

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

*Ministère de l'Enseignement supérieur
et de la Recherche Scientifique*



UNIVERSITE DE BOUMERDES



**FACULTE DES SCIENCES DE
L'INGENIEUR**

DEPARTEMENT GENIE CIVIL

OPTION : GEOTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDE MASTER

**ETUDE DES PARAMETRES INFLUANT SUR
LA PORTANCE DE SOL NON SATURE
(INDICE C.B.R)**

Réalisé par :

- Belarbi Narimene
- Nadjia asma

Encadreur :

Mr. Basbas

Promoteur :

Mr. Kerfouf hamid

2016/2017

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents.

Ma grande mère.

Mon frère, Mes sœurs.

Mes neveux, Mes nièces.

Mon futur mari.

Mes copines.

Ma copine Narimene qui a partagé avec moi les bons et les mauvais moments durant mes études.

Tous les étudiants de ma promotion et à tous les personnes que j'aime.

ASMA

Je dédie ce travaille

A mes très chers parents qui n'ont pas cessé de me soutenir et me donner le meilleur d'eux même tout au long de ma formation

A mes sœurs,

A toute La famille Belarbi, et La famille bensadi

A mon fiancé

A mes amies

A ma copine Asma

A toute la promotion MGO

NARIMENE

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier et en premier lieu le Dieu le tout puissant
et miséricordieux qui nous a donné la force, la volonté
et le courage à mener à bonne fin ce travail.

Nous remercions nos très chers parents pour les efforts qu'ils nous offrent tout
au long de nos études.

Nous adressons nos plus vifs remerciements et notre profonde reconnaissance à
notre encadreur Mr BASBAS et les techniciens de laboratoire Géotechnique
du CCTP Mr H.BOUMAICH et Mr MAZAACH Mm S. HAJIAJ pour
dévouement, leurs conseils et leur soutien moral. Ils n'ont jamais ménagé aucun
effort pour suivre cette étude de près durant tout au long de l'élaboration de ce
modeste travail.

Nos remerciements vont également, notre promoteur Mr H .KARFOUF

Nos vifs remerciements, vont aux membres de jury ; D'avoir accepté
D'examiner, d'évaluer et d'enrichir ce travail

Merci beaucoup à tous d'avoir contribué à la réalisation de ce travail.

Résumé

L'Algérie vit une révolution dans le domaine de la construction et la réalisation des ouvrages en terre. L'opération de compactage des sols en place et des sols reconstitués est couramment utilisée sur les chantiers de génie civil et de travaux publics.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de l'étude du comportement des sols fins compactés à l'état non saturé, le protocole expérimental convenu pour ce travail comprend des essais, notamment CBR, réalisables au laboratoire sur des éprouvettes qui visent de compacter deux matériaux différents (sable, argile) à différentes teneurs en eau et pour différentes densités dans le but de déterminer la portance du sol ainsi que la mesure de succion avec la méthode de papier filtre.

La problématique dans ce mémoire est d'étudier les paramètres influant sur la portance, telle que la teneur en eau, la densité et la succion.

Mots clés : CBR, succion, la portance du sol, compactage, sol non saturé.

Table des matières

REMERCIEMENTS.

DEDICACES.

LISTE DES TABLEAUX.

LISTE DES FIGURES.

LISTE DES NOTATIONS.

RESUME.

INTRODUCTION GENERALE.....1

Chapitre I : LES NOTIONS DE COMPACTAGE

I.1	Introduction :	Erreur ! Signet non défini.
I.2	Définition de compactage :.....	Erreur ! Signet non défini.
I.3	Classification des sols en vue du compactage :	Erreur ! Signet non défini.
I.3.1	Groupe I : Enrochements	Erreur ! Signet non défini.
I.3.2	Groupe II : sables et graviers	Erreur ! Signet non défini.
I.3.3	Groupe III : limons, sols siliceux	Erreur ! Signet non défini.
I.3.4	Groupe IV : Argiles	Erreur ! Signet non défini.
I.4	Objectif du compactage :	Erreur ! Signet non défini.
I.4.1	Diminution des tassements :	Erreur ! Signet non défini.
I.4.1.1	Constatation banale des tassements	Erreur ! Signet non défini.
I.4.1.2	Suppression des tassements :	Erreur ! Signet non défini.
I.4.1.3	Suppression des tassements différentiels :	Erreur ! Signet non défini.
I.4.2	Elévation des caractéristiques mécaniques :	Erreur ! Signet non défini.
I.4.2.1	Augmentation de la cohésion C et de l'angle de frottement interne : ..	Erreur ! Signet non défini.
I.4.2.2	Augmentation du module de déformation :	Erreur ! Signet non défini.
I.5	Théorie de compactage :	Erreur ! Signet non défini.
I.5.1	les facteurs qui influencent le compactage :	Erreur ! Signet non défini.
I.5.1.1	Energie de compactage :	Erreur ! Signet non défini.
I.5.1.2	Résistance à la pénétration des terres saturées :	Erreur ! Signet non défini.

1.5.1.3	Nature du sol :	Erreur ! Signet non défini.
1.5.1.4	Teneur en eau :	Erreur ! Signet non défini.
1.5.1.5	Teneur en eau des matériaux fins :	Erreur ! Signet non défini.
1.5.2	Propriétés des courbes de compactage :	Erreur ! Signet non défini.
1.5.3	Teneur En Eau Optimale :	Erreur ! Signet non défini.
1.5.4	Teneur en eau de mise en place des terres :	Erreur ! Signet non défini.
I.6	CONCLUSION :	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre II : La Portance Du Sol

II.1	Introduction :	Erreur ! Signet non défini.
II.2	Définition de La portance du sol :	Erreur ! Signet non défini.
II.3	Les facteurs qui influent sur la portance du sol :	Erreur ! Signet non défini.
II.3.1	Humidité du sol :	Erreur ! Signet non défini.
II.3.2	Type de sol :	Erreur ! Signet non défini.
II.3.3	Structure du sol :	Erreur ! Signet non défini.
II.4	L'essai CBR :	Erreur ! Signet non défini.
II.4.1	Principe d'essai :	Erreur ! Signet non défini.
II.4.2	Type d'essais :	Erreur ! Signet non défini.
II.5	Des essais in-situ pour la détermination de la portance du sol :	Erreur ! Signet non défini.
II.5.1	Essai de plaque :	Erreur ! Signet non défini.
II.5.1.1	Le module EV2 :	Erreur ! Signet non défini.
II.5.1.2	Le but d l'essai de plaque :	Erreur ! Signet non défini.
II.5.1.3	Principe de l'essai de plaque :	Erreur ! Signet non défini.
II.5.2	Essai Standard Penetration Test (SPT) :	Erreur ! Signet non défini.
II.5.3	Essai pénétromètre dynamique (DPT) :	Erreur ! Signet non défini.
II.5.4	Essai pénétromètre statique (cpt) :	Erreur ! Signet non défini.
II.6	Conclusion :	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre III : LA SUCCION DANS LES SOLS NON SATURE

III.1	Introduction	Erreur ! Signet non défini.
III.2	Sols non saturés	Erreur ! Signet non défini.
III.2.1	Etat des connaissances sur les sols non saturés.....	Erreur ! Signet non défini.

III.3	La succion.....	Erreur ! Signet non défini.
III.4	Les différents types de la succion.....	Erreur ! Signet non défini.
III.4.1	Succion matricielle	Erreur ! Signet non défini.
III.4.1.1	La succion capillaire	Erreur ! Signet non défini.
III.4.1.2	Succion d'adsorption	Erreur ! Signet non défini.
III.4.2	Succion osmotique	Erreur ! Signet non défini.
III.4.3	Succion totale	Erreur ! Signet non défini.
III.5	Techniques de mesure et de contrôle de la succion	Erreur ! Signet non défini.
III.5.1	Techniques de mesure de la succion	Erreur ! Signet non défini.
III.5.1.1	Tensiomètre.....	Erreur ! Signet non défini.
III.5.1.2	Plaque de succion.....	Erreur ! Signet non défini.
III.5.1.3	Méthode psychrométrique.....	Erreur ! Signet non défini.
III.5.1.4	Méthode du papier filtre.....	Erreur ! Signet non défini.
III.5.2	Techniques de contrôle de la succion.....	Erreur ! Signet non défini.
III.5.2.1	Méthode de la surpression d'air	Erreur ! Signet non défini.
III.5.2.2	Méthode Osmotique	Erreur ! Signet non défini.
III.5.2.3	Dessiccateur à vide (Méthode à pression vapeur).....	Erreur ! Signet non défini.
III.6	Relation teneur en eau-succion (courbe de rétention d'eau)	Erreur ! Signet non défini.
III.7	Conclusion	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre IV: PROGRAMME EXPERIMENTAL

IV.1	Introduction :	Erreur ! Signet non défini.
IV.2	Les essais d'identification de sol :	Erreur ! Signet non défini.
IV.2.1	Limites d'Atterberg :	Erreur ! Signet non défini.
IV.2.1.1	La limite de liquidité WL :	Erreur ! Signet non défini.
IV.2.1.2	Détermination de limite de plasticité :	Erreur ! Signet non défini.
IV.2.2	Granulométrie :	Erreur ! Signet non défini.
IV.2.3	Sédimentomètre :	Erreur ! Signet non défini.
IV.2.4	Equivalent de sable :	Erreur ! Signet non défini.
IV.2.5	Essai au bleu de méthylène :	Erreur ! Signet non défini.
IV.3	Les essais mecanique :	Erreur ! Signet non défini.

IV.3.1	Essais proctor :	Erreur ! Signet non défini.
IV.3.1.1	Les essais de portance	Erreur ! Signet non défini.
IV.3.2	l'essai IPI (Indice CBR Immédiat) :	Erreur ! Signet non défini.
IV.3.3	Essai de mesure de succion avec la méthode du papier filtre :	Erreur ! Signet non défini.
IV.4	Conclusion :	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre V : PRESENTATION DES RESULTATS

V.1	Introduction.....	Erreur ! Signet non défini.
V.2	Identification des sols étudiés.....	Erreur ! Signet non défini.
V.2.1	Identification du premier matériau (argile):	Erreur ! Signet non défini.
V.2.1.1	Analyse granulométrique (NF.P.94-056) :	Erreur ! Signet non défini.
V.2.1.2	Les limites d'Atterberg de matériau 01 (NF 94-051):.....	Erreur ! Signet non défini.
V.2.1.3	Détermination de la valeur au bleu :	Erreur ! Signet non défini.
V.2.1.4	Synthèse des résultats d'identification de matériaux 01: ...	Erreur ! Signet non défini.
V.2.2	Identification du deuxième matériau (sable):	Erreur ! Signet non défini.
V.2.2.1	Analyse granulométrique de matériau 02 (NF P-056) :	Erreur ! Signet non défini.
V.2.2.2	Equivalent de sable matériau (N.A 455) :	Erreur ! Signet non défini.
V.2.2.3	Détermination de la valeur au bleu :	Erreur ! Signet non défini.
V.2.2.1	Synthèse des résultats d'identification de matériaux 02: ...	Erreur ! Signet non défini.
V.3	Résultats de mesure	Erreur ! Signet non défini.
V.3.1	Essai de mesure de succion des Sols :	Erreur ! Signet non défini.
V.3.1.1	Détermination de l'allure de courbe de succion :	Erreur ! Signet non défini.
V.3.2	Essai de portance (Caractérisation pour des éprouvettes destinées aux essais CBR immédiat)	Erreur ! Signet non défini.
V.3.2.1	Teneur en eau constante :	Erreur ! Signet non défini.
V.3.3	Superposition de la courbe de rétention avec la courbe de l'indice cbr en fonction de la teneur eau volumique :	Erreur ! Signet non défini.
V.4	Conclusion	Erreur ! Signet non défini.

CONCLUSION GENERALE

ANNEXE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Liste des tableaux

Tableau. IV. 1.Classification proposée par Dakshanamurthy et Raman (1973)(cité par AZZOUZ F-Z,2006).....	38
Tableau. IV. 2.Classement des matériaux suivant leur diamètre (Source : LNTPB) (cité par randrianandrasana A-P, 2005).....	40
Tableau. V. 1.Analyse granulométrique du matériau 01.....	51
Tableau. V. 2.Analyse granulométrique par sédimentométrie du 1er matériau.....	51
Tableau. V. 3: Limite de liquidité matériau 01	53
Tableau. V. 4:limite de plasticité matériau 01	54
Tableau. V. 5: Synthèse des différents résultats d'identification de matériau 01.....	55
Tableau. V. 6: Analyse granulométrique du matériau 02.....	55
Tableau. V. 7 : Résultats de l'essai d'équivalent de sable	56
Tableau. V. 8: Résultats de l'essai de la valeur au bleu.....	57
Tableau. V. 9: Synthèse des différents résultats d'identification de matériau 02.....	57
Pour clarifier cette tâche du programme expérimental, en présentant dans le Tableau. V. 10, les différents résultats trouvés lors la mesure de succion. A partir de la teneur en eau du papier filtre, on trouve la succion à l'aide de la projection sur la Courbe d'étalonnage de papier filtre utilisé (Wathman 42). On résume nos résultats dans le tableau suivant :	58
Tableau. V. 11: Résultats de mesure de succion et la teneur en eau du le papier filtre (1er matériau).....	58
Tableau. V. 12 Les points expérimentaux mesurés du 1er matériau.....	59
Tableau. V. 13: Résultats de mesure de succion et la teneur en eau du papier filtre (matériau 02).....	61
Tableau. V. 14: Les points expérimentaux mesurés (matériau 02).....	62
Tableau. V. 15.récapitulatif des essais cbr selon la teneur en eau et les densités sèche (matériau 01)	64
Tableau. V. 16:Récapitulatif des essais IPI pour des différentes densités sèches (matériau 02)	66
Tableau. V. 17: Récapitulatif des essais CBR à des différentes teneurs en eau.....	67
Tableau. V. 18:Récapitulatif des essais cbr des différentes teneurs en eau (sable)	68

Liste des tableaux

Tableau. IV. 1.Classification proposée par Dakshanamurthy et Raman (1973)(cité par AZZOUZ F-Z,2006).....	38
Tableau. IV. 2.Classement des matériaux suivant leur diamètre (Source : LNTPB) (cité par randrianandrasana A-P, 2005).....	40
Tableau. V. 1.Analyse granulométrique du matériau 01.....	51
Tableau. V. 2.Analyse granulométrique par sédimentométrie du 1er matériau.....	51
Tableau. V. 3: Limite de liquidité matériau 01	53
Tableau. V. 4:limite de plasticité matériau 01	54
Tableau. V. 5: Synthèse des différents résultats d'identification de matériau 01.....	55
Tableau. V. 6: Analyse granulométrique du matériau 02.....	55
Tableau. V. 7 : Résultats de l'essai d'équivalent de sable	56
Tableau. V. 8: Résultats de l'essai de la valeur au bleu.....	57
Tableau. V. 9: Synthèse des différents résultats d'identification de matériau 02.....	57
Pour clarifier cette tâche du programme expérimental, en présentant dans le Tableau. V. 10, les différents résultats trouvés lors la mesure de succion. A partir de la teneur en eau du papier filtre, on trouve la succion à l'aide de la projection sur la Courbe d'étalonnage de papier filtre utilisé (Wathman 42). On résume nos résultats dans le tableau suivant :	58
Tableau. V. 11: Résultats de mesure de succion et la teneur en eau du le papier filtre (1er matériau).....	58
Tableau. V. 12 Les points expérimentaux mesurés du 1er matériau.....	59
Tableau. V. 13: Résultats de mesure de succion et la teneur en eau du papier filtre (matériau 02).....	61
Tableau. V. 14: Les points expérimentaux mesurés (matériau 02).....	62
Tableau. V. 15.récapitulatif des essais cbr selon la teneur en eau et les densités sèche (matériau 01)	64
Tableau. V. 16:Récapitulatif des essais IPI pour des différentes densités sèches (matériau 02)	66
Tableau. V. 17: Récapitulatif des essais CBR à des différentes teneurs en eau.....	67
Tableau. V. 18:Récapitulatif des essais cbr des différentes teneurs en eau (sable)	68

LISTE DES FIGURES

Figure. I. 1. Influence de l'énergie de compactage (J.LEREAU, 2006).....	7
Figure. I. 2. Influence de la nature du sol sur le compactage (J.LEREAU, 2006)	9
Figure. I. 3. courbe de compactage (H.VARLET, 1966)	10
Figure. I. 4. courbe de compactage (disposition théorique) (H.VARLET, 1966).....	11
Figure. I. 5. courbe de compactage (aspect réel) (P.I.DELLIYOU.2000)	11
Figure. I. 6. variation de γ_d en fonction de ω_{opt} (H.VARLET 1966).....	12
Figure. I. 7. comportement des courbes inférieures d'un remblai (H.VARLET 1966).....	13
Figure.III. 1. sol humide et non saturé (M.Callaud 2004).....	22
Figure.III. 2. Les trois états des sols non saturé (Worth and Houlsby, 1985).....	23
figure.III. 3. (a) principe de la plaque tensiométrique , (b) plaque tensiométrique (Cui et Delage(2000)).....	26
figure.III. 4. effet Peltier et effet seebeck.....	27
figure.III. 5. Méthode du papier-filtre (DELAGE et All)	28
figure.III. 6. courbe de rétention - phénomène d'hystérésis	33
Figure.III. 7 : les courbe de rétention pour différents types de sols	34
Figure. IV. 1. Préparation de l'échantillon	36
Figure. IV. 2. Réalisation de la rainure dans la pate de sol au moyen d'un outil spécial	37
Figure. IV. 3. colonne de tamis	39
Figure. IV. 4. déroulement de l'essai de l'équivalent de sable.....	41
Figure. IV. 5. manipulation de l'essai de bleu	42
Figure. IV. 6. Ordre de grandeur (Type de sol en fonction de la valeur VBS) (Léreau 2005: INSA-Institut National Des Sciences Appliquées De Toulouse).....	42
Figure. IV. 7. Préparation de l'échantillon à compacter	43
Figure. IV. 8 Réalisation de l'essai Proctor	45
Figure. IV. 9 des moules CBR préparer pour passer au poinçonnement	46
Figure. IV. 10. Appareille CBR (laboratoire CTPP).....	46
Figure. IV. 11. Réalisation de l'essai de succion.....	47
Figure. IV. 12. Courbe d'étalonnage du papier filtre (ASTM D5298)	47
Figure V. 1: prélèvement des deux matériaux (a. Sable, b. Argile)	50
Figure V. 2: Courbe granulométrique matériau 01 (donner par le logiciel sol test)	52
Figure V. 3: courbe de tendance de la teneur en eau en fonction de nombre de choc	53

Figure V. 4: Courbe granulométrique matériau 01(Donner par le logiciel sol test).....	56
Figure V. 5:Papier filtre whatman 42.....	58
Figure V. 6: Les différentes courbe de rétention selon la nature de sol (thèse doctorat, étude de la rétention d'eau et de la consolidation des sols dans un cadre thermo-hydro-mécanique)....	60
Figure V. 7 Position de la courbe de succion de l'argile par rapport aux autres types de sol et détermination de son allure	60
Figure V. 8:Allure de la succion de sable fin et limitation de différente phases (VANAPALLI S.K, et AL .2002)	61
Figure V. 9: Positionnement de la courbe de succion de sable par rapport aux autres types de sol et détermination de son allure.....	62
Figure V. 10:Allure de succion du matériau 2 (sable)	63
Figure V. 11:Variation de l'indice CBR Immédiat en fonction de la densité sèche pour 3 différente teneur en eau (argile)	65
Figure V. 12: variation de l'indice CBR immédiat pour différentes densité (sable)	66
Figure V. 13: variation de I _{cbr} pour différentes teneurs en eau (argile).....	68
Figure V. 14: variation de l'indice cbr en fonction de la teneur en eau (sable)	69
Figure V. 15. Superposition de la courbe de succion(sable) et la courbe de l'indice cbr en fonction de la teneur en eau volumique	70
Figure V. 16. Superposition de la courbe de succion et la courbe de l'indice cbr en fonction de la teneur en eau volumique argile	71

LISTE DES NOTATIONS

C : Cohésion.

Cbr : Californien Bearing Ration.

Cc : coefficient de compressibilité.

CPT : Essai pénétromètre statique.

CTTP : organisme national de contrôle technique des travaux publics.

C_U : coefficient d'uniformité.

DPT : Essai pénétromètre dynamique

E : Module de Young.

γ_d : densité volumique sèche.

GTR : guide des terrassements routiers

I_p : l'indice plasticité.

IPI : L'indice Portant Immédiat .

MO : la teneur pondérale de matières organiques.

OPN : optimum Proctor modifié.

SPT: Essai Standard Pénétration Test.

T_s: tension de surface.

u_a : Pression de l'air.

u_w: Pression de l'eau.

VBS : valeur de bleu d un sol

W_l : La limite de liquidité.

W_p : limite de plasticité.

θ : teneur en eau volumique.

π : succion osmotique.

φ : Angle de frottement.

Ψ : La succion totale.

Ψ_m : succion capillaire.

ω : la teneur en eau.

ω_{opt} : teneur en eau qui correspond à l'optimum Proctor.

INTRODUCTION GENERALE

Le sol compacté est largement utilisé dans la construction des ouvrages en terre. La réalisation des grands ouvrages, comme les remblais routiers, requiert des volumes importants de matériaux. De ce fait, il est souvent nécessaire, pour réaliser un ouvrage d'une certaine ampleur, d'utiliser des matériaux d'origines différentes, présentant des caractéristiques mécaniques et des comportements différents.

Les remblais en sols argileux ou marneux sont fréquemment exposés à des problèmes spécifiques liés au comportement particulier de ces matériaux. Ils sont souvent le siège de déformations irréversibles, ce qui présente un risque d'instabilité pour l'ouvrage (affaissements, fissures ou même rupture) et par conséquent pour l'utilisateur. Ces déformations sont liées essentiellement aux faibles portances.

Le comportement des corps de remblai appartient à l'un des domaines les plus mal connus de l'ingénieur, dans le cadre global des sols non saturés. Par ailleurs, le dimensionnement de ce type d'ouvrages se fait le plus souvent par rapport à la rupture et rarement par rapport à l'évolution des déformations, alors que les problèmes posés par les corps de remblai sont essentiellement liés aux déformations. L'influence des caractéristiques mécaniques des sols, constitue un élément majeur dans la conception et le dimensionnement des ouvrages en terre et les chaussées, notamment les remblais en sols compactés et sur la portance plus particulièrement.

Ce travail présente une étude paramétrique des paramètres influant sur la portance telle que la teneur en eau, la densité et la succion.

Le présent travail est structuré en cinq chapitres :

- ✓ Le premier chapitre est consacré au contexte général de l'étude : le compactage, objectif de compactage, les facteurs influençant le compactage, et la classification des sols en vue du compactage.
- ✓ Le deuxième chapitre représente brièvement la portance du sol, l'influence des différents paramètres sur la portance comme l'humidité du sol, le type de sol, la structure du sol et quelques essais dans le but de déterminer la portance.
- ✓ Le troisième chapitre est consacré aux propriétés des sols non saturés. Nous aborderons notamment la notion de la succion, quelques techniques de mesures et les propriétés de rétention des sols ou la courbe de succion.
- ✓ Le quatrième chapitre expose les matériaux et les essais réalisés, la méthodologie adoptée pour mener plusieurs essais (essai CBR, succion).
- ✓ Le dernier chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des différentes mesures réalisées.

Une conclusion générale est donnée à la fin du mémoire, elle rassemble les points importants issus de ce travail.

Chapitre I :

LES NOTIONS DE COMPACTAGE

I.1 Introduction :

Dans le génie civil on peut distinguer deux principaux domaines d'application du compactage :

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

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

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

Des nombreuses méthodes ont été développées, pour stabiliser ou traiter les sols faibles. Ce travail s'intéresse tout particulièrement à la méthode de stabilisation par compactage. (D.IALY RADIO et M. TERKI HASSAINE, 1990).

I.2 Définition de compactage :

Compacter un sol, un remblai, une plate-forme, une couche de forme, un corps de chaussée, un noyau de barrage en terre, c'est réduire le volume des interstices de ces divers matériaux, et le compactage consiste surtout à produire un meilleur arrangement des grains en les uns sur les autres. (G ARQUIE et G. MOREL, 1988)

le sol acquière (BIAREZ, 1974)

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

I.3 Classification des sols en vue du compactage :**I.3.1 Groupe I : Enrochements**

Des essais de force portante sur des enrochements non compactés, comparés à des essais sur des enrochements vibrés ont indiqué que la capacité portante est multipliée par dix, dans certains cas par un compactage efficace. Le module d'élasticité d'enrochements peut atteindre 800 – 1600 kg/cm² au premier cycle de chargement et 1600 – 3200 kg/cm² aux cycles suivants de chargement.

Les tassements mesurés dans des enrochements de bonne qualité bien compactés se sont révélés très faibles. (G. ARQUIE.G.MOREL, 1988).

I.3.2 Groupe II : sables et graviers

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

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

I.3.3 Groupe III : limons, sols siliceux

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

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

I.3.4 Groupe IV : Argiles

Une argile, à sa teneur en eau optimale, réclame un effort de compactage important. Les machines qui sont utilisées doivent exercer des forces de compression et de cisaillement relativement importantes sur le matériau. Avec tous les types de compacteurs, le compactage doit être réalisé en couches d'une épaisseur plus faible que dans le cas des sols non cohérents. Deux solutions, principalement, sont envisageables pour le compactage par vibrations de tels matériaux cohérents. Dans certains cas, des rouleaux vibrants lourds à bille lisse ont donné de bons résultats. L'autre possibilité est d'utiliser des rouleaux à pieds de moutons ou à pieds dameurs. (G. ARQUIE et G. MOREL, 1988)

I.4 Objectif du compactage :

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

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

I.4.1 Diminution des tassements :**I.4.1.1 Constatation banale des tassements**

C'est un fait d'expérience courante qu'un remblai constitué sans précautions, tasse sous l'effet de son propre poids, soit des charges permanentes qu'il supporte, soit des surcharges qui roulent sur lui. Or ce tassement n'est que la traduction d'une diminution de volumes des matériaux, diminution qui est le résultat d'un compactage spontané et lent qui réduit le volume des interstices du sol constituant le remblai de la tranchée.

I.4.1.2 Suppression des tassements :

Le premier objectif que va donc poursuivre l'ingénieur, c'est de substituer à ce compactage lent, qui conduit dans le temps à des désordres, une opération volontaire effectuée avant mise en service de l'ouvrage, et qui met le matériau dans un état suffisamment serré pour qu'un resserrement ultérieur soit impossible ou peu probable. A la limite, si cette opération volontaire réduisait le volume des interstices à 0, tout tassement serait évidemment rigoureusement impossible. Mais pour éviter, en pratique, que le matériau tasse, il n'est pas nécessaire, d'atteindre un tel état, du reste totalement utopique ; nous verrons qu'une densification modérée est suffisante.

I.4.1.3 Suppression des tassements différentiels :

Très souvent l'ingénieur cherche moins à supprimer tout tassement, qu'à éviter que ce tassement s'accompagne de déformations.

En effet, lorsqu'il se produit, un tassement est rarement constant d'un bout à l'autre du profil en long et du profil en travers de l'ouvrage ; ne serait-ce que parce que le remblai n'est pas de hauteur égale. Ce sont donc les tassements différentiels qui sont les plus dommageables.

Or, il est évident que si l'on diminue fortement, par le compactage, les tassements absolus, on réduira beaucoup plus les tassements différentiels qui ne sont, en général, que de l'ordre de grandeur du 10^e des premiers.

Cette dernière affirmation est évidemment inexacte si le tassement différentiel est égal au tassement absolu, car une partie tasse et que l'autre est indéformable. Le cas le plus frappant est celui de remblai adjacent.

I.4.2 Elévation des caractéristiques mécaniques :

Le resserrement des grains du matériau a un effet très important : les caractéristiques mécaniques sont fortement améliorées et les conditions de résistance au cisaillement deviendront plus importantes.

I.4.2.1 Augmentation de la cohésion C et de l'angle de frottement interne :

La courbe intrinsèque des sols est caractérisée par deux paramètres, l'ordonnée à l'origine ou cohésion c et l'angle φ que fait la droite intrinsèque avec l'axe des contraintes normales.

Grace au compactage, les grains sont plus serrés, les ménisques d'eau vont avoir plus d'efficacité et autre part, les phénomènes de surface jouent davantage.

Quelle que soit la valeur de ce raisonnement la cohésion est constatée bien augmenter par le compactage.

I.4.2.2 Augmentation du module de déformation :

L'intuition montre clairement que lorsque le volume des interstices d'un sol est important, le sol sera plus déformable que lorsque la réussite à refermer ces interstices. C'est bien ce qui est constaté : le compactage augmente considérablement les modules de déformation.

Selon (G. ARQUIE et G. MOREL, 1988), cette augmentation est utilisée pour contrôler le compactage par cet effet. Elle se traduit aussi par une augmentation de la portance.

I.5 Théorie de compactage :

D'après (H.VARLET, 1966), on conçoit théoriquement, tout au moins, qu'il puisse exister deux structures limites entre lesquelles se situent toutes les autres :

- ✓ L'une où, l'imbrication étant poussée au maximum, les vides entre les particules sont réduits au minimum ; corrélativement la densité apparente passe par sa plus grande valeur ; on dit alors que le sol atteint sa compacité maximale.
- ✓ L'autre où le squelette prend la disposition la plus relâchée que les grains puissent former en gardant contact entre eux avec une certaine stabilité ; la terre atteint, dans ce cas le foisonnement maximal. La densité apparente est, par contre, minimale.

Entre ces deux structures limites, la terre possède un squelette plus ou moins foisonné.

En pratique, la terre sortant de fouille ou de carrière, meuble et légère, présente son foisonnement le plus élevé. Par roulage, pilonnage et arrosage, on augmente sa compacité : c'est le compactage.

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

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

- ✓ En mettant en jeu des forces capables de vaincre les frottements entre particules : ce sont les forces de compactage.
- ✓ En sélectionnant les terres de manière à obtenir, au besoin par des mélanges, une granulométrie qui favorise le logement des petites particules entre les grosses et assure ainsi une meilleure compacité.
- ✓ En lubrifiant les terres, par une addition d'eau appropriée ; ainsi est facilité le glissement des particules les unes sur les autres.

I.5.1 les facteurs qui influencent le compactage :

A partir de 1930, il est devenu nécessaire de mieux comprendre le phénomène de compactage et son influence sur les propriétés du sol afin de mieux contrôler le compactage et de développer les engins de compactage. C'est à l'ingénieur américain R.PROCTOR (1933) que l'on doit les premières études.

I.5.1.1 Energie de compactage :

Plus l'énergie de compactage est grande, plus la densité sèche maximale est grande: on obtient une meilleure imbrication des particules de terre, d'où une meilleure résistance au cisaillement et une étanchéité accrue. Pour des énergies de compactage de plus en plus grandes en prenant les terres avec leur teneur en eau optimale, qui donne un éventail de droite qui montre que la cohésion c et l'angle de frottement interne ϕ augmentent avec l'énergie de compactage.

La figure 1 illustre, pour un sol constitué de limon argileux, l'influence de l'énergie de compactage sur les densités atteintes en relation avec la variation de la teneur en eau.

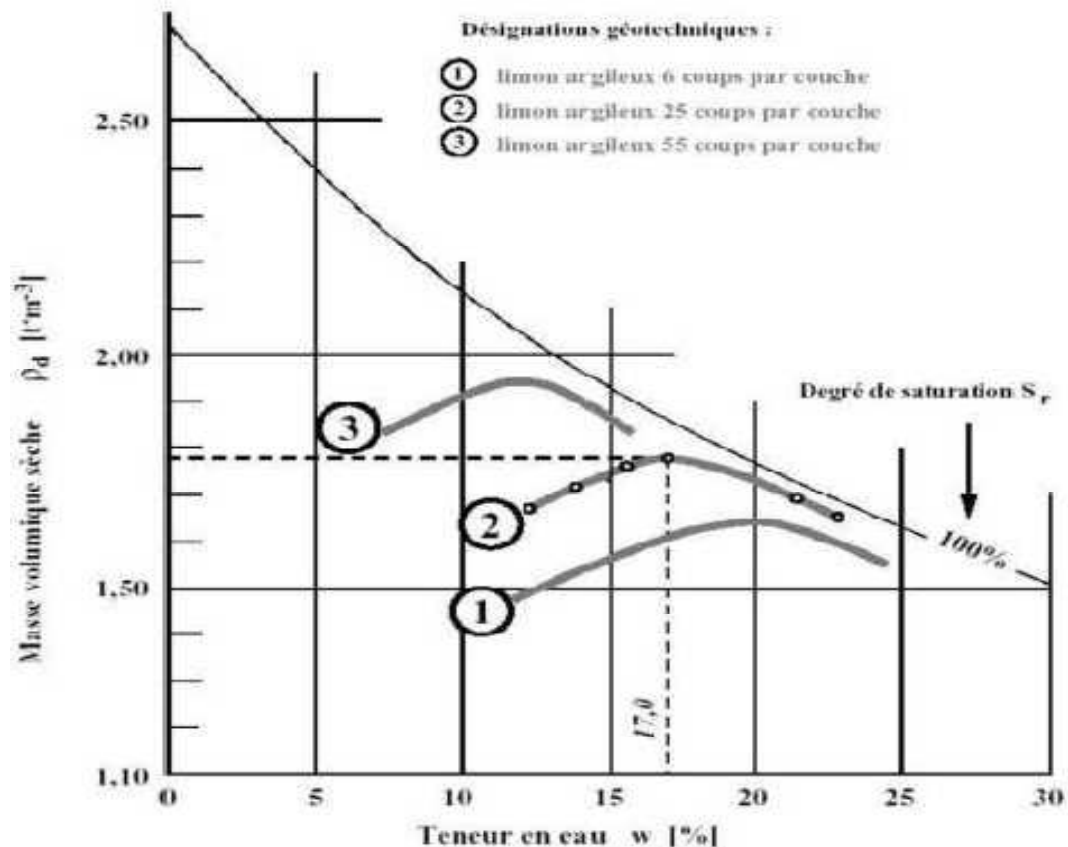


Figure. I. 1. Influence de l'énergie de compactage (J.LEREAU, 2006)

L'analyse de la figure offre des informations complémentaires à savoir :

- ✓ Une augmentation de l'énergie de compactage à gauche de l'optimum Proctor de teneur en eau conduit à une augmentation de la résistance.

- ✓ Une augmentation de l'énergie de compactage à droite de l'optimum Proctor de teneur en eau peut entraîner un gain ou une perte de résistance.
- ✓ Pour une même énergie de compactage et une même densité, le compactage du côté sec donne une résistance plus élevée que le côté humide.

I.5.1.2 Résistance à la pénétration des terres saturées :

Pour le compactage des terres sur un chantier de barrage, il faut pouvoir, à chaque instant, vérifier que la teneur en eau (donnée ou complétée par arrosage) est bien celle que les essais de laboratoire ont indiqué d'adopter. Or, la détermination de la teneur en eau ne se fait pas directement qu'en prenant un échantillon de terre, de poids connu, qui soumet à dessiccation complète et qu'on pèse ensuite. C'est une mesure délicate et longue qui relève du laboratoire. Proctor a trouvé un moyen plus pratique, et très expéditif, basé sur une propriété remarquable de la résistance à la pénétration des terres saturées.

I.5.1.3 Nature du sol :

L'allure des courbes de compactage varie avec la nature du sol, très aplatie pour une argile plastique. Lorsque la courbe est très aplatie. Le compactage est influencé par la teneur en eau. Les matériaux de genre sont les meilleurs pour les remblais.

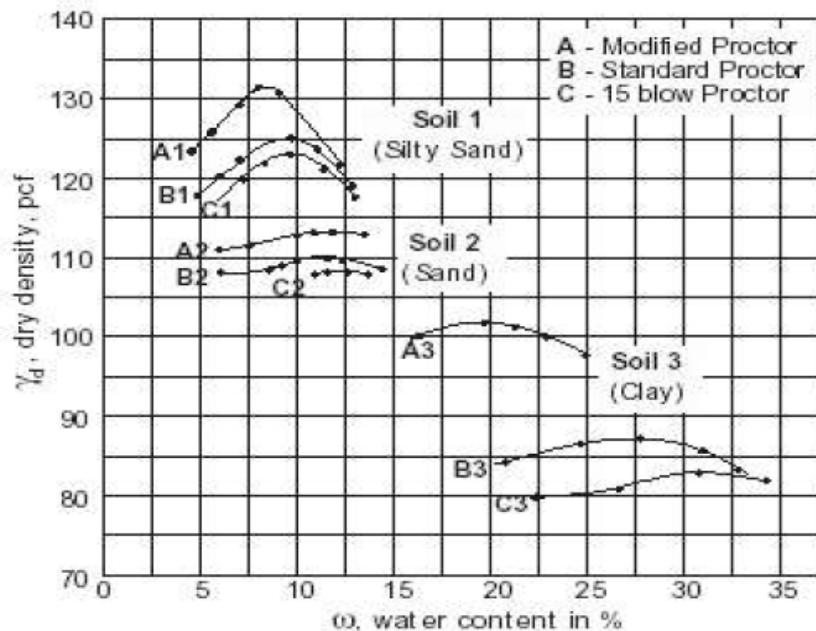


Figure. I. 2. Influence de la nature du sol sur le compactage (J.LERAU, 2006)

I.5.1.4 Teneur en eau :

La teneur en eau joue un rôle important dans la conduite du compactage et suivant sa valeur, on obtient des résultats plus ou moins satisfaisants pour une même dépense d'énergie. Lors d'un essai de compactage, si l'on fait varier la teneur en eau de l'échantillon et que l'on

représente graphiquement la variation du poids volumique sec γ_d en fonction de la teneur en eau ω , on obtient une courbe en cloche. Cette influence peut être expliquée par l'effet d'attraction des forces capillaires qui constitue une résistance au réarrangement des grains. Pour étudier comment la teneur en eau influe sur le compactage d'une terre, Proctor a imaginé de procéder au tassement mécanique d'un échantillon, toujours de même façon, en modifiant seulement le degré d'humidité. . Ayant tamisé, puis disposé la terre par couches égales dans un cylindre de dimensions bien définies, il tasse chaque couche à l'aide d'un pilon, toujours de même poids, tombant toujours de la même hauteur, un même nombre de fois n . En faisant varier la teneur en eau.

En particulier si, sur un graphique (fig. I. 3), on porte en ordonnées les valeurs de la densité apparente d et en abscisses les valeurs de la teneur en eau ω on obtient, pour un nombre déterminé n de corps de pilon, une courbe de compactage passant par un maximum, dont l'abscisse est ω_{opt} .

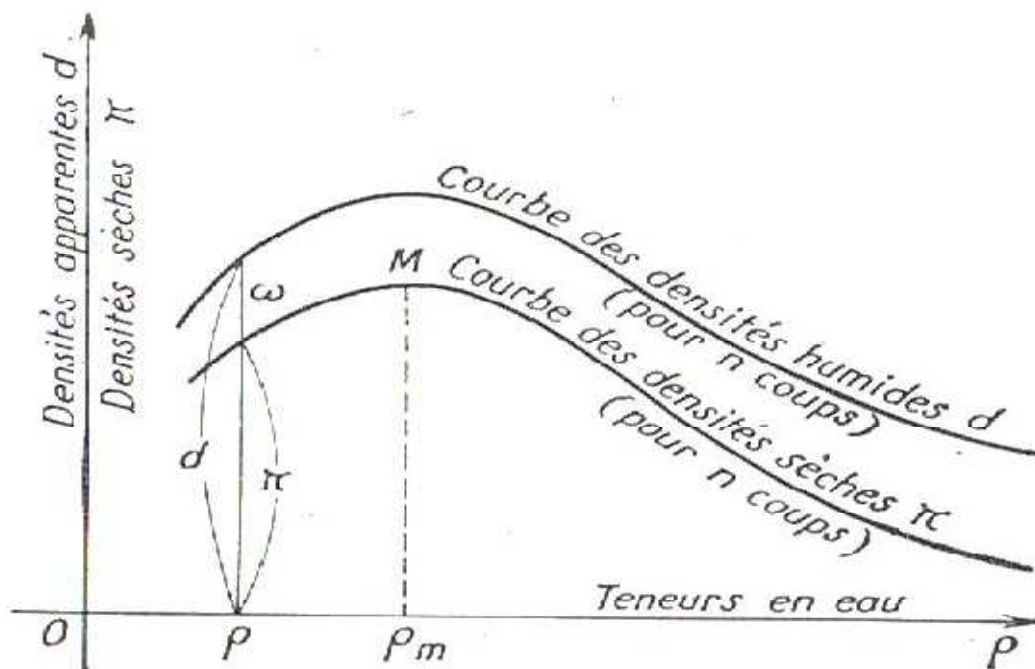


Figure. I. 3.courbe de compactage (H.VARLET, 1966)

I.5.1.5 Teneur en eau des matériaux fins :

Il convient que les matériaux d'emprunt aient une teneur en eau proche de celle de l'optimum Proctor normal. Mais, avant même de connaître cette valeur, on peut indiquer que lorsque les teneurs en eau sont inférieures à 10 ou supérieures à 40, les matériaux ont des caractéristiques médiocres et il peut être délicat de les utiliser comme emprunts

I.5.2 Propriétés des courbes de compactage :

Partons d'un sol absolument sec dans la nature, les terres possèdent, au départ, une certaine teneur en eau, de structure bien déterminée, caractérisée par une densité γ_{do} ; l'ajout de l'eau permettra de suivre les propriétés de la courbe de compactage.

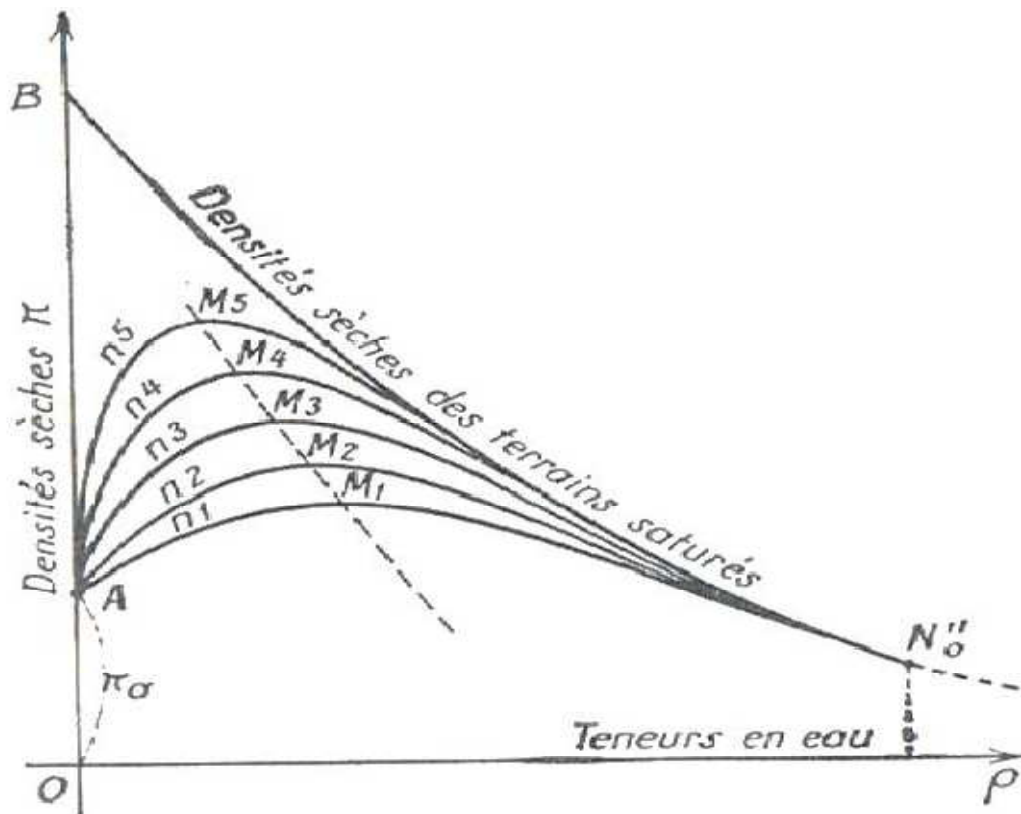


Figure. I. 4.courbe de compactage (disposition théorique) (H.VARLET, 1966)

Toute courbe de compactage, obtenue avec une même énergie de compactage partira du point A (γ_{d0}), d'après les essais de Proctor, que la courbe passera d'abord par un maximum M, puis ira en décroissant. Or, dans sa partie descendante elle ne pourra que venir se raccorder à la courbe des densités sèches de saturation, puisqu'on augmentant la teneur en eau on atteint fatalement cet état limite. Il en résulte que toutes les courbes de compactage partiront d'un même point A, auront un maximum M, d'autant plus élevé évidemment que l'énergie de compactage sera plus forte, et admettront une même branche descendante (courbe des densités sèches de saturation) pour les fortes teneurs en eau.

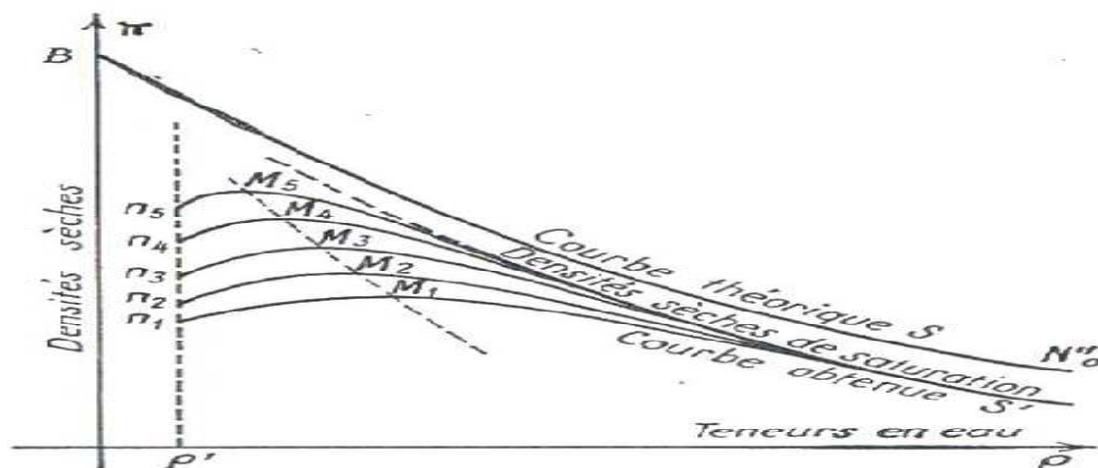
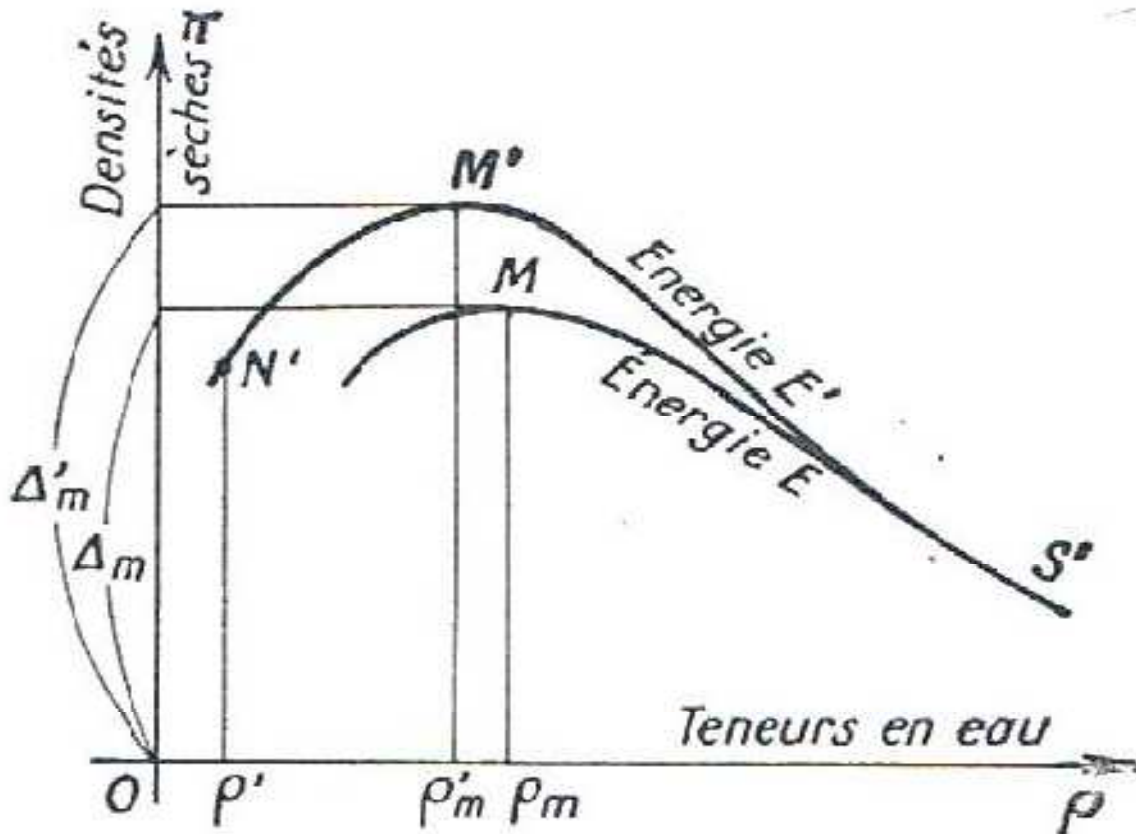


Figure. I. 5.courbe de compactage (aspect réel) (P.I.DELLIYOU.2000)

I.5.3 Teneur En Eau Optimale :

Chaque courbe de compactage passe en M par un maximum de densité sèche $\gamma_d \max$, pour une teneur en eau $\gamma_{d\max}$ que déterminent les essais.

**. I. 6.variation de γ_d en fonction de ω_{opm} (H.VARLET 1966)**

Les spécifications concernant le compactage des remblais sont établies à partir des essais Proctor normal réalisés à partir des résultats des zones d'emprunt. On exige en général que la densité sèche des matériaux compactés soit supérieure à 97% de la densité sèche des matériaux compactés soit supérieur qui correspond à la teneur en eau optimale obtenue lors de l'essai Proctor normal. Pour cela, on tolère habituellement un écart de plus ou moins 2 points sur la teneur en eau par rapport à celle de l'OPN.

I.5.4 Teneur en eau de mise en place des terres :

Considérons une terre qui vient d'être mise en place dans une des couches inférieures d'un barrage en construction. Soit N2 son point représentatif après compactage (fig. I.7). Supposons le place sur la branche descendante S' commune aux courbes de compactage. Par la suite d'autre couches de terres vont venir couvrir la terre étudiée .la charge va donc croître pendant la construction et lentement la terre va subir un tassement complémentaire .le volume des vides diminuera et l'eau interstitielle, pourra les occuper tous : autrement dit, la terre se saturera et son point représentatif et ira en montant, de N2 en N3, pour atteindre la courbe S saturation.

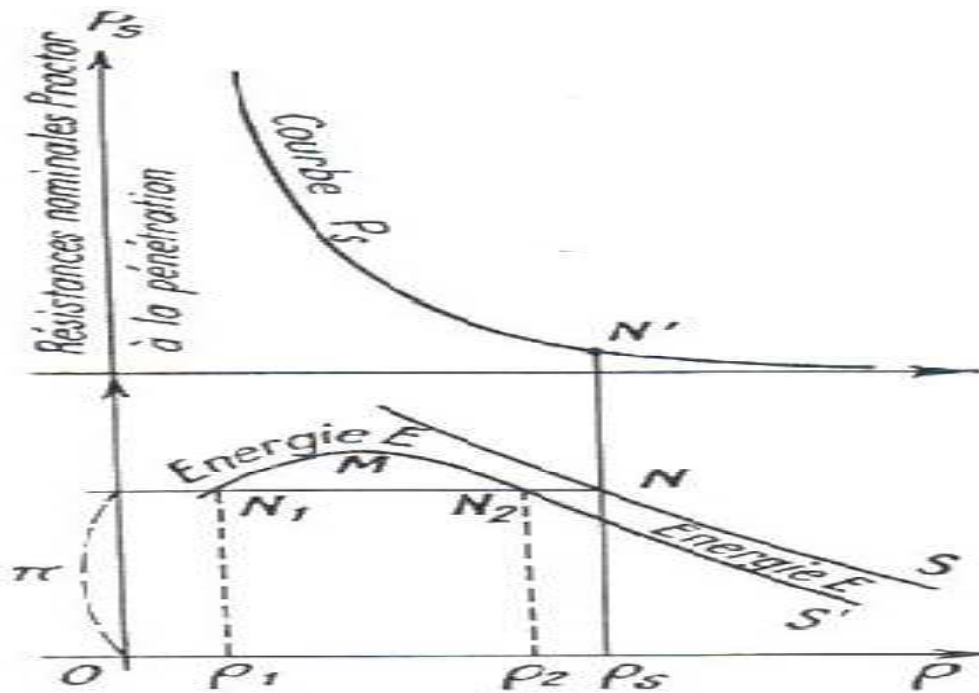


Figure. I. 7.comportement des courbes inférieures d'un remblai (H.VARLET 1966)

Si l'on continue d'ajouter de nouvelles couches de terre sur le barrage, le point représentatif N ne pourra plus se déplacer qu'en. Remontant la courbe S, jusqu'en N4 par exemple. Mais entre N3 et N4 nous aurons chargé une terre saturée d'eau et nous assisterons au phénomène de la consolidation : la teneur en eau doit, en particulier, tomber de la valeur p_2 à la valeur p_4 , ce qui n'est possible qu'après une expulsion d'eau correspondante. Cette expulsion demandera, comme on sait, un temps pendant lequel l'eau interstitielle sera mise en surpression p et la résistance au cisaillement diminuée, ainsi que le rappelle la relation :

$$S = C + (n - p) \cdot \tan \varphi$$

Finalement l'état N4 ne sera atteint que quand la consolidation de la terre sera terminée et ceci nécessitera parfois de nombreux mois après la fin des travaux.

Pour éviter cette circonstance, une solution peut être dégagée.

Menons l'horizontale passant par le point N4 : elle coupe la courbe S'en G. Dans l'état G, la structure de la terre est la même qu'en N4 et, en particulier, la résistance nominale à la pénétration est identique (valeur P_s). Or, pour aboutir en G pendant la construction, sous la charge croissante des terres, il suffit de partir du point D situé, à l'aplomb de G, sur l'horizontale du point N2. Ainsi pour obtenir une même structure finale, avec même densité sèche et même résistance P_s , tout en évitant les dangers des états transitoires de la consolidation, il est indiqué d'adopter le point D plutôt que le point N2.

Le lieu du point D donne une courbe dite courbe limite de consolidation. Au moment de la mise en place des couches de terre, on devra adopter une teneur en eau qui, après compactage, donne un point représentatif situé à gauche ou au plus sur cette courbe. En fait, on prendra ce

point sur la courbe même, car on a besoin de la plus forte teneur en possible pour faciliter le compactage.

I.6 CONCLUSION :

Cette contribution bibliographique a mis en évidence l'ensemble des aspects liés au compactage des sols, objectif de compactage, l'influence de plusieurs paramètres comme énergie de compactage, nature de sol et la teneur en eau, ainsi la classification des sols en vue du compactage.

Chapitre II :

LA PORTANCE DU SOL

II.1 Introduction :

La capacité portante d'un sol est la contrainte que peut reprendre le sol avant rupture par cisaillement. Plusieurs méthodes issues d'essais permettent de la déterminer. Une fois calculée, il faut procéder à une vérification cette capacité portante sous action statique dans un premier temps puis sous actions sismiques si il y'a lieu dans un second temps.

II.2 Définition de La portance du sol :

La portance d'un sol est la caractéristique qui définit sa capacité à supporter les charges qui Lui sont appliquées.

La portance dépend de la nature du sol, du pourcentage d'eau et du degré de compactage. Quel que soit le sol, sa résistance mécanique augmente avec sa densité en faisant passer plusieurs fois des engins lourds qui assurent le compactage.

II.3 Les facteurs qui influent sur la portance du sol :**II.3.1 Humidité du sol :**

Plus le sol est humide, plus sa portance est faible et plus la pression exercée pénètre profondément dans le sol. Le risque de compactage du sous-sol augmente.

II.3.2 Type de sol :

Les sols lourds (argileux) sont plus sensibles au tassement que les sols sablonneux légers.

II.3.3 Structure du sol :

Une bonne structure du sol se caractérise par des agrégats résistants à l'eau, agrégés par les organismes du sol. Ils sont formés par les organismes vivant dans le sol qui se nourrissent entre autres de sécrétions racinaires, de résidus de récoltes et d'engrais organiques. Le travail ameublir beaucoup le sol et affaiblit la structure .une bonne stabilité structurale du sol prévient le compactage.

II.4 L'essai CBR :

La portance du sol est sa résistance à la rupture déterminée par l'essai CBR, le Californien Bearing Ration (norme NF P 94-078).Cet essai donne une mesure de la portance relative des sols par rapport a un sol type de référence. Il permet d'observer le comportement du matériau vis-à-vis sa densification ainsi qu'une idée de sa résistance à l'eau.

L'indice de portance CBR immergé (I_{CBR} après 4 jours d'immersion), et indice portant immédiat IPI, se calculent ainsi par le rapport entre la pression d'enfoncement du sol et celle d'un matériau type référence (en %) :

$$\frac{\text{effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement(en kn)}}{13,35} \times 100$$

$$\frac{\text{effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement(en kn)}}{19,93} \times 100$$

L'indice recherché est par convention la plus grande de ces deux valeurs.

II.4.1 Principe d'essai :

L'essai consiste à poinçonner l'échantillon de matériau compacté par pénétration d'un poinçon cylindrique à vitesse constante (1,27 mm/min). On relève les valeurs des forces correspondant à des enfoncements de 2,5 et 5mm. On rapporte ces valeurs à celles obtenues sur un matériau de référence pour en déduire la valeur de l'indice portant recherché.

II.4.2 Type d'essais :

- ✓ **L'indice Portant Immédiat (IPI) :** mesure la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à sa teneur en eau naturelle ou dans la plage de teneur en eau dans lequel il est susceptible d'évoluer. Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins en phase chantier. Le matériau est compacté à l'énergie proctor normal dans le cas d'un sol et à l'énergie proctor modifier dans le cas d'un matériau d'assise de chaussée.
- ✓ **L'essai CBR immédiat (I.CBR immédiat) :** mesure la résistance au poinçonnement d'un sol compacté généralement à l'énergie proctor modifier à sa teneur en eau à l'optimum proctor (w_{opt}). En plus, dans la mesure où le matériau est support ou constituant d'une structure de chaussée, l'éprouvette de sol testé sera surchargée en tête par des disques annulaires représentant l'équivalent de la contrainte imposée par la chaussée sur la plate-forme.
- ✓ **L'essai CBR après immersion (I.CBR immersion) :** mesure de la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à différentes teneurs en eau puis immergé pendant plusieurs jours (4 en général).

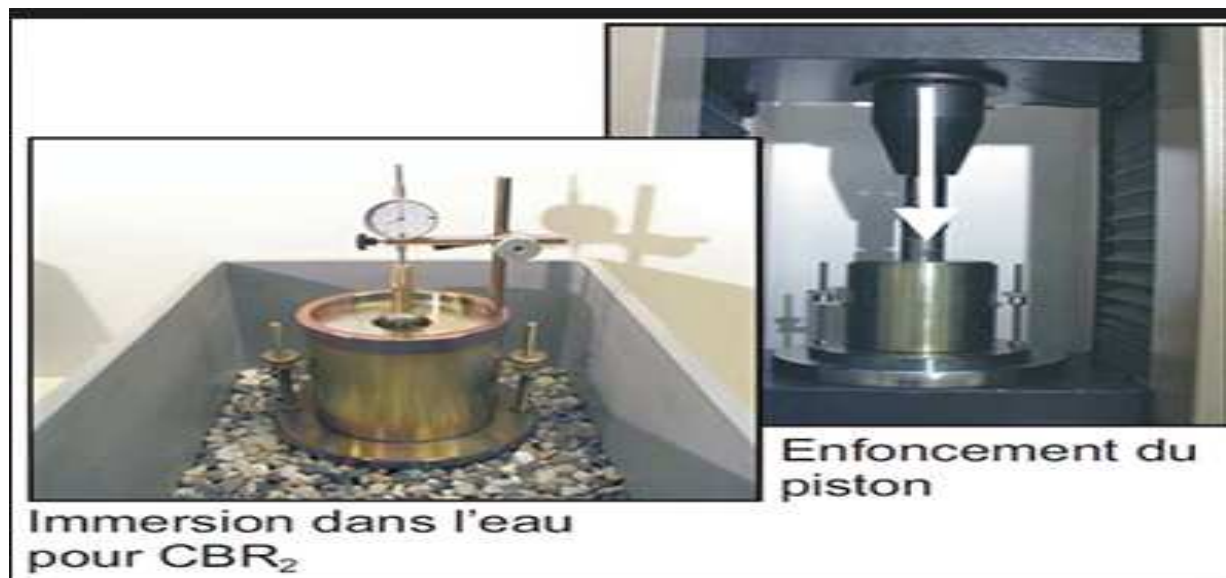


Figure. II. 1. Essai CBR (California bearing ratio)

II.5 Des essais in-situ pour la détermination de la portance du sol :

II.5.1 Essai de plaque :

La plaque dynamique légère est un essai de portance dynamique par une masse tombante. Il permet de déterminer le module de déformation dynamique E_{V2} du sol et d'en déduire le module E_{V2} .

II.5.1.1 Le module E_{V2} :

La mesure à la plaque du module E_{V2} donne la portance du support et indique si le compactage est correct. Cela permet de vérifier si les objectifs de performance mécanique prévus sont atteints.

II.5.1.2 Le but de l'essai de plaque :

- ✓ Détermination du module de déformation E_{V2} .
- ✓ Contrôle de la portance (plates-formes, fonds de fouille, remblais ...).
- ✓ Contrôle de compactage en couche par couche (tranchées, remblais, ...).

II.5.1.3 Principe de l'essai de plaque :

- ✓ L'essai consiste à mesurer l'enfoncement du point central de la plaque de charge à la suite de trois impacts.
- ✓ L'impulsion est exercée par une force maximale de 7,07 kN sur une plaque de 30 cm de diamètre.
- ✓ Le déplacement sous la plaque est mesuré par un accéléromètre.



Figure. II. 2.essai de plaque

II.5.2 Essai Standard Penetration Test (SPT) :

L'essai consiste à mesurer le nombre de coups nécessaire à l'enfoncement sur 30cm d'un carottier. L'essai s'applique aux sols pulvérulents (grenus).

L'appareillage est composé d'un équipement de forage, un dispositif de battage, un train de tiges, un carottier ($\varnothing=3,5\text{cm}$) et d'un système de mesure pour compter le nombre de coups de mouton. Le mouton a une masse de 63,5kg et une hauteur de chute de 0,76m, il tombe à une cadence de battage de 15 à 30 coups/mn.

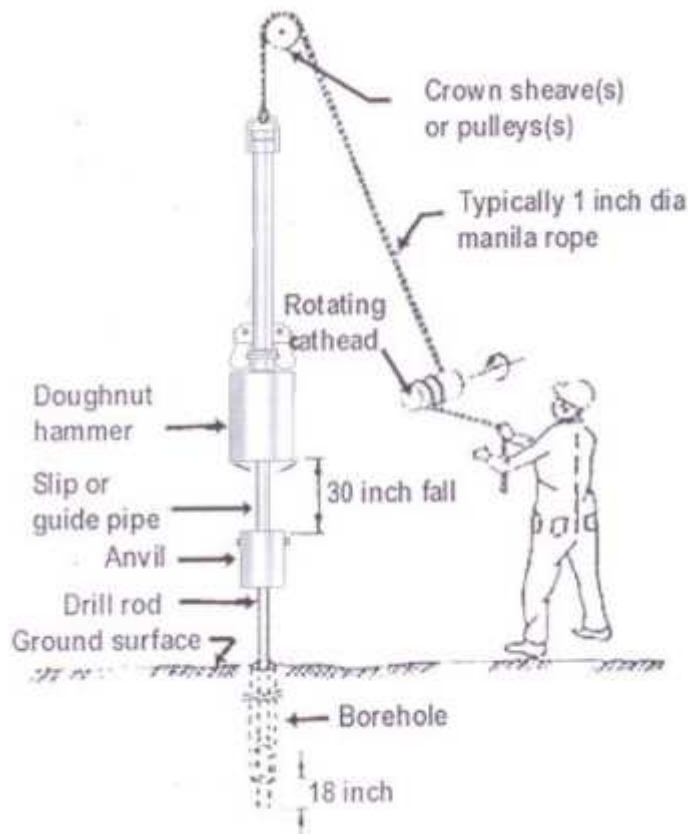


Figure. II. 3.principe de l'essai SPT

II.5.3 Essai pénétromètre dynamique (DPT) :

L'essai consiste à battre des trains de tiges de faible $\varnothing$ finissant par une pointe conique dans le sol à l'aide d'un mouton de masse (M) tombant d'une hauteur fixe (H) et de mesurer le nombre de coups (N_d) nécessaire pour faire pénétrer la pointe sur une profondeur (h).

Il existe quatre types d'essai DPT selon la taille du cône et l'énergie de battage :

- ✓ Essai DPL ou pénétration dynamique légère.
- ✓ Essai DPM ou pénétration dynamique moyenne.
- ✓ Essai DPH ou pénétration dynamique lourde.
- ✓ Essai DPSH ou pénétration dynamique lourde.

- ✓ Essai DPSH ou pénétration dynamique.

L'essai DPT est recommandé pour une investigation dans un sol pulvérulent.

Domaine d'utilisation :

- ✓ Zoner un site en phase de reconnaissance.
- ✓ Définir le toit d'un substratum rocheux.
- ✓ Etudier les sites peu résistant (sol tourbeux) ou il n'est pas possible d'utiliser des essais lourds (cpt.).
- ✓ Etudier la pénétrabilité des pieux et palplanches.

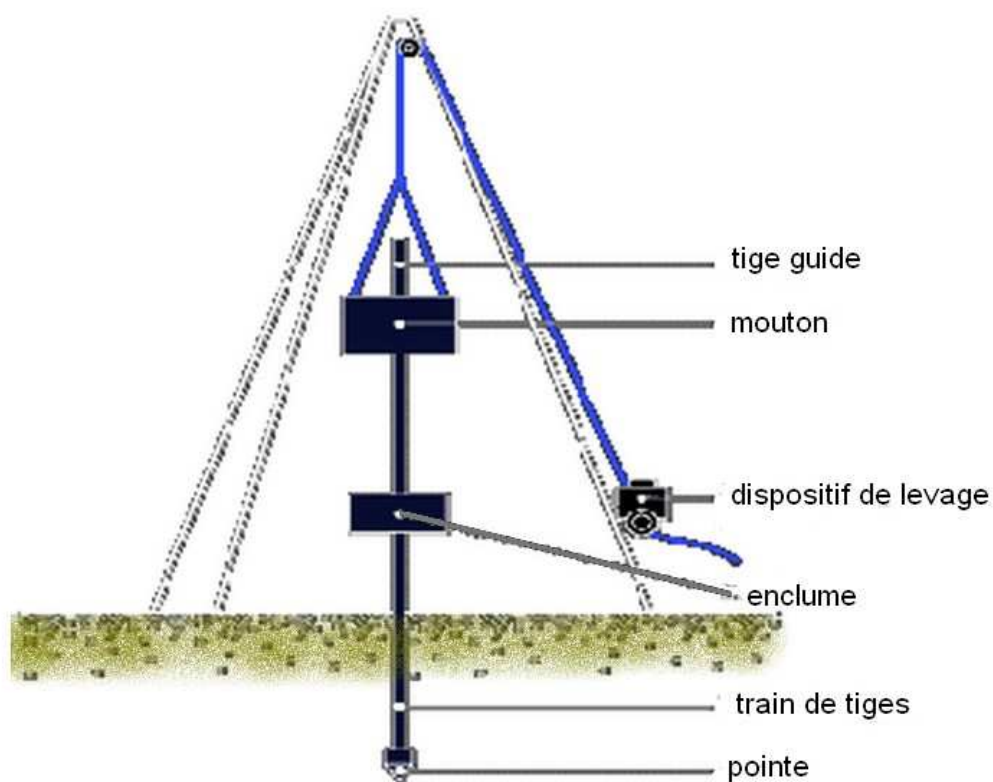


Figure. II. 4.Principe de l'essai DPT

II.5.4 Essai pénétromètre statique (cpt) :

L'essai consiste à enfoncer une tige de 30-100mm de diamètre finissant par une pointe conique dans le sol avec une vitesse constante de 20mm/s et mesurer l'effort.

Lors de l'enfoncement on mesure :

- ✓ L'effort de pointe Q_p .
- ✓ L'effort total de pénétration Q_t des tiges + point.
- ✓ L'effort de frottement latéral sur les tiges $Q_f = Q_t - Q_p$.

- ✓ Le rapport $\frac{Q_f}{Q_s} \times 100$.

On distingue 2 catégories d'appareils :

- ✓ Pénétromètre à cône fixe (solidaire de la tige). ainsi on mesure simultanément Q_p et Q_f .
- ✓ Pénétromètre à cône mobile : cône peut s'enfoncer seul Q_p est mesuré après que l'ensemble (tige+pointe) descend après Q_t est mesuré.

II.6 Conclusion :

Cette partie de travail définit la portance du sol, l'influence des différents paramètres sur la portance comme l'humidité du sol, type de sol et la structure du sol, ainsi les essais in-situ (Essai CBR) et au laboratoire (Essai de plaque, Spt, Cpt, Dpt) pour déterminer sa résistance à la rupture.

Le but d'étudier la portance du sol c'est le dimensionnement d'une superstructure de la chaussée.

Chapitre III :

LA SUCCION DANS LES SOLS NON SATURE

III.1 Introduction

Dans le domaine de la mécanique des sols, la succion est utilisée de plus en plus pour l'étude des sols non saturés. La connaissance de la succion dans un sol non saturé a de multiples intérêts. En effet, la succion conditionne les mouvements et l'équilibre de l'eau dans la zone non saturée. En outre, elle influence fortement le comportement mécanique des sols. Il est donc indispensable de pouvoir mesurer la succion lorsqu'un sol est en état non saturé.

Pour mieux maîtriser l'influence de la succion sur le comportement hydromécanique des sols, il y a un intérêt considérable à savoir contrôler ou imposer la succion dans les essais géotechniques dans la détermination de la courbe de rétention.

III.2 Sols non saturés

L'hypothèse qui consiste à considérer que le sol se trouve soit dans un état sec, soit dans un état saturé, néglige l'effet de la succion qui se développe au sein d'un sol non saturé et qui conditionne largement son comportement mécanique.

Le domaine des sols non saturés couvre:

- soit des ouvrages réalisés par compactage tels que les remblais, les digues, les barrages en terre et les barrières géologiques d'étanchéité de centre de stockage de déchets.
- soit des sols naturels dans les régions arides à semi arides et même dans des régions tempérées où les couches de surface sont très souvent non saturées (figure I.1)

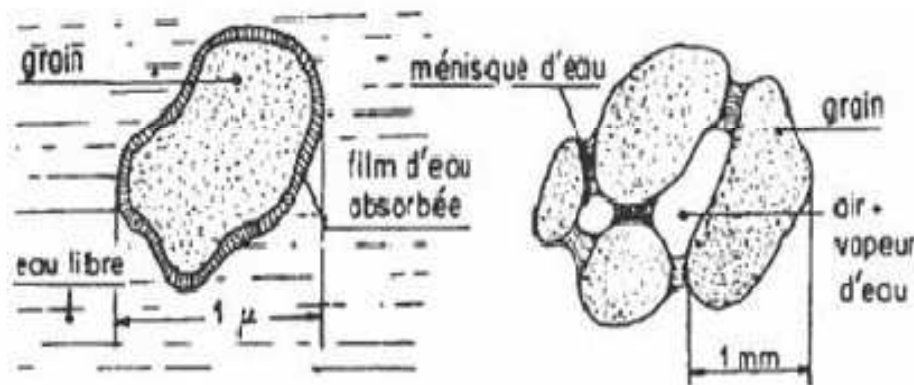


Figure.III. 1.sol humide et non saturé (M.Callaud 2004)

Fredlund et Rahardjo (1993), proposent d'ajouter à ces trois phases, un autre système qui présente des propriétés physiques différentes des autres notamment par le pouvoir d'exercer une tension superficielle (Tensile pull). Il s'agit de l'interface eau – air (Contractile skin). Le comportement mécanique des sols non saturés est ainsi régi par l'interaction entre ces différentes phases. (Cité par CHIKHI K., 2011)

III.2.1 Etat des connaissances sur les sols non saturés

Dans les sols non saturés coexistent trois phases et l'on observe en général que l'eau « mouille » la surface des particules, c'est à dire la recouvre tandis que l'air est plutôt situé au milieu des pores (figure I.2). Suivant le degré de saturation du sol, nous distinguons trois modes d'interaction entre les phases (Worth & Houlsby, 1985):

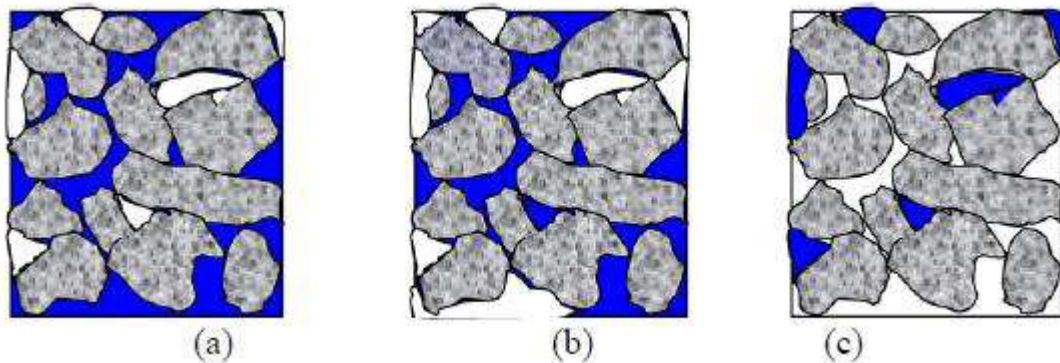


Figure.III. 2. Les trois états des sols non saturé (Worth and Houlsby, 1985)

- ✓ **Sol quasi saturé** : la phase liquide est continue et l'eau peut circuler sous l'influence de la pesanteur. La phase gazeuse est discontinue et ne se déplace pas de façon autonome. Les sols sont « quasi saturés » pour des degrés de saturation supérieurs à 85 % (Figure I.2a).
- ✓ **Sol a la saturation d'équilibre** : la phase liquide est encore continue mais l'eau ne peut plus se déplacer sous la seule influence de la pesanteur. La phase gazeuse est également continue, mais ne circule pas en général (Figure I.2-b).
- ✓ **Sol faiblement saturé** : l'eau entoure les particules et occupe des volumes discontinus à leurs points de contact sous forme de ménisque. La phase liquide est toujours continue par l'intermédiaire des pellicules d'eau adsorbée mais ne se déplace que très lentement. La phase gazeuse est continue, mais généralement immobile. L'évaporation de l'eau à l'intérieur des pores du sol peut devenir un phénomène important (Figure 1.2-c). (Cité par LACHGUER K. ,2007)

III.3 La succion

Le terme succion ou potentiel de l'eau, désigne l'état intégrant de tension qui tient en Compte tous les effets de surface capable de retenir l'eau à l'intérieur de la structure de sol.

Plusieurs définitions ont été données à la succion :

- ✓ Pour Bligh (1965), l'effet de la succion dans un sol non saturé est équivalent à une pression extérieure appliquée.
- ✓ O'Neill et Poormoayed (1980), ont défini la succion comme la tension exercée par le sol sur l'eau, laquelle est responsable de la rétention de l'eau dans le sol.
- ✓ Schreiner (1987), a défini la succion totale comme la pression négative exercée sur l'eau du sol de manière qu'un plan d'eau pure soit en équilibre avec l'eau du sol à travers une membrane semi perméable
- ✓ La succion d'un sol peut être décrite par l'affinité du sol pour l'eau. Plus le sol est sec, plus la succion est importante (Chen 1988).

III.4 Les différents types de la succion

Richards (1974) (Blatz J.A.et al.2008) a énuméré trois composantes de succion dans les sols non saturés, à savoir, la succion matricielle, adsorption dans le cas des minéraux argileux, et la succion osmotique.

III.4.1 Succion matricielle

La succion matricielle exprime la capacité de rétention d'eau de composants du sol, elle est dépendante des propriétés capillaires du milieu et des propriétés d'adsorption développées par les particules d'un sol. Elle est généralement considérée comme la composante dominante de la succion totale dans le cas des sols non-plastique.

III.4.1.1 La succion capillaire

Plus généralement, Lorsqu'un liquide et un gaz sont en contact, l'interface entre les deux phases est le siège d'une tension de surface T_s . Cette propriété permet d'expliquer le phénomène d'ascension capillaire. C'est la différence entre pressions de l'air et de l'eau ou la pression capillaire, qui est le paramètre déterminant des mouvements de fluides dans les milieux poreux. Cette différence de pression se traduit par l'existence d'un ménisque entre l'air et l'eau. Elle est caractérisée par la loi de Jurin .elle est noté Ψ_m

$$\Psi_m = u_a - u_w = \frac{2T_s \cos \alpha}{r} \quad (1)$$

Cette définition a été généralisée à n'importe quel état de contrainte mécanique. Aujourd'hui, en Mécanique des Sols, les deux notions de pression capillaire et de succion sont équivalentes.

III.4.1.2 Succion d'adsorption

Dans les sols fins non saturés, contrairement aux sols grenus, l'action d'attraction de l'eau par le sol n'est pas seulement due à la capillarité, mais aussi aux actions d'adsorption physico-chimique car les argiles sont des particules chargées négativement, et de ce fait, ont tendance à adsorber de l'eau à leur surface Selon Masekanya J-P. 2008 les forces mises en jeu sont :

- ✓ La liaison hydrogène entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène
- ✓ Les hydroxydes situés à la surface des feuillets argileux
- ✓ L'eau nécessaire à l'hydratation des cations attirés par les défauts de charge du feuillet
- ✓ L'eau attirée par l'attraction osmotique créée par la concentration de cations au voisinage du feuillet
- ✓ L'attraction électrique du pôle positif du dipôle que forme la molécule d'eau
- ✓ Les forces d'attraction de Van der Waals

III.4.2 Succion osmotique

La succion osmotique ou pression osmotique est la capacité de rétention d'eau par les sels présents sous forme dissoute dans l'eau interstitielle. Elle existe lorsque l'eau est une solution saline. Si la concentration de sel est faible, ou dans le cas de sable qui ne contient généralement pas de sels cette composante peut être négligée et la succion totale se réduit à la succion matricielle.

La succion osmotique π est identique à la pression osmotique. Elle est créée par la force liée à la répulsion osmotique lorsque des sels solubles sont présents dans l'eau. Elle dépend de leur concentration. On a :

$$\pi = -\frac{\rho_w RT}{\omega_w} \ln x_w \quad (2)$$

Avec :

R : la constante des gaz parfaits ($R=8,31432 \text{ J/ (mol K)}$)

T : la température absolue ($^{\circ}\text{K}$)

ρ_w : la masse volumique de l'eau (kg/m^3)

ω_w : la masse molaire de la vapeur d'eau (18.016 kg/kmol)

x_w : la fraction molaire d'eau dans la solution

Houston et al .1994 (cité par alshihabi O, 2002) confirment que la succion osmotique diminue quand le degré de saturation augmente.

En géotechnique elle n'est en général pas pris en compte, car son influence serait négligeable (Fredlund et Rahardjo 1993 ; Delage 1991).

III.4.3 Succion totale

La succion totale du sol peut être vue comme la somme de deux composantes principales : la succion matricielle et la succion osmotique (Aitchison, 1965, cité par MEKKI L ,2009)

- La succion matricielle Ψ_m qui est liée au phénomène de capillarité et d'adsorption
- La succion osmotique π

On peut ainsi écrire :

$$\Psi = \Psi_m + \pi \quad (3)$$

III.5 Techniques de mesure et de contrôle de la succion

III.5.1 Techniques de mesure de la succion

Actuellement, il existe plusieurs méthodes pour mesurer la succion dans un sol. La succion totale peut être déterminée par mesure de la pression de vapeur ou de l'humidité relative à l'aide de la méthode psychrométrique ainsi que par la méthode du papier filtre. La succion matricielle peut être obtenue directement ou indirectement. Pour la mesure directe, on dispose du tensiomètre et de la plaque de succion. Pour la mesure indirecte, on dispose de la méthode du papier filtre.

III.5.1.1 Tensiomètre

Par définition, la succion matricielle est donnée par:

$$S = u_a - u_w \quad (4)$$

Lorsque la pression d'air est égale à la pression atmosphérique prise comme référence, on a :

$$S = -u_w \quad \text{avec } u_w < 0 \quad (5)$$

Le tensiomètre est destiné à mesurer cette pression négative de l'eau directement dans le sol. C'est une technique essentiellement utilisée *in situ*. Le tensiomètre est constitué par un

petit réservoir d'eau désaérée dont une extrémité est recouverte par une couche de céramique poreuse imperméable à l'air, mais perméable à l'eau, afin d'empêcher le passage d'air. Il est connecté à un manomètre via un tube rempli d'eau désaérée. Pour mesurer la pression négative du sol, on introduit le tensiomètre dans un trou foré préalablement dans le sol ou l'échantillon (Figure III.3a). Lorsque l'eau du réservoir est en équilibre avec celle du sol, la pression négative du tensiomètre, mesurée par le manomètre, fournit directement la pression négative de l'eau du sol.

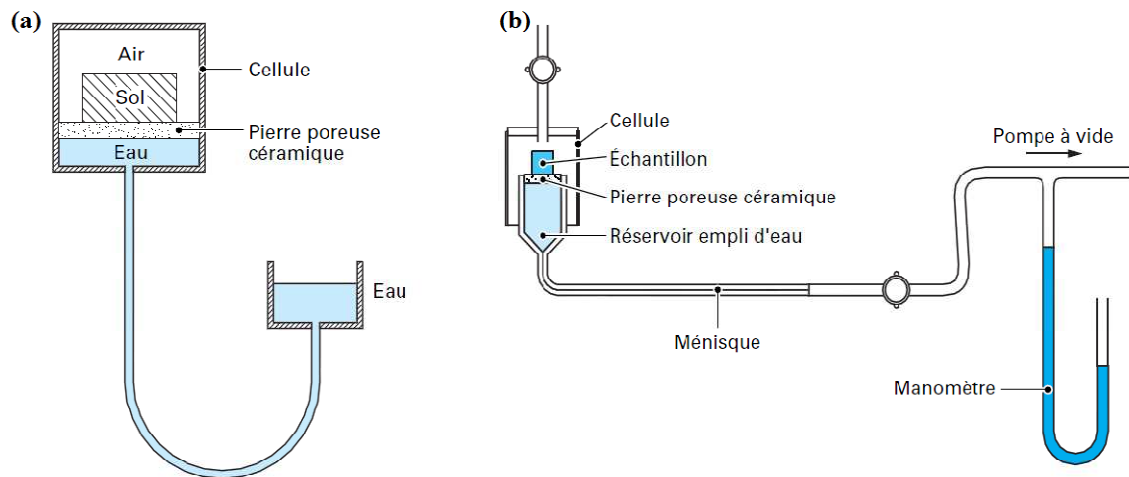


figure.III. 3. (a) principe de la plaque tensiométrique , (b) plaque tensiométrique (Cui et Delage(2000))

Cette méthode est limitée à une succion maximale de l'ordre de 500 kPa à cause de la cavitation. En pratique, le tensiomètre doit être placé dans une éprouvette ou dans le sol préalablement foré. Donc, il est nécessaire d'assurer à tout moment un bon contact entre le sol et le réservoir d'eau, au travers de la céramique poreuse, afin d'assurer une continuité de la phase d'eau entre le réservoir et le sol, et cela malgré le retrait éventuel du sol.

III.5.1.2 Plaque de succion

Le principe de la plaque de succion est le même que celui du tensiomètre; elle sert aussi à mesurer la pression négative de l'eau d'un sol dont l'air est à la pression atmosphérique. Par contre, cette technique est essentiellement utilisée en laboratoire. (La Figure III.3 (b)) représente une coupe schématique de cet appareil. Cette méthode est également limitée à une succion maximale de l'ordre de 500 kPa.

III.5.1.3 Méthode psychrométrique

III.5.1.3.1 Principe de la méthode psychrométrique

La méthode psychrométrique est basée sur l'équation de Kelvin

$$u_a - u_w = \frac{RT}{gM} \ln H \quad (6)$$

qui décrit la relation entre, d'une part, l'humidité relative de la phase gazeuse au voisinage d'une interface gaz-eau et, d'autre part, la succion totale Ψ_t . C'est une

mesure de l'humidité relative au moyen d'un thermocouple (Verbrugge, 1978) qui repose sur l'effet Peltier et l'effet Seebeck décrits brièvement ci-dessous (Fredlund, 1993) :

Effet Peltier : Lorsqu'un courant électrique passe dans un circuit fait de deux métaux différents, une des jonctions va être chauffée, et l'autre refroidie. Ce phénomène est appelé l'effet Peltier. Il est illustré à la (Figure III.4(a)).

Effet Seebeck : Une force électromotrice est générée dans un circuit formé de deux métaux différents lorsque les températures dans les deux jonctions sont différentes (Figure III -4(b)). Elle est proportionnelle à la différence de température entre les deux jonctions. Un microvoltmètre peut être installé dans le circuit afin de mesurer cette force électromotrice.

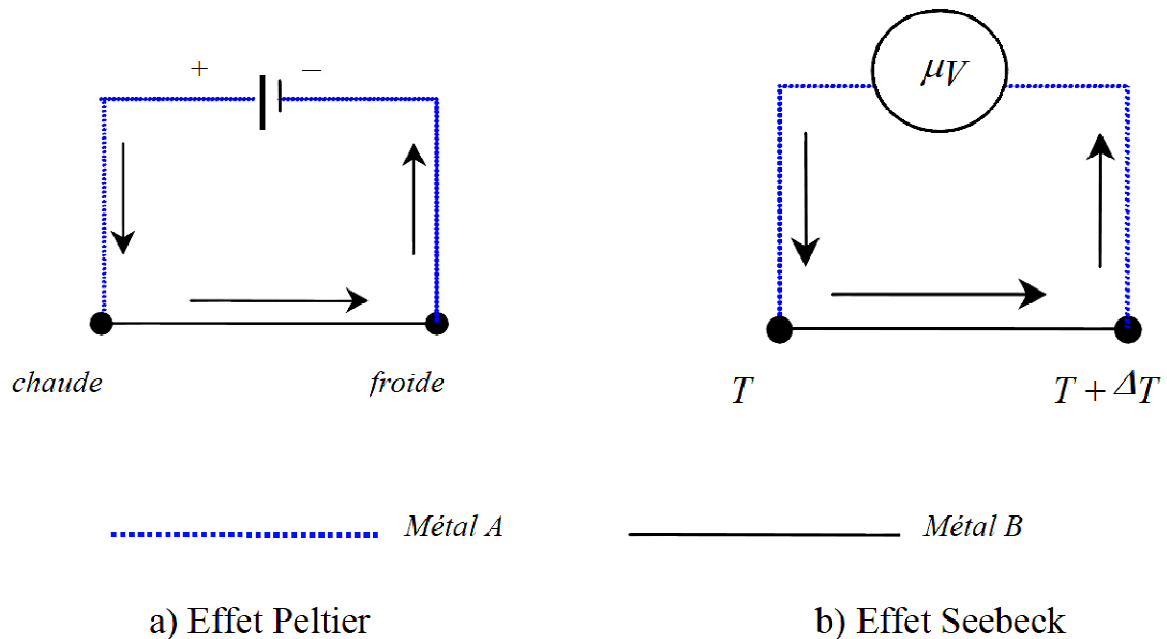


figure.III. 4.effet Peltier et effet seebeck

Considérons maintenant un thermocouple placé dans une éprouvette de sol. Le signal fourni initialement par le thermocouple correspond à la température d'équilibre du système. Cette température sert de référence. Faisons ensuite passer un courant électrique dans le circuit du thermocouple de telle manière que, par l'effet Peltier, la température d'une jonction de celui-ci diminue en-dessous du point de rosée. Cet abaissement de la température provoque alors la condensation sur la jonction du thermocouple. Après un certain temps, on interrompt le passage du courant, l'eau condensée a tendance à s'évaporer. Comme l'évaporation est endothermique, il en résulte que la température de la jonction continue à diminuer. Ce nouvel abaissement de la température est fonction de la vitesse de vaporisation qui elle-même dépend de la pression partielle de vapeur d'eau environnante et donc de la succion totale du sol. Par effet Seebeck, cet abaissement de la température peut être mesuré à l'aide d'un microvoltmètre. Par des théories thermodynamiques, Verbrugge (1974, 1976) a démontré que cet abaissement de température est proportionnel à l'humidité relative. De ce fait, il constitue une mesure de la succion totale par la loi de Kelvin. Il s'agit d'une méthode assez sophistiquée dont les applications pratiques en mécanique des sols sont encore assez

rares, limitée à une succion maximale de 7MPa (95 % d'humidité relative), au-delà de laquelle les molécules de vapeur d'eau sont trop rares pour parvenir à la condensation.

III.5.1.4 Méthode du papier filtre

la méthode du papier –filtre est une méthode indirecte , simple et pratique de mesure de succion , utilisable dans n'importe quel laboratoire disposant d'un système de pesée précis au $1/10\ 000^e$ de gramme [Dalage et al]. Son principe est représenté sur (la figure. III.5)

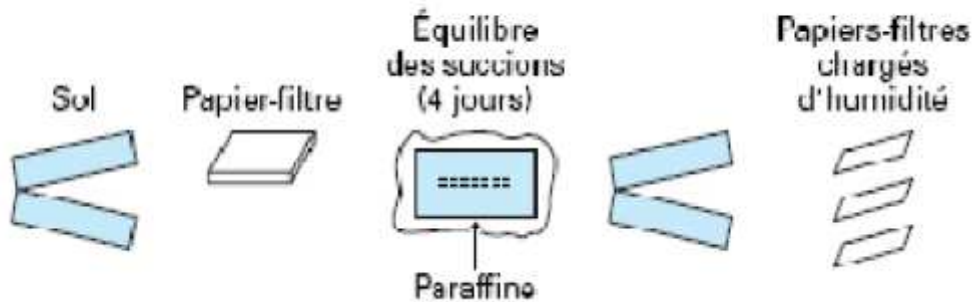


figure.III. 5.Méthode du papier-filtre (DELAGE et All)

D'après Gardner cette méthode peut être utilisée pour mesurer des pressions interstitielles allant de 30kpa à 100000 kpa

Elle consiste à insérer une triple épaisseur de papier-filtre dans l'éprouvette dont on veut déterminer la succion et à attendre (au moins 24h) l'équilibre des suctions entre le sol et le papier-filtre, en évitant toute évaporation ; on peut paraffiner l'éprouvette ou l'envelopper soigneusement d'un sac plastique.

On extrait ensuite les papiers-filtres de l'éprouvette et l'on détermine la teneur en eau de la feuille centrale, non polluée, par une pesée au $1/10\ 000^e$.la connaissance de la teneur en eau et de la courbe de rétention d'eau permet d'accéder à la succion du papier-filtre et donc du sol.

III.5.2 Techniques de contrôle de la succion

Les techniques de contrôle sont conçues de telle manière qu'on puisse imposer une succion au sol et mesurer la teneur en eau correspondant à l'équilibre hydrique.

Il existe essentiellement trois techniques : la méthode de surpression d'air, la méthode osmotique et la méthode à pression de vapeur. Cette dernière méthode permet d'imposer des suctions très élevées. Le principe est le même que celui du dessiccateur à vide.

III.5.2.1 Méthode de la surpression d'air

La méthode de surpression d'air est basée sur le principe de la *translation d'axes* décrit brièvement ci-dessous. On travaille avec de l'eau pure, de sorte qu'il n'y ait pas de succion osmotique. Dans les essais ordinaires, si l'on prend la pression atmosphérique comme référence (égale à zéro), la succion matricielle est égale à la pression d'eau changée de signe (équation (5)): Si l'on veut imposer une certaine succion à l'éprouvette au cours d'essais dans lesquels l'air est à pression atmosphérique, il faut appliquer une pression d'eau

négative à l'éprouvette. Mais des difficultés sont rencontrées dans ces conditions à cause de la cavitation : lorsque la pression d'eau se trouve aux environs de 100 kPa, la cavitation apparaît dans le système de mesure. Par conséquent, le système de mesure se remplit de gaz (vapeur d'eau essentiellement) et l'eau est poussée par le gaz dans l'éprouvette. On perd alors le contrôle des essais. Pour éviter ce genre de problème pratique, on recourt à la technique de translation d'axe sur laquelle repose la méthode de surpression d'air. L'objectif de la translation d'axe consiste à appliquer au sol une pression d'air plus haute que la pression atmosphérique (une surpression), tandis que la pression d'eau reste constante. Par exemple, pour avoir $s=100\text{kPa}$ on peut appliquer une pression d'air $u_a=200\text{kPa}$ tandis que $u_w=100\text{kPa}$. Ainsi, la pression d'eau reste positive, ce qui ne pose pas de difficulté expérimentale.

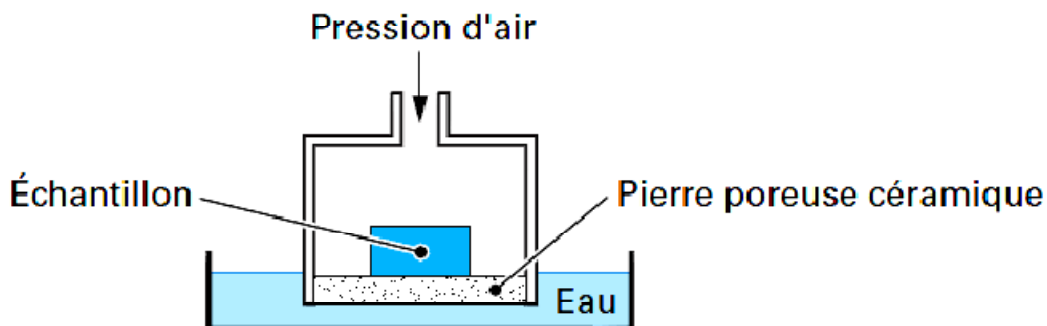


Figure III. 1 .cellule de Richards pour le contrôle de succion par translation d'axe

Un disque en céramique avec une forte valeur d'entrée d'air permet d'éviter l'entrée d'air dans le circuit d'eau. Il s'agit d'une sorte de pierre poreuse perméable à l'eau, mais peu perméable à l'air, à condition que la pression d'air appliquée soit inférieure à la valeur d'entrée d'air. Cela permet de contrôler séparément la pression d'air u_a et celle de l'eau u_w . On peut trouver dans le commerce des disques en céramique ayant différentes valeurs d'entrée d'air. Le principe de translation d'axe est illustré par la (Figure III.4).

La méthode de surpression d'air est fréquemment utilisée dans l'étude du comportement hydromécanique du sol non saturé : détermination de la courbe de rétention d'eau (la teneur en eau en fonction de la succion), détermination du coefficient de perméabilité hydraulique à une succion donnée, essais oedométriques à succion contrôlée, essais triaxiaux à succion contrôlée, etc. Cette méthode est limitée à une succion inférieure à 1500 kPa pour des problèmes de résistance de l'équipement d'essai. D'autre part, la pression d'air appliquée doit toujours être inférieure à la valeur d'entrée d'air de la pierre poreuse, sinon, l'air entrerait dans le système de mesure et on perdrait alors le contrôle de la succion.

III.5.2.2 Méthode Osmotique

III.5.2.2.1 Principe de la méthode osmotique

De l'eau pure est mise en contact avec une solution à travers une membrane semi-perméable qui laisse passer les molécules d'eau mais pas les grosses molécules du soluté.

Par suite de la différence de concentration entre l'eau et la solution, l'eau pure a tendance à s'écouler vers la solution à travers la membrane afin d'obtenir un équilibre. Si l'écoulement

d'eau est restreint, il y a une différence de potentiel chimique entre l'eau et la solution. Pour équilibrer cette différence de potentiel, une différence de pression entre l'eau et la solution apparaît. Cette différence de pression est la succion osmotique. Par contre, si l'écoulement d'eau n'est pas empêché, un échange d'eau se produit. Il s'arrête lorsque l'équilibre des potentiels chimiques est atteint. Bien entendu, le volume d'eau échangé dépend de la concentration de la solution.

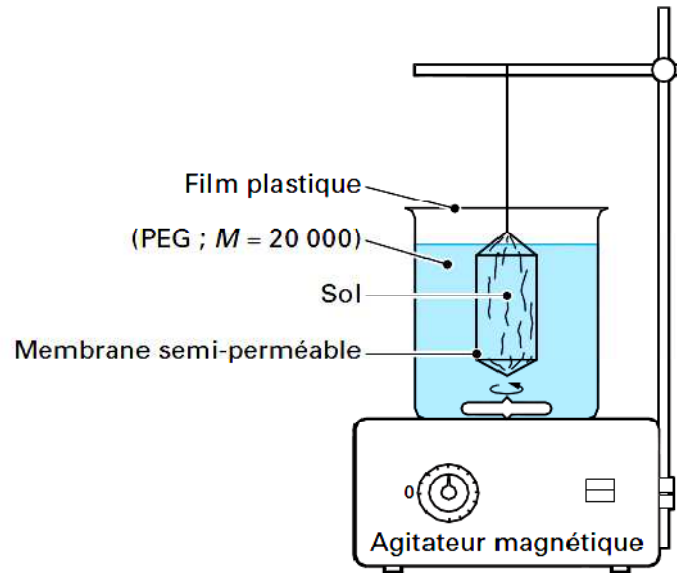


Figure III. 2: Mise en œuvre de la technique osmotique

Rappelons que la succion osmotique Ψ_0 est calculée par :

$$\psi_0 = -\frac{\rho_w RT}{\omega_v} \ln(X) \quad (7)$$

Où X est la fraction molaire d'eau dans la solution qui représente la concentration de la solution, R est la constante des gaz parfaits, T est la température absolue, ρ_w est la masse volumique de l'eau et ω_v est la masse molaire de la vapeur d'eau.

L'équation (7) est à la base du principe osmotique. On note que la succion est d'autant plus grande que la fraction molaire d'eau est petite. Autrement dit, la succion est plus grande lorsque la concentration du soluté est grande.

III.5.2.2.2 Contrôle de la succion par la méthode osmotique

Cette méthode repose sur le mécanisme de la pression osmotique créée dans le sol à l'aide d'une membrane semi-perméable et d'une solution.

Le soluté utilisé est le polyéthylène glycol 20000 (PEG 20000). La taille des molécules de PEG 20000 est plus grande que la taille des pores de la membrane semi-perméable utilisée. De ce fait, la membrane est perméable à l'eau mais pas aux grosses molécules de PEG 20000. Lorsque le sol est mis en contact à travers une membrane semi-perméable avec la solution de PEG préparée préalablement à une concentration bien déterminée, du fait qu'il existe une différence de potentiel chimique entre l'eau interstitielle du sol et la solution de PEG, un échange d'eau entre la solution et le sol va se produire (tendance à l'équilibre). Si la solution est contenue dans un flacon relativement grand, on peut considérer

que cet échange d'eau ne modifie guère la concentration de la solution. Par conséquent, lorsque l'équilibre est établi entre l'eau dans le sol et la solution, on peut considérer que le potentiel chimique de la solution représente la succion dans le sol.

La relation entre la concentration et la succion pour la solution de PEG 20000 à 25 °C a été calibrée expérimentalement (Figure III.6). Ainsi, à l'aide de la courbe d'étalonnage de la solution de PEG 20000 (concentration -succion) de Williams et Shaykewish (Vicol (1990)), on peut imposer une succion donnée au sol en fonction de la concentration de la solution.

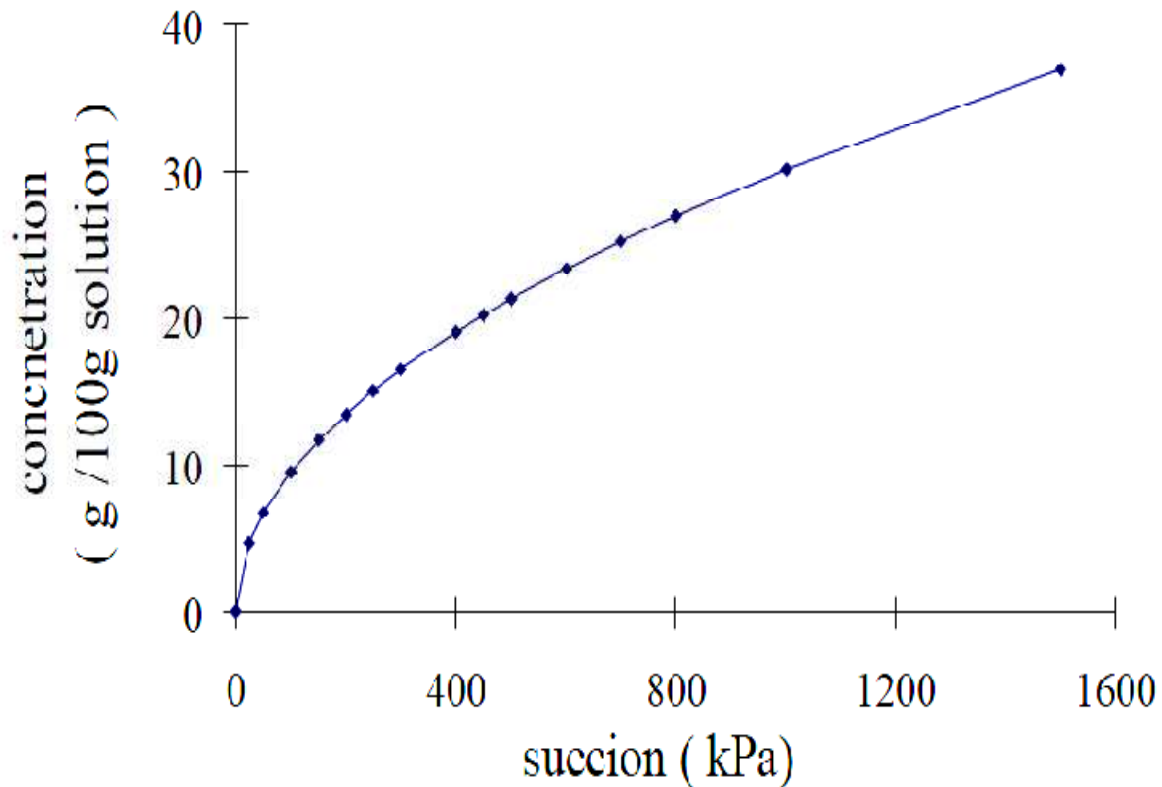


Figure III. 3: Courbe de calibration de la concentration de la solution PEG en fonction de la succion (à 25°)

Il faut noter que la succion imposée dépend également de la température.

III.5.2.3 Dessiccateur à vide (Méthode à pression vapeur)

III.5.2.3.1 Principe du dessiccateur à vide

Cette technique est également basée sur l'équation de Kelvin (6). On impose l'humidité relative constante à l'aide de solutions salines saturées dont les concentrations sont connues. L'échantillon de sol est placé dans une enceinte sous vide contenant une solution de composition chimique connue.

Chaque type de solution saline saturée correspond à une humidité relative connue en fonction de ses propriétés physico-chimiques. Lorsque l'équilibre entre le sol et la solution est atteint par transfert de vapeur d'eau, la succion du sol est équivalente à l'humidité relative de la solution (loi de Kelvin). Le Tableau II-1 fournit les valeurs d'humidité relative mesurées et les succions équivalentes correspondant à différentes solutions salines saturées (Delage et al.

(1996)). On constate immédiatement que cette technique permet d'imposer une succion très élevée (quelques centaines de MPa).

Tableau III 1: L'humidité relative RH et la succion totale de différentes solutions salines saturées

Solutions saturées	Température = 20 °C		Température = 30 °C	
	RH (%)	Succion (MPa)	RH (%)	Succion (MPa)
K_2SO_4	97	4.113	96	5.512
KNO_3	93	9.8	91	12.734
KCl	86	20.364	85	21.943
NaCl	76	37.055	75	38.843
$NaNO_2$	66	56.104	63	62.385
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	55	80.721	52	88.294
$K_2CO_3 \cdot 2H_2O$	44	110.85	43	113.954
KCH_3CO_2	20	217.31	22	204.44
KOH	9	325.125	7	359.059

III.5.2.3.2 Facteurs influençant les mesures par la méthode de la pression à vapeur

La température est un paramètre fort sensible ici, non seulement parce qu'elle intervient directement dans la loi de Kelvin, mais aussi à cause de son influence sur les propriétés physiques et chimiques des solutions. C'est pourquoi l'utilisation d'un bain thermostatique est conseillée.

Delage et al. (1996) démontrent que 1% d'erreur sur la mesure d'humidité relative peut donner une valeur de 1,38MPa d'incertitude sur la mesure de la succion.

Dès lors, cette technique a certaines limites pour une succion inférieure à 10MPa. D'autre part, la mise en équilibre est d'autant plus lente que les éprouvettes sont volumineuses. En conséquence, la durée d'essai est importante.

III.6 Relation teneur en eau-succion (courbe de rétention d'eau)

Considérons un sol initialement saturé en eau. Si on lui applique une pression d'air, à partir d'une valeur de pression critique appelée pression d'entrée d'air du sol, les larges pores commencent à se vider. La loi de Jurin Laplace permet d'affirmer qu'une augmentation de la pression d'air appliquée au sol entraîne un drainage de pores de taille de plus en plus petite.

La succion du sol est reliée à la quantité d'eau qui y est présente à cause interactions de type capillaire ou d'adsorption entre l'eau et les particules du sol. Cette relation est une

caractéristique spécifique d'un type de sol et peut être déterminée expérimentalement par les méthodes de contrôle de la succion présentées dans ce chapitre. Elle est représentée par une courbe appelée courbe de rétention.

La relation succion-teneur en eau n'est pas univoque. La (figure III.6) montre que le sol est plus humide à la dessiccation qu'à l'humidification pour une même valeur de succion. Il en résulte que le sol présente un comportement non univoque, qui fait intervenir à priori l'histoire hydrique du sol, complique singulièrement la description des écoulements dans les sols non saturés. Cette non-unicité est liée au phénomène d'hystérésis qui signifie que les caractéristiques hydrique pour un sol en séchage et en humidification ne sont pas les mêmes.

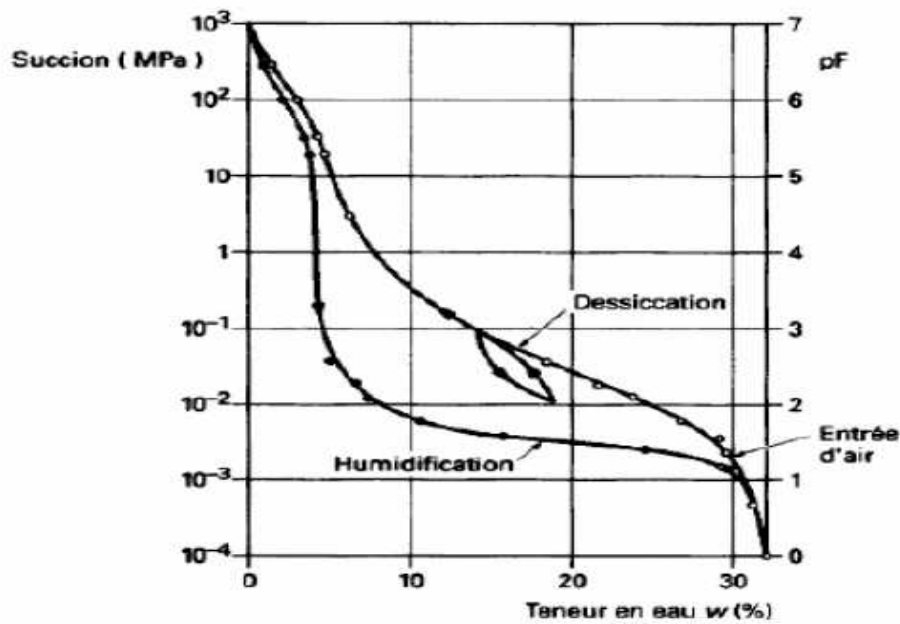


figure.III. 6.courbe de rétention - phénomène d'hystérésis

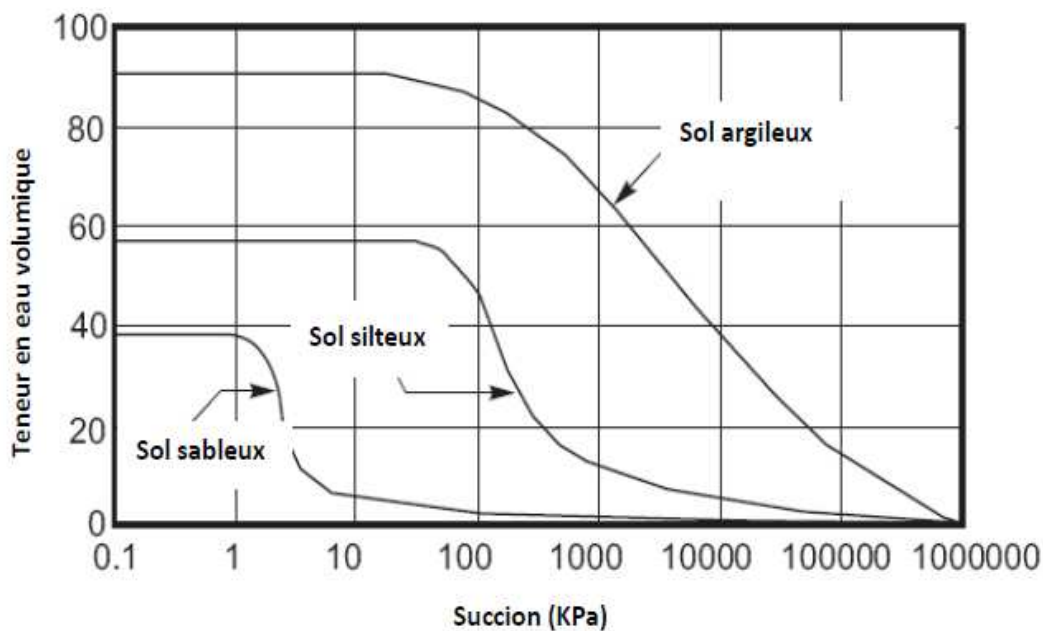


Figure.III. 7 : les courbes de rétention pour différents types de sols

III.7 Conclusion

Dans la pratique, une meilleure connaissance du statut de l'eau dans les sols non saturés permet de mieux comprendre le comportement d'ouvrage bâtis en sol non saturé tels que les ouvrages compactés (remblais routiers, barrage en terre....).

Des nombreuses études expérimentales du comportement des sols non saturés ont été réalisées, ce qui a permis la mise en évidence de leurs caractéristiques principales. Ainsi l'ensemble des études démontrent que la présence de la succion rigidifie le sol et augmente sa résistance.

Généralement la courbe de rétention d'eau du sol n'est pas une propriété qui est régulièrement déterminée dans les laboratoires de mécanique du sol. Donc en absence de données expérimentales, on peut estimer cette courbe à l'aide des modèles de prédiction.

Chapitre IV:

PROGRAMME EXPERIMENTAL

IV.1 Introduction :

Après avoir passé en revue des généralités sur les sols compactés et les sols non saturés dans les précédents chapitres, et afin de caractériser l'effet du compactage sur les caractéristiques mécaniques et hydriques du sol d'étude prélevé à Bouinan, un programme expérimental a été réalisé au niveau du laboratoire CTPP (contrôle technique des travaux publics). Il consiste d'abord à l'identification physico chimique du matériau puis à la calcul de la succion et l'indice cbr.

Nous présentons dans ce chapitre toutes les techniques expérimentales qui seront mises en œuvre pour réaliser notre programme expérimental.

IV.2 Les essais d'identification de sol :

IV.2.1 Limites d'Atterberg :

C'est l'un des essais d'identification les plus importants. Les limites d'Atterberg sont réalisées selon les recommandations de la norme (NF P 94-051).

L'essai s'effectue en deux phases :

IV.2.1.1 La limite de liquidité WL :

✓ Préparation de la pate :

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



Figure. IV. 1.Préparation de l'échantillon

✓ Réalisation de l'essai :

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



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

La limite de liquidité est la teneur en eau pour laquelle on observe une fermeture des lèvres de la rainure après 25 chocs. Elle peut se déterminer graphiquement grâce à 3 ou 4 essais successifs ou, si le nombre de coups est compris entre 15 et 35, à partir d'un seul essai au moyen de la formule:

$$WL = W (N/25)^{0.121}$$

Avec :

WL= teneur en eau correspondant à la limite de liquidité;

W = teneur en eau de la pâte de sol;

N = nombre de chocs correspondants à w.

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

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

IV.2.1.2 Détermination de limite de plasticité :

Cette limite a une importance fondamentale en géotechnique car elle indique la sensibilité d'un sol aux modifications de sa teneur en eau.

✓ **Réalisation de l'essai :**

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

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

L'indice de plasticité a une grande importance dans tous les problèmes de géotechnique

Le GTR9 2 (Guide Technique pour la Réalisation des remblais et des couches de forme septembre 992) retient pour I_p les seuils d'argilosité suivant :



IV.2.2 Granulométrie :

L'essai a pour but de déterminer en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions.

L'analyse granulométrique des matériaux étudiés est effectuée par Le tamisage sous l'eau (voie humide), selon la norme NA 2607). Le principe de cette méthode est de séparer par lavage les grains agglomérés d'un échantillon de masse connue du matériau, puis les fractionner, au moyen d'une série de tamis ; et enfin peser successivement après séchage la quantité du matériau retenue sur chaque tamis (refus sur un tamis). Le lavage du matériau a été réalisé manuellement



Figure. IV. 3.colonne de tamis

Afin de connaître l'étalement granulométrique de la fraction étudiée et pouvoir la classer (tableau V.2), deux paramètres sont utilisés (R.D Holtz et W.D Kovacs, 1991; F.Schlosser, 1997):

Le paramètre de forme de la courbe, appelé coefficient d'uniformité (C_u), dit coefficient de Hazen, donné par la relation:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

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

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad [2]$$

D_{10} , D_{30} et D_{60} représentent les diamètres correspondant respectivement à 10, 30 et 60% du tamisât cumulé.

Par définition, un sol est dit à granulométrie étalée, lorsque celui-ci est constitué de particules dont les diamètres forment une gamme étendue et présente une courbe régulière et légèrement concave vers le haut. Contrairement, un sol peu étalé est celui qui affiche un excès ou un déficit de particules d'un diamètre donné (R.D Holtz et W.D Kovacs, 99). Les coefficients C_u et C_c ont été évalués par application des relations [1] et [2].

Tableau. IV. 2. Classement des matériaux suivant leur diamètre (Source : LNTPB) (cité par randrianandrasana A-P, 2005)

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

IV.2.3 Sédimentométrie :

Cette analyse permet de déterminer le pourcentage des particules argileuses dans un matériau. Dans l'étude des sols, on désigne par argile la fraction de matériau comprenant des éléments de diamètres inférieurs à 2 μm.

Le principe de la sédimentométrie est basé sur la loi de Stokes qui mesure la vitesse (v) de décantation des particules sphériques dans un milieu visqueux sous l'influence de la force de gravitation et de la résistance du milieu.

On prend 20g de matériau sec sont pesés et introduits dans une éprouvette A. Par la suite, 30 cm³ de solution d'hexamétaphosphate de sodium à 5% et 200 cm³ d'eau déminéralisée sont ajoutés, puis le tout est agité manuellement. Après un repos de 24 h, on agite à nouveau pendant 10 minutes et le volume de la solution de l'éprouvette A est complété à 1000 cm³ avec l'eau déminéralisée. De la même manière, on prépare une autre solution dans l'éprouvette B, 30 cm³ de solution d'hexamétaphosphate de sodium à 5%, complétée à 1000 cm³ avec l'eau déminéralisée. Les éprouvettes A et B sont placées dans un bain d'eau froide afin d'uniformiser la température. Le densimètre est d'abord introduit dans l'éprouvette B, et, concomitamment on agite vigoureusement la solution de l'éprouvette A. Aux différents instants, après avoir effectué la lecture de B, le densimètre est enlevé et introduit doucement dans l'éprouvette A et la lecture est à nouveau effectuée. A chaque lecture du densimètre, la température est aussi mesurée dans le bain d'eau froide.

IV.2.4 Equivalent de sable :

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

Le prélèvement est place dans l'éprouvette contenant une quantité de flocculant en attendant 10min. l'éprouvette passe à l'agitateur pendant 30 sec on remplit le reste de l'éprouvette d'eau jusqu'au seconderait et agiter la burette par favorise la remontée des fines et l'élément argileux puis laisser reposer.

Après 20 min on mesure la hauteur (sable propre +élément fin et la hauteur de sable propre H₂ ou l'en descend le piston lentement par son poids propre dans l'éprouvette jusqu'à la stabilisation et l'on mesure la distance entre poids et la bague (piston calibrer pour l'éprouvette).

$$\frac{h_2}{h_1} \times 100$$

On détermine : **ESV** (ES visuel ou h_1 et h_2 sont mesurée a l'aide de la règle ESP (ES piston h_2 est mesurée a son poids propre ou $h_2 = h_2' - h$ libre

On siphonne la solution lavante dans chaque cylindre gradué, jusqu'au trait repère inférieur figurant sur le cylindre.

A l'aide de l'entonnoir, verser une éprouvette dans chaque cylindre gradué, en maintenant le cylindre dans une position verticale.

On Tape le fond de chaque cylindre à plusieurs reprises sur la paume de la main afin de déloger les bulles d'air et de favoriser le mouillage de l'éprouvette, et Laisser reposer pendant (10 ± 1) min pour humidifier l'éprouvette.

✓ **Mesurages :**

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

✓ **Calcul et expression des résultats :**

On Calcule le rapport $(h_2 / h_1) \times 100$ pour chaque cylindre avec un chiffre après la virgule.

On Calcule l'équivalent de sable (SE) comme la moyenne des rapports $(h_2 / h_1) \times 100$

On obtient sur chaque cylindre et enregistrer au nombre entier le plus proche.



Figure. IV. 4. déroulement de l'essai de l'équivalent de sable

IV.2.5 Essai au bleu de méthylène :

Il s'agit aussi d'un paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol. L'essai est effectué selon la norme (NA 1948). Son application est récente. Ce paramètre noté VBS (valeur de bleu du sol), représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules argileuses contenues dans la fraction du sol considéré c'est donc une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol.

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

L'essai consiste à introduire progressivement de bleu de méthylène dans une suspension de sol maintenue en agitation on prélève périodiquement une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier chromatographique (papier filtre normalisé), dès qu'une auréole bleutée se développe autour de la tache ainsi formée

On peut considérer que l'adsorption du bleu de méthylène sur les particules d'argile est terminée. En effet, c'est l'excès de bleu de méthylène qui apparaît dans l'auréole.



Figure. IV. 5.manipulation de l'essai de bleu

La VBS traduit globalement la quantité et la qualité (activité) de la fraction argileuse du sol. Elle s'exprime en grammes de bleu pour 100g du sol.

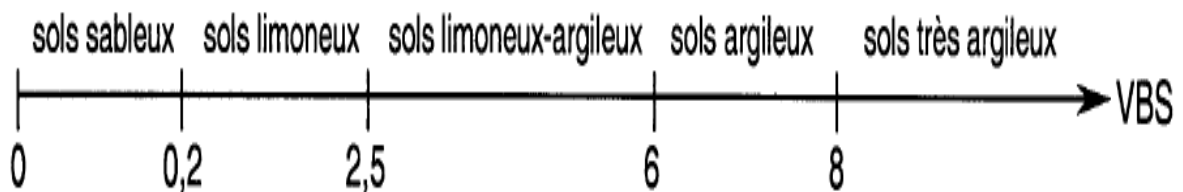


Figure. IV. 6.Ordre de grandeur (Type de sol en fonction de la valeur VBS) (Léreau 2005: INSA-Institut National Des Sciences Appliqués De Toulouse)

IV.3 Les essais mecanique :

IV.3.1 Essais proctor :

L'essai Proctor est un essai de compactage exécuté en laboratoire qui a pour but de déterminer l'influence de la teneur en eau (W , exprimée en %) d'un matériau sur sa compactibilité (exprimée par la masse volumique sèche en g/cm^3 ou en kg/m^3) l'essai est effectuée selon la norme (NF P 94-093).

Concernant notre travail, on a utilisé le compactage pour mesuré la succion des deux matériaux sable et argile ainsi pour déterminer l'indice cbr des déférentes teneures en eau et densités sèches. Le compactage de l'échantillon de sol est réalisé dans un moule modifié, avec une dame normalisée et modifié, et selon la norme (NF P 94-093). La teneur en eau et le poids spécifique sec après compactage du sol sont mesurés

Le moule choisi pour l'opération de compactage est de type CBR, caractérisé par :

- ømoule : 152 mm
- H: 152 mm sans rehausse
- H disque d'espacement : 35 mm
- H utile : 116 mm
- Vmoule CBR : 2 122 cm^3

✓ Préparation des éprouvettes :

-Une quantité importante de l'ordre de matériau a été mise à l'étuve à une température normalisée de 105° pendant 24h suivant la norme (NF P 94 – 061 – 2) Cette condition de température et de temps de séchage a pour objectif de faire sortir et d'évacuer la phase liquide des deux matériaux , Après séchage, le matériau est tamisé à 5 mm de diamètre dans le but d'avoir un mélange homogène et d'éviter la formation des grumeaux, ensuite il est homogénéisé



Figure. IV. 7.Préparation de l'echantillon à compacter

✓ Mode opératoire :

Avant introduction du matériau dans le moule il ya lieu de :

- Solidarisé : moule, embase et rehausse ;
 - Lubrifier les parois du moule ;
 - Placer le disque d'espacement au fond moule CBR lorsqu'il est utilisé ;
 - Placer éventuellement un papier sur le disque d'espacement du moule CBR pour facilité le démoulage ;
 - Introduire la quantité de matériau pour que la hauteur de la première couche après compactage soit légèrement supérieure au tiers de la hauteur de moule (5,5 Kg par Proctor) ;
 - Compacté cette couche avec la dame correspondante
 - Après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse, le matériau doit alors dépasser du moule d'une hauteur d'un centimètre au maximum. Cet excédent est arasé soigneusement au niveau du moule en opérant radialement du centre vers le périphérique du moule.
 - peser l'ensemble du moule avec le matériau,
- Pour chaque éprouvette compactée, on a calculé :
- la teneur en eau
 - la densité sèche de matériau

IV.3.1.1 Les essais de portance**✓ Manipulation 1 :**

- cinq parts de (5,5kg) du matériau sont humidifié à la même teneur en eau ensuite compacté à des déférentes énergies de compactage et déférent nombre de couche (dame normalisé 25 coups par 3couches, dame normalisé 56 coups par 3couches, dame modifié 56 coups par 4 couches, dame modifié 25 coups par 4 couches, dame modifié 56 coups par 5 couches).
 - Répéter l'opération pour trois teneurs en eau (0%, 5% ,10%) pour les deux matériaux.
 - Après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse, le matériau doit alors Dépasser du moule d'une hauteur d'un centimètre au maximum. Cet excédent est arasé soigneusement au niveau du moule en opérant radialement du centre vers le périphérique du moule.
 - peser l'ensemble du moule avec le matériau.
- Pour chaque éprouvette compactée, on a calculé :
- la teneur en eau
 - la densité sèche de matériau

✓ Manipulation 2 :

- une quantité calculée pour obtenir une densité sèche précise est humidifié à des teneur en eau différente (0% ;5% ; 10% ;15%) et divisé en trois part égaux
 - Introduire alors la quantité de matériau pour que la hauteur de la première couche après compactage soit au tiers de la hauteur de moule
 - Compacté cette couche avec la dame correspondante en appliquant une énergie de compactage a fin que toute la quantité calculé soit dans le moule et répéter l'opération pour trois densité ($1,55 \text{ g/m}^3$, $1,65 \text{ g/m}^3$, $1,75 \text{ g/m}^3$)
 - peser l'ensemble du moule avec le matériau,
- Pour chaque éprouvette compactée, on a calculé :
- la teneur en eau
 - la densité sèche de matériau



Figure. IV. 8 Réalisation de l'essai Proctor

IV.3.2 l'essai IPI (Indice CBR Immédiat) :

L'essai permet de mesurer la portance d'un matériau compacté. Il consiste à comparer la résistance au poinçonnement d'un matériau à tester à celle d'un matériau de référence californien (grave naturelle).

L'essai est réalisé en enfonçant à vitesse constante un poinçon cylindrique dans l'axe de l'éprouvette à la cadence normalisée de 1,27 mm/min sur des éprouvettes de sol compactées à l'énergie Proctor dans des moules CBR.

On mesure en continu la force appliquée en fonction de l'enfoncement du poinçon (généralement jusqu'à 10 mm). Après l'essai, on détermine l'effort de pénétration à appliquer au sol pour observer des enfoncements de 2,5 et 5 mm (respectivement P2, 5 et P5).

L'indice IPI (exprimé en %) est défini comme étant la plus grande des deux valeurs suivantes:

$$IPI_{25} = \frac{100 \times F_{25}}{13.35}$$

$$IPI_{50} = \frac{100 \times F_{50}}{19.93}$$

$$IPI = \max (IPI_{25} ; IPI_{50})$$

Où:

F_{25} : Force [kN] à 2,5 mm d'enfoncement

F_{50} : Force [kN] à 5 mm d'enfoncement

13,35 : Force [kN] à 2,5 mm d'enfoncement pour le matériau type

19,93 : Force [kN] à 5 mm d'enfoncement pour le matériau type

Le poinçonnement est réalisé sur toutes les éprouvettes de l'essai Proctor, on peut ainsi établir un graphique CBR/teneur en eau au compactage



Figure. IV. 9 des moules CBR préparer pour passer au poinçonnement



Figure. IV. 10. Appareille CBR (laboratoire CTTTP)

IV.3.3 Essai de mesure de succion avec la méthode du papier filtre :

L'essai est réalisé selon la norme anglaise **D 5298 — 03**. On a utilisé le papier filtre **Wathtman 42**, pour lequel, il existe des courbes d'étalonnage dans les normes. Pour des raisons de similitude des conditions de recherche, 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

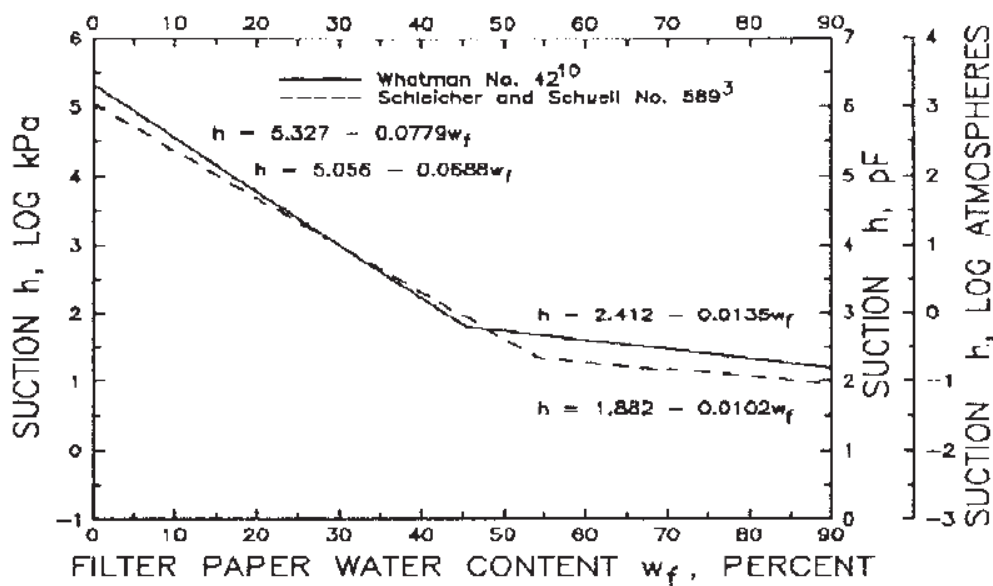
central est passé à l'étuve pendant 24 h ensuite il est pesé avec une balance de précision 1/1000 g

Après compactage, l'échantillon étant enveloppé par un sac dans une salle hermétique pour éviter toute évaporation.

-Une fois l'équilibre atteint (5 jours pour le sable et 10 jours pour l'argile), l'échantillon est déballé et démoulé et la teneur en eau du papier-filtre central « propre » (propre car il n'est pas au contact avec le sol), est déterminée, ainsi la teneur en eau du sol qui se situe autour du papier. La succion matricielle correspondant à cette teneur en eau, évaluée en utilisant la courbe d'étalonnage ASTM



Figure. IV. 11. Réalisation de l'essai de succion



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

Figure. IV. 12. Courbe d'étalonnage du papier filtre (ASTM D5298)

Synthèse des différents essais :

IV.4 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la présentation des techniques expérimentales qui seront mises en œuvre pour réaliser notre programme expérimental.

Les essais présentés sont les essais d'identification nécessaires pour pouvoir classer les deux sols, et les essais mécaniques tels que l'essai de compactage, les essais de portance, l'essai de mesure de l'indice cbr immédiat et l'essai de succion.

Certaines techniques sont courantes comme toutes celles utilisées pour l'identification physico-chimique du matériau. D'autres sont plus spécifiques comme la technique de mesure de la succion et l'indice cbr immédiat.

La mise en œuvre de ces techniques nous permettra de cerner les difficultés, les avantages et les inconvénients des différentes techniques utilisées.

Chapitre V

PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

V.1 Introduction

Les prélèvements de deux matériaux viennent des remblais de la région de Bouinan-BLIDA. Le premier est un matériau fin-argileux. Le deuxième est un matériau sableux qui contient une fraction des fines.

Dans ce chapitre, on présente les résultats des essais d'indentification de ces deux matériaux, ainsi que les essais de caractérisation mécanique et hydrique.

V.2 Identification des sols étudiés

Pour élaborer ce travail de recherche, plusieurs essais ont été réalisés au niveau du laboratoire C.T.T.P (contrôle technique des travaux publics)

Les matériaux sont prélevés par les techniciens du C.T.T.P au niveau de Bouinan BLIDA. On va donner dans ce qui suit les résultats d'identification de chaque matériau prélevé.

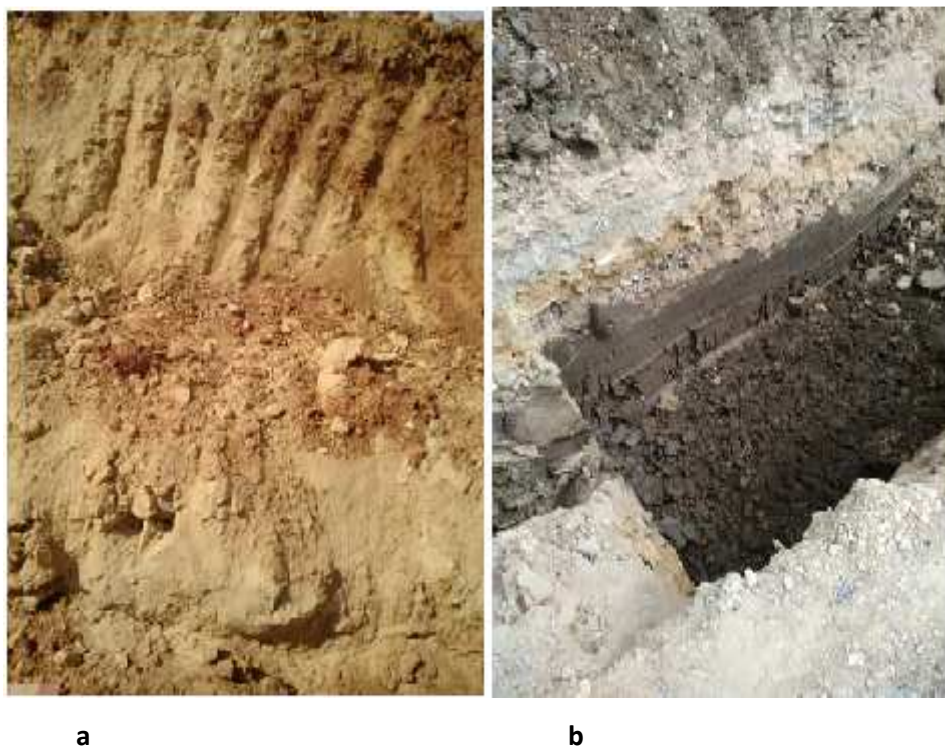


Figure V. 1: prélèvement des deux matériaux (a. Sable, b. Argile)

V.2.1 Identification du premier matériau (argile):

V.2.1.1 Analyse granulométrique (NF.P.94-056) :

L'analyse granulométrique peut être effectuée par tamisage. Pour des grains de diamètres inférieurs à 0.08 mm le tamisage n'est plus une solution praticable. En effet, l'épaisseur des fils du tamis peut poser problème par exemple. On adoptera donc la méthode de la sédimentométrie.

Tableau. V. 1.Analyse granulométrique du matériau 01

Tamis (mm)	Tamisa (%)
5	0
2	98
1	96
0,400	95
0,200	93
0,100	90
0,080	90

Passant au résultat de l'analyse par sédimentométrie :

Tableau. V. 2.Analyse granulométrique par sédimentométrie du 1er matériau

Tamis (micron)	Tamisa (%)
80	90
75	88
55	83
38	80
25	74
17	67
12	61
8	57
6	51
4	46
3	38

Les tableaux (V.1) et (V.2) représente les résultats de l'analyse granulométrie et Sédimentométrie. Les résultats sont présentés par une courbes appelée courbes granulométriques (figure V.1),

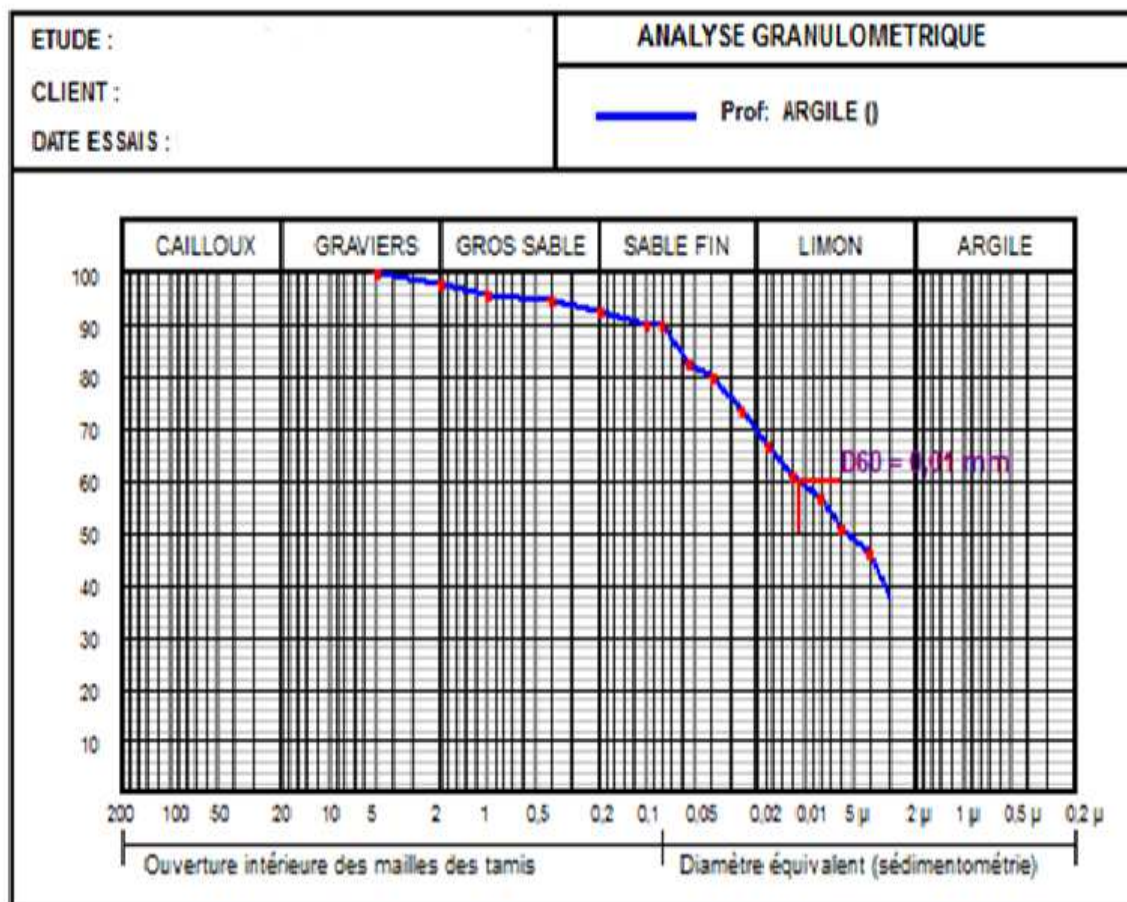


Figure V. 2: Courbe granulométrique matériau 01 (donner par le logiciel sol test)

Notre courbe est composée de quatre parties :

5μm à 2 μm des graviers

2μm à 0.2 μm gros sable

0.2 μm à 0.02 μm sable fin

0,02 μm à 5 μ limon on remarque une discontinuité dans cette partie

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

V.2.1.2 Les limites d'Atterberg de matériau 01 (NF 94-051):

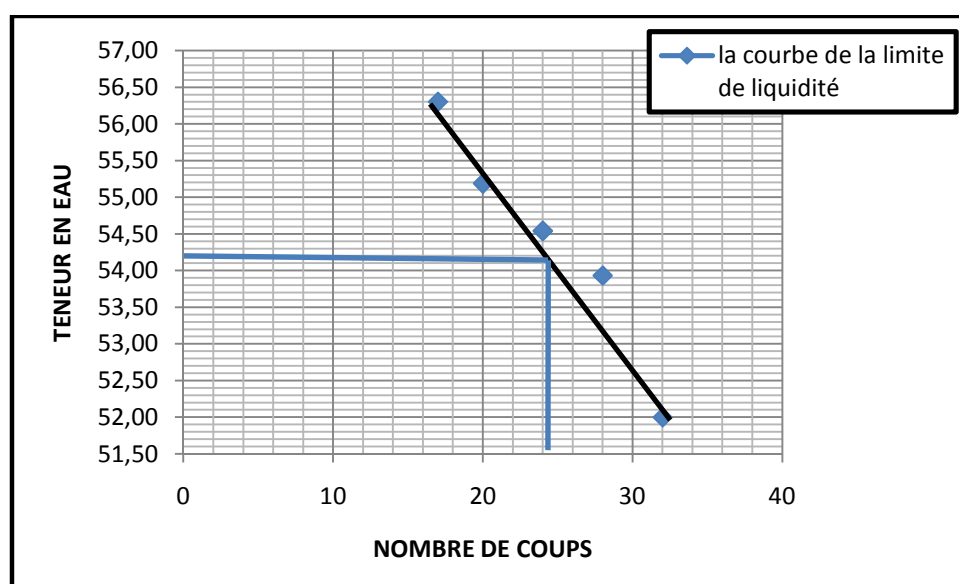
V.2.1.2.1 Détermination de la limite de liquidité :

Les résultats obtenus pendant l'essai sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau. V. 3: Limite de liquidité matériau 01

	1 er essai		2eme essai		3eme essai		4eme essai		5eme essais	
Nombre De choc	17		20		24		28		32	
N° tare	78	123	43	90	48	23	40	150	41	130
Poids totale humide	12,64	14,48	13,94	15,10	14,13	14,82	13,96	13,12	13,72	12,42
Poids totale sec	9,41	10,66	10,29	10,98	10,50	10,94	10,43	9,80	10,66	9,49
Poids de la tare	3,66	3,89	3,68	3,51	3,85	3,82	3,91	3,62	4,76	3,87
Poids de l'eau	3,23	3,82	3,65	4,12	3,63	3,88	3,53	3,32	3,06	2,93
Poids du sol sec	5,75	6,77	6,61	7,47	6,65	7,12	6,52	6,18	5,90	5,62
Teneur en eau %	56	56,5	55,3	55,2	54,6	54,5	54,2	53,8	51,9	52,2
Moyenne	56,25		55,2		54,5		54,5		52,05	

Vu que, lors des cinq tentatives, le sillon s'est refermé après un nombre de coups différents de 25, une courbe de tendance peut fournir la teneur en eau si le sillon s'était refermé à exactement 25 coups (graphique).

**Figure V. 3:** courbe de tendance de la teneur en eau en fonction de nombre de choc

Ainsi pour 25 coups, on a $W_L = 54,3[\%]$.

V.2.1.2.2 Détermination Limite de plasticité :

Vu que le fil est maintenu à 3 [mm] de diamètre, la teneur en eau calculée correspond à la limite de plasticité. Le tableau (V.4) regroupe les résultats :

Tableau. V. 4:limite de plasticité matériau 01

	1 ^{er} essai	2eme essai	3eme essai
N° tare	67	78	325
Poids totale humide(g)	8,04	7,93	7,76
Poids totale sec(g)	7,32	7,24	7,08
Poids de la tare(g)	4,78	4,73	4,66
Poids de l'eau(g)	0,72	0,69	0,68
Poids du sol sec (g)	2,54	2,51	2,42
Teneur en eau %	28,4	27,5	28,1
Moyenne %	28		

Se basant sur les résultats notés dans le tableau, la limite de plasticité théorique s'obtient par calcul de la moyenne des trois limites de plasticités obtenues au laboratoire.

Limite de plasticité : $W_p = 28$ [%]

De ce fait on peut calculer l'indice de plasticité $I_p = W_L - W_p = 26,3$ [%].

V.2.1.3 Détermination de la valeur au bleu :

Cas d'un sol ou d'un matériau rocheux :

Masse sèche de la prise d'essai de la fraction 0/5mm en (gr) : $M_0 = 100$ gr

Quantité totale de la solution de colorant ajoutée en (ml) : $V_1 = 445$

Masse de bleu introduite : $B = V \cdot 0.01 = 4,45$

VBS exprimé en grammes de bleu pour 100g de matériau sec $VBS = B/M_0 \cdot 100 = 4,45$

V.2.1.4 Synthèse des résultats d'identification de matériaux 01:

D'après les essais d'identification du matériau 01. Le sol présente les caractéristiques géotechniques et physiques présentés dans le tableau suivant, avec un D_{max} inférieur à 50mm.

Tableau. V. 5: Synthèse des différents résultats d'identification de matériau 01

Désignations	Résultats
Limite de plasticité $w_p\%$	28
Limite de liquidité W_l	54,3
L'indice de plasticité I_p	26,3 [%].
Valeur de bleu de méthylène	4,45

La classification de ce sol, selon le Guide des Terrassement Routier G.T.R. le diamètre maximum est de 2mm, ce qui est inférieur à 50mm. Ainsi que les Passants à $80\mu\text{m}$ sont à 90%, cela est nettement supérieur à 35%.donc, le matériau est un **Sol fin de classe A**. les tamisât à $80\mu\text{m}$, est supérieur a 35%, la Valeur au bleu de méthylène est supérieur à 2,5(d'après le tableau de Synthèse des déférents résultats d'identification), le sol présente un indice de plasticité supérieure à 25. Donc ce matériau, est à **la sous Classe A3**

V.2.2 Identification du deuxième matériau (sable):

V.2.2.1 Analyse granulométrique de matériau 02 (NF P-056) :

Pour des grains de diamètres supérieurs à 0,08 l'analyse granulométrique peut être effectuée par tamisage

Le tableau suivant récapitule les résultats de l'essai

Tableau. V. 6: Analyse granulométrique du matériau 02

Tamis	Tamisa (%)
5	99
2	99
1	98
0,400	96
0,200	21
0,100	13
0,080	12

On peut maintenant tracer la courbe de granulométries et analysé les différentes fractions de se sable

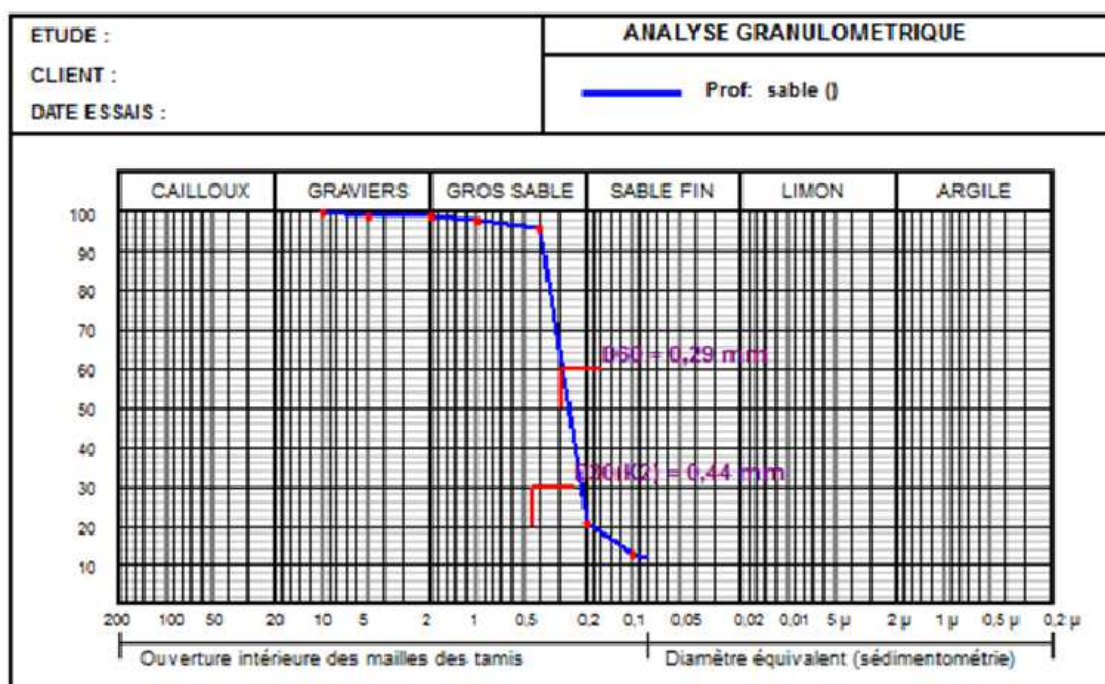


Figure V. 4: Courbe granulométrique matériau 01(Donner par le logiciel sol test)

Notre courbe est composée de trois fractions :

Les graviers ont un diamètre varie de 11mm à 2mm.

Le gros sable a un diamètre varie de 2mm à 0.2 mm.

Le sable fin a un diamètre varie de 0.2 mm à 0.1 mm.

On remarque une discontinuité dans la partie de gros sable. Quand la granulométrie est discontinue, avec prédominance d'une fraction particulière, il est dit mal gradué.

V.2.2.2 Equivalent de sable matériau (N.A 455) :

Calcul et expression des résultats :

On Calcule le rapport $(h_2/h_1) \times 100$ pour chaque cylindre avec un chiffre après la virgule.

On Calcule l'équivalent de sable (SE) comme la moyenne des rapports $(h_2/h_1) \times 100$ comme indique le tableau (V.7)

Tableau. V. 7 : Résultats de l'essai d'équivalent de sable

	Première éprouvette	Deuxième éprouvette
Masse de l'éprouvette (g)	120	120
H1 (mm)	19,20	18,80
H2 (mm)	8,90	8,80
$(H_2/H_1) \times 100$	46,40	46,80
Moyenne	47%	

Selon la norme NA 455.

Plus le sable et propre plus ES est proche de 100

Plus le sable et sale plus ES proche de 0

Notre ES= 47% $\leq$ 60 notre sable est un sable argileux risque de retrait ou de gonflement

V.2.2.3 Détermination de la valeur au bleu :

Tableau. V. 8: Résultats de l'essai de la valeur au bleu

Masse sèche de la prise d'essai de la fraction 0/2 mm (g)	M1= 60 gr
Quantité totale de la solution de colorant ajoutée (ml)	V1= 23 ml
Valeur au bleu MB exprimée en gramme de colorant par kg de grains de fraction 0/2mm	MB=V1/M1 = 3,8

V.2.2.1 Synthèse des résultats d'identification de matériaux 02:

D'après les essais d'identification du matériau 02. Le sol présente les caractéristiques géotechniques et physiques présentés dans le tableau suivant, avec un Dmax inférieur à 50mm.

Tableau. V. 9: Synthèse des différents résultats d'identification de matériau 02

Désignations	Résultats
Equivalent de sable	47%
Valeur de bleu de méthylène	3,8

La classification de ce sol, selon le Guide des Terrassement Routier G.T.R. le un diamètre maximum est de 5mm, ce qui est inférieur à 50mm. Ainsi que les Passants à 80 μ m sont à 12%, cela est nettement inférieur à 35%.donc, le matériau est un **Sol sableux et graveleux avec des fines de classe B**. les tamisât à 80 μ m, compris entre 12 et 35%, l'équivalent de sable est supérieur a 35(d'après le tableau de Synthèse des déférents résultats d'identification), Donc ce matériau, est à **la sous Classe B1** (Sables silteux...).

V.3 Résultats de mesure

V.3.1 Essai de mesure de succion des Sols :

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 00/0 de teneur en eau rajouté jusqu'à une teneur en eau importante, 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 (**Whatman n ° 42** papiers filtres, (Figure V.3).

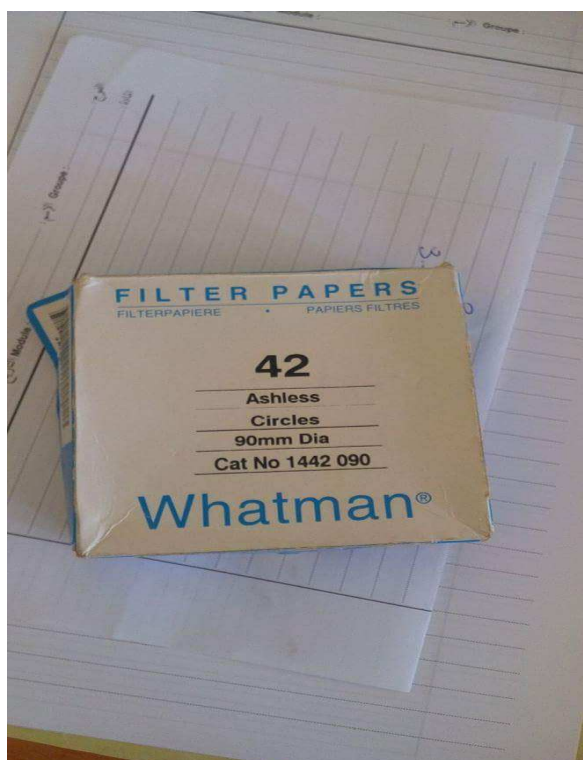


Figure V. 5:Papier filtre whatman 42

Matériau 01 (Argile)

Pour clarifier cette tâche du programme expérimental, en présentant dans le Tableau. V. 10, les différents résultats trouvés lors la mesure de succion. A partir de la teneur en eau du papier filtre, on trouve la succion à l'aide de la projection sur la Courbe d'étalonnage de papier filtre utilisé (Wathman 42). On résume nos résultats dans le tableau suivant :

Tableau. V. 11: Résultats de mesure de succion et la teneur en eau du le papier filtre (1er matériau)

teneur en eau du sol w (%)	1,29	5,69	9,59	15,73	19,18	22,99	23,26
teneur en eau du papier filtre (%)	4,74	7,47	10,82	10,81	26,83	91,37	26,94
Succion Ψ (kpa)	90782,05	55634,81	30461,591	30537,80	1725,83	15,08	1691,36

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. Nos résultats sont organisés dans ce tableau suivant :

Tableau. V. 12 Les points expérimentaux mesurés du 1er matériau

Teneur en eau volumique θ (%)	Densité sèche γ_d (g/cm ³)	Teneur en eau w %	Succion Ψ (kpa)
2,02	1,57	1,29	212324,45
8,12	1,43	5,69	282811,92
13,81	1,44	9,59	1588546,75
25,01	1,59	15,73	30537,81
31,07	1,62	19,18	1725,84
36,31	1,58	22,99	58,54
38,15	1,64	23,26	1691,37

V.3.1.1 Détermination de l'allure de courbe de succion :

Pour la variation de la succion en fonction de teneur en eau volumique on ne peut pas tracer la courbe de rétention complète car on n'a pas déterminé un nombre suffisant des points réussis. Pour cela nous allons utiliser les courbes types de succion valable pour chaque sol (sol argileux, sol limoneux, sol sableux). Les points expérimentaux, le type de sol et les courbes type de succion, vont permettre à déterminer l'allure de la courbe de succion, alors, nous allons tracer l'allure de succion de cette argile comme suit en se basant sur les paramètres et les critères cités en avant :

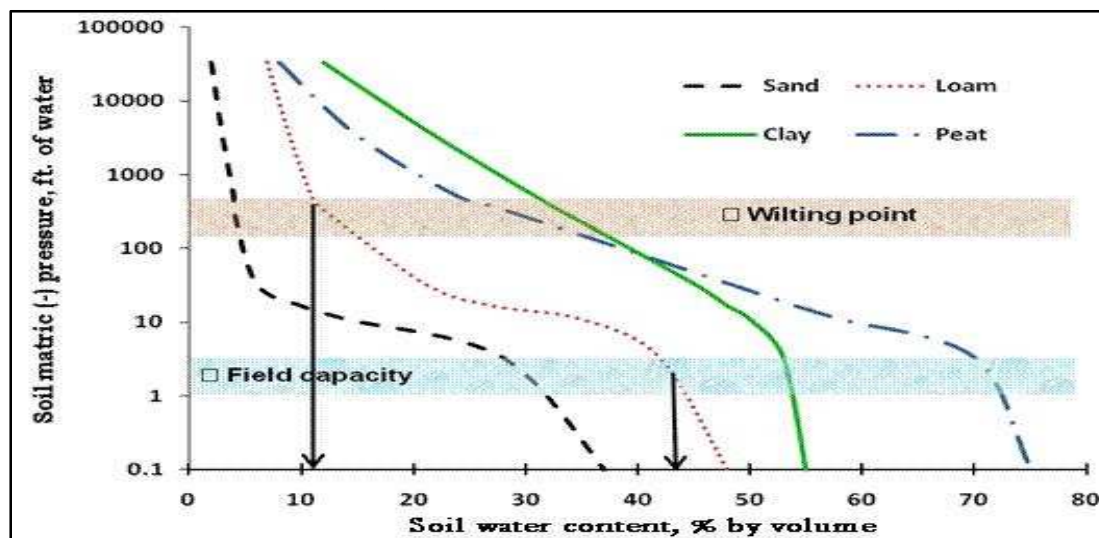


Figure V. 6: Les différentes courbe de rétention selon la nature de sol (thèse doctorat, étude de la rétention d'eau et de la consolidation des sols dans un cadre thermo-hydro-mécanique).

D'après la littérature, on trouve plusieurs types de courbe de rétention, qui change selon la nature de sol. Dans la (figure V.5) nous allons tracer les courbes de succion de différents sols (sable, limon, argile), on schématise les points expérimentaux qu'on a fait par essais, sur la même figure.

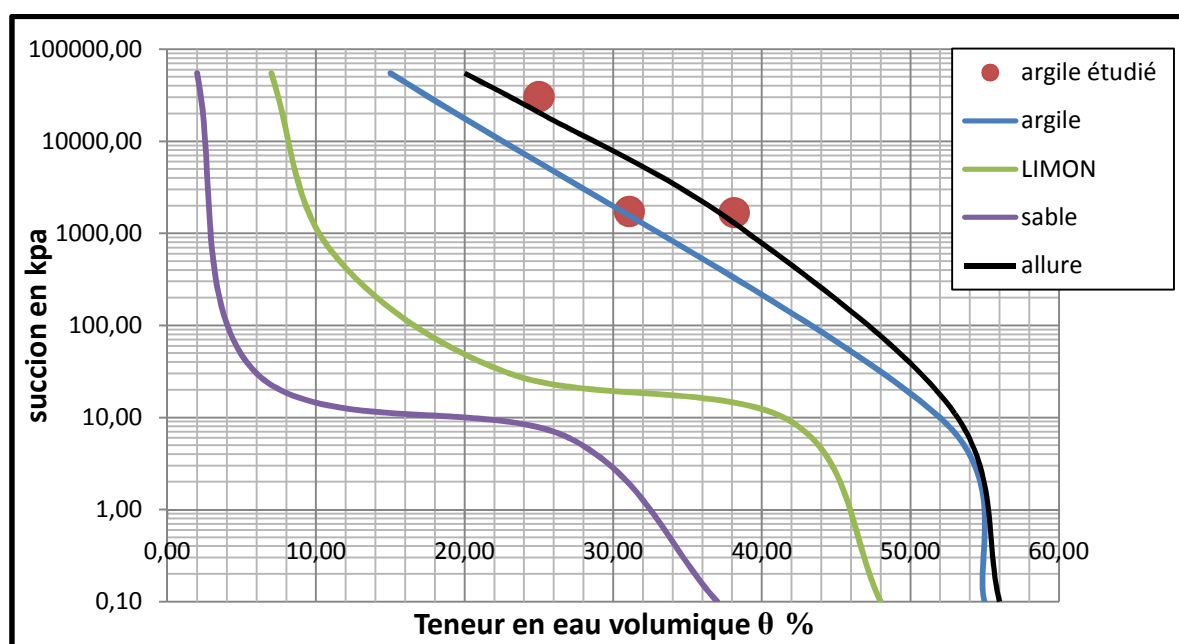


Figure V. 7 Position de la courbe de succion de l'argile par rapport aux autres types de sol et détermination de son allure

Par la suite, d'après la nature de notre sol et le positionnement des points expérimentaux sur la figure. On trace l'allure de succion qui prend la tendance de la courbe de rétention de sol le plus proche aux points d'essai. Dans ce cas, notre sol qui a une nature et un comportement

plus proche à l'argile. L'allure de cette argile est donnée en couleur noir, dans la figure citée précédemment et proche à la courbe de rétention du l'argile

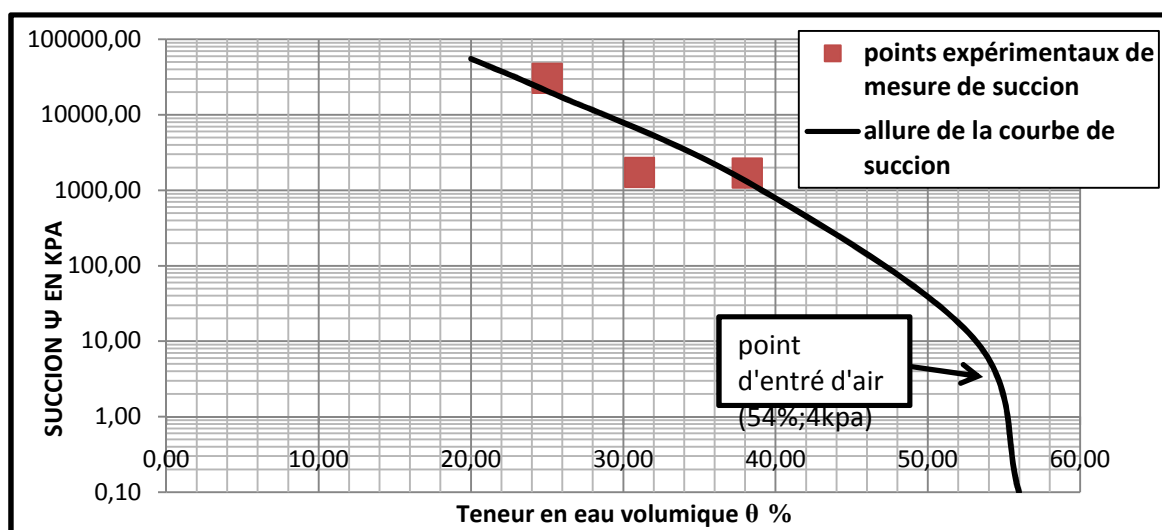


Figure V. 8: Allure de la succion de sable fin et limitation de différente phases (VANAPALLI S.K, et AL .2002)

Le sol étudié est un sol fin, on remarque que lorsque la teneur en eau volumique est supérieure à 54%, le sol commence à présenter une succion faible inférieure à 10 Kpa. Donc on peut considérer que le point (54%; 4Kpa), comme le point d'entrée d'air. Cette phase de petite perturbation, s'arrête au point de saturation (46%; 0.1Kpa).

Dans, la deuxième phase la succion présente une variation importante pour des teneurs en eau très faible, la succion peut aller jusqu'à 55000 Kpa (Figure. V.8)

Matériau 02 (sable)

Par les mêmes étapes on représente les résultats de mesure de succion pour le deuxième matériau

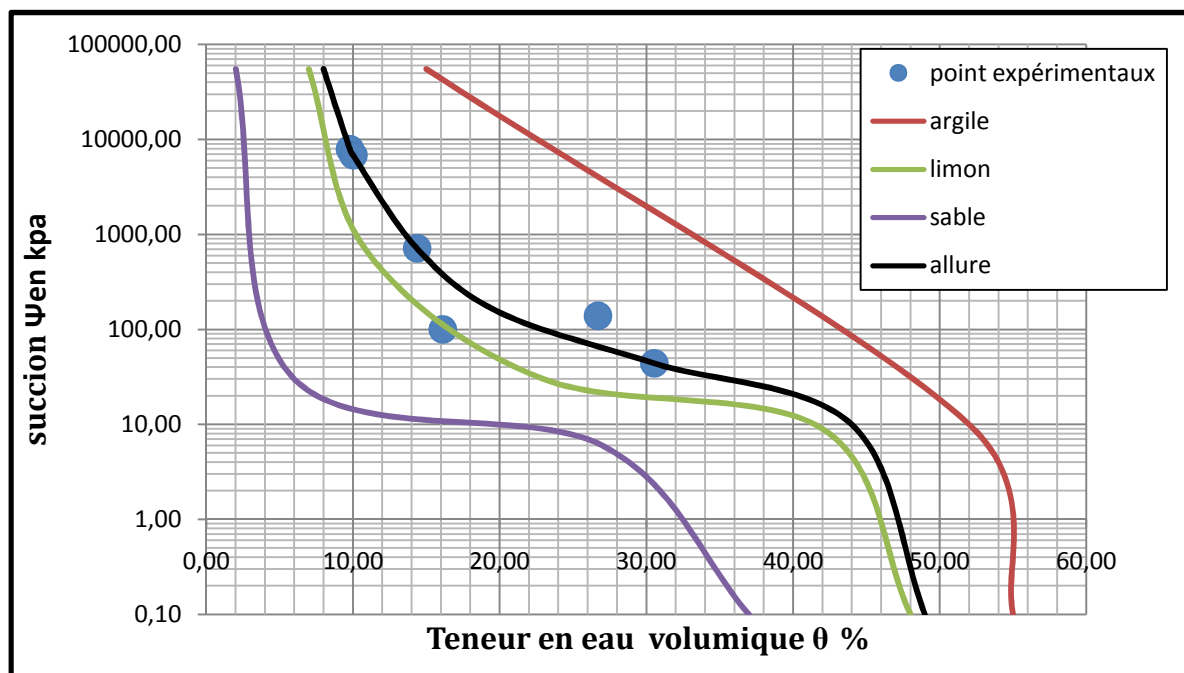
Tableau. V. 13: Résultats de mesure de succion et la teneur en eau du papier filtre (matériau 02)

teneur en eau du sol	0,59	9,17	15,52	18,78	5,86	5,93	8,30
teneur en eau du papier filtre	0,72	42,72	40,88	56,99	18,37	19,19	31,75
succion	186734,41	99,78	138,81	43,92	7873,79	6788,89	714,47

Tableau. V. 14: Les points expérimentaux mesurés (matériau 02)

Teneur en eau volumique θ (%)	Densité sèche γ_d (g/cm ³)	Teneur en eau w %	La succion Ψ (kpa)
0,91	1,52	0,59	186734,41
9,79	1,67	5,86	7873,79
10,02	1,69	5,93	6788,89
14,37	1,73	8,30	714,47
16,12	1,76	9,17	99,78
26,70	1,72	15,52	138,81
30,55	1,63	18,78	43,92

On doit présenter la courbe comme suit

**Figure V. 9:** Positionnement de la courbe de succion de sable par rapport aux autres types de sol et détermination de son allure

On remarque que ce sol, s'approche à la courbe de succion du limon. On explique cette convergence au comportement du limon, par ce que ce sol, est un sable fin qui contient une

fraction non négligeable de fine ; les éléments inférieurs à 80 μm , sont autour de 12%, d'après l'analyse granulométrique de ce dernier.

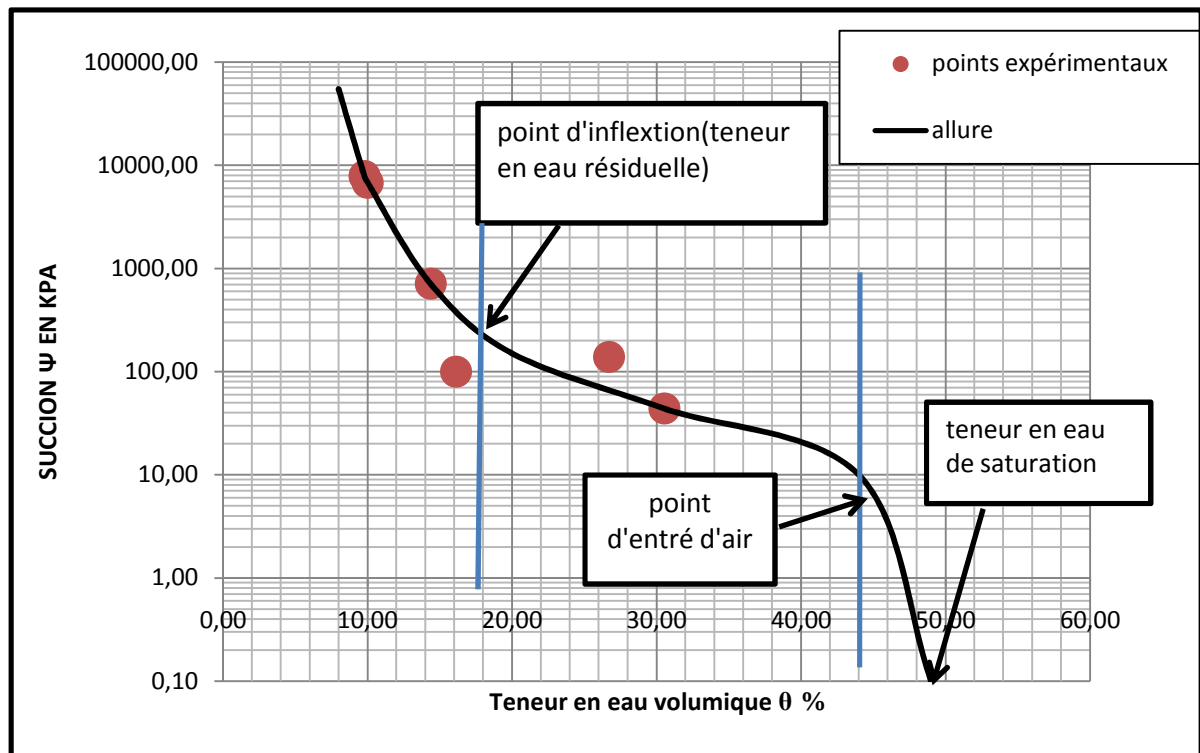


Figure V. 10: Allure de succion du matériau 2 (sable)

Lorsque la teneur en eau volumique est supérieure à 44%, le sol commence à présenter une succion faible inférieure à 10 Kpa. Donc on peut considérer que le point (44%; 10Kpa), comme le point d'entrée d'air. Cette phase de petite perturbation, s'arrête au point de saturation (49%; 0.1Kpa).

Entre une teneur en eau volumique $\theta = 42$ (%), jusqu'à $\theta = 20$ (%), l'allure devient plate, elle commence d'une succion $\Psi = 10$ Kpa, jusqu'à point d'inflexion, teneur en eau résiduelle 18 % et une succion de 200 Kpa. Dans, la dernière phase la succion, présente une variation importante pour des teneurs en eau très faible, la succion peut aller jusqu'à 55000 Kpa (Figure

La courbe de rétention d'eau varie selon les types de sols, plus le sol est fin, plus la pression d'entrée d'air est grande et plus les variations de succion sont importantes. Pour les argiles, la succion peut atteindre plusieurs MPa. Ceci est lié, d'une part, à l'adsorption qui crée une succion osmotique et, d'autre part, à la faible dimension des particules d'argile. Les pores sont alors plus petits, les rayons de courbure des ménisques plus faibles et, d'après la loi de Jurin, la succion peut atteindre des valeurs plus élevées. La teneur en eau résiduelle d'une argile est souvent plus grande que celle d'un sable. Cela est lié essentiellement aux phénomènes d'adsorption, la couche d'eau adsorbée étant plus difficile à extraire et la surface spécifique est plus grande

V.3.2 Essai de portance (Caractérisation pour des éprouvettes destinées aux essais cbr immédiat)**V.3.2.1 Teneur en eau constante :**

On veut étudier l'influence de la teneur en eau sur la portance du sol et pour cela on a compacté notre sol à 3 teneurs en eau fixe et les densités sèches varié , après cette opération toutes les éprouvettes passe au poinçonnement

1. Le premier matériau (argile)

Le tableau suivant représente les valeurs de l'indice cbr obtenu à partir des courbes représentatives en annexes (l'enfoncement en fonction de la force on lit la force F25 correspond à un enfoncement de 2,5 mm et celle correspondant à un enfoncement de 5mm (F50).) pour les 3 teneurs en eau (0% ; 5% ; 10%) et les densités sèches obtenue du sol compacté à différente énergie de compactage.

Tableau. V. 15.récapitulatif des essais cbr selon la teneur en eau et les densités sèche (matériau 01)

teneur en eau ajoutée $\omega(\%)$	n° de l'essai	teneur en eau réelle $\omega(\%)$	densité sèche $\gamma_d(g/m_3)$	indice cbr I_{cbr}
0	1	1,49	1,40	15,29
	2	2,71	1,48	20,31
	3	4,48	1,49	20,31
	4	4,01	1,62	28,70
	5	4,68	1,68	36,85
5	1	7,63	1,56	11,50
	2	6,70	1,61	19,94
	3	6,74	1,66	23,56
	4	6,27	1,69	35,62
	5	6,32	1,71	39,72
10	1	14,79	1,44	9,92
	2	16,00	1,47	26,15
	3	15,73	1,53	17,67
	4	14,80	1,65	29,99
	5	14,68	1,68	38,33

Les résultats obtenus sont exprimés sous forme de graphique dans la figure (V.11)

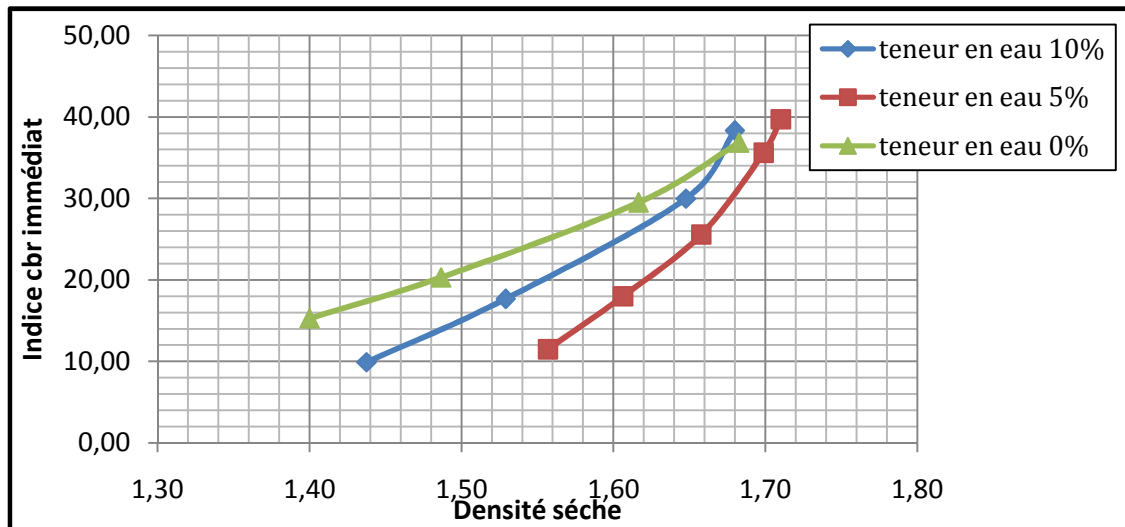


Figure V. 11: Variation de l'indice CBR Immédiat en fonction de la densité sèche pour 3 teneurs en eau (argile)

On présente dans (la figure V.11) les 3 courbes d'indice CBR en fonction de la densité sèche pour les 3 teneurs en eau (0% ; 5% ; 10%) du premier sol l'argile

Les graphes montrent que la densité sèche γ_d varie entre 1,40 g/m³ et 1,72 g/m³ et plus la densité sèche γ_d est plus grande plus l'indice cbr immédiat augmente. Cela est pour les 3 teneurs en eau

On peut retirer aussi à partir de ces résultats que la résistance du sol est plus importante pour une teneur en eau faible (0%) et pour les autres teneurs en eau 5% et 10% on obtient des graphes inversés

Les résultats exposés dans cette section permettant 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

La résistance du sol est plus importante pour des teneurs en eau plus faible, 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

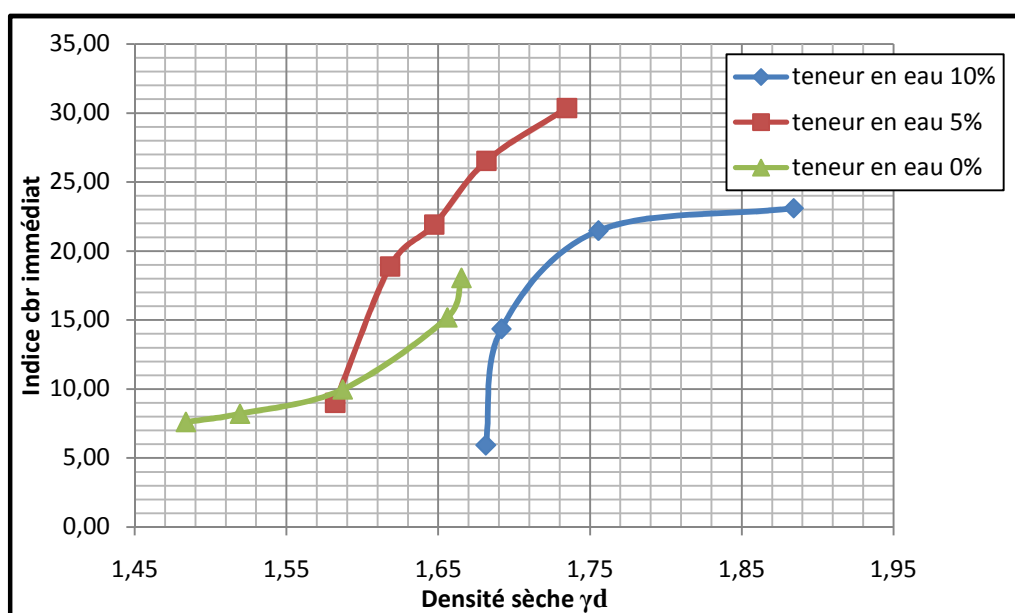
2. deuxième matériau (sable) :

A fin de comparé les résultats obtenues sur l'argile on a appliqué les même essais sur le deuxième matériau

Les résultats obtenues sont représentés dans le tableau (V.16) ainsi les graphes figure (V.12)

Tableau. V. 16:Récapitulatif des essais IPI pour des différentes densités sèches (matériau 02)

teneur en eau ajoutée $\omega(\%)$	n° de l'essai	teneur en eau réelle $\omega(\%)$	densité sèche $\gamma_d(g/m_3)$	indice cbr I_{cbr}
0	1	0,48	1,48	7,60
	2	0,62	1,52	8,40
	3	0,51	1,59	9,60
	4	0,17	1,66	15,80
	5	0,07	1,67	18,04
5	1	3,29	1,58	9,00
	2	5,08	1,62	18,88
	3	5,41	1,65	21,92
	4	5,03	1,68	26,53
	5	3,53	1,73	30,36
10	1	10,31	1,68	5,93
	2	10,79	1,69	14,35
	3	9,56	1,76	21,47
	4	8,64	1,81	20,39
	5	8,18	1,88	23,11

**Figure V. 12:** variation de l'indice CBR immédiat pour différentes densité (sable)

Les courbes obtenues montrent que les densités varient entre 1,48 g/cm³ et 1,67 g/cm³ pour la teneur en eau 0% et de 1,58 g/cm³ à 1,88 g/cm³ pour $\omega = 5\%$ et 10%, le sable présente des densités sèches plus importantes que celle de l'argile

Pour le sable les résultats donnent un différent constat, on peut réaliser des densités importante avec une teneur en eau égale à 0% et pour les autres teneurs en eau l'allure de la teneur 5% est supérieure à celle de 10% ce qui est l'inverse pour les graphes de l'argile

2 Densité constante

Dans les essais précédents on a montré comment la teneur en eau influe sur la portance du sol, pour comparer l'influence des deux paramètres teneur en eau et densité sèche on effectue la deuxième partie des essais de portance et cela par la fixation d'une densité sèche et la variation de la teneur en eau

Les trois densités sèches sont choisies (1,55 ; 1,65 ; 1,75) g/cm³, pour chaque densité sèche le sol a été humidifié à 4 teneur en eau différentes (0%, 5%, 10%, 15%)

1. premier matériau (argile) :

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau (V.17)

Tableau. V. 17: Récapitulatif des essais CBR à des différentes teneurs en eau
(Argile)

densité sèche $\gamma(g/m^3)$	teneur en eau ajouté $\omega(\%)$	teneur en eau réelle $\omega(\%)$	indice cbr immédiat
1,55	0	0,70	9,15
	5	6,31	14,83
	10	11,89	23,29
	15	16,53	33,87
1,65	0	0,53	30,19
	5	6,82	35,49
	10	11,70	40,24
	15	16,14	42,28
1,75	0	0,91	33,53
	5	4,26	43,97
	10	10,80	63,73
	15	14,41	72,04

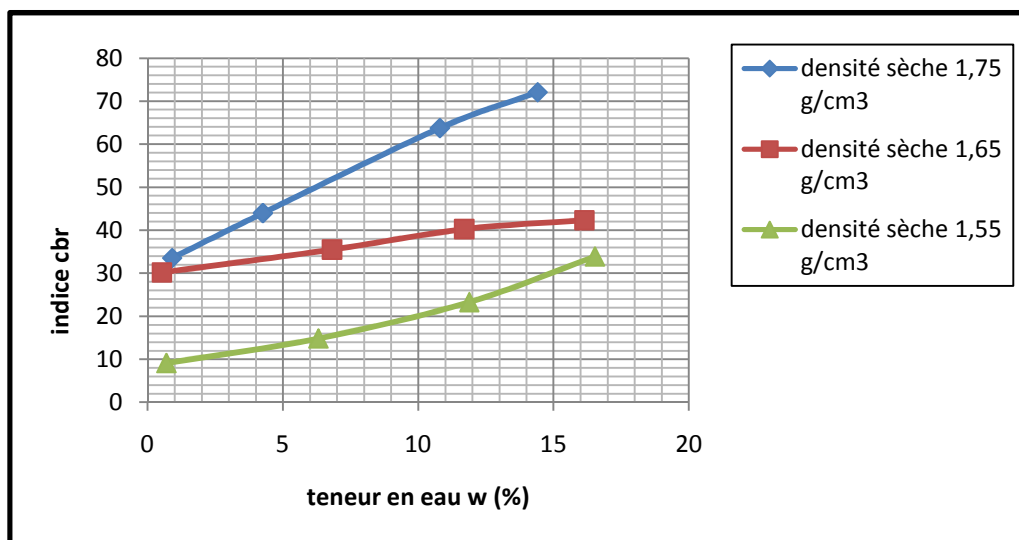


Figure V. 13: variation de Icbr pour différentes teneurs en eau (argile)

Sur la figure, Les courbes obtenues des essais de poinçonnement réalisés sur l'ensemble des éprouvettes, montrent que l'indice CBR est plus important pour une densité sèche importante, Les courbes montrent que plus la densité sèche est grande plus l'indice CBR augmente

On a montré déjà que la portance du sol est plus importante pour des teneurs en eau faible, alors que les résultats obtenus dans cette section ne suivent pas cette logique, comme indique la figure (V.13)

2. deuxième matériau (sable) :

Tableau. V. 18:Récapitulatif des essais cbr des différentes teneurs en eau (sable)

densité sèche $\gamma(g/m^3)$	teneur en eau ajoutée $\omega(\%)$	teneur en eau réelle $\omega(\%)$	indice cbr
1,55	0	0,43	9,36
	5	5,78	12,23
	10	9,89	16,76
	15	14,92	25,03
1,65	0	0,95	15,86
	5	5,05	18,27
	10	9,36	21,90
	15	14,43	30,96
1,75	0	1,07	19,94
	5	5,25	25,52
	10	9,48	34,89
	15	14,07	39,46

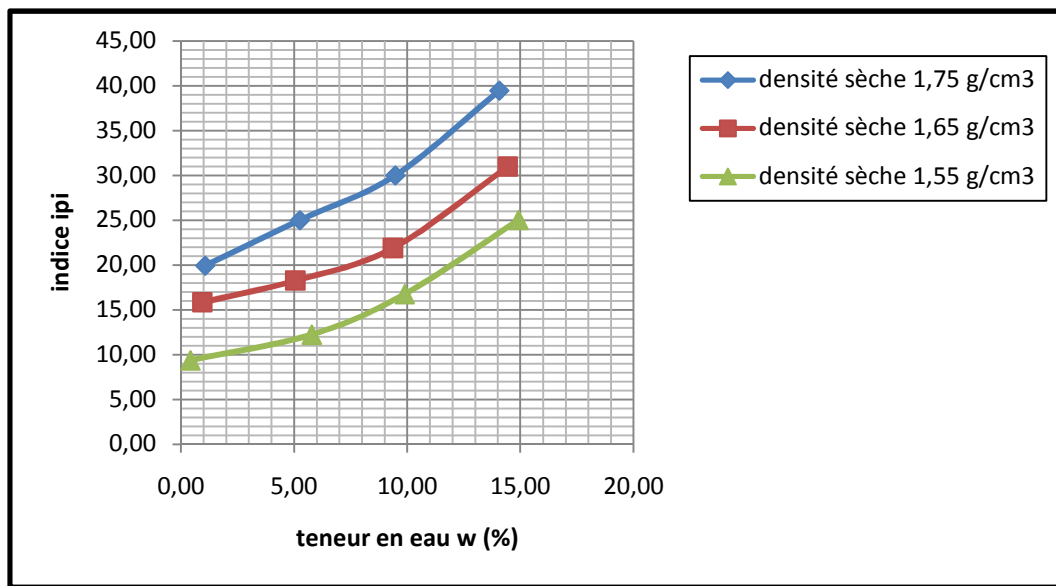


Figure V. 14: variation de l'indice cbr en fonction de la teneur en eau (sable)

Sur la figure (V.14), on présente les courbes de l'indice cbr en fonction de la teneur en eau pour les trois densités sèches réalisées sur le sable,

Comparons entre les deux sols sable et argile, pour la même densité et même teneur en eau le sable donne des indices cbr plus faible que l'argile

Le gradient de densité a une très grande importance pratique dans le compactage, en effet, la densité fond de couche de ces couches a une très forte influence sur la durée de vie de la chaussée. Si l'assise a une épaisseur telle que la décroissance de la densité soit très forte, il est préférable de, soit diminuer l'épaisseur, soit utiliser un compacteur plus puissant. Chaque fois qu'il est possible, le choix de cette solution est préférable

V.3.3 Superposition de la courbe de rétention avec la courbe de l'indice cbr en fonction de la teneur eau volumique :

On présente en parallèle les succions et la courbe de l'indice cbr en fonction de la teneur en eau volumique. Pour chaque branche, on souligne l'élément qui influence l'indice cbr, de telle façon, de bien comprendre les phénomènes qui se produisent.

1^{er} matériau (sable)

On superpose la courbe indice cbr en fonction de la teneur en eau volumique pour les 3 densités sèches avec l'allure de succion (figure 14), on extrait les constats suivants :

- l'augmentation de la teneur en eau volumique donne des succions faibles voir nulle à des teneurs en eau très importantes
- L'indice cbr augmente avec la densité sèche malgré l'augmentation de la teneur en eau volumique.

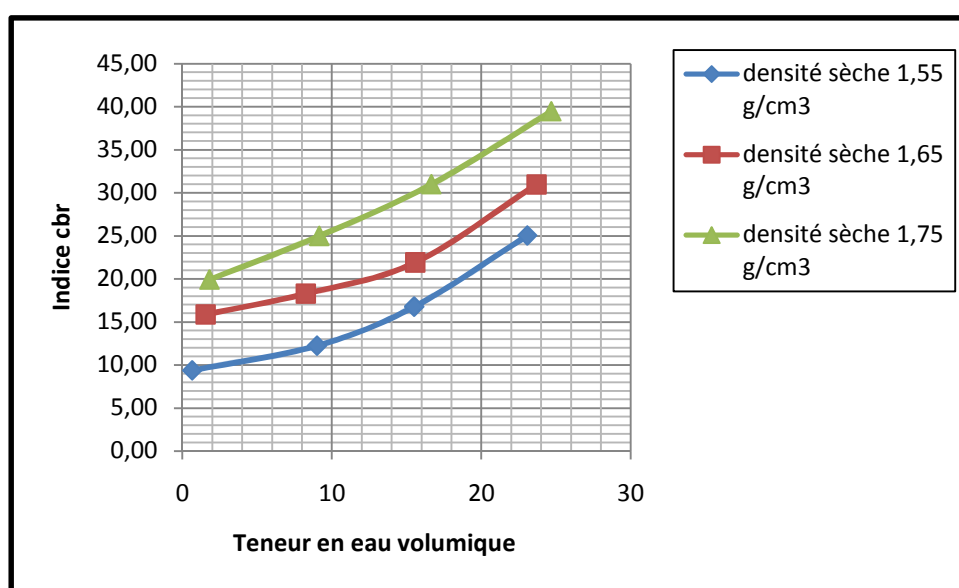
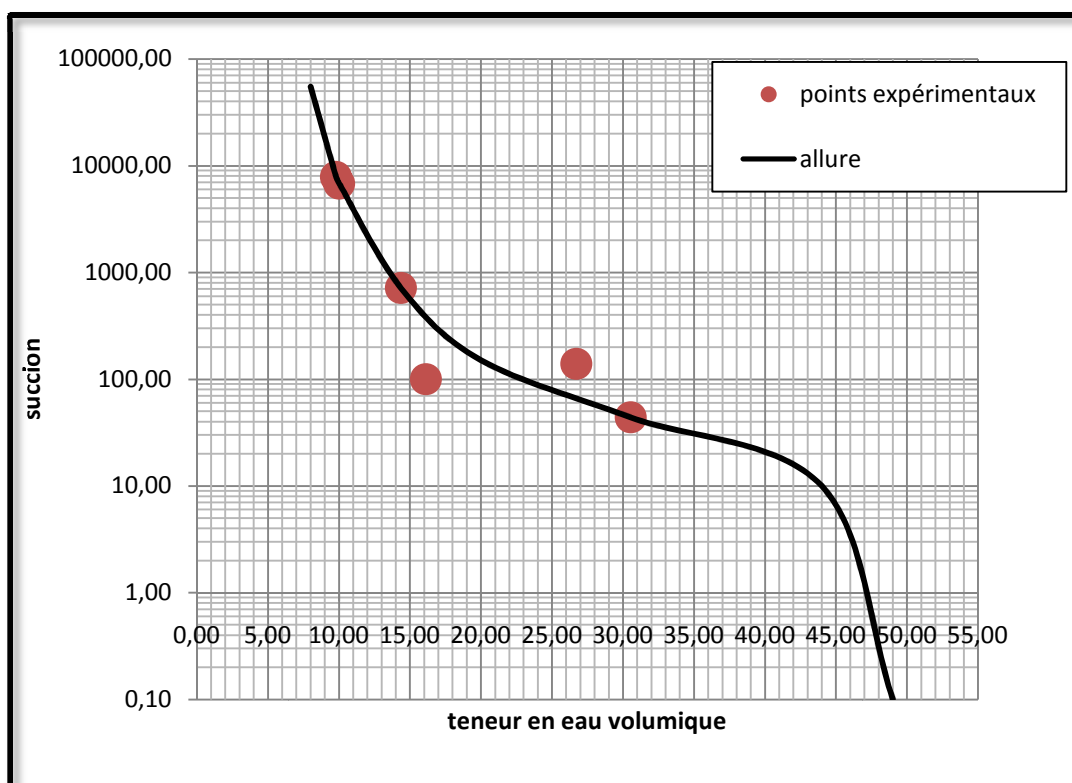


Figure V. 15. Superposition de la courbe de succion(sable) et la courbe de l'indice cbr en fonction de la teneur en eau volumique

Au fur et à mesure que les états deviennent secs, il semblerait que la portance soit fortement contrôlée par la succion du sol, mais, on observe, à la ligne de saturation, où la succion du sol est théoriquement nulle, le cbr augmente avec la densité sèche, c'est-à-dire avec l'augmentation de l'assemblage des interparticules.

On conclure que la succion n'a aucun influence sur la portance du sol par contre la densité sèche joue un rôle très important sur cette dernière.

2eme matériau (argile) :

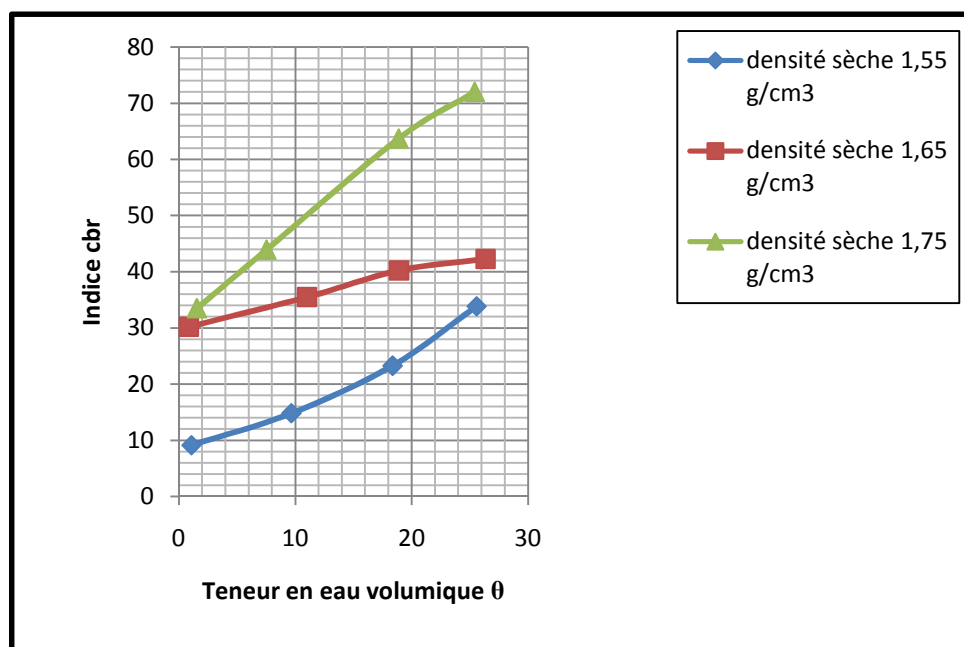
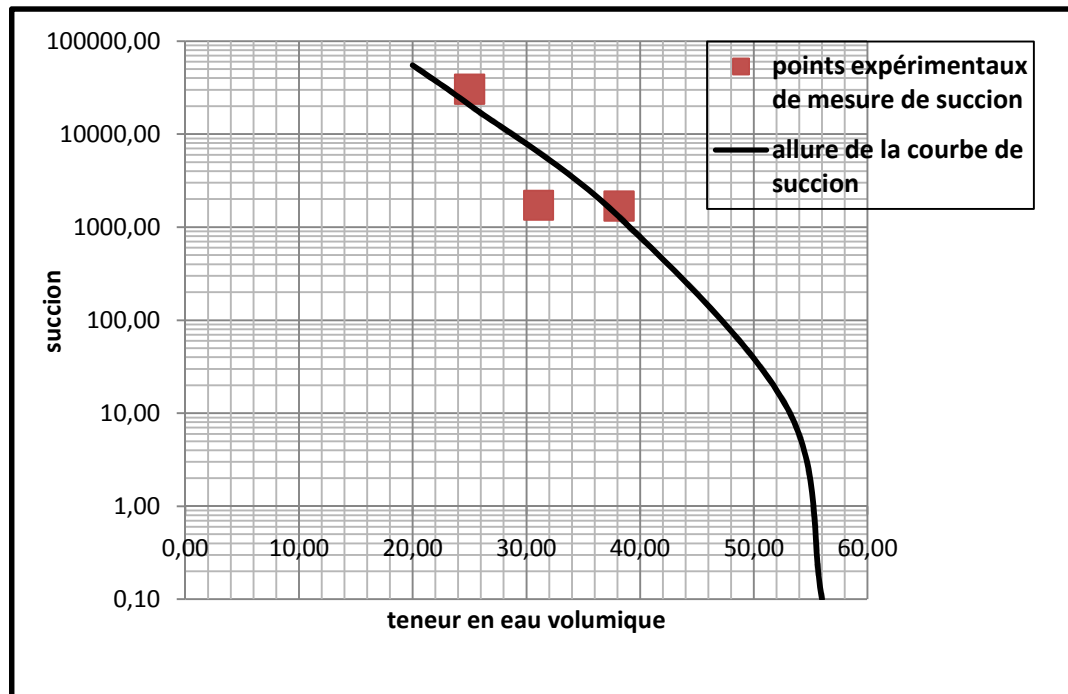


Figure V. 16. Superposition de la courbe de succion et la courbe de l'indice cbr en fonction de la teneur en eau volumique argile

Comparaison entre les deux sols

L'argile marque des suctions plus importantes par rapport au sable, donc le phénomène de surface est très important dans ce matériau

Concernant la portance, le sable est fin (sol grenus), ce qui à donne une portance plus faible que l'argile, la force de frottement dérange la réorganisation des grains, donc, elle gêne l'augmentation de la densité sèche. Cette force de frottement entre les grains, elle est négative, elle travaille contre le compactage.

V.4 Conclusion

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de ce chapitre :

- Les mesures de la succion effectuées révèlent que plus l'échantillon est sec plus la succion est importante. Une petite variation de teneur en eau engendre une grande variation de succion.
- Les courbes obtenues à partir des essais cbr immédiat à des teneurs en eau constantes, indiquent que le matériau présente une résistance meilleure quand la teneur en eau diminue.
- les essais cbr immédiat à des densités sèche constantes ont montrés que plus la densité sèche augmente plus l'indice cbr augmente malgré l'augmentation de la teneur en eau
- l'utilisation de la courbe de succion nous a aider à constater que la succion n'a pas d'influence sur la portance du sol par contre le paramètre le plus influent est la densité sèche
- A la fin, on peut retenir que le sable a une succion plus faible que l'argile ainsi que la portance.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans la thématique portant sur l'étude du comportement des sols non saturés compactés utilisés dans les ouvrages en terre tels que les remblais et les noyaux de barrages.

L'étude bibliographique élaborée a permis d'élucider l'ensemble des aspects et critères en relation avec les paramètres influençant le compactage des sols, on a consacré une part importante à la portance du sol ainsi à la succion des sols non saturé.

Les sols utilisés sont prélevés au niveau des aménagements routiers (Bouinan wilaya de Blida).les deux échantillons utilisés pour étudier le comportement et la portance des sols. On a étudié plus particulièrement les trois paramètres les plus influençant (la densité, la teneur en eau et la succion) sur la portance du sol (indice CBR).

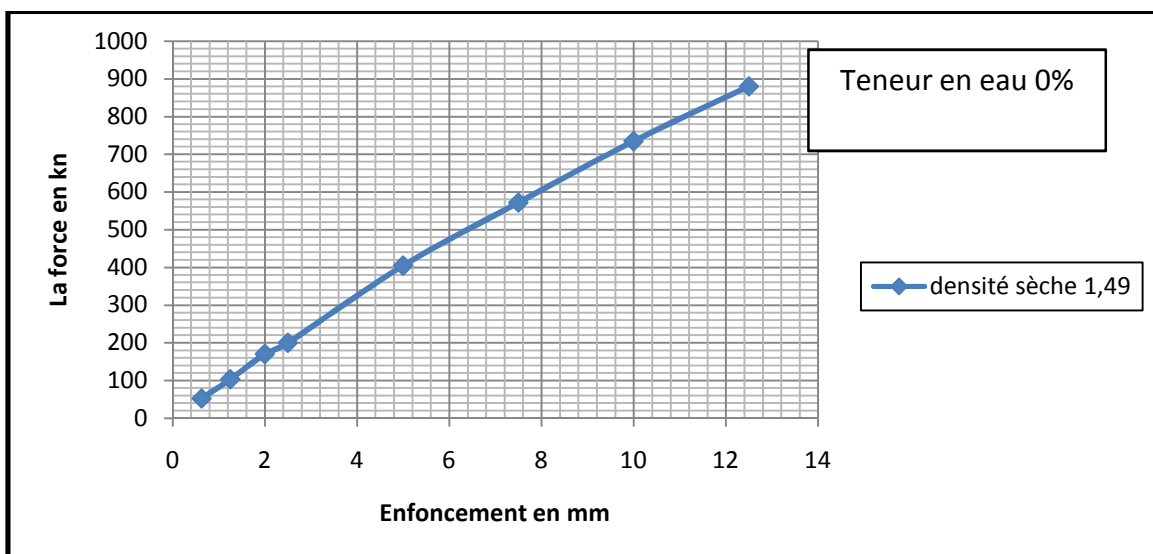
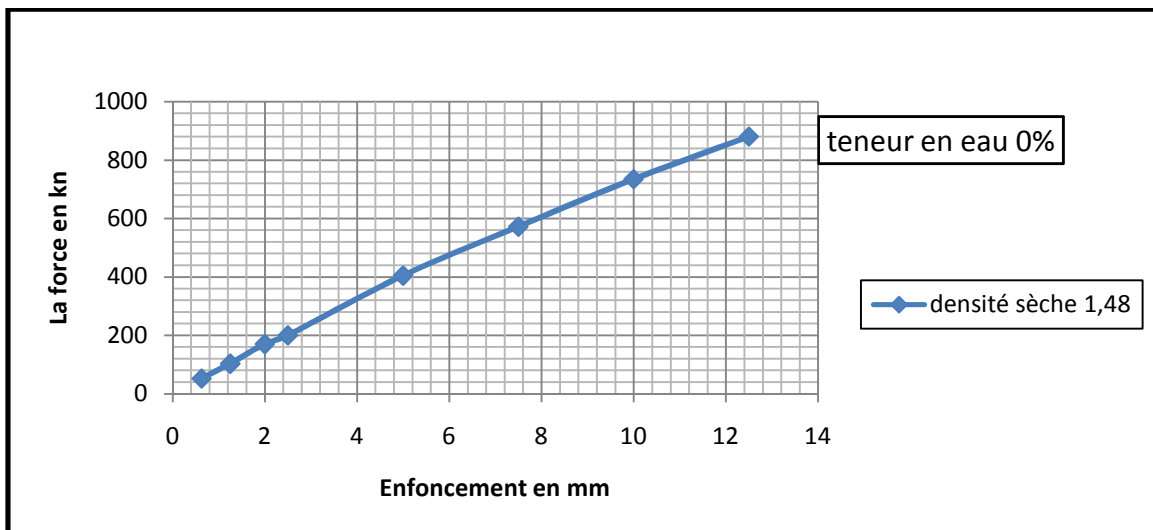
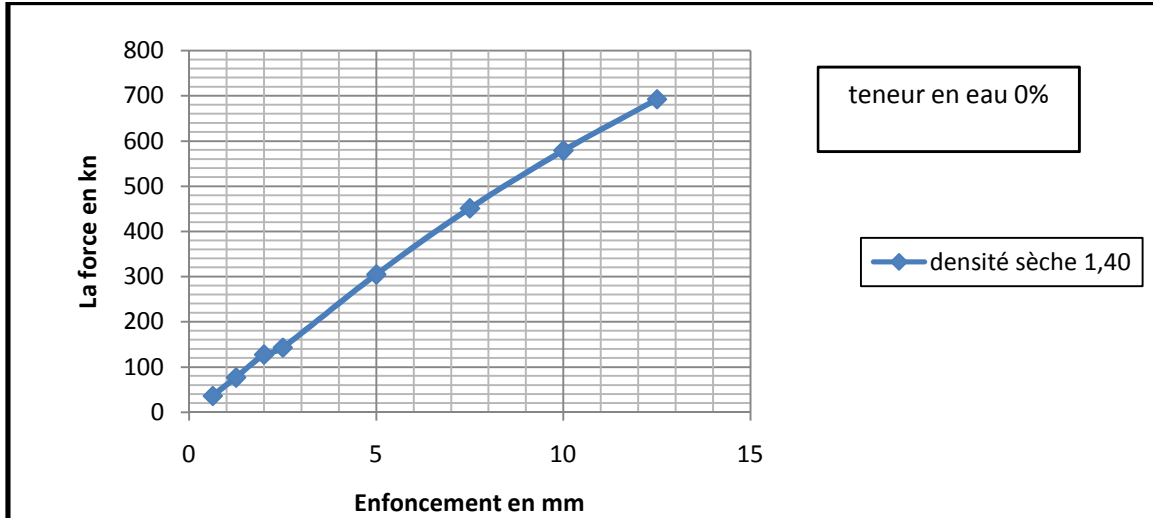
A l'issue de ce travail, nous pouvons tirer les principales conclusions, qui sont en accord avec des observations déjà établies par d'autres auteurs.

- ✓ l'indentification géotechnique de ces matériaux s'appuie essentiellement sur des données relative à la granulométrie, aux limites d'atterberg, l'équivalent de sable, la valeur de bleu de Mytilène et les essais chimiques et leur propriété, le premier échantillon s'agit d'une argile et deuxième est un sable.
- ✓ Les résultats des mesures réalisées par Wathman 42, indiquent que la succion augmente quand la teneur en eau diminue.
- ✓ d'après les essais de la succion mesurée dans cette étude, on constate que la succion dans le sol argileux moyennement plastique, diminue lorsque sa teneur en eau augmente. Cette augmentation est liée au phénomène de surface ; c'est-à-dire que lorsque la teneur en eau diminue les force dues au phénomène de surface augmente et par conséquent le potentiel de sol augmente et la quantité d'eau absorbé par papier filtre diminue.
- ✓ les résultats d'essais de portance I.CBR immédiat réalisés sur l'ensemble des éprouvettes Compactées, ont permis d'illustrer que leur résistance augmente avec le décroissement de la teneur en eau. Ce la peut être expliqué par le frottement important entre les grains de sol par contre pour des humidités importantes l'eau joue un rôle d'un lubrifiant.
- ✓ On note que pour certaines teneur en eau fixe et la densité sèche variable on trouve que la portance augmente avec l'augmentation de la teneur en eau cela montre que la densité sèche est le paramètre le plus prépondérant.

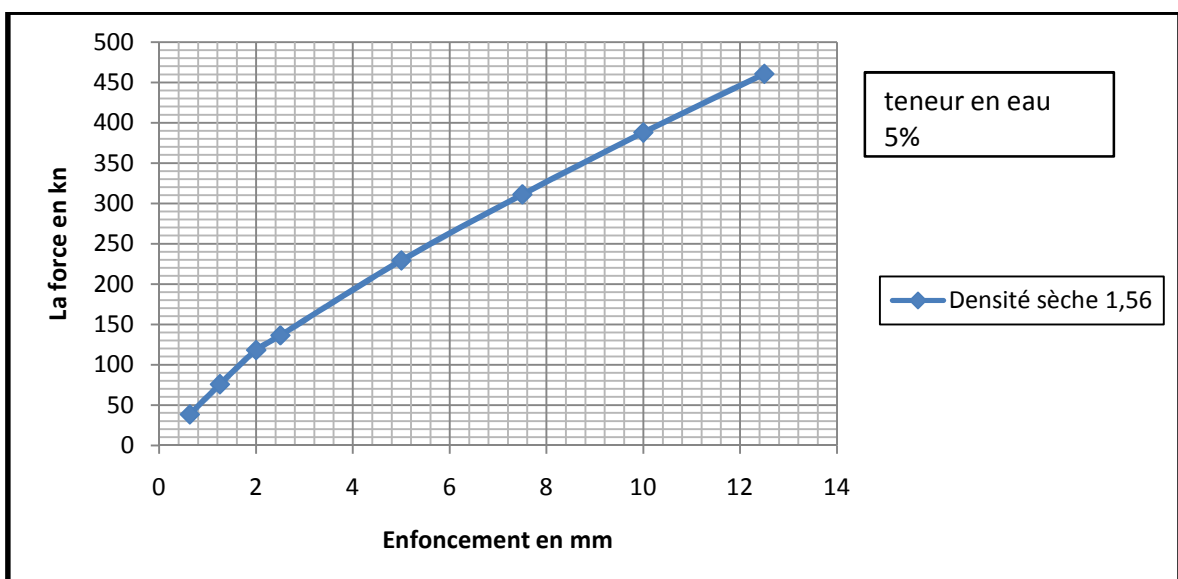
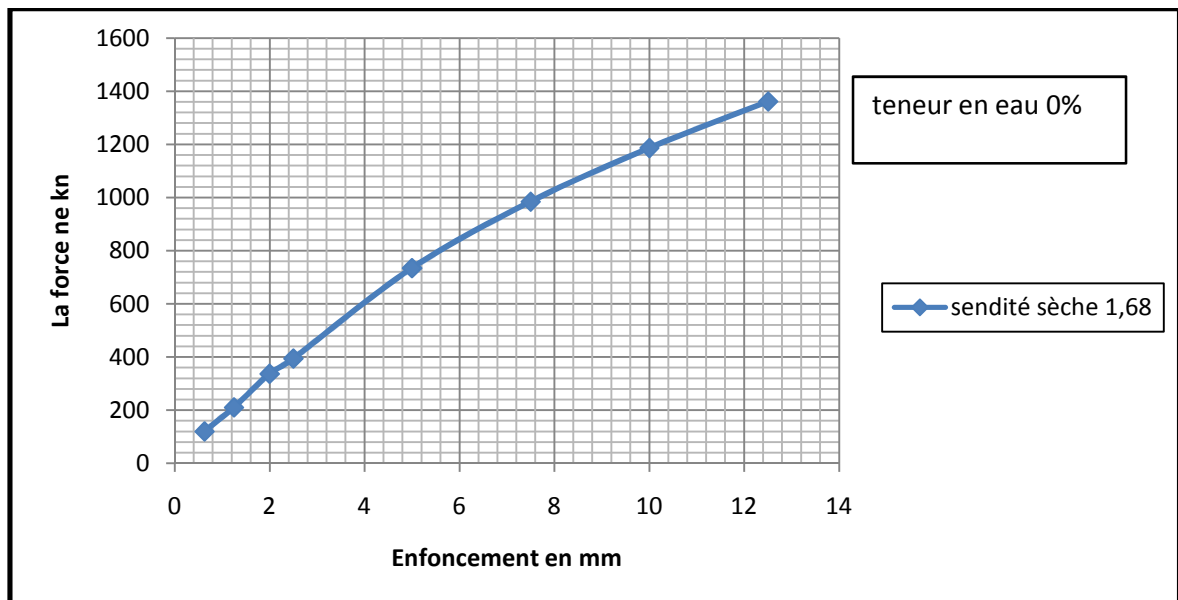
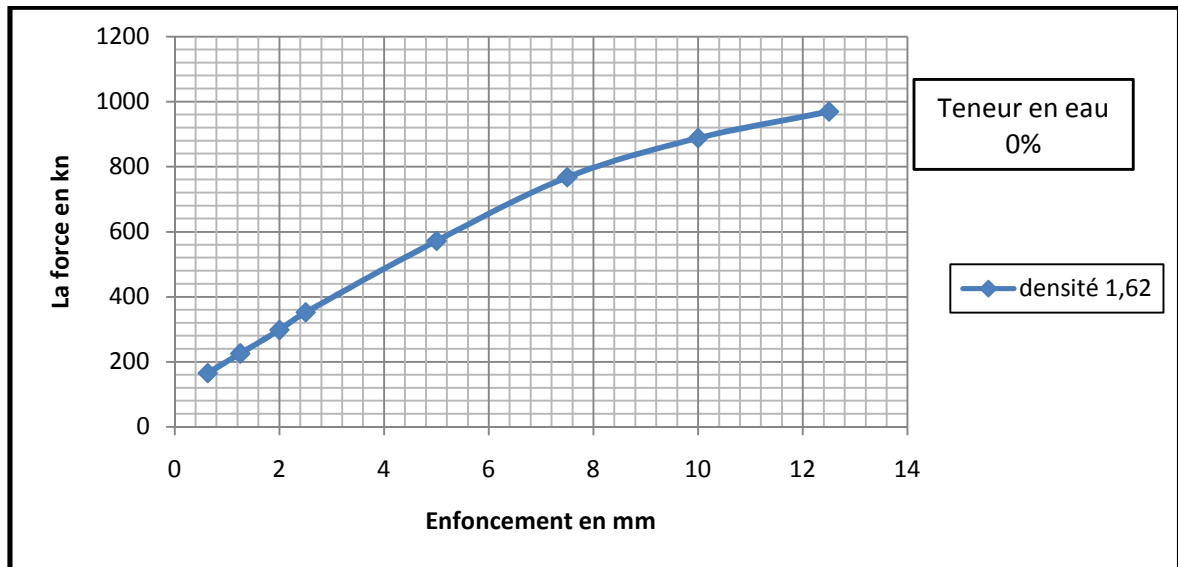
Annexe

Les courbes des essais cbr

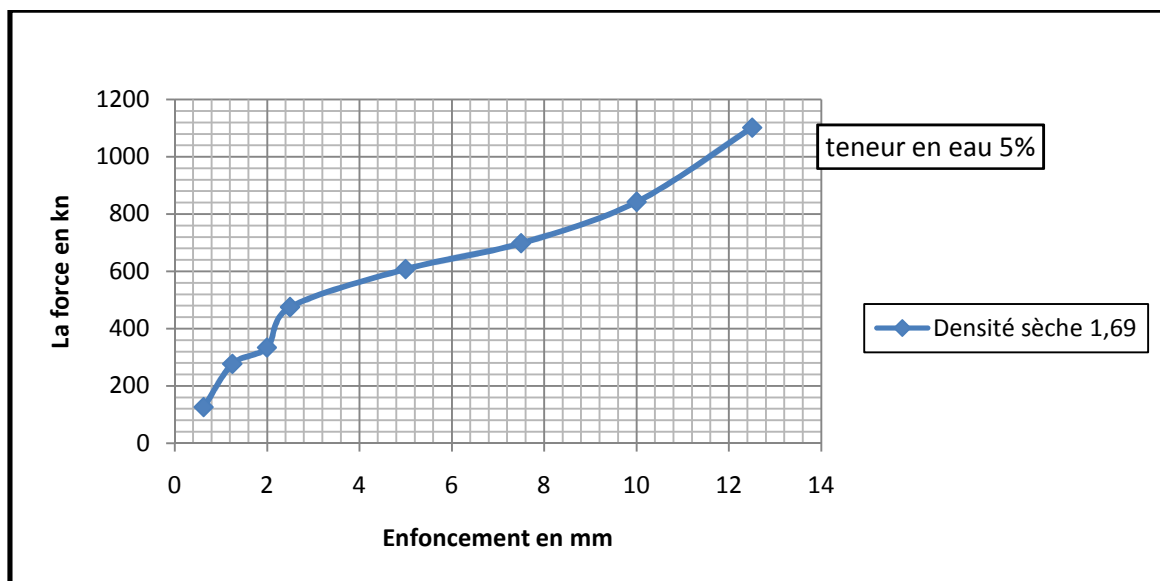
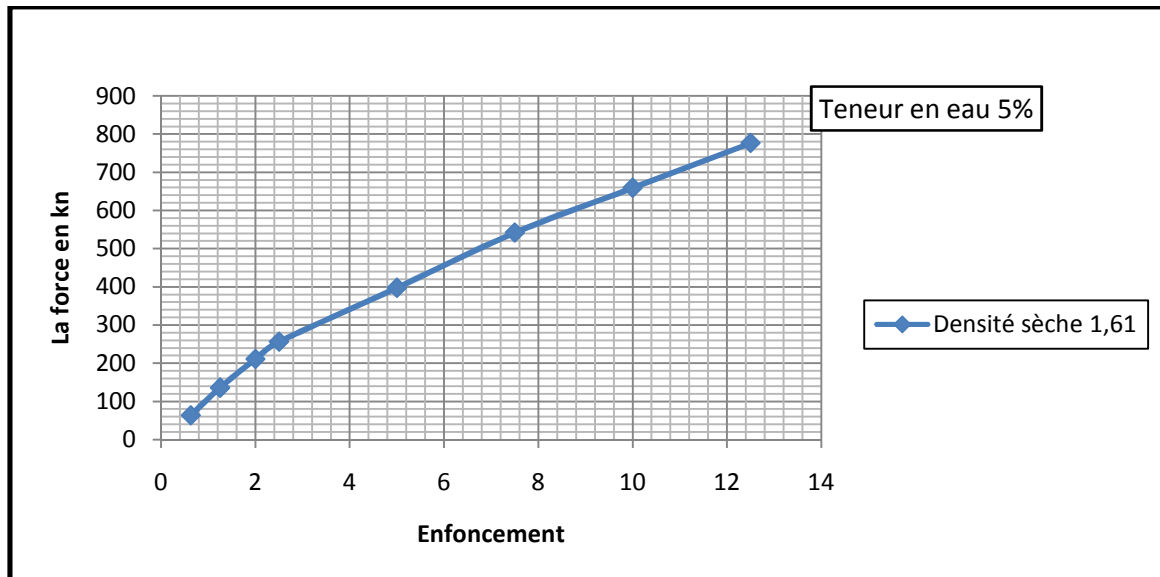
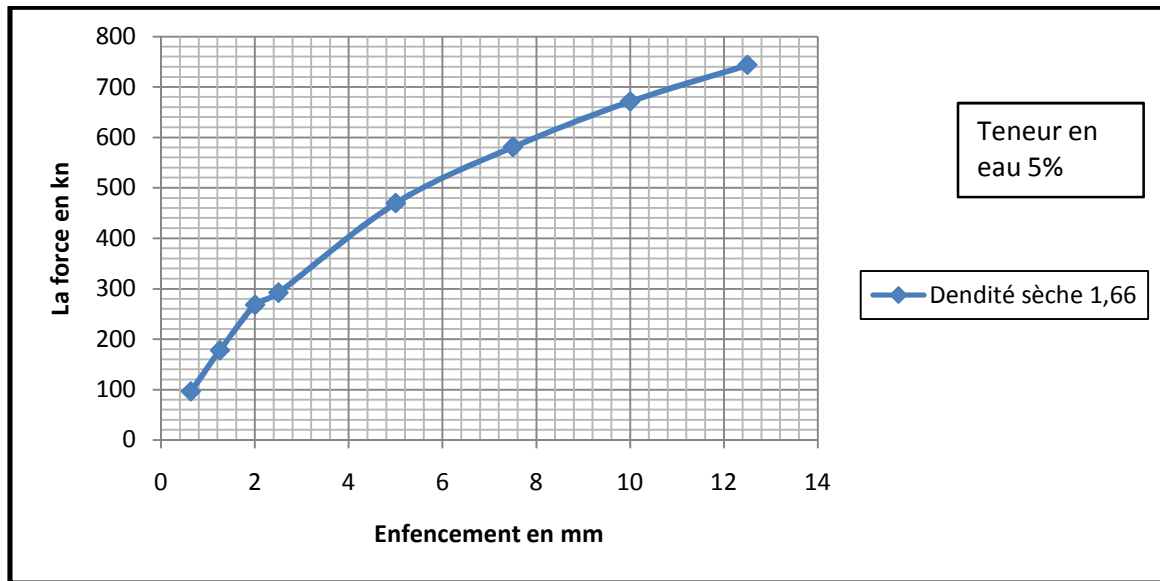
1. Teneur en eau constante



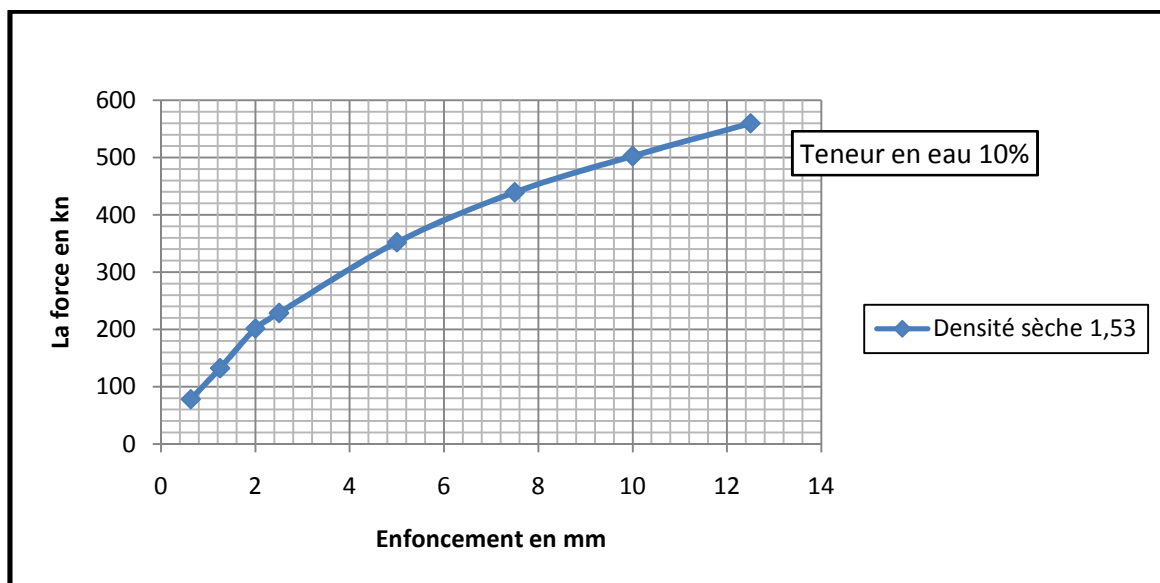
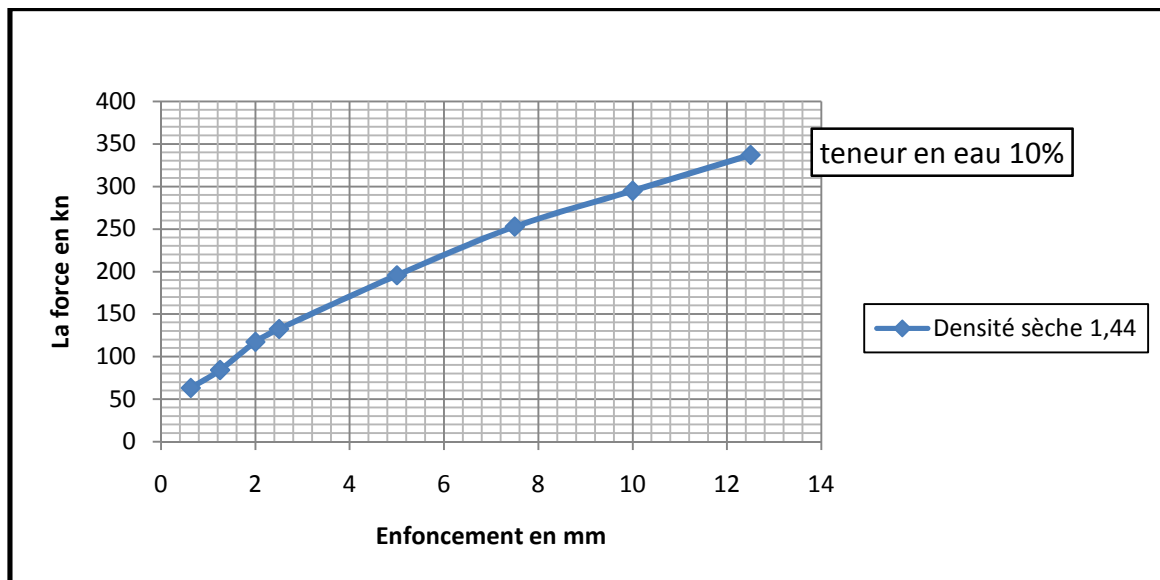
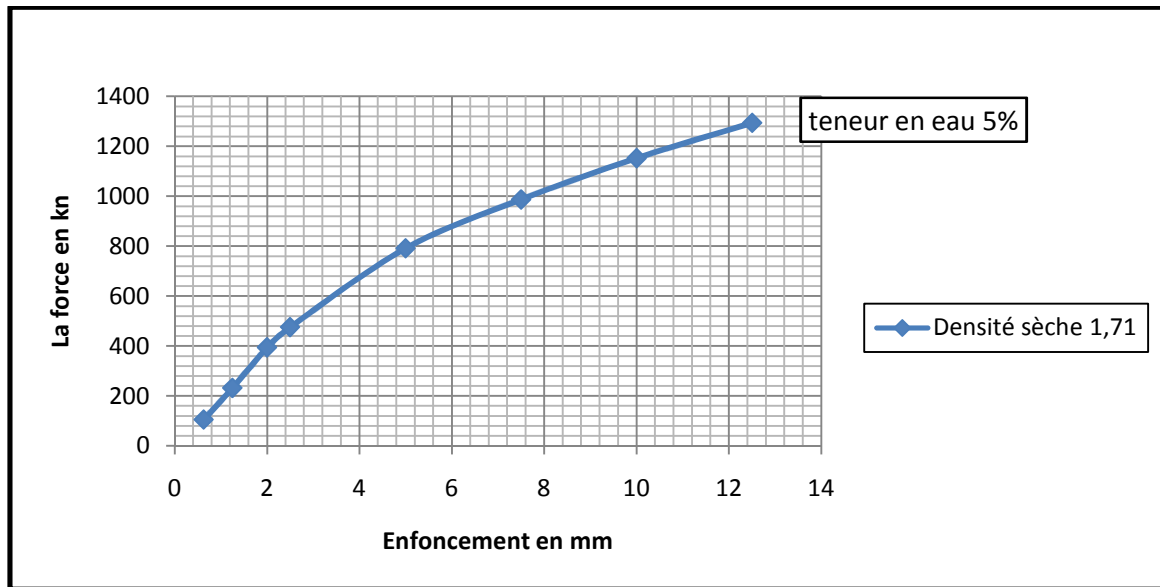
ANNEXE



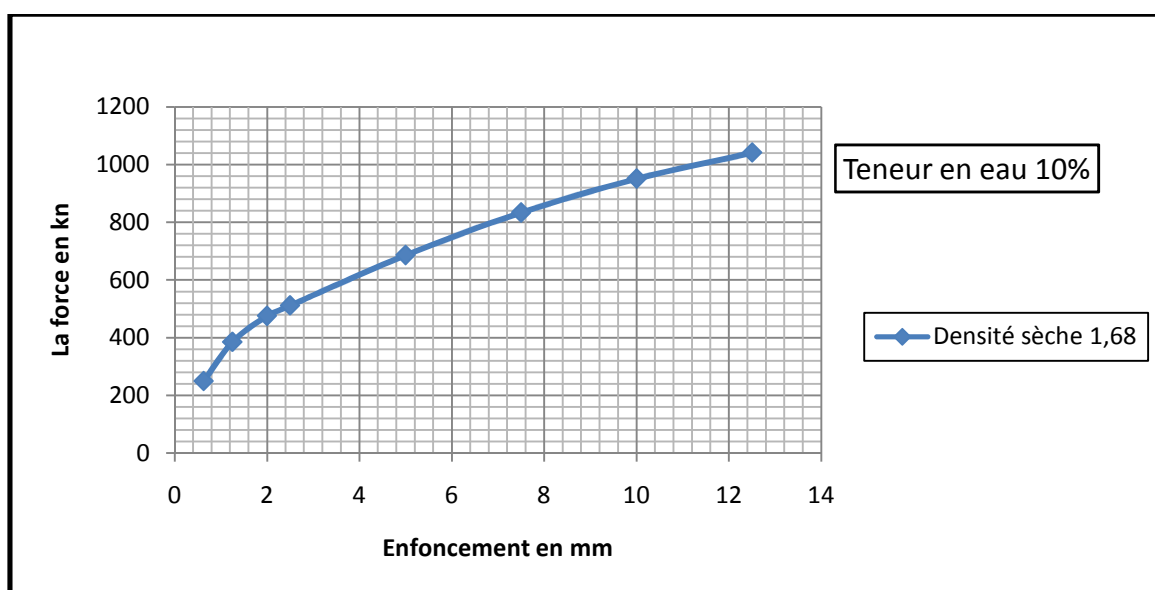
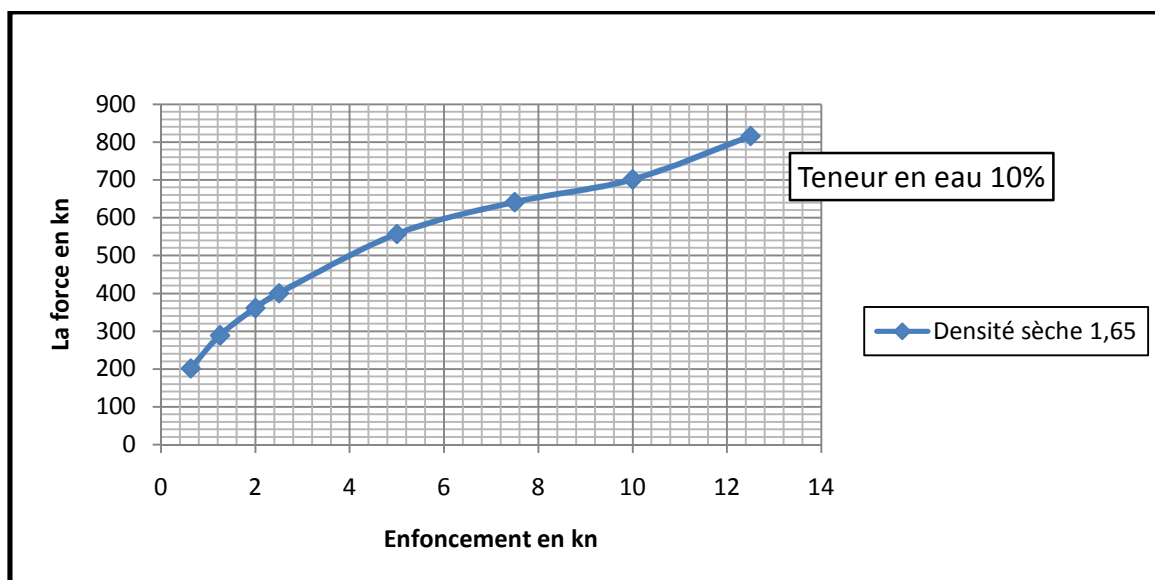
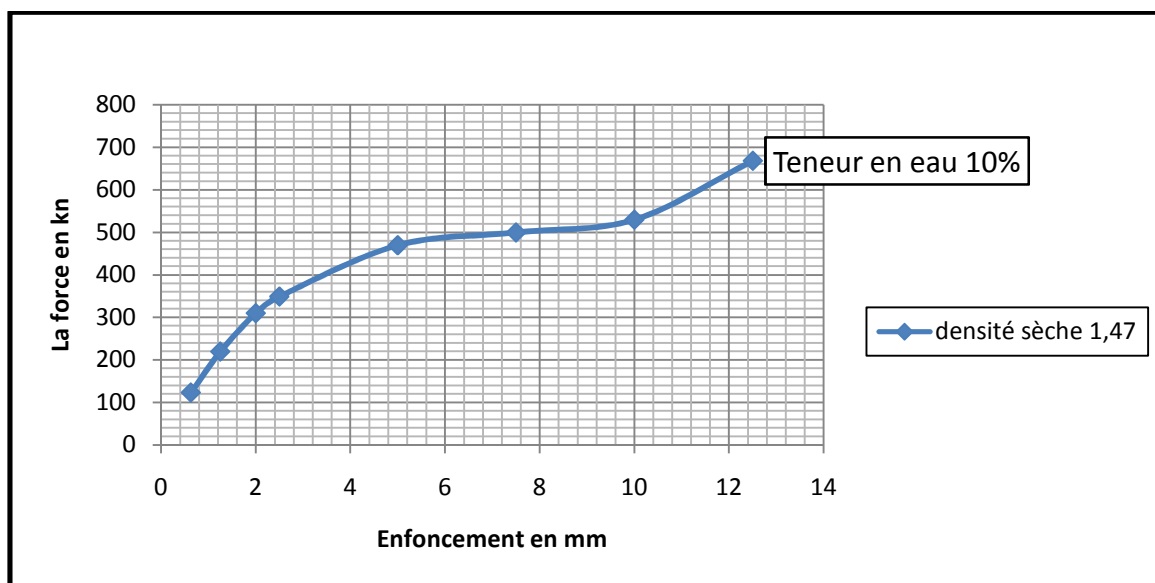
ANNEXE



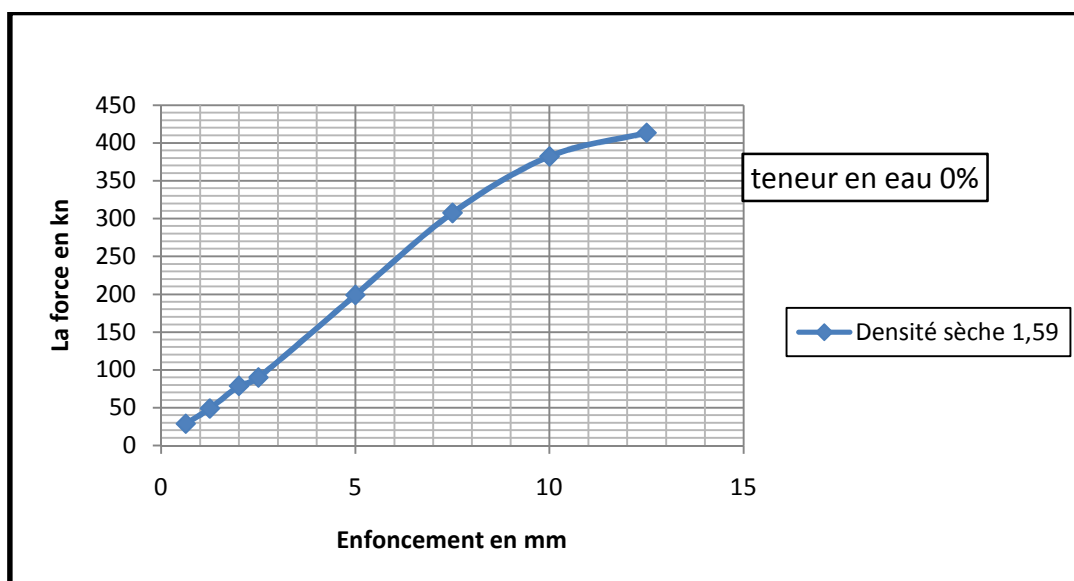
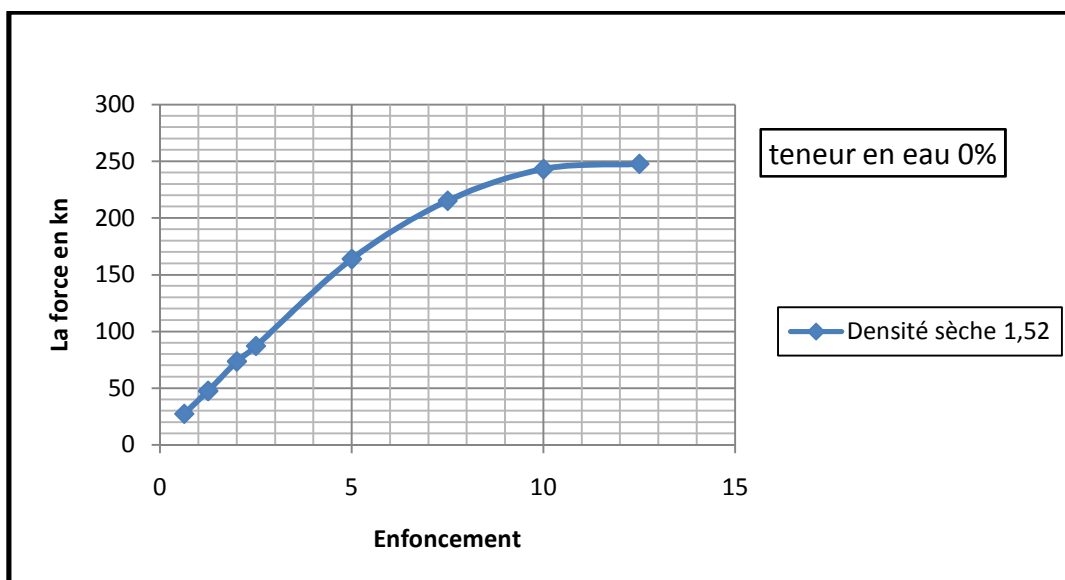
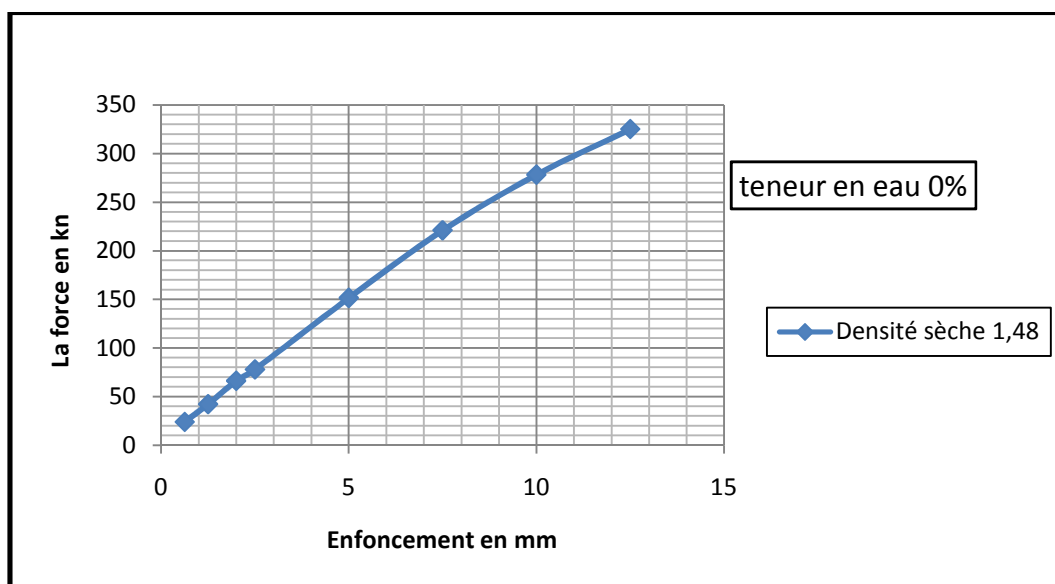
ANNEXE



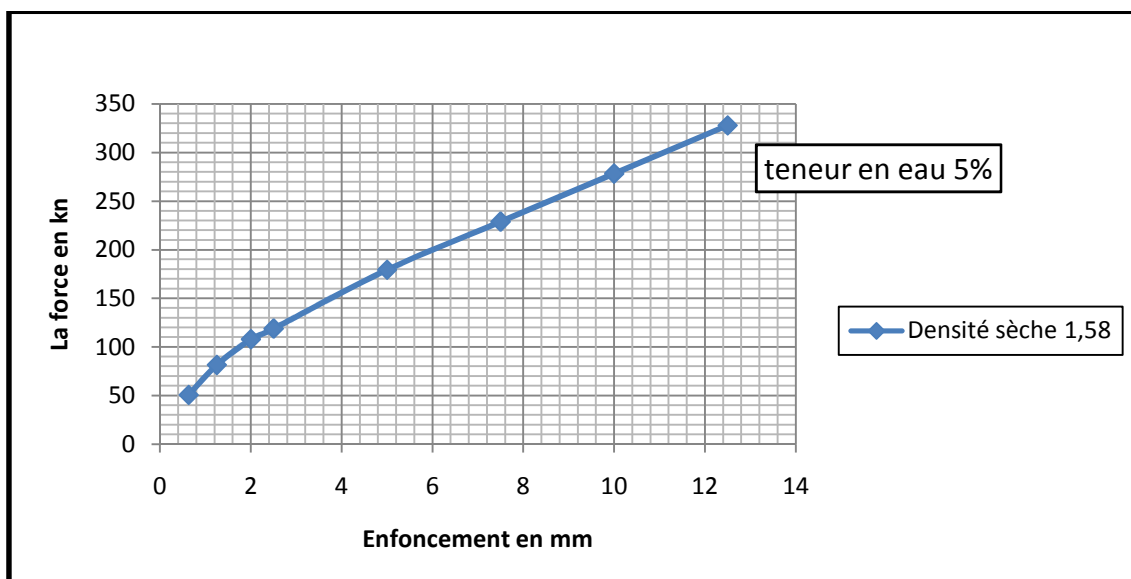
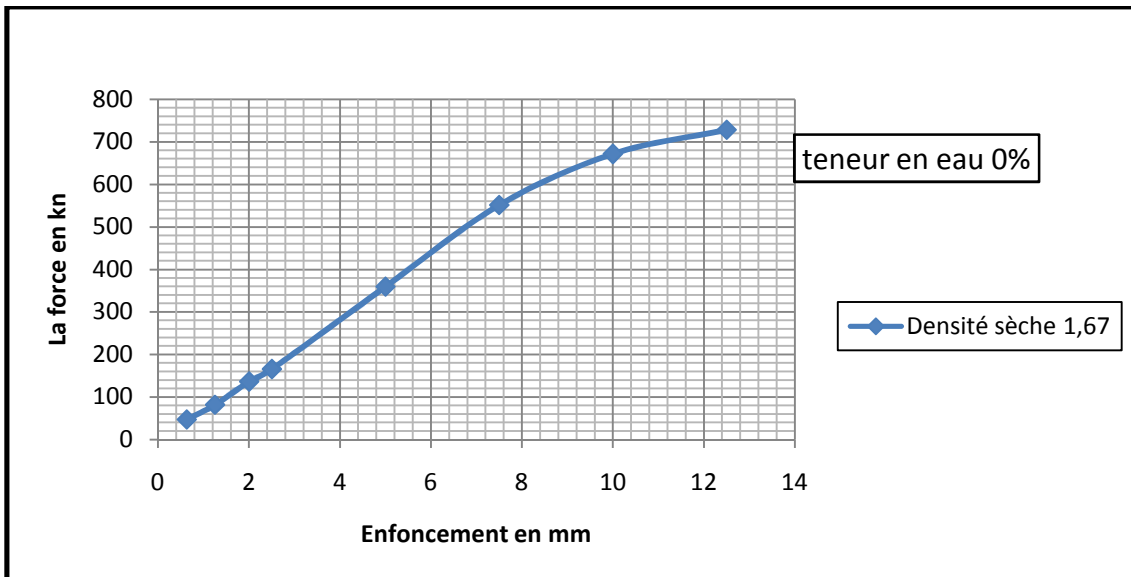
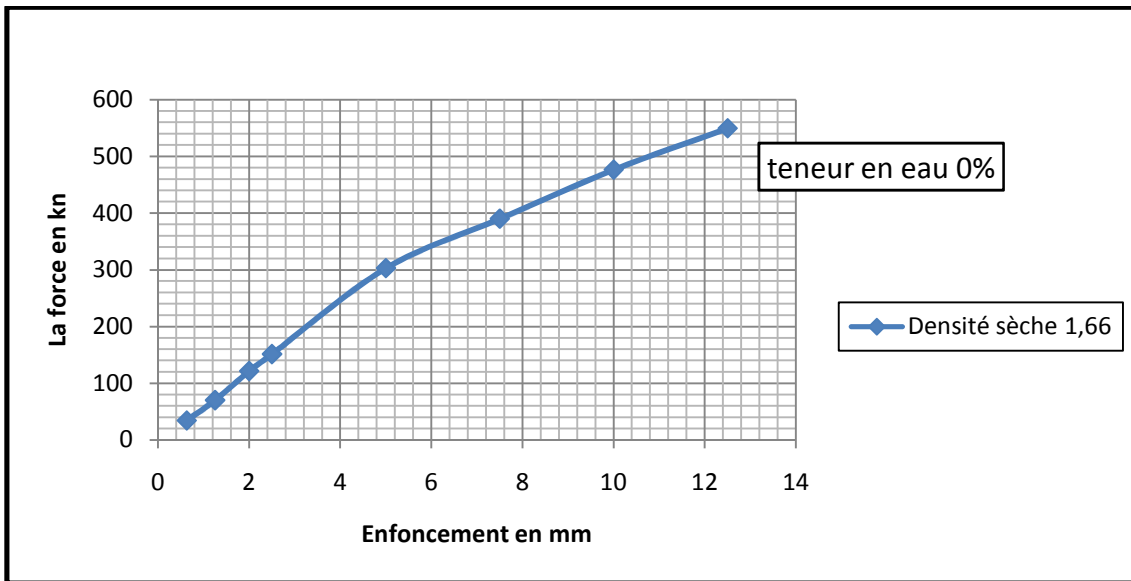
ANNEXE



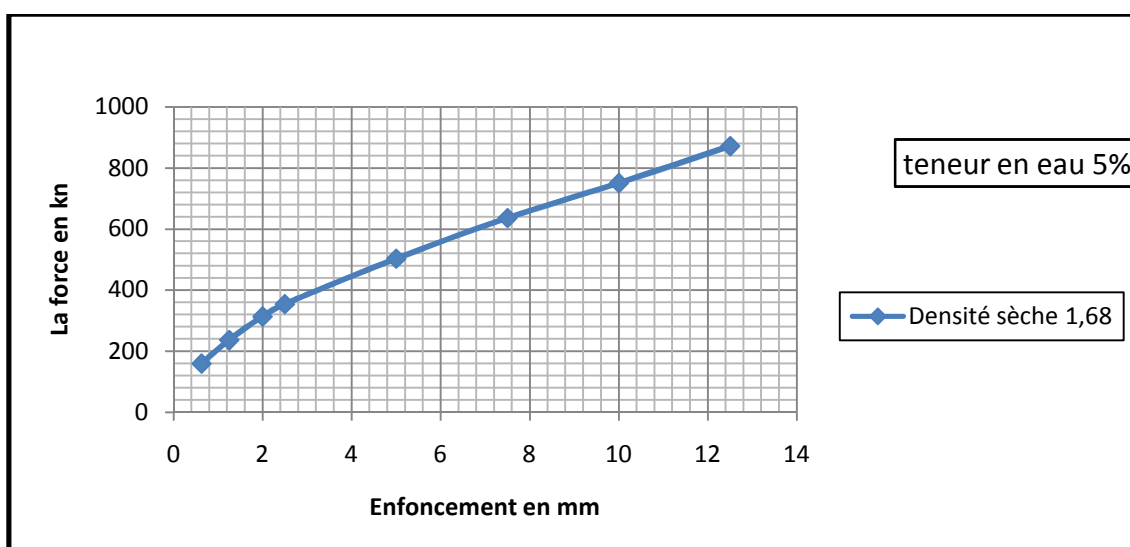
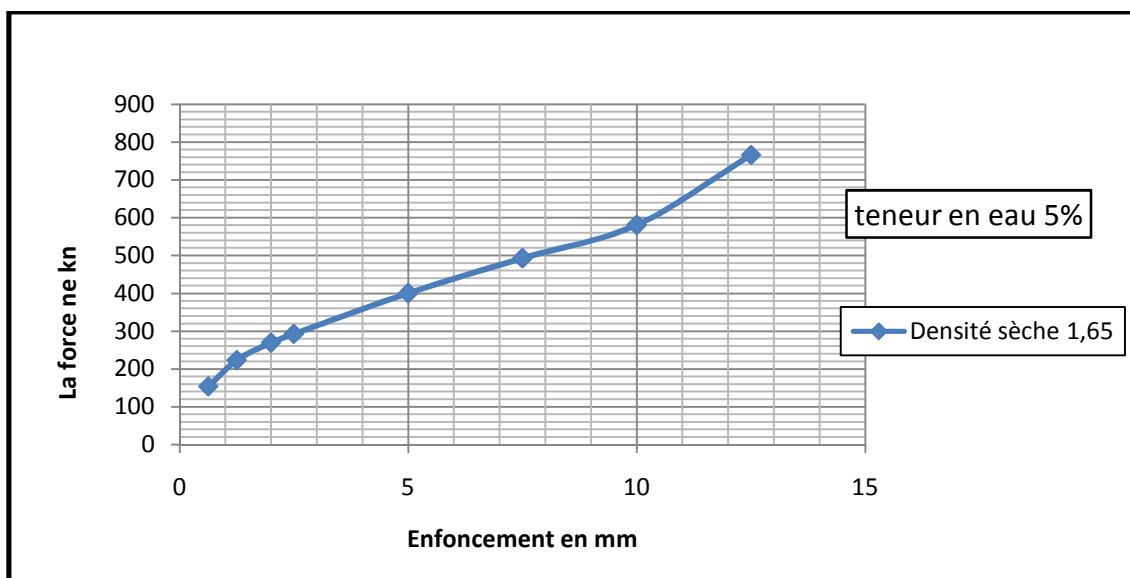
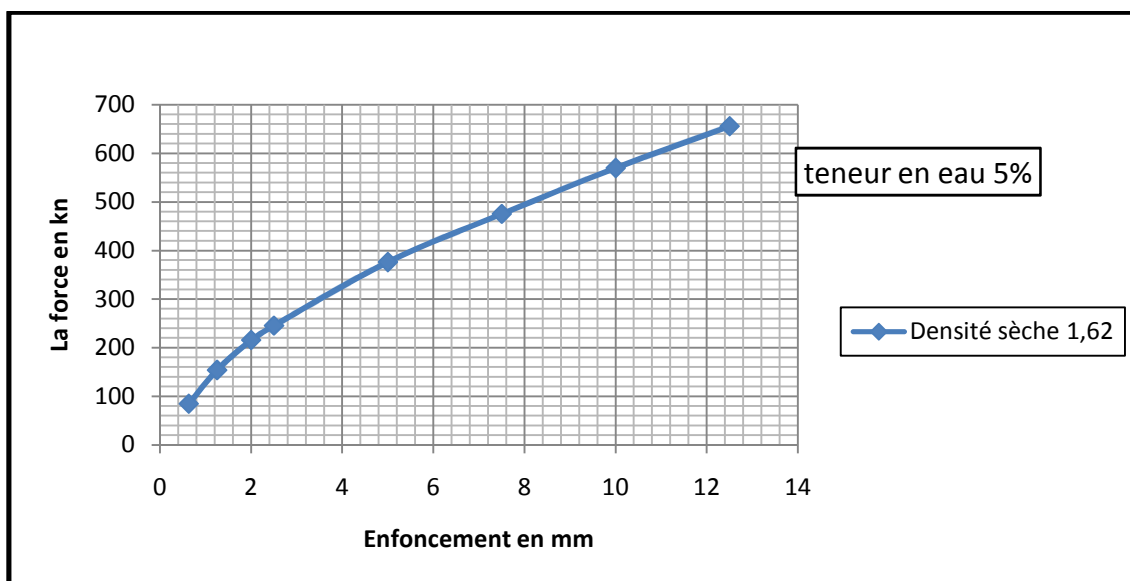
2EME MATERIAU SABLE



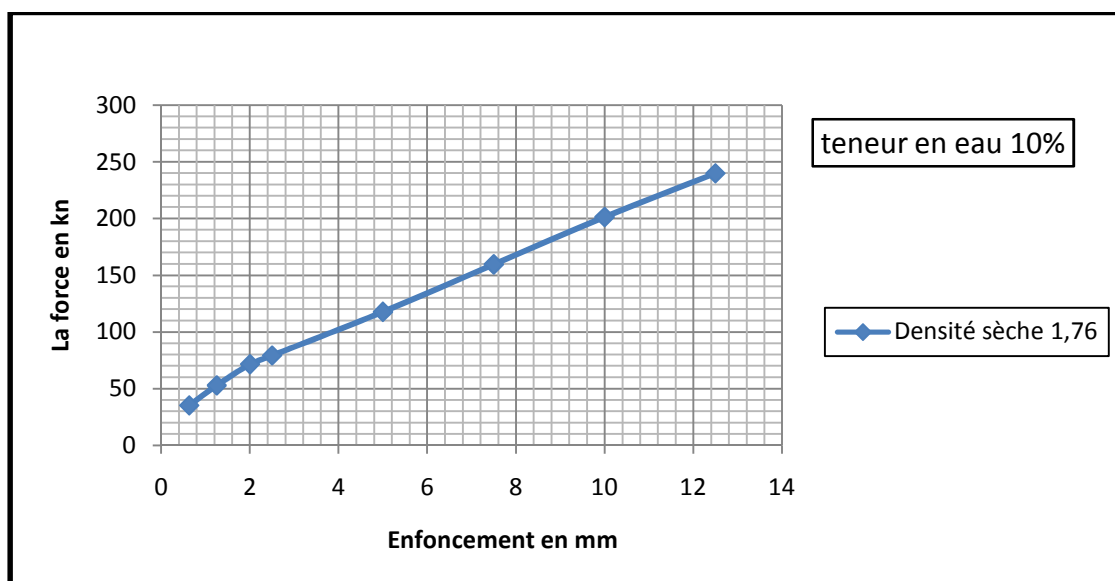
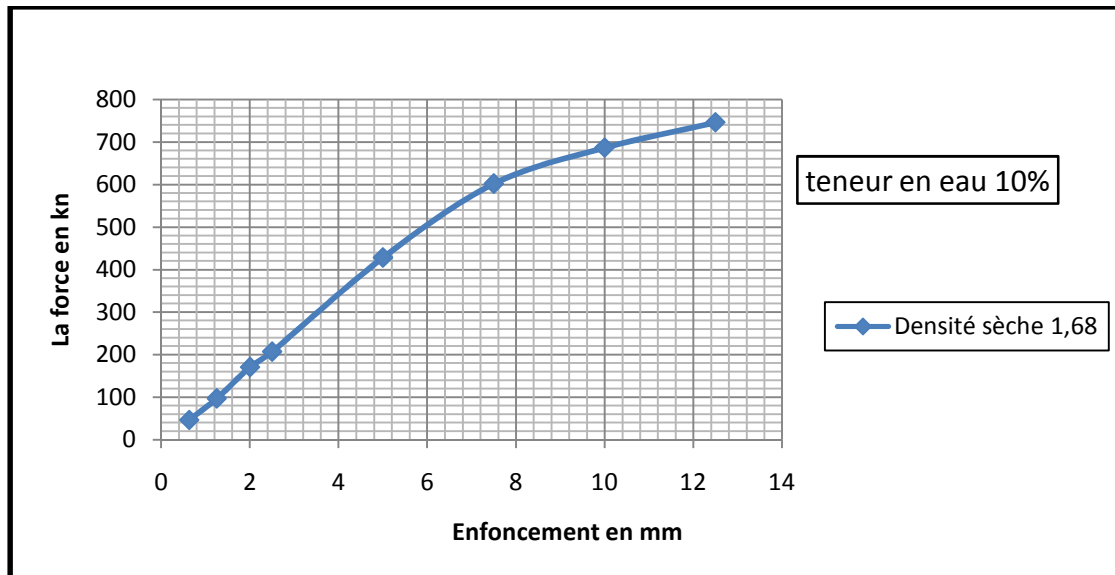
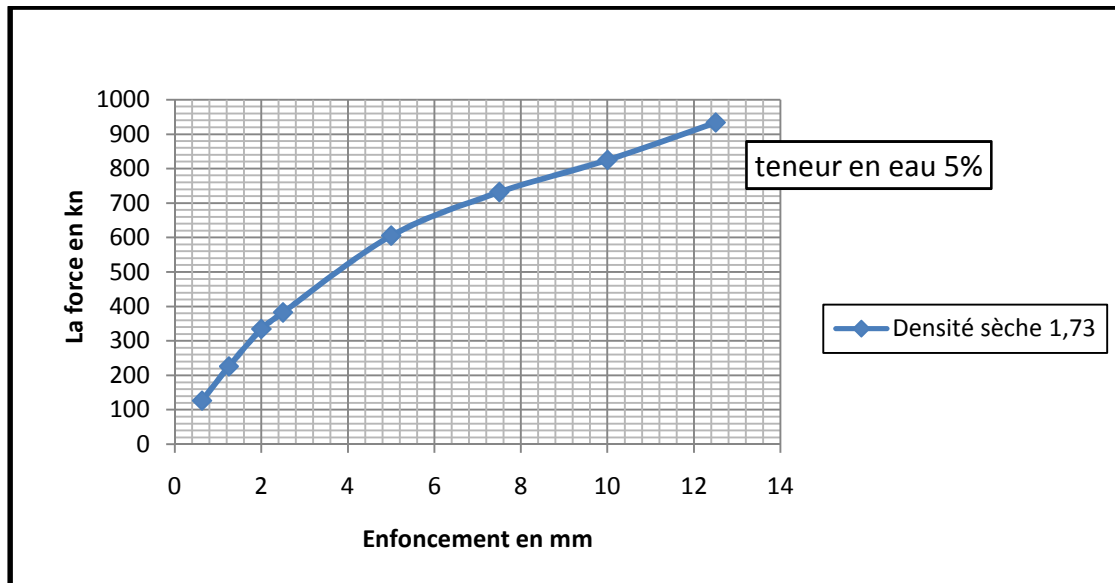
ANNEXE



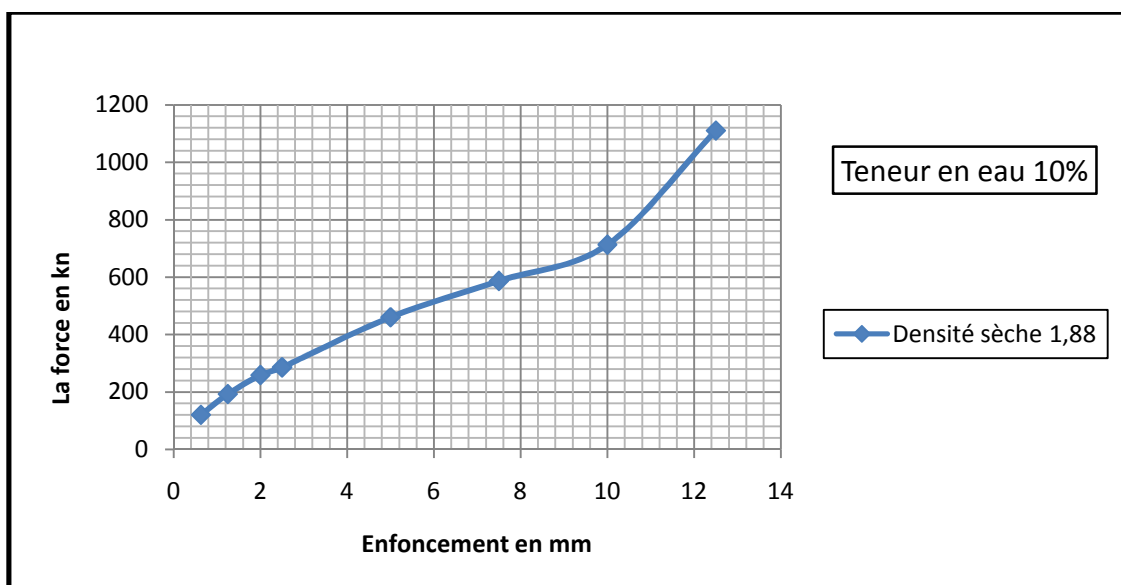
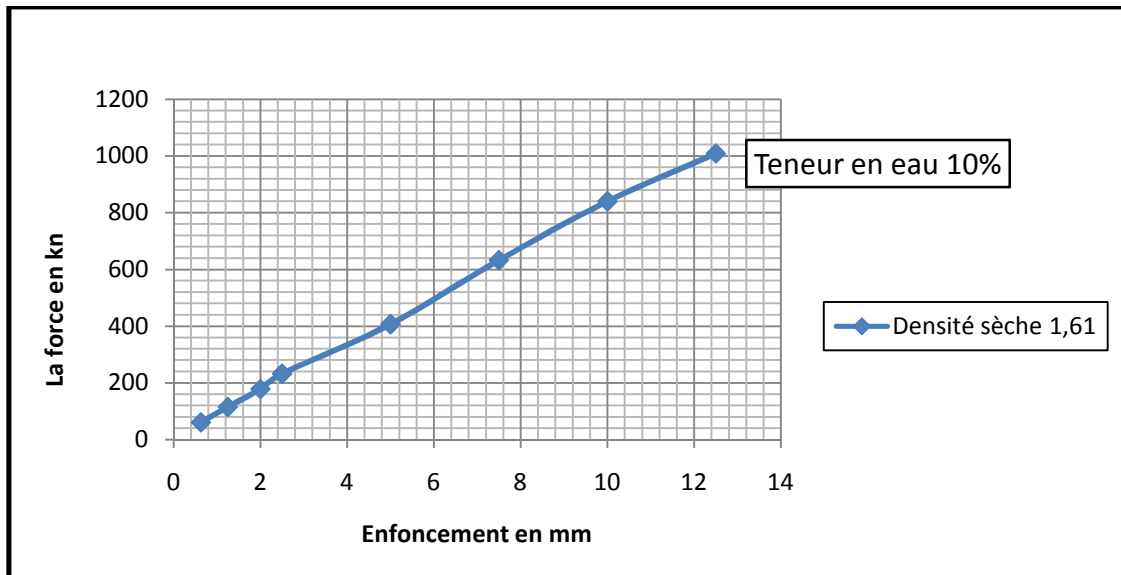
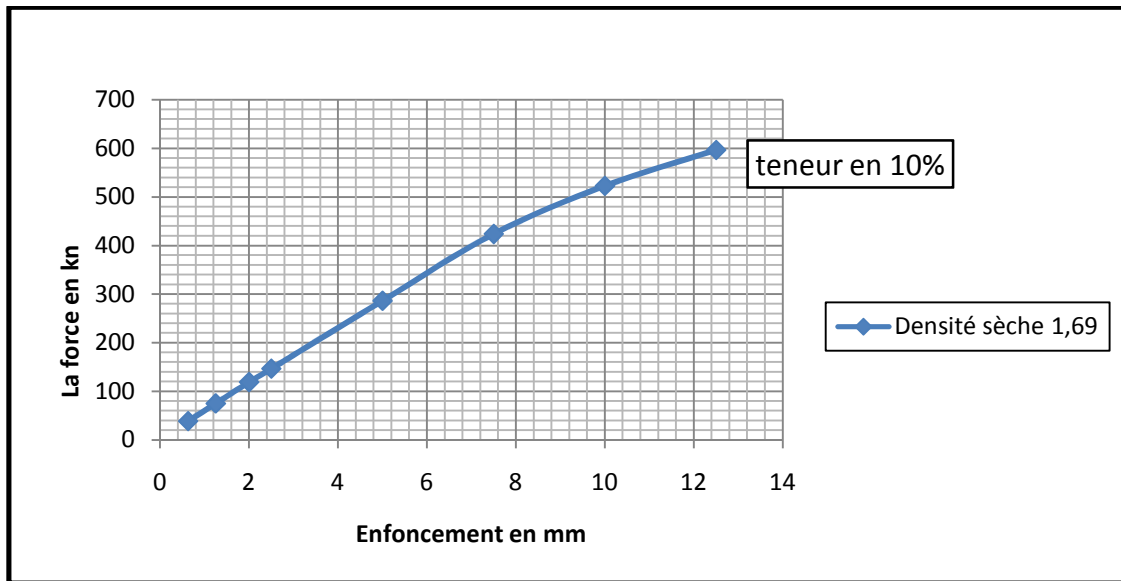
ANNEXE



ANNEXE



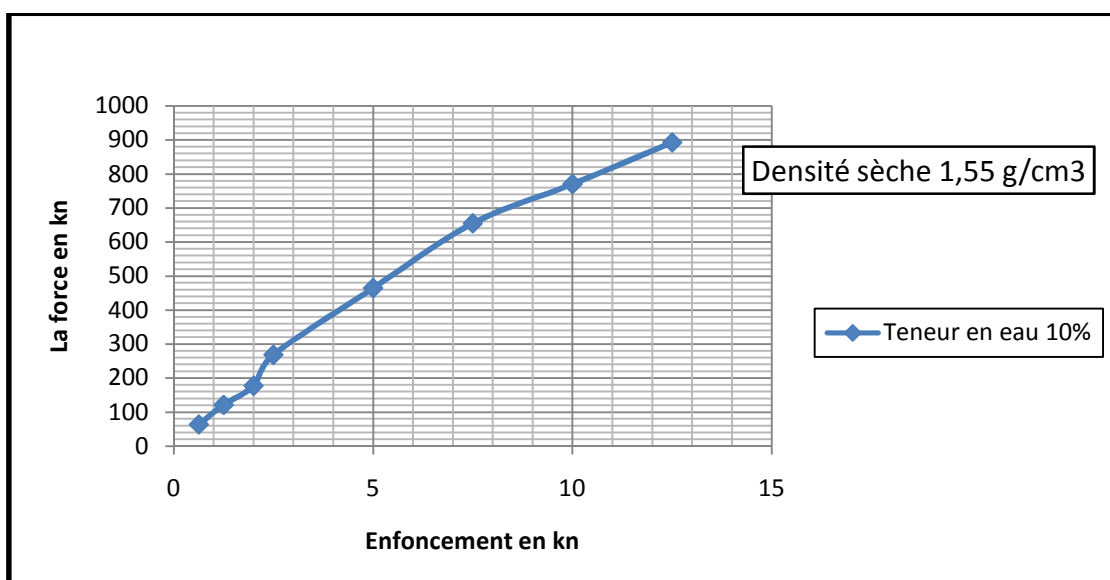
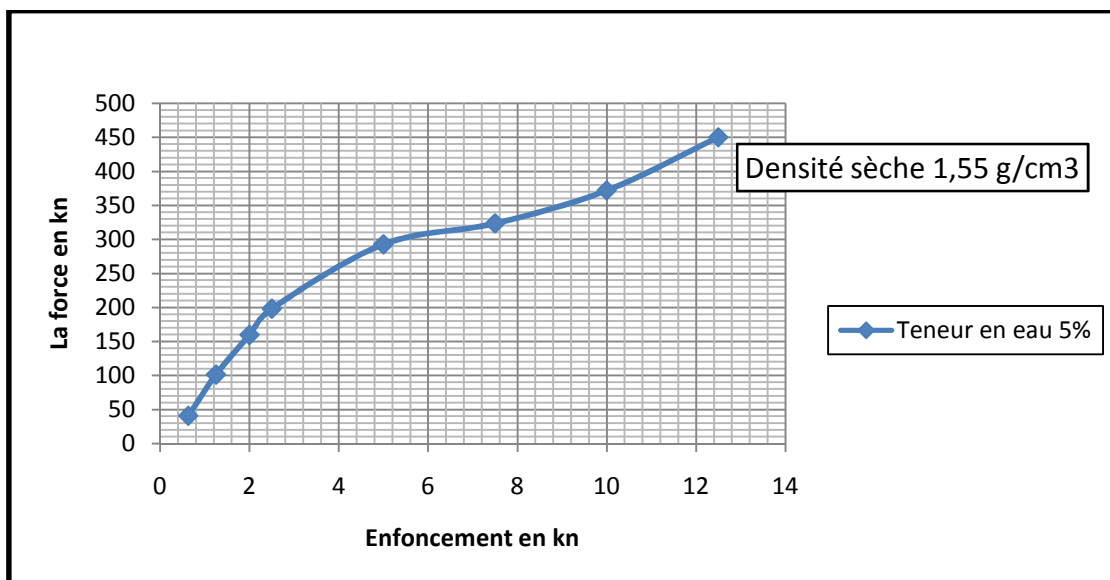
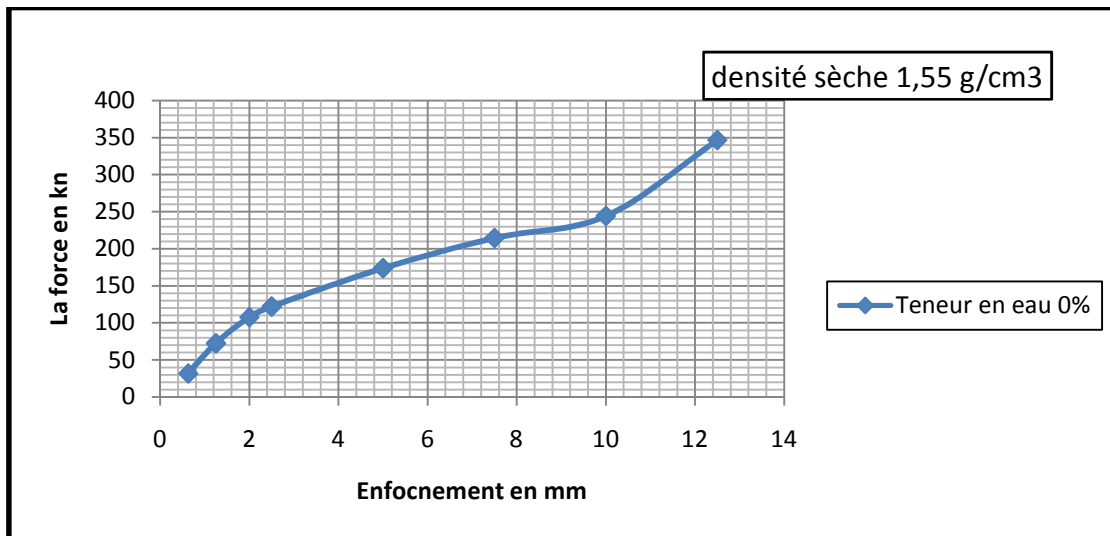
ANNEXE

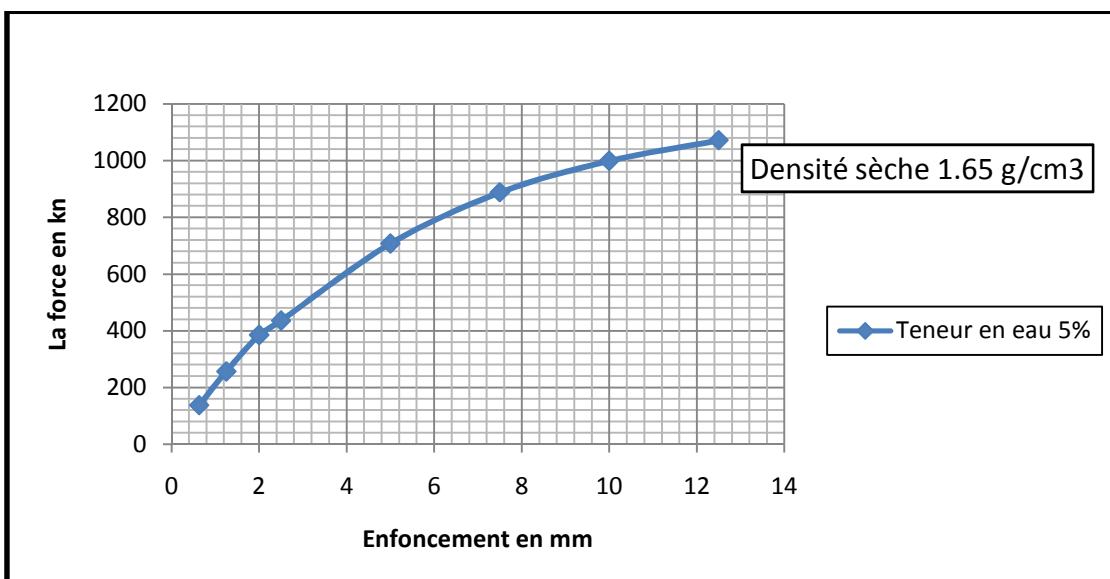
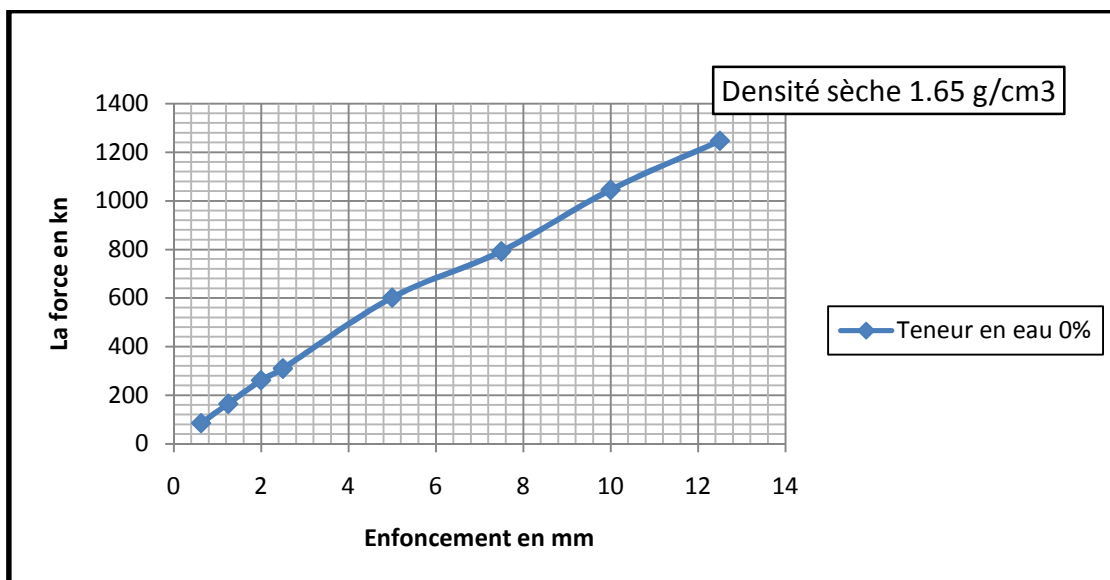
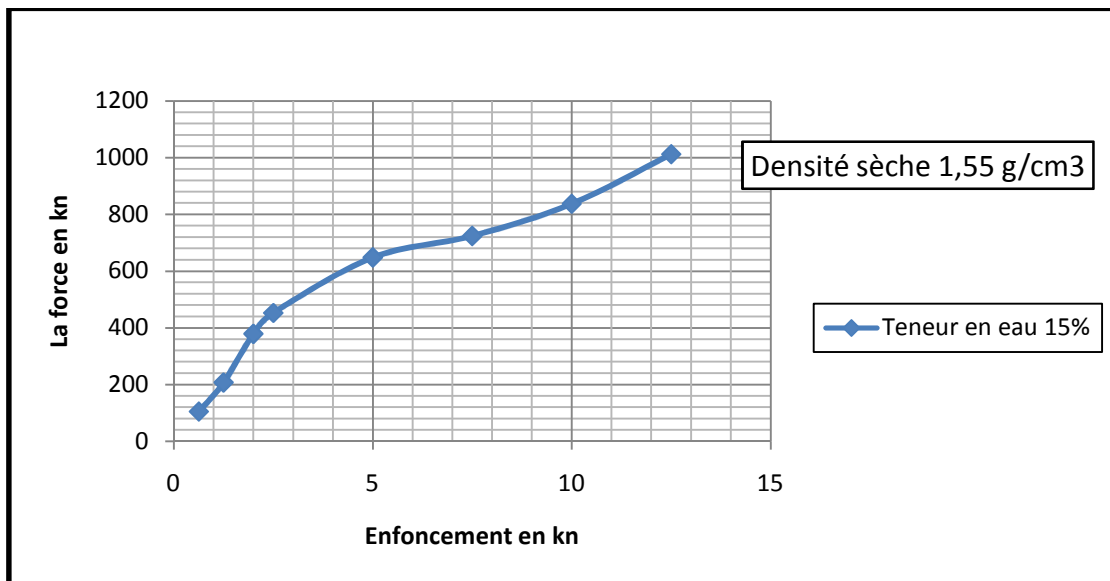


ANNEXE

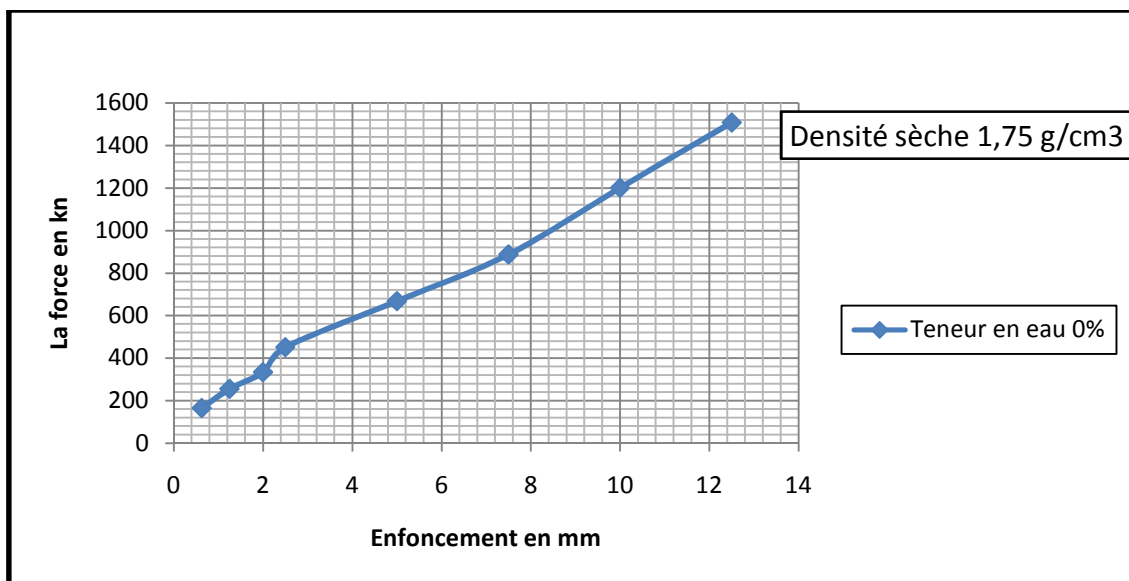
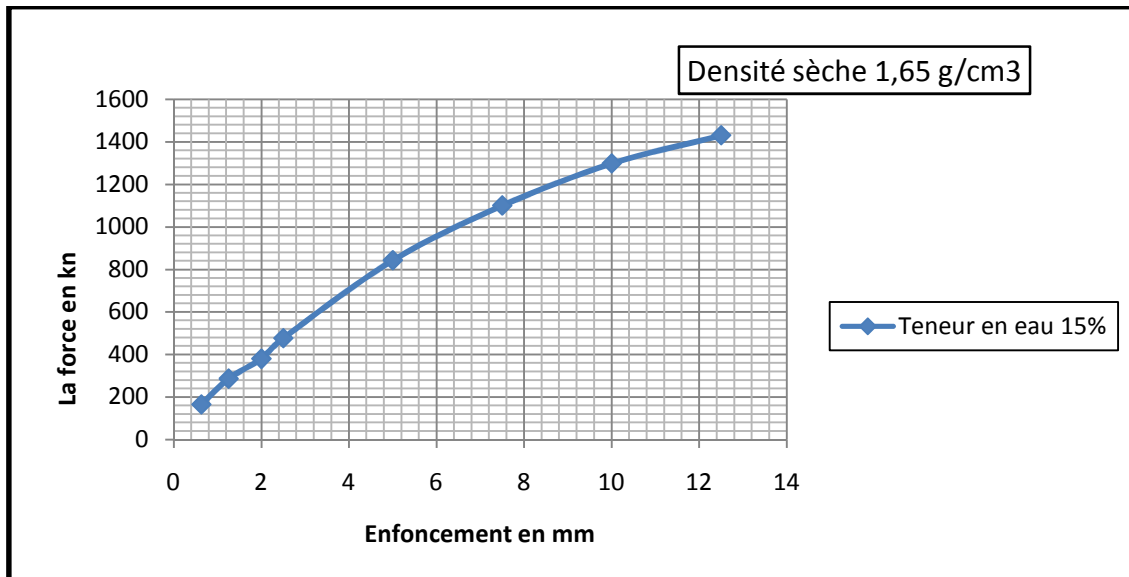
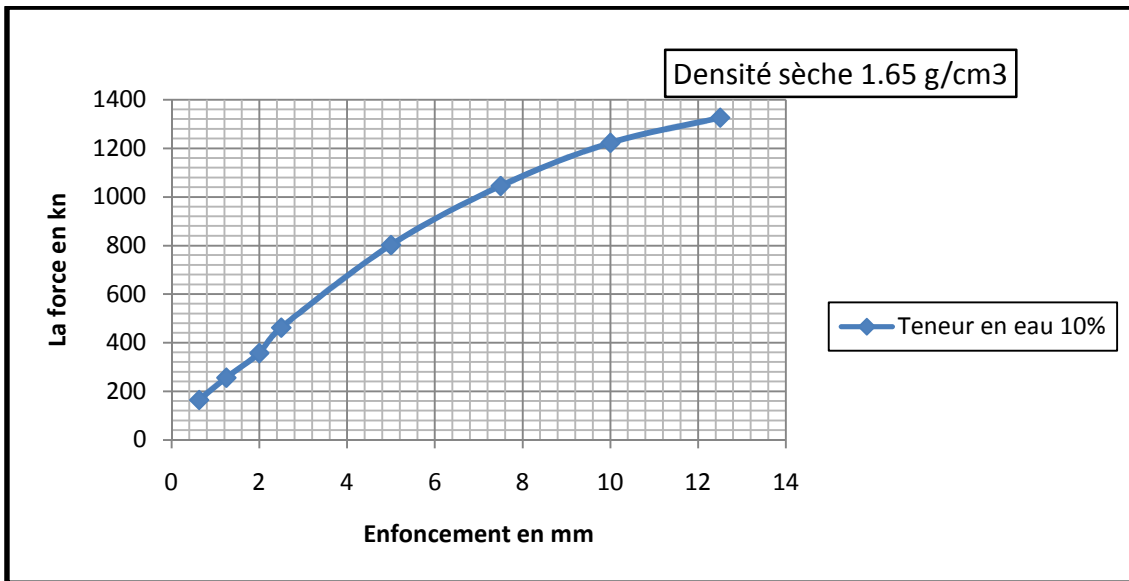
Densité sèche constante

Argile

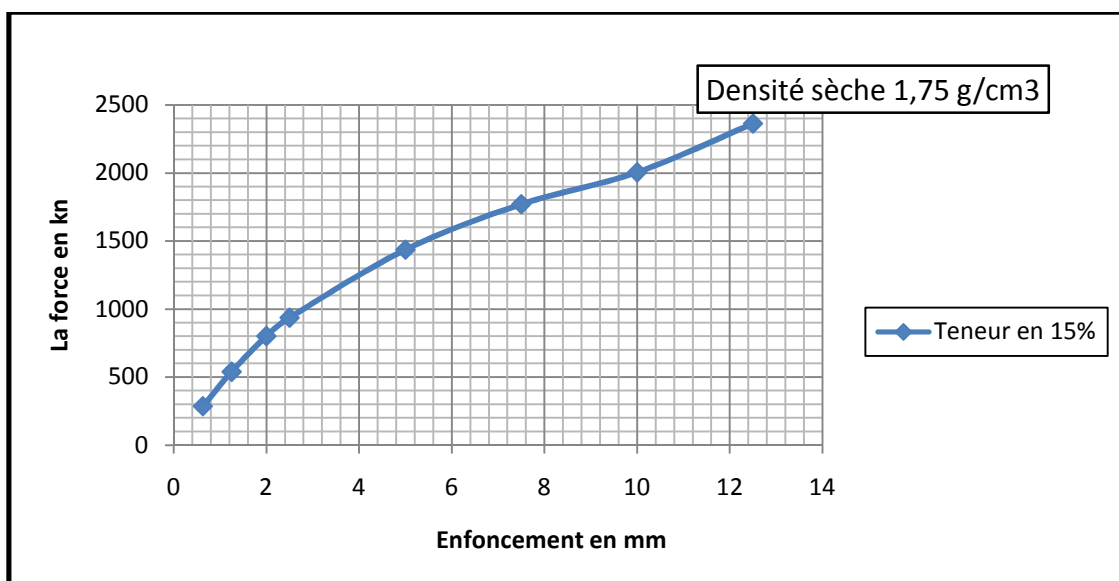
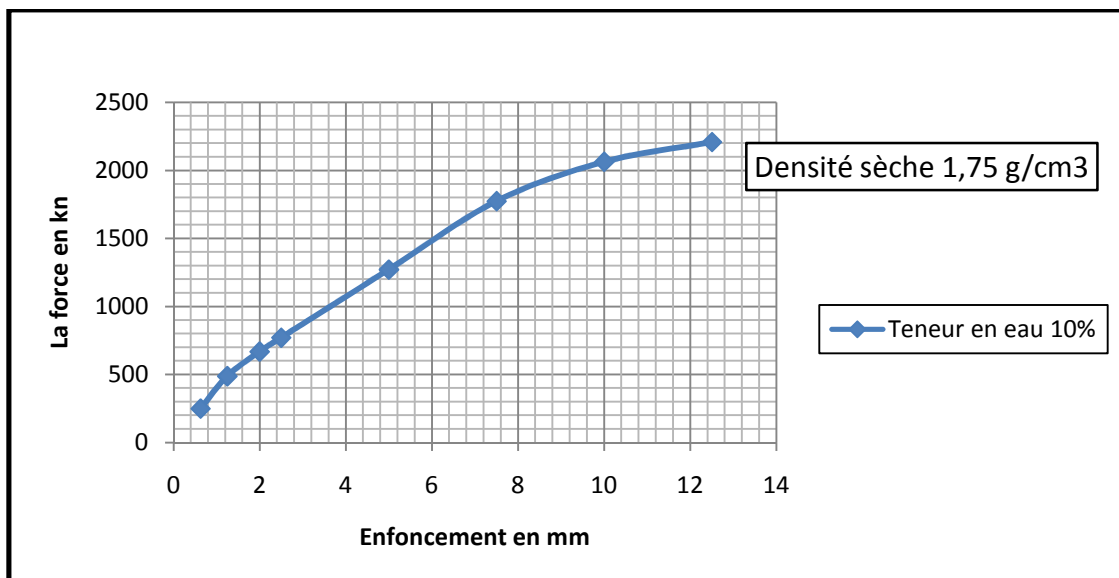
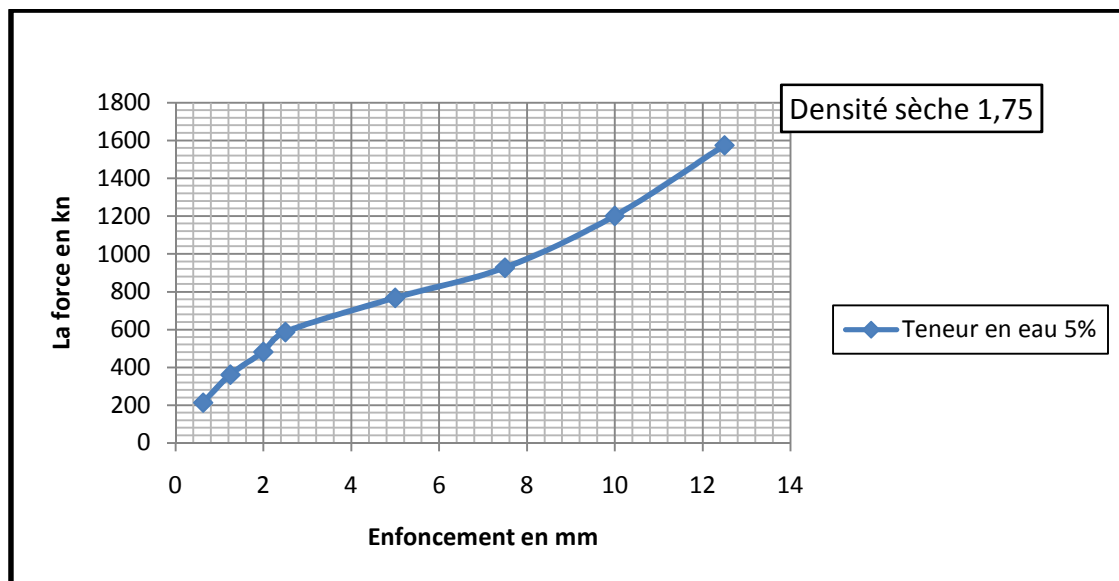




ANNEXE

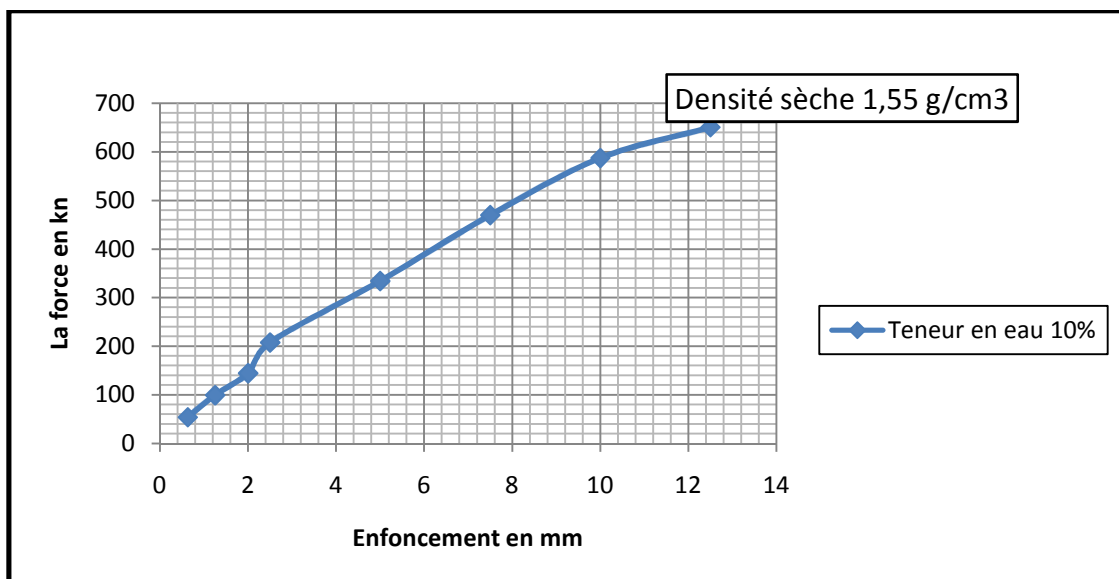
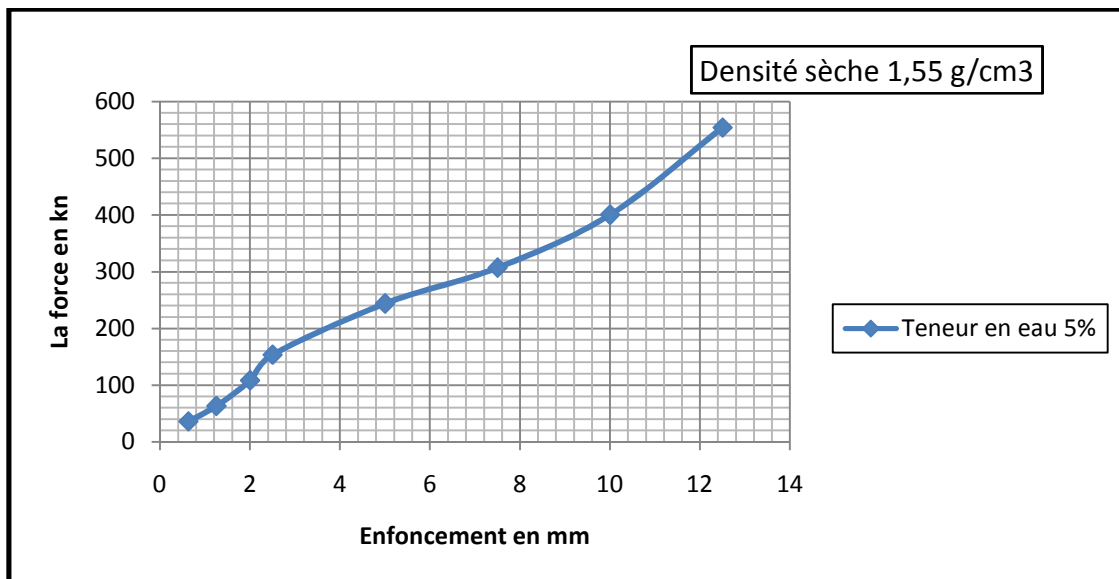
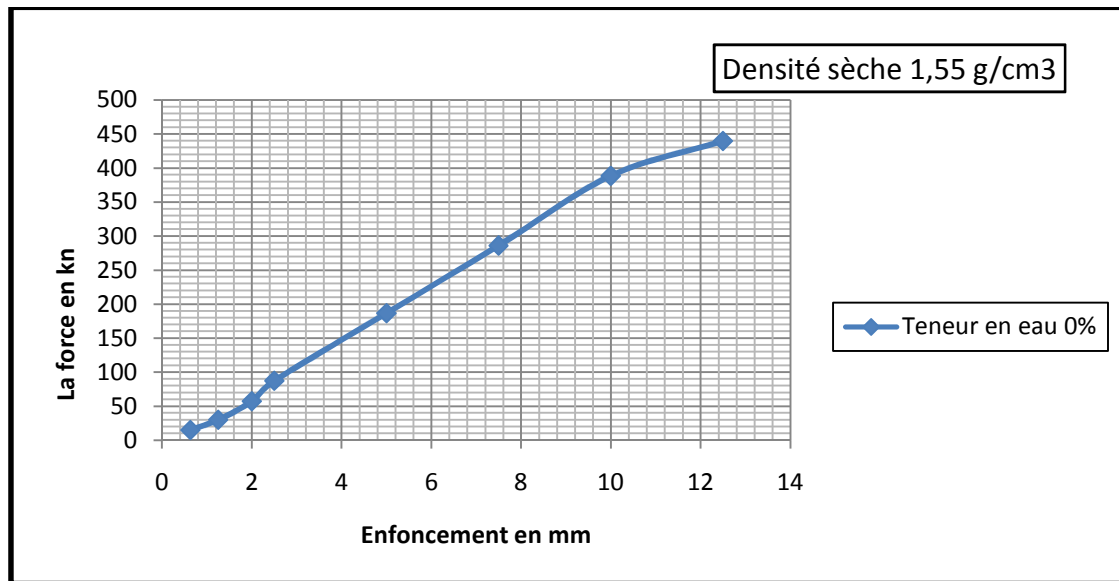


ANNEXE

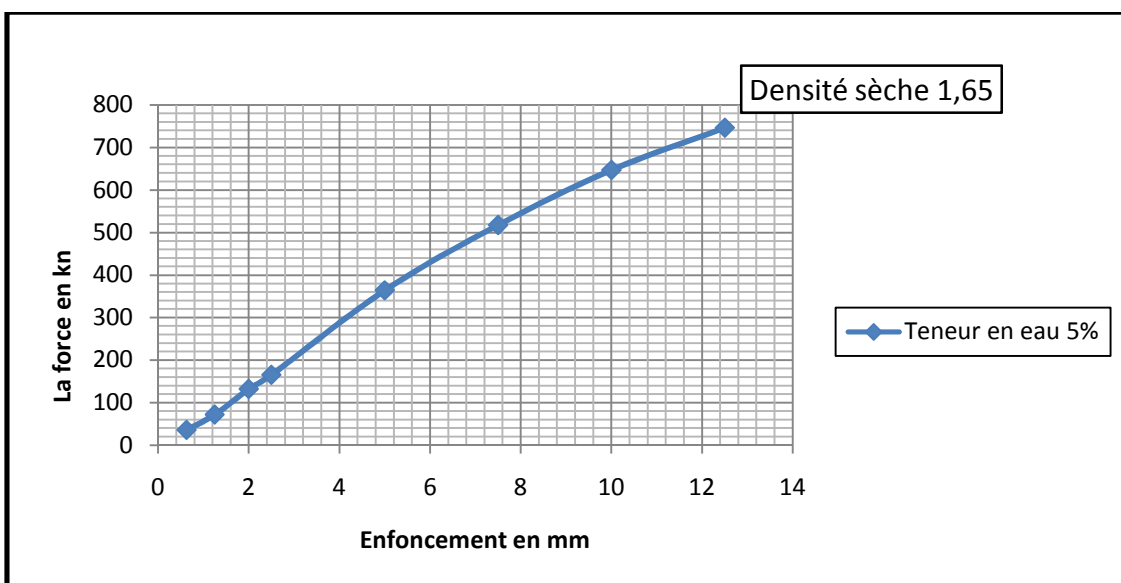
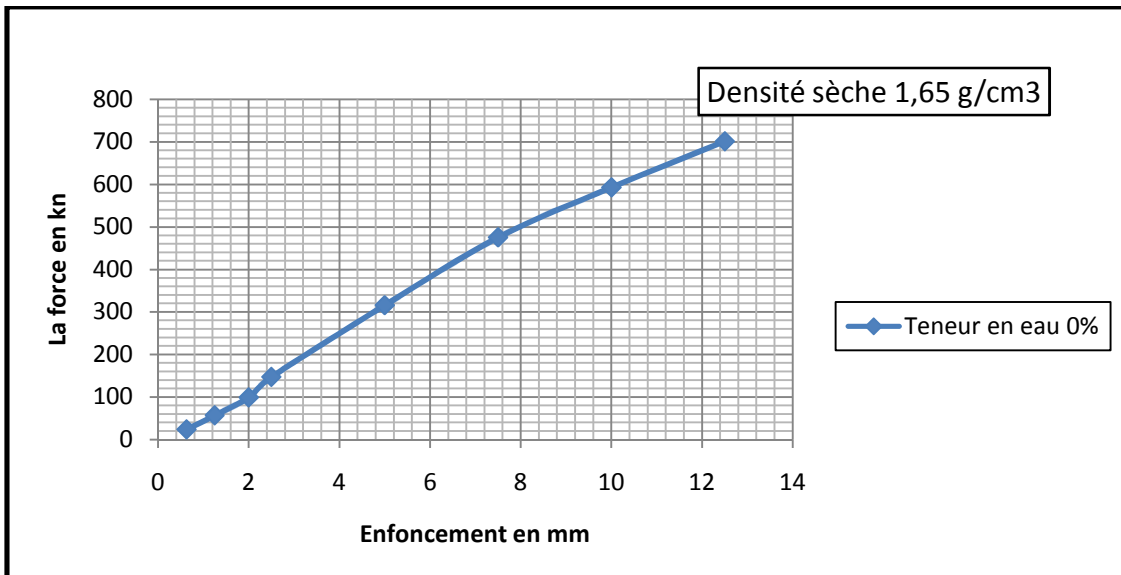
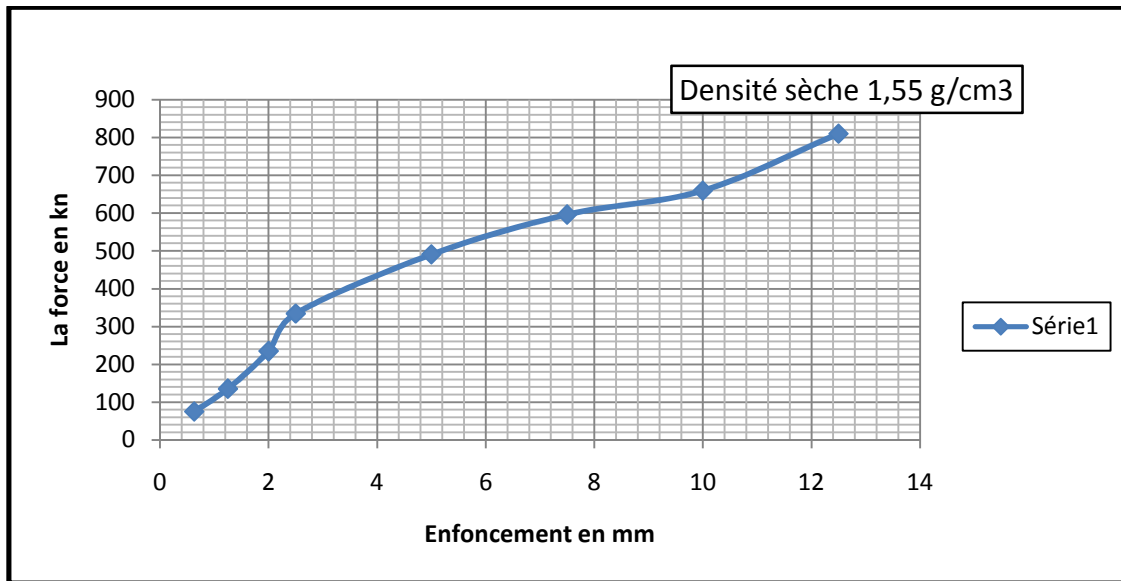


ANNEXE

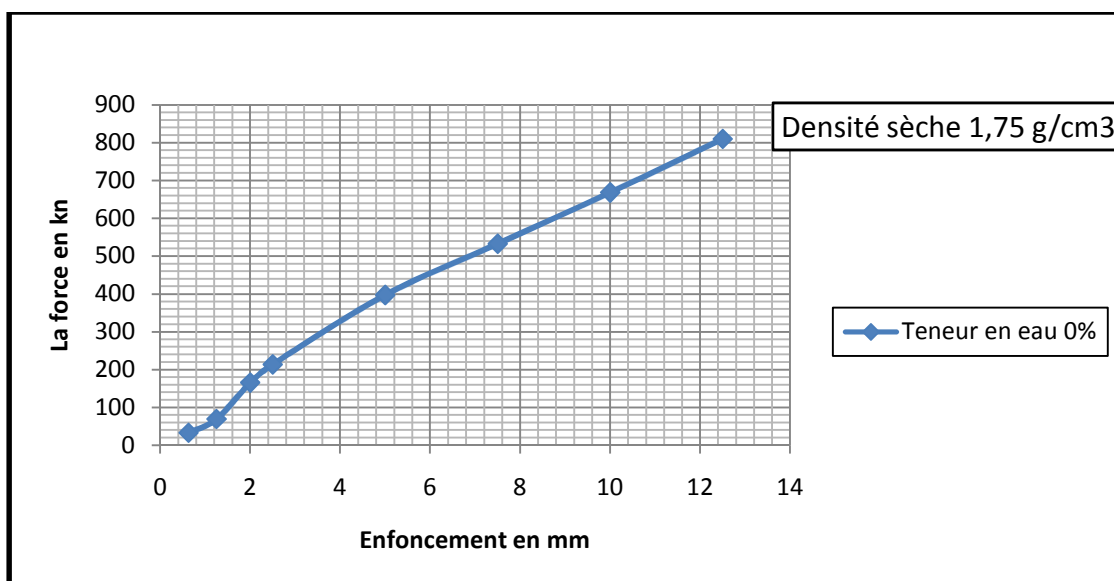
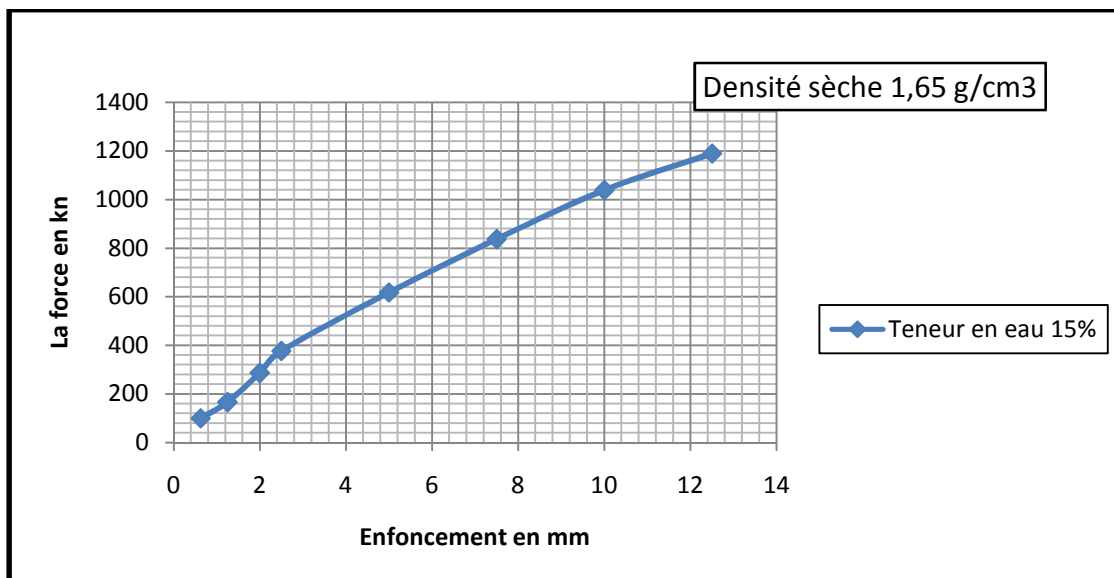
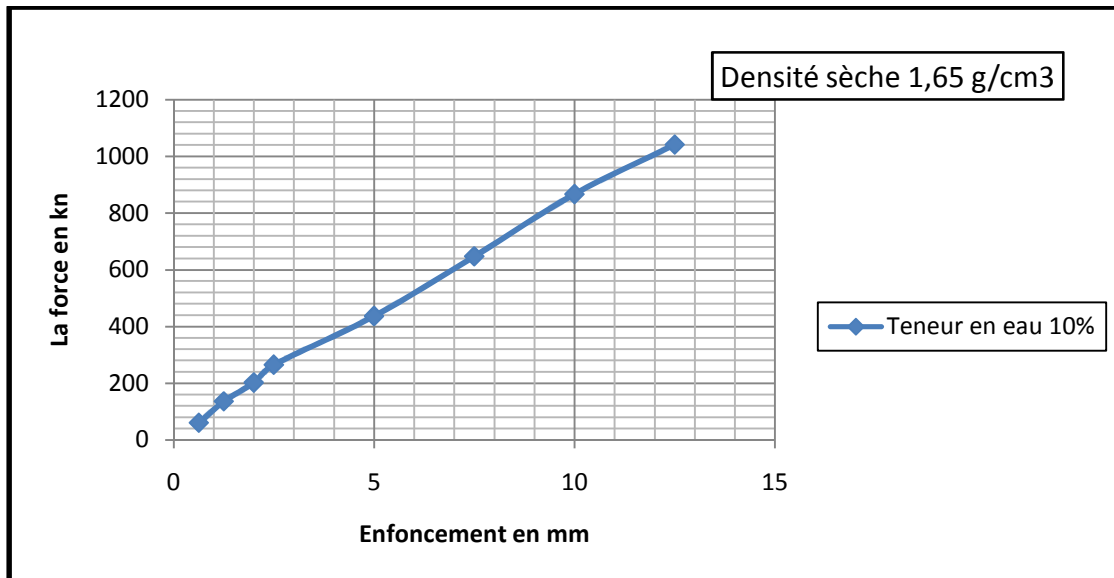
Sable



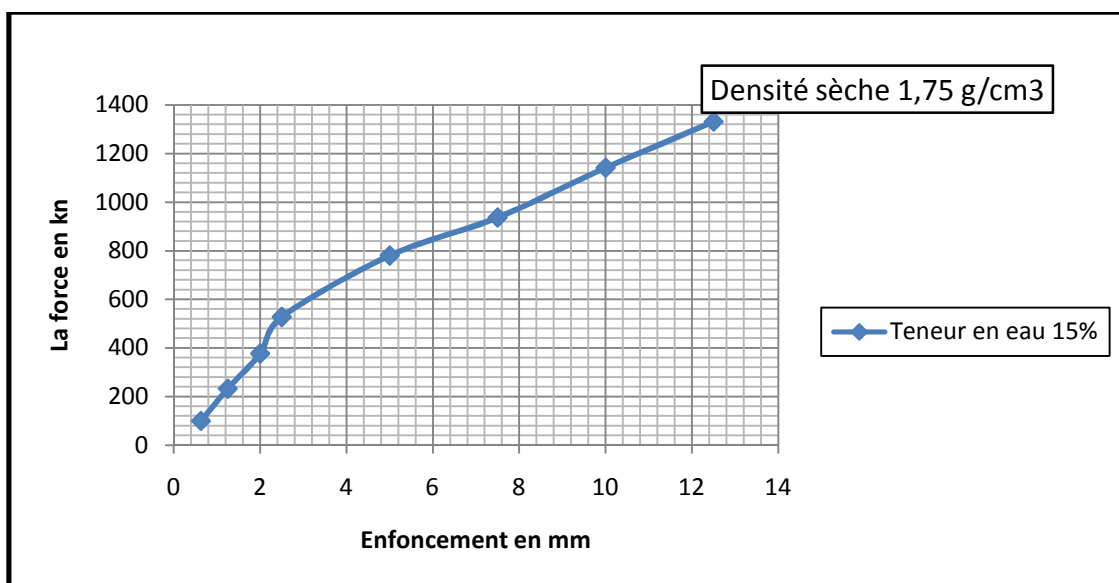
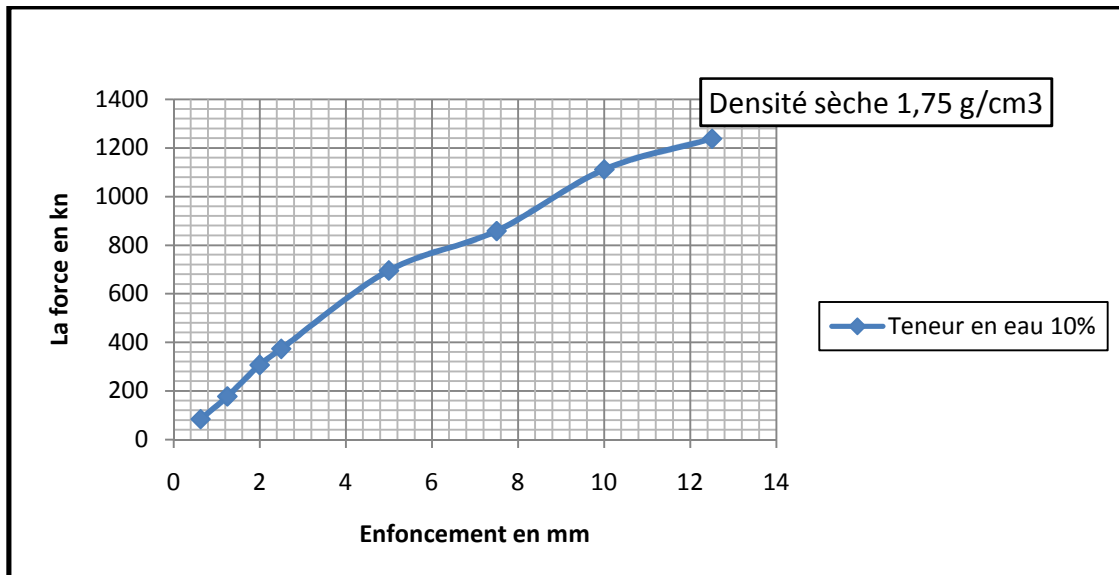
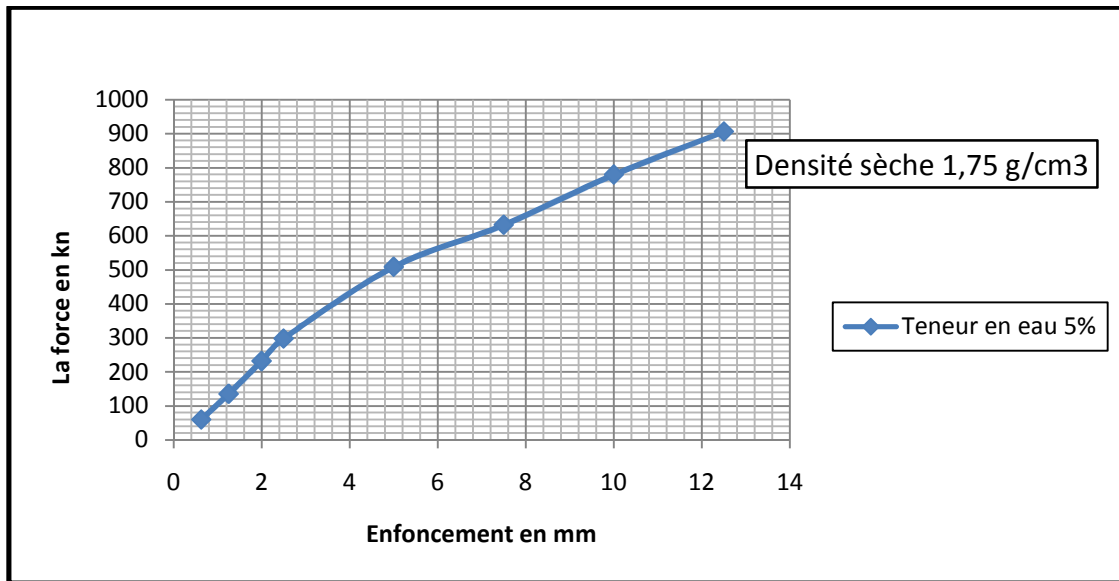
ANNEXE



ANNEXE



ANNEXE



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARAIRO .W : Influence des cycles hydriques de la dessiccation et de l'humidification sur le comportement hydromécanique des géo matériaux non saturés, L'institut national des sciences appliquées de Lyon (MEGA), L'institut national des sciences appliquées de Lyon.

BADI. S, SEDDI. S : Etude des courbes irrégulières des sols reconstituent par le compactage mémoire de master en génie civil option géotechnique université M'Hamed bougara BOUMERDES.

BOUKLIHA.R, MECHERNENE.M : l'effet du compactage sur les caractéristiques de perméabilité et de résistance d'un sol fin, Université De Tlemcen, Département de Génie Civil, Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master en Génie Civil Spécialité : Ingénierie des Structures.

G.ARQUIE, G.MOREL." le compactage", 1988.

GHANEM.F : Etude de corrélation entre la perméabilité et la succion mémoire de magistère Laboratoire Géo-matériaux Environnement Et Aménagement (L.G.E.A Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

GHORZI.K, HAFIDI.FZ : Compactage des Barrage en Remblai mémoire pour l'obtention du diplôme de master en génie civil option infrastructure de base et géotechnique –travaux public- université Abou BEKR BELKAID.

ISIS BRABET : le traitement des sols pour la couche de forme, plate forme de chaussée. Présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur CNAM, conservatoire national des arts et métiers PARIS.

MELLAL. F : Etude du comportement physicochimique et mécanique d'un remblai routier marneux amélioré par la chaux éteinte Cas de l'autoroute Est-Ouest tronçon Oued Fodda /Khemis Miliana. Mémoire de magistère en génie civil option construction. Université Hassiba Ben-Bouali –Chlef.

MESSAFER TAHAR : Cours d'ingénierie de fondation département génie civil, faculté de science d'ingénieur UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA, BOUMERDES, septembre 2014.

OMRAN ALSHIHABI : étude en laboratoire du comportement d'un sol compacte non sature Université Des Sciences Et Technologie De Lile, thèse doctorat.

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

La norme NA 2607 : Analyses granulométriques.

La norme NA 455 : Equivalent de sable.

La norme NA 5251 : Analyse sédimentométrique.

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

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

La norme NF P 94-048 : Détermination de la teneur en carbonate.

La norme NF P 94-078 : l'essai CBR.

La norme NF P 94-093 : Proctor normal.

La norme XP P 94-047 : Détermination de la teneur pondérale en matières Organiques d'un matériau.

ARTICLE : conception et réalisation des terrassements-fascicule3 : méthode d'essai.

ARTICLE : prévenir le compactage des sols-conseils pratique (AGRIDEA 2014).

ARTICLE : sol solution l'innovation sur de solides appuis, site web : www.sol-solution.com