REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE CIVIL

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : GEOTECHNIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique

Par :

Ben cheniti Nadjoua & Salmi Maroua

Caractérisation des alluvions du chott -El-Hodna (wilaya de M'silla) faiblement traités au ciment Ardia et reconstitués à faible énergie de compactage

Intitulé

Soutenu devant le jury composé de :

Prof. RAHMOUNI Zinelabidine	Université Med Boudiaf - m'sila	Président
Prof. KHEMISSA Mohamed	Université Med Boudiaf - m'sila	Encadreur
M.C.A. MAHAMEDI Abdelkrim	Université Med Boudiaf - m'sila	Co-Encadreur
M.A.A. GUERRAICHE Amar	Université Med Boudiaf - m'sila	Examinateur

Année universitaire : 2021 /2022

بسم الله الرحمن الرحيم

Dédicaces

***

** A nos chers parents, pour tous leurs sacrifices, leurs soutiens et leurs prières tout au long de nos VIE,*

** A toute nos familles pour leurs soutiens tout au long de nos parcours universitaire,*

** A tous nos meilleurs amis et à toute la promotion 2022.*

A tous ceux qui luttent contre l'injustice et l'ignorance.

Merci d'être toujours là pour nous.

Remerciements

Il est primordial de remercier «Allah» de j'avoir donné le courage, la patience et la sante qui nous ont été utiles tout au long de mes années d'études et pour réaliser ce modeste travail.

Je tiens à remercier chaleureusement notre encadreur Pour son aide et son encadrement, ses encouragements et surtout sa compréhension durant toute la période de préparation de ce travail.

Je tiens à remercier tous mes Professeurs de notre département.

Je remercie toute personne du corps enseignant ou administratif de Génie civil, ayant contribué de près ou de loin à ma formation.

Ma gratitude aux membres de jury qui me font l'honneur de juger mon travail de fin d'étude.

Résumé

Le sol salin est l'un des plus grands problèmes auxquels sont confrontées les sciences du sol dans le monde et en Algérie car il Occupant beaucoup de place en termes de surface, de nombreuses solutions ont été proposées pour profiter de Terre affectée par la salinisation et l'utiliser pour la construction de routes et divers champs.

Cette étude visait à améliorer les caractéristiques du sol salin du Chott El-Hodna au niveau de la commune. Ain Al-Khadra, Wilaya de M'sila a testé cela en ajoutant différentes proportions de ciment L'argile a été identifiée et testée mécaniquement avec des résultats exceptionnels Il existe des preuves d'améliorations significatives des propriétés géotechniques telles que Paramètres de consistance, de portance et de résistance à la compression.

ملخص

التربة المالحة هي واحدة من أكبر المشاكل التي تواجه علوم التربة في العالم وفي الجزائر حيث تشغل مساحة كبيرة من حيث المساحة السطحية، تم اقتراح العديد من الحلول للاستفادة من الأرض المتضررة من التملح واستخدامها في بناء الطرق والحقول المختلفة.

كان الهدف من هذه الدراسة تحسين خصائص التربة المالحة لشوت الحضنة على مستوى البلدية. اختبرت عين الخضراء بولاية المسيلة ذلك بإضافة نسب مختلفة من طين الأسمنت تم تحديدها واختبارها ميكانيكيًا مع نتائج بارزة. هناك أدلة على تحسينات كبيرة في الخصائص الجيوتقنية مثل معايير الاتساق والرفع ومقاومة الضغط

Abstract

Saline soil is one of the biggest problems facing soil sciences in the world and in Algeria as it occupies a lot of space in terms of surface area, many solutions have been proposed to take advantage of Earth affected by salinization and use it for the construction of roads and various fields.

The aim of this study was to improve the saline soil characteristics of Chott El-Hodna at the commune level. Ain Al-Khadra, Wilaya de M'sila tested this by adding different proportions of cement Clay has been identified and tested mechanically with outstanding results There is evidence of significant improvements in geotechnical properties such as Parameters of consistency, lift and compression resistance.

SOMMAIRE

Dédicaces

Remerciements

Liste des tableaux

Liste des figures

Résumé

Abstract

Introduction Générale.……....….....….....1

CHAPITRE I

I.1 Les Sols Salés…….....**.....**4

I.2 Particularités des sols salés…….**.....**……....4

I.3 Classification des sols salés…….**.....**……5

I.4 Répartition des sols salés **.....** 6

CHAPITRE II

II.1. INTRODUCTION…….**.....**……...7

II.2.Objectifs d'un traitement de sol…….**.....**.....8

II.3. Influences de traitement de sol (liants hydrauliques) sur les propriétés géotechniques et mécaniques…….**.....**……8

Ⅱ.4. Techniques de traitement possible…….**.....**……10

CHAPITRE III

III.1 Le ciment (ARDIA 600)…….. **.....**……12

III.2. Application produit ARDIA…….....……...……12

III.3.Dosages indicatifs…….……**.....**…12

III.4. Techniques de traitement possible par produit ARDIA600…….....….13

CHAPITRE IV

IV .1. Descriptif…….....…….....……....14

IV.2. Localisation dd Chott El Hodna…….....….....…….....…..15

IV.3. Site de prélèvement d'échantillon…….....……16

CHAPITRE V

IV.1 Introduction…….....……..…..17

. IV.2 Sol non traité…….....…….....17

IV.3 Sol traité…….....…….....17

IV.4 Description des essais…….....……..18

CHAPITRE VI

VI.1 Introduction…….....…….25

VI.2 Sol non traité…….....……..25

VI.3 Sol Traité…….....31

CHAPITRE VII

Conclusion générale ……....……39

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Superficie affectées par la salinité dans le monde …….....……5

Tableau VI.1 Résultats de l'analyse chimique…….....…….....……26

Tableau VI.2 Résultats des essais des paramètres d'état…….....……...…….....……26

Tableau VI.3 Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sol nonbroyé).....27

Tableau VI.4 Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sol broyé) …..…..28

Tableau VI.5 Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg…….....…29

Tableau VI.6 Résultats et moyenne des essais de VBS…….....…..…….....…….30

Tableau VI.7 Caractéristiques d'identification des essais effectués sur le sol témoin étudié.....30

Tableau VI.8 Densités sèches en fonction des teneurs en eau …….....…….....…..31

Tableau VI.9 Valeurs moyennes des forces de pénétration en fonction des enfoncements 32

Tableau VI.10 Valeurs moyennes de l'indice C.B.R.…….....…….....…32

Tableau VI.11 Résultats des essais de compression ……...……..…….....33

Tableau VI.12 Limites de consistance à différents teneur en ciment .....…….37

Tableau VI.13 : Valeur de bleu de méthylène par l'essai à la tâch…..…….....……..39

Tableau VI.14 : Résultats des essais Proctor normal à différentes teneur en ciment…….....…40

Tableau VI.15 Résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents teneurs en ciment …….....……41

Tableau VI.16 Forces en fonction du teneur en ciment pour chaque enfoncement…….....….....42

Tableau VI.17 Résultats des indices C.B.R immédiats pour différents teneurs en ciment.....43

Tableau VI.18 Résultats de la résistance à la compression pour différents teneurs en ciment.....44

Liste des Figures

Figure I.1 : Répartition des sols salins au nord d'Algérie…….....…….6

Figure IV.1 : Le Chott en période d'été ……..…….....…16

Figure IV.2 : Le Chott en périoded'hiver …….....17

Figure IV.3: Situation géographique du Chaut …….....…18

Figure IV.4 : Localisation de site de prélèvement d'échantillon…….....18

Figure V.1 : L'appareil de DRX (au niveau du laboratoire de Lafarge)……..… ….....21

Figure V.2 : Pastilles d'échantillon pour le DRX…….……..……21

Figure V.3 : Appareil de XRF S8 Tiger (au niveau du laboratoire de Lafarge)……...…22

Figure V.4 : Pastilles d'échantillon pour XRF S8…….....……..……..…...22

Figure V.5 : Analyse granulométrique par tamisage……..……23

Figure V.6 : Analyse granulométrique par sédimentométrie……..……..…….23

Figure V.7 : Appareillage d'essai des limites d'Atterberg……...…..……24

Figure V.8 : Appareillage d'essai VBS……..……24

Figure V.9 : Machine de l'essai Proctor……25

Figure V.10 : Appareil CBR……...…….……26

Figure V.11 : Appareil de compression……..……....……..26

Figure VI.1 : Résultats d'analyse DRX……....…….27

Figure VI.2 : Résultats de l'analyse chimique….....……..……27

Figure VI.3 Courbes de trois essais de l'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sol non broyé)…...….....…….....……28

Figure VI.4 Courbes de trois essais de l'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sol broyé)….....……....……29

Figure VI.5 Classe du sol étudié selon l'abaque deCasagrande…….....…..…….30

Figure VI.6 Masses volumiques sèches en fonction des teneurs en eau …...…….....….33

Figure VI.7 Courbe des moyennes des forces de pénétration en fonction des enfoncements…..…34

Figure VI.8 Courbe de la limite de liquidité……..…..…….....39

Figure VI.9 Courbe de la limite de plasticité……..…….....39

Figure VI.10 Courbe de l'indice de plasticité……..…….....40

Figure VI.11 Classification selon l'abaque de Casagrande……...…….....40

Figure VI.12Valeur de Blue de méthylène pour différents teneurs en ciment.....41

Figure VI.13 Surface spécifique pour différents teneurs en ciment….....…41

Figure VI.14 Densité sèche pour différents teneurs en ciment …..…….....42

Figure VI.15 Teneur en eau pour différents teneurs en ciment …….....…42

Figure VI.16 Forces de pénétration pour différents teneurs en ciment.....43

Figure VI.17 Courbe des forces en fonction des teneurs en ciment pour chaque enfoncement….....44

Figure VI.18 courbe des indices C.B.R immédiats pour différents teneurs en ciment …….....45

Figure VI .19 courbe de la résistance aux compressions pour différents teneurs en ciment …..…..45

Introduction Générale

Les sols salins sont l'un des sols problématiques les plus courants dans le monde, en particulier dans les régions arides et semi-arides. Les régions arides et semi-arides comprennent la majeure partie de l'Algérie. Ces zones sont délimitées par le Tel Atlas au nord et l'Atlas saharien au sud, et s'étendent d'est en ouest jusqu'aux pays voisins du Maghreb. Leurs caractéristiques météorologiques sont une faible pluviométrie et un écart de température important entre l'hiver et l'été (hivers froids et humides, étés chauds et secs). Les obstructions fréquentes dans ces zones affectent les infrastructures routières, diverses routes et réseaux, et les bâtiments civils et industriels de faible hauteur, empêchant l'utilisation du sol salin à l'état naturel comme matériau de remblai ou de nivellement, formant ou servant de fondation de support pour l'ingénierie géotechnique. Lorsqu'ils sont secs, les sols salins sont difficiles à compacter car leur consistance varie de dur à très dur. Lorsqu'ils sont humides, ils deviennent très collants et ne peuvent donc pas être compactés. Cependant, leur utilisation peut être déterminée par le traitement spécifique de la chaux et/ou des liants hydrauliques, qui leur donnera de nouvelles caractéristiques répondant à la qualité requise. Produire principalement de la chaux vive gazeuse de calcium (chaux vive, chaux éteinte, lait de chaux), du ciment et des liants routiers spéciaux. La méthode de traitement la plus couramment utilisée. Ce procédé est principalement utilisé pour rendre le sol meuble compactable en réduisant sa plasticité et en augmentant sa capacité portante.

Auparavant, quand un sol n'était pas adéquat pour la construction d'un ouvrage il était possible d'en choisir un autre qui présente des caractéristiques géotechniques meilleures car les besoins de la société n'étant pas importants. Avec l'accroissement de la population et le développement des activités, la mise à disposition des sols adéquats qui présentent de bonnes caractéristiques géotechniques est parfois impossible. Par conséquent, il est souvent obligatoire d'adapter un ouvrage au type de sol sur lequel il sera construit même si ses caractéristiques géotechniques sont de qualités médiocres, les sols des Sebkhas en sont un exemple. Ces derniers sont connues comme des sols salés vu leur contenance excessive en sel. L'effet de la salinité affecte l'état hydrique du sol en diminuant sa teneur en eau, ce dernier redeviendra rugueux et sec. De surcroit, les sols salés abritent d'autre problèmes physiques, tels qu'une faible capacité portante et une compressibilité élevée.

Le monde entier, notamment l'Algérie, a construit des Mauvaise qualité en particulier pour les grands projets de sols résidant à Sebkha. Le pays de Sebkha est Gisements de sel récents, largement distribués en Asie continentale, Amérique du Sud, Australie, États-Unis et Afrique du Nord. L'Algérie a une grande Sebha disséminée dans le sud Tunisie aux montagnes de l'Atlas dans le nord de l'Algérie.

Certains sols, en raison de leurs propriétés géotechniques inhérentes et/ou de leur L'eau est considérée comme mauvaise ou médiocre et n'existe donc pas et est nécessaire Résister au trafic sur site, routier et futur, le transport peut même faire office de remblai, un exemple est le sol salin.

Le tissu urbain de la province de Msila connaît une prospérité économique et Une énorme responsabilité sociale conduit à l'expansion continue de son réseau routier Pour le développement du tissu urbain, il s'étend ainsi au territoire des zones sous-développées Généralement moins favorable que les zones urbanisées. Willaya est situé dans Il appartient à la zone semi-aride, avec peu de précipitations et des températures élevées hiver et été. La wilaya de M'sila abrite une importante zone saline considérée comme En tant que capitale de Chott-El-Hodna (Sebkha). Un aspect de l'objectif de cette étude est de Décrire la résistance des sols collectés dans la zone rurale de Chott-El-Hodna près de la ville de l'Ain Khadra, Wilaya de Msila, également à travers Ensemble d'essais effectués avant et après les traitements par ciment ARDIA 600.

Le travail présenté dans ce mémoire est composé de six chapitres :

- Le premier chapitre présente une étude bibliographique des sols salés, leurs caractéristiques, classifications, et la salinité de sol ainsi que leurs effets sur les propriétés de sol.
- Le deuxième chapitre est réservé au traitement des sol, objectif et techniques des traitements. L'essentiel du traitement des sols. L'influence de liant hydraulique sur les propriétés géotechniques est également discutée.
- Le troisième chapitre est réservé à la description de liant utilisé dans notre étude et on parle ici de ciment ARDIA (600).
- Le quatrième chapitre présente un aperçu sur la description géographique et géologique du site de prélèvement, Chott El Hodna près de la commune de Ain Khadra wilaya de M'sila.
- Le cinquième chapitre regroupe l'ensemble des essais expérimentaux ainsi que les procédures suivis, il est attesté par des photos de réalisation au niveau de laboratoire de recherche et développement Géo matériaux de l'Université de M'sila.
- Le sixième chapitre expose et analyse les résultats qu'on a obtenus à travers des essais effectués sur le sol avant traitement au ciment à différentes teneurs.
- Enfin une conclusion générale résume les principaux résultats obtenus lors de cette étude.

Chapitre I

Synthèse Bibliographique

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

I.1 Les Sols Salés

I.1.1 Définition

Les sols sodiques aussi appelés sols salés ou sols halomorphes sont caractérisés par leur teneur élevée en sels solubles dans l'ensemble ou dans une partie du profil ou par la dégradation de la structure de l'un de leurs horizons ou de tout leur ensemble sous l'influence de l'un des ions provenant de ces sels, en particulier du sodium. Ces sols ont une grande extension en Algérie. La salinité est due aux conditions arides où les possibilités d'exploitation sont considérables et les précipitations pluviales limitées.

Les sols salés contiennent des sels plus solubles que le gypse, c'est-à-dire susceptible de passer dans la solution du sol en quantité assez importante pour gêner la croissance des plantes. En conséquence, les sols calcaires ne sont pas des sols salés, même si le carbonate de calcium est un sel comme un autre sur le plan chimique. La salinisation des sols est généralement associée aux apports de sels dissous, issus de l'hydrolyse du substrat édaphique constitué de roches endogènes ou exogènes (salinisation primaire) ou des activités éoliennes et hydriques : embruns marins, eau d'irrigation et nappe phréatique sub affleurante et salée (salinisation secondaire).

I.1.2Particularitésdes sols salés

Dans les zones humides, ces sols sont rarement présents, sauf en bordure de mer. Les sels solubles sont lessivés par les précipitations, dont la plupart sont éliminés du profil du sol. A l'inverse, les sols salins sont fréquents dans les régions arides ou semi-arides. Dans ces sols, les processus de lessivage vertical et de déplacement latéral du sel ne sont pas aussi bons que les zones humides. S'il y a un lessivage, il est toujours limité aux contours ; le sel n'est pas exporté, mais a tendance à être sous l'effet de l'évaporation et du déficit. L'humidité est concentrée dans le profil, en particulier dans la couche de surface. De plus, dans le mouvement capillaire en l'absence de drainage général pour drainer la solution saline intervention, ainsi le sol évolue vers un type salin ou alcalin selon la nature et la concentration du sel, ainsi que des rapports cationiques dans l'eau de la nappe.

I.1.3LesParticularités chimiques

Les Particularités chimiques du sol dépendent de la qualité et de la quantité des sels solubles, la quantité totale de sel influe surtout sur la pression osmotique de la solution du sol. Les anions les plus importants sont Clet SO4 -- parfois une faible quantité de CO3H - peut exister, les cations les plus habituels sont : Na+, Ca++, Mg++, et dans quelques cas K+.

I.1.3 Les Particularités physiques

Les propriétés physiques des sols salins sont parfois très favorables, grâce à présence d'excès de sel et absence de toute quantité appréciable de sodium échangeable, colloïdes très floculant dans certains sols salins-alcalins, il a donc une bonne structure et une bonne perméabilité. Cependant, certains sols salins ont une très faible perméabilité.

KOVDA V.A. (1961) a souligné que dans les régions arides et semi-arides, l'accumulation de grandes quantités de sel sont parfois observées sur le sol, généralement 50 à 60 % du à la masse des sols, ils atteignent une épaisseur de 3-5 cm, parfois 50-100 cm, leur structure est très dense, il forme une couche imperméable. Leur composition chimique est variable. les plus formés important : croûte calcaire, contenant 50 à 70 % de carbonate de calcium, croûtes de gypse contenant 60-80' de gypse et croûtes salées par un mélange de différents sels et en particulier de chlorures.

I.1.4 Classification des sols salés

Les différents systèmes de classifications des sols ont accordé une importance relative aux sols riches en sels. La classification est une classification hiérarchisée. Elle est morpho- génétique, est englobe des niveaux suivant la classe, la sous-classe, le groupe, sous- groupe, la famille, la série, le type et la phase. Dans cette classification, les sols salés sont rangés dans la classe des sols salsodiques, elle - même subdivisée en deux (02) sous classes :

I.1.4.1 Sous classe des sols sodiques à structure non dégradée :

Ce sont des sols salins (Solontchaks), soumis à l'influence d'une nappe salée peu profonde riches en sels de sodium, caractérisés par une conductivité électrique supérieure à 4mmhos/cm (Duchaufour, 1988).

- **Sols salins à complexe calcique (Solontchaks) :** Ils sont très fréquents en Algérie (FAO, 2005), et sont caractérisés par un ESP < 15% et un profil peu différencié (Servant, 1975). Ils se rencontrent dans les zones steppiques ou désertiques dans lesquelles des nappes salées contiennent à l'instar des sels solubles, une quantité importante de calcium qui alimente le profil (Halitim, 1973).
- **Sols salins à complexe sodique (Solontchaks sodiques) :**Ce type de sol est caractérisé par un ESP> 15% se rencontre en bordure de mer, ou dans les lagunes côtières, sa structure tend à se dégrader et devient poudreuse (Duchaufour, 1988).

I.1.4.2Sous classe des sols sodiques à structure dégradée :

Ce sont des sols alcalins à structure dégradée (Duchaufour, 1976). On distingue trois (03) groupes selon les étapes d'évolution des profils (Duchaufour, 1988) :

Sols alcalins non lessives (Solontchaks-Solonetz) : Ils sont fréquents en Algérie (Durand, 1983). Leur profil est de type AC ou A (B) C.

Sols alcalins lessives de type ABC : Ces sols existent en Algérie, mais sont très localisés dans les zones humides (Durand, 1983).

Sols alcalins dégradés (Solods) : Présentent une structure dégradée complètement en surface avec un pH de 4 à 5 en profondeur un pH élevé de 9 à 10.

I.5 Répartition des sols salés

I.5.1 Dans le monde

D'après SZABLOCS (1989) 932,2 million d'hectares subissent à des degrés de sévérité variable, le phénomène de salinisation dont une bonne partie se trouve localisée dans les régions steppiques où le processus de salinisation est plus marqué du fait des températures élevées durant presque toute l'année, du manque d'exutoire et de l'absence de drainage efficient.

Dans une étude récente, les sols salés occupent une superficie de 950 millions d'hectares. Il a été estimé que 20% des 275 millions d'hectares des terres irriguées et 15% (227 millions d'hectares) des

terres cultivables sont affectés par la salinité en Afrique du nord et au Moyen-Orient, elle couvre près de 15 millions d'hectares, dont 15% sont dépourvus de toute végétation.

Tableau I.1 : Superficies affectées par la salinité dans le monde

Régions	Superficies (millions d'hectares)
Afrique	80 ,5
Europe	50,8
Amérique du nord	15,7
Amérique du sud	129,2
Asie du sud	87,6
Australie	357,3
Mexique et Amérique centre	2
Asie du sud-Est	20
Asie du centre et du nord	211,7
Total	954,8

I.4.2 En Algérie

En Algérie, il n'est recensé aucune étude cartographique fiable et précise permettant de délimiter les zones touchées par la salinité des terres et la quantification de la teneur des sels dans le sol. Néanmoins il existe quelques données fragmentaires qui donnent une idée générale sur le phénomène de salinité et de la dégradation des terres.

Ce phénomène est observé (voir carte ci-jointe) dans les plaines et vallées de l'Ouest du pays (Mina, Cheliff, Habra Sig, Maghnia) dans les hautes plaines de l'Est (Constantine, Sétif, Bordj Bou Arreridj, Oum El Bouagui),aux abords des Chotts et de Sbkhas (Chott Ech Chergui, Chott Gharbi, Chott Hodna, Chott Melghir, Sebkha d'Oran, de Benziane, Zemmoul, Zazhrez Gharbi et Chergui, etc..) et dans le grand Sud (dans les Oasis, le long des oueds, etc…

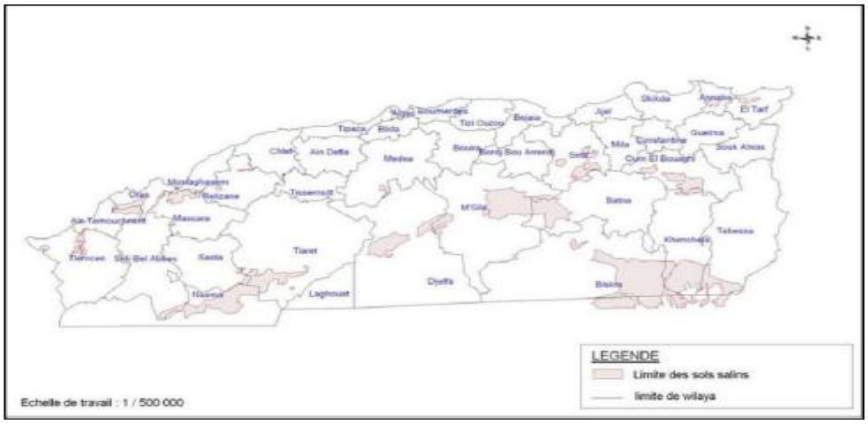


Figure I.1 : Répartition des sols salins au nord de l'Algérie.

Chapitre II

Traitement des sols

Chapitre II : Traitement Des Sols

II.1. Introduction

La technique du traitement des sols a été utilisée en France dès la fin des années soixante et, jusqu'au milieu des années soixante-dix, principalement appliquée à la réutilisation en remblai des sols sensibles à Veau et humides. Elle a ainsi permis de réaliser, dans de bonnes conditions techniques, économiques et de délais, les grands travaux de terrassement nécessités par la construction des programmes autoroutiers du Nord, de l'Est et de l'Ouest de la France, ainsi que l'aéroport de Roissy-Charles de Gaulle. Dès cette époque, il avait été considéré que l'état des connaissances et de l'expérience était suffisant pour qu'un document méthodologique, codifiant la technique du traitement des sols dans cette application particulière, puisse être produit.

Par la suite, la technique s'est étendue à la réalisation des couches de forme et principalement des couches de forme autoroutières.

Elle a abordé ce domaine d'abord par les sols fins, en développant eu particulier la technique du traitement mixte des limons, puis progressivement s'est étendue à une palette de plus en plus large de matériaux, allant des sols fins aux graves argileuses ou propres, voire aux mélanges de sols fins et d'éléments blocaille. Parallèlement, les techniques d'exécution, les matériels, les produits de traitement se multipliaient et se diversifiaient pour s'adapter aux particularités de cette variété de matériaux. De nombreuses publications ont rendu compte des progrès qui étaient obtenus au fur et à mesure des chantiers.

Dans un contexte aussi évolutif, il était difficile, voire non souhaitable, de produire un document méthodologique qui risquait de figer prématurément la technique.

Toutefois, dès la fin des années quatre-vingt, devant la place grandissante occupée par les couches de forme en sols traités dans les grands projets et la prise en compte toujours plus forte de ces couches dans la structure des chaussées, un tel document devenait indispensable.

Un premier pas a été fait en 1992, avec la parution du GTR (Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme).Qui, d'une part, précise les classes de matériaux devant subir un traitement pour être utilisés dans des couches de forme. Et, d'autre part, propose une démarche empirique pour la prise en compte des couches de forme en sols traités dans le dimensionnaient des

structures de chaussées (en fixant la classe de plate-forme pouvant être atteinte par une couche de forme en sol traité de nature, de performances et d'épaisseur données).

II.2.Objectifs d'un traitement de sol

Le but du traitement est de modifier les caractéristiques physico-chimiques et géotechniques d'un matériau le plus souvent le sol naturel en place, mais parfois un matériau rapporté pour en améliorer rapidement et durablement le comportement mécanique. Pour cela, on incorpore dans le matériau à traiter un ou plusieurs produits qui apportent modification de l'état hydrique, stabilité immédiate et accroissement des performances mécaniques dans le temps. De nombreux matériaux sont ainsi valorisables : limons, sables, graves argileuses, craie, etc. Les liants utilisés sont de nature hydraulique : chaux, ciment, liant hydraulique routier. Pour des ouvrages plus spécifiques, l'utilisation de bentonite augmente l'imperméabilité des matériaux traités. Cette solution apporte une structure durable aux ouvrages.

II.3. Influences de traitement de sol (liants hydrauliques) sur les propriétés géotechniques et mécaniques

Les liants hydrauliques par exemple la chaux et le ciment contribuent en général à l'amélioration des propriétés géotechniques et mécaniques des poudres minérales.

L'ampleur des effets des liants dépend surtout de la granulométrie et de la minéralogie de la matière première traitée.

II.3.1 Sur les propriétés géotechniques

II.3.1.1 La granulométrie

L'ajout de liant hydraulique à un sol argileux ou latéritique crée une agglomération de ses particules, contribuant à une augmentation de leurs tailles pour rejoindre celles des limons et du sable et par conséquent fait diminuer la fraction argileuse. Ce phénomène est dû aux réactions d'échange cationique responsable de la floculation- agglomération des particules argileuses et aussi aux réactions pouzzolaniques impliquant les minéraux argileux.

II.3.1.2 La consistance du sol

La consistance d'un sol est définie par les limites d'Atterberg et par la valeur au bleu de méthylène. La consistance d'un sol est immédiatement modifiée après l'ajout de la chaux ou du ciment. L'effet de la chaux sur les sols argileux ou latéritiques est plus ressenti sur les limites d'Atterberg que ne l'est celui du ciment. Cette modification immédiate est due aux réactions d'échange cationique responsable de la floculation-agglomération des particules argileuses.

L'ajout de la chaux ou du ciment à un sol argileux s'accompagne d'une diminution de la limite de liquidité (wl), d'une augmentation de la limite de plasticité (wp) et par conséquent d'une diminution de l'indice de plasticité (Ip).

Par contre pour un sol limoneux, on observe les phénomènes contraires pour la limite de liquidité et celle de plasticité.

Il a été observé une augmentation des limites de liquidité et de plasticité dans le cas du traitement à la chaux des argiles saturées en calcium.

La teneur en eau optimale et la densité sèche maximale

L'ajout de la chaux ou du ciment à un sol argileux ou latéritique fait augmenter la teneur en eau optimale et par conséquence la densité sèche maximale diminue.

L'augmentation de la teneur en eau optimale est due à la forte demande en eau après l'ajout de ces liants en vue de dissocier le Ca(OH) 2 pour produire des ions Ca2+ nécessaires pour les réactions d'échange cationique et pouzzolanique. La diminution de la densité sèche maximale d'un sol par l'ajout de la chaux s'explique de deux manières :

- l'ajout de la chaux à un sol provoque l'agglomération des particules du sol qui occupent alors de grands volumes,
- La densité absolue de la chaux est généralement inférieure à celle des sols.

L'effet de la chaux sur ces paramètres est plus ressenti par rapport à celui du ciment.

II.3.1.3 Sur les propriétés mécaniques

L'ajout de chaux ou de ciment à l'argile ou à la latérite améliore les performances et les ropriétés mécaniques, principalement la portance CBR, la compression, la flexion et la raction par fendage (test brésilien) de ce sol.

Ces améliorations des propriétés mécaniques sont dues à la réaction d'hydratation du ciment CSH est produit, qui lie les particules de sol ensemble d'une part et, d'autre part, à travers la réaction pouzzolanique entre les minéraux argileux et Ca(OH) 2. Ces paramètres varient avec l'intégration de CSH au fil du temps.

La capacité portante typique du CBR pour trois jours de séchage à l'air puis quatre jours d'immersion est supérieure à la valeur après quatre jours d'immersion directe.

Ⅱ.4. Techniques de traitement possible

Le traitement des sols expansifs est souvent opéré pour augmenter leur résistance, ainsi que pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau.

Les techniques de traitement les plus utilisées sont :

- Traitement mécanique.
- Traitement thermique.
- Traitement chimique.

Le choix de l’une de ces méthodes dépend de plusieurs paramètres tels que ; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l’opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d’environnement.

Ⅱ.4.1. Traitement mécanique

Ⅱ.4.1.1 Drainage :

C’est la technique la plus classique qui est mise en œuvre. Plusieurs procédés sont utilisés ; comme les tranchées drainant, drains de carton, drains de sables verticaux, tapis de la cote de la nappe (Livet).

Ⅱ.4.1.2 Substitution :

C'est la suppression de la couche du sol gonflant. C'est la solution la plus évidente. Si la couche a une grande épaisseur, la suppression totale ne peut être envisagée. Elle consiste à excaver jusqu'à une certaine profondeur puis remblayer avec des sable ou autres matériaux graveleux. C'est une solution très coûteuse.

Ⅱ.4.1.3 Compactage :

Dawson recommande de compacter les argiles à des densités minimales et Seed (1961) note que les argiles compactées de la côte sèche de l'optimum ont plus tendance à gonfler que si elles sont compactées de la côte humide. Malheureusement, de la côte humide, Les argiles sont moins résistantes. Il faudrait donc retrouver un compromis.

Ⅱ.4.1.4 Préhumidification :

On crée ainsi un gonflement avant construction et si une forte teneur en eau est maintenue.

Le volume restera sensiblement constant par la suite. Deux techniques sont utilisées :

- Simple arrosage par jet.
- Création de bassins au-dessus du sol gonflant, et c'est beaucoup plus utilisé

Ⅱ.4.2. Traitement thermique

Une augmentation de la température peut améliorer la résistance d'une argile. En réduisant La répulsion électrique entre les particules sous l'effet de la chaleur, on provoque un écoulement de l'eau interstitielle due au gradient thermique appliqué.

Ⅱ.4.3.Traitement chimique

Deux techniques de stabilisation chimique peuvent être effectuées :

Ⅱ.4.3.1Traitement chimiques par ajouts des matériaux inertes :

Par exemple les sables, les graviers, utilisés en mélange avec les argiles gonflantes. Ces matériaux inertes réduisent le pourcentage global d'éléments actifs (inférieurs à 2 microns) et réduisent l'activité

du gonflement de l'argile. L'efficacité de ce mode de traitement sera fonction du pourcentage d'éléments inertes, de leur granulométrie et du mode de mise en place du mélange.

Ⅱ.4.3.2Traitement chimique par additifs :

Elle est employée surtout pour des sols contenant une certaine quantité d'argile. Ils ont pour effet de réagir avec la fraction argileuse et de modifier leur environnement chimique et sa structure minéralogique.

Parmi les stabilisations les plus couramment utilisées, on distingue :

- Traitement par ajout de chaux.
- Traitement par ajout de ciment.
- Traitement mixte (chaux-ciment).

Chapitre III

Traitement des sols par le ciment (ARDIA 600)

Chapitre III : Traitement des sols par le ciment

III.1Le ciment (ARDIA 600)

III.1.1 Définition

Ardia 600 est un liant hydraulique routier, conforme à l'avant-projet de norme algérienne NA 17061, pour le traitement des sols (remblais, PST et Couche de forme) et le recyclage des chaussées. Il permet de valoriser les matériaux en place pour tous types de routes et de plates-formes.

Il adapté, de par sa composition et ses caractéristiques, aux techniques routières. Il est recommandé en particulier pour les traitements des remblais, couches de forme et retraitements de chaussées. Les performances mécaniques des matériaux traités peuvent être vérifiées par une étude de laboratoire avant le début du chantier.

III.2. Application produit ARDIA

III.2.1.Amélioration et Traitement des sols

Pour la réalisation des remblais, couches de forme et d'assises de chaussées, des pistes, des plates-formes industrielles, des aires de stockage, parkings, routes forestières et d'exploitations agricoles.

III.2.2.Traitement des arases / « PST » Partie Supérieure de Terrassement

Les performances de l'ARDIA 600 permettent l'optimisation des structures aussi bien avec des sols fins qu'avec des sols sableux ou graveleux avec fines.

III.2.3. Retraitement en place des chaussées détériorées

La solution ARDIA 600 permet de valoriser les matériaux en place pour les routes nationales, départementales et voiries communales.

III.3. Dosages indicatifs

Les dosages à respecter varient en fonction du type d'application, de la nature et de la qualité des matériaux à traiter, voici quelques dosages à titre indicatif

- Remblais / Arase / PST : 1.5 à 5%

- Couche de forme : 5 à 7%
- Couche d'assise / (gaves traitées) 3 à 9%
- Retraitement en place : 3 à 5%

III.4.Techniques de traitement possible par produit ARDIA600

III.4.1. Stabilisation et Traitement des Sols

Le traitement des sols en place est une technique d'amélioration et de stabilisation des remblais, de la partie supérieure des terrassements de la couche de forme et des couches d'assise.

Cette technique permet de conférer à des matériaux inutilisables en remblai (argiles, limons, marnes, craies, …) des performances largement supérieures à celles des matériaux granulaires naturels traditionnellement réservés à la réalisation des couches de forme.

Les sols en place sont malaxés avec le Liant Hydraulique Routier et compactés pour former un matériau rigide et imperméable.

III.4.2. Recyclage de Chaussée

Le traitement des chaussées en place à froid au Liant Hydraulique Routier est une solution alternative aux méthodes classiques de renforcement ou d'entretien des chaussées dégradées.

Cette technique consiste à recréer à partir de la chaussée existante, une nouvelle structure homogène et adaptée au trafic. L'ancienne chaussée dégradée est fraisée, malaxée au liant hydraulique routier puis compactée. Une finition de surface peut être appliquée par-dessus en fonction du dimensionnement.

III.4.3. Chaussée Rigides

La chaussée rigide est une solution de revêtement routier, autoroutier et d'aménagement de voiries urbaines.

La chaussée rigide peut être en : dalles courtes non armées et non goujonnées, dalles courtes non armées et goujonnées ou béton armé continu, ou en BCR (Béton Compacté Routier).La structure repose directement sur une couche de fondation en béton maigre ou sur une grave traitée au Liant Hydraulique routier, ou sur l'ancienne chaussée dans le cas d'un renforcement.

Ce type de structure est adapté aux trafics spéciaux et aux trafics lourds.

Chapitre IV

Description du Site étudié

« Chott El-Hodna »

Chapitre IV : Description du site étudie

IV.1 Descriptif

Chott-El-Hodna fait partie d'une série de chotts des eaux de l'Atlas saharien au sud et de l'Atlas tellien au nord. Paysage verdoyant haute plaine steppique, qui s'inscrit dans la perspective phytogéographique du domaine Maghreb Prairie. Le bassin est situé à l'extrémité orientale du plateau. S'étendant sur 220 km de long et 90 km de large, pris en coincé entre deux montagnes 1800 à 1900 m d'altitude au nord et 600 à 900 m d'altitude au sud. bassin hydrologiquement fort de 26 000 km2bassin fermé, d'une superficie de 8500 km2, comme niveau de base la vallée du bassin, située au milieu de son fond plat, d'une superficie de 1100 km2, est le soi-disant "Le Chott-El-Hodna" est situé à une altitude de 400 m sur la surface cruellement étendue, le chott est de forme ovale, en forme d'eau salée, long de 77 km et large de 19 km, bien que sa surface immergée soit variable, elle ne dépasse jamais 80000 ha.

Chott El Hodna est alimentée par au moins 22 cours d'eau, les ressources en eau douce doivent être reconstituées. Le chott ne se remplit d'eau qu'en hiver. Sec en été, la croûtede sel recouvre toute la zone.

Figure IV.1 : Le Chott en période d'été.

Figure IV.2 : Le Chott en période d'hiver

IV.2. Localisation de Chott El Hodna

Le Chott occupe la partie basse du centre du bassin du Hodna, situé à l'extrême Est des hauts plateaux, ce bassin s'étend sur 220 Km de long et 90 Km de large au maximum, piégé entre les formations suivantes :

Au Nord par la chaîne du Bibans et les monts du Hodna d'altitude comprise entre 1400 m et 1800 m.

Au Sud par l'extrémité orientale de l'Atlas Saharien (prolongement des monts du Ouled Naîls d'altitude comprise entre 1470 m et 1675 m et les Monts du Zab : 980 m.

A l'Est par le Djebel Metlili à 1495 m.

Au Sud-Est la ville de Barika et le Djebel Tsenia.

Au Sud-Ouest par les monts de Boussaâda terminaison des monts des Ouled Naîl.

A l'Ouest par les hautes plaines steppiques Algéro-oranaises où l'altitude moyenne est comprise entre 900 m et 1200 m.

La zone centrale, représentée par la Sabkha, ou zone d'eau libre salée, plate et nue est caractérisée par une absence totale de végétation.

Figure IV.3 1 : Situation géographique du Chott-El-Hodna

IV.3. Site de prélèvement d'échantillon

Le site est situé dans l'est d'Algérie dans la wilaya de M'sila, qui a reçu un projet de liaison routière entre le village de Ain el Khadra et M'cif. La route projetée traverse le Chott d'el Hodna sur un linéaire de 11 km. La coupe géotechnique du massif a révélé la présence de trois couches de sol consécutives : des dépôts de vase et des traces de terre végétale d'épaisseur 0,2 à 0,4 m, suivie d'une couche de sol consécutives. Et après une couche de sable. Le prélèvement des échantillons d'essais a été effectué à l'aide d'une pelle mécanique entre 1,50 et 2,20 m de profondeur.

Figure IV.4 : Localisation du site de prélèvement d'échantillon.

Chapitre V

Programme expérimental et Procédures d’essais

Chapitre V : Programme expérimental et procédures d'essais

V.1 Introduction

Le programme expérimental est reparti en deux parties, la première partie concerne les essais d'identification et les essais mécaniques du sol témoin (non traité), et la deuxième partie concerne les essais d'identification et les essais mécaniques du sol traité.

V.2Sol non traité :

V.2.1 Les essais d'identification :

- Paramètres d'état
- Analyse minéralogique.
- Analyse chimique.
- Analyse granulométrique. (Par tamisage et par sédimentométrie).
- Limites d'Atterberg.
- Essai au bleu de méthylène.

V.2.2.Les essais mécaniques :

- Proctor normal.
- C.B.R. immédiat.
- Compression simple.

V.3Sol traité :

V.3.1.Les essais d'identification :

- Limites d'Atterberg.
- Essai au bleu de méthylène.

V.3.2. Les essais mécaniques :

- Proctor normal.
- C.B.R. immédiat.
- Compression simple.

V.4 Description des essais

V.4.1 Essais d'identification

V.4.1.1 Paramètres d'états :

Ils comportent :

- La teneur en eau qui permet d'apprécier la consistance des sols (NF 94-050).
- Les masses volumiques humide et sèche (NF P 94-053).

La teneur en eau c'est le rapport de la masse de l'eau contenue dans le sol (mw) sur lamasse des grains solides (md) qui le constituent exprimé en pourcentage :

L'échantillon de sol est pesé, puis placé dans une étuve. Une fois la dessiccation obtenue,l'échantillon est pesé à nouveau. Les deux pesées donnent par différence la masse de l'eaucontenue dans le sol.

La masse volumique humide d'un sol (γh) est le quotient de la masse humide (mh) du sol par le volume (V) qu'il occupe (y compris les fluides interstitiels : air + eau).

La masse volumique sèche d'un sol (γd) est le quotient de la masse des grains solides (ms)du sol par le volume (v) qu'il occupe.

La masse volumique sèche peut être obtenue comme le rapport du poids volumique humide par l'unité plus la teneur en eau ($\gamma_d = \gamma_h/1+w$).

V.4.1.2 Analyse minéralogique : DRX

La diffraction des rayons X est l'une des techniques couramment utilisées pour l'identification desespèces minérales cristallisées d'une matière première.

Tout corps cristallisé peut être analysé par diffraction des rayons X car ses atomes sont arrangés selon des plans cristallins spécifiques.

Un faisceau de rayons X est diffracté sur un réseau de plans cristallins selon la loi de Bragg :

$$\mathbf{2d \sin\theta = n\lambda}$$

Où :

- n : l'ordre de la diffraction,
- λ : longueur d'onde de la source émettrice,
- d : espacement entre deux plans parallèles successifs du réseau cristallin.

Pour une source émettrice de Rayons X donnée (λ), le balayage selon un angle d'incidence θ d'une préparation représentative d'un échantillon, permet d'accéder à la connaissance de tous les espacements réticulaires (d) de cet échantillon.

Pour l'analyse diffractométrie aux rayons X, des échantillons ont été broyés dans un mortier en agate jusqu'à une granulométrie < 80 µm puis séchés à l'air pendant une semaine. Les dépouillements des diffractogrammes ont été réalisés à l'aide des fiches A.S.T.M.

Figure V.1 : L'appareil de DRX (à niveau de labo de Lafarge).

Figure V.2 : Les pastilles d'échantillon pour le DRX.

V.4.1.3 Analyse chimique :

Le but de cet essai est de déterminer la nature chimique des échantillons choisis. Cette étape étant importante dans l'identification des matériaux locaux utilisés en construction surtout routière.

Figure V.3 : L'appareil de XRF S8 Tiger (au niveau du labo de Lafarge).

Figure V.4 : Appareillage pour XRF S8

V.4.1.4 Analyse granulométrique :

L'essai a été réalisé selon les prescriptions de la norme NF P 94-056 et NF 94-057.

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la distribution des particules qui forment le squelette des sols en vue de leur classification et elle s'effectue en deux étapes :

L'analyse granulométrique par tamisage après lavage pour la distribution dimensionnelle en poids des particules de taille supérieure à 80 microns.

L'analyse granulométrique par sédimentométrie, pour la distribution dimensionnelle en poids des particules de taille inférieure à 80 microns.

Figure V.5: Analyse granulométrique par tamisage.

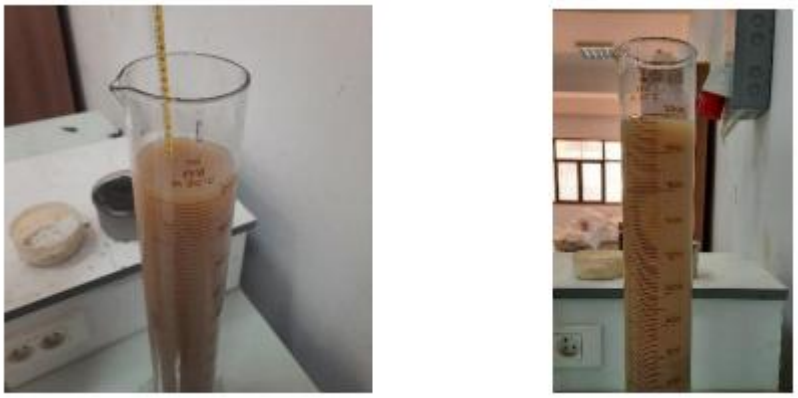


Figure V.6: Analyse granulométrique par sédimentométrie.

V.4.1.5 Limites d'Atterberg :

Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre :

- le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique : limite de liquidité (Wl),
- le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limite de plasticité (Wp).

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considérée, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute. La différence Ip = Wl –Wp qui définit l'étendue du domaine plastique, est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité.

L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon.

Figure V.7 : Appareil de Casagrande

V.4.1.6 Essai au bleu de méthylène :

Il permet de mesurer la capacité d'adsorption ionique des sols et granulats à l'aide du bleu de méthylène. Il a pour but de déterminer la quantité et l'activité de la fraction argileuse d'un sol d'une façon globale. Le résultat de l'essai dépend directement à la fois de la quantité et de la nature minéralogique de cette fraction. Le principe de l'essai consiste à introduire des quantités croissantes de bleu de méthylène jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées. Il apparaît alors un début d'excès qui marque la fin de l'essai et que l'on détecte par le test dit à la tâche. Ce test consiste à former avec une goutte de la suspension déposée sur du papier filtre normalisé, une tâche qui est un dépôt de sol coloré en bleu soutenu, entourée d'une zone humide incolore. L'excès de bleu se traduit par l'apparition dans cette dernière zone d'une auréole bleu clair. On dira alors que le test est positif.

L'essai a été réalisé selon la norme NF P 94-068.

Figure V.8 : Appareillage et test de l'essai VBS.

V.4.2 Essais mécaniques

V.4.2.1 Essai Proctor :

L'essai Proctor a pour objectif la détermination de la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale pour un compactage normalisé d'intensité donnée. Il consiste à compacter de façon identique des échantillons d'un même sol avec des teneurs en eau différentes. On constate que la densité sèche γd varie et passe par un maximum pour une teneur en eau déterminée dite optimale (Wop).

Il existe deux types d'essais Proctor. Selon l'intensité de compactage utilisé, l'essai sera appelé essai Proctor normal ou essai Proctor modifié.

L'essai choisi pour notre étude est l'essai Proctor normal car il est recommandé pour la construction routière. L'essai a été réalisé selon la norme NF P 94-093.

Figure V.9 : Machine et éprouvette d'essai Proctor.

V.4.2.2 Essai CBR immédiat :

Cet essai est un paramètre incontournable pour le dimensionnement mécanique des chaussées.

L'indice CBR est une grandeur utilisée pour caractériser un sol, en tant que support ou constituant d'une structure de chaussée. Le principe général de l'essai servant à déterminer l'indice de portance CBR, consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique de 19,35 cm2de section pour le faire pénétrer à la vitesse de 1,27 mm/mn dans une éprouvette de sol. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué les enfoncements de 2,5 et 5 mm sont alors rapportés, aux valeurs de 13,35 et 20 kN, qui sont respectivement les forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements.

$$CBR_1 = \frac{F_1}{13.35} X100 \qquad CBR_2 = \frac{F_2}{19.93} X100$$

F1 et F2 correspondent aux forces mesurées pendant l'essai, elles sont exprimées en kN.

L'indice portant CBR est alors défini conventionnellement par la plus grande valeur des rapports ainsi calculés. L'essai a été réalisé selon la norme NF P 94-078.

Figure V.10 : Appareil CBR

V.4.2.3 La résistance à la compression simple :

L'éprouvette est soumise à une charge monotonement croissante jusqu'à la rupture.

La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette :

$$RC = 10\ FS$$

Où :

- Rc : résistance à la compression de l'éprouvette en MPa.
- F : charge maximale supportée par l'éprouvette en kN.
- S : valeur moyenne de la section en cm2

L'essai a été réalisé suivant la norme NF P18-406.

Figure V.11 : Appareil de Compression Simple.

Chapitre VI

Présentation et analyse des Résultats d’essais

Chapitre VI : Présentation et analyse des résultats d'essais

IV.1 Introduction

Ce chapitre regroupe l'ensemble des résultats des essais réalisés sur le sol étudié et leur interprétation, il est organisé sous forme de deux parties :

- Une première partie concernant le sol non traité, qui comporte les essais d'identification (paramètres d'état, l'analyse minéralogique et chimique et limites d'Atterberg), les essais mécaniques (Proctor normal, la portance immédiate, compression simple).

- Une deuxième partie portant sur le sol traité à faible teneurs en ciment (ARDIA), qui regroupe des essais d'identification (valeur de bleu de méthylène, limites d'Atterberg), les essais mécaniques (portance immédiate, compression simple, Proctor normal).

Les interprétations des résultats seront décrites à la fin de chaque partie.

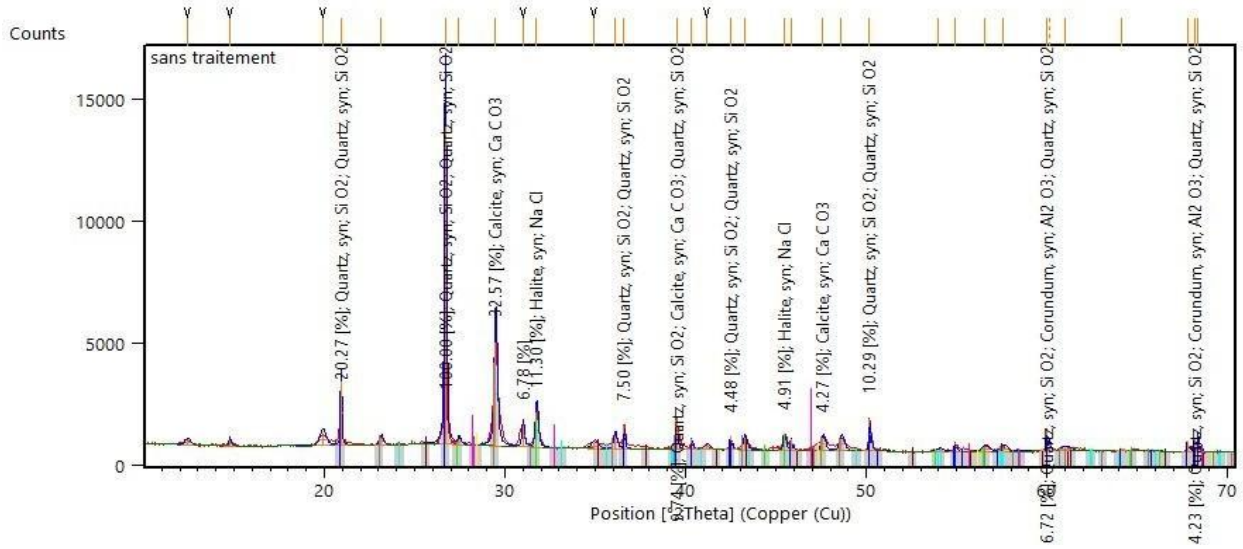
Rappel : Ce travail porte sur l'étude des effets du traitement de ciment(ARDIA) sur le comportement des sols salés du Chott-El-Hodna (wilaya de M'sila). Pour des raisons pratiques dans le but d'avoir une plage de résultats plus représentative et plus significative dans l'ensemble des essais qui ont été effectués, les résultats correspondants aux faibles teneurs en ciment(ARDIA): 2%, 4%, 6%

IV.2 Sol non traité :

Cette partie présente en premier lieu les résultats des essais d'identification, les paramètres d'état (teneur en eau, poids volumique humide et sèche), analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie, l'analyse minéralogique et chimique (S8) et limites d'Atterberg), ensuite les résultats des essais mécaniques (Proctor normal, la portance immédiate, compression simple).

VI.2.1Essais d'identification

VI.2.1.1Analyse Minéralogique DRX



Les résultats de cette analyse sont représentés sur la figure VI.1

Figure VI.1 : Résultats de l'analyse DRX

V.2.1.2 Analyse chimique S8

Les résultats de cette analyse sont représentés sur le tableau VI.1 et la figure VI.2

Tableau V.2 Résultats de l'analyse chimique

Constituants	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	K2O	Na2O	Pertes au feu
%	**37,555**	8,69	3,735	**17,81**	3,195	2,325	1,465	3,615	21,61

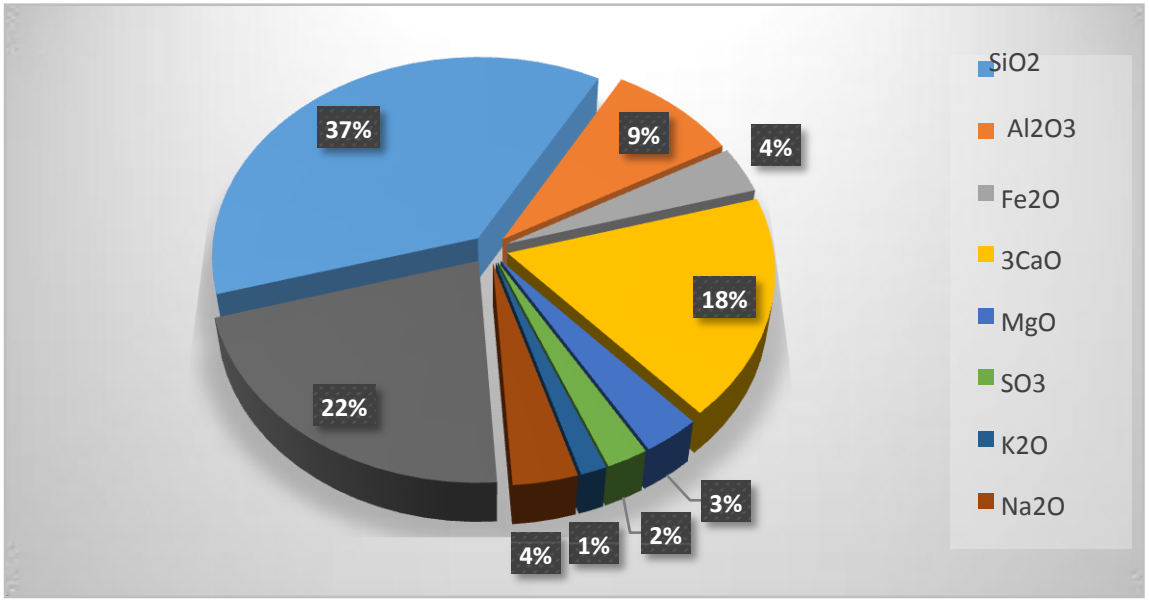


Figure VI.2 : Résultats de l'analyse chimique

V.2.1.3 Paramètres d'état

Profondeur	1 m	1,5 m	2 m
Volume du moule (cm^3)	500	200	100
Masse humide totale (g)	4044,8	2080,9	920,6
Masse sèche totale (g)	3896,7	1995,1	887,7
Masse du moule (g)	3093,3	1580,5	722,4
Masse du sol humide (g)	951,5	500,4	198,2
Masse du sol sec (g)	803,4	418,6	165,3
Masse d'eau (g)	148,1	81,8	32,9
Teneur en eau Wnat (%)	15,56	16,34	16,59
Masse volumique humide ρ_h (g/cm^3)	1,903	2,502	1,982
Masse volumique sèche ρ_d (g/cm^3)	1,6068	2,093	1,653
W_{nat} : moyenne (%)	**16,17**		
ρ_d : moyenne (g/cm^3)	**1,78**		
ρ_h : moyenne g/cm^3)	**2,13**		

Tableau VI.2Résultats des essais des paramètres d'état.

VI.2.1.4 Analyse granulométrique

Elle a pour but de déterminer la distribution des particules qui forment le squelette des sols en vue de leur classification (norme NF P 94-041 pour l'analyse par tamisage et norme NF P 94-057 pour l'analyse par sédimentométrie)

Tableau VI.3 Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sans broyage).

Tamis (mm)	Tamisats (%)			
	Essai01	**Essai02**	**Essai03**	**Moyenne**
5	100	100	100	100
2,5	100	100	100	100
1,25	99,89	99,90	99,91	99,90
0,63	99,77	99,75	99,65	99,73
0,315	98,66	98,54	98,87	98,69
0,16	94,35	94,23	94,40	94,33
0,08	87,47	86,99	87,47	87,31
0,075	87,3	85,17	87,49	86,63
0,055	83,36	83,13	83,14	83,21
0,038	79,12	79,04	79,11	79,09
0,025	74,93	75,33	74,93	75,10
0,017	70,87	71,28	70,77	70,91
0,012	66,38	67,22	66,21	66,6
0,008	59,67	56,43	61,7	59,27
0,005	52,24	45,76	52,35	50,18
0,002	3,42	4,27	3,26	3,65

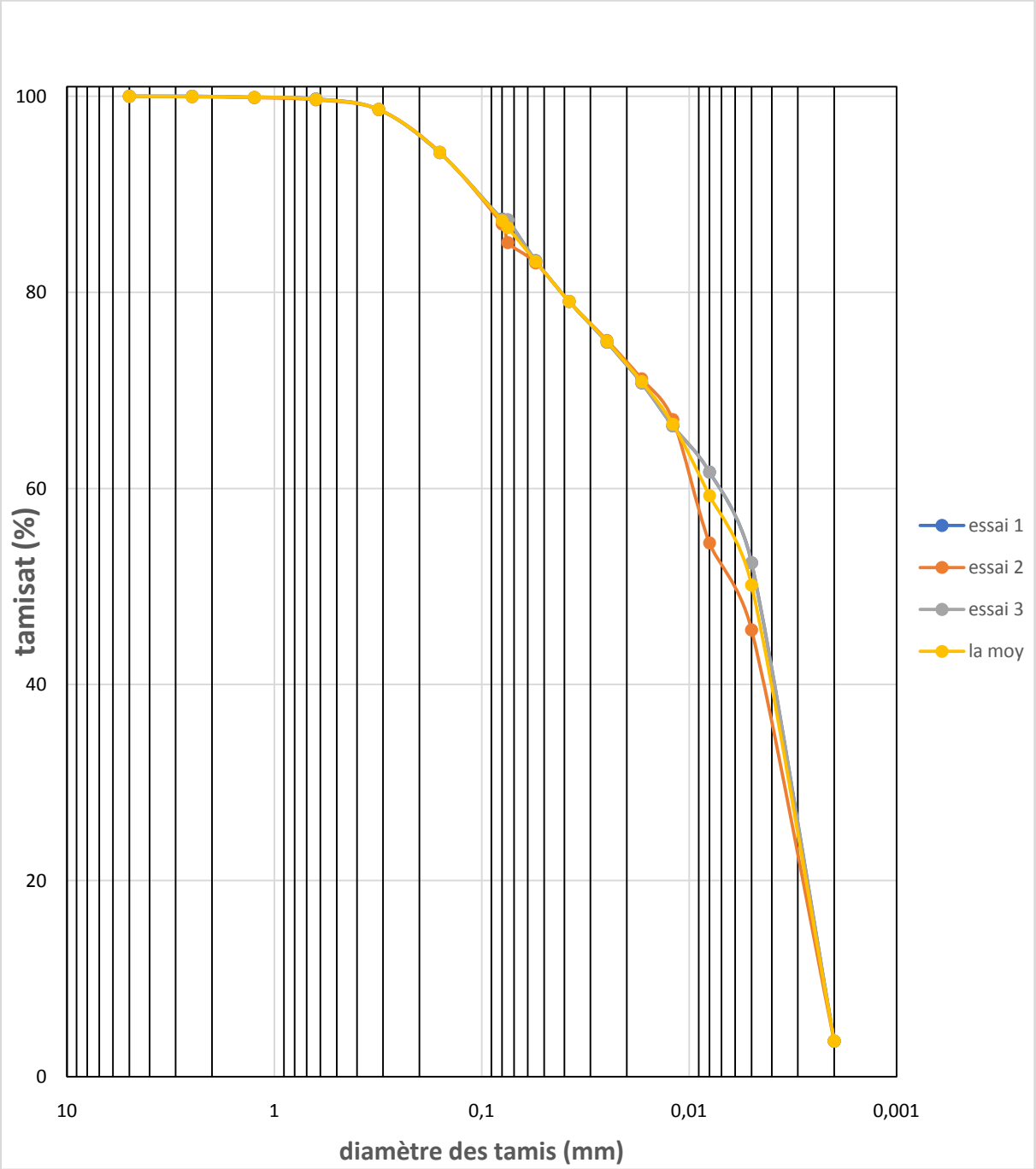


Figure VI.3 Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sol non broyé).

Tableau VI.4 Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sol broyé).

Tamis (mm)	Tamisats (%)			
	Essai01	**Essai02**	**Essai03**	**Moyenne**
5	100	100	100	100
2,5	100	100	100	100
1,25	99,96	99,99	99,89	99,96
0,63	99,67	99,69	99,9	99,68
0,315	98,15	97,92	98,07	98,05
0,16	90,97	91,85	90,96	91,20
0,08	82,97	82,30	81,97	82,40
0,075	81,96	83,18	81,96	82,37
0,055	79,24	79,27	81,18	79,9
0,038	78,2	79,39	78,2	78,60
0,025	74,24	75,55	74,64	75,00
0,017	70,66	71,92	70,36	70,98
0,012	65,91	64,91	66,91	65,91
0,008	59,49	50,77	58,39	56,22
0,005	48,49	46,58	47,79	47,62
0,002	7,91	7,8	7,92	7,88

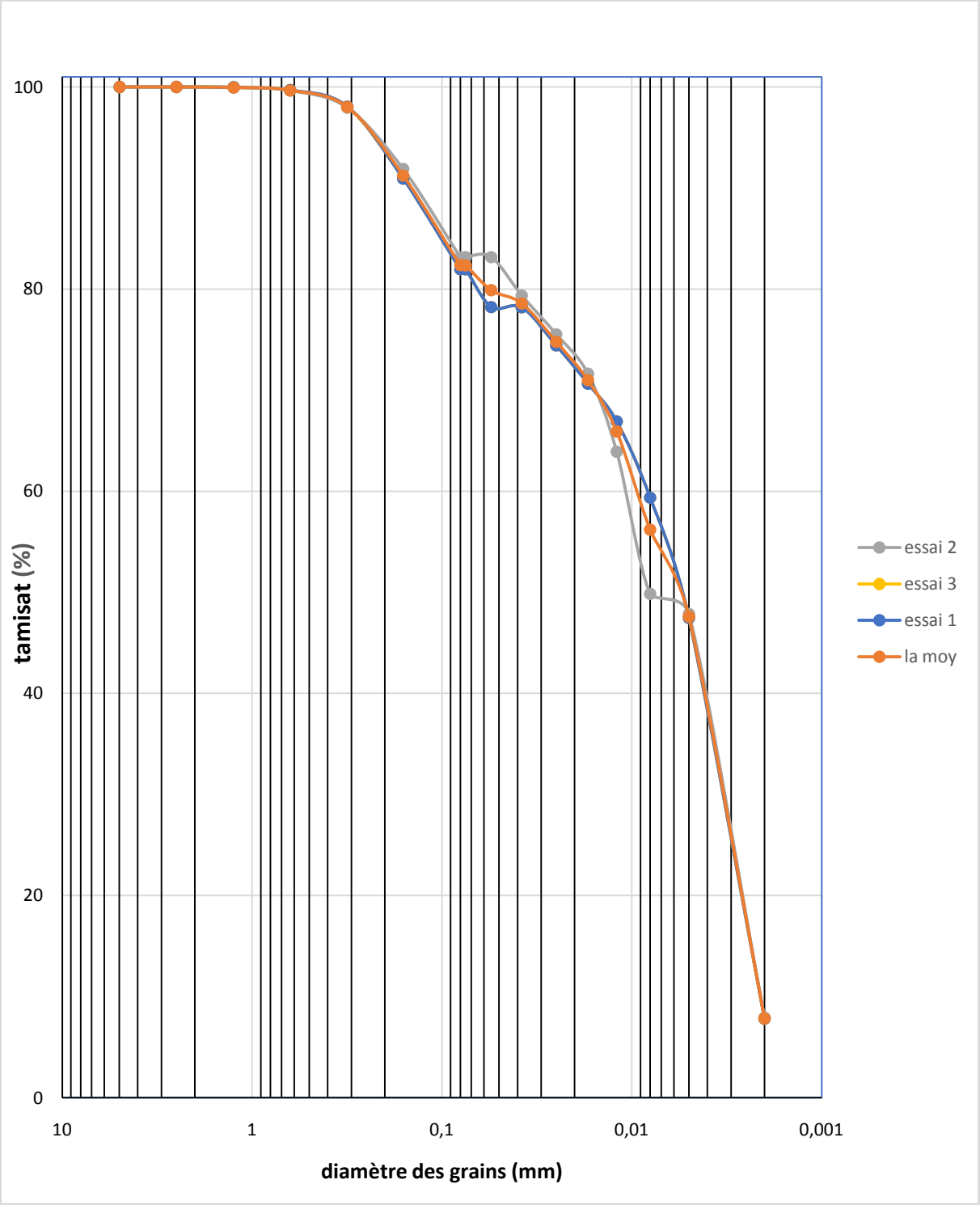


Figure VI.4 : Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sol broyé)

VI.2.1.5 Les limites d'Atterberg

Les limites de liquidité et de plasticité, dites limites d'Atterberg ou limites de consistance, sont des paramètres géotechniques destinés à identifier les sols, caractériser leur consistance et permettre de ce fait de les classer (NFP 94-051).

Les tableaux A.1 à A.6 qui présentent des valeurs des limites de liquidité, des limites de plasticité et des indices de plasticité correspondant aux différentes teneurs de ciment sont joints en annexe.

Le tableau V.5 Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg.

	Essai01	Essai02	Essai03	Moyenne
Limite de liquidité %	37,49	35,33	33,14	**35,33**
Limite de plasticité %	24,67	22,81	20,17	**22,55**
Indice de plasticité	12,82	12,52	12,97	**12,78**

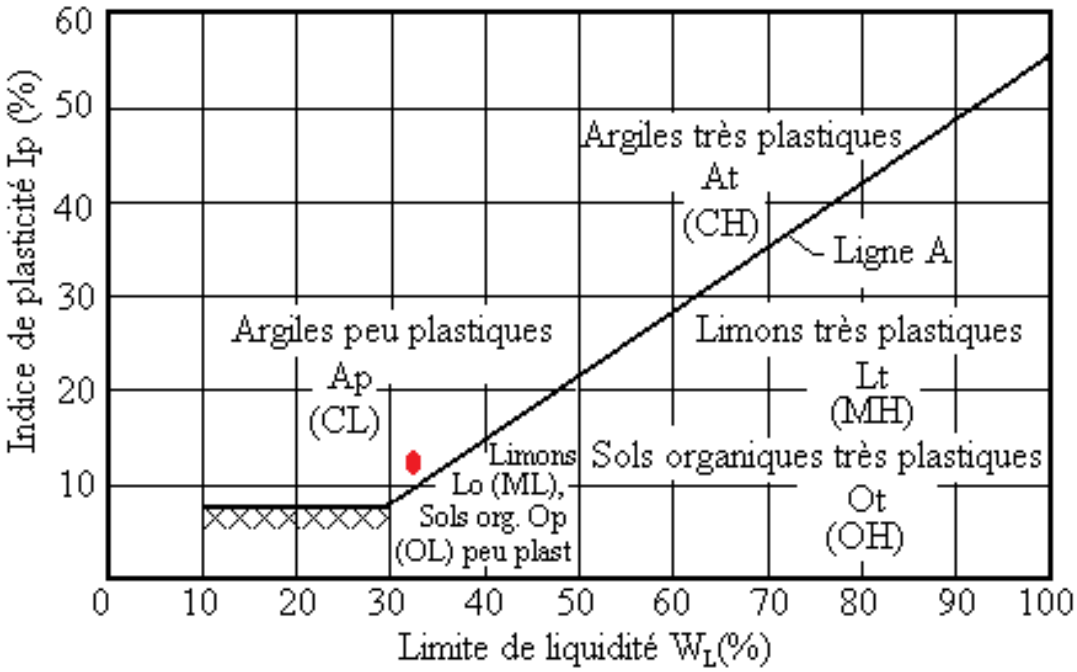


Figure VI.5 Classe des sols étudiés selon l'abaque de Casagrande

V.2.1.6 L'essai au bleu de méthylène

La valeur au bleu de méthylène constitue un paramètre d'identification permettant de mesurer la surface spécifique des particules solides contenues dans les sols fins et de déterminer l'activité de leur fraction argileuse (NF P 94-068).

Tableau VI.6 Résultats des essais de VBS.

Essai	Volume de la solution (cm3)	VBS (Cm3)	Surface spécifique (g/cm2)
01	210	7	146,93
02	210	7	146,93
03	200	6,67	140
Moyenne	206,67	6,89	144,62

Le tableau VI.7 Caractéristiques d'identification des essais effectués sur le sol témoin étudié.

Profondeur (m)	1,5 – 2,5
Teneur en eau naturel Wnat(%)	16,17
Poids volumique humide γh (g/cm3)	2,13
Poids volumique sec γd (g/cm3)	1,78
Limite de liquidité Wl	35,33
Limite de plasticité Wp	22,81
Indice de plasticité Ip	12,52
Valeur de Bleu de méthylène VBS	6,89
La surface spécifique (m2 /g)	144,62
Passants à 2 ,5mm (%)	100
Passants à 0,08mm (%)	87,31
Passants à 0,025mm (%)	75,1
Passants à 0,002mm (%)	3,65
Indice de consistance Ic : Ic = (Wl – W)/I	2,02

VI.2.1.7 Interprétation des résultats des essais d'identification

D'après les résultats de l'analyse chimique nous remarquons que les éléments prépondérants sont la silice et la chaux, ces deux éléments constituent la structure des argiles donc il s'agit d'argile avec la présence d'impuretés comme l'oxyde de fer, les sulfates et l'alumine.

La teneur en Silice (< 50%), reflète la faible présence de sable cette teneur en Silice reste inférieure à 80%, qui est la frontière entre les sols gonflants et non gonflants.

Selon la courbe de l'essai de l'analyse granulométrique plus de 50% des éléments ici 56.21% ont un diamètre < à 80 µm, en plus le pourcentage des éléments inferieurs à 25µm est de 75,1%. Donc il s'agit d'une argile très fine, la limite de liquidité est supérieure à 35,33% et l'indice de plasticité Ip est de 12,78%.

Ces valeurs sont très peu dispersées pour le prélèvement exploré. Elles semblent indiquer que le massif est homogène dans la zone étudiée.

Selon la classification LCPC en vigueur (Magnan ; 1980), il s'agit d'une argile peu plastique très consistante avec une activité importante de sa fraction argileuse qui indique la présence de montmorillonite calcique. Les modifications de la teneur en eau de ce type de sol sont généralement accompagnées de retrait ou gonflement considérable.

D'après les résultats obtenus la valeur de bleu de l'argile est supérieure à 6,89 donc cette argile se classe permis les sols argileux selon la norme française NF P 11 -300.

La surface spécifique est de 144,62 dépasse largement 100m2/g ce qui implique que notre argile est constituée essentiellement de minéraux de type vermiculite.

V.2.2 Les essais mécaniques

V.2.2.1 Essais Proctor normal

Le tableau V.8 présente les densités sèches en fonction des teneurs en eau à différentes teneurs en eau.

Les tableaux, qui sont joints en annexe présentent les détails des résultats obtenus

Tableau VI.8 Densités sèches en fonction des teneurs en eau.

	ESSAI 1		ESSAI 2		ESSAI 3		LA MOYENNE	
Pourcentage d'eau ajoutée à chaque compactage	W %	γd	W %	γd	W %	γd	W %	γd
16%	17,09	1,63	16,95	1,64	16,86	1,63	16,96	1,63
18%	20,05	1,65	19,62	1,66	19,34	1,66	19,67	1,65
20%	23,92	1,68	21,92	1,71	22,10	1,70	22,65	1,68
22%	26,74	1,60	25,95	1,62	26,60	1,58	26,43	1,60
24%	29,35	1,58	29,65	1,57	29,20	1,58	29,40	1,58

Les figures des courbes jointes en annexe présentent les caractéristiques optimums.

La teneur en eau à l'optimum Proctor normal Wopt= 20,37 % et la masse volumique sèche à l'optimum Proctor normal ρd = 1,68 g/cm3.

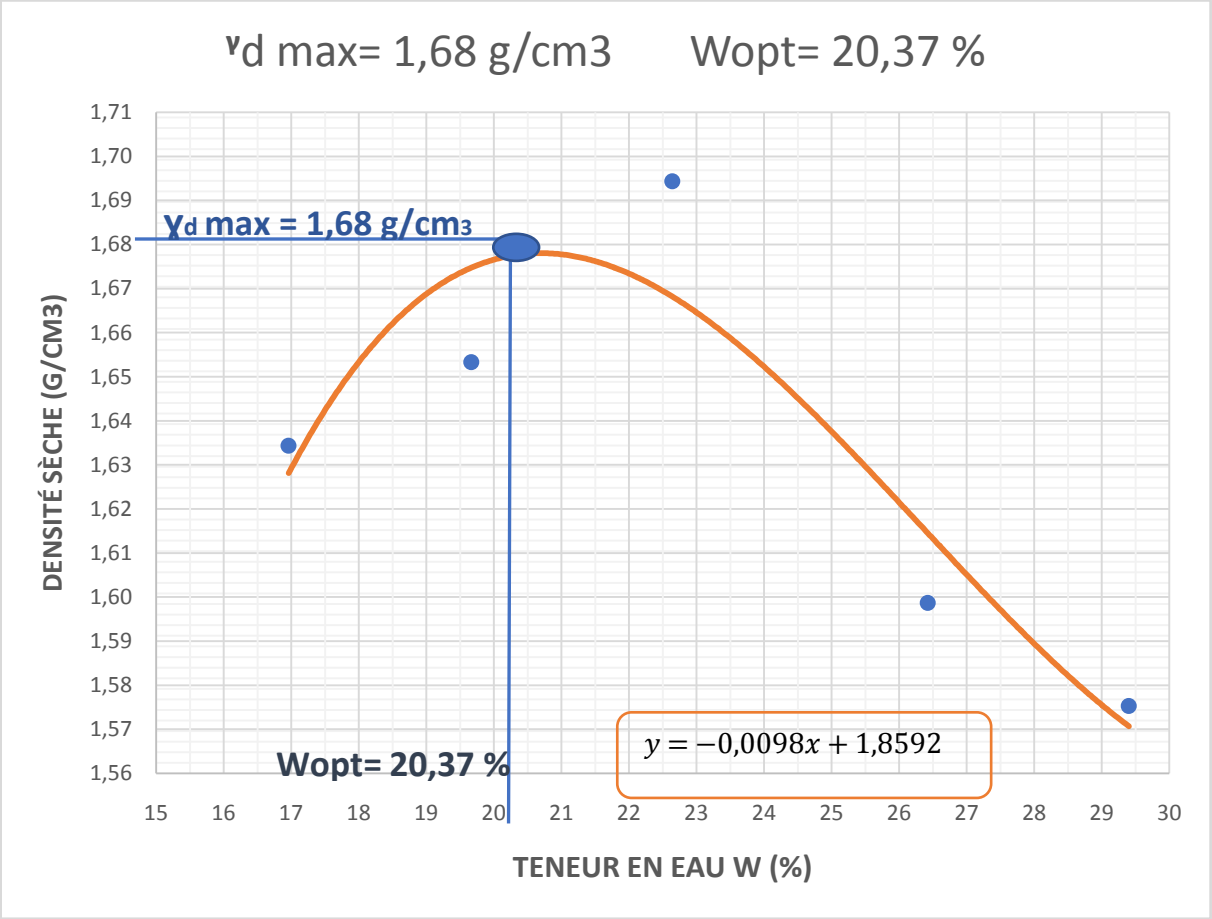


Figure VI.6 Masses volumiques sèches en fonction des teneurs en eau.

VI.2.2.2 Essai C.B.R. immédiat

Les tableaux V.9 et V.10 présentent les valeurs moyennes des forces de pénétration en fonction des enfoncements et de l'indice C.B.R. immédiat d'un éprouvette témoin confectionné aux caractéristiques optimums du Proctor modifié.

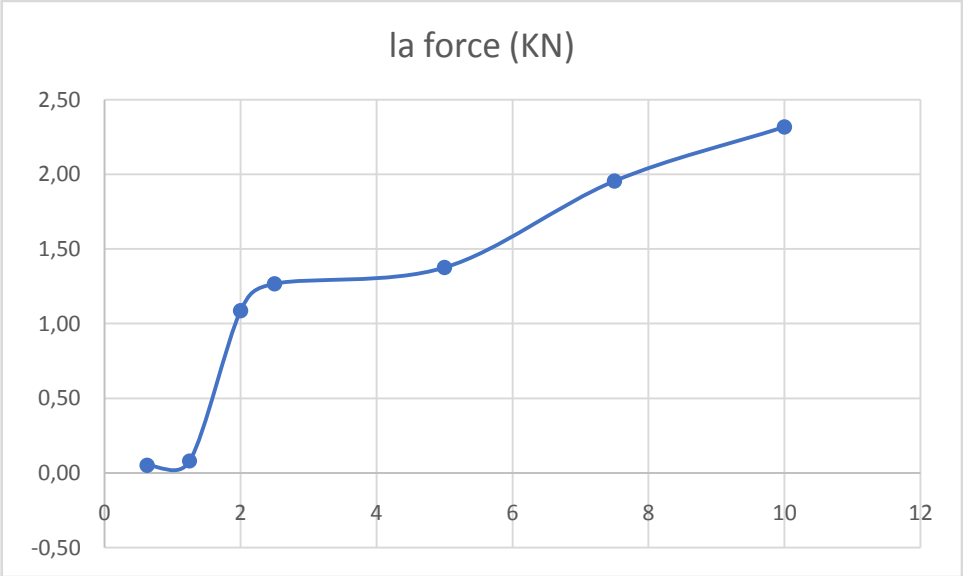
Tableau VI.9 Forces de pénétration en fonction des enfoncements

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,02	0,05
1,25	0,04	0,08
2	0,05	1,09
2,5	0,06	1,27
5	0,07	1,38
7,5	0,09	1,96
10	0,1	2,32

Tableau VI.10 Valeurs moyennes de l'indice C.B.R

Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
9,50	6,91	9,50

Les courbes des moyennes des forces de pénétration en fonction des enfoncements de l'éprouvette témoin sont jointes en annexe.



La figure VI.7 Forces de pénétration en fonction des enfoncements

VI.2.2.3 Essai de compression simple

Tableau VI.11 Résultats de la compression

Essai	**La résistance Mpa**	**La charge kN**
01	2,9	24,65
02	3,3	26,35
03	3,9	25,15
Moyenne	3,37	25,38

VI.3 Sol Traité

Dans cette partie on a regroupé l'ensemble des résultats qui concernent les essais d'identification (valeur de bleu de méthylène, limites d'Atterberg, l'analyse minéralogique et chimique(S8), et les essais mécaniques (portance immédiate, compression simple, Proctor normal) des échantillons obtenus à partir des éprouvettes traitées à faible teneur en ciment (ARDIA) et confectionnées à la teneur en eau aux conditions de l'optimum du Proctor normal.

VI.3.1 Essais d'identification

V.3.1.1 Limite D'Atterberg

Tableau VI.12 Limites de consistance à différentes dosages

Teneur en ciment %	WL	WP	IP
0%	35,33	22,55	12,78
2%	35,25	22,72	12,53
4%	32,97	23,24	9,73
6%	33,26	22,98	10,28

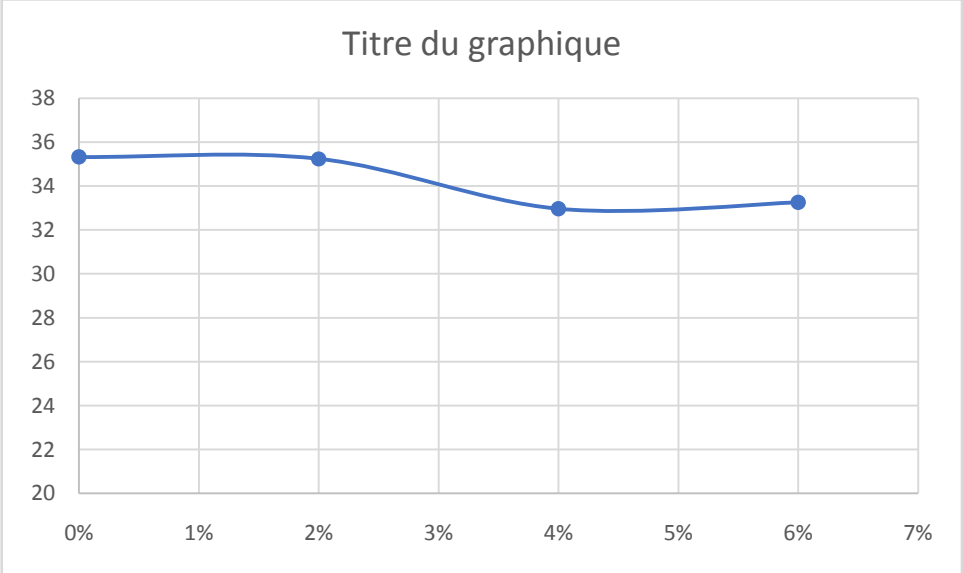


Figure VI.8 Limite de liquidité

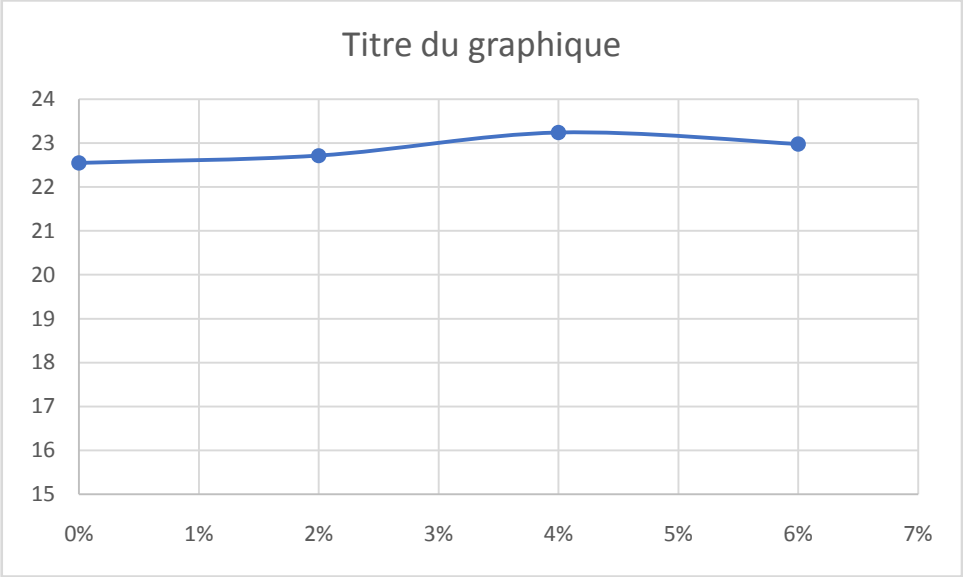


Figure VI.9 Limite de plasticité

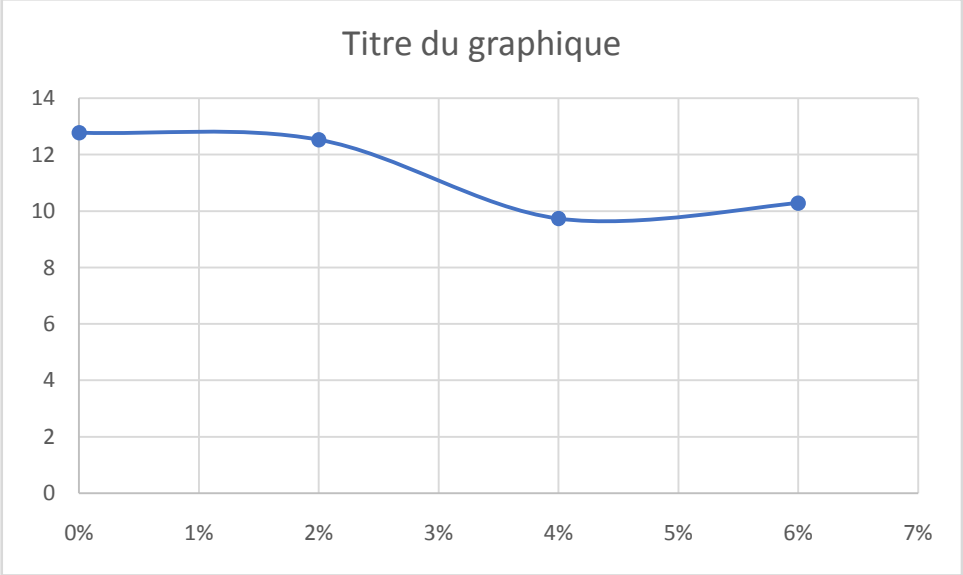


Figure VI.10 Indice de plasticité

Figure VI.11 Classification selon l'abaque de Casagrande

VI.3.1.2Essai au bleu de méthylène

Tableau V.13 : Bleu de méthylène par l'essai à la tâche

Teneur en ciment (%)	VBS (Cm3)	Surface spécifique (g/cm2)
0	6,89	144,69
2	6,67	140,07
4	6,44	135,31
6	6,11	128,38

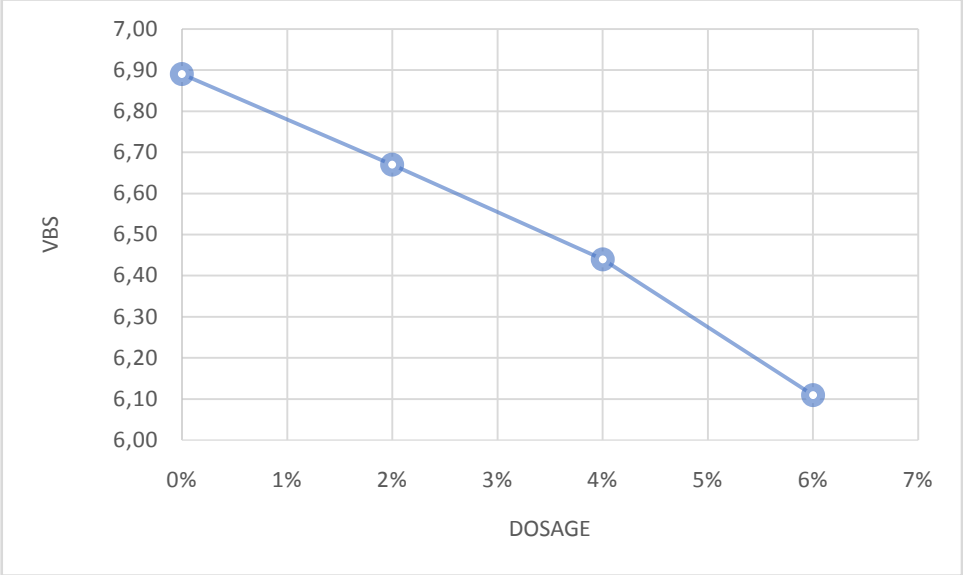


Figure VI.12 Bleu de méthylène à différents teneurs en ciment.

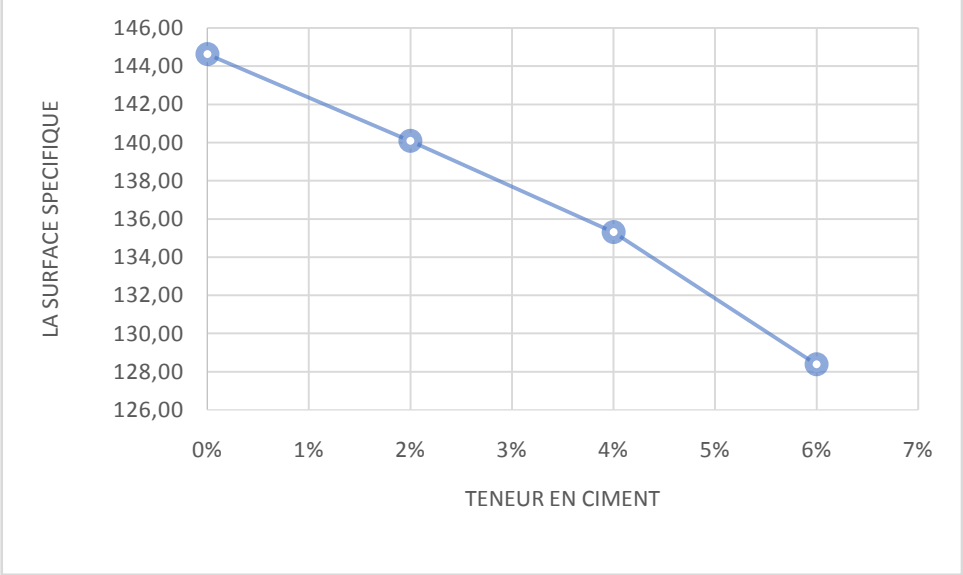


Figure VI.13 Surface spécifique à différents teneurs en ciment.

VI.3.2 Essai mécanique

VI.3.2.1 Proctor normal

Tableau VI.14 : Résultats des essais Proctor normal à différentes teneurs en ciment

Teneur en ciment	***0%***	***2%***	***4%***	***6%***
Masse volumique du sol sec (gr/cm^3)	**1,69**	**1,62**	**1,59**	**1,61**
Teneur en eau %	**22,65**	**20,61**	**19,95**	**20,96**

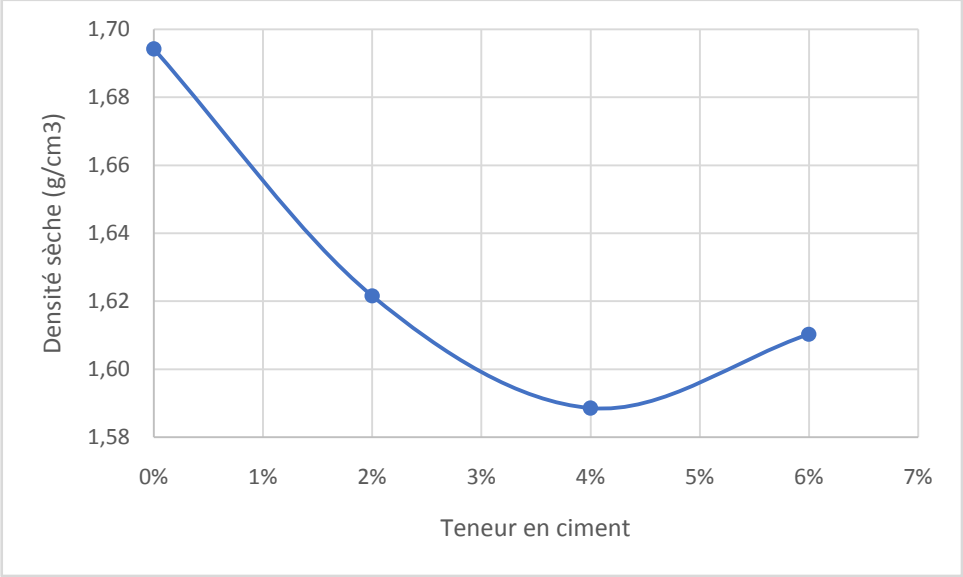


Figure VI.14 Densité sèche différentes teneurs en ciment

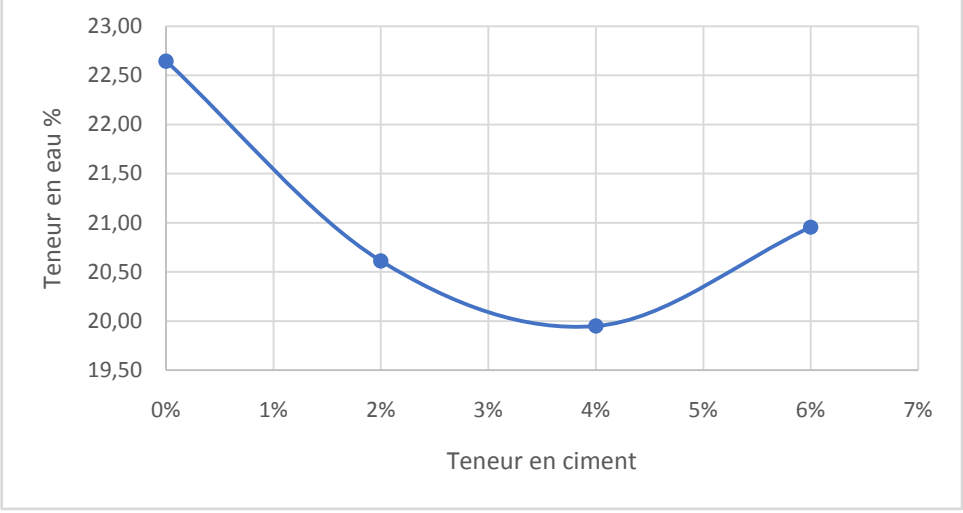


Figure VI.15 Teneur en eau à différentes teneurs en ciment

V.3.2.2 CBR immédiat

Tableau VI.15 Forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en ciment.

dép de piston	la force (KN) 0%	la force (KN) 2%	la force (KN) 4%	la force (KN) 6%
0,625	0,0507	0,4347	0,4782	0,4675
1,25	0,0797	0,7607	0,8694	0,8824
2	1,0869	0,9781	1,2606	1,2412
2,5	1,2680	1,2388	1,5431	1,5921
5	1,3767	2,0865	2,6733	2,6974
7,5	1,9563	2,6082	3,3689	3,4663
10	2,3188	2,9556	3,8470	3,8211

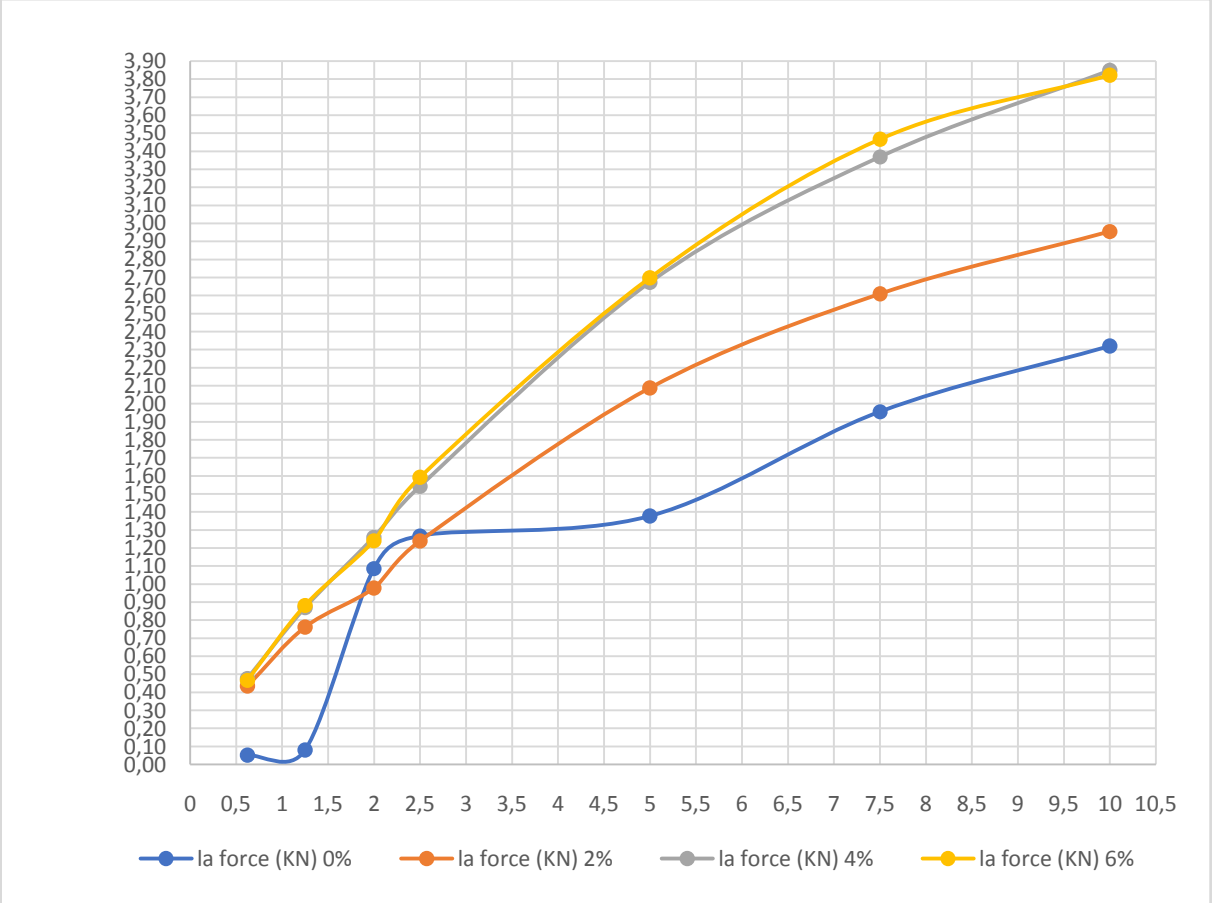


Figure VI.16 : Forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en ciment

Tableau V.16 Forces en fonction des teneurs en ciment pour chaque enfoncement

DOSAGE %	0,625 (mm)	1,25 (mm)	2 (mm)	2,5 (mm)	5 (mm)	7,5 (mm)	10 (mm)
0%	0,0507	0,0797	1,0869	1,2680	1,3767	1,9563	2,3188
2%	0,4564	0,7534	1,0213	1,2604	2,0646	2,5140	2,9558
4%	0,4782	0,8694	1,2606	1,5431	2,6733	3,3689	3,8470
6%	0,4675	0,8824	1,2412	1,5921	2,6974	3,4663	3,8211

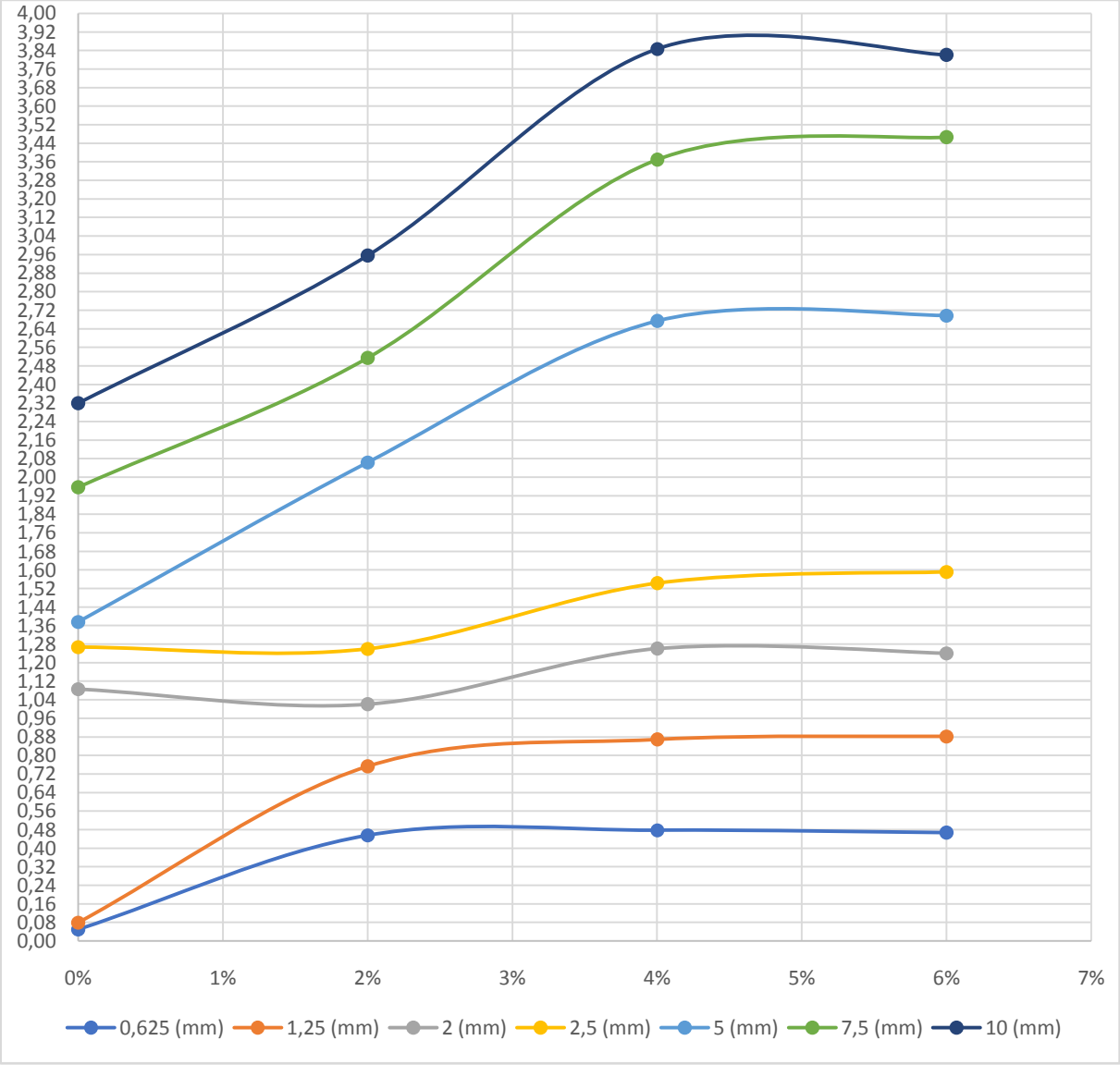


Figure VI.17 Forces en fonction des teneurs en ciment pour chaque enfoncement

Tableau VI.17 Indices C.B.R immédiats pour différents teneurs en ciment

Dosage en ciment (%)	Indice C.B.R. immédiat à 2,5mm	Indice C.B.R. immédiat à 5mm	Indice C.B.R. max
0	9,50	6,91	9,50
2	9,44	10,36	10,36
4	11,56	13,41	13,41
6	11,93	13,53	13,53

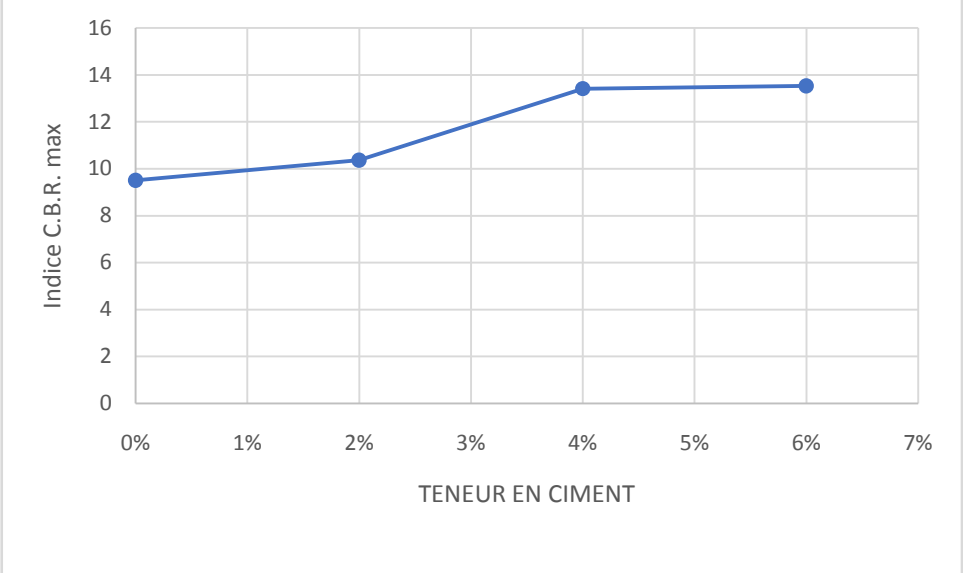


Figure VI.18 Indices C.B.R immédiats pour différents teneurs en ciment

VI.3.2.3 Compression simple

Tableau VI.18 Résultats de la résistance aux compressions pour différents teneur en ciment

Dosage en ciment (%)	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
0	25,38	3,37
2	29,27	5,22
4	40,12	8,47
6	49,82	9,98

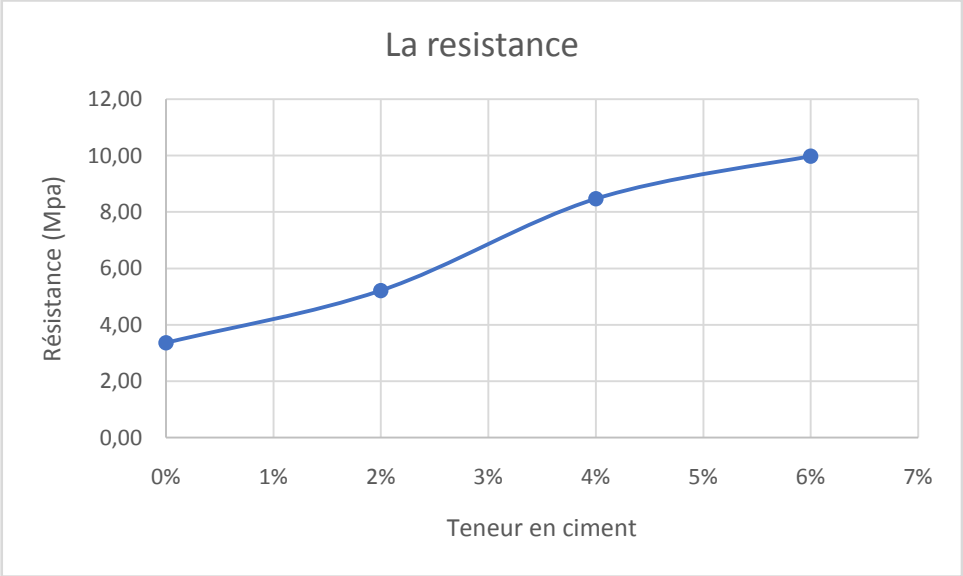


Figure VI.19 Résistance à la compression pour différents teneurs en ciment

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

A l'issue de ce travail, d'une part, certaines propriétés physiques et mécaniques et le comportement des sols salins ont été collectés selon diverses références nationales et internationales, et d'autre part, des recherches expérimentales ont été menées sur le sol prélevé. A partir du site de Chott El Hodna près du village d'Ain Khadra dans la province de Msila, la zone est considérée comme une zone semi-aride, cette dernière est considérée comme la capitale de Chott El Hodna (Sabkha), ce qui nous permet d'expliquer quelque chose sur le sol salé, Ce sont :

La salinisation des sols affecte 3,2 millions d'hectares en Algérie, dont Une grande partie est située dans les zones herbeuses.

Utiliser un sol salin dans son état naturel comme matériau de remblai ou couche La forme de la route n'est pas prise en compte. Ceux-ci peuvent être utilisés dans leur état naturel Traitement spécifique à l'aide de liants hydrauliques (chaux, ciment...) ou de liants Spéciales route.

Diverses études sur l'effet du traitement du sel sur certaines propriétés géotechniques Sols salins tels que la teneur en humidité, les limites d'Atterberg, les caractéristiques du sol, compactage, le paramètre de compressibilité, ce dernier indiquant les difficultés liées à Détermination des propriétés géotechniques des sols salins.

Suite à cette étude expérimentale, nous avons inclus les sols de Chott El-Hodna traités au ciment, et obtenir la conclusion :

L'augmentation de la quantité de ciment a un effet direct sur la réduction de la valeur du bleu de méthylène, donc la surface spécifique.

La valeur de la limite de liquidité diminue avec l'augmentation du pourcentage de ciment,

La réduction de la limite de liquidité est due à la réduction de la surface spécifique totale car la teneur en argile diminue au fur et à mesure que le dosage de ciment augmente.

L'augmentation de la consommation de ciment affecte directement l'augmentation de l'indice ciment porté (indice C.B.R.) à la valeur maximale correspondant à un 6% ciment.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- **ABROL. (1. P.), BHUMBLA (D. R.), 1978.** -Some comments on Terminology relating to salt affected soils. Dryland saline -- seep Control 6-19-27.

- AFES (2008). Référentiel pédologique. Association Française pour l'Etude du Sol. Ed. Quæ. - AFNOR (1991) Norme Française : **NF P 94-050** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des sols – Méthode par étuvage.

- AFNOR (1991) Norme Française : **NF P 94-053** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire – Méthode du moule.

- AFNOR (1992) Norme Française : **NF P 94-057** : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie.

- AFNOR (1993) Norme Française : **NF P 94-051** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.

- AFNOR (1993) Norme Française : **NF P 94-068** Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche.

- AFNOR (1997) Norme Française : **NF P 94-078**Sols : Indice CBR immédiat— Indice Portant Immédiat.

- AFNOR (1999) Norme Française : **NF P 94-093** Sols : Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié.

- **ANAT - 1993** - Plan d'Aménagement de la Wilaya de M'sila - Tome 1 -Alger, 217 p.

- **Antipova-Karataev & Kerzum P.A. (1961**). The system of reclamation methods for exploiting saline and swapped soils against secondary salinization of irrigated soils in Tadzhikistan.Salinity problems in the arid zones. P. 281 – 284UNESCO

-**Benzaoui Ismail & Himer Mohammed Amin** Etude des effets du traitement de mixte sur le comportement des sols du Chott-El-Hodna (Wilaya de M'sila) Mémoire de master en géotechnique. Université de M'sila, 2021.

- **Aubert ; 1976** : les sols salsodiques en Afrique du Nord. Ann. INA, Alger. Vol. IV. PP: 182 193.

- **Aubert G. (1962).**Les sols de la zone aride. Etude de leur formation, de leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation. Les problèmes de la zone aride. UNESCO

- **Bellague et al, 2011** : Séminaire Eau et Environnement dynamique spatio–temporelle de la salinité des sols du Bas Chéliff : Cas de la station INRAA Hmadna (Relizane).

- **CONNOR (G. O.), 1979.** - Minimizing the salt burden of irrigation drainage water in the Pecos Valley of New Mexico. NMSU, USA.

- **Construction et Travaux public** - Les matériaux de construction Actualisation permanente sur www.techniques-ingenieur.fr.

- **Delfaut A.** Traitement à la chaux vive et au ciment des argiles plastiques du Sparnacienne de la région parisienne. Etude de laboratoire, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées -169, Sept-Oct 1990. - Bahar R, Benazzoug M, Kenai S. Performance of compacted cement-stabilised soil. Cem Concr Compos 2004.

- **Delphine et al, 1998 in Parida et Das, 2005** : B. parviflora (Parida et Das, 2005). In Parida A.K., Das A.B., (2005): Salt tolérance and salinity effect on plants: review. Ecotoxycology and Environmental Safety. Vol. 60, 349 p.

- **Demnati F. (2013**) Biodiversité et enjeux socio-économiques des lacs salés (Cotts et Sebkhas) d'Algérie : cas du Chohh Merouane et Melghir. Thèse de doctorat en sciences agronomiques. Université Mohamed Khider, Biskra.

- **Denden et al. 2005** : Effet de la salinité sur la fluorescence chlorophyllienne, la teneur en proline et la production florale de trois espèces ornementales, disponible sur : www.tropicultura. org/text/v23n4/220.pdf.

- **Dosso (M.). -1980**. Géochimie des sols salés et des eaux d'irrigations – Aménagement de la basse vallée de l'Euphrate en Syrie – thèse de Doc. Ing. Toulouse.

- **F.A.O. - Rome - 1975** -Etude des ressources naturelles et expérimentation et démonstration Agricoles dans la Région du Hodna - ALGERIE - Les Sols du Hodna - volume 1 - 141 p

- Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar, représentée par le Ministère des Ressources Hydriques.

- **HADJAB -M -1998**- Aménagement et Protection des Milieux Naturelles dans la Cuvette du Hodna (ALGERIE) - Thèse : Doctorat - Université d'Aix Marseille 1 - 242 p.

- **Itsvan C (1990).** Comportement des sables argileux ; influence du traitement à la chaux. Thèse de doctorat CGI, ENSMP, INSA Rennes.

- **JURY (W.A.), JARRELL (W.M.), DEVITT (D.).** -1979- Reclamation of saline-sodic soil by leaching. – Soil sci. soc. Am. J. vol43.

- **KAABACHE. M - J M. GEHU - GHARZOULI. R : 1993** - Une Remarquable Tope séquence Phytocoenotique en Bordure du Chott El Hodna (ALGERIE) - Centre de Phytosociologie de Bailleul - FRANCE -514 A519 p.

- **LEFFELAAR (P.A.), PALSHARMA (R.). -1977**- Leaching of a highly saline-sodic soil. – Joum of hydrology, 32.

- **MIMOUNE. S.-1995** - Gestion des Sols Sales et Désertification dans une Cuvette Endoréique d'Algérie (Sud du Chott El Hodna) - Thèse : Doctorat : Université d'Aix Marseille 1- 209p

- **RIEU (M.), CHEVERRY (C.) 1976**, Mise au point bibliographique sur quelque recherches récentes en matière de sols salés – cah, Orstom, sér, Pédol, vol XIV. N°1

- **SEBHI. S .1987** -Mutations du Monde Rural Algérien - Le Hodna - off Publ. Univ, Alger, 252p.

- **Ali Mohamad MASSOUM**CARAC TÉRISATION ET AMÉ LIORATION, DES SOLS SALES ET A ALCALIS PAR la S 1968

- Classification des sols salés : les sols Salit **J.Y. LOYER** Pédologue Orstom, BP 5045, 34032 Montpellier cedex

- Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques Application à la réalisation des remblais et des couches de forme Guide technique **Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Service d Etudes Techniques des Routes et Autoroutes**.

Annexes

Tableau A.3

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
Nombre De Coupe	15	15	23	23	30	30	33	33
N° de la tare	1	2	3	4	5	6	7	8
Massetotale humide (g)	13,294	11,985	15,734	13,773	10,2	9,832	11,697	10,584
Masse totale sèche (g)	11,165	10,218	13,51	12,179	8,188	7,812	9,524	9,079
Masse de la tare (g)	5,484	5,55	7,655	7,979	2,798	2,384	3,71	4,979
Masse de l'eau (g)	2,129	1,767	2,224	1,594	2,012	2,02	2,173	1,505
Masse du sol sec (g)	5,681	4,668	5,855	4,2	5,39	5,428	5,814	4,1
Teneur en eau%	37,48	37,85	37,98	37,95	37,33	37,21	37,38	36,71
Moyenne %	37,6646334		37,968504		37,271414		37,041309	
Moyenne Générale %	37,49							

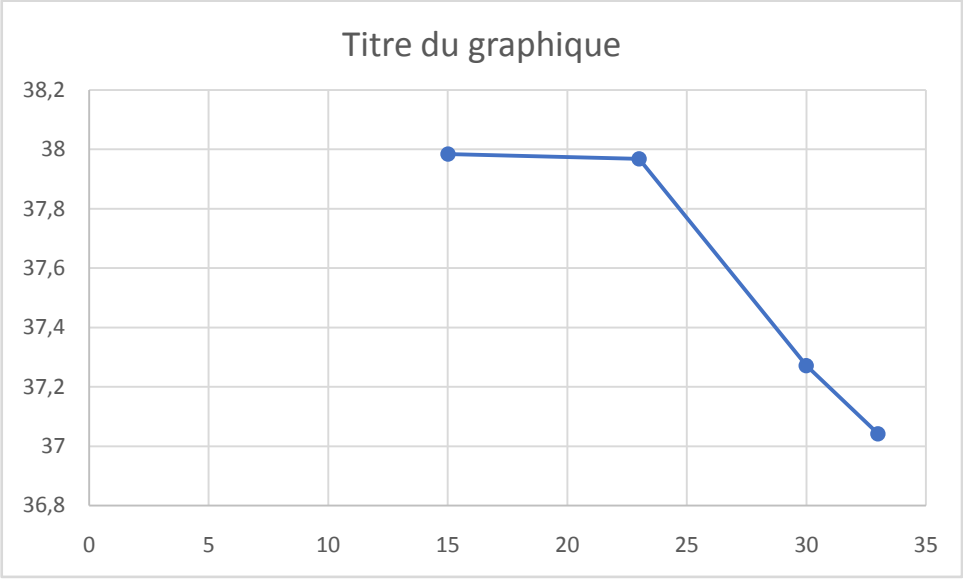


Figure A.1

Tableau A.4

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3
N° de la tare	AA	A13	B15	C2	GH	23
Masse totale humide (g)	10,5	10,7	6,745	5,238	9,697	7,53
Masse totale sèche (g)	10,1	10,2	6,076	4,83	9,334	7,18
Masse de la tare (g)	8,4	8,2	3,315	3,123	7,927	5,81
Masse de l'eau (g)	0,4	0,5	0,669	0,408	0,363	0,35
Masse du sol sec (g)	1,7	2	2,761	1,707	1,407	1,37
Teneur en eau%	23,529	25	24,230	23,901	25,799	25,547
Moyenne %	24,264		24,065		25,673	
Moy. Gén. %	24,668					

Tableau A.5

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
Nombre de Coupe	16	16	23	23	29	29	32	32
N° de la tare	1	2	3	4	5	6	7	8
Masse totale humide (g)	12,286	10,871	13,552	11,56	10,487	10,812	14,452	12,56
Masse totale sèche (g)	10,289	9,281	11,556	10,164	8,589	8,991	12,587	11,179
Masse de la tare (g)	4,484	4,564	5,655	5,979	2,798	3,384	6,71	6,979
Masse de l'eau (g)	1,997	1,59	1,996	1,396	1,898	1,821	1,865	1,381
Masse du sol sec (g)	5,805	4,717	5,901	4,185	5,791	5,607	5,877	4,2
Teneur en eau%	34,40	33,71	33,82	33,36	32,77	32,48	31,73	32,88
Moyenne %	34,0546		33,5910		32,6261		32,3074	
Moyenne Générale %	33,14							

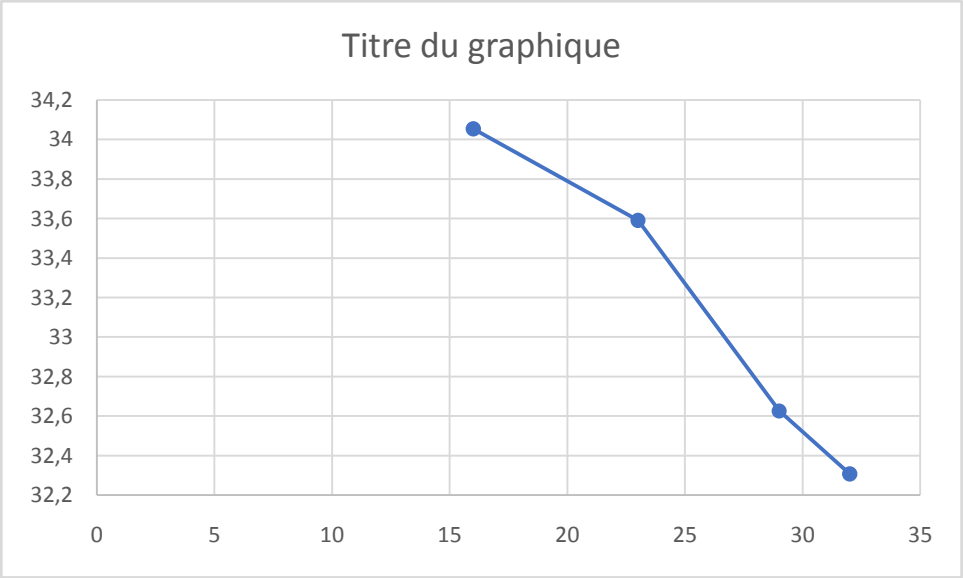


Figure A.2

Tableau A.6

	Essai 1	**Essai 1**	**Essai 2**	**Essai 2**	**Essai 3**	**Essai 3**
N° de la tare	AA	A13	B15	C2	GH	23
Masse totale humide (g)	8,41	7,396	10,218	6,226	5,686	5,54
Masse totale sèche (g)	8,15	7,128	9,957	5,843	5,387	5,234
Masse de la tare (g)	6,831	5,823	8,65	3,947	3,947	3,68
Masse de l'eau (g)	0,26	0,268	0,261	0,383	0,299	0,306
Masse du sol sec (g)	1,319	1,305	1,307	1,896	1,44	1,554
Teneur en eau%	19,71	20,54	19,97	20,20	20,76	19,69
Moyenne %	20,124		20,084		20,227	
Moyenne Générale %	20,15					

Tableau A.7

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
Nombre De Coupe	17	17	22	22	32	32	34	34
N° de la tare								
Masse totale humide (g)	9,56	9,56	11,552	9,88	11,1	10,741	11,487	11,158
Masse totale sèche (g)	8,079	8,079	9,524	8,218	9,188	8,904	9,525	9,177
Masse de la tare (g)	3,979	3,979	3,655	3,557	3,798	3,384	3,71	3,484
Masse de l'eau (g)	1,481	1,481	2,028	1,662	1,912	1,837	1,962	1,981
Masse du sol sec (g)	4,1	4,1	5,869	4,661	5,39	5,52	5,815	5,693
Teneur en eau%	36,12	36,12	34,55	35,66	35,47	33,28	33,74	34,80
Moyenne %	36,1219		35,1060		34,3760		34,2687	
Moyenne Générale %	34,97							

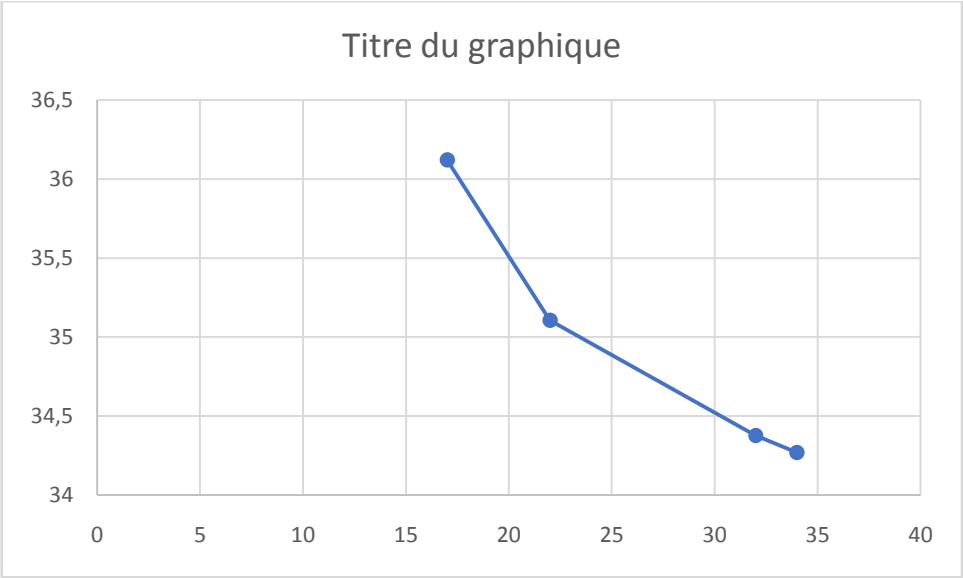


Figure A.3

Tableau A.8

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3
N° de la tare	AA	A13	B15	C2	GH	23
Masse totale humide (g)	6,444	5,429	5,386	5,085	5,646	5,463
Masse totale sèche (g)	6,141	5,128	5,076	4,83	5,334	5,18
Masse de la tare (g)	4,831	3,823	3,723	3,707	3,927	3,943
Masse de l'eau (g)	0,303	0,301	0,31	0,255	0,312	0,283
Masse du sol sec (g)	1,31	1,305	1,353	1,123	1,407	1,237
Teneur en eau%	23,13	23,07	22,91	22,71	22,17	22,88
Moyenne %	23,097		22,809		22,5263	
Moyenne Générale %	22,81					

Tableau A9

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
Nombre De Coupe	18	18	22	22	27	27	35	35
N° de la tare	A	R	S	T	U	W	X	Y
Masse totale humide (g)	11,11	10,42	10,72	11,66	12,94	13,66	11,45	10,65
Masse totale sèche (g)	8,98	8,44	8,56	9,42	10,78	11,13	9,46	8,61
Masse de la tare (g)	3,01	2,97	2,57	3,1	4,45	4,23	3,8	2,64
Masse de l'eau (g)	2,13	1,98	2,16	2,24	2,16	2,53	1,99	2,04
Masse du sol sec (g)	5,97	5,47	5,99	6,32	6,33	6,9	5,66	5,97
Teneur en eau%	35,68	36,20	36,06	35,44	34,12	36,67	35,16	34,17
Moyenne %	35,94		35,75		35,39		34,66	
Moyenne Générale %	35,44							

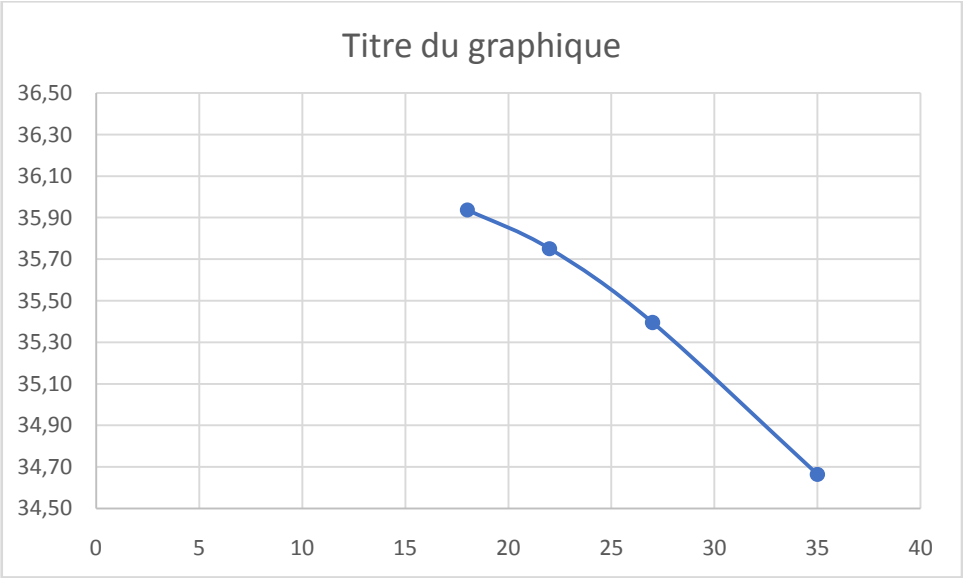


Figure A4

Tableau A10

	Essai 1	**Essai 1**	**Essai 2**	**Essai 2**	**Essai 3**	**Essai 3**
N° de la tare	Z	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Masse totale humide (g)	11,03	10,29	11,04	11,26	13,03	12,19
Masse totale sèche (g)	10,38	9,6	10,52	10,65	12,42	11,51
Masse de la tare (g)	7,69	6,52	8,22	7,98	9,69	8,54
Masse de l'eau (g)	0,65	0,69	0,52	0,61	0,61	0,68
Masse du sol sec (g)	2,69	3,08	2,3	2,67	2,73	2,97
Teneur en eau%	24,16	22,40	22,61	22,85	22,34	22,90
Moyenne %	23,2830		22,727		22,619	
Moyenne Générale %	22,876					

Tableau A11

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
Nombre De Coupe	16	16	21	21	26	26	31	31
N° de la tare	A	B	C	D	E	F	G	H
Masse totale humide (g)	13,36	16,59	12,58	11,49	11,37	11,29	13,79	11,19
Masse totale sèche (g)	10,47	13,52	9,87	9,09	8,97	8,95	11,01	8,98
Masse de la tare (g)	2,24	4,93	2,15	2,26	2,22	2,19	2,76	2,74
Masse de l'eau (g)	2,89	3,07	2,71	2,4	2,4	2,34	2,78	2,21
Masse du sol sec (g)	8,23	8,59	7,72	6,83	6,75	6,76	8,25	6,24
Teneur en eau%	35,12	35,74	35,10	35,14	35,56	34,62	33,70	35,42
Moyenne %	35,43		35,12		35,09		34,56	
Moyenne Générale %	35,05							

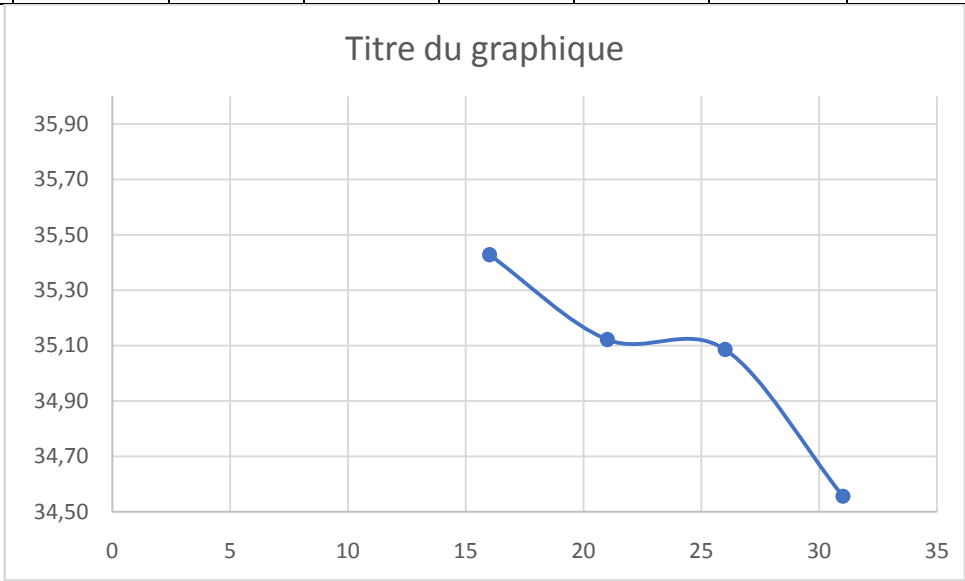


Figure A5

Tableau A12

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3
N° de la tare	K	L	M	N	O	P
Masse totale humide (g)	11,99	11,29	13,04	11,26	11,04	12,18
Masse totale sèche (g)	11,38	10,62	12,42	10,65	10,52	11,51
Masse de la tare (g)	8,69	7,66	9,69	7,98	8,22	8,54
Masse de l'eau (g)	0,61	0,67	0,62	0,61	0,52	0,67
Masse du sol sec (g)	2,69	2,96	2,73	2,67	2,3	2,97
Teneur en eau%	22,68	22,64	22,71	22,85	22,61	22,56
Moyenne %	22,655		22,778		22,583	
Moyenne Générale %	22,672					

Tableau A13

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
Nombre De Coupe	16	16	22	22	27	27	33	33
N° de la tare	100	101	102	103	104	105	106	107
Masse totale humide (g)	16,59	11,19	12,58	11,66	11,45	11,19	11,37	11,29
Masse totale sèche (g)	13,52	8,98	9,87	9,42	9,46	8,98	8,97	8,95
Masse de la tare (g)	4,93	2,74	2,15	3,1	3,8	2,74	2,22	2,19
Masse de l'eau (g)	3,07	2,21	2,71	2,24	1,99	2,21	2,4	2,34
Masse du sol sec (g)	8,59	6,24	7,72	6,32	5,66	6,24	6,75	6,76
Teneur en eau%	35,74	35,42	35,10	35,44	35,16	35,42	35,56	34,62
Moyenne %	35,58		35,27		35,29		35,09	
Moyenne Générale %	35,31							

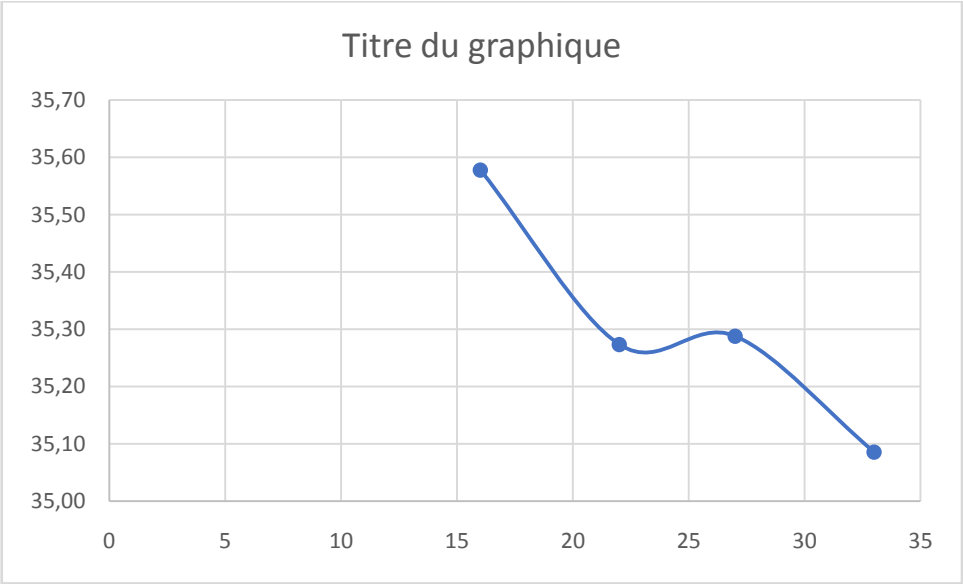


Figure A6

Tableau A14

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3
N° de la tare	108	109	110	111	112	113
Masse totale humide (g)	13	11,27	11,05	11,24	10,32	11,99
Masse totale sèche (g)	12,42	10,65	10,52	10,65	9,6	11,38
Masse de la tare (g)	9,69	7,98	8,22	7,98	6,52	8,69
Masse de l'eau (g)	0,58	0,62	0,53	0,59	0,72	0,61
Masse du sol sec (g)	2,73	2,67	2,3	2,67	3,08	2,69
Teneur en eau%	21,25	23,22	23,04	22,10	23,38	22,68
Moyenne %	22,233		22,570		23,026	
Moyenne Générale %	22,610					

Tableau A15

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
Nombre De Coupe	15	15	21	21	27	27	34	34
N° de la tare	21	22	23	24	25	26	27	28
Masse totale humide (g)	16,49	11,07	12,35	11,63	11,22	11,39	11,17	11,19
Masse totale sèche (g)	13,54	8,92	9,81	9,45	9,41	9,18	8,97	8,95
Masse de la tare (g)	4,93	2,74	2,15	3,1	3,8	2,74	2,22	2,19
Masse de l'eau (g)	2,95	2,15	2,54	2,18	1,81	2,21	2,2	2,24
Masse du sol sec (g)	8,61	6,18	7,66	6,35	5,61	6,44	6,75	6,76
Teneur en eau%	34,26	34,79	33,16	34,33	32,26	34,32	32,59	33,14
Moyenne %	34,53		33,74		33,29		32,86	
Moyenne Générale %	33,61							

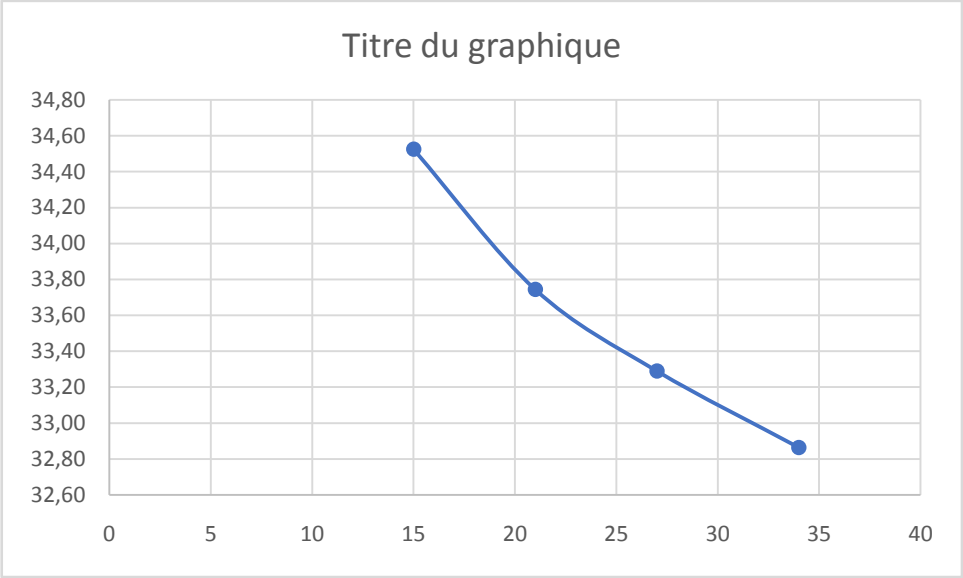


Figure A7

Tableau A16

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3
N° de la tare	9	10	11	12	13	14
Masse totale humide (g)	11,98	11,31	12,99	11,25	10,97	12,18
Masse totale sèche (g)	11,37	10,62	12,37	10,61	10,44	11,51
Masse de la tare (g)	8,69	7,66	9,69	7,98	8,22	8,54
Masse de l'eau (g)	0,61	0,69	0,62	0,64	0,53	0,67
Masse du sol sec (g)	2,68	2,96	2,68	2,63	2,22	2,97
Teneur en eau%	22,76	23,31	23,13	24,33	23,87	22,56
Moyenne %	23,036		23,734		23,2163	
Moyenne Générale %	23,328					

Tableau A17

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
Nombre De Coupe	18	18	24	24	30	30	35	35
N° de la tare	11	12	13	14	15	16	17	18
Masse totale humide (g)	10,97	10,32	10,52	11,56	12,84	13,46	11,35	10,35
Masse totale sèche (g)	8,98	8,44	8,56	9,42	10,78	11,18	9,48	8,52
Masse de la tare (g)	3,01	2,97	2,57	3,1	4,45	4,23	3,8	2,64
Masse de l'eau (g)	1,99	1,88	1,96	2,14	2,06	2,28	1,87	1,83
Masse du sol sec (g)	5,97	5,47	5,99	6,32	6,33	6,95	5,68	5,88
Teneur en eau%	33,33	34,37	32,72	33,86	32,54	32,81	32,92	31,12
Moyenne %	33,85		33,29		32,67		32,02	
Moyenne Générale %	32,96							

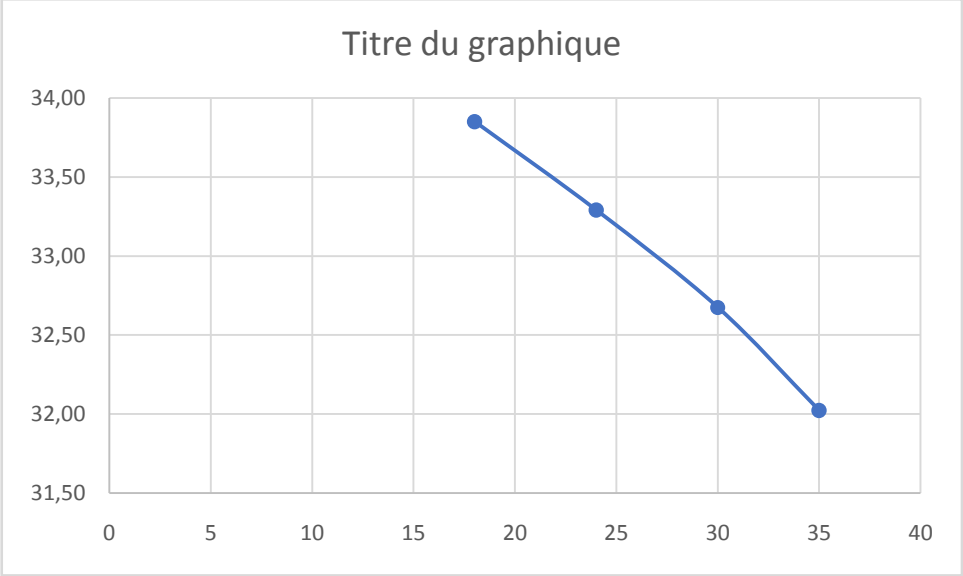


Figure A8

Tableau A18

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3
N° de la tare	Q	G	H	J	K	L
Masse totale humide (g)	12,95	11,25	10,99	12,96	10,29	11,93
Masse totale sèche (g)	12,33	10,64	10,47	12,35	9,57	11,33
Masse de la tare (g)	9,69	7,98	8,22	9,69	6,52	8,69
Masse de l'eau (g)	0,62	0,61	0,52	0,61	0,72	0,6
Masse du sol sec (g)	2,64	2,66	2,25	2,66	3,05	2,64
Teneur en eau%	23,48	22,93	23,11	22,93	23,61	22,73
Moyenne %	23,21		23,02		23,17	
Moyenne Générale %	23,13					

Tableau A19

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
Nombre De Coupe	15	15	21	21	30	30	33	33
N° de la tare	1	2	3	4	5	6	7	8
Masse totale humide (g)	13,26	16,49	12,38	11,31	11,17	11,2	13,49	11,01
Masse totale sèche (g)	10,45	13,52	9,87	9,11	8,99	9,08	11,01	8,99
Masse de la tare (g)	2,24	4,93	2,15	2,26	2,22	2,19	2,76	2,74
Masse de l'eau (g)	2,81	2,97	2,51	2,2	2,18	2,12	2,48	2,02
Masse du sol sec (g)	8,21	8,59	7,72	6,85	6,77	6,89	8,25	6,25
Teneur en eau%	34,23	34,58	32,51	32,12	32,20	30,77	30,06	32,32
Moyenne %	34,40		32,31		31,49		31,19	
Moyenne Générale %	32,35							

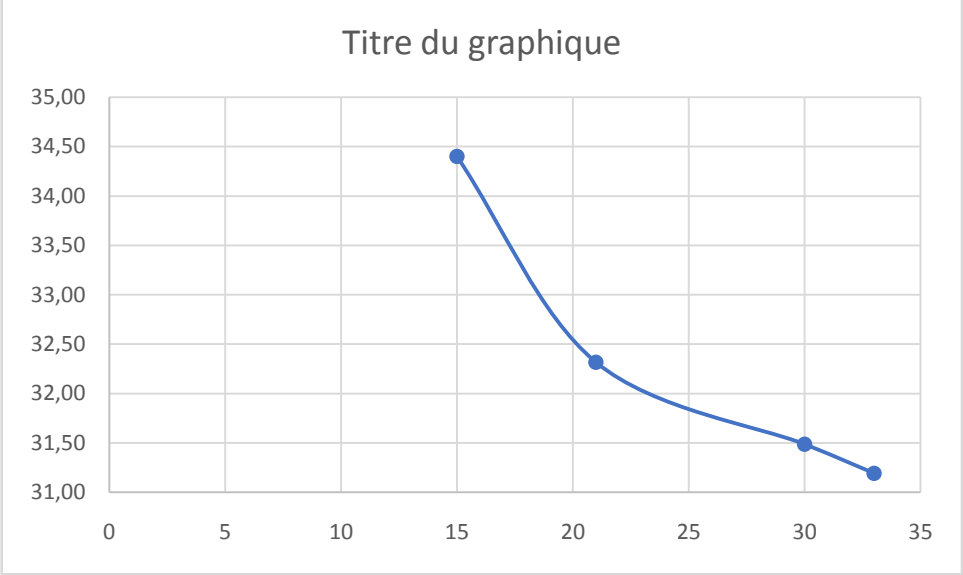


Figure A9

Tableau A20

	Essai 1	**Essai 1**	**Essai 2**	**Essai 2**	**Essai 3**	**Essai 3**
N° de la tare	Z	E	B12	N	C23	P
Masse totale humide (g)	11,01	10,32	11,06	11,26	13,03	12,21
Masse totale sèche (g)	10,38	9,6	10,52	10,65	12,4	11,52
Masse de la tare (g)	7,69	6,52	8,22	7,98	9,69	8,54
Masse de l'eau (g)	0,63	0,72	0,54	0,61	0,63	0,69
Masse du sol sec (g)	2,69	3,08	2,3	2,67	2,71	2,98
Teneur en eau%	23,42	23,38	23,48	22,85	23,25	23,15
Moyenne %	23,40		23,16		23,20	
Moyenne Générale %	23,25					

Tableau A21

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
Nombre De Coupe	18	18	24	24	30	30	35	35
N° de la tare	11	12	13	14	15	16	17	18
Masse totale humide (g)	10,97	10,32	10,52	11,56	12,84	13,46	11,35	10,35
Masse totale sèche (g)	8,98	8,44	8,56	9,42	10,75	11,15	9,46	8,46
Masse de la tare (g)	3,01	2,97	2,57	3,1	4,45	4,23	3,8	2,64
Masse de l'eau (g)	1,99	1,88	1,96	2,14	2,09	2,31	1,89	1,89
Masse du sol sec (g)	5,97	5,47	5,99	6,32	6,3	6,92	5,66	5,82
Teneur en eau%	33,33	34,37	32,72	33,86	33,17	33,38	33,39	32,47
Moyenne %	33,85		33,29		33,28		32,93	
Moyenne Générale %	33,34							

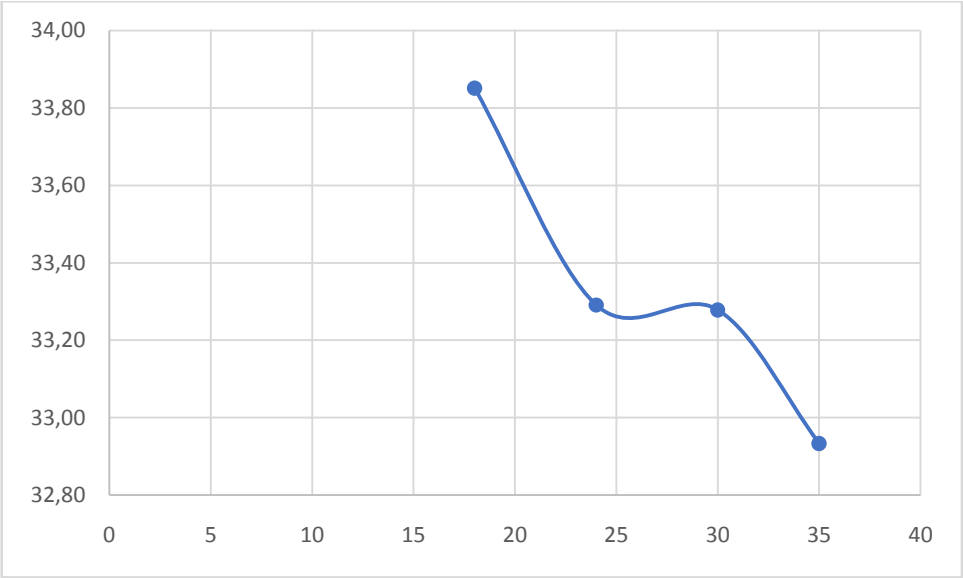


Figure A10

Tableau A22

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3
N° de la tare	16	17	18	19	A	B
Masse totale humide (g)	12,95	11,25	10,99	12,96	10,29	11,93
Masse totale sèche (g)	12,35	10,64	10,48	12,35	9,57	11,33
Masse de la tare (g)	9,69	7,98	8,22	9,69	6,52	8,69
Masse de l'eau (g)	0,6	0,61	0,51	0,61	0,72	0,6
Masse du sol sec (g)	2,66	2,66	2,26	2,66	3,05	2,64
Teneur en eau%	22,56	22,93	22,57	22,93	23,61	22,73
Moyenne %	22,74		22,75		23,17	
Moyenne Générale %	22,89					

Tableau A22

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
Nombre De Coupe	16	16	21	21	26	26	31	31
N° de la tare	A	B	C	D	E	F	G	H
Masse totale humide (g)	13,11	16,39	12,47	11,49	11,37	11,29	13,79	11,15
Masse totale sèche (g)	10,39	13,52	9,87	9,21	9,08	9,03	11,01	9,08
Masse de la tare (g)	2,24	4,93	2,15	2,26	2,22	2,19	2,76	2,74
Masse de l'eau (g)	2,72	2,87	2,6	2,28	2,29	2,26	2,78	2,07
Masse du sol sec (g)	8,15	8,59	7,72	6,95	6,86	6,84	8,25	6,34
Teneur en eau%	33,37	33,41	33,68	32,81	33,38	33,04	33,70	32,65
Moyenne %	33,39		33,24		33,21		33,17	
Moyenne Générale %	33,25							

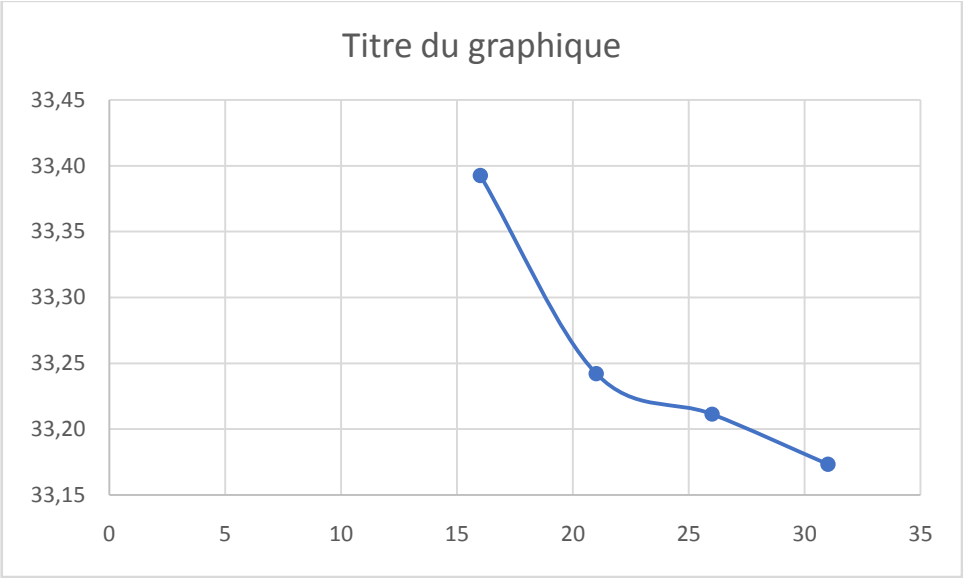


Figure A11

Tableau A23

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3
N° de la tare	D	E	F	FF	G	GG
Masse totale humide (g)	11,99	11,29	13,04	11,26	11,04	12,18
Masse totale sèche (g)	11,37	10,62	12,42	10,65	10,52	11,51
Masse de la tare (g)	8,69	7,66	9,69	7,98	8,22	8,54
Masse de l'eau (g)	0,62	0,67	0,62	0,61	0,52	0,67
Masse du sol sec (g)	2,68	2,96	2,73	2,67	2,3	2,97
Teneur en eau%	23,13	22,64	22,71	22,85	22,61	22,56
Moyenne %	22,88		22,78		22,58	
Moyenne Générale %	22,75					

Tableau A24

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
Nombre De Coupe	16	16	23	23	29	29	32	32
N° de la tare	L	M	N	O	P	Q	R	S
Masse totale humide (g)	12,286	10,871	13,552	11,56	10,487	10,812	14,452	12,56
Masse totale sèche (g)	10,289	9,281	11,556	10,164	8,589	8,991	12,587	11,179
Masse de la tare (g)	4,484	4,564	5,655	5,979	2,798	3,384	6,71	6,979
Masse de l'eau (g)	1,997	1,59	1,996	1,396	1,898	1,821	1,865	1,381
Masse du sol sec (g)	5,805	4,717	5,901	4,185	5,791	5,607	5,877	4,2
Teneur en eau%	34,40	33,71	33,82	33,36	32,77	32,48	31,73	32,88
Moyenne %	34,05		33,59		32,63		32,31	
Moyenne Générale %	33,14							

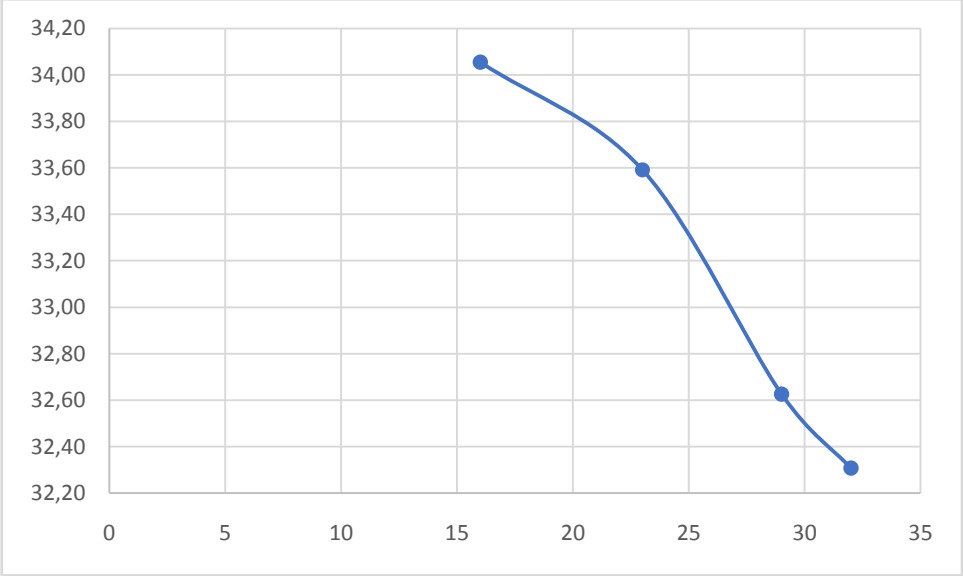


Figure A12

Tableau A25

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3
N° de la tare	V	W	X	Y	Z	ZZ
Masse totale humide (g)	6,436	5,422	5,382	5,084	5,646	5,463
Masse totale sèche (g)	6,141	5,128	5,076	4,83	5,334	5,18
Masse de la tare (g)	4,831	3,823	3,723	3,707	3,927	3,943
Masse de l'eau (g)	0,295	0,294	0,306	0,254	0,312	0,283
Masse du sol sec (g)	1,31	1,305	1,353	1,123	1,407	1,237
Teneur en eau%	22,94	22,95	23,02	22,92	23,17	22,98
Moyenne %	22,95		22,99		23,08	
Moyenne Générale %	23,06					

VBS - 0%

Tableau A.21

0%	B	VBS (Cm3)	La surface spécifique
Essai 1	420	7,00	147
Essai 2	420	7,00	147
Essai 3	400	6,67	140,07
La moy	413,33	6,89	144,69

VBS - 2%

Tableau A.22

2%	B	VBS (Cm3)	La surface spécifique
Essai 1	400	6,67	140,07
Essai 2	400	6,67	140,07
Essai 3	400	6,67	140,07
La moy	400,00	6,67	140,07

VBS - 4%

Tableau A.23

4%	B	VBS (Cm3)	La surface spécifique
Essai 1	390	6,50	136,5
Essai 2	390	6,50	136,5
Essai 3	380	6,33	132,93
La moy	386,67	6,44	135,31

VBS - 6%

Tableau A.24

6%	B	VBS (Cm3)	La surface spécifique
Essai 1	360	6,00	126
Essai 2	370	6,17	129,57
Essai 3	370	6,17	129,57
La moy	366,67	6,11	128,38

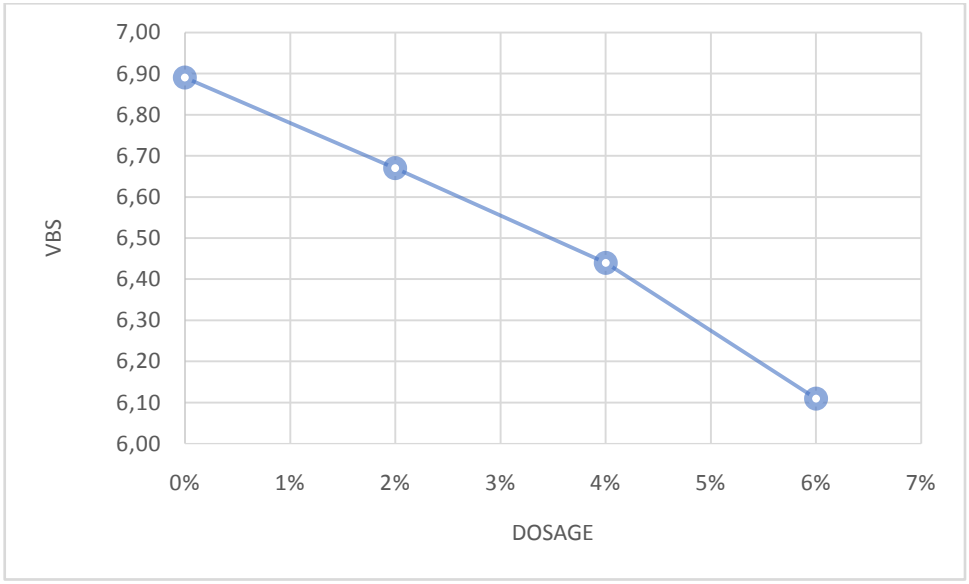


Figure A13

Essais Mécaniques

Proctor

Appareillage :

Figure A15

Préparation de l’échantillon :

Figure A14

Réalisation de l’essai :

Figure A15

Etuvage de l’échantillon :

Figure A16

Tableau A.25

Réf/ échantillon	1	2	3	4	5
Pourcentage d'eau ajoutée à chaque compactage	*16%*	*18%*	*20%*	*22%*	*24%*
Masse du sol humide, (g)	1805,6	1864,12	1960,4	1911,2	1934,3
Masse du sol sec, (g)	1542,08	1552,81	1582,04	1507,94	1495,35
Volume du moule, ($cm^{3)}$	944	944	944	944	944
Masse volumique du sol humide, (g/cm^3)	1,913	1,975	2,077	2,025	2,049
Masse volumique du sol sec (gr/cm^3)	1,634	1,645	1,676	1,597	1,584
Poids de l'eau, (g)	263,520	311,310	378,360	403,260	438,950
Teneur en eau (%)	17,089	20,048	23,916	26,742	29,354

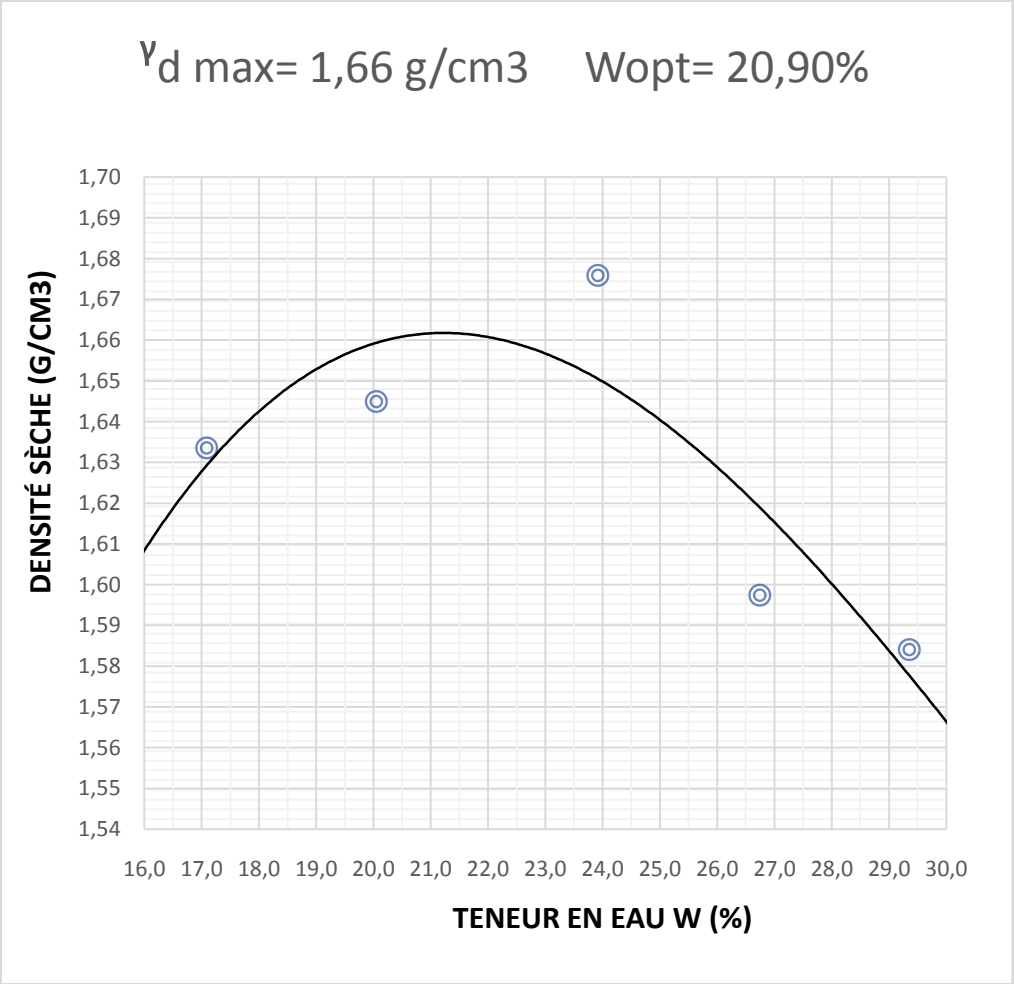


Figure A10

Tableau A.26

Réf/ échantillon	1	2	3	4	5
Pourcentage d'eau ajoutée à chaque compactage	*16%*	*18%*	*20%*	*22%*	*24%*
Masse du sol humide, (g)	1813,8	1872,97	1968,9	1920,1	1925,9
Masse du sol sec, (g)	1550,98	1565,8	1614,9	1524,56	1485,48
Volume du moule, ($cm^{3)}$	944	944	944	944	944
Masse volumique du sol humide, (g/cm^3)	1,921	1,984	2,086	2,034	2,040
Masse volumique du sol sec (gr/cm^3)	1,643	1,659	1,711	1,615	1,574
Poids de l'eau, (g)	262,82	307,17	354,00	395,54	440,42
Teneur en eau (%)	16,945	19,617	21,921	25,945	29,648

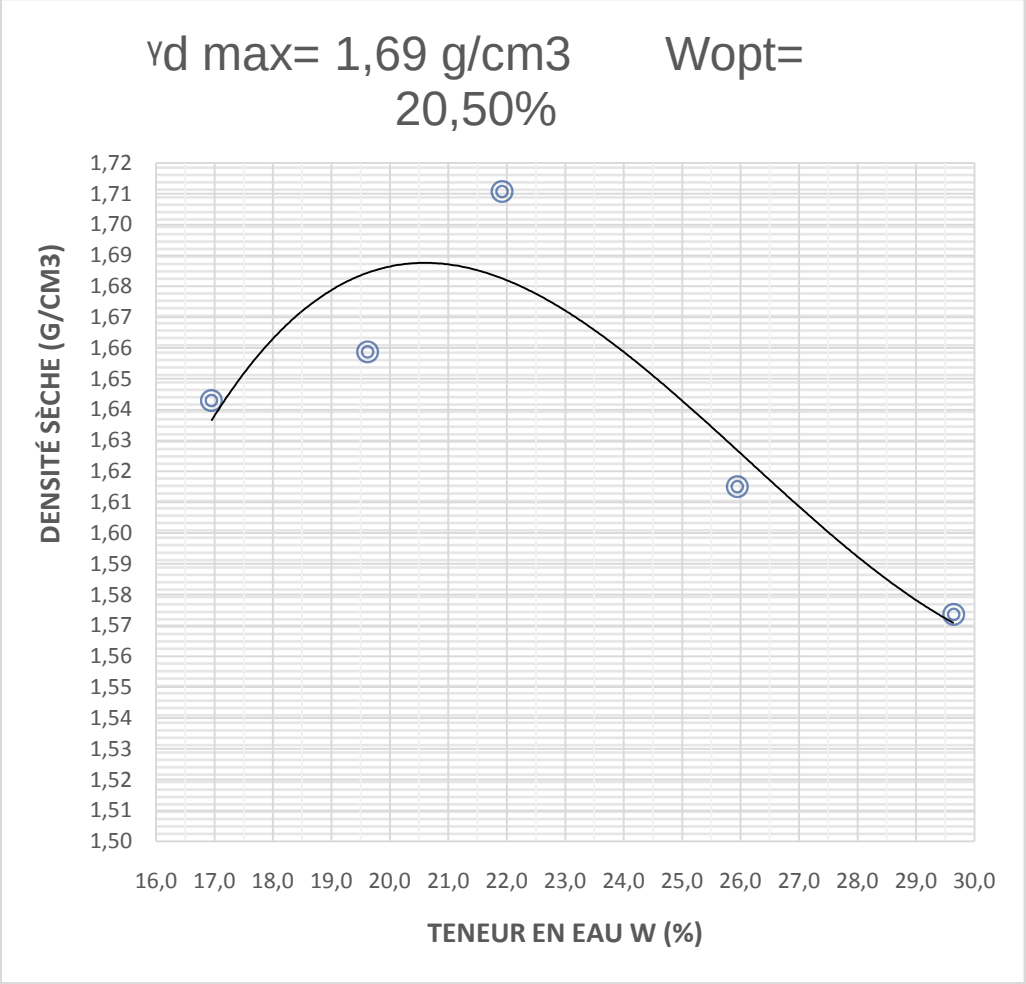


Figure A11

Tableau A.27

Réf/ échantillon	1	2	3	4	5
Pourcentage d'eau ajoutée à chaque compactage	*16%*	*18%*	*20%*	*22%*	*24%*
Masse du sol humide, (g)	1793,8	1865,4	1955,1	1893,4	1921,6
Masse du sol sec, (g)	1535,05	1563,07	1601,23	1495,61	1487,32
Volume du moule, ($cm^{3)}$	944	944	944	944	944
Masse volumique du sol humide, (g/cm^3)	1,900	1,976	2,071	2,006	2,036
Masse volumique du sol sec (gr/cm^3)	1,626	1,656	1,696	1,584	1,576
Poids de l'eau, (g)	258,750	302,330	353,870	397,790	434,280
Teneur en eau (%)	16,856	19,342	22,100	26,597	29,199

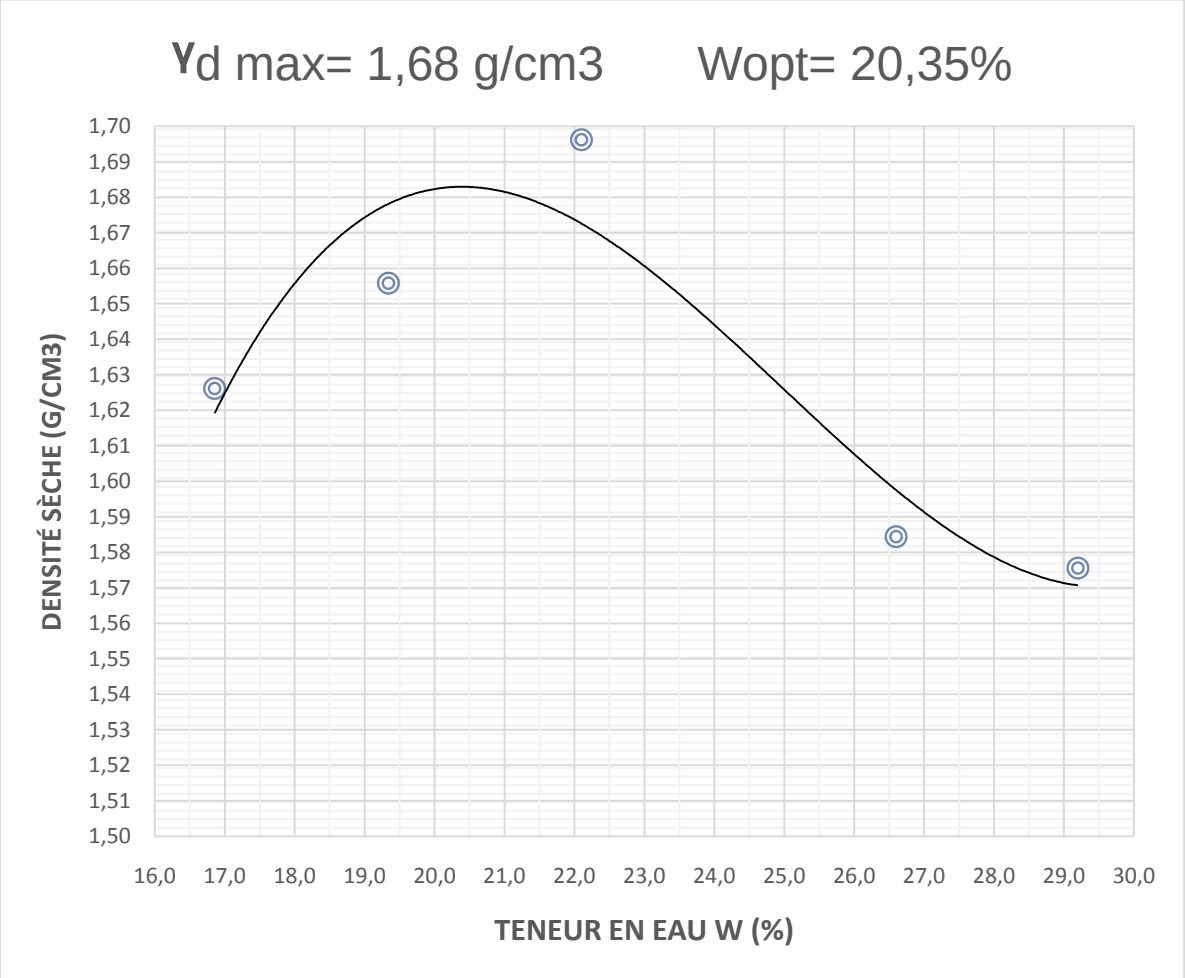


Figure A12

Tableau A.28

Réf/ échantillon	1	2	3	4
Le Dosage De Liant	*0%*	*2%*	*4%*	*6%*
Masse du sol humide, (g)	1955,1	1849,92	1809,86	1829,23
Masse du sol sec, (g)	1601,23	1523,95	1496,85	1505,75
Volume du moule, ($cm^{3)}$	944	944	944	944
Masse volumique du sol humide, (g/cm^3)	2,07	1,96	1,92	1,94
Masse volumique du sol sec (gr/cm^3)	1,70	1,61	1,59	1,60
Masse de l'eau, (g)	353,87	325,97	313,01	323,48
Teneur en eau %	22,100	21,390	20,911	21,483

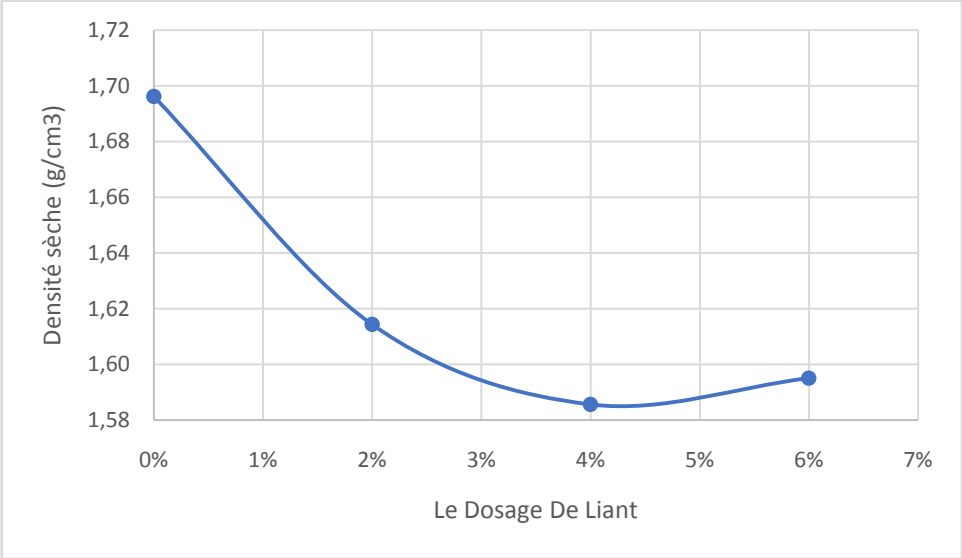


Figure A13

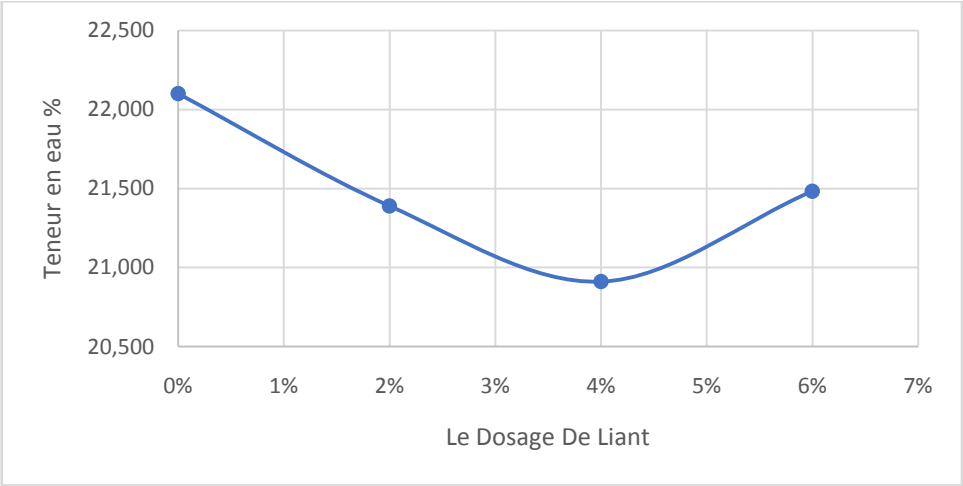


Figure A14

Tableau A.29

Réf/ échantillon	1	2	3	4
Le Dosage De Liant	*0%*	*2%*	*4%*	*6%*
Masse du sol humide, (g)	1968,9	1826,83	1764,94	1818,69
Masse du sol sec, (g)	1614,9	1531,39	1489,41	1515,25
Volume du moule, ($cm^{3)}$	944	944	944	944
Masse volumique du sol humide, (g/cm^3)	2,09	1,94	1,87	1,93
Masse volumique du sol sec (gr/cm^3)	1,71	1,62	1,58	1,61
Masse de l'eau, (g)	354	295,44	275,53	303,44
Teneur en eau %	21,921	19,292	18,499	20,026

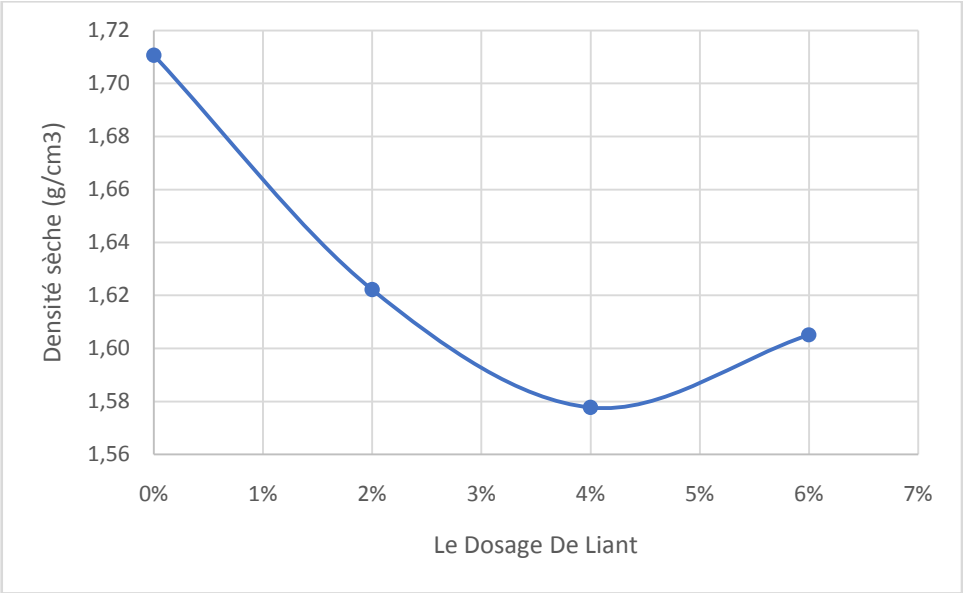


Figure A15

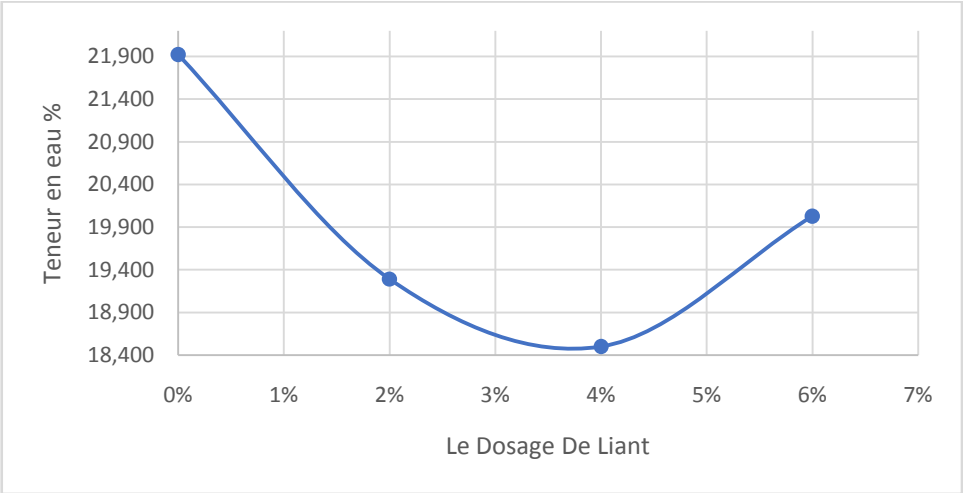


Figure A16

Tableau A.30

Réf/ échantillon	1	2	3	4
Le Dosage De Liant	*0%*	*2%*	*4%*	*6%*
Masse du sol humide, (g)	1960,4	1862,3	1821,86	1868,2
Masse du sol sec, (g)	1582,04	1537,11	1512,66	1539,41
Volume du moule, ($cm^{3)}$	944	944	944	944
Masse volumique du sol humide, (g/cm^3)	2,08	1,97	1,93	1,98
Masse volumique du sol sec (gr/cm^3)	1,68	1,63	1,60	1,63
Masse de l'eau, (g)	378,36	325,19	309,2	328,79
Teneur en eau %	23,916	21,156	20,441	21,358

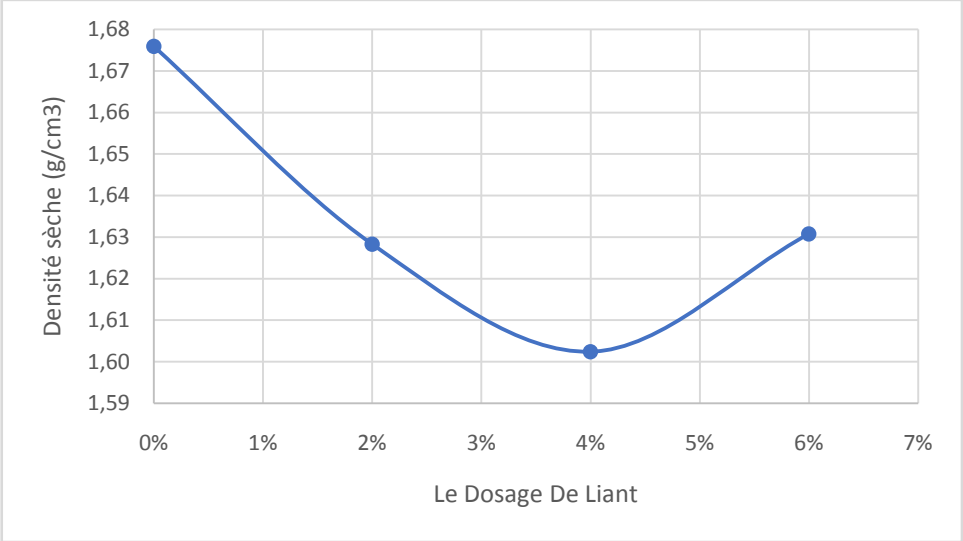


Figure A17

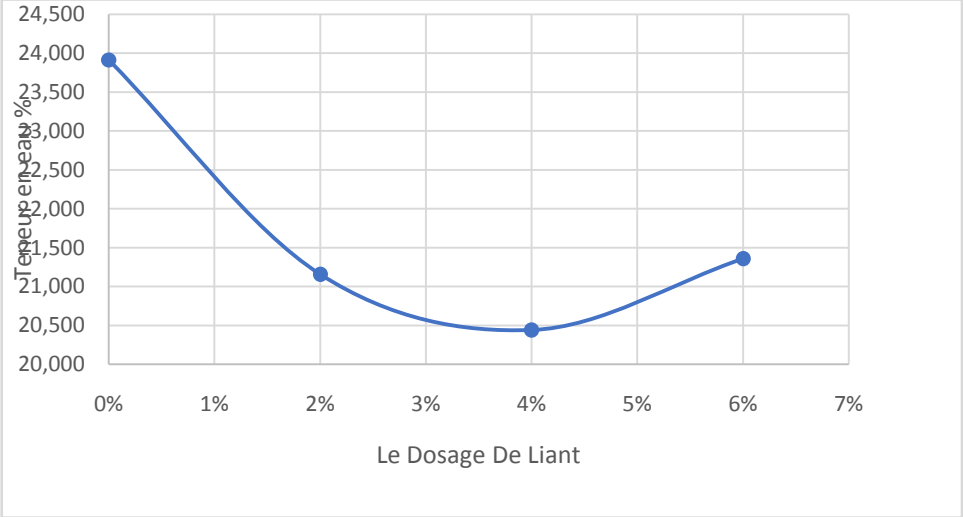


Figure A18

CBR

Tableau A.31

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,03	0,06521
1,25	0,04	0,08695
2	0,05	1,0869
2,5	0,06	1,3042
5	0,07	1,5216
7,5	0,09	1,9563
10	0,1	2,1739
Indice à 2,5 mm	**Indice à 5 mm**	**Indice C.B.R max**
9,77	7,63	9,77

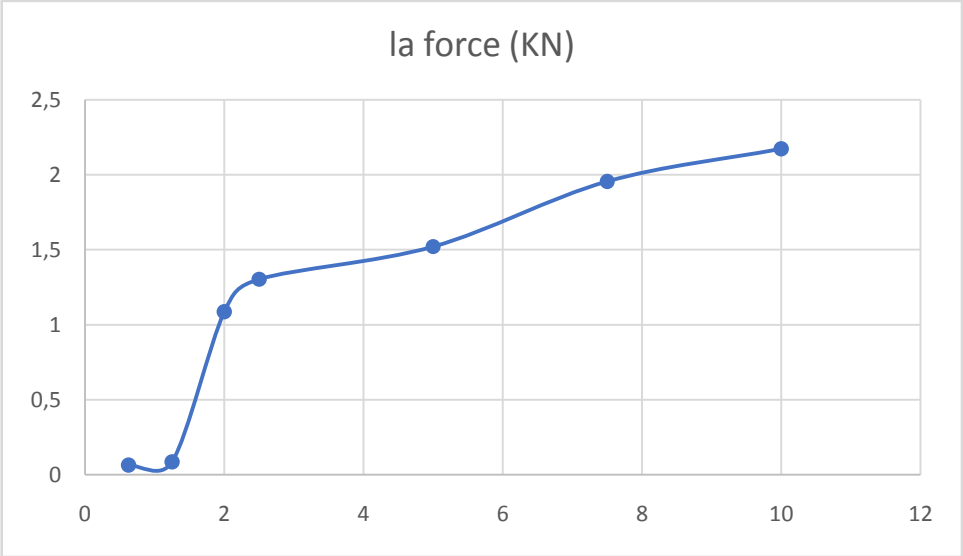


Figure A19

Tableau A.32

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,02	0,04347
1,25	0,04	0,08695
2	0,05	1,0869
2,5	0,55	1,1955
5	0,07	1,3042
7,5	0,09	1,9563
10	0,11	2,3913
Indice à 2,5 mm	**Indice à 5 mm**	**Indice C.B.R max**
8,96	6,54	8,96

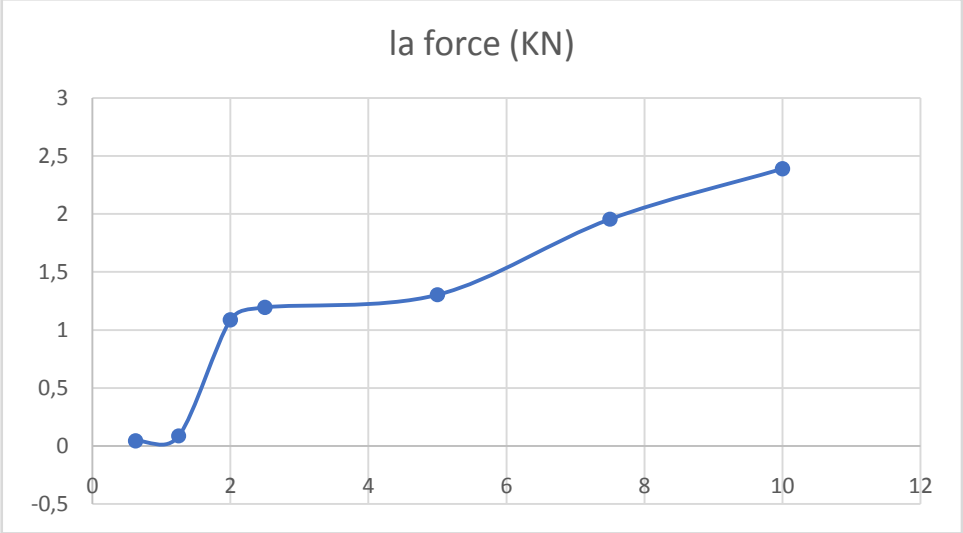
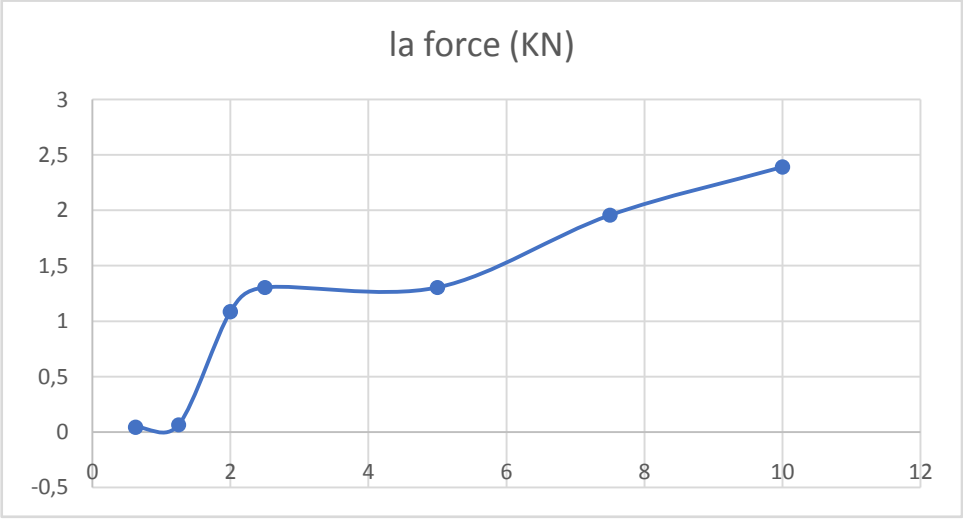


Figure A20

Tableau A.33

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,02	0,04347
1,25	0,03	0,06521
2	0,05	1,0869
2,5	0,06	1,3042
5	0,07	1,3042
7,5	0,09	1,9563
10	0,11	2,3913
Indice à 2,5 mm	**Indice à 5 mm**	**Indice C.B.R max**
9,77	6,54	9,77



2%

Figure A21

Tableau A.34

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,021	0,4563
1,25	0,034	0,7387
2	0,048	1,0429
2,5	0,06	1,3037
5	0,093	2,0207
7,5	0,113	2,3913
10	0,139	2,826
Indice à 2,5 mm	**Indice à 5 mm**	**Indice C.B.R max**
9,77	10,14	10,14

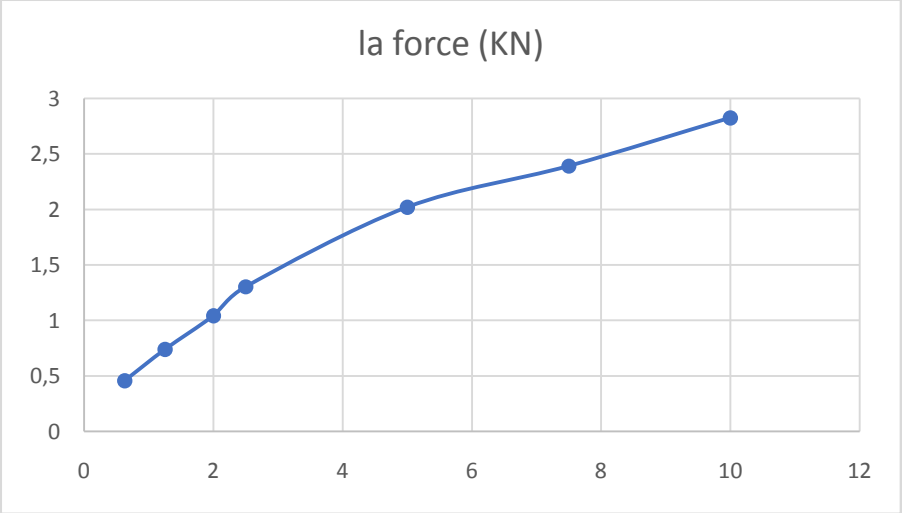


Figure A22

Tableau A.35

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,02	0,4347
1,25	0,035	0,7607
2	0,045	0,9781
2,5	0,057	1,2388
5	0,096	2,0865
7,5	0,12	2,6082
10	0,136	2,9556
Indice à 2,5 mm	**Indice à 5 mm**	**Indice C.B.R max**
9,28	10,47	10,47

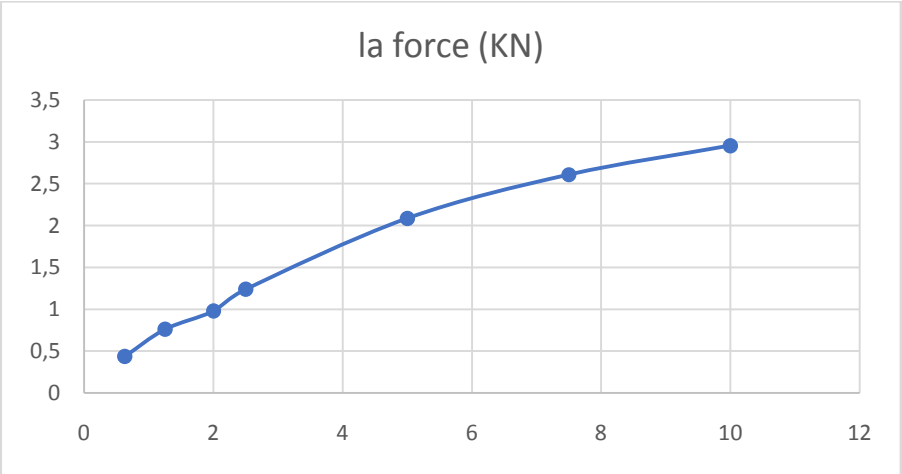


Figure A23

Tableau A.36

dép de piston	**dép de force (mm)**	**la force (KN)**
0,625	0,022	0,4781
1,25	0,035	0,7607
2	0,048	1,0429
2,5	0,058	1,2388
5	0,09	2,0865
7,5	0,117	2,5426
10	0,142	3,0858
Indice à 2,5 mm	**Indice à 5 mm**	**Indice C.B.R max**
9,28	10,47	10,47

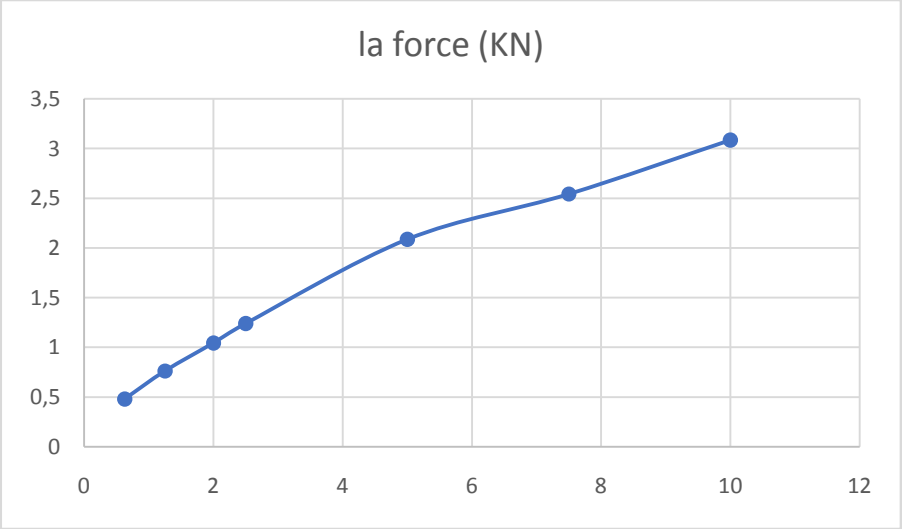


Figure A24

Tableau A.37

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,022	0,4781
1,25	0,041	0,891
2	0,058	1,2388
2,5	0,071	1,5429
5	0,125	2,7164
7,5	0,15	3,2598
10	0,175	3,803
Indice à 2,5 mm	**Indice à 5 mm**	**Indice C.B.R max**
11,56	13,63	13,63

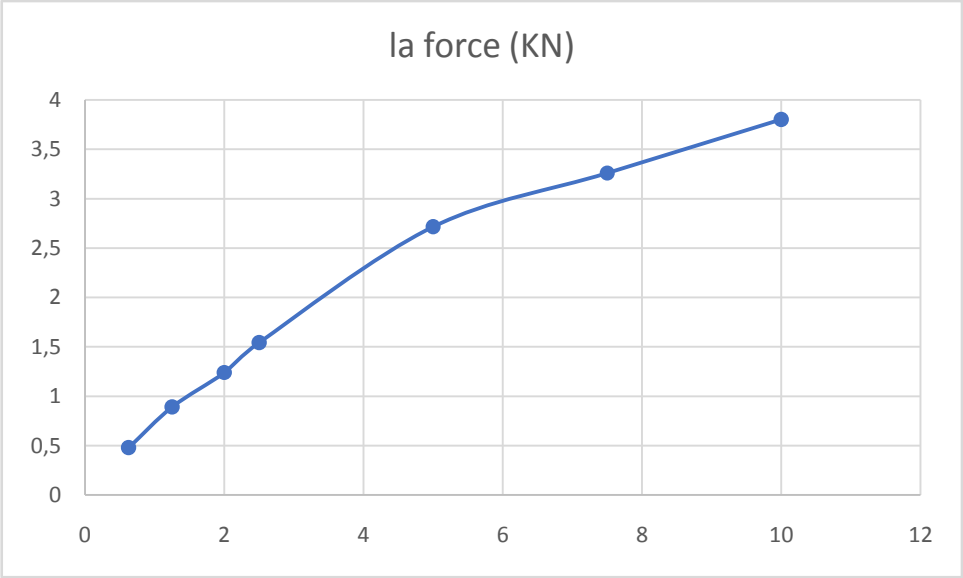


Figure A25

Tableau A.38

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,02	0,4347
1,25	0,039	0,8476
2	0,057	1,2388
2,5	0,069	1,4997
5	0,121	2,6299
7,5	0,16	3,4776
10	0,177	3,847
Indice à 2,5 mm	**Indice à 5 mm**	**Indice C.B.R max**
11,23	13,20	13,20

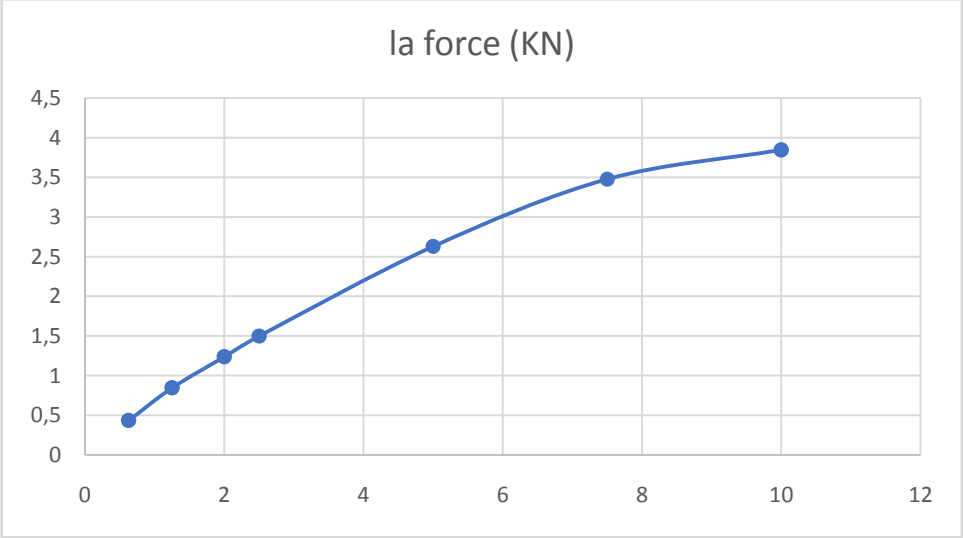
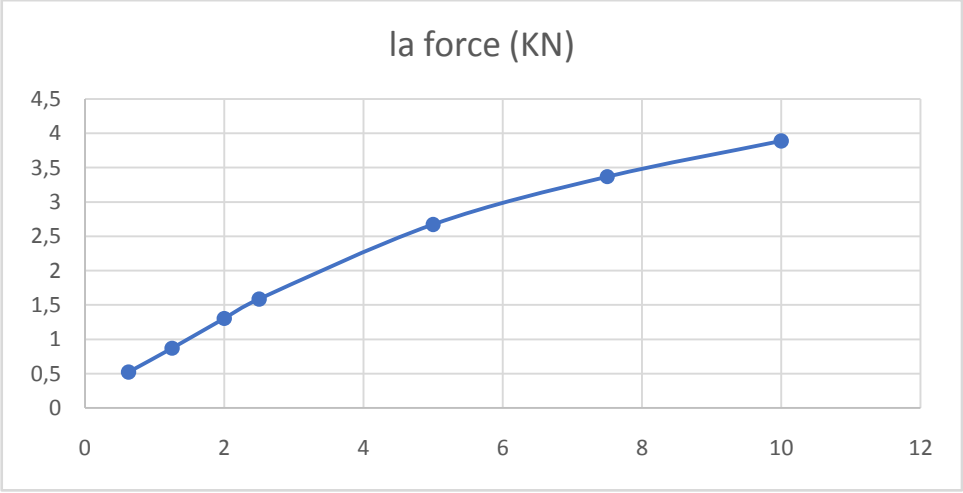


Figure A26

Tableau A.39

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,024	0,5217
1,25	0,04	0,8695
2	0,06	1,3042
2,5	0,073	1,5868
5	0,123	2,6737
7,5	0,155	3,3693
10	0,179	3,891
Indice à 2,5 mm	**Indice à 5 mm**	**Indice C.B.R max**
11,89	13,42	13,42



6%
Figure A27

Tableau A.40

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,023	0,4435
1,25	0,045	0,8572
2	0,057	1,246
2,5	0,069	1,5634
5	0,127	2,6299
7,5	0,167	3,8779
10	0,178	3,8567
Indice à 2,5 mm	**Indice à 5 mm**	**Indice C.B.R max**
11,71	13,20	13,20

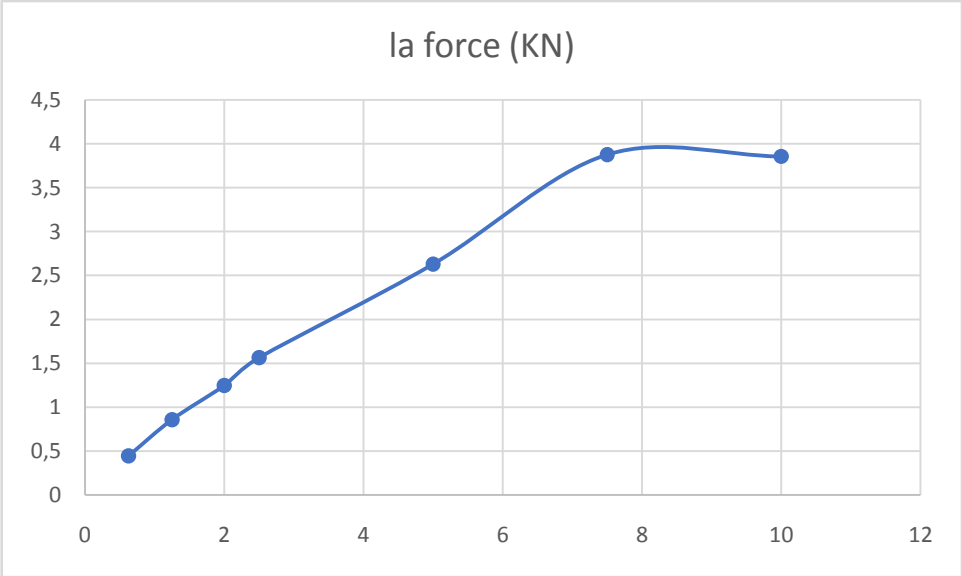


Figure A28

Tableau A.41

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,025	0,4781
1,25	0,041	0,891
2	0,058	1,2388
2,5	0,077	1,5684
5	0,132	2,7345
7,5	0,156	3,2598
10	0,175	3,803
Indice à 2,5 mm	**Indice à 5 mm**	**Indice C.B.R max**
11,75	13,72	13,72

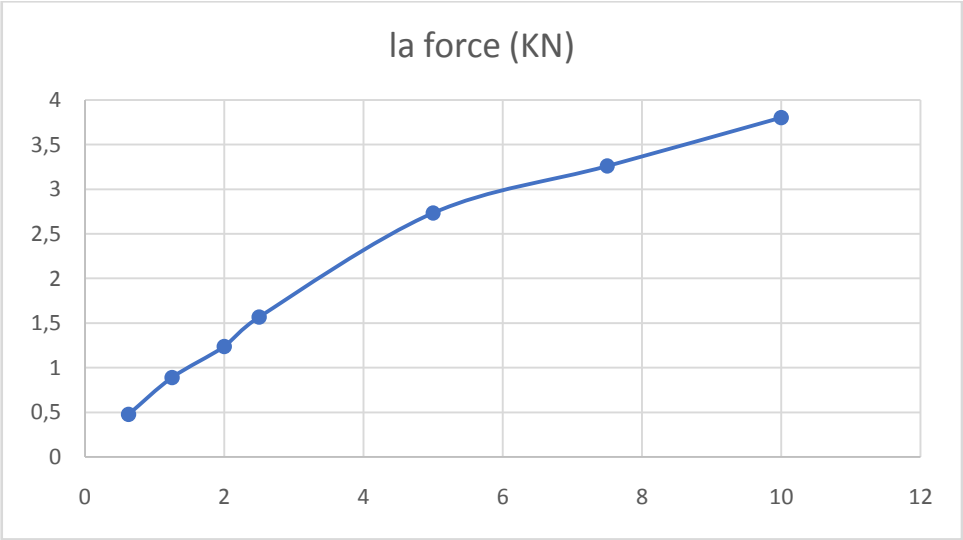


Figure A29

Tableau A.42

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,024	0,481
1,25	0,045	0,899
2	0,059	1,2388
2,5	0,09	1,6446
5	0,129	2,7279
7,5	0,153	3,2613
10	0,178	3,8036
Indice à 2,5 mm	**Indice à 5 mm**	**Indice C.B.R max**
12,32	13,69	13,69

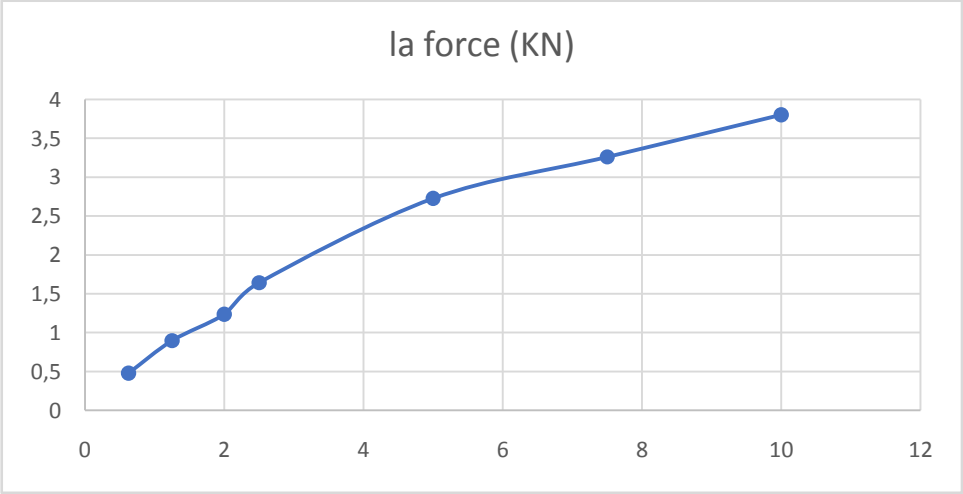


Figure A30