

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



FILIERE : GENIE CIVIL
OPTION : GEOTECHNIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par :

KHADRAOUI Seif Eddine et NACERI Hamza

Intitulé

Etude des effets du traitement à la chaux sur le
comportement des sols du Chott-El-Hodna
(Wilaya de M'sila)

Soutenu devant le jury composé de :

Prof. RAHMOUNI Zinelabidine	Université de M'sila	Président
Prof. KHEMISSA Mohamed	Université de M'sila	Encadreur
MCA. MAHAMEDDI Abdelkrim	Université de M'sila	Co-Encadreur
MAA. GUERRAICHE Ammar	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2020 /2021



Dédicaces

*Grâce à Dieu le tout puissant, j'ai achevé la
Réalisation de ce modeste travail que je tien très
Chaleureusement à le dédier à :*

*Ma mère chérie et mon père qui m'ont
Encouragé et soutenu tout au long de mes
Études et pour leurs patience que Dieu les
Protègent et les gardes pour moi.*

A mes adorables frères.

*Et à mes très chères amis et camarades pour
Tous les moments d'échange et de débat aux
Personnes qui m'ont toujours aidé et
Soutenue sans oublier mes cousines*

Remerciements

Ce mémoire que nous présentons ici a été réalisé au Laboratoire de recherche et développement Géomatériaux de l'Université de Mohamed BOUDIAF.

Nous remercierons très chaleureusement pour avoir accepté de diriger cette recherche. Le Professeur **KHEMISSA Mohamed** et le docteur **MAHAMEDI Abdelkrim** qui nous ont donné le goût de la recherche ; les enseignements et les conseils précieux qu'ils nous ont prodigué tout au long de ces années ont été fort utiles pour la conduite de ce travail à son terme. Enfin, nous voudrions les remercier pour leur compréhension et leur tolérance face aux erreurs de jeunesse que nous avons pues commettre.

Aussi nous remercierons le staff du groupe de laboratoires de la Faculté de Technologie, et spécialement le chef du Hall technologique Mr. **SALAMANI Ibrahim**.

Le laboratoire « Technosol » de Mr. **SAHLI Mohamed**, qui était toujours disponible pour nous aider.

Le chef de laboratoire de Lafarge Mr. **BOUKHALLAT Layachi**, et le chef du personnel de Lafarge Mr. **TOUATI Mekki** qui à facilité notre collaboration avec la société.

Mr. **KETFI Abdellatif**, Technicien supérieur au « LCTP » et Chef des travaux routières de la direction des travaux public et Mr. **BACHIRI Azzedine**, qui nous ont aidés pour la récolte de données et d'informations concernant notre recherche.

Nous remercierons également toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à l'élaboration de ce mémoire.

ملخص:

تشكل التربة المالحة واحدة من أكبر مشاكل علم الأتربة في العالم والجزائر لأنها تشغل حيزا كبيرا من حيث المساحة، وقد تم اقتراح العديد من الحلول لاستغلال الأراضي المتضررة من الملوحة أو استعمالها في إنشاء الطرقات ومختلف مجالات الهندسة.

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين خصائص التربة المالحة لسطح الحضنة على مستوى بلدية عين الخضراء ولاية المسيلة عن طريق إضافة نسب مختلفة من الجير، وعليه تم تحديد الاختبارات والفحوص الميكانيكية التي تجرى على هذا النوع من الأتربة، وقد أظهرت النتائج تحسن كبير في الخصائص الجيوتقنية والميكانيكية للتربة المدروسة كزيادة عوامل الصلابة والتحمل.

Résumé

Le sol salin constitue l'un des plus gros problèmes de la pédologie dans le monde et en Algérie car il occupe un grand espace en termes de superficie, de nombreuses solutions ont été proposées pour exploiter les terres affectées par la salinité et les utiliser dans la construction de routes et divers domaines.

Cette étude vise à améliorer les caractéristiques du sol salin de Chott El-Hodna au niveau de la commune d'Ain Al-Khadra, Wilaya de M'sila en ajoutant différentes proportions de chaux. Pour cela, des essais d'identification et des essais mécaniques ont été effectués sur cette argile et les résultats obtenus mettent en évidence une amélioration certaine et nettement meilleure des caractéristiques géotechniques telles que les paramètres de consistance, la portance et la résistance à la compression.

Abstract

Saline soil constitutes one of the biggest problems of soil science in the world and Algeria because it occupies a large space, and many solutions have been proposed to exploit the lands affected by salinity and use them in the construction of roads and various other fields.

This study aims to improve the characteristics of the saline soil of Chott El-Hodna at the municipality of Ain Al-Khadra, M'sila State by adding different proportions of lime. For this, identification tests and mechanical tests were performed on the clay and the results show a definite improvement and substantially better geotechnical parameters such as consistency, lift and shear strength

SOMMAIRE

Dédicaces	
Remerciements	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
ملخص	
Résumé	
Abstract	
Introduction Générale.....	1

CHAPITRE I : Synthèse Bibliographique

I.1 Introduction.....	4
I.2 Les Sols Salés.....	4
I.3 Caractéristique des sols salés.....	4
I.4 Classification des sols salés.....	5
I.5 Effets de la salinité sur les propriétés du sol	6
I.6 Répartition des sols sales.....	8

CHAPITRE II :

Liant hydraulique

II.1. La Chaux.....	9
---------------------	---

CHAPITRE III :

Description du Site étudié « Chott El-Hodna »

III.1 Localisation générale.....	14
III.2. Descriptif.....	14
III.3. Caractéristiques Physiques.....	16
III.4 Site de prélèvement d'échantillon.....	19

CHAPITRE IV:

Programme expérimental et procédures d'essai

V.1 Liste des essais.....	21
IV.2 Sol non traité.....	23
IV.3 Sol traité.....	23
IV.5 Description des essais.....	23

CHAPITRE V :

Présentation et analyse des résultats d'essais

V.1 Introduction.....	30
V.2 Sol non traité.....	30
V.3 Sol Traité.....	40

CHAPITRE VI :Conclusion générale

Conclusion générale.....	67
--------------------------	----

Références bibliographiques

Annexes

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Superficie affectées par la salinité dans le monde	8
---	---

CHAPITRE V

Le tableau V.2 Résultats de l'analyse chimique.....	38
Le tableau V.2 Résultats des essais des paramètres d'état.....	39
Le tableau V.3 Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sol non broyé).....	40
Le tableau V.4 Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sol broyé)	42
Le tableau V.5 Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg.....	44
Le tableau V.6 Résultats et moyenne des essais de VBS.....	45
Le tableau V.7 Caractéristiques d'identification des essais effectués sur le sol témoin étudié.....	45
Tableau V.8 Densités sèches en fonction des teneurs en eau	46
Tableau V.9 Valeurs moyennes des forces de pénétration en fonction des enfoncements	48
Tableau V.10 Valeurs moyennes de l'indice C.B.R.....	48
Tableau V.11 Résultats des essais de compression	48
Tableau V.12 Résultats des essais d'ultrason	49
Tableau V.13 Limites de consistance à différents dosages de chaux	56
Tableau V.14 : Valeur de bleu de méthylène par l'essai à la tâche.....	58
Tableau V.15 : Résultats des essais Proctor normal à différentes teneur en chaux.....	60
Tableau V.16 Résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en chaux	61
Tableau V.17 Forces en fonction du dosages en chaux pour chaque enfoncement	62
Tableau V.18 Résultats des indices C.B.R immédiats pour différents dosages en chaux.....	64
Tableau V.19 Résultats de la résistance à la compression pour différents dosages en chaux.....	65
Tableau V.20 Temps et vitesse de propagation des ondes ultrasoniques.....	66

Liste des Figures

CHAPITRE I

Figure I.1 : Répartition des sols salins au nord d'Algérie.....	9
--	---

CHAPITRE II

Figure II.1 : Etapes de fabrication de la chaux.....	16
---	----

CHAPITRE III

Figure III.1 : Situation géographique du Chott.....	21
Figure III.2 : Le Chott en période d'été.....	22
Figure III.3 : Le Chott en période d'hiver.....	22
Figure III.4 : Les oueds qui alimentent le Chott.....	24
Figure III.5 : Localisation du site de prélèvement d'échantillon.....	26

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : L'appareil de DRX (au niveau du laboratoire de Lafarge).....	28
Figure IV.2 : Pastilles d'échantillon pour le DRX.....	29
Figure IV.3 : Appareil de XRF S8 Tiger (au niveau du laboratoire de Lafarge).....	29
Figure IV.4 : Pastilles d'échantillon pour XRF S8.....	29
Figure IV.5 : Appareillage de mesure du Ph.....	30
Figure IV.6 : Analyse granulométrique par tamisage.....	31
Figure IV.7 : Analyse granulométrique par sédimentométrie.....	31
Figure IV.8 : Appareillage d'essai des limites d'Atterberg.....	32
Figure IV.9 : Appareillage d'essai VBS.....	33
Figure IV.10 : Echantillonnages d'essai VBS.....	33
Figure IV.11 : Machine de l'essai Proctor.....	34
Figure IV.12 : Eprouvette de Proctor Normal.....	34
Figure IV.14 : Appareil CBR.....	35
Figure IV.15 : Appareil de compression.....	36
Figure IV.16 : Mesure aux ultrasons sur un échantillon de Proctor.....	36

CHAPITRE V

Figure V.1 : Résultats d'analyse DRX.....	38
Figure V.2 : Résultats de l'analyse chimique.....	38
La figure V.3 Courbes de trois essais de l'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sol non broyé).....	41
La figure V.4 Courbes de trois essais de l'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie 'sol broyé).....	43
La figure V.5 Classe du sol étudié selon l'abaque de Casagrande.....	44
La figure V.6 Masses volumiques sèches en fonction des teneurs en eau	47
La figure V.7 Courbe des moyennes des forces de pénétration en fonction des enfoncements.....	48
La figure V.7 Résultats des diffractogrammes à 2% de chaux	49
La figure V.8 Résultats des diffractogrammes à 4% de chaux	50
La figure V.9 Résultats des diffractogrammes à 6% de chaux	50
La figure V.10 Résultats des diffractogrammes à 8% de chaux	51
La figure V.11 Résultats des diffractogrammes à 10% de chaux	51
La figure V.12 Résultats des diffractogrammes à 12% de chaux	52
La figure V.13 Résultats de l'analyse chimique à 2% de chaux	53
La figure V.14 Résultats de l'analyse chimique à 4% de chaux	53
La figure V.15 Résultats de l'analyse chimique à 6% de chaux	54
La figure V.16 Résultats de l'analyse chimique à 8% de chaux	54
La figure V.17 Résultats de l'analyse chimique à 10% de chaux	55
La figure V.18 Résultats de l'analyse chimique à 12% de chaux	55
La figure V.19 Courbe de la limite de liquidité.....	56
La figure V.20 Courbe de la limite de plasticité.....	57
La figure V.21 Courbe de l'indice de plasticité.....	57
La figure V.22 Classification selon l'abaque de Casagrande.....	58
La figure V.23 Valeur de Blue de méthylène pour différents dosages en chaux.....	59
La figure V.24 Surface spécifique pour différents dosages en chaux.....	59
La figure V.25 Densité sèche pour différents dosages en chaux	60
La figure V.26 Teneur en eau pour différents dosages en chaux	61
La figure V.27 Forces de pénétration pour différents dosages en chaux.....	62
La figure V.28 Courbe des forces en fonction des dosages en chaux pour chaque enfoncement.....	63
La figure V.29 courbe des indices C.B.R immédiats pour différents dosages en chaux.....	64
La figure V.30 courbe de la résistance aux compressions pour différents dosages en chaux.....	65
La figure V.31 Courbe de vitesse de propagation en fonction du dosage chaux.....	66

Introduction Générale

Le sol salin est l'un des sols à problèmes les plus courants dans diverses régions du 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 Ter Atlas au nord et l'Atlas saharien au sud, s'étendant d'est en ouest jusqu'aux pays voisins du Maghreb. Leurs caractéristiques météorologiques sont de faibles précipitations et une grande différence de température entre l'hiver et l'été (froid et humide en hiver, chaud et sec en été). Les obstacles qui apparaissent souvent dans ces zones affectent les infrastructures routières, les routes et réseaux divers, et les bâtiments civils et industriels de faible hauteur, qui nuisent à l'utilisation des sols salés à l'état naturel comme matériaux de remblayage ou de plate-forme ou comme fondation de support pour la géotechnique. Lorsqu'ils sont secs, les sols salés 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.

Dans le passé, lorsqu'un type de sol n'était pas adapté aux l'utilisation et la construire des ouvrages, un autre type de sol avec de meilleures propriétés géotechniques pouvait être sélectionné, car les besoins sociaux n'étaient pas importants. Avec la croissance de la population et le développement des activités, il est parfois impossible de fournir des sols adaptés avec de bonnes propriétés géotechniques. Par conséquent, même si ses propriétés géotechniques sont de mauvaise qualité, il est généralement nécessaire d'adapter la structure au type de sol sur lequel elle sera construite, comme le sol de Sebkhass. En raison de leur forte teneur en sel, ces sols sont appelés sols salins. L'influence de la salinité affecte l'état d'humidité du sol en réduisant la teneur en humidité du sol, cette dernière Deviendra rugueuse et sec à nouveau. De plus, le sol salé est le berceau d'autres problèmes physiques. Par exemple, une faible capacité de charge et une compressibilité élevée.

Le monde entier, en particulier l'Algérie, s'est construit Certains sont situés dans des sols de mauvaise qualité, en particulier les grands projets en sols peuplent Sebkhass. Le sol de Sebkhass est le sédiment de sel le plus récent, largement distribué dans Asie continentale, Amérique du Sud, Australie, États-Unis et Afrique du Nord. L'Algérie compte un grand nombre de Sebkhass dispersées du sud de la Tunisie aux montagnes de l'Atlas dans le nord de l'Algérie.

Certains sols, du fait de leurs caractéristiques géotechniques inhérentes et/ou de leur teneur en eau est considérée comme mauvaises ou médiocres et n'existe pas par conséquent, il est nécessaire de résister au trafic sur site, à la surface de la route et à l'avenir, les transports serviront même de remblai, les sols salés en sont un exemple.

La structure urbaine de la Wilaya de M'sila connaît aujourd'hui une prospérité économique et une énorme responsabilité sociale a conduit à l'expansion continue de son réseau routier parallèlement au développement de la structure urbaine, il s'étend donc au territoire des zones non aménagées qui ne sont généralement pas aussi avantageuses que les zones urbanisées. La Wilaya est située dans une région classée semi-aride, caractérisée par de faibles précipitations et température importante entre l'hiver et l'été. La Wilaya de M'sila est le siège d'une région importante terre saline-alkali, considérée comme la capitale du Chott El Hodna (Sebkha). Un aspect de l'objectif de cette recherche est de caractériser la résistance des sols collectés sur le site rural de Chott El Hodna près de la ville Ain Khadra, Wilaya de Msila, et aussi déterminer les paramètres physiques et mécaniques de ce sol par un groupe d'essais réalisés avant et après traitements à la Chaux.

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 coince 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 km² bassin 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 croûte de sel recouvre toute la zone.

Le travail présenté dans ce mémoire est composé de cinq 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 à la description de liant utilisé dans notre étude et on parle ici de la chaux, ensuite l'essentiel du traitement des sols. L'influence de ce liant hydraulique sur les propriétés géotechniques est également discutée.

- Le troisième 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 quatrième chapitre regroupe l'ensemble des essais expérimentaux ainsi que les procédures suivies, il est attesté par des photos de réalisation au niveau de laboratoire de recherche et développement Géomatériaux de l'Université de M'sila.
- Le cinquième chapitre expose et analyse les résultats qu'on a obtenus à travers des essais effectués sur le sol avant traitement à la chaux 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 Introduction

Les sols salés ou sols halomorphes, appelés actuellement sols salsodiques représentent un pourcentage important de la surface totale des sols dans le monde. Les sols salés se trouvent essentiellement dans les régions sèches (aride et semi arides et méditerranéennes).

Mais aussi dans les milieux subhumides et même humides. Ils sont étroitement liés à une source de salinité d'ordre géologique (évaporites), hydro-géologique (eaux souterraines) ou hydrologique (eau marine).

La salinité affecte le développement des cultures, et propriété pédologique notamment la dispersion des colloïdes, la stabilité structurale et la chute de la perméabilité hydraulique.

I.2 Les Sols Salés

I.2.1 Définition

Ce sont les sols qui contiennent une quantité élevée de sels solubles. Une limite conventionnelle a été proposée afin de définir les sols salés. SCHOFIELD a montré que le sol est considéré comme salé lorsque la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée a une valeur supérieure ou égale (1) à 4 mmhos/cm à 25° avec un taux de saturation de sodium inférieur à 15% de la capacité d'échange, normalement le pH est également inférieur à 8,5.

Les sols qui possèdent les caractéristiques indiquées ci-dessus correspondent au "white alcali" de HILGARD, ou au "solontchak" des pédologues russes, ou aux sols salins de la classification française, ils présentent très souvent des efflorescences ou une croûte blanche à la surface de l'horizon supérieur du sol.

I.3 Caractéristiques des sols salés

Dans des régions humides, ces sols n'existent que très rarement, sauf en bordure de mer, les sels solubles sont lessivés, par l'action des précipitations, et ils sont évacués en majeure partie du profil du sol. Les sols salins sont au contraire fréquents dans les régions arides, ou semi-arides. Dans ces sols les processus de lessivage vertical et de déplacement latéral des sels sont moins complets que dans les régions humides. S'il se produit un phénomène de lessivage il reste limité au profil ; et les sels ne sont pas exportés en dehors, ils ont au contraire tendance sous l'action de l'évaporation et du déficit d'humidité à se concentrer dans le profil et surtout dans les horizons superficiels. Par ailleurs, dans le cas où il n'y a pas de drainage général permettant d'évacuer les nappes salées, le mouvement capillaire

intervient, et par conséquent le sol évolue vers le type salé ou à alcali selon la nature et la concentration des sels, ainsi que des rapports cationiques dans l'eau de la nappe.

I.3.1 Les caractéristiques chimiques

Les caractéristiques 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 Cl^- et SO_4^{2-} parfois une faible quantité de CO_3H^- peut exister, les cations les plus habituels sont : Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , et dans quelques cas K^+ .

I.3.2 Les caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques des sols salés sont parfois assez favorables, grâce à la présence de sels en excès et à l'absence de quantité appréciable de sodium échangeable, les colloïdes dans certains sols salins sont très flocculés et ainsi donnent une structure favorable et une bonne perméabilité. Cependant certains sols salins ont des perméabilités très basses.

KOVDA V.A. (1961), a noté que dans les régions arides et semi-arides, une accumulation intense de sels s'observe parfois à la surface du sol, ces sels représentent souvent jusqu'à 50-60 % de la masse du sol, leur épaisseur atteint 3 à 5 cm, et parfois de 50-100 cm, leur structure est très dense, ils forment une couche imperméable. Leur composition chimique est variable. Les formations les plus importantes sont : les croutes calcaires, avec une quantité de 50-70 % de carbonate de calcium, les croutes gypseuses qui contiennent 60-80' de gypse et les croutes salées, qui sont constituées d'un mélange de différents sels et en particulier de chlorures.

I.4 Classification des sols salés

La classification française paraît la plus appropriée dans les zones arides et en particulier pour les sols sales puisque selon, les sols sales sont rangés dans la classe des sols sodique, elle-même subdivisée en deux sous classe :

I.4.1 Sous classe des sols sodiques à structure non dégradée

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

I.4.1.1 Sols salins à complexe calcique (solont-chaks)

Très fréquents en Algérie, caractérisés par $\text{ESP} < 15\%$ et un profil peu différencié.

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 alimentent le profil.

I.4.1.2 Sols salins à complexe sodique (solon-tchaks sodique)

Ce type de sol est caractères par un ESP >15% se rencontre en bordure de mer, ou dans les lagunes côtières, sa structure tend à se dégrader et devient poudreuse.

Profils des type AC, $CE > 4 \text{ mmhos/cm}$, $\text{pH} < 8,5$, $\text{ESP} > 15 \%$.

I.4.2 Sous classe des sols sodique à structure dégradée

On distingue trois groupes selon l'étape d'évolution des profils :

I.4.2.1 Sols alcalins non lessives (solon-tchaks solonetz)

Leur profil de type AC ou A (B) Cils sont fréquent on Algérie $CE > 4 \text{ mmhos/cm}$ à $25 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{pH} > 8$, $\text{ESP} > 15\%$

I.4.2.2 Sols alcalins lessives

L'horizon de surface pauvre en argile (migration par l'effet de lessivage).

Ces sols existent en Algérie mais sont très localises dans les zones humides $CE < 4 \text{ mmhos/cm}$, $\text{pH} > 8,5$, $\text{ESP} > 15\%$.

I.5 Effets de la salinité sur les propriétés du sol

C'est l'accroissement du taux de sodium échangeable d'un sol dû à diverses modifications physico- chimiques, dont résultent une défloculation des argiles et une obturation des pores qui entravent la circulation de l'eau. Le sol devient de ce fait imperméable et donc infertile.

En revanche, le sol sodique est le sol dont la structure pédologique est conditionnée par la teneur en sodium. Les principaux types de sols sodiques sont les solonetz, les solont-chaks et les soloths. (FRANÇOIS, 2008).

I.5.1 Effet sur la structure du sol

Les cations sodium tendent à provoquer la destruction de la structure en favorisant la dispersion des colloïdes minéraux. D'une façon générale, la dispersion dépend de deux facteurs :

- 1- La quantité de cations Na^+ adsorbés (ESP) dont l'augmentation favorise la dispersion.
- 2- La concentration de la solution saline au contact de la phase solide, dont l'augmentation limite la dispersion (Calvet, 2003).

I.5.2 Phénomène de floculation du complexe argilo-humique

La floculation permet de s'attaquer au problème du faible diamètre des colloïdes. Le véritable souci est en fait la masse, qui ne permet pas une sédimentation naturelle et exploitable dans le cadre d'un traitement. La solution exploitée par la floculation est de provoquer, grâce à l'ajout de flocculant,

une agglomération des particules colloïdales. Par la suite, cet agglomérat de colloïdes appelé floc dispose d'une masse suffisante pour pouvoir se décanter. Le floculant ajouté est généralement un polymère, qu'il soit organique ou naturel, qui va jouer le rôle de colle entre les colloïdes.

I.5.3 Conductivité hydraulique saturée

La conductivité hydraulique est l'une des propriétés physiques indispensable en agriculture irriguée, cette propriété dépend des conditions chimiques de la solution du sol. La circulation de l'eau dans les sols salins dépend surtout en saison sèche essentiellement de leur texture et de leur structure, elle devient difficile dès que, le sol est saturé, elle se fait très lentement par diffusion.

La réduction de la perméabilité des sols salés est une conséquence directe de la dispersion des colloïdes par le sodium échangeable.

La diminution de la perméabilité est fonction de l'ion accompagnateur du sodium, elle diminue dans le sens suivant : $\text{CO}_3^{2-} > \text{HCO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ (Servant, 1971) Signalait que le sodium réduit la percolation alors que le K^+ l'augmente. Par contre les sols saturés par le Ca^{2+} ont une meilleure perméabilité que ceux saturés par le Na^+ et K^+ .

Selon RICHARDS (1954), deux facteurs jouent ou régissent la diminution de la perméabilité :

- Le gonflement des particules d'argiles, causant la diminution de la taille des pores larges dans le système ;
- La dispersion des argiles provoque ainsi l'obstruction des pores et des canaux dans le sol.

I.5.4 Bilan ionique de la solution du sol

Les sels proviennent de la combinaison des bases (cations) et des acides (anions).

Parmi ces sels, ce sont surtout Na Cl , Na_2SO_4 , Na HCO_3 , Ca SO_4 , Ca Cl_2 , Mg SO_4 .

Mg Cl_2 que l'on rencontre dans les sols salifères.

Tous les ions peuvent participer à la salinisation ; en pratique certains sont susceptibles de s'accumuler et d'être à l'origine d'une salinité excessive des terres. En effet, ce sont le sodium (Na^+), le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), ainsi que le chlorure (Cl^-), sulfate (SO_4^{4-}), carbonate (CO_3^{3-}) et les bicarbonates (HCO_3^-).

Selon DURANT (1958), la mobilité des sels est liée à leurs solubilités, les plus mobiles sont les plus solubles et leurs mouvements dépendent de l'eau imprégnant le sol et les mouvements qu'elle subit.

I.6 Répartition des sols salés

I.6.1 Dans le monde

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.6.2 En Algérie

Les sols salés occupent de vastes superficies (3.2 millions d'hectares de la superficie totale). Ils sont localisés du Nord au sud, l'isohyète 450mm semble être la limite supérieure des sols fortement sodiques. On rencontre plusieurs types de sols sales en Algérie localises surtout dans les étages bioclimatiques arides et semi- arides. Voir (figure 1).

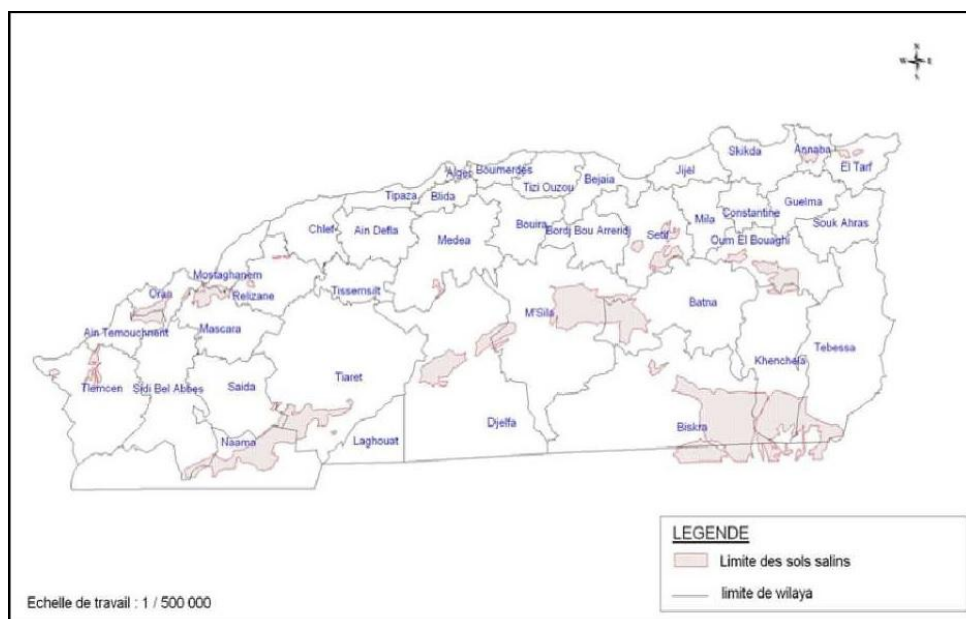


Figure I.1 : Répartition des sols salins au nord de l'Algérie

Chapitre II

Liant hydraulique

Chapitre II : Liant hydraulique

II.1. La Chaux

II.1.1 Définition

La chaux est un corps chimique minéral, l'oxyde de calcium de formule brute CaO . Il s'agit d'une espèce minérale naturelle rare, de maille cubique (ou isométrique), qu'il est possible d'observer en petites masses blanches avec les éjectas transformés à haute température parmi lesquels les laves communes sur les flancs des formations volcaniques, par exemple sur le Vésuve en Italie. Référencée officiellement en 1935 dans le champ de la minéralogie, elle fait partie du groupe isostructurel $\text{Fm}3\text{m}$ du périclase MgO .

II.1.2 Histoire

Les usages de la chaux ont largement précédé la connaissance rationnelle des mécanismes de sa fabrication et de sa prise. Jusqu'au 19^e siècle, ce sont donc les savoirs empiriques qui ont guidé les pratiques des chaudronniers, des maçons et des architectes. Les usages de ce matériau, qui a permis des réalisations architecturales, artistiques et domestiques majeures, ont recoupé ce que l'analyse scientifique a ensuite dénommé de carbonatation, prise aérienne, réaction pouzzolanique et prise hydraulique.

Nous nous proposons, dans cette partie historique, de suivre les péripéties de l'usage de la chaux dans le domaine de la construction, péripéties qui trouveront leurs explications et leur conclusion dans les recherches des chimistes et des ingénieurs de la fin du 18^e et du 19^e siècle, recherches qui ouvriront les voies de l'exploitation rationnelle et industrielle des propriétés des roches carbonatées.

II.1.3 Principales caractéristiques

Leurs principales caractéristiques sont les suivantes :

- du point de vue chimique : elles contiennent au moins 50 % de calcite (CaCO_3), ont généralement une faible dureté et font effervescence à l'acide chlorhydrique (dégagement de CO_2) ;
- du point de vue géologique : elles proviennent la plupart du temps de l'accumulation de dépôts, fossiles ou terrigènes. Elles peuvent être aussi issues de précipitations chimiques ou biochimiques.

II.1.4 Classification de Chaux

Leur classification est faite suivant leurs caractéristiques principales :

- la proportion de calcite : calcaire pur, dolomitique, argileux... ;
- le milieu de dépôt : calcaire marin, lacustre, continental... ;
- la taille des grains : calcaire micritique (calcite microcristalline dont la taille n'excède pas 10mm), sparitique (calcite spathique d'environ 100 mm), grossier (calcite de plus de 200 mm) ;
- leur texture, leur compacité, la nature et/ou la quantité de fossiles : calcaire marbrier, coquillier, oolithique, récifal, amilioles...

II.1.5 Types de chaux

II.1.5.1 La chaux vive

La chaux vive (notation Q selon la norme EN 459-1) se présente essentiellement sous forme d'oxyde et réagit de façon exothermique avec l'eau. On distingue l'oxyde de calcium et l'oxyde de calcium et de magnésium.

Ces deux types de chaux vive sont disponibles sous différentes présentations granulométriques, discontinues ou continues, pouvant aller, du bloc sortant du four (ou « roche » selon la terminologie des chaufourniers), à la poudre obtenue par broyage.

II.1.5.2 La Chaux éteinte

La chaux hydratée – également qualifiée d'« éteinte » – (notation S selon la norme EN 459-1) se présente essentiellement sous forme d'hydroxyde obtenu par hydratation – ou extinction – contrôlé de l'oxyde. On distingue l'hydroxyde de calcium et l'hydroxyde de calcium et de magnésium.

La chaux hydratée est disponible à l'état de poudre, d'une part, et en suspension dans l'eau, d'autre part. Dans ce dernier cas, on obtient, du plus concentré au plus dilué, une pâte, un coulis, ou un lait de chaux.

Il faut signaler que la chaux dolomitique est également produite sous forme de chaux dolomitique semi-hydratée, c'est-à-dire constituée d'hydroxyde de calcium et d'oxyde de magnésium (notation S1 selon la norme EN 459-1) : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgO}$.

II.1.6 Fabrication de la chaux

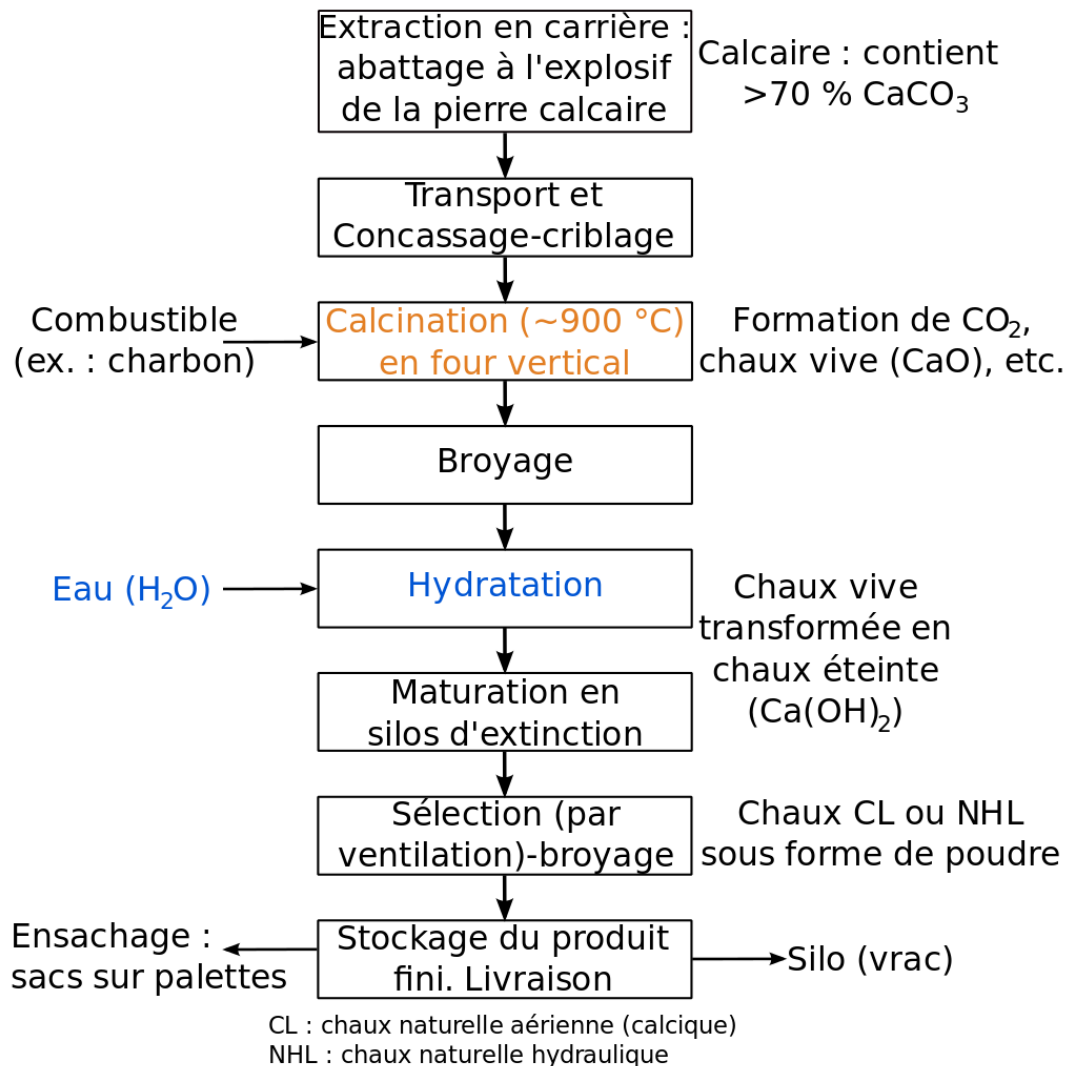


Figure II.3 : Etapes de fabrication de la chaux

II.1.7 Réactions argile- chaux

L'ajout de la chaux à un sol argileux ou latéritique déclenche quatre principales réactions : l'échange cationique, la floculation- agglomération, la réaction pouzzolanique et la réaction de carbonatation.

II.1.7.1 Echange cationique

L'ajout de la chaux à un sol argileux a un effet immédiat sur les propriétés de celui-ci. Il y a libération des ions Ca^{+2} produits par la chaux en présence d'eau, et ceci s'accompagne d'une augmentation du pH du sol. Il se produit un échange cationique entre les ions métalliques liés aux surfaces des particules argileuses et les ions Ca^{+2} produits par la chaux. La valence et la taille de l'ion jouent un rôle primordial dans cette réaction d'échange cationique. Les cations de valence élevée

remplacent facilement ceux de faible valence. Pour des cations de même valence, le plus gros peut être facilement remplacé. On peut donc dresser une liste des cations par ordre approximatif de capacité de remplacement.

Cet ordre dans la réalité dépend du type d'argile, de la nature des cations à remplacer et de la concentration des ions dans l'eau. L'ordre croissant de capacité de remplacement des cations est le suivant : $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{H}^+ < \text{K}^+ < \text{NH}_4^+ < \text{Mg}^{+2} < \text{Ca}^{+2} < \text{Al}^{+3}$.

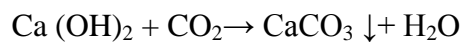
II.1.7.2 Flocculation- agglomération

Après la réaction d'échange cationique, les particules argileuses se trouvent entourées par une double couche diffuse qui peut être modifiée par l'échange ionique du calcium. Cela altère la densité de la charge électrique autour des particules argileuses qui s'attirent et se regroupent en formant des flocons. Ce processus s'appelle la flocculation. Ce phénomène peut changer la texture des particules argileuses aboutissant à la formation des particules de plus grande taille. Il s'ensuit une réduction de la plasticité et une augmentation de la portance du sol argileux.

L'agglomération est causée par l'attraction du restant des particules du sol qui portent encore des charges négatives par celles de la surface chargée positivement. Elle est affectée par l'échange cationique ou la flocculation des particules.

II.1.7.3 Carbonatation

Il s'agit de la réaction entre la chaux éteinte et le dioxyde de carbone de l'air qui conduit à la formation de la calcite qui précipite sous forme de cristaux. La réaction chimique est la suivante :



Les cristaux de calcite formés sont des liants de cimentation très fragiles et par conséquent connectent faiblement les particules du sol argileux. Ces cristaux renforcent seulement à court terme le sol. La réaction consomme une partie de la chaux destinée à la réaction pouzzolanique entre l'argile et la chaux, retarde celle-ci et contribue à la baisse du pH des sols traités [13, 44, 45]. Paige-Green (1984) a montré que la présence du dioxyde de carbone induit initialement une résistance mécanique qui diminue avec le temps de cure. La carbonatation est néfaste pour le traitement des sols argileux à la chaux.

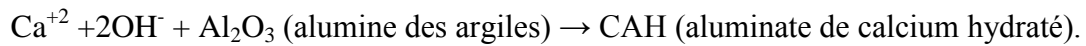
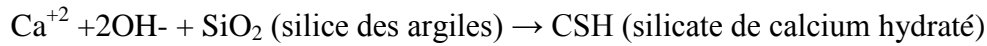
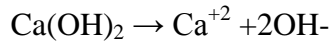
II.1.7.4 Réaction pouzzolanique

La chaux, l'eau, la silice et l'alumine réagissent pour donner divers composés de cimentation. La silice et l'alumine peuvent provenir des minéraux argileux, du quartz, des feldspaths, des micas, des minéraux alumino-silicatés et même de certains composés amorphes.

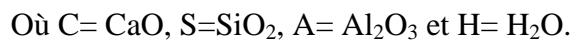
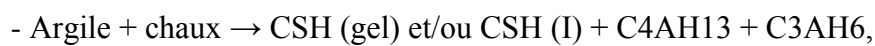
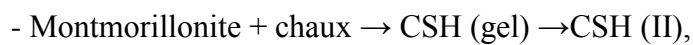
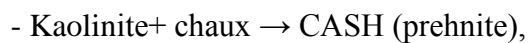
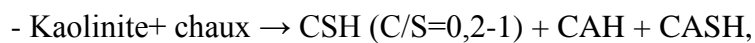
L'ajout d'une quantité importante de chaux à un sol fait augmenter de manière significative le pH du mélange jusqu'à 12,4, valeur correspondante au pH d'une solution saturée de chaux. Les solubilités de la silice et de l'alumine croissent donc avec ces valeurs de pH élevées.

Divers mécanismes de formation des produits de la réaction entre la silice ou l'alumine avec la chaux ont été proposés par des chercheurs.

II.1.8 Les principales réactions chimiques peuvent être schématisées comme suit :



Une large variété d'hydrates peut être obtenue en fonction des conditions des réactions chimiques. Ces conditions sont principalement : la quantité et le type de chaux, les caractéristiques du sol, le temps de cure et la température. Les réactions typiques entre le sol et la chaux sont les suivantes :



Pour CSH (I) et CSH (II), les ratios C/S sont respectivement inférieur et supérieur à 1,5.

Les propriétés et caractéristiques du sol qui influencent les réactions pouzzolaniques sont : le pH, le taux de matière organique, le drainage naturel, la présence d'une quantité excessive de sodium échangeable, la minéralogie de l'argile, le degré d'altération, la présence des sulfates et carbonates, le fer extractible, le rapport silice/ sesquioxydes et le rapport silice/alumine.

Chapitre III

Description du Site étudié

« Chott-El-Hodna »

Chapitre III : Description du site étudié

III.1 Localisation générale

Le Chott-El-Hodna chevauche deux wilaya, M'Sila, sur 1000 Km², et Batna sur 100 Km², situé au Sud-Est de l'Algérie et isolé de la Mer Méditerranéenne par 100 à 150 km de chaînes de montagnes, cet écosystème qui occupe le centre de la cuvette du Hodna est situé à 40 km de la Ville de M'sila, à 20 km au Sud-Ouest de la ville de Bou Saada et à 80 km au Sud-Est de la ville de Biskra.

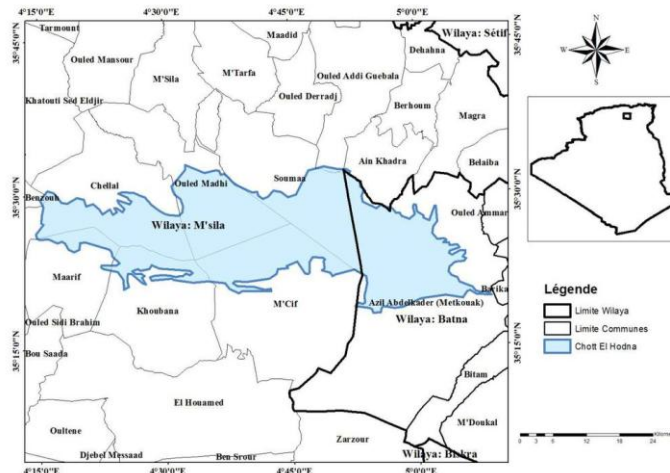


Figure III.1 : Situation géographique du Chott-El-Hodna

III.2. Descriptif

Le Chott-El-Hodna fait partie d'une série de chotts qui se sont développés où convergent les eaux provenant de l'Atlas Saharien au Sud et l'Atlas Tellien au Nord. Paysage végétal des hautes plaines steppiques, il fait partie du point de vue phytogéographique du domaine Maghrébin steppique. Son bassin situé à l'extrême Est des hauts plateaux, qui s'étend sur 220 km de long et 90 Km de large, est coincé entre deux formations montagneuses atteignant 1 800 à 1 900 m d'altitude au Nord et 600 à 900 m d'altitude au Sud, c'est hydrologiquement un bassin fermé de 26.000 km².

La cuvette du Hodna, d'une superficie de 8 500 km², qui sert de niveau de base aux oueds du bassin, occupés-en son milieu de bas-fond plat une superficie de 1100 km², C'est cela que l'on appelle « Le Chott-El-Hodna » situé à 400 m d'altitude. Surface d'épandage des cruel, le chott a une forme elliptique, une eau salée et s'étend sur 77 km de long et 19 km de large. Sa surface inondée, quoique variable, ne dépasse jamais 80 000 ha. L'alimentation du Chott est assurée par au moins 22 cours d'eau principaux, auxquels il

faut ajouter des sources d'eau douce. Le Chott se met en eau uniquement en hiver. Sec et salé en été, des croutes de sel couvrent toute son étendue.



Figure III.2 : Le Chott en période d'été



Figure III.3: Le Chott en période d'hiver

III.3. Caractéristiques Physiques

III.3.1 Géologie

Durant le quaternaire récent se distinguent deux épisodes humides, le Soltanien puis le Rharbien suivis par l'actuelle période de sécheresse. La fin du Soltanien est marquée par l'apparition de vastes lacs, la sebkha du Hodna s'y est implantée il y a quelques milliers d'années seulement à la suite de l'émergence du seuil de M'doukal par des formations lacustres du Soltanien et par des dunes. Le Chott est implanté en partie sur une structure anti-clinale qui, probablement, est le prolongement de l'anti-clinal du chott El hammam. Le chott El Hodna est un paysage transito-accumulatif de dépôts argileux récents qui bordent la sebkha, Il renferme des dépôts alluvionnaires du Quaternaire ou on distingue l'ensemble Q1 représenté par des strates conglomératiques consolidées par des argiles jaunes qui contiennent des sables fins et de petits cristaux de gypse. L'ensemble Q0 à dominance d'éléments fins comportant trois strates argileuses avec une intercalation de lentilles sableuses. L'ensemble Q est constitué de limon et d'argile sur toute la plaine et de sables fins au contact des oueds. L'épandage deltaïque des oueds couvre la partie avale, là où le réseau hydrographique se ramifie de plus en plus vers la sebkha. Deux types de sédiments sont bien distincts des formations moyennement grossières (Q0), du gravier et du sable d'une part et, d'autre part, des formations fines.

III.3.2 Géomorphologie

Doté d'un relief plat et d'un micro-relief ondulé, le chott qui est une large dépression dont le fond atteint 391 m sépare la région du Hodna proprement dite de la région saharienne, dépression constituée de deux zones concentriques, une zone périphérique ou zone du chott et une zone centrale ou zone de la sebkha.

La zone Nord du chott occupe une partie de la plaine, les oueds denses étalent leurs sédiments sous forme de crues qui mordillent la sebkha. Ils débordent fréquemment et salinisent les terres après évaporation. Cette partie est caractérisée par des sols argilo-limoneux.

La zone Sud du chott occupe une partie de la plaine sud, dite du R'mel, qui se distingue par sa nature sableuse, elle est parcourue par un réseau hydrographique peu dense. Les accumulations éoliennes masquant en partie la zone du chott, cette zone offre un paysage détendu, sableux et plat.

La zone centrale, représentée par la Sebkha, ou zone d'eau libre salée, plate et nue est caractérisée par une absence totale de végétation et par la présence d'une couche minérale sous forme d'une pellicule blanche de sel.

Le bassin versant du Hodna se situe entre l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au sud, de cette position résulte une grande complexité Tectonique. Cinq phases tectonique sont, en effet, affecté le bassin du Hodna : Lamarienne, Atlasique, Miocène, Pliocène et Quaternaire.

III.3.3 Hydrologie

Le régime hydrologique du Hodna est lié au régime pluviométrique caractérisé par de fortes irrégularités. La majorité des cours d'eau n'ont pas de débits pérennes, à l'exception des oueds Lougmane, El Ham, K'sob, Selmane, Berhoum, Soubella alimentés par des sources et retenues par des « ceds » (ou retenues) traditionnelles. A cela se rajoute une multitude de petits cours d'eau (Chaaba) à sec pratiquement toute l'année et qui coulent lors des chutes de pluies. Quatre oueds seulement sont pérennes, quoique leur débit soit très faible Oued El Ham à l'Ouest, Oued K'sob au Nord, Oued Barika à l'Est et Oued M'cif au Sud. Tous les oueds, pérennes ou non, ont des crues secondaires et fortes, les eaux se déversant dans le chott sont estimées à 150 hm³ par an pour une année moyennement pluvieuse.

III.3.4 Sources d'eau

Les sources de Chellal ont l'Ouest du chott se situent sur la bordure Sud du Synclinal de M'sila, leur débit est inférieur à 10 l/s. La plupart d'entre-elles provient de l'aquifère Albo-Aptien, leur concentration dépassant rarement 2g/l. Les autres sources, probablement d'origine Cénomaniennne, ont une concentration qui dépasse 3g/l, leur faciès chimique est Chlorure sodique ».

Ces sources, vraisemblablement des exécutoires de la nappe captive, provoquent un gonflement de la nappe phréatique. Autour d'elles, les terrains sont généralement sales et la surface irrigable est très limitée.



Figure III.4 : Les Oueds qui alimentent le Chott

III.3.5 Bilan hydrique

L'apport annuel moyen des eaux souterraines est 63 hm^3 , soit un débit évalué à $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$ environ.

III.3.6 Types de sols

Les sols du chott et la sebkha accumulent des gypso-salines de nappe qui, l'évaporation aidant, deviennent franchement salins dans la sebkha. La répartition des sols est en rapport avec des phénomènes pédologiques majeurs tels que : la fertilisation, l'halomorphie, la gypsomorphie, la calcimorphie et la désertification.

La nappe phréatique se rapprochant de la surface près de la sebkha, lieu de la minéralisation des eaux augmente, la salinisation de type sulfato-chlorure devient chloruro-sulfatée et chlorurée.

Dans le chott on observe une zonalité pédologique suivante :

- Sol peu évolué d'apport alluvial affecté à différents degrés par des sels sur les glacis récents se trouvant également en plaine.
- Sol halomorphe moyennement à très fortement salins dans le chott avec une couverture végétale clairsemée, localement avec des sols hydromorphes à redistribution de gypse.
- Sol halomorphe excessivement salin, abiotique de la sebkha.
- Sol halomorphe et sol hydromorphe à redistribution de gypse ensable en complexe avec des sols minéraux bruts, xériques et inorganiques issus d'apports de région du R'mel.

III.3.7 Qualité de d'eau

Les eaux des oueds qui convergent vers la sebkha sont faiblement à moyennement salées avec un PH neutre à basique.

III.3.8 Nappe superficielle

Les eaux de la nappe superficielle ont une salinité modérée à très élevée, compte tenu du type de salinisation elles sont sulfato-chlorurée dans la partie -Est. Le résidu sec de la nappe varie de 0,5 à 280g/l, le type de salinisation change dans la partie basse du bassin, les eaux dans la plaine sont sulfatochlorurées avec quelques lentilles sulfatées.

III.3.9 Nappe phréatique

La température de la nappe phréatique qui oscille entre 15°C et 22°C varie de quelques degrés durant l'hiver et l'été, au niveau de la nappe en charge elle varie entre 22°C et 24°C . Aucune variation saisonnière n'étant relevée, le PH se situe entre 7 et 8. Dans la majorité des cas, d'eau est donc neutre à basique.

III.4 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 III.5 : Localisation du site de prélèvement d'échantillon

Chapitre IV

**Programme expérimental et
procédures d'essais**

Chapitre IV : programme expérimental

IV.1 Introduction

Après présentation du protocole expérimental suivi et définition des propriétés physico-chimiques du stabilisant utilisé, ce chapitre donne la liste des essais d'identification et de caractérisation qui devaient être réalisés avec une description succincte des procédures expérimentales correspondantes en vigueur en Algérie et les paramètres d'interprétation des propriétés physico-chimiques et mécaniques des sols testés

IV.2 Protocole expérimental

Le protocole expérimental qui devrait être exécuté comporte des essais d'identification réalisés sur sol non traité (sol témoin) et sur sol traité à la chaux. Une description de ce liant et des essais est donnée ci-après.

Les échantillons soumis aux essais seront confectionnés à partir du mélange de la quantité de sol finement broyé après étuvage à 105 °C à la teneur en stabilisant désirée. L'ensemble sera ensuite malaxé vigoureusement à sec, puis humidifié à la teneur en eau optimale W_{opt} (i.e. densité sèche maximale γ_{d-max} correspondant à l'optimum Proctor) ; les caractéristiques de compactage étant préalablement déterminées sur le sol non traité. Tous les essais ont été conduits à la température ambiante.

Les procédures expérimentales suivies dans chaque type d'essai ont été conformes aux normes algériennes en vigueur, lesquelles sont compatibles aux normes françaises (i.e. normes européennes) en vigueur. Les méthodes d'interprétation des résultats d'essais s'inspirent beaucoup des connaissances acquises à travers le monde sur ce type de sol.

IV.3 Propriétés du liant hydraulique utilisé

Le traitement sera effectué en mélangeant le sol au stabilisant (la chaux dans notre cas) dans les proportions données ci-après. La chaux utilisée est de type chaux éteinte provenant des usines ERCO de Hassasna (wilaya de Saïda). Le tableau 4.1 donne les caractéristiques physiques et chimiques de ce stabilisant.

Les teneurs pondérales en chaux considérés pour le traitement sont 0 % pour l'échantillon témoin, 2 %, 4 %, 6 %, 8 %, 10 % et 12 % pour les échantillons traités.

Tableau IV.1 : Propriétés physico-chimiques de la chaux éteinte de Saïda.

Description	NHL	
Propriétés physiques	Densité	600-900 g/l
	Coefficient d'absorption	< 5
	Sensibilité au gel	< 30
	Volume d'extinction	2,73 cm ³
	Refus 630 µm	0 %
	Refus 90 µm	< 10 %
Propriétés chimiques	Humidité	> 5
	CaO	> 83,3 %
	MgO	< 0,5 %
	Fe ₂ O ₃	< 2 %
	Al ₂ O ₃	< 1,5 %
	SiO ₂	< 2,5 %
	SO ₃	< 2,5
	Na ₂ O	< 4,7 -0,5
	CO ₂	< 5
	CaCO ₃	< 10
	Insolubles dans HCL	< 1

IV.4 Liste des essais :

La liste des essais d'identification et de caractérisation et les normes en vigueur correspondantes sont données ci-après.

Le programme expérimental a été réalisé au sein du Laboratoire de Développement des Géomatériaux de l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila. Ce programme est réparti en deux parties :

IV.4.1 Sol non traité

IV.2.1 Essais d'identification :

Analyse minéralogique : DRX.

Analyse chimique : S8

La teneur en eau.

Le poids volumique sec est humide.

La granulométrie (par tamisage et par sédimentométrie).

Les limites d'Atterberg.

L'essai bleu de méthylène.

IV.2.2 Essais de caractérisation

Proctor normal

Essai C.B.R immédiat

Essai de compression simple.

Mesures aux ultrasons.

IV.4.2 Sol traité

IV.3.1 Essais d'identification

Limites d'Atterberg.

Essai de bleu de méthylène.

Analyse minéralogique : DRX.

Analyse chimique : S8.

IV.3.2 Essais de caractérisation

Proctor normal.

Essai C.B.R immédiat

Essai de compression simple.

Mesures aux ultrasons.

IV.5 Description des essais

IV.5.1 Essais d'identification

IV.5.1.1. Analyse minéralogique : DRX

La diffraction des rayons X est l'une des techniques couramment utilisées pour l'identification des espèces 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 :

$2d \sin\theta = n\lambda$ 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 diffractométrique aux rayons X, des échantillons ont été broyés dans un mortier en agate jusqu'à une granulométrie $< 80 \mu\text{m}$ 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 IV.1 : L'appareil de DRX (à niveau de labo de Lafarge)



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

IV.5.1.2 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 IV.3 : L'appareil de XRF S8 Tiger (au niveau du labo de Lafarge)



Figure IV.4 : Appareillage pour XRF S8

IV.5.1.3 La mesure du pH

La mesure du pH de l'échantillon a nécessité une certaine préparation. Pour cela 1g d'échantillon a été dissout dans 2.5 ml d'eau distillée. Le mélange obtenu a été agité pendant 2 heures afin d'avoir une solution homogène. Le pH a été mesuré sur ces solutions.



Figure IV.5 : Appareillage de mesure du pH

IV.5.1.4 Teneur en eau (NF P 94-050)

C'est le rapport de la masse de l'eau contenue dans le sol (m_w) sur la masse des grains solides (m_d) qui le constituent exprimé en pourcentage : $W = \frac{m_s}{m_d}$

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'eau contenue dans le sol (m_w).

IV.5.1.5 Poids volumique sec et humide (NF P 94-053)

La masse volumique d'un sol (ρ) est le quotient de la masse (m) du sol par le volume (V) qu'il occupe (y compris les fluides interstitiels : air + eau). Dans ce cas, l'utilisation d'un carottier a été préconisée, qui consistait au respect des étapes de la norme.

La masse volumique d'un sol (ρ_d) est le quotient de la masse des grains solides (m_s) 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 ($\gamma_d = \gamma_h / 1 + \omega$).

IV.5.1.6 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions des grains de différentes tailles d'un matériau. Elle s'effectue :

- par tamisage (tamis à maille carrée) pour des grains de diamètre supérieur à 80 μm ,
- par sédimentométrie pour les grains les plus fins. Elle consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau.

Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est lente. (Loi de Stokes). La mesure de la densité de la suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion de grains de chaque diamètre.

Les analyses granulométriques par tamisage et par sédimentométrie ont été réalisées selon respectivement les normes NF P18-560 et NF P94-057.

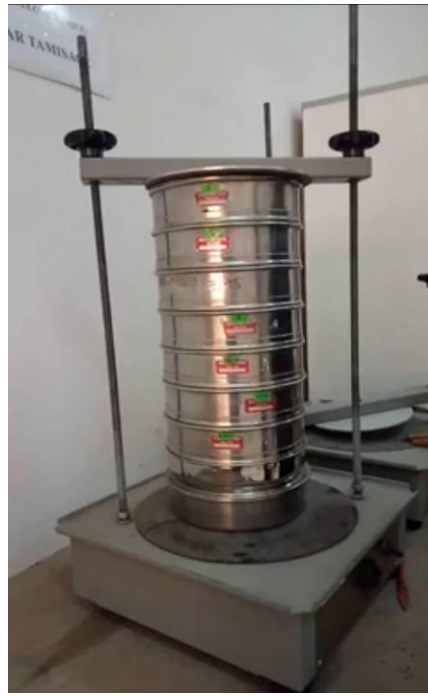


Figure IV.6 : Analyse granulométrique par tamisage

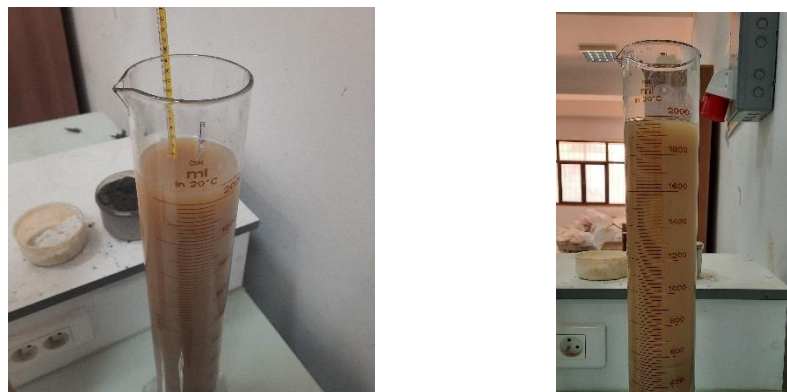


Figure IV.7 : Analyse granulométrique par sédimentométrie

IV.5.1.7 Les 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 (W_l),
- le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limite de plasticité (W_p).

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 $I_p = W_l - W_p$ 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.

La détermination des limites d'Atterberg a été réalisée selon la norme NF P 94-051.



Figure IV.8 : Appareillage d'essai des limites d'Atterberg

IV.5.1.8 L'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 IV.9 : Appareillage de l'essai VBS

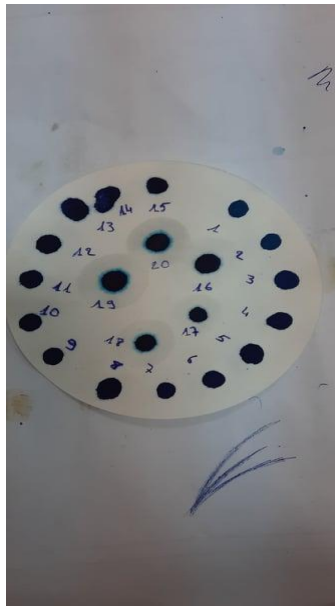


Figure IV.10 : Echantillonnages de l'essai VBS

IV.5.2 Essais de caractérisation

IV.5.2.1 L'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 γ_d varie et passe par un maximum pour une teneur en eau déterminée dite optimale (W_{op}).

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 IV.11 : Machine d'essai Proctor



Figure IV.12 : Eprouvettes des essais Proctor Normal

IV.5.2.2 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 cm² de 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.

$$CBR_1 = \frac{F_1}{13.35} \times 100 \qquad CBR_2 = \frac{F_2}{19.93} \times 100$$

F_1 et F_2 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 IV.14 : Appareil CBR

IV.5.2.3 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 :

$$R_c = \frac{10 F}{S} \quad \text{Où :}$$

R_c : 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 cm^2

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



Figure IV.15 : Appareil de Compression

IV.5.2.4 Mesures aux ultrasons

Le principe de cette méthode consiste à mesurer le temps mis par la propagation d'ondes longitudinales (de compression) à parcourir une distance donnée et par conséquent la vitesse correspondante de propagation de cette onde dans l'éprouvette.



Figure IV.16 : Mesure aux ultrasons sur un échantillon de Proctor

Chapitre V

**Présentation et analyse des
résultats d'essais**

Chapitre V : Présentation et analyse des résultats

V.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 (teneur en eau, poids volumique humide et sec), analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie, l'analyse minéralogique et chimique (S8) et limites d'Atterberg), les essais mécaniques (Proctor normal, la portance immédiate, compression simple, mesures aux ultrasons).

- Une deuxième partie portant sur le sol traité à différents teneurs en chaux, qui regroupe des essais d'identification (valeur de bleu de méthylène, limites d'Atterberg, l'analyse minéralogique et chimique (S8)), les essais mécaniques (portance immédiate, compression simple, mesures aux ultrasons et Proctor normal).

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

Rappel : Ce travail porte sur l'étude des effets du traitement à la chaux 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 teneurs en chaux:

0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%.

V.2 Sol non traité

Cette partie présente en premier lieu les résultats des essais d'identification (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, mesures aux ultrasons).

V.2.1: Essais d'identification

V.2.1.1 : Analyse Minéralogique DRX

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

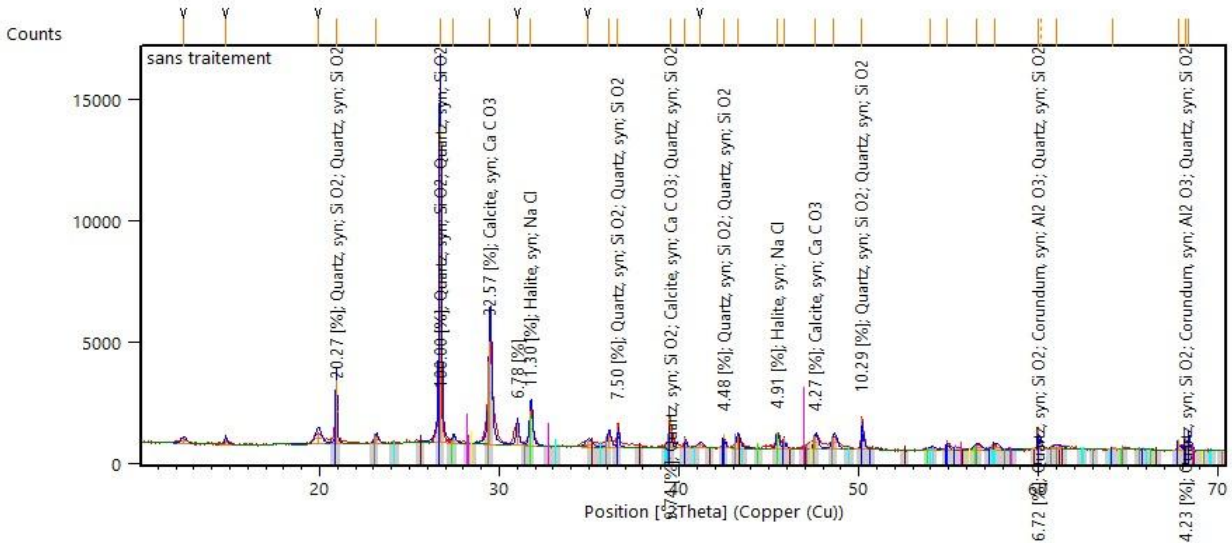


Figure V.1 : Résultats de l'analyse DRX

V.2.1.2 Analyse chimique S8

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

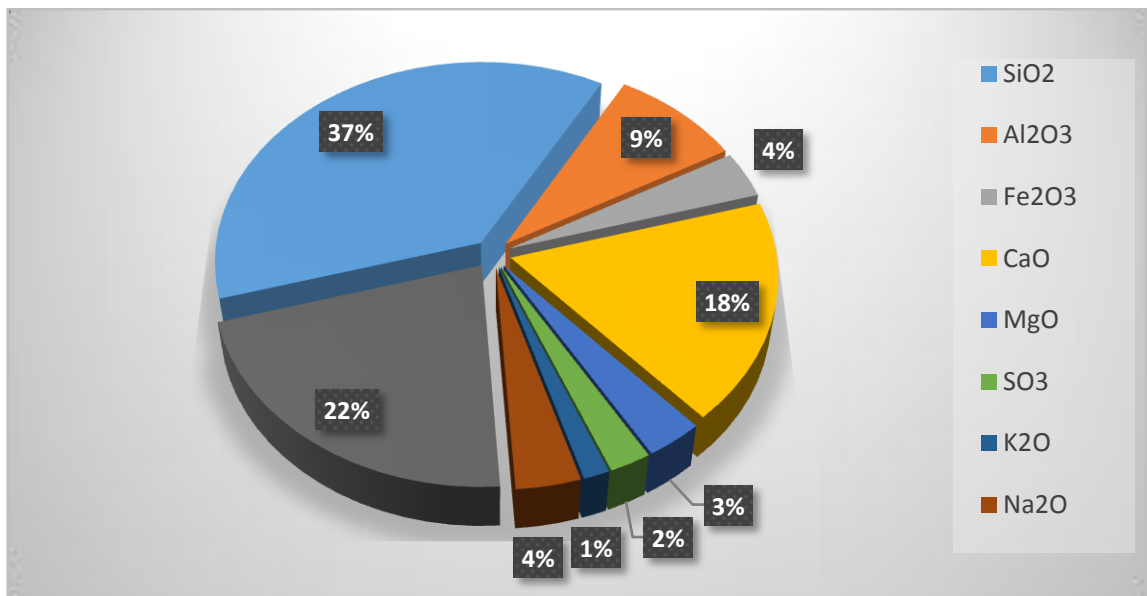


Figure V.2 : Résultats de l'analyse chimique

V.2.1.2 : Paramètres d'état

Tableau V.2 Résultats des essais des 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 W _{nat} (%)	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		

V.2.1.3 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 V.3 Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sans broyage).

Tamis (mm)	Tamisats (%)			
	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moyenne
5	100	100	100	100
2,5	100	99,96	100	99,99
1,25	99,91	99,89	99,91	99,90
0,63	99,74	99,66	99,74	99,71
0,315	98,67	98,66	98,67	98,67
0,16	94,25	94,33	94,25	94,28
0,08	87,47	86,99	87,47	87,31
0,075	87,4	85,07	87,4	86,62
0,055	83,24	83,03	83,24	83,17
0,038	79,08	79,08	79,08	79,08
0,025	74,93	75,13	74,93	75,00
0,017	70,77	71,18	70,77	70,91
0,012	66,38	67,02	66,38	66,59
0,008	61,67	54,43	61,67	59,26
0,005	52,44	45,56	52,44	50,15
0,002	3,62	3,62	3,62	3,62

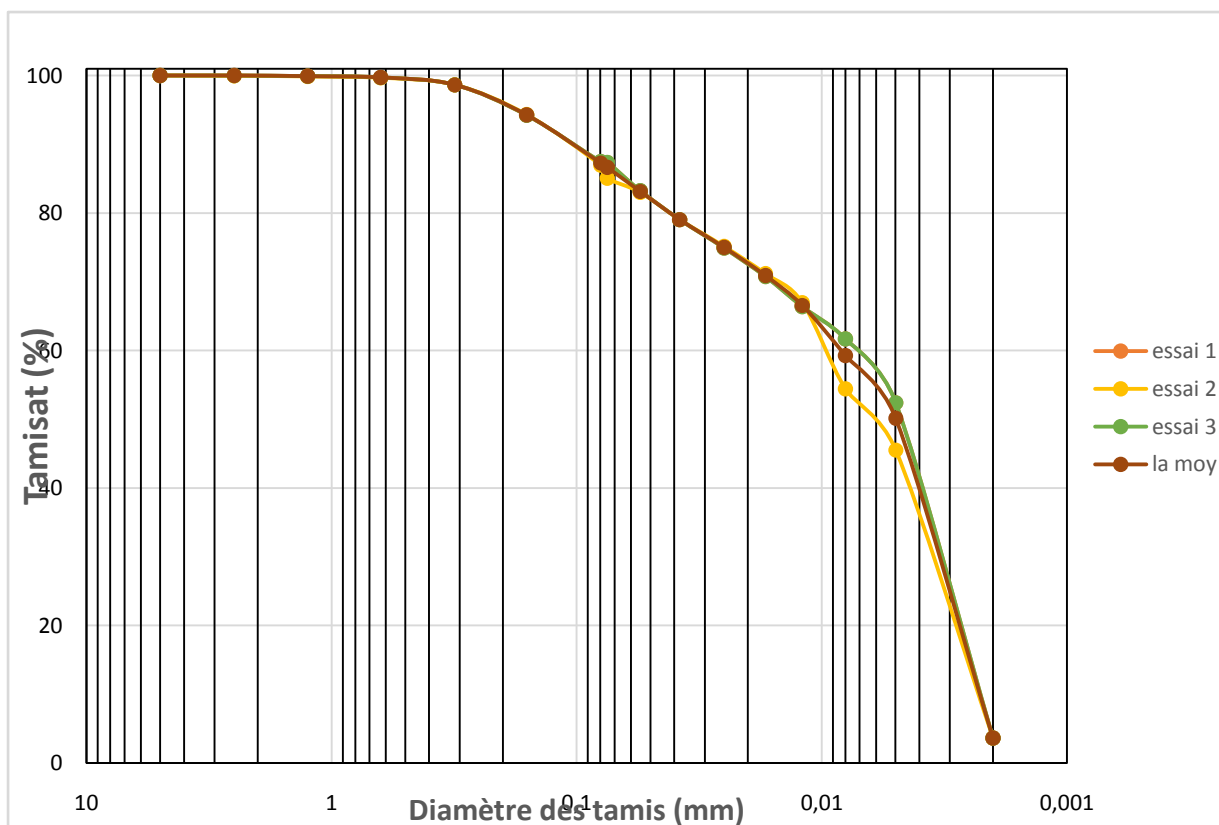


Figure V.3 Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sol non broyé).

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

Tamis (mm)	Tamisats (%)			
	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moyenne
5	100	100	100	100
2,5	100	100	100	100
1,25	99,94	99,99	99,94	99,96
0,63	99,69	99,65	99,69	99,67
0,315	98,09	97,95	98,04	98,03
0,16	90,94	91,88	90,93	91,25
0,08	81,97	83,18	81,97	82,37
0,075	81,96	83,18	81,96	82,37
0,055	78,24	83,18	78,24	79,89
0,038	78,2	79,39	78,2	78,60
0,025	74,44	75,55	74,44	75
0,017	70,66	71,62	70,66	70,98
0,012	66,91	63,91	66,91	65,91
0,008	59,39	49,84	59,39	56,21
0,005	47,46	47,85	47,46	47,59
0,002	7,81	7,92	7,81	7,85

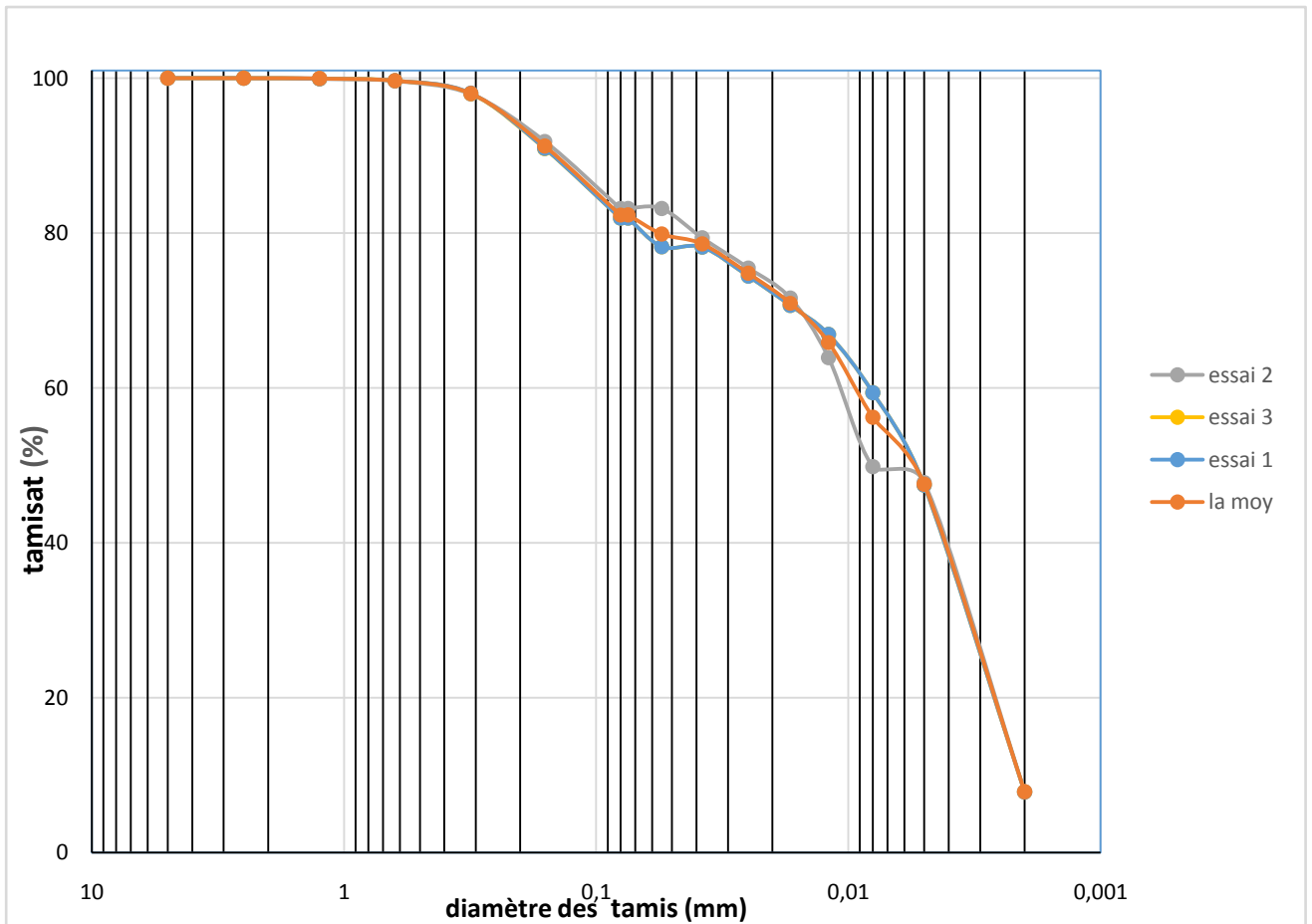


Figure V.4 Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sol broyé)

V.2.1.4 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 chaux sont jointes en annexe.

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

	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moyenne
Limite de liquidité %	51,8	52,39	51,07	51,75
Limite de plasticité %	31,33	31,85	31	31,39
Indice de plasticité	20,47	20,54	20,07	20,36

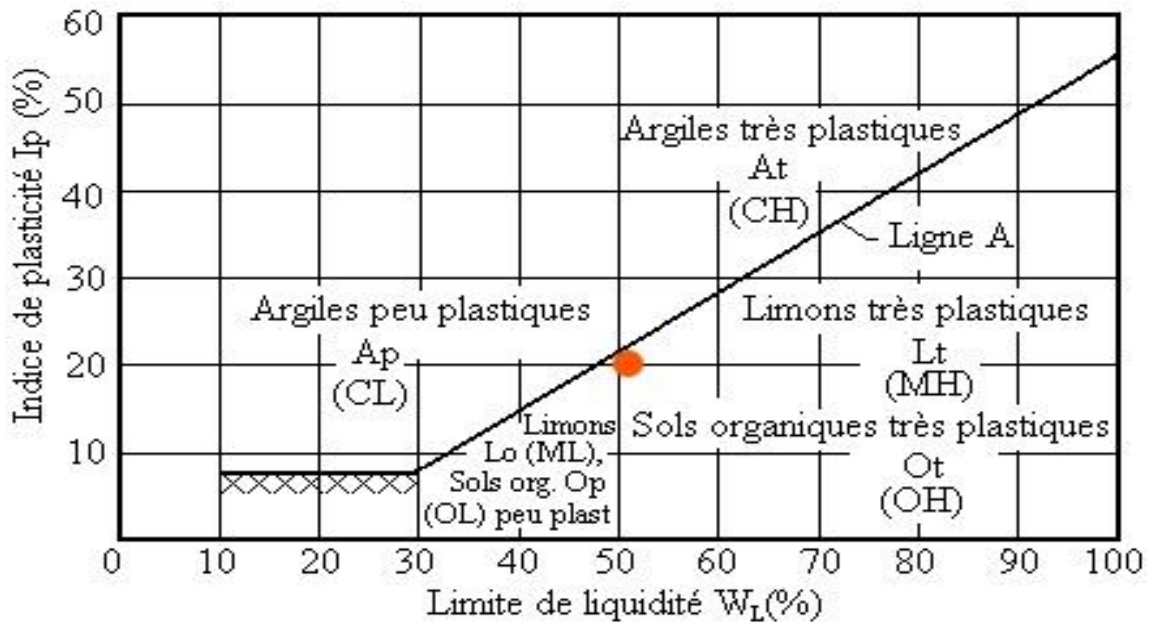


Figure V.5 Classe des sols étudiés selon l’abaque de Casagrande

V.2.1.5 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 V.6 Résultats des essais de VBS

Essai	Volume de la solution (cm ³)	VBS (Cm ³)	Surface spécifique (g/cm ²)
1	200	6,67	140
2	200	6,67	140
3	190	6,33	133
Moyenne	196,67	6,56	137,67

Le tableau V.7 Caractéristiques d’identification des essais effectués sur le sol témoin étudié.

Profondeur (m)	1,5 – 2,5
Teneur en eau naturel $W_{nat}(\%)$	16,17
Poids volumique humide $\gamma_h (g/cm^3)$	2,13
Poids volumique sec $\gamma_d (g/cm^3)$	1,78

Limite de liquidité w_L	51,75
Limite de plasticité w_p	31,39
Indice de plasticité I_p	20,36
Valeur de Bleu de méthylène VBS	6,56
La surface spécifique (m^2/g)	137,67
Passants à 2,5mm (%)	99,99
Passants à 0,08mm (%)	87,31
Passants à 0,025mm (%)	75
Passants à 0,002mm (%)	3,62
Indice de consistance I_c : $I_c = (W_1 - W)/I_p$	2,05

V.2.1.6 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 inférieurs à 25 μm est 75%. Donc il s'agit une argile très fine, la limite de liquidité supérieure à 51,75% et l'indice de plasticité I_p est de 20,36%.

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 (Magan ; 1980), il s'agit d'une argile très 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 **6,56** donc cette argile se classe permis les sols argileux selon la norme française NF P 11 -300.

La surface spécifique est de 137,67 dépasse largement 100 m^2/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 V.8 Densités sèches en fonction des teneurs en eau.

Pourcentage d'eau ajoutée à chaque compactage (%)	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Moyenne	
	W %	ρ_d	W %	ρ_d	W %	ρ_d	W %	ρ_d
16	16,69	1,65	18,09	1,65	16,96	1,67	17,25	1,66
18	19,86	1,67	19,62	1,67	19,76	1,68	19,75	1,67
20	23,89	1,68	21,90	1,69	21,95	1,69	22,58	1,69
22	26,56	1,60	25,76	1,60	25,85	1,60	26,06	1,60
24	29,31	1,56	29,01	1,55	29,03	1,55	29,12	1,55

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

La teneur en eau à l'optimum Proctor normal $W_{opt} = 20,4$ % et la masse volumique sèche à l'optimum Proctor normal $\rho_d = 1,68$ g/cm³.

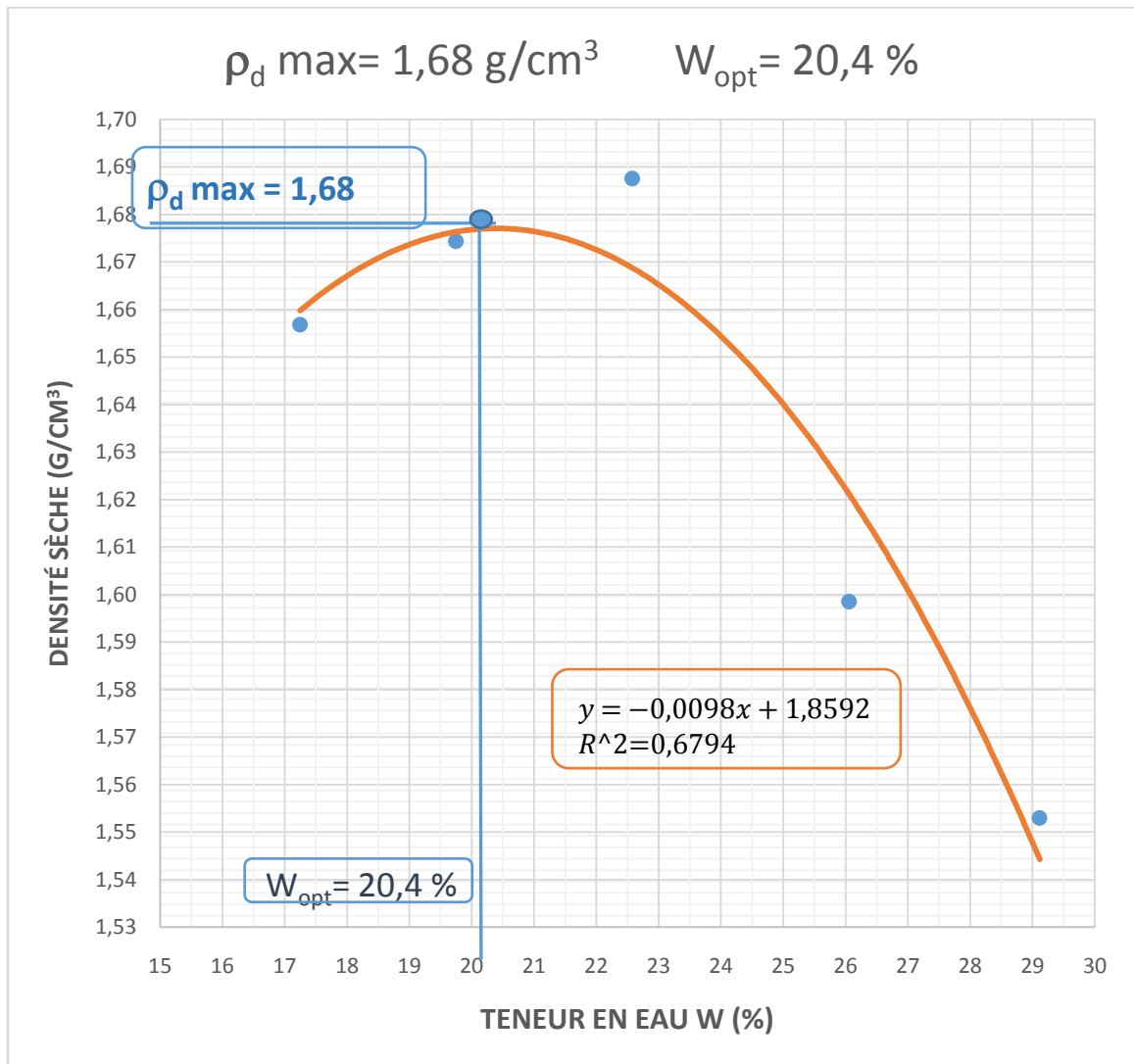


Figure V.6 Masses volumiques sèches en fonction des teneurs en eau

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'une éprouvette témoin confectionnée aux caractéristiques optimums du Proctor modifié.

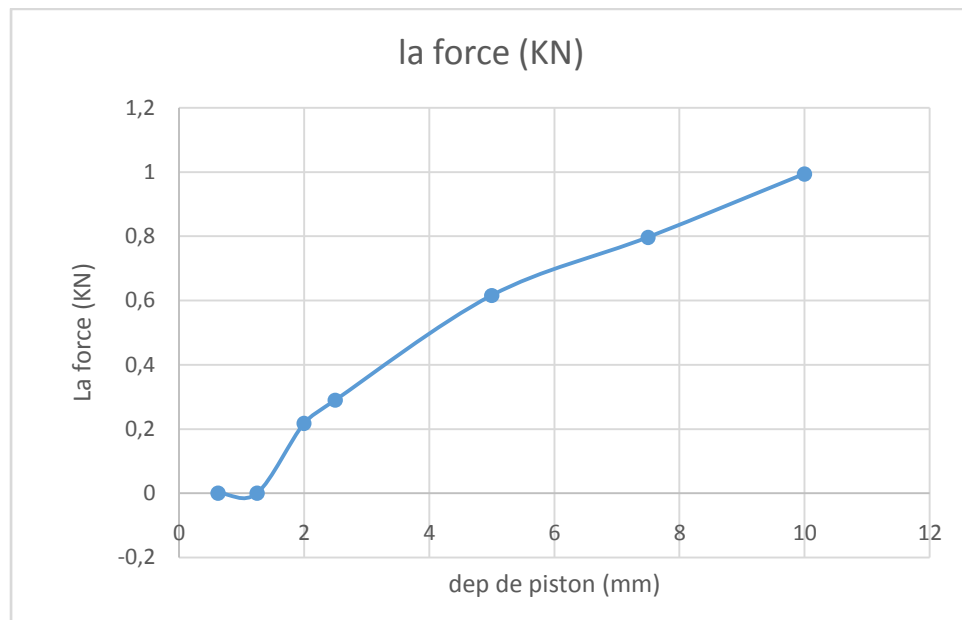
Tableau V.9 Forces de pénétration en fonction des enfoncements

dép. de piston	dép. de force (mm)	La force (KN)
0,625	0	0
1,25	0,00	0,00
2	0,01	0,22
2,5	0,01	0,29
5	0,02	0,61
7,5	0,03	0,80
10	0,04	0,99

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

Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
2,17	3,09	3,09

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

**La figure V.7** Forces de pénétration en fonction des enfoncements

2-2-3 Essai de compression simple. :

Tableau V.11 Résultats de la compression

Essai	La charge (KN)	La résistance (Mpa)
1	16,5	2,1
2	25,2	3,2
3	20,85	2,65
Moyenne	20,85	2,65

2-2-4 Mesure aux ultrasons :

Tableau V.12 Résultats des essais d'ultrasons

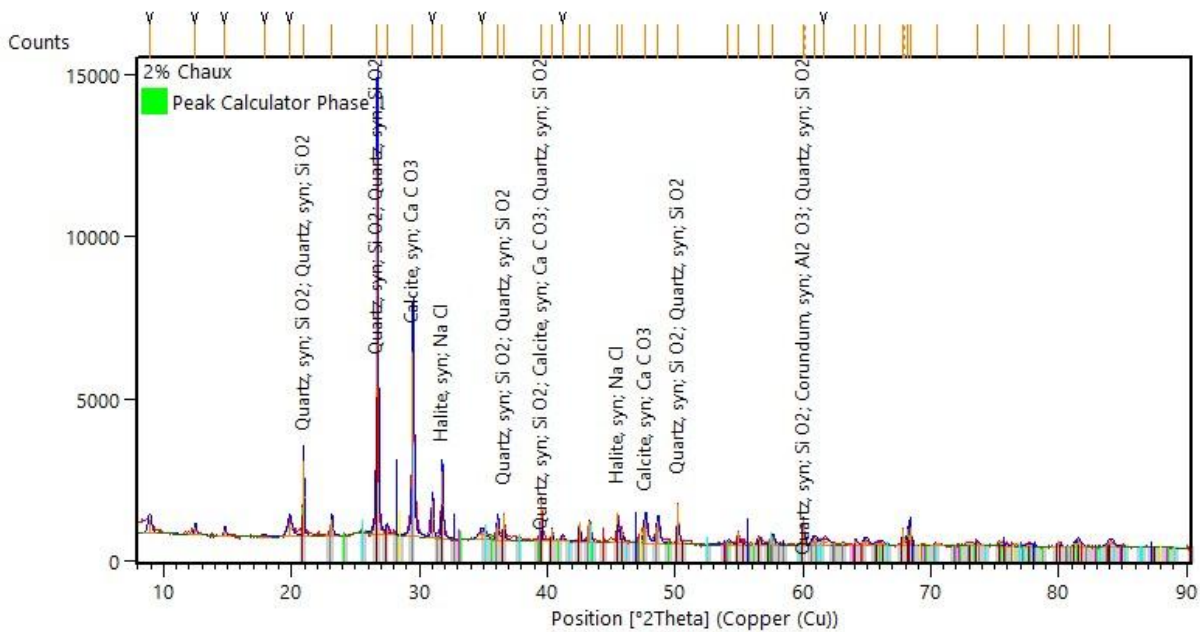
Essai	t (μ)	V (Cm/ μ s)
1	126,00	0,10
2	137,00	0,09
3	139,40	0,09
La moyenne	134,13	0,09

V.3 Sol Traité

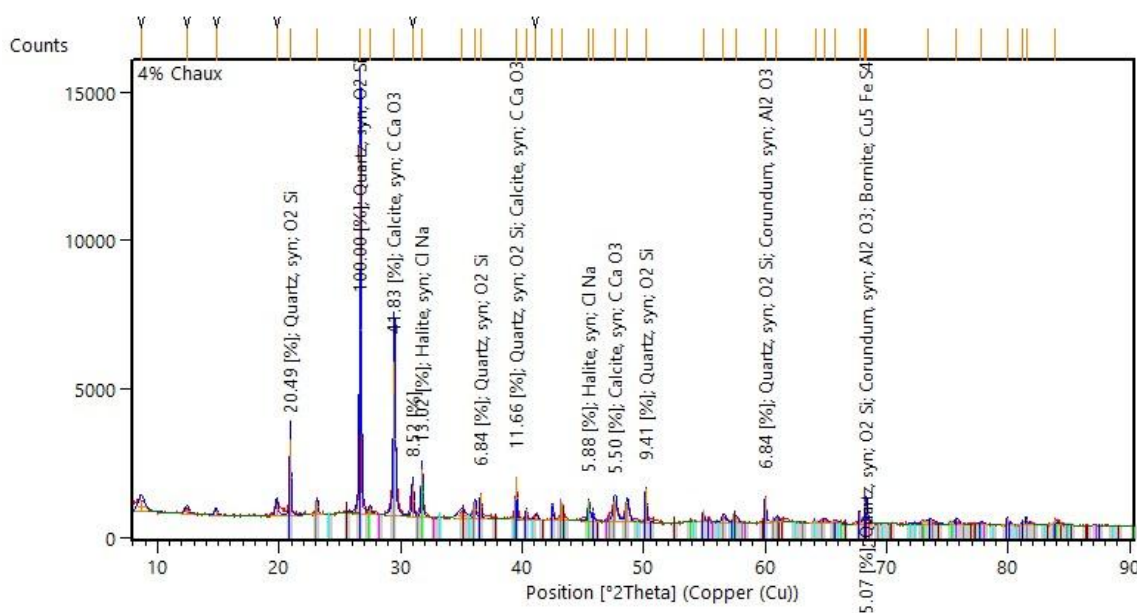
Dans cette partie on a regroupé l'ensemble des résultats qui concernent les essais d'identification (valeur de bleu de méthylène, limites d'Atterberg, l'analyse minéralogique et chimique (S8)), et les essais mécaniques (portance immédiate, compression simple, mesures aux ultrasons, Proctor normal) des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

V.3.1 Essais d'identification :

V.3.1.1 DRX



La figure V.7 présente les résultats des diffractogrammes du sol traité à 2% de chaux



La figure V.8 présente les résultats des diffractogrammes du sol traité à 4% de chaux

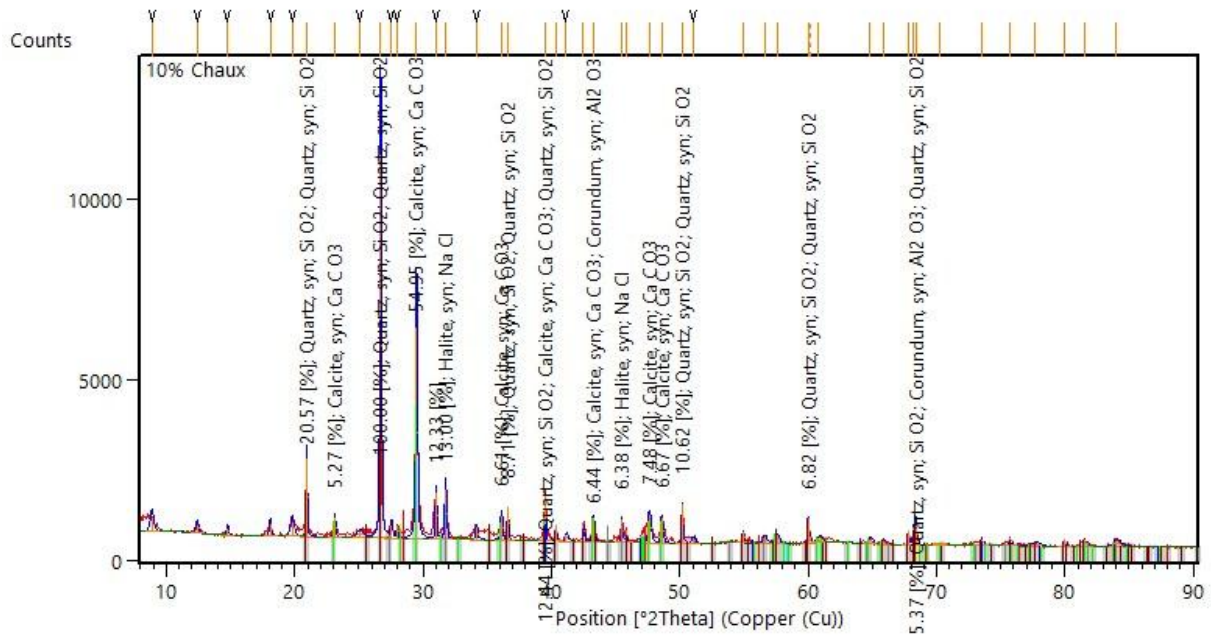


Figure V.11 Résultats des diffractogrammes du sol traité à 10% chaux

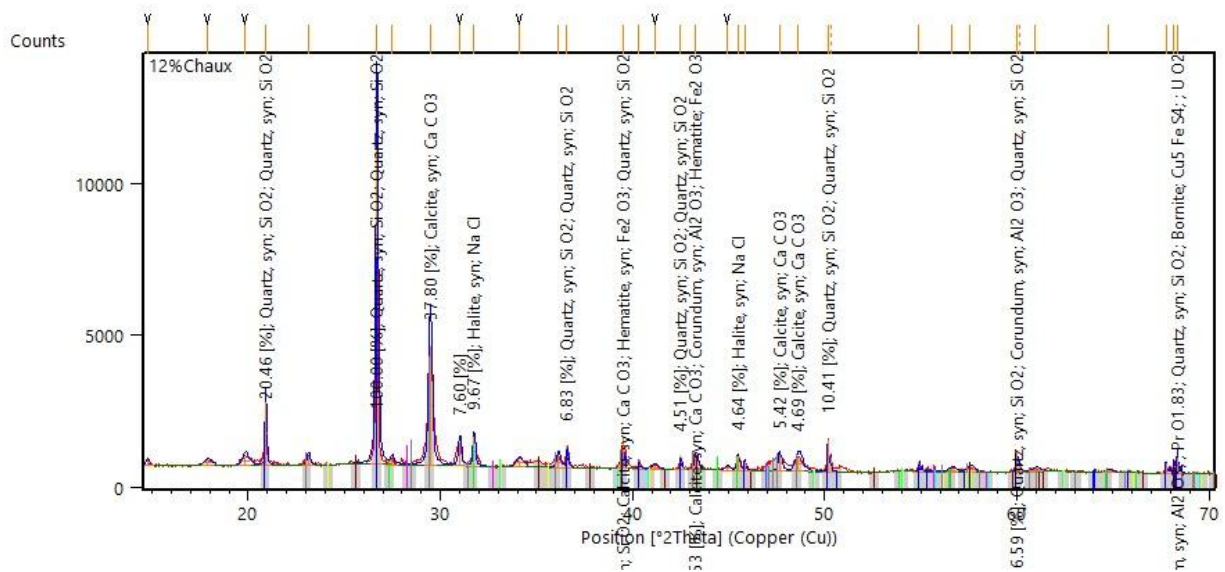


Figure V.12 Résultats des diffractogrammes du sol traité à 12% de chaux

V.3.1.2 Analyse Chimique (S8)

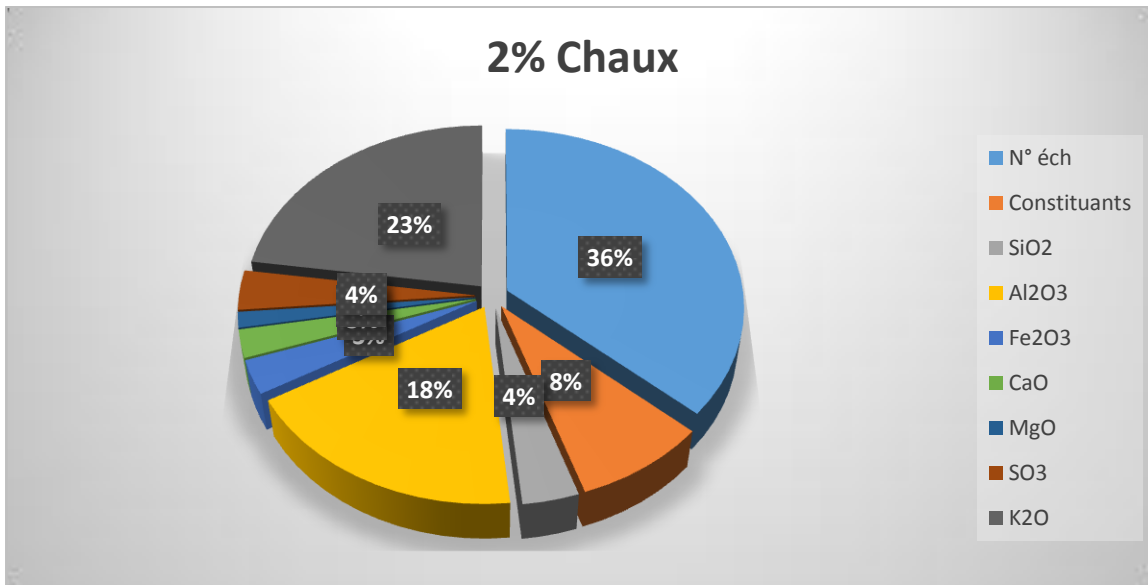


Figure V.13 Résultats d'analyse chimique pour le dosage de 2% de chaux

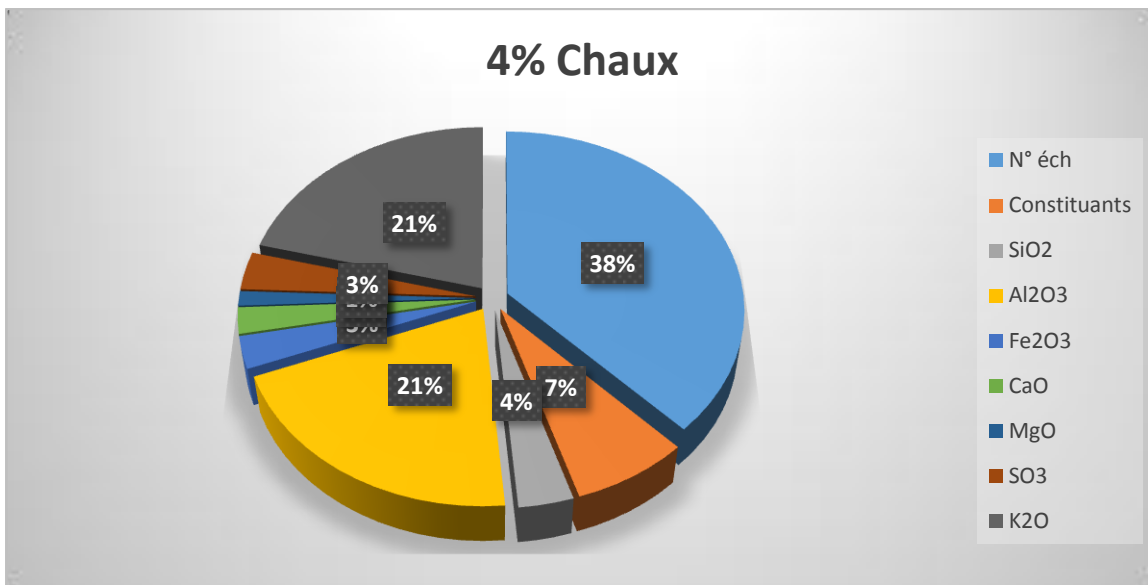


Figure V.14 Résultats d'analyse chimique pour le dosage de 4% de chaux

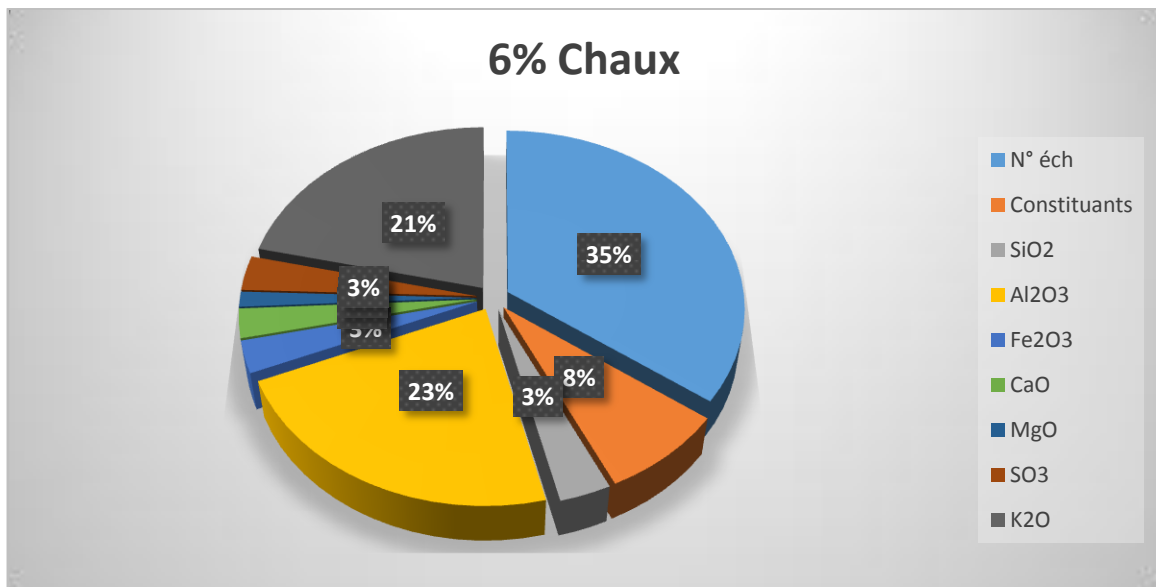


Figure V.15 Résultats d'analyse chimique pour le dosage de 6% chaux

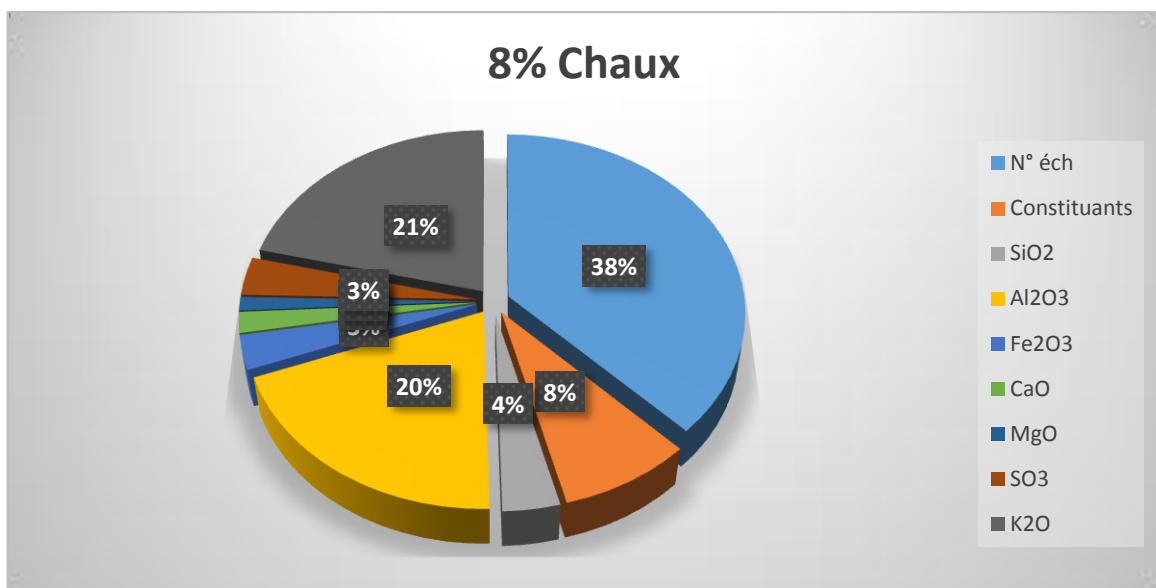


Figure V.16 Résultats d'analyse chimique pour le dosage de 8% de chaux

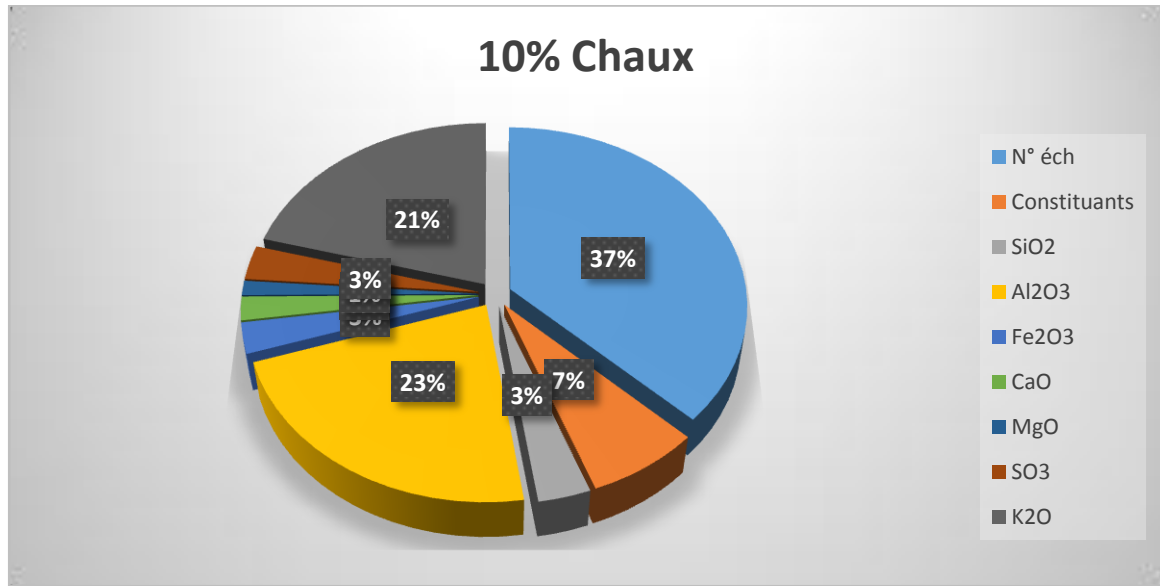


Figure V.17 Résultats d'analyse chimique pour le dosage de 10% chaux

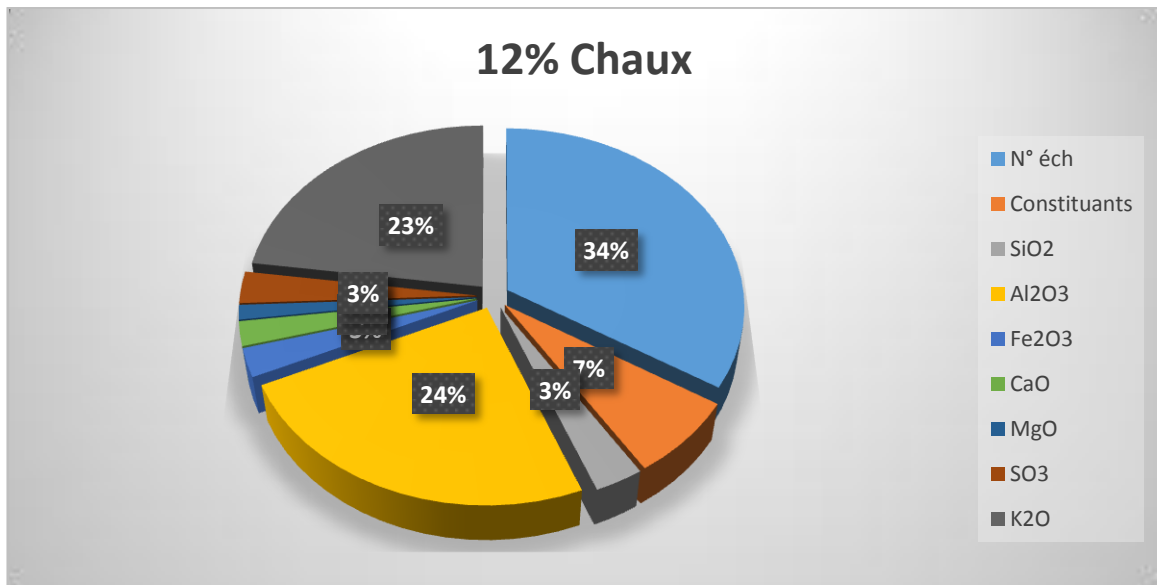


Figure V.18 Résultats d'analyse chimique pour le dosage de 12% chaux

V.3.1.3 Limite D'Atterberg

Tableau V.13 Résultats moyens des limites de consistance à différents dosages

Dosage de liant	WL	WP	IP
0%	51.74	31.39	20.35
2%	51.5	32.7	18.79
4%	49.68	32.73	16.94
6%	50.15	32.34	17.76
8%	48.2	33.32	14.87
10%	46.71	34.24	12.46
12%	45.96	34.53	11.45

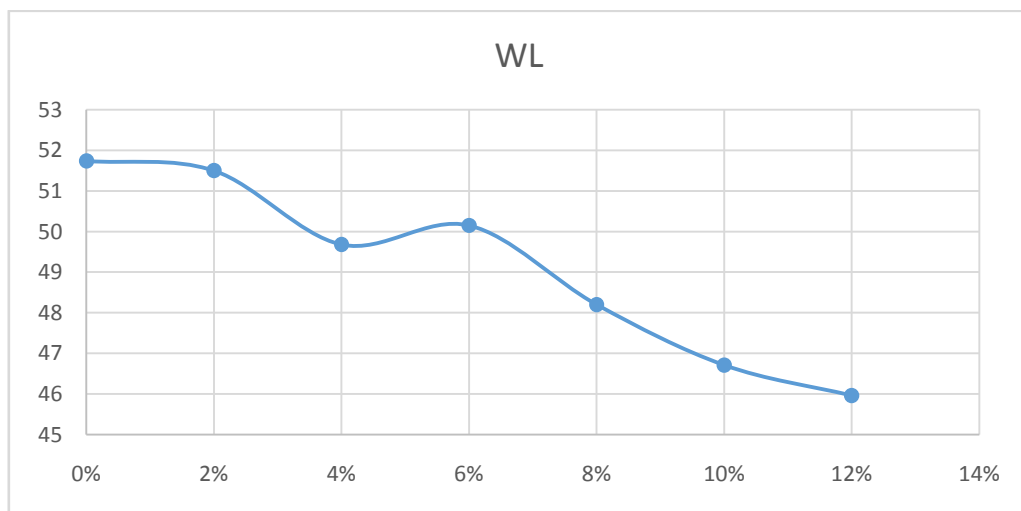


Figure V.19 Courbe de limite de liquidité

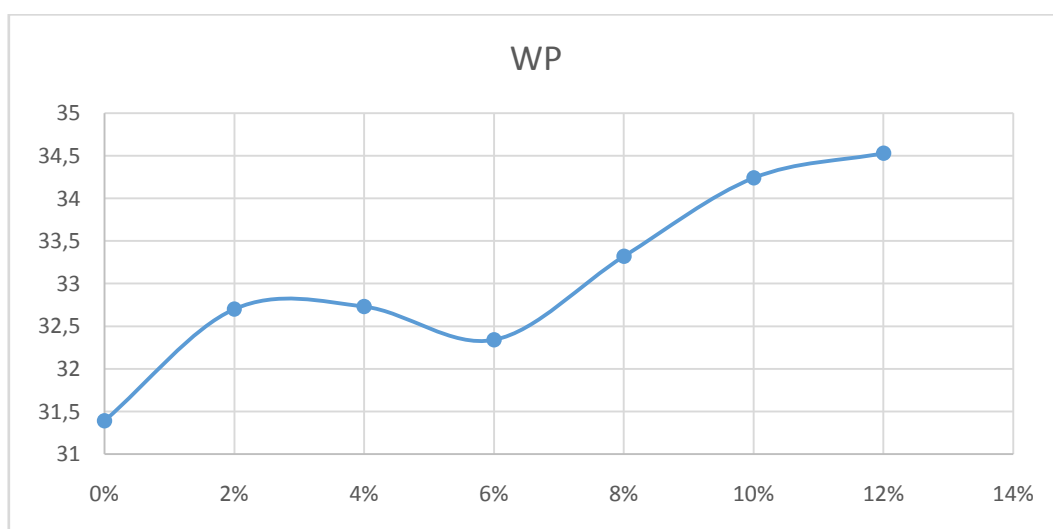


Figure V.20 Courbe de limite de plasticité

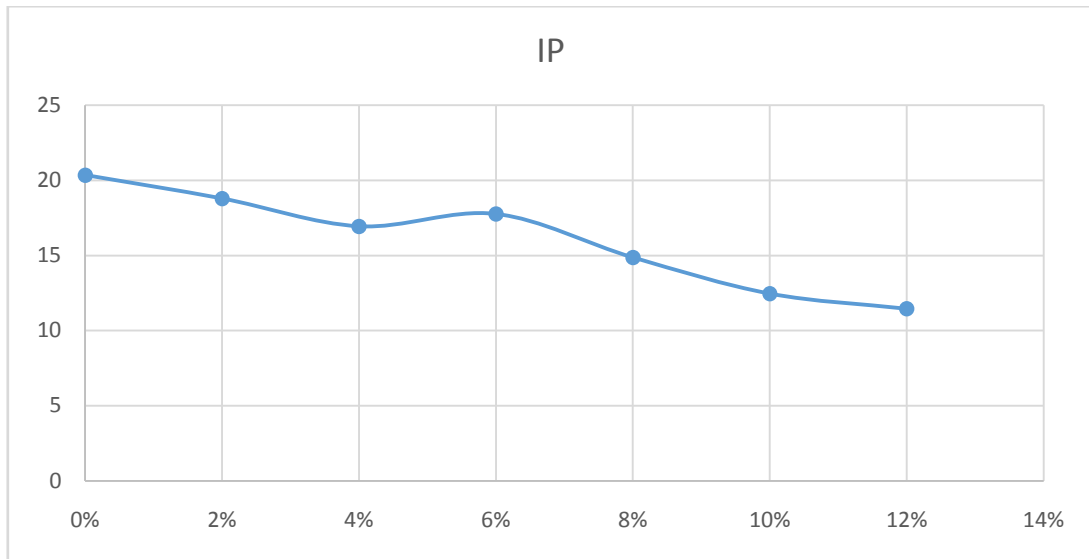


Figure V.21 Courbe de l'indice de plasticité

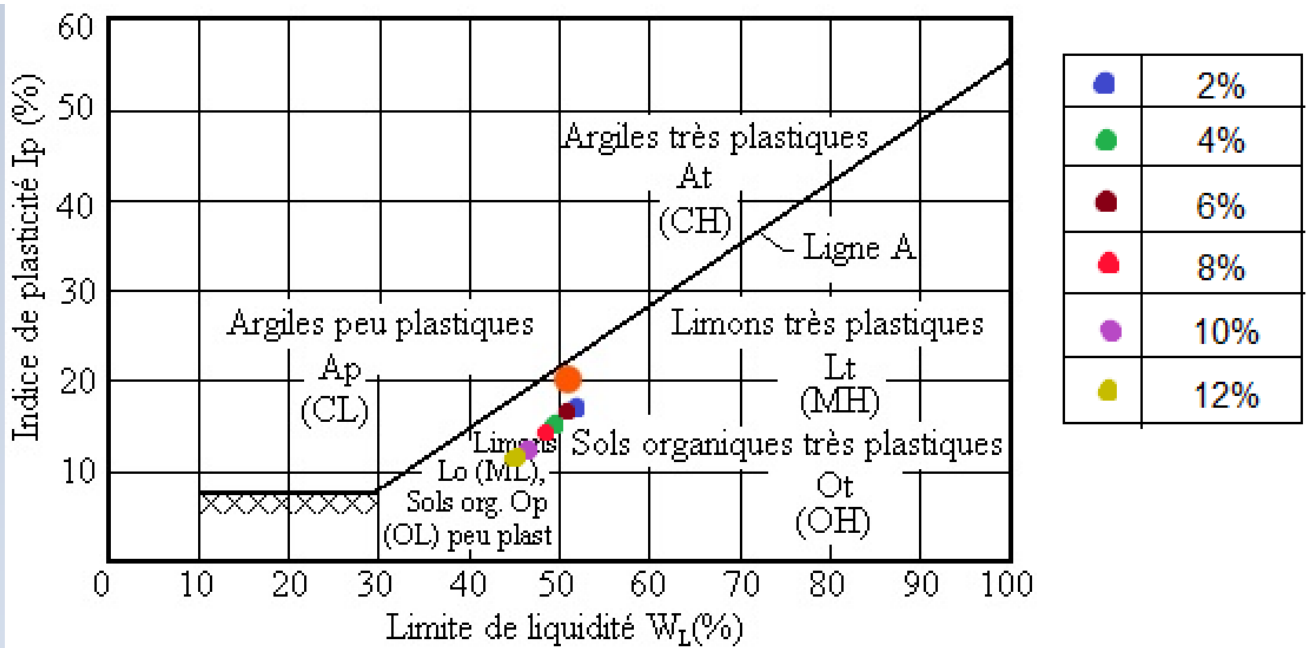
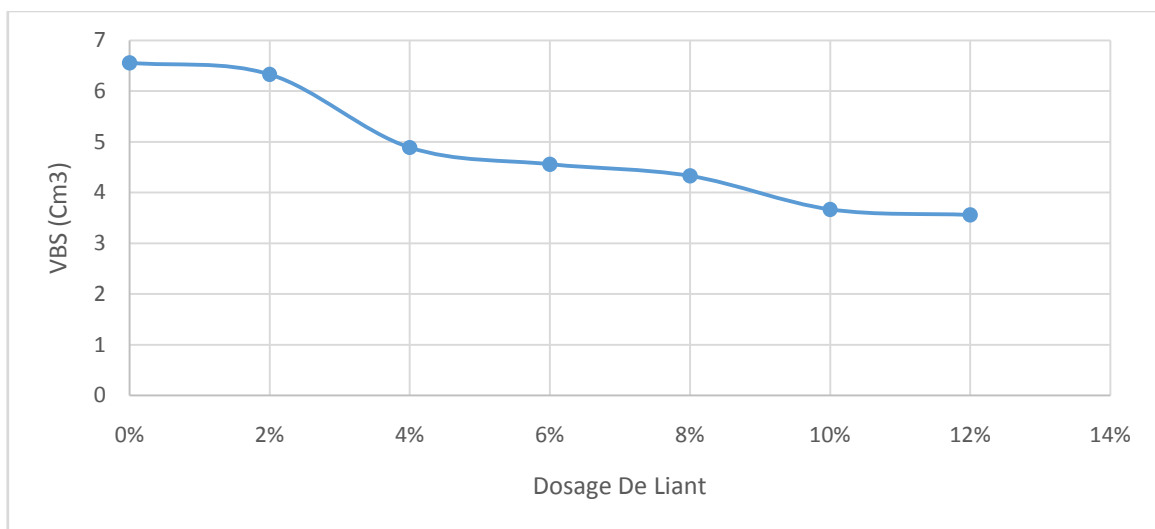


Figure V.22 Classification selon l'abaque de Casagrande

V.3.1.4 Essai au bleu de méthylène

Tableau V.14 : Valeur de bleu de méthylène par l'essai à la tâche

Dosage en chaux (%)	VBS (Cm3)	La surface spécifique (g/cm2)
0	6,56	137,67
2	6.33	133.00
4	4.89	102.67
6	4.56	95.67
8	4.33	91.00
10	3.67	77.00
12	3.56	74.67



La figure V.23 Valeurs du Bleu de méthylène à différents dosages en chaux

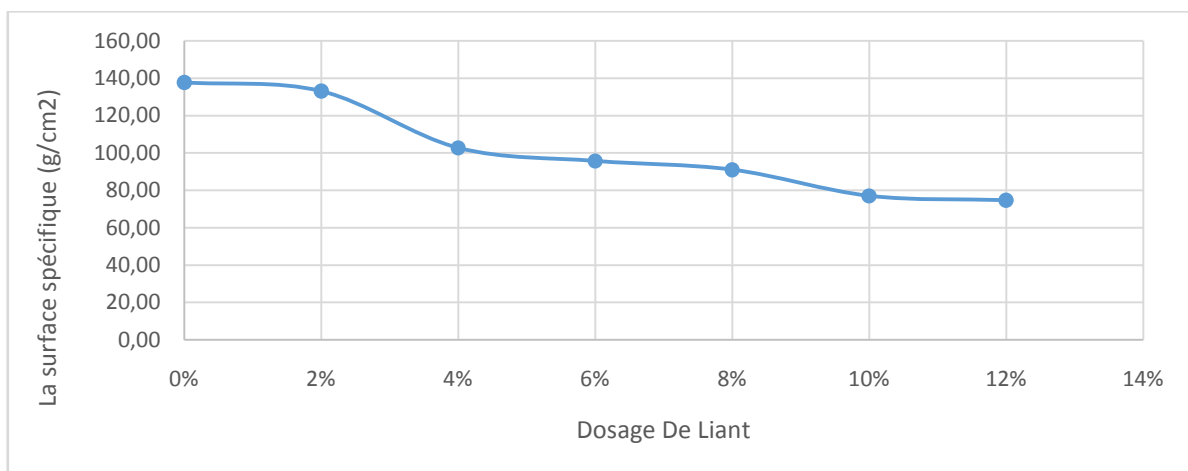


Figure V.24 Surface spécifique à différents dosages en chaux

V.3.2 Essai mécanique

V.3.2.1 Proctor normal

Tableau V.15 : Résultats des essais Proctor normal à différentes teneur en chaux

Dosage en	Masse volumique du sol sec (gr/cm ³)	Teneur en eau %
0	1,69	22,58
2	1,53	21,82
4	1,56	20,26
6	1,57	19,76
8	1,58	19,06
10	1,60	15,96
12	1,60	15,40

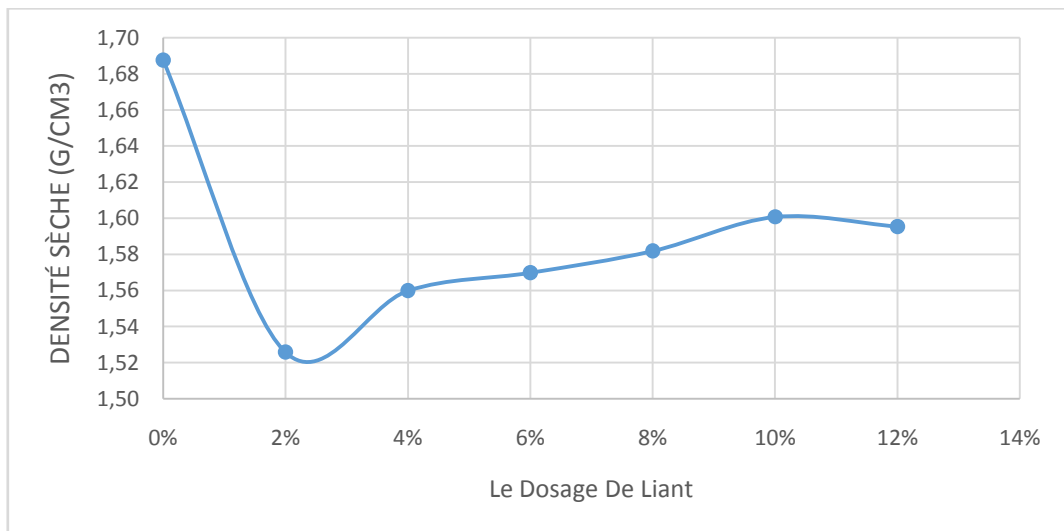


Figure V.25 Densité sèche à différentes teneur en chaux

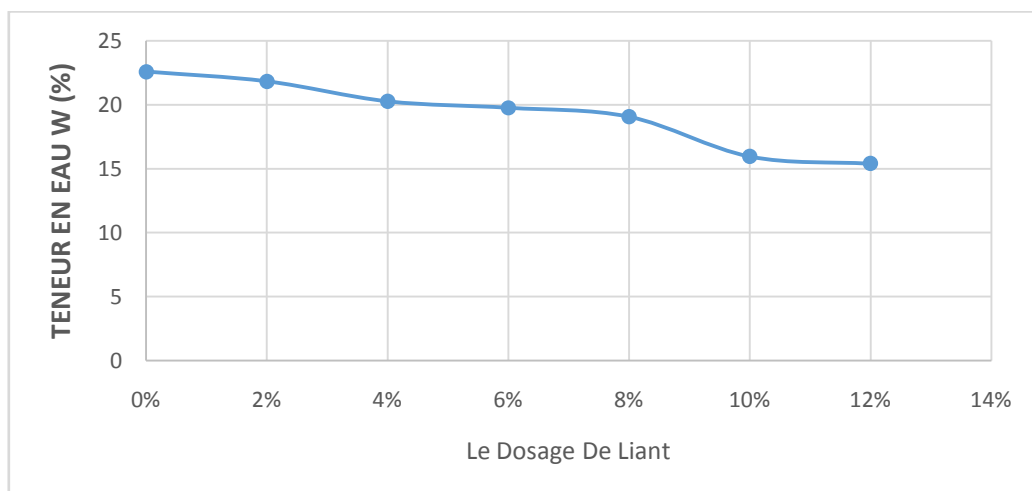


Figure V.26 Teneur en eau à différentes teneur en chaux

V.3.2.2 CBR immédiat

Tableau V.16 Forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en chaux

Enfoncement	Force (KN) à 0%	Force (KN) à 2%	Force (KN) à 4%	Force (KN) à 6%	Force (KN) à 8%	Force (KN) à 10%	Force (KN) à 12%
0,625	0.0000	0.1086	0.1449	0.0724	0.2173	0.2173	0.2173
1,25	0.0000	0.2898	0.2173	0.2173	0.4347	0.4347	0.5072
2	0.2173	0.5796	0.4347	0.4345	0.6521	0.6521	0.8695
2,5	0.2898	0.7970	0.5796	0.5072	0.9420	0.8695	1.0869
5	0.6159	1.3043	0.8695	0.8695	1.5942	1.6666	2.3188
7,5	0.7971	1.7391	1.0869	1.3043	2.2464	2.2826	2.8985
10	0.9944	2.2464	1.3768	1.5942	2.6811	2.7535	3.4057

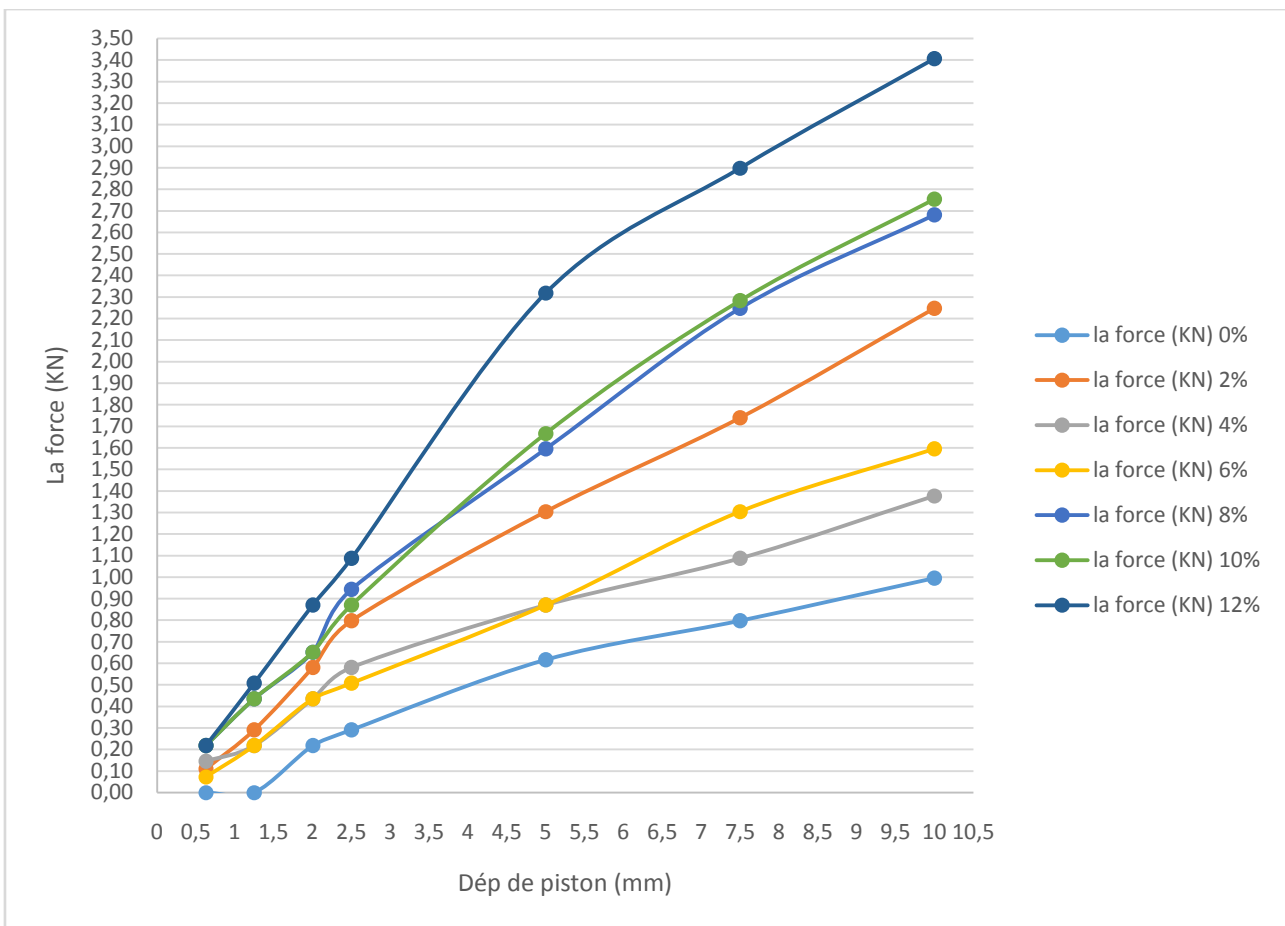


Figure V.27 : Forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en chaux

Tableau V.17 Forces en fonction des dosages en chaux pour chaque enfoncement

Dosage en chaux en %	0,625 (mm)	1,25 (mm)	2 (mm)	2,5 (mm)	5 (mm)	7,5 (mm)	10 (mm)
0	0.0000	0.0000	0.2173	0.2898	0.6159	0.7971	0.9944
2	0.1086	0.2898	0.5796	0.7970	1.3043	1.7391	2.2464
4	0.1449	0.2173	0.4347	0.5796	0.8695	1.0869	1.3768
6	0.0724	0.2173	0.4345	0.5072	0.8695	1.3043	1.5942
8	0.2173	0.4347	0.6521	0.9420	1.5942	2.2464	2.6811
10	0.2173	0.4347	0.6521	0.8695	1.6666	2.2826	2.7535
12	0.2173	0.5072	0.8695	1.0869	2.3188	2.8985	3.4057

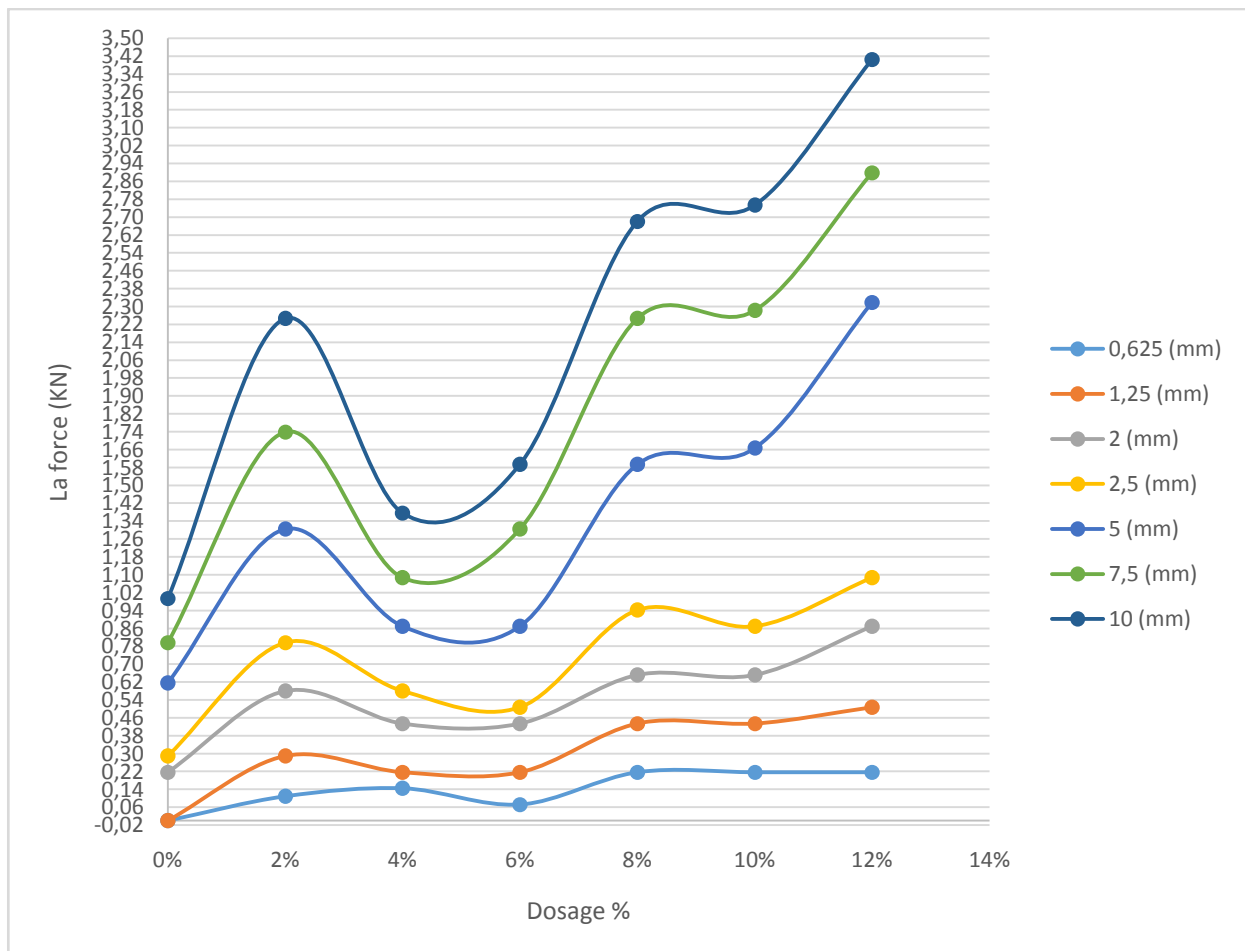
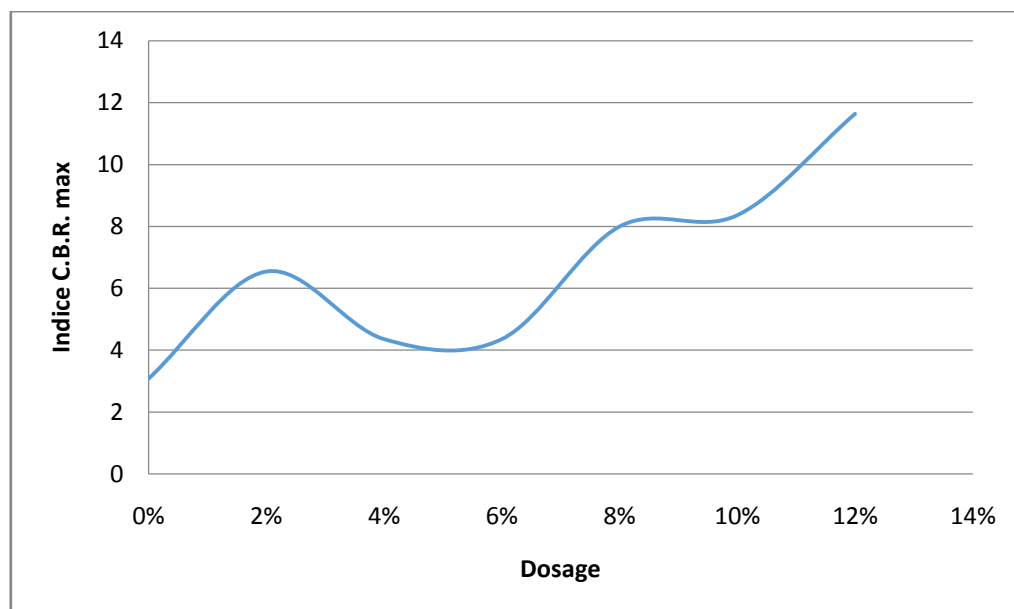


Figure V.28 Courbe des forces en fonction du dosage en chaux pour chaque enfoncement

Tableau V.18 Résultats des indices C.B.R immédiats pour différents dosages en chaux

Dosage en chaux en %	Indice C.B.R. immédiat à 2,5mm	Indice C.B.R. immédiat à 5mm	Indice C.B.R. max
0	2.169	3.09	3.09
2	5.965	6.544	6.544
4	4.338	4.362	4.362
6	3.796	4.362	4.362
8	7.05	7.998	7.998
10	6.508	8.362	8.362
12	8.135	11.634	11.634

**Figure V.29** Courbe des indices C.B.R immédiats pour différents dosages en chaux

V.3.2.3 Compression simple

Tableau V.19 Résultats de la résistance aux compressions pour différents dosages en chaux

Dosage en chaux en %	La charge (KN)	La résistance (Mpa)
0	20.85	2.65
2	26.57	3.38
4	38.83	4.94
6	60.23	7.67
8	75.37	9.60
10	100.70	12.82
12	83.47	10.63

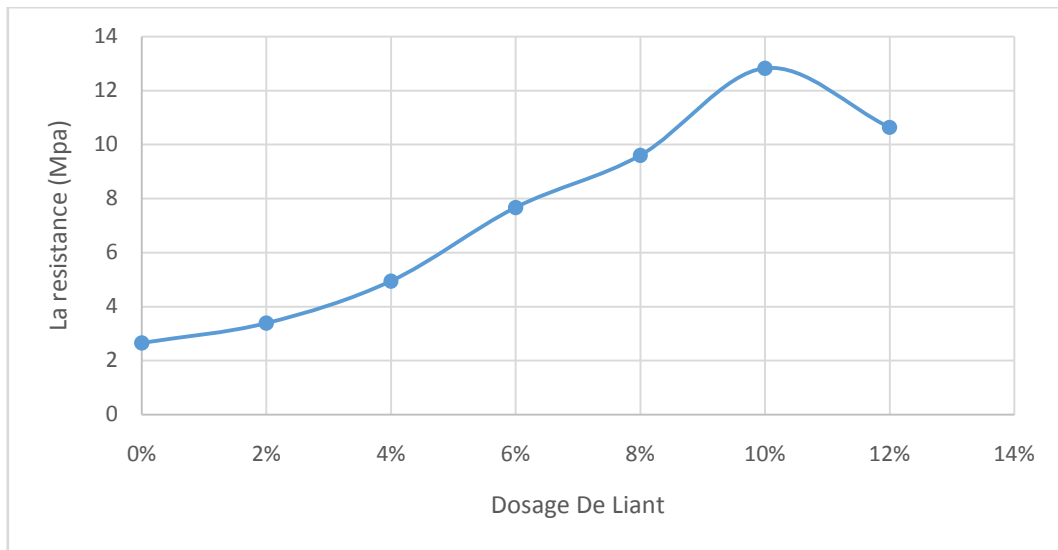


Figure V.30 Courbe de la résistance à la compression pour différents dosages en chaux

V.3.2.4 Mesures aux ultrasons

Tableau V.20 Temps et vitesse de propagation des ondes ultrasoniques

Dosage en chaux en %	t (μ)	V (Cm/ μ s)
0	134.13	0.09
2	108.20	0.11
4	101.20	0.12
6	84.17	0.14
8	80.73	0.15
10	65.67	0.18
12	67.40	0.18

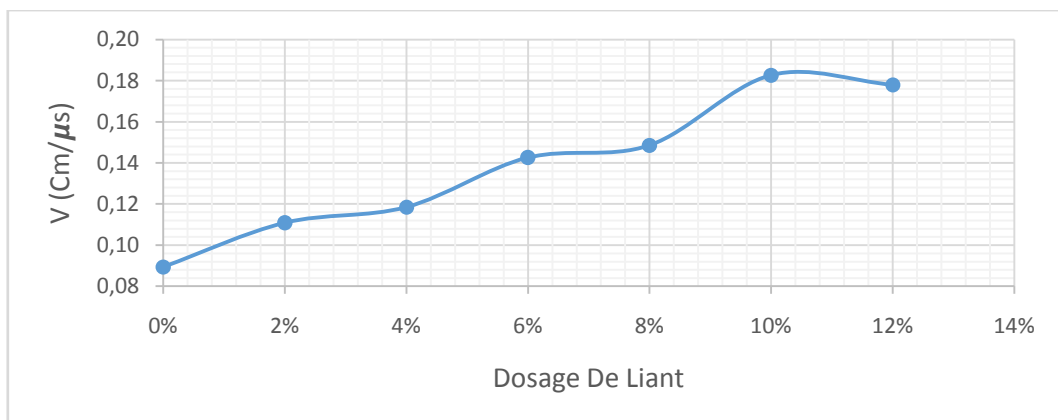


Figure V.31 Courbe de vitesse de propagation en fonction du dosage en chaux

CHAPITRE VI

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 wilaya de Msila, la zone est considérée comme une zone semi-aride, cette dernière est considérée comme la capitale du Chott El Hodna (Sabkha), ce qui nous permet d'expliquer conclure sur le sol salé ce qui suit :

- ❖ La salinisation des sols affecte 3,2 millions d'hectares de la surface globale de l'Algérie dont une bonne partie se trouve localisée dans les régions steppiques.
- ❖ L'emploi des sols salés dans leur état naturel comme matériaux de remblais ou de couches de forme routières, n'est pas envisagé. Ces derniers peuvent être rendus utilisables à leur état naturel par un traitement spécifique aux liants hydrauliques (la chaux, le ciment, ...etc.) ou aux liants spéciaux routiers.
- ❖ Les différentes études qui traitent l'effet des sels sur certaines caractéristiques géotechniques des sols salés comme la teneur en eau, les limites d'Atterberg, les caractéristiques de compactage, les paramètres de compressibilité, ces derniers démontrent les difficultés liées à la détermination des caractéristiques géotechniques des sols salés.

On a constaté après cette étude expérimentale qui consistait au traitement du sol de chott El-Hodna avec de la chaux, les résultats suivants :

- ❖ Les analyses granulométriques des échantillons de sol donnent un pourcentage des passants à 2,5 mm de 100 % et un pourcentage des passants à 80 μm de 56,21 %. Ces valeurs indiquent que le sol présente une granulométrie fine.
- ❖ La limite de liquidité (W_L) vaut 51,75 %, la limite de plasticité (W_p) est de 31,39 %, l'indice de plasticité (I_p) vaut 20,36% et l'indice de consistance $I_c = 2.05$
- ❖ D'après l'abaque de Casagrande c'est une argile peu plastique.
- ❖ La valeur du bleu de méthylène (VBS) étant de 6.56. D'après la norme NF P 94 -068, il s'agit d'un sol fin argileux peu plastique. La valeur de la surface spécifique SST) est de 137.67 m²/g, celle-ci dépasse les 100 m²/g, ce qui fait que l'argile étudiée se compose essentiellement de vermiculite.
- ❖ D'après l'essai de compactage Proctor normal réalisé, la teneur en eau moyenne optimale vaut 20,4 % et la densité sèche optimum est de 1,68 g/cm³.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- 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 (1994) Norme Française : **NF P 94-071-1**Sols : Reconnaissance et Essais – Essai de cisaillement rectiligne à la boîte – partie 1 cisaillement direct.
- AFNOR (1996) Norme Française : **NF P 94-041** : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique, méthode de tamisage par voie humide
- 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.
- Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar, représentée par le Ministère des Ressources Hydriques.
- Construction et Travaux public - Les matériaux de construction Actualisation permanente sur www.techniques-ingenieur.fr.
- **Aubert ; 1976** : les sols salsodiques en Afrique du Nord. Ann. INA, Alger. Vol. Iv. PP: 182 193.
- **Bellague et al, 2011** : Séminaire Eau et Environnement dynamique spatio-temporelle de la salinité des sols du Bas Chélif : Cas de la station INRAA Hmadna (Relizane).
- **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.
- **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.

- **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 – 284 UNESCO
- **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
- **Clément Louis Treussart,** Mémoire sur les mortiers hydrauliques et sur les mortiers ordinaires, Carillan-Goeury, 1829
- **Khattab SAA. 2002.** Etude multi – échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux. Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans (France).
- **Mahalinger-Iyer U, Williams DJ. 1997.** Properties and performance of lateritic soil in road pavements. Eng Geol.
- **Akoto BKA, Singh G. 1981** Some geotechnical properties of a lime-stabilized laterite containing a high proportion of aluminum oxide. Eng Geol.
- **Bell FG.** Lime stabilization of clay minerals and soils. Eng Geol. 1996.
- **Walker PJ. Strength,** Durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. Cem Concr Comp. 1995.
- **Attoh-Okine B.** Stabilization effect of locally produced lime on selected lateritic soils. Construc Build Mater 1990.
- **Osula DOA.** A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. Eng Geol 1996.
- **Moh ZC.** Reactions of soil minerals with cement and chemicals. In Highway Research Record 86, HRB, National Research Council, Washington, D.C., 1965
- **Diamond S, Kinter E B.** Mechanism of soil-lime stabilization. Highway Research Record, N°92, 1965.
- **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.
- **Itsvan C (1990).** Comportement des sables argileux ; influence du traitement à la chaux. Thèse de doctorat CGI, ENSMP, INSA Rennes.
- **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.
- **JURY (W.A.), JARRELL (W.M.), DEVITT (D.). -1979-** Reclamation of saline-sodic soil by leaching. – soil sci. soc. Am. J. vol43.

- **LEFFELAAR (P.A.), PALSHARMA (R.). -1977-** Leaching of a highly saline-sodic soil. – Jour of hydrology, 32.
- **RIEU (M.), CHEVERRY (C.) 1976,** Mise au point bibliographique sur quelques recherches récentes en matière de sols salés – Cah, Orstom, sér, Pédol, vol XIV. N°1
- **ABROL. (I. P.), BHUMBLA (D. R.), 1978.** -Some comments on Terminology relating to salt affected soils. Dryland saline -- seep Control 6-19-27.
- **CONNOR (G. O.), 1979.** - Minimizing the salt burden of irrigation drainage water in the Pecos Valley of New Mexico. NMSU, USA.
- **Demnati F. (2013)** Biodiversité et enjeux socio-économiques des lacs salés (Cotts et Sebkhass) d'Algérie : cas du Chott Merouane et Melghir. Thèse de doctorat en sciences agronomiques. Université Mohamed Khider, Biskra.
- **HADJAB -M -1998-** Aménagement et Protection des Milieux Naturels dans la Cuvette du Hodna (ALGERIE) - Thèse : Doctorat - Université d'Aix Marseille 1 - 242 p.
- **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.
- **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
- **SEBHI. S .1987** -Mutations du Monde Rural Algérien - Le Hodna - off Publ. Univ, Alger,252p.
- **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.
- **HUGUES. R .H et HUGUES. J. J : 1992** -Répertoires des Zones Humides d'Afrique (Chott El Hodna) - UICN- PNUE - CMSC - 21-22 P.
- **Bell F.G.** Lime stabilization of clay soils. Eng. Geol. Env., Springer 1989 ;39(1) :67-74.

Annexes

Tableau A.1

Analyse S8											
Dosage De Liant	N° éch	Constituants	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	K2O	Na2O	Pertes au feu
Sans traitement	1	%	37,555	8,69	3,735	17,81	3,195	2,325	1,465	3,615	21,61
2% Chaux	8	%	36.42	8.42	3.54	18.31	3.06	2.53	1.42	3.58	22.72
4% Chaux	9	%	37.78	7.38	3.45	20.43	2.91	2.37	1.32	3.41	20.95
6% Chaux	10	%	35	7.99	3.24	22.4	2.91	2.65	1.37	3.11	21.33
8% Chaux	11	%	37.63	8.37	3.59	19.61	3.09	1.88	1.24	3.46	21.13
10% Chaux	12	%	37.17	7.16	3.3	22.33	2.78	2.13	1.31	3.07	20.75
12% Chaux	13	%	33.83	7.11	3.06	24.19	2.59	2.21	1.33	2.86	22.82

Tableau A.2

DRX											
	N° éch	R_wp	Calcite	Dolomite	Quartz	Pyrite	Illite	Chlorite	Kaolinite	Albite	CO2_XRD
sans traitement	1	8,8	32,74	4,67	26,15	0,31	22	5,86	7,15	1,12	16,62
2% Chaux	8	9.59	34.08	4.86	24.36	0.43	22.13	5.27	7.64	1.22	17.3
4% Chaux	9	8.05	34.85	5.1	29.79	0.05	20.78	4.14	5.09	0.2	17.76
6% Chaux	10	9.01	33.97	5.19	27.87	0.3	21.95	3.05	7.47	0.18	17.42
8% Chaux	11	8.76	35.17	5.22	27.72	0.22	21.51	4.33	5.34	0.49	17.95
10% Chaux	12	7.69	36.81	5	29.91	0.06	19.66	4.11	4.44	0.01	18.57
12% Chaux	13	7.85	37.02	5.59	27.38	0.11	21.7	2.24	5.9	0.06	18.94

Tableau A.3

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	17	17	22	22	26	26	31	31
N° de la tare	S2	S3	S1	C12	DJ	KH	15	L12
Masse totale humide (g)	31,48	31,42	34,88	20,56	21,68	20,69	17,33	17,21
Masse totale sèche (g)	28,81	28,66	31,11	18,09	18,91	18,32	14,87	14,9
Masse de la tare (g)	23,8	23,6	23,8	13,5	13,5	13,7	9,9	10,2
Masse de l'eau (g)	2,67	2,76	3,77	2,47	2,77	2,37	2,46	2,31
Masse du sol sec (g)	5,01	5,06	7,31	4,59	5,41	4,62	4,97	4,7
Teneur en eau%	53,29	54,55	51,57	53,81	51,20	51,30	49,50	49,15
Moyenne %	53,92		52,69		51,25		49,32	
Moyenne Générale %	51,80							

Figure A.1

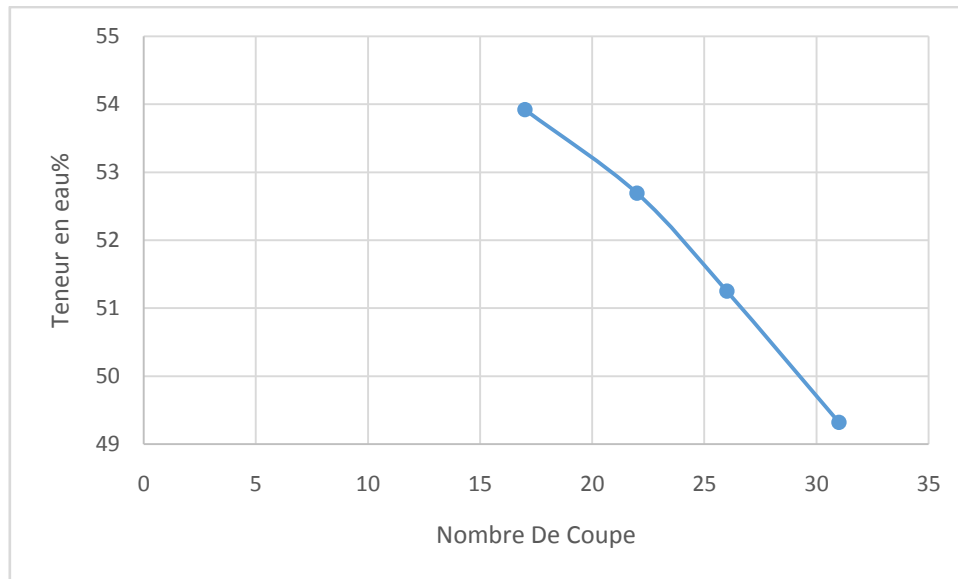


Tableau A.4

	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
N° de la tare	1	1	2	2	3	3
Masse totale humide (g)	17,58	23,11	22,74	19,34	22,6	22,07
Masse totale sèche (g)	17,14	22,73	22,39	18,91	22,26	21,78
Masse de la tare (g)	15,73	21,46	21,26	17,56	21,19	20,88
Masse de l'eau (g)	0,44	0,38	0,35	0,43	0,34	0,29
Masse du sol sec (g)	1,41	1,27	1,13	1,35	1,07	0,9
Teneur en eau%	31,21	29,92	30,97	31,85	31,78	32,22
Moyenne %	30,56		31,41		32,00	
Moyenne Générale %	31,33					

Tableau A.5

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	18	19	22	22	29	29	34	34
N° de la tare	A	1	2	5	3	4	M	K
Masse totale humide	21.11	11,42	16,84	18,3	12,34	13,2	10,91	21,84
Masse totale sèche (g)	17.23	8,76	14,53	15,47	9,4	10,01	8,84	19,23
Masse de la tare (g)	10.01	3,84	10,17	10,22	3,77	3,7	4,8	14
Masse de l'eau (g)	3.88	2,66	2,31	2,83	2,94	3,19	2,07	2,61
Masse du sol sec (g)	7.22	4,92	4,36	5,25	5,63	6,31	4,04	5,23
Teneur en eau%	53.74	54,07	52,98	53,90	52,22	50,55	51,24	49,90
Moyenne %	52.72		53,44		51,39		50,57	
Moyenne Générale %	51.86							

Figure A.2

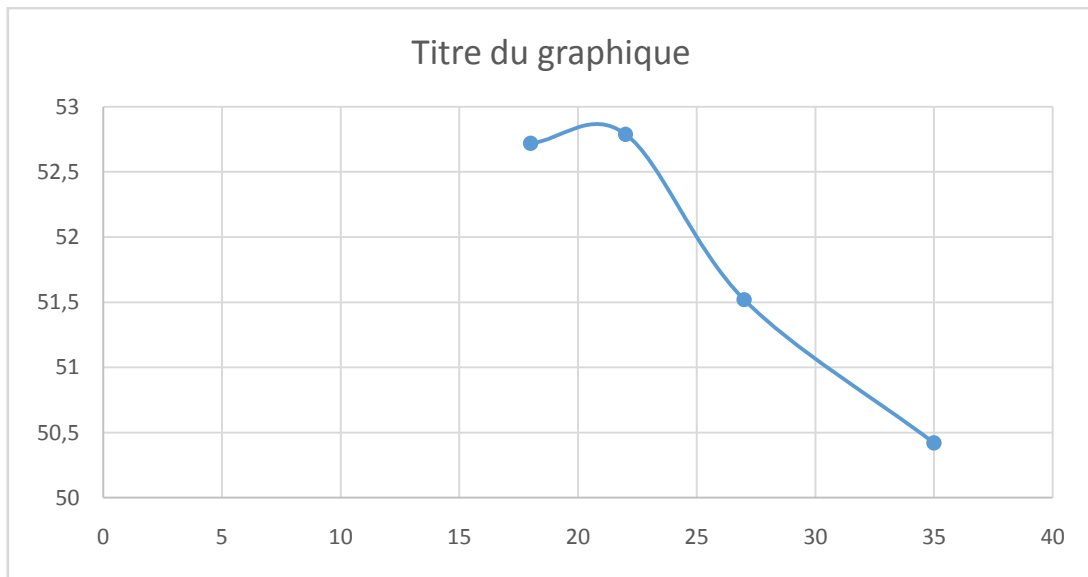


Tableau A.6

N° de la tare	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
	Z	10	11	12	13	14
Masse totale humide (g)	12.09	17,36	22,66	21,78	17,29	17,32
Masse totale sèche (g)	11.71	16,98	22,29	21,46	16,9	16,92
Masse de la tare (g)	10.49	15,74	21,11	20,49	15,6	15,7
Masse de l'eau (g)	0.38	0,38	0,37	0,32	0,39	0,4
Masse du sol sec (g)	1.22	1,24	1,18	0,97	1,3	1,22
Teneur en eau%	31.15	30,65	31,36	32,99	30,00	32,79
Moyenne %	32.32377049		32,17		31,39	
Moyenne Générale %	32.89938144					

Tableau A.7

Nombre De Coupe	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
	1	A	B	G	D	B13	A13	C
Masse totale humide (g)	14.56	15,36	11,79	21,88	30,95	16,46	18,84	8,82
Masse totale sèche (g)	11.43	13,56	8,96	19,13	28,6	14,4	16,77	6,87
Masse de la tare (g)	5.42	10,23	3,57	13,8	23,87	10,27	12,58	2,84
Masse de l'eau (g)	3.13	1,8	2,83	2,75	2,35	2,06	2,07	1,95
Masse du sol sec (g)	6.01	3,33	5,39	5,33	4,73	4,13	4,19	4,03
Teneur en eau%	52.08	54,05	52,50	51,59	49,68	49,88	49,40	48,39
Moyenne %	52.69		52,05		49,78		48,90	
Moyenne Générale %	50.39							

Figure A.3

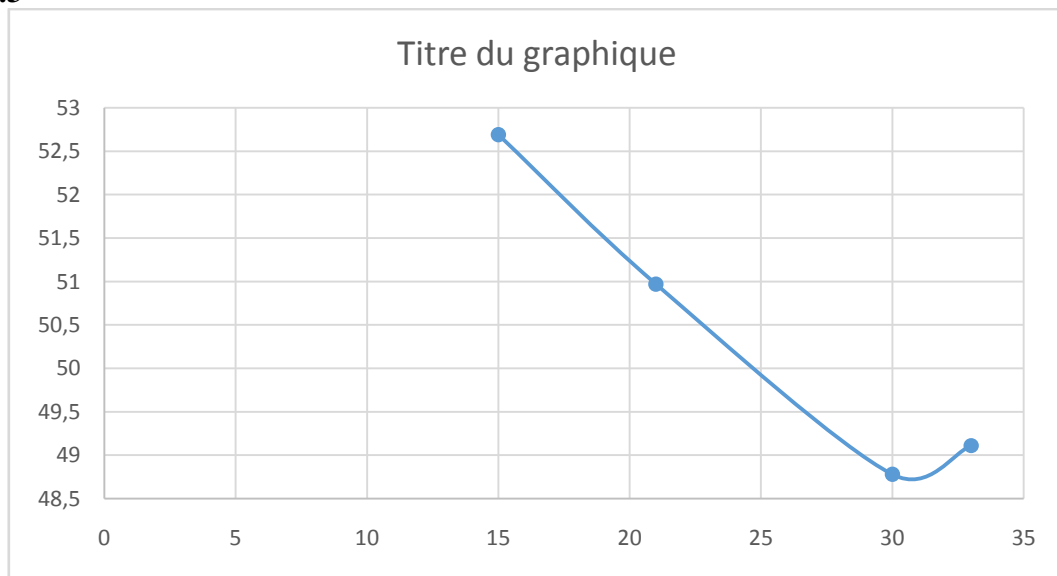


Tableau A.8

	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
N° de la tare	9	18	19	20	21	22
Masse totale humide (g)	6.93	5,84	18,78	16,77	18,53	22,51
Masse totale sèche (g)	6.58	5,56	18,34	16,51	18,21	22,14
Masse de la tare (g)	5.5	4,73	16,8	15,69	17,17	20,98
Masse de l'eau (g)	0.35	0,28	0,44	0,26	0,32	0,37
Masse du sol sec (g)	1.08	0,83	1,54	0,82	1,04	1,16
Teneur en eau%	32.41	33,73	28,57	31,71	30,77	31,90
Moyenne %	32.54033737		30,14		31,33	
Moyenne Générale %	33.57982236					

Tableau A.9

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	15	17	22	22	30	30	33	33
N° de la tare	1	16	17	18	19	20	21	22
Masse totale humide (g)	19.53	23,51	23,6	26,33	25,27	23,2	25,67	25,88
Masse totale sèche (g)	16.19	20,32	20,41	22,42	21,61	20,2	22,03	22,13
Masse de la tare (g)	9.8	13,75	13,92	13,76	13,76	13,81	13,68	13,76
Masse de l'eau (g)	3.34	3,19	3,19	3,91	3,66	3	3,64	3,75
Masse du sol sec (g)	6.39	6,57	6,49	8,66	7,85	6,39	8,35	8,37
Teneur en eau%	52.27	48,55	49,15	45,15	46,62	46,95	43,59	44,80
Moyenne %	52.86		47,15		46,79		44,20	
Moyenne Générale %	49.48							

Figure A.4

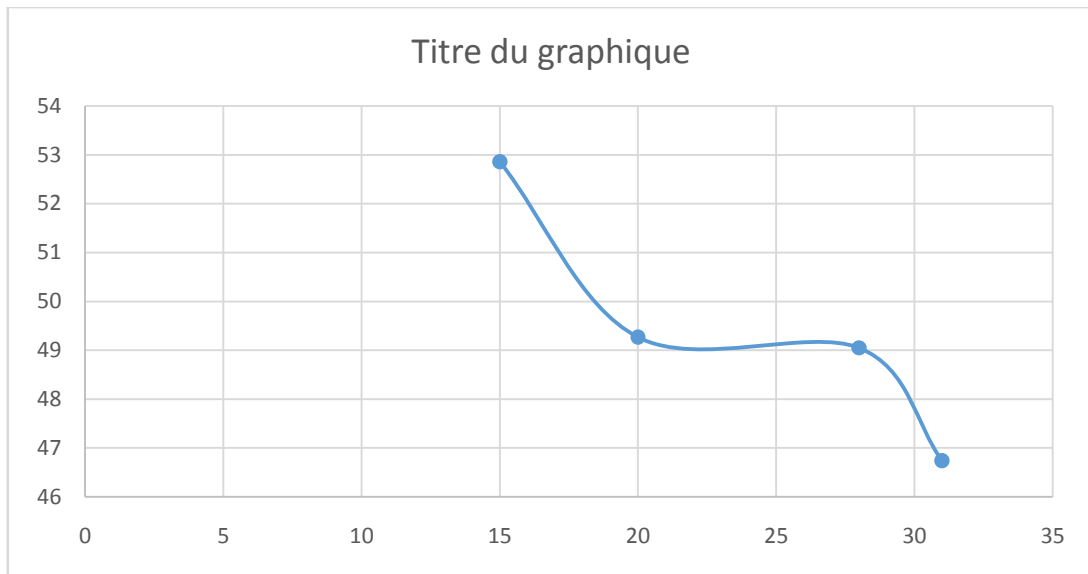


Tableau A.10

	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
N° de la tare	9	24	25	26	27	28
Masse totale humide (g)	14.56	25,15	25,23	25,25	25,59	25,14
Masse totale sèche (g)	14.24	24,73	24,83	24,94	25,21	24,81
Masse de la tare (g)	13.17	23,56	23,69	24	24,06	23,9
Masse de l'eau (g)	0.32	0,42	0,4	0,31	0,38	0,33
Masse du sol sec (g)	1.07	1,17	1,14	0,94	1,15	0,91
Teneur en eau%	29.91	35,90	35,09	32,98	33,04	36,26
Moyenne %	33.30770141		34,03		34,65	
Moyenne Générale %	33.45806391					

Tableau A.11

	Essai1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	18	15	21	21	28	28	32	32
N° de la tare	1	2	3	4	5	6	7	8
Masse totale humide (g)	16.89	21,04	20,72	20,48	21,02	16,93	20,32	25,2
Masse totale sèche (g)	12.93	17,34	17,26	16,99	17,39	14,61	16,87	20,52
Masse de la tare (g)	5.42	9,83	9,9	9,74	9,97	9,56	9,46	10,56
Masse de l'eau (g)	3.96	3,7	3,46	3,49	3,63	2,32	3,45	4,68
Masse du sol sec (g)	7.51	7,51	7,36	7,25	7,42	5,05	7,41	9,96
Teneur en eau%	52.73	49,27	47,01	48,14	48,92	45,94	46,56	46,99
Moyenne %	52.31		47,57		47,43		46,77	
Moyenne Générale %	49.83							

Figure A.5

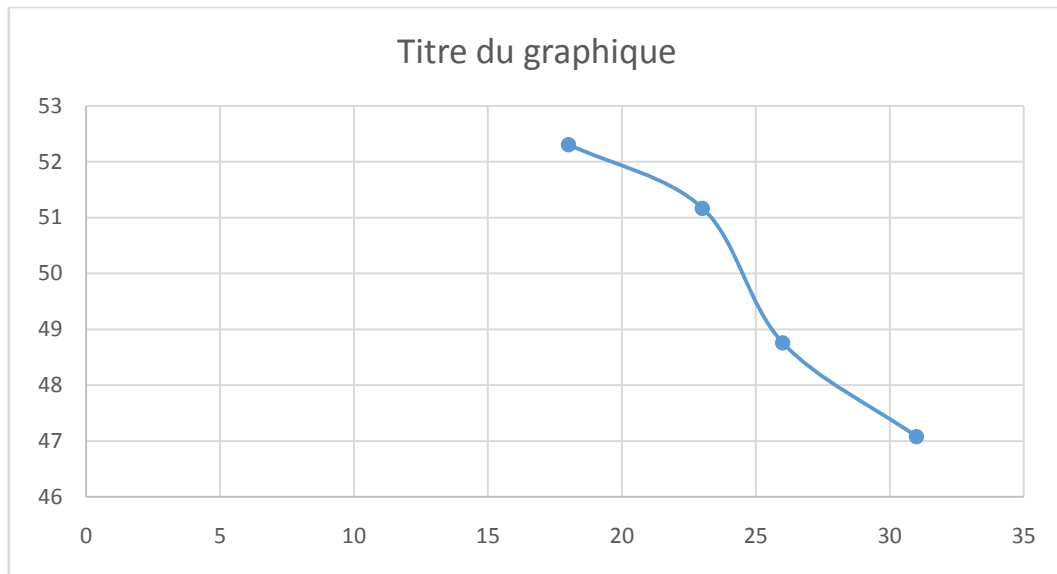


Tableau A.12

	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
N° de la tare	9	18	19	20	21	22
Masse totale humide (g)	6.82	5,84	18,78	16,77	18,53	22,51
Masse totale sèche (g)	6.5	5,56	18,34	16,51	18,21	22,14
Masse de la tare (g)	5.5	4,73	16,8	15,69	17,17	20,98
Masse de l'eau (g)	0.32	0,28	0,44	0,26	0,32	0,37
Masse du sol sec (g)	1	0,83	1,54	0,82	1,04	1,16
Teneur en eau%	32.00	33,73	28,57	31,71	30,77	31,90
Moyenne %	31.34090909		30,14		31,33	
Moyenne Générale %	34.73900597					

Tableau A.13

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	19	18	23	23	27	27	33	33
N° de la tare	1	A	B	G	D	B13	A13	C
Masse totale humide (g)	28.16	15,36	11,79	21,88	30,95	16,46	18,84	8,82
Masse totale sèche (g)	23.45	13,56	8,96	19,13	28,6	14,4	16,77	6,87
Masse de la tare (g)	13.82	10,23	3,57	13,8	23,87	10,27	12,58	2,84
Masse de l'eau (g)	4.71	1,8	2,83	2,75	2,35	2,06	2,07	1,95
Masse du sol sec (g)	9.63	3,33	5,39	5,33	4,73	4,13	4,19	4,03
Teneur en eau%	48.91	54,05	52,50	51,59	49,68	49,88	49,40	48,39
Moyenne %	48.21		52,05		49,78		48,90	
Moyenne Générale %	46.81							

Figure A.6

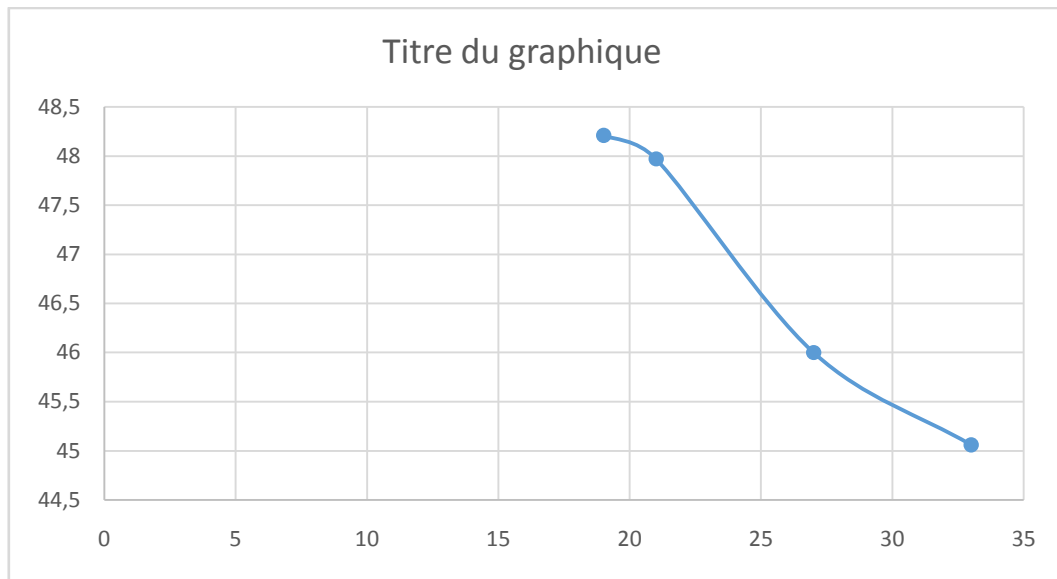


Tableau A.14

	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
N° de la tare	9	18	19	20	21	22
Masse totale humide (g)	20,74	5,84	18,78	16,77	18,53	22,51
Masse totale sèche (g)	20,49	5,56	18,34	16,51	18,21	22,14
Masse de la tare (g)	19,77	4,73	16,8	15,69	17,17	20,98
Masse de l'eau (g)	0,25	0,28	0,44	0,26	0,32	0,37
Masse du sol sec (g)	0,72	0,83	1,54	0,82	1,04	1,16
Teneur en eau%	34,72	33,73	28,57	31,71	30,77	31,90
Moyenne %	36,11111111		30,14		31,33	
Moyenne Générale %	33,76265646					

Tableau A.15

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	16	18	23	23	27	27	33	33
N° de la tare	1	A	B	G	D	B13	A13	C
Masse totale humide (g)	18,03	15,36	11,79	21,88	30,95	16,46	18,84	8,82
Masse totale sèche (g)	13,95	13,56	8,96	19,13	28,6	14,4	16,77	6,87
Masse de la tare (g)	5,48	10,23	3,57	13,8	23,87	10,27	12,58	2,84
Masse de l'eau (g)	4,08	1,8	2,83	2,75	2,35	2,06	2,07	1,95
Masse du sol sec (g)	8,47	3,33	5,39	5,33	4,73	4,13	4,19	4,03
Teneur en eau%	48,17	54,05	52,50	51,59	49,68	49,88	49,40	48,39
Moyenne %	48,27		52,05		49,78		48,90	
Moyenne Générale %	45,70							

Figure A.7

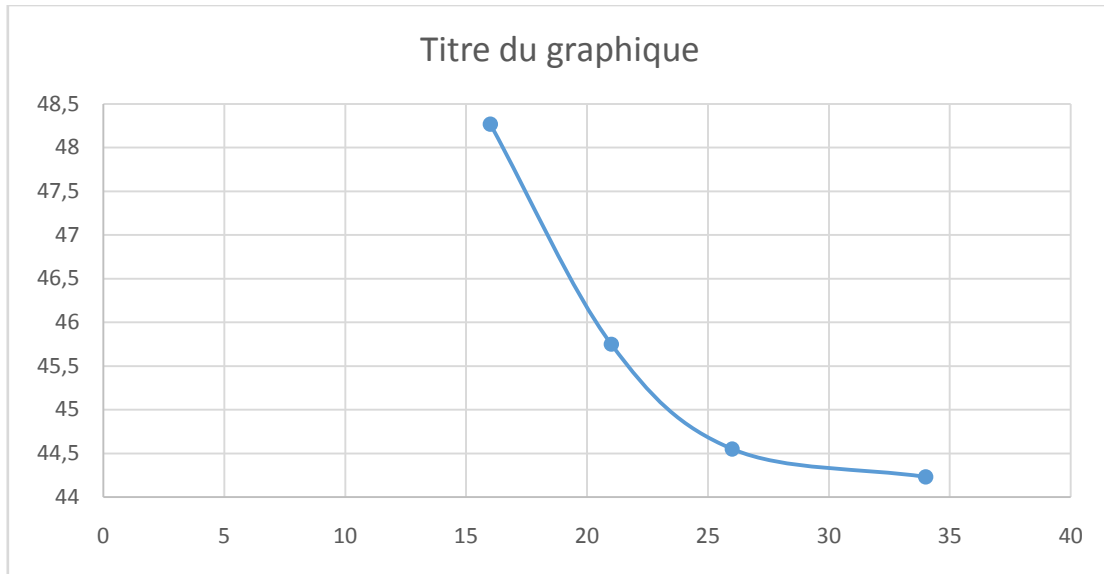


Tableau A.16

N° de la tare	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
	9	18	19	20	21	22
Masse totale humide (g)	6.63	5,84	18,78	16,77	18,53	22,51
Masse totale sèche (g)	6.33	5,56	18,34	16,51	18,21	22,14
Masse de la tare (g)	5.43	4,73	16,8	15,69	17,17	20,98
Masse de l'eau (g)	0.3	0,28	0,44	0,26	0,32	0,37
Masse du sol sec (g)	0.9	0,83	1,54	0,82	1,04	1,16
Teneur en eau%	33.33	33,73	28,57	31,71	30,77	31,90
Moyenne %	33.52059925		30,14		31,33	
Moyenne Générale %				34.50847726		

VBS

0%

Tableau A.17

B	VBS (Cm3)	La surface spécifique (g/cm2)
200	6,67	140
200	6,67	140
190	6,33	133
196,67	6,56	137,67

2%

Tableau A.18

B	VBS (Cm3)	La surface spécifique (g/cm2)
180	6.00	126
200	6.67	140
190	6.33	133
190.00	6.33	133.00

4%

Tableau A.19

B	VBS (Cm3)	La surface spécifique (g/cm2)
150	5.00	105
140	4.67	98
150	5.00	105
146.67	4.89	102.67

6%

Tableau A.20

B	VBS (Cm3)	La surface spécifique (g/cm2)
140	4.67	98
140	4.67	98
130	4.33	91
136.67	4.56	95.67

8%

Tableau A.21

B	VBS (Cm3)	La surface spécifique (g/cm2)
130	4.33	91
130	4.33	91
130	4.33	91
130.00	4.33	91.00

10%

Tableau A.22

B	VBS (Cm3)	La surface spécifique (g/cm2)
100	3.33	70
120	4.00	84
110	3.67	77
110.00	3.67	77.00

12%

Tableau A.23

B	VBS (Cm3)	La surface spécifique (g/cm2)
110	3,67	77
100	3,33	70
110	3,67	77
106,67	3,56	74,67

Essais Mécaniques

Proctor

Tableau A.24

Pourcentage d'eau ajoutée à chaque compactage	ESSAI 1		ESSAI 2		ESSAI 3	
	W %	γ_d	W %	γ_d	W %	γ_d
16%	16,69	1,65	18,09	1,65	16,96	1,67
18%	19,86	1,67	19,62	1,67	19,76	1,68
20%	23,89	1,68	21,90	1,69	21,95	1,69
22%	26,56	1,60	25,76	1,60	25,85	1,60
24%	29,31	1,56	29,01	1,55	29,03	1,55

Tableau A.25

ESSAI 1								
Réf/ échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Le Dosage De Liant	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%	0%
Masse du sol humide, (g)	1929.4	1711.3	1740.6	1744	1746.2	1712.4	1701.7	1929.4
Masse du sol sec, (g)	1557.3	1402.4	1444.4	1455	1468	1479.7	1471.6	1557.3
Volume du moule, (cm ³)	926.9	926.9	926.9	926.9	926.9	926.9	926.9	926.9
Masse volumique du sol humide, (g/cm ³)	2.08	1.85	1.88	1.88	1.88	1.85	1.84	2.08
Masse volumique du sol sec (gr/cm ³)	1.68	1.51	1.56	1.57	1.58	1.60	1.59	1.68
Masse de l'eau, (g)	372.1	308.9	296.2	289	278.2	232.7	230.1	372.1
Teneur en eau %	23.894	22.027	20.507	19.863	18.951	15.726	15.636	23.894

Tableau A.26

ESSAI 2								
Réf/ échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Le Dosage De Liant	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%	0%
Masse du sol humide, (g)	1909.9	1743	1732.2	1737.5	1742.6	1738.9	1719.2	1909.9
Masse du sol sec, (g)	1566.8	1434.6	1445.2	1451.1	1460.4	1493.9	1488.6	1566.8
Volume du moule, (cm ³)	926.9	926.9	926.9	926.9	926.9	926.9	926.9	926.9
Masse volumique du sol humide, (g/cm ³)	2.06	1.88	1.87	1.87	1.88	1.88	1.85	2.06
Masse volumique du sol sec (gr/cm ³)	1.69	1.55	1.56	1.57	1.58	1.61	1.61	1.69
Masse de l'eau, (g)	343.1	308.4	287	286.4	282.2	245	230.6	343.1
Teneur en eau %	21.898	21.497	19.859	19.737	19.323	16.400	15.491	21.898

Tableau A.27

ESSAI 3								
Réf/ échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Le Dosage De Liant	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%	0%
Masse du sol humide, (g)	1912.8	1714.3	1743.6	1746.2	1748.2	1710.3	1698.5	1912.8
Masse du sol sec, (g)	1568.5	1405.8	1447.9	1459.1	1470.2	1477.5	1476.1	1568.5
Volume du moule, (cm ³)	926.9	926.9	926.9	926.9	926.9	926.9	926.9	926.9
Masse volumique du sol humide, (g/cm ³)	2.06	1.85	1.88	1.88	1.89	1.85	1.83	2.06
Masse volumique du sol sec (gr/cm ³)	1.69	1.52	1.56	1.57	1.59	1.59	1.59	1.69
Masse de l'eau, (g)	344.3	308.5	295.7	287.1	278	232.8	222.4	344.3
Teneur en eau %	21.951	21.945	20.423	19.677	18.909	15.756	15.067	21.951

CBR

Tableau A.28

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0	0
1,25	0	0
2	0,01	0,2173
2,5	0,01	0,2173
5	0,025	0,5434
7,5	0,032	0,6522
10	0,04	0,8695
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
1,63	2,73	2,73

Figure A.8

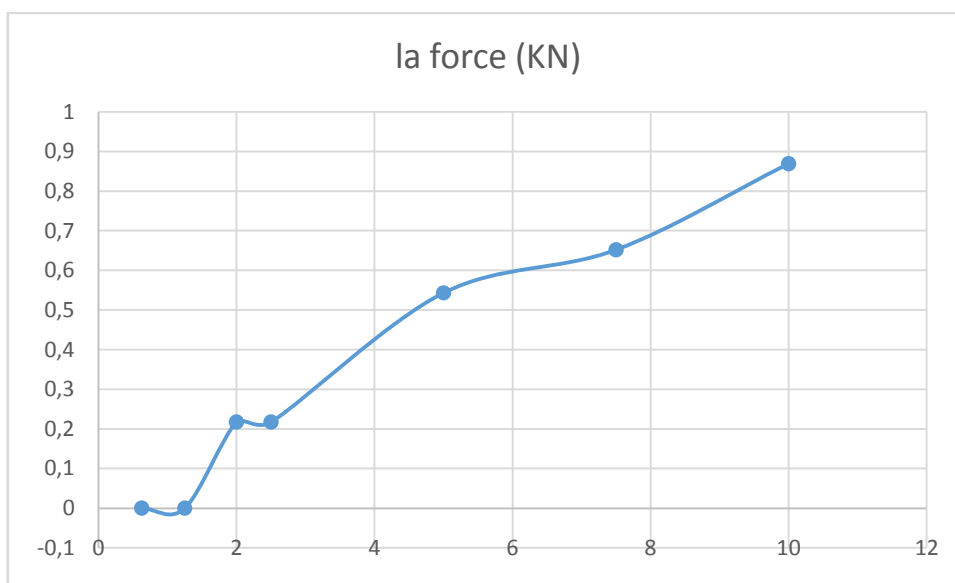


Tableau A.29

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0	0
1,25	0	0
2	0,01	0,2173
2,5	0,02	0,4347
5	0,03	0,6521
7,5	0,04	0,8695
10	0,05	1,0569
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
3,26	3,27	3,27

Figure A.9

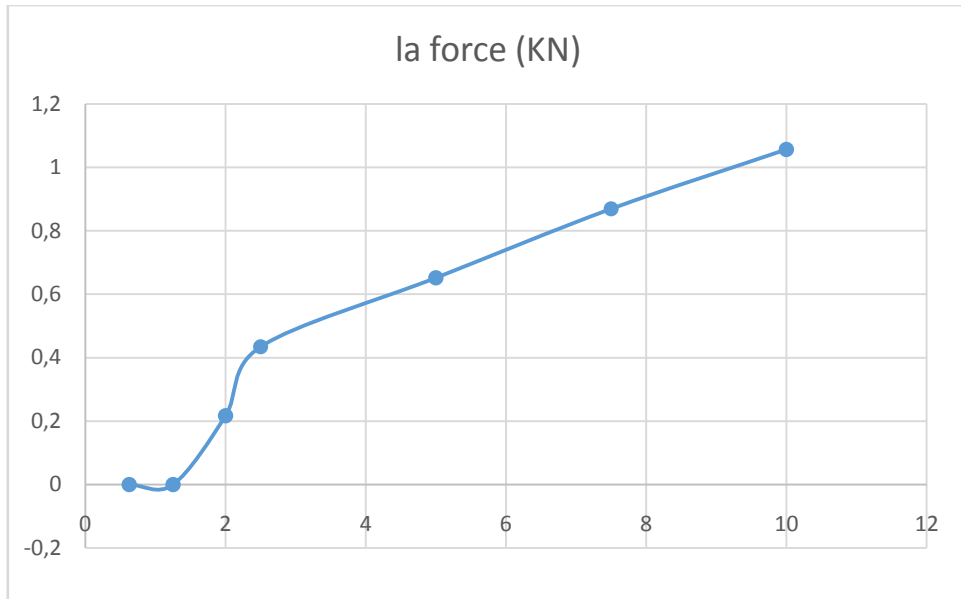
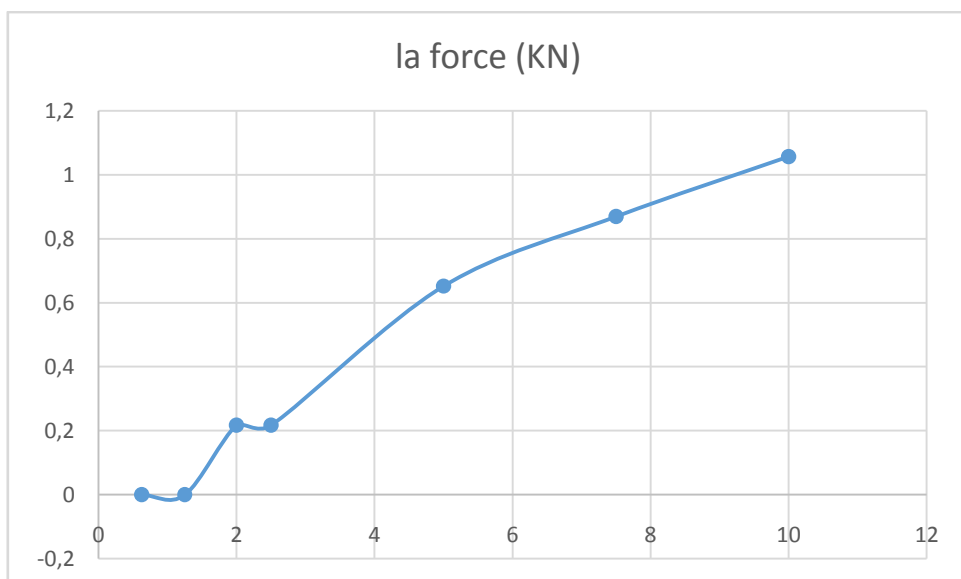


Tableau A.30

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0	0
1,25	0	0
2	0,01	0,2173
2,5	0,01	0,2173
5	0,03	0,6521
7,5	0,04	0,8695
10	0,05	1,0569
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
1,63	3,27	3,27

Figure A.10



2%

Tableau A.31

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0.005	0.1086
1.25	0.01	0.2173
2	0.03	0.6521
2.5	0.04	0.8695
5	0.07	1.5217
7.5	0.09	1.9565
10	0.11	2.3913
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
6.51	7.64	7.64

Figure A.11

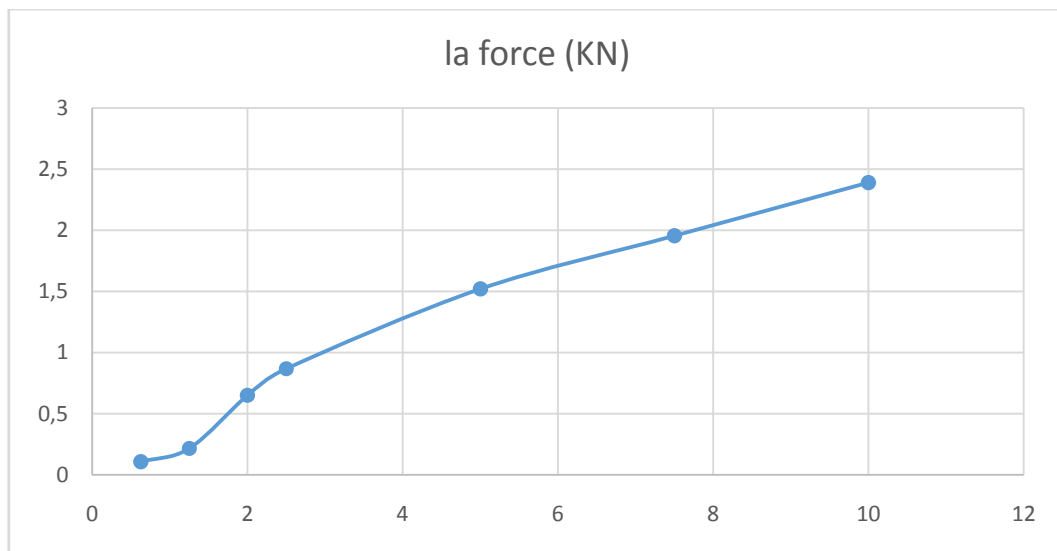


Tableau A.32

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0	0
1.25	0.01	0.2173
2	0.02	0.4347
2.5	0.03	0.6521
5	0.05	1.0869
7.5	0.07	1.5217
10	0.1	2.1739
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
4.88	5.45	5.45

Figure A.12

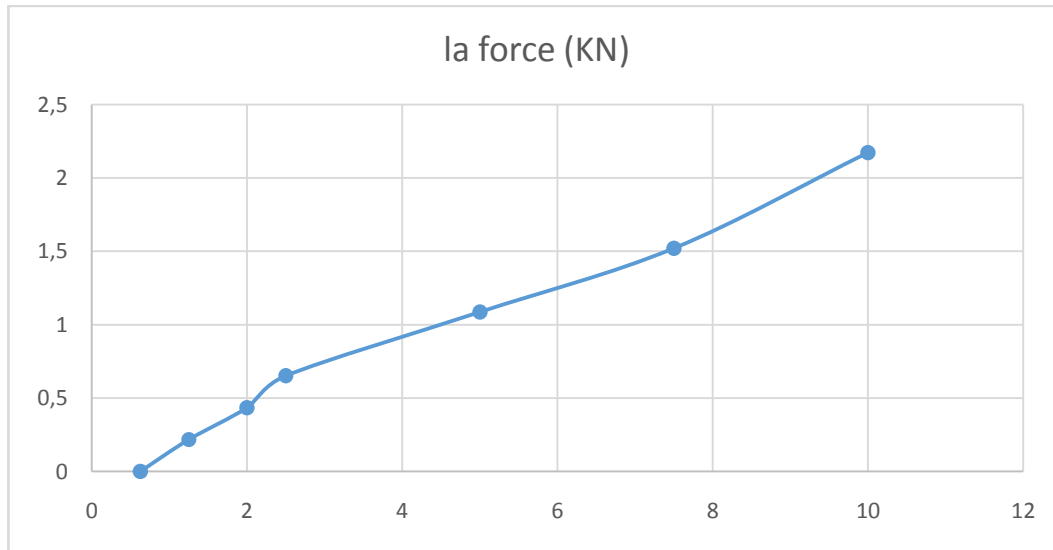
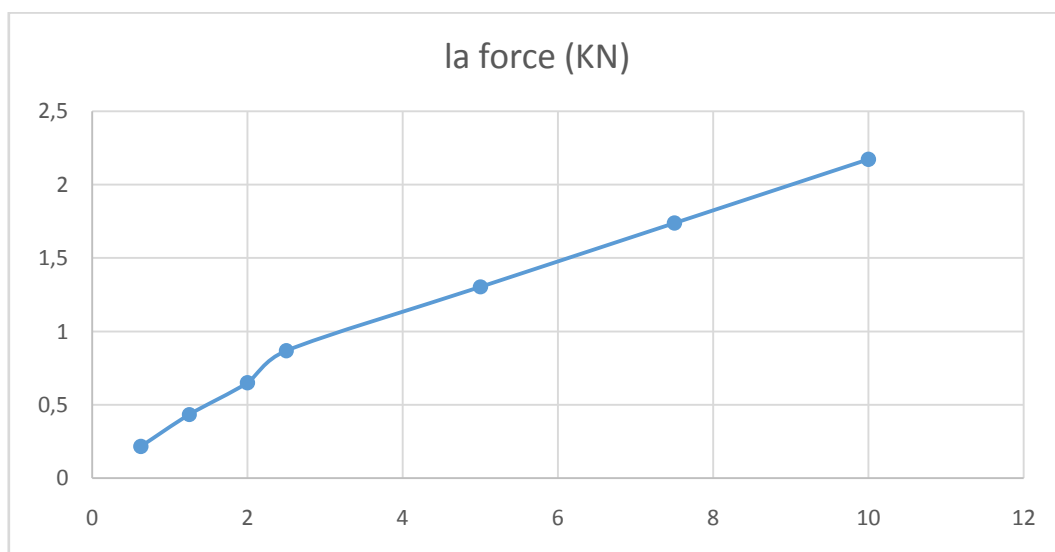


Tableau A.33

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0.01	0.2173
1.25	0.02	0.4347
2	0.03	0.6521
2.5	0.04	0.8695
5	0.06	1.3043
7.5	0.08	1.7391
10	0.1	2.1739
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
6.51	6.54	6.54

Figure A.13



4%

Tableau A.34

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0.01	0.2173
1.25	0.01	0.2173
2	0.02	0.4347
2.5	0.02	0.4347
5	0.04	0.8695
7.5	0.05	1.0869
10	0.062	1.3043
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
3.26	4.36	4.36

Figure A.14

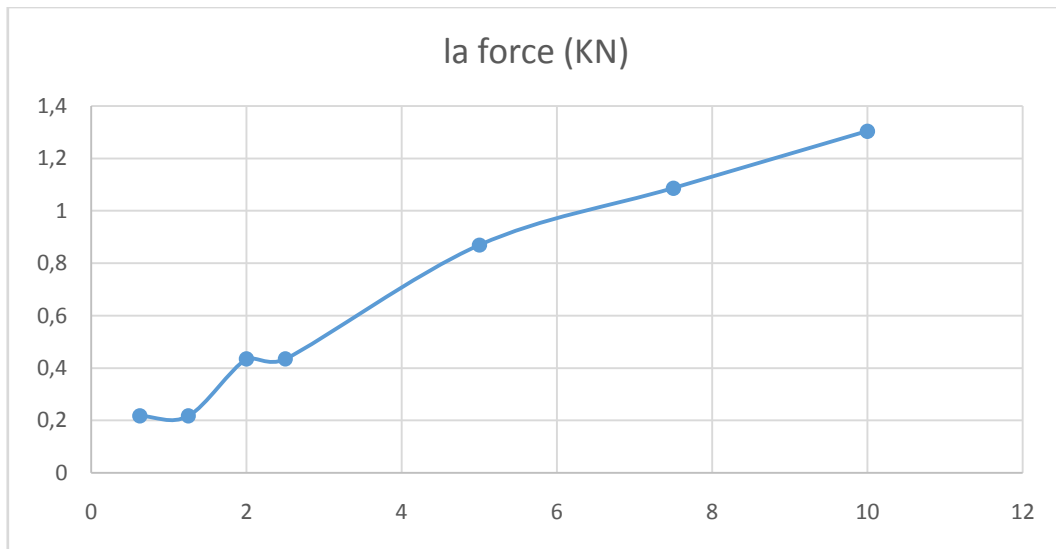


Tableau A.35

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0	0
1.25	0.01	0.2173
2	0.02	0.4347
2.5	0.025	0.6521
5	0.04	0.8695
7.5	0.05	1.0869
10	0.062	1.3043
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
4.88	4.36	4.88

Figure A.15

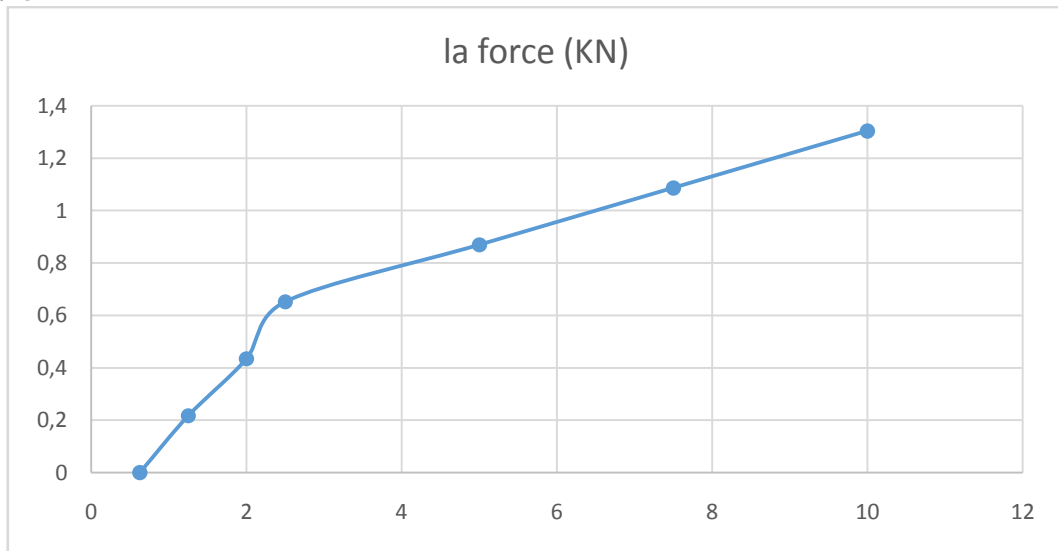
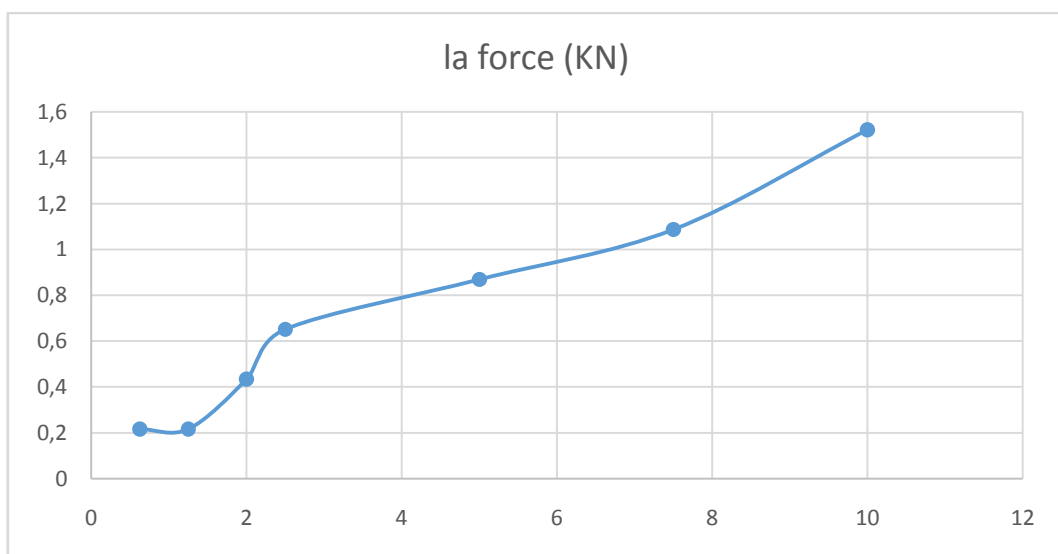


Tableau A.36

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0.01	0.2173
1.25	0.012	0.2173
2	0.022	0.4347
2.5	0.03	0.6521
5	0.04	0.8695
7.5	0.05	1.0869
10	0.065	1.5217
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
4.88	4.36	4.88

Figure A.16



6%

Tableau A.37

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0	0
1.25	0.01	0.2173
2	0.02	0.4347
2.5	0.02	0.4347
5	0.04	0.8695
7.5	0.06	1.3043
10	0.07	1.5217
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
3.26	4.36	4.36

Figure A.17

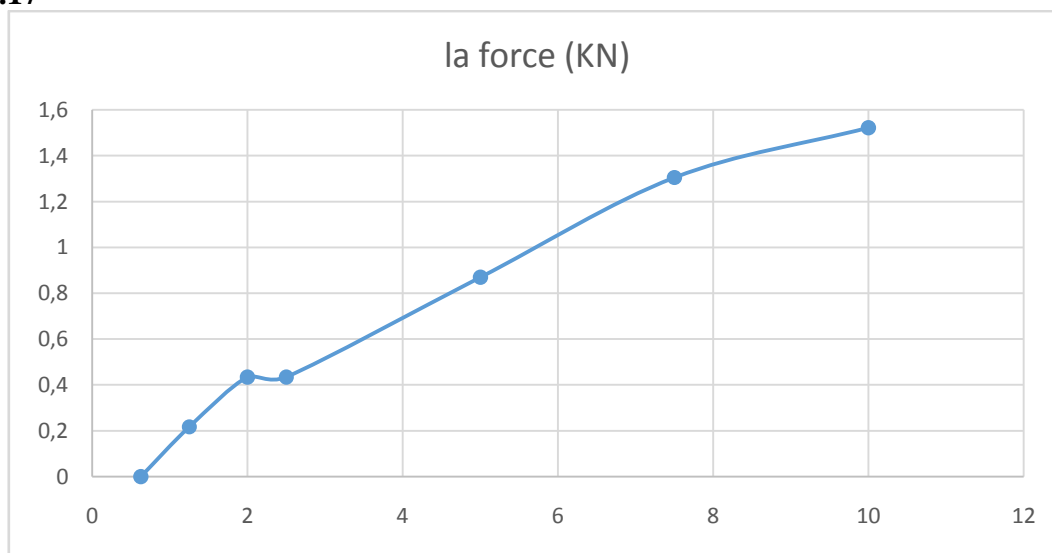


Tableau A.38

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0.005	0.10865
1.25	0.01	0.2173
2	0.015	0.4342
2.5	0.02	0.4347
5	0.04	0.8695
7.5	0.06	1.3043
10	0.07	1.5217
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
3.26	4.36	4.36

Figure A.18

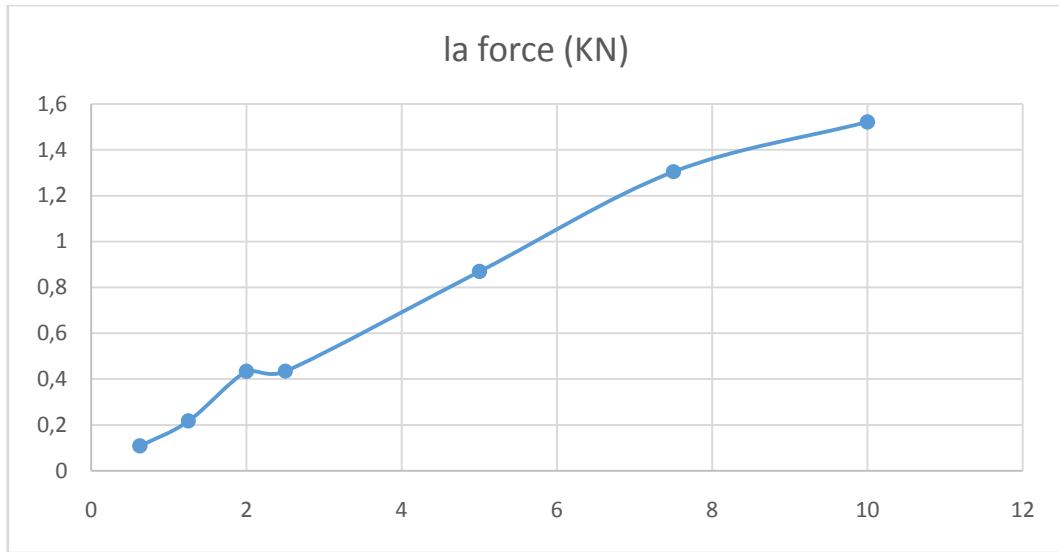
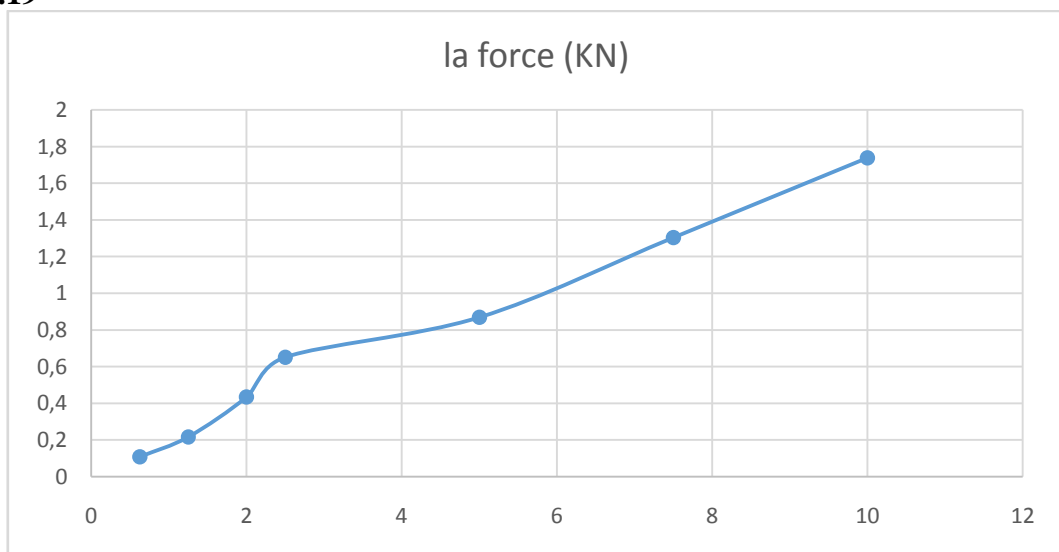


Tableau A.39

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0.005	0.10865
1.25	0.01	0.2173
2	0.02	0.4347
2.5	0.03	0.6521
5	0.04	0.8695
7.5	0.06	1.3043
10	0.08	1.7391
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
4.88	4.36	4.88

Figure A.19



8%

Tableau A.40

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0.01	0.2173
1.25	0.02	0.4347
2	0.03	0.6521
2.5	0.04	0.8695
5	0.07	1.5217
7.5	0.1	2.1739
10	0.12	2.6086
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
6.51	7.64	7.64

Figure A.20

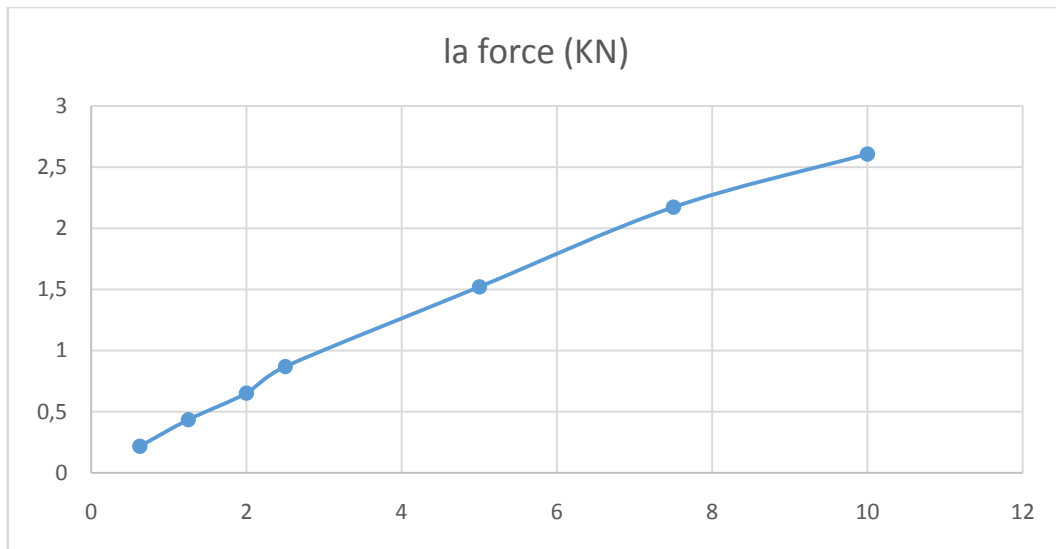


Tableau A.41

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0.01	0.2173
1.25	0.02	0.4347
2	0.03	0.6521
2.5	0.05	1.0869
5	0.07	1.5217
7.5	0.1	2.1739
10	0.12	2.6086
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
8.14	7.64	8.14

Figure A.21

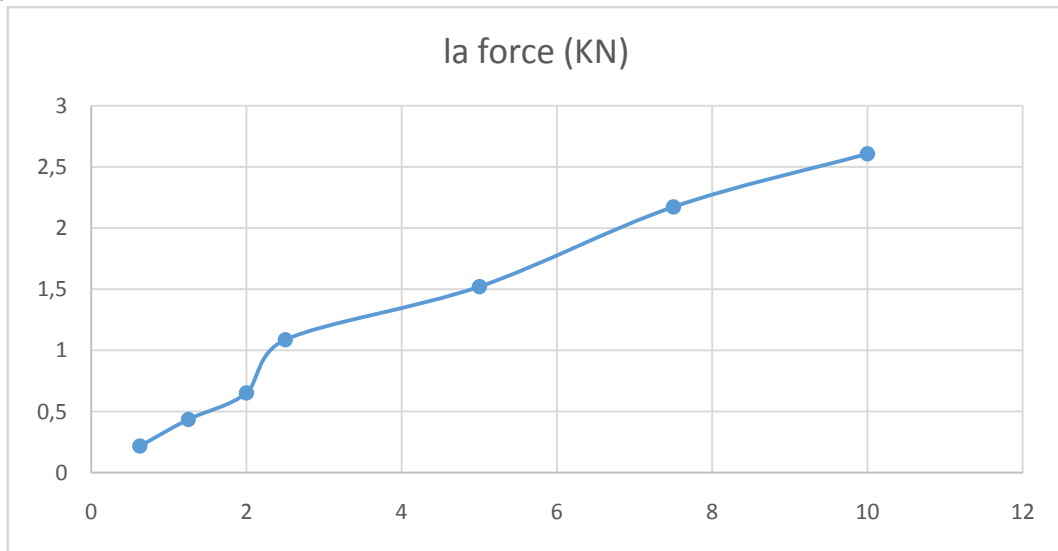
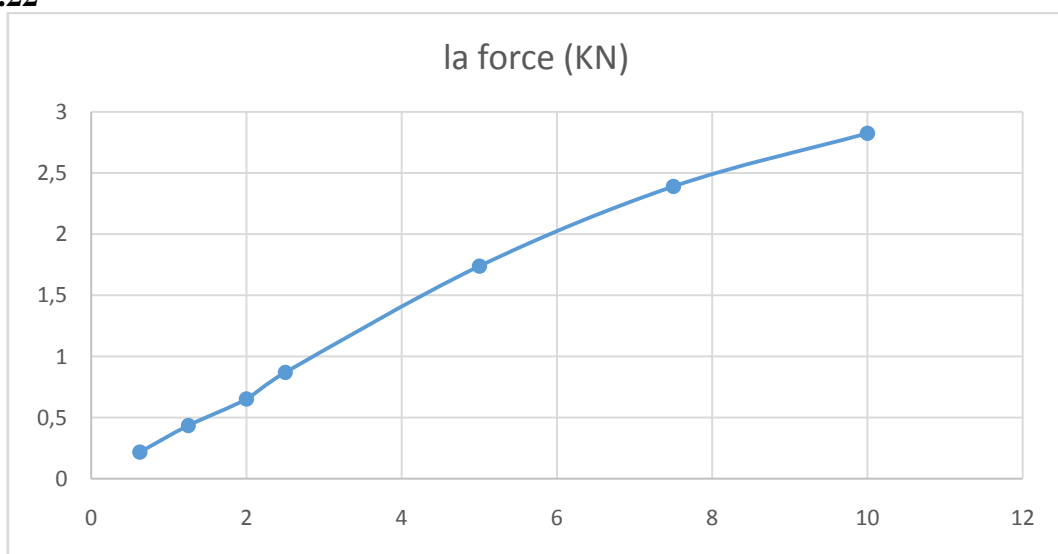


Tableau A.42

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0.01	0.2173
1.25	0.02	0.4347
2	0.03	0.6521
2.5	0.04	0.8695
5	0.08	1.7391
7.5	0.11	2.3913
10	0.13	2.826
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
6.51	8.73	8.73

Figure A.22



10%

Tableau A.43

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0.01	0.2173
1.25	0.02	0.4347
2	0.03	0.6521
2.5	0.04	0.8695
5	0.071	1.5217
7.5	0.105	2.2826
10	0.13	2.826
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
6.51	7.64	7.64

Figure A.23

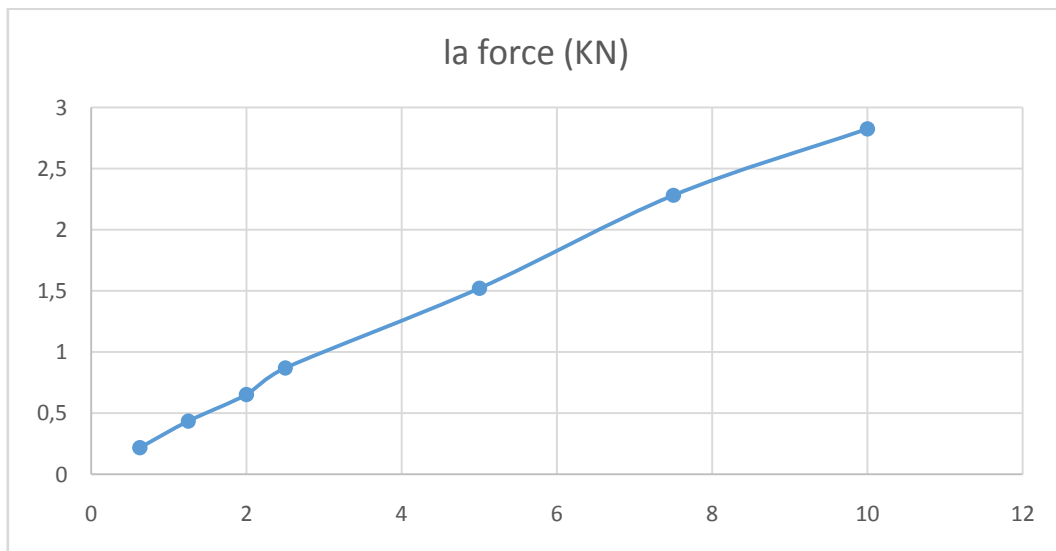


Tableau A.44

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0.01	0.2173
1.25	0.02	0.4347
2	0.03	0.6521
2.5	0.04	0.8695
5	0.08	1.7391
7.5	0.11	2.3913
10	0.13	2.826
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
6.51	8.73	8.73

Figure A.24

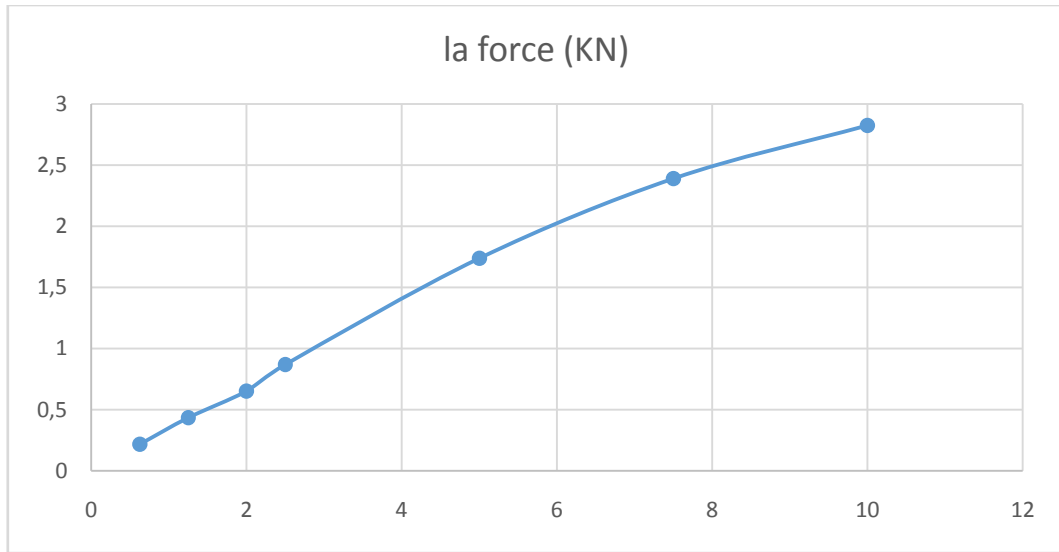
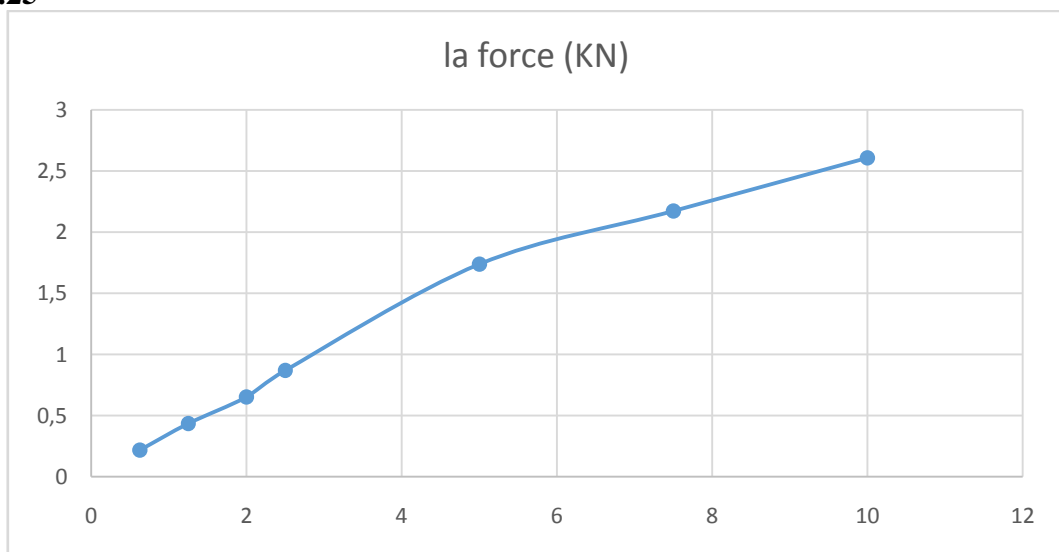


Tableau A.45

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0.01	0.2173
1.25	0.02	0.4347
2	0.03	0.6521
2.5	0.04	0.8695
5	0.8	1.7391
7.5	0.1	2.1739
10	0.12	2.6086
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
6.51	8.73	8.73

Figure A.25



12%

Tableau A.46

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0.01	0.2173
1.25	0.02	0.4347
2	0.04	0.8695
2.5	0.05	1.0869
5	0.1	2.1739
7.5	0.13	2.826
10	0.16	3.4782
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
8.14	10.91	10.91

Figure A.26

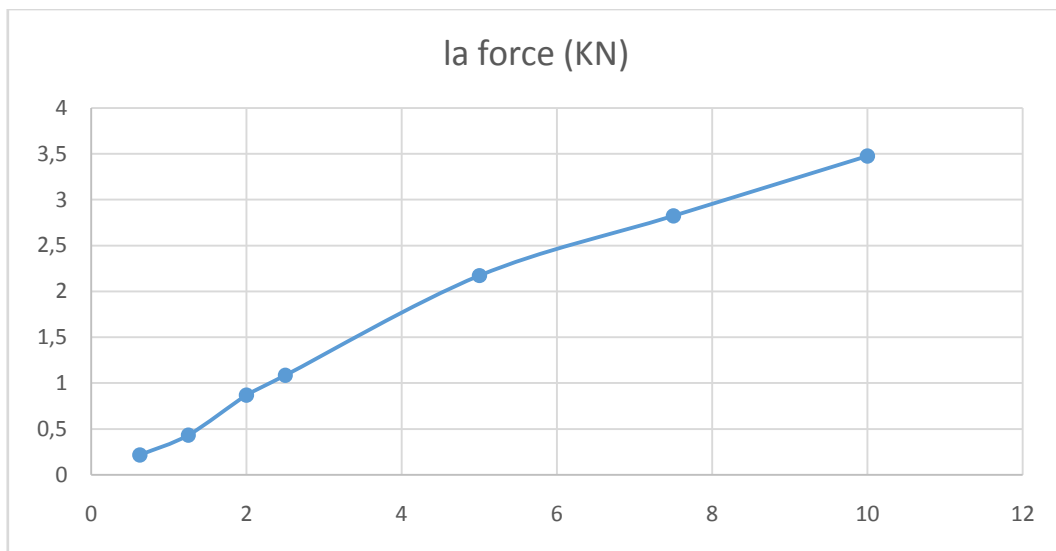


Tableau A.47

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0.01	0.2173
1.25	0.03	0.6521
2	0.04	0.8695
2.5	0.05	1.0869
5	0.11	2.3913
7.5	0.14	3.0434
10	0.16	3.4782
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
8.14	12.00	12.00

Figure A.27

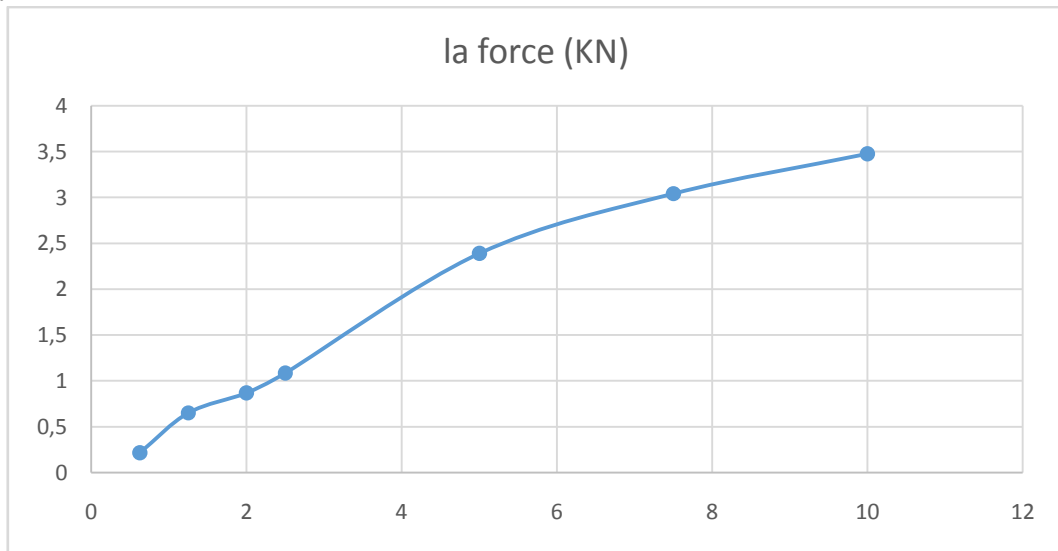
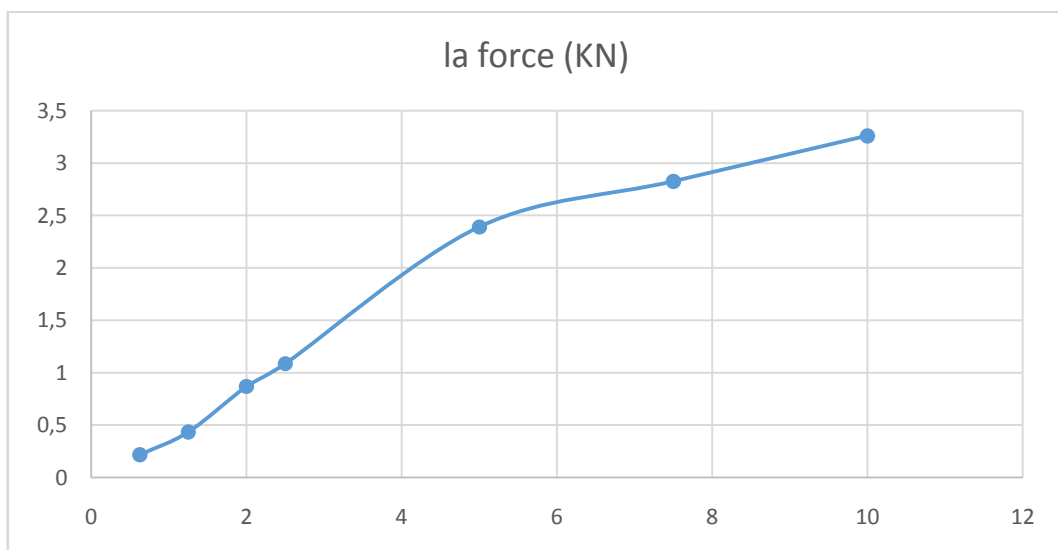


Tableau A.48

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0.625	0.01	0.2173
1.25	0.02	0.4347
2	0.04	0.8695
2.5	0.05	1.0869
5	0.11	2.3913
7.5	0.13	2.826
10	0.15	3.2608
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
8.14	12.00	12.00

Figure A.28



Mesure aux ultrasons
Tableau A.49

Dosage De Liant	t (μ)	V (Cm/μs)
0%	126.00	0.10
2%	106.80	0.11
4%	99.40	0.12
6%	82.40	0.15
8%	79.60	0.15
10%	63.70	0.19
12%	66.10	0.18
0%	126.00	0.10

Tableau A.50

Dosage De Liant	t (μ)	V (Cm/μs)
0%	137.00	0.09
2%	109.10	0.11
4%	102.60	0.12
6%	86.00	0.14
8%	82.50	0.15
10%	67.50	0.18
12%	68.80	0.17
0%	137.00	0.09

Tableau A.51

Dosage De Liant	t (μ)	V (Cm/μs)
0%	139.40	0.09
2%	108.70	0.11
4%	101.60	0.12
6%	84.10	0.14
8%	80.10	0.15
10%	65.80	0.18
12%	67.30	0.18
0%	139.40	0.09