

**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 :

BENZIANE TOUFIK ABDESSLAME

LOUGMA ABDESSLAME

Intitulé

**Caractérisation Des alluvions du Chot-El-Hodna(Wilaya
de M'sila)Fortement Traités Au Ciment Ardia Et
Reconstitués a Faible énergie de compactage**

Soutenu devant le jury composé de :

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

Année universitaire : 2021 /2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Tout d'abord, Nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir accordé courage et bénédiction pour accomplir ce travail.

Nous remercions particulièrement Mr. Khemissa Mohamed, pour nous avoir fait l'honneur d'être notre encadreur, pour nous avoir accueilli au sein de son laboratoire, de nous avoir fait confiance, encouragé et conseillé tout en nous laissant une grande liberté. Qu'il soit assuré de notre profonde gratitude.

On tient à exprimer nos profondes reconnaissances à Mr. Mahamedi Abdelkrim, notre Co-promoteur, pour son suivi attentif, son soutien, son enthousiasme et ses conseils avisés tout au long de ce travail.

Nous remercions également, l'équipe du laboratoire de Maîtrise des Genie Civil : Hanane, Ibrahim, Abdelmalek, Ismail et Wahiba pour leurs encouragements et les bons moments passés ensemble. Merci à tous qui ont participé, de près ou de loin, à la réussite de ce travail.

Toufik et Islam

Dédicaces

Je dédie ce travail:

A Mes chers parents qui m'ont toujours soutenu durant mes études et qui m'ont tout offert. Que dieu les protège et que ce travail soit le témoignage de leur sacrifice et leur tendresse

*A mes chers grands-mère et Père fatiha
et djeloul à qui je souhaite
une longue vie*

A mes parents, Abdelghani et Manina qui m'ont toujours accompagné dans mon éducation

A ma mère, et à ma mère.

*A tous mes chers frères et sœurs Yassmine, Nardjes , Hamza , Foula
A toute la famille Benziane A mes très chers amis Housseem , Adhem,
Younes, Bilal, Selma , A toute personne que je connais
A tous les étudiants de la promotion Genie Civil*

Benziane Toufik

Dédicases

Je dédie ce travail à la personne qui m'est très chère,

Ma grand-mère .

Je le dédis à Lougma Abdelmadjid, mon père.

A ma mère, et à ma mère.

Ma Grand mère, j'espère que d'outre sa tombe elle est fière,

Je dédie ce mémoire,

A ta mémoire.

Et encore à ma mère sans laquelle je ne serais qui je suis,

ma mère, celle à qui je suis toujours fière,

Et tu es la meilleure que je ne puisse rêver

à ceux qui me suivent et ceux que je suis ;

Très chers, de vous je suis ravi,

A mon oncle Zaitar Mourad pour ses encouragements

A tous mes amis, en particulier Smail ,Abdelmalek, pour leurs

encouragements

Ainsi, que Dieu nous garde toujours uni.

Je dédie ce mémoire aussi au Pr. Khemissa Mohammed et Dr.

MAHAMEDI Abdelkrim ,

En qui je vois un bienveillant mentor, je le remercie de tout mon être.

Abdesslame Lougma

ملخص:

يهدف هذا العمل إلى دراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية لتربة شط الحضنة المالحة وإمكانيات تطورها. تم اقتراح العديد من الحلول لتطوير الأراضي المتأثرة بالملوحة واستخدامها لإنشاء طرق وحقول مختلفة. من أجل تحسين التربة المالحة للتحضير ، قمنا بمعالجتها بنسب مختلفة من أسمنت Ardia600 وقمنا بإجراء اختبارات ميكانيكية عليها. الغرض من الدراسة التجريبية التي تم إجراؤها هو التحقق من الجوانب الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية وتوصيف سلوك هذه التربة المالحة. يمكن أن تحدد النتائج التي تم الحصول عليها التربة المختبرة على أنها طين عالي الثبات.

الكلمات المفتاحية: التربة المالحة ، اختبارات التحديد ، Ardia600.

Résumé

Ce travail vise à étudier les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol salin de Shatt Al-Hadna et ses possibilités de développement. Plusieurs solutions ont été proposées pour aménager les terres salines et les utiliser pour créer différentes routes et champs.

Afin d'améliorer le sol salin pour l'incubation, nous l'avons traité avec différentes proportions de ciment Ardia600 et y avons effectué des tests mécaniques. L'étude expérimentale menée a pour but de vérifier les aspects physiques, chimiques et mécaniques et de caractériser le comportement de ce sol salin. Les résultats obtenus permettent d'identifier le sol testé comme une argile très stable.

Mots-clés : sol salé, essais d'identification, Ardia600.

Abstract

This work aims to study the physical, chemical and biological properties of Shatt Al-Hadna saline soil and its development possibilities. Several solutions have been proposed to develop salt-affected lands and use them to create different roads and fields.

In order to improve the saline soil for incubation, we treated it with different proportions of Ardia600 cement and carried out mechanical tests on it. The purpose of the conducted experimental study is to verify the physical, chemical and mechanical aspects and characterize the behavior of this saline soil. The results obtained can identify the tested soil as highly stable clay.

Keywords: salty soil, identification tests, Ardia600

Sommaire

Remerciements

Dédicases

Résumé , absract, ملخص

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction Générale	13
Chapitre I	16
Chapitre I : Synthèse bibliographique	4
I. Caractérisation des sols salés.....	4
II. Les Sols Salés	4
i) Définition.....	4
2) Caractérisation des sols salés.....	4
i) Les caractéristiques chimiques.....	6
ii) Les caractéristiques physiques	6
b) Caractéristiques des sols salés :	6
c) Classification des sols salés	6
d) Effet de la salinité et la sodicité sur le sol	10
C. Effets sur les propriétés chimiques	12
d) Effets de la salinité sur les propriétés du sol.....	13
E. Effet sur la structure du sol.....	13
Mise en valeur des sols salés.....	13
3) Répartition des sols salés	14
Chapitre II	16
Chapitre II : Liant hydraulique et techniques de traitement	9
Le Ciment	9
Définition.....	9
Les étapes de la fabrication du ciment	11

Types de ciment	12
Réactions physico-chimiques du ciment	12
Reaction Chimique :	13
Réactions physiques	15
LES PROBLEMATIQUE	15
Chapitre III.....	20
Chapitre III : Description du site étudié	21
III. Présentation de la zone d'étude « Chott El-Hodna »:	21
Description du Chott	21
Aspect géographique et administratif	22
Aspect physique.....	24
Géologie:	24
Stratigraphie.....	25
Géomorphologie:	25
Hydrologie:	26
Bassin versant :	27
Bilan hydrique du bassin versant:	27
Types de sols	27
Pédologie:	28
Aspect climatologique:	31
La pluviométrie:	32
La température:	34
Le vent:	34
Synthèse climatique:.....	36
Aspect biotique:	40
Chapitre IV.....	41
Chapitre IV : programme expérimental.....	42
Introduction	42
Protocole expérimental	42
Propriétés du liant hydraulique utilisé	42
Liste des essais	44
Sol non traité.....	45
Sol traité :.....	45
Description des essais.....	47
Essais d'identification	47
Analyse minéralogique	47
b/ Analyse chimique	48
c/ Analyse microstructurale.....	48

d/ Teneur en eau (NF P 94-050 ; NA 5209).....	50
e/ Poids volumique humide et sec (NF P 94-053 ; NA 5210).....	50
f/ Analyse granulométrique (NF P94-056 ; NA 5232) et (NF P94-57 ; NA 5251).....	51
f.1/ Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056 ; NA 5232).....	51
f.2/ Analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P 94-057 ; NA 5251).....	52
g/ Essai de limites de consistance (NF P 94-051 ; NA 16213).....	52
h/ Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068 ; NA 5288).....	55
Essais de caractérisation.....	57
a/ Essai Proctor normal (NF P 94-093 ; NA 5262)	57
b/ Essai de portance C.B.R (NF P 94-078 ; NA 5252).....	58
b.1/ Essai C.B.R immédiat.....	58
b.2/ Essai C.B.R après imbibition.....	59
d/ Essai de compression simple (NF P 18-406 ; NA 427).....	61
Chapitre V	63
Introduction.....	37
Sol non traité.....	37
: Essais d'identification.....	38
: Analyse Minéralogique DRX.....	38
Analyse chimique S8.....	38
: Paramètres d'état.....	39
Analyse granulométrique.....	39
Les limites d'Atterberg.....	44
L'essai au bleu de méthylène :.....	48
Interprétation des résultats des essais d'identification.....	49
Les essais mécaniques.....	51
Essais Proctor normal	51
Essai C.B.R. immédiat :.....	53
Essai de compression simple. :.....	54
Sol Traité.....	54
Essais d'identification :.....	55
Essai mécanique.....	62
CHAPITRE VI	81
Conclusion générale.....	67
Références Bibliographiques	69
Annexes	73

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Superficie affectées par la salinité dans le monde	
Tableau V.2 Résultats de l'analyse chimique.....	38
Tableau V.2 Résultats des essais des paramètres d'état.....	39
Tableau V.3 Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sol non broyé).	40
Tableau V.4 Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sol broyé)	42
Tableau V.5 Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg	44
Tableau V.6 Résultats et moyenne des essais de VBS.....	45
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.13 Limites de consistance à différents dosages.....	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 teneurs en liants (mixte).....	60
Tableau V.16 Résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en ciment	
.....	
61	
Tableau V.17 Forces en fonction du dosages Ciment Ardia pour chaque enfoncement	62
Tableau V.18 Résultats des indices C.B.R immédiats pour différents dosages en ciment... ..	
.....	
64	
Tableau V.19 Résultats de la résistance à la compression pour différents dosages en ciment	65

Liste des Figures

Figure I.1 : Répartition des sols salins au nord d'Algérie.....	9
Figure II.1 : Composition du ciment	10
Figure II.2 : Fabrication du ciment.....	11
Figure II.3 : Etapes de fabrication de ciment ardia	16
Figure III.1 : Situation géographique du ciment ardia	21
Figure III.4 : Les Oueds qui alimentent le Chott	24
Figure III.5 : Localisation de site de prélèvement d'échantillon	26
Figure IV.1 : L'appareil de DRX (au niveau du laboratoire de Lafarge)	28
Figure IV.2 : Les pastilles d'échantillon pour DRX.....	29
Figure IV.3 : L'appareil de XRF S8 Tiger (au niveau du laboratoire de Lafarge).....	29
Figure IV.4 : Les pastilles d'échantillon pour XRF S8	29
Figure IV.6 : Analyse granulométrique par tamisage.....	31
Figure IV.7 : Analyse granulométrique par sédimentométrie.....	31
Figure IV.8 : Appareillage d'essai limite d'Atterberg	32
Figure IV.9 : Appareillage d'essai VBS	33
Figure IV.10 : Echantillonnages d'essai VBS.....	33
Figure IV.11 : Machine de Proctor.....	34
Figure IV.12 : Eprouvette de Proctor Normal.....	34
Figure IV.14 : Appareille CBR	35
Figure IV.15 : Appareille de Compression	36
Figure IV.16 : Mesure aux ultrasons sur un échantillon de Proctor	36
Figure V.1 : Résultats d'analyse DRX... ..	38
Figure V.2 : Résultats de l'analyse chimique... ..	38
Figure V.3 Courbes de trois essais de l'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie(sol non broyé)...	41
Figure V.4 Courbes de trois essais de l'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie(sol broyé)...	43
Figure V.5 Classe du sol étudié selon l'abaque de Casagrande.....	44
Figure V.6 Masses volumiques sèches en fonction des teneurs en eau	47

Figure V.7 Courbe des moyennes des forces de pénétration en fonction des enfoncements	48
Figure V.7 Résultats des diffractogrammes pour 8% ciment	49
Figure V.8 Résultats des diffractogrammes pour 10% ciment	50
Figure V.9 Résultats des diffractogrammes pour 12% ciment	50
Figure V.14 Résultats de l'analyse chimique pour 8% de ciment	53
Figure V.15 Résultats de l'analyse chimique pour le dosage de 10% ciment	53
Figure V.16 Résultats de l'analyse chimique pour le dosage de 12% ciment	54
Figure V.17 Courbe de la limite de liquidité	56
Figure V.18 Courbe de la limite de plasticité	57
Figure V.19 Courbe de l'indice de plasticité	57
Figure V.20 Classification selon l'abaque de Casagrande	58
Figure V.21 Valeur de Blue de méthylène pour différents dosages en ciment Ardia.....	59
Figure V.22 Surface spécifique pour différents dosages en ciment Ardia.....	59
Figure V.23 Densité sèche pour différents dosages en ciment Ardia.	60
Figure V.24 Teneur en eau pour différents dosages en ciment Ardia.....	61
Figure V.25 Forces de pénétration pour différents dosages en ciment Ardia.	62
Figure V.26 Courbe des forces en fonction des dosages en ciment pour chaque enfoncement.....	63
Figure V.27 courbe des indices C.B.R immédiats pour différents dosages en ciment Ardia.	64
Figure V.28 courbe de la résistance aux compressions pour différents dosages en ciment Ardia.	65
Figure V.29 Courbe de vitesse de propagation en fonction du dosage ciment Ardia.....	66

Introduction Générale

Le sol salin est l'un des types de sol les plus courants dans différentes parties 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 régions sont délimitées par l'Atlas Tillien au nord et l'Atlas saharien au sud, et s'étendent d'est en ouest jusqu'aux pays voisins du Maghreb. Ses caractéristiques climatiques sont de faibles précipitations et une grande différence de température entre l'hiver et l'été (froid et humide en hiver et chaud et sec en été). Les perturbations fréquentes dans ces zones affectent les routes, les routes, les réseaux divers et les infrastructures des installations civiles et industrielles de faible hauteur, compromettant l'utilisation des sols salins à l'état naturel comme matériau de remblai ou comme fondation de support pour les structures géotechniques. A l'état sec, les sols salins sont difficiles à compacter car leur texture varie de dure à très dure. A l'état humide, il devient très visqueux et donc incompressible. Cependant, leur utilisation peut être conditionnée par le traitement spécifique Ardia600 du liant hydraulique, qui leur confèrera de nouvelles propriétés répondant aux qualités recherchées.

Dans le passé, lorsqu'un sol n'était pas adapté à l'utilisation et aux projets de construction, il était possible de choisir un autre sol avec de meilleures propriétés géotechniques, et les besoins sociétaux n'étaient pas importants. Avec la croissance démographique et les activités, il est parfois impossible de fournir des sols adaptés avec de bonnes propriétés géotechniques. Ainsi, même si ses caractéristiques géotechniques sont de mauvaise qualité, il est souvent nécessaire d'adapter l'ouvrage au type de sol sur lequel il sera construit, comme le sol de sebkha. En raison de sa forte teneur en sel, ce sol est appelé sol salin. L'effet de la salinité affecte les conditions d'humidité du sol en réduisant sa teneur en humidité, de sorte que le sol redevient dur et sec. De plus, le sol salin est un berceau pour d'autres problèmes physiques. Par exemple, faible capacité de charge et haute résistance à la compression.

La construction se passe partout dans le monde, en particulier en Algérie, certaines d'entre elles sont situées dans des sols pauvres, en particulier les grands projets de sols qui vivent dans la sabkha. Les sols de sabkha sont les dépôts d'eau salée les plus récents et sont répandus sur le continent asiatique, en Amérique du Sud, en Australie, aux États-Unis et en Afrique du Nord. L'Algérie compte un grand nombre de marécages qui s'étendent du sud de la Tunisie aux montagnes de l'Atlas au nord de l'Algérie.

Certains sols, en raison de leurs propriétés géotechniques inhérentes et/ou de leur teneur en eau, sont considérés comme stériles ou stériles et donc inexistantes, il est nécessaire de résister au trafic

Introduction Générale

de chantier et de chaussée et, à l'avenir, le transport remplira les sols salins.

Par exemple

Le tissu urbain de M'Sila jouit aujourd'hui d'une grande prospérité économique et d'une responsabilité sociale, ce qui s'est traduit par un réseau routier qui ne cesse de s'étendre au fur et à mesure que le tissu urbain se développe, il s'étend donc aux terrains des zones moins développées et est généralement moins utile que l'urbain. L'État est situé dans une région semi-aride où il y a peu de précipitations et des températures élevées entre l'hiver et l'été. La Wilayat de M'sila abrite une importante région saline et est considérée comme la capitale du Chott El Hodna (Sabkha). L'un des objectifs de cette étude est de caractériser la résistance du sol collecté dans la zone de Chott El-Hodna près de la ville d'Ain Al-Khadra dans la Wilaya de M'sila, et de déterminer les facteurs physiques et mécaniques de ce sol. . Passer une série de tests avant et après les traitements à la chaux et au ciment mélangé.

Chott El Hodna fait partie d'une chaîne de chutes d'eau provenant des eaux de l'Atlas saharien au sud et du Tell Atlas au nord. Des plaines verdoyantes et des paysages verdoyants, s'inscrivant dans une perspective botanique-géographique de la région des steppes maghrébines. Le bassin est situé à l'extrémité orientale du plateau, sa longueur est de 220 km et sa largeur de 90 km. Bassin de 26000 kilomètres carrés, bassin fermé de 8500 kilomètres carrés, le niveau de base du bassin de la vallée de 1100 kilomètres carrés est situé au milieu de son fond plat. C'est ce qu'on appelle le "chat de couvée", situé à une altitude de 400 mètres au-dessus du niveau de la mer, et de forme ovale sur des surfaces non étendues. Elle mesure 77 kilomètres de long et 19 kilomètres de large en eau saumâtre, et bien que sa surface soit plus ou moins inondée, elle ne dépasse pas 80 000 hectares.

La rivière Chott El-Hodna fournit de l'eau à au moins 22 rivières qui nécessitent des ressources supplémentaires en eau douce. Il n'est rempli qu'à moitié d'eau en hiver. L'été est sec et des croûtes de sel recouvrent toute la région

Cette étude vise, d'une part, à déterminer les propriétés de résistance des sols prélevés dans la campagne de Chott El-Hodna située près de la ville d'Ain El Khadra dans la Wilayat de M'sila, et d'autre part, à déterminer la propriétés de résistance du sol. propriétés de résistance du sol. Paramètres physiques et mécaniques de ce sol compacté dans des conditions optimales de surveillance avant et après le traitement de Ciment Ardia600.

Cette thèse est divisée en cinq chapitres divisés en deux parties :

- I. **La première section présente une revue de la littérature sur les sols salins et leur traitement.** Il se compose de deux chapitres :

Introduction Générale

- Le premier chapitre donne un aperçu des sols salins dans le monde, notamment en Algérie, puis définit la structure des sols salins, puis décrit le phénomène de salinisation. Il se conclut ensuite par une série de méthodes expérimentales d'identification et de caractérisation des sols salins.
 - Le deuxième chapitre traite des bases du traitement des sols (techniques de traitement possibles, techniques de réalisation des travaux de traitement, traitement chimique et physique de ciment ardia600).
- II. **La deuxième partie** présente **l'étude expérimentale qui a été menée**, et elle se compose de trois chapitres :
- Le troisième chapitre présente le contexte de l'étude et décrit le site d'échantillonnage : Chott El-Hodna, près de la ville d'Ain Al-Khadra, dans la Wilaya de M'sila.
 - Le quatrième chapitre contient tous les tests expérimentaux et les procédures suivies.
 - Le cinquième chapitre présente et analyse les résultats expérimentaux du sol avant différents niveaux de traitement à la chaux.

L'article se termine par une conclusion générale et une liste bibliographique.

Chapitre I

Synthèse Bibliographique

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I. Caractérisation des sols salés

Les sols salins sont parmi les types de sols les plus courants dans différentes parties du monde, en particulier dans les régions arides et semi-arides. Il comprend les régions arides et semi-arides et la Méditerranée). Ainsi que dans des environnements semi-humides voire humides. Elle est étroitement liée à la source de salinité dans les systèmes géologiques (évaporation), hydrogéologiques (eaux souterraines) ou hydrologiques (eau de mer). La salinité affecte la croissance des cultures et les propriétés du sol, y compris la dispersion colloïdale, la stabilité structurale et la perte de perméabilité hydraulique. Ce chapitre donne un aperçu des sols salins du monde, en particulier en Algérie. Enfin, une série de méthodes expérimentales d'identification et de caractérisation des sols salins sont listées .

II. Les Sols Salés

i) Définition

D'une façon générale, les sols salés sont caractérisés par la présence de sels en excès dans leur profil, ces sels peuvent leur donner certaines propriétés physico-chimiques, qui se manifestent dans le cas des sols évolués par des caractéristiques morphologiques et des structures particulières. D'après la classification française (AUBERT 1967), les sols salés sont divisés en deux sousclasses suivant que leur structure est dégradée ou non par l'action du sodium, la première comporte les sols à alcalis (sols à alcalis non lessivés, solonetz, solod), et la deuxième les sols salins proprement dit. Pour mettre en évidence l'action des sels solubles sur les caractères physico-chimiques du sol, il paraît utile de rappeler rapidement les définitions essentielles des sols salés et à alcalis.

2) Caractérisation des sols salés

Les sols salins sont parmi les types de sols les plus courants dans différentes parties du monde, en

Synthèse Bibliographique

particulier dans les régions arides et semi-arides. Il comprend les régions arides et semi-arides et la Méditerranée).

Ainsi que dans des environnements semi-humides voire humides. Elle est étroitement liée à la source de salinité dans les systèmes géologiques (évaporation), hydrogéologiques (eaux souterraines) ou hydrologiques (eau de mer).

La salinité affecte la croissance des cultures et les propriétés du sol, y compris la dispersion colloïdale, la stabilité structurelle et la perte de perméabilité hydraulique.

Ce chapitre donne un aperçu des sols salins du monde, en particulier en Algérie. Enfin, une série de méthodes expérimentales d'identification et de caractérisation des sols salins sont listées .

i) 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_3^{2-} peut exister, les cations les plus habituels sont : Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , et dans quelques cas K^+ .

ii) 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 croûtes calcaires, avec une quantité de 50-70 % de carbonate de calcium, les croûtes gypseuses qui contiennent 60-80% de gypse et les croûtes salées, qui sont constituées d'un mélange de différents sels et en particulier de chlorures.

b) Caractéristiques des sols salés :

Tout sol qui contient des sels solubles en quantités anormalement élevées est appelé salin. La mesure effectuée est une mesure de salinité, Les sels solubles sont filtrés par les précipitations, et la majeure partie d'entre eux est évacuée du profil du sol. Au contraire, les sols salins sont prédominants 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 zones humides et tout sol contenant du sodium échangeable en quantité anormalement élevée est appelé sodique. La mesure prise est la mesure de la sodomie. Ces sélections nécessitent des méthodes spécifiques. Si le phénomène de lavage se produit, il reste limité au profil ; Les sels ne sont pas exportés vers l'extérieur, mais au contraire ont tendance du fait de l'évaporation et du manque d'humidité à se concentrer dans le profil, notamment dans les horizons superficiels.

c) Classification des sols salés

Basé sur la concentration en sel et le rapport en concentration $\text{Na}/(\text{Ca} + \text{Mg})$, les sols sont classés comme salin, sodique ou salin-sodique. La concentration totale en sels est habituellement mesurée par la conductivité électrique (CE) exprimée en $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Si elle égale ou supérieure à $4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, le sol est salé. Les sols sodiques sont définis comme étant des sols qui ont un rapport d'adsorption de sodium (SAR) supérieur à 15. Le SAR est calculé comme suit : $\text{SAR} = [\text{Na}^+] / [(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2]^{1/2}$ (Cramer, 2002).

Sols salés

On distingue deux grands groupes :

- **Les sols à complexe calcique dominant (solontchaks)** : le Ca^{++} (sous des formes diverses : bicarbonates, carbonates, nitrates) existe en proportion importante par rapport à NaCl . Vu l'adsorption préférentielle de Ca^{++} sur Na^+ , l'ion Na minoritaire et bloqué dans le complexe absorbant. L'ion Na est représenté à raison de moins de 15% dans la capacité d'échange. La structure est bonne et ces sols sont alors stables.
- **Les sols à complexe sodique dominant** : présentent la tendance inverse. Il faut toutefois faire une distinction suivant leur origine.
 1. **Les sols à alcali non salés** : proviennent d'une roche éruptive riche en minéraux sodiques, en climat sec où l'élimination de Na^+ est insuffisante par lessivage. Dans ce cas, la saturation en Na^+ du complexe absorbant est plus de 15 %. Il y a hydrolyse en période pluvieuse d'où l'augmentation du pH et la destruction de la structure du sol.
 2. **Les sols à alcali salés** : sont des sols à nappe salée avec une faible proportion de Ca^{++} . Le Ca^{++} bloque Na^+ aussi longtemps que la nappe salée reste proche de la surface. Dans ce cas, les argiles

s'hydrolysent peu, le pH ne monte pas plus que 8-8,5 et la dégradation de la structure n'est que partielle.

Sols sodiques et à alcali

- La classification des sols sodiques est délicate car ils peuvent résister aux changements saisonniers ou induits par l'homme. Plusieurs appellations sont utilisées : sol salin, sol salin, sol sodique ; aucune ne couvre tous les sols concernés.
- L'appellation Sols Salsidiques proposée par Servant en 1975 semble bien meilleure. Deux sous-classes se distinguent selon la présence ou l'absence de l'horizon des structures dégénérées. Dans la première sous-catégorie des sols sableux à structure non dégradée, on distingue deux groupes :
 - Comme le sol salin contient des complexes calcium-magnésium, la teneur en sodium des complexes d'échange est inférieure à 15 %. Les sous-groupes peuvent être les suivants :
 - modal, friable et sursalé en surface (hyper-solontchak, profil salin A ou C) (Servant, 1975).
 - modal, friable en surface, sursalé en profondeur (crypto-solontchak à profil salin de type B ou D (Servant, 1975)
 - friable en surface, mais hydromorphe en profondeur,
 - à croûte saline en surface (en pratique, toujours hydromorphe).
 - à horizon d'accumulation gypseuse (en pratique, toujours hydromorphe).
 - à salant hygroscopique,
 - à sulfures acidifiants.

La deuxième sous-classe comprend les sols sodiques, dont un horizon sur au moins 20cm présente une structure dégradée, une forte compacité, sous l'influence de la teneur élevée du complexe en sodium échangeable. Suivant les sols (teneur en argile et type de celle-ci, teneur en matière organique et type de celle-ci) la valeur critique de Na/T varie. Elle est toujours au moins de 10%. Actuellement K et Mg ne sont pas pris en compte : le premier est normalement en quantité faible, l'action du second est encore mal élucidée.

La classification Française paraît la plus appropriée dans les zones arides et en particulier pour les sols salés, puisque selon Halitim (1988), la classification Américaine est

pragmatique et classe les sols dans des ordres différents en fonction d'une faible variation de l'évapotranspiration ou de la pluviométrie.

Dans la classification Française, les sols salés sont rangés dans la classe des sols salsodiques, elle – même subdivisée en deux sous classes :

A. *Sous classe des sols sodiques à structure non dégradée* : ce sont des sols salins (solontchak), soumis à l'influence d'une nappe salée peu profonde, riches en sels de sodium, caractérisés par une conductivité électrique supérieure à 4 dS.m^{-1} (Duchauffour, 1988).

A-1. *Sols salins à complexe calcique (solontchaks)* : très fréquents en Algérie (FAO, 2005), caractérisés par un ESP $< 15\%$ et un profil peu différencié (Servant, 1975 ; Duchauffour, 1976). Ils se rencontrent dans les zones steppiques ou désertiques dans lesquelles des nappes salées contiennent à l'instar des sels solubles, une quantité importante de calcium qui alimente le profil (Halitim, 1973).

A-2 *Sols salins à complexe sodique (Solontchaks sodique)* : ce type de sol est caractérisé par un ESP $> 15\%$, il se rencontre en bordure de mer, ou dans les lagunes côtières, sa structure tend à se dégrader et devient poudreuse (Duchauffour, 1988).

B. *Sous classe des sols sodiques à structure dégradée* : ce sont des sols alcalins à structure détruite (Duchauffour, 1976). Selon Duchauffour (1988), on distingue trois (03) groupes selon les étapes d'évolution des profils :

B-1 : *Sols alcalins non lessives (solontchaks solonetz)* : leur profil est de type AC ou A (B) C. Ils sont fréquents en Algérie (Durand, 1983).

B-2. *Sols alcalins lessives de type ABC*. L'horizon de surface A, pauvre en argile (migration par l'effet de lessivage) (Duchauffour, 1983). Ces sols existent en Algérie, mais sont très localisés dans les zones humides (Durand, 1983).

B-3. *Sols alcalins dégradés (Solonetz)* : ils présentent une structure dégradée complètement en surface avec un pH de 4 à 5 et en profondeur un pH élevé de 9 à 10.

Selon Loyer (1995), on distingue selon le référentiel pédologique Français (Baize et Girard, 1995), sept références : Sali sols (1 référence), salisodisols (1 référence), Salisols (2 références), sodisols (3 références).

d) Effet de la salinité et la sodicité sur le sol

Dans les sols salins, la présence excessive de sels solubles neutres floccule partiellement les argiles mais les maintient stables, alors que dans les sols alcalins, l'excès de sodium échangeable favorise la dispersion des argiles et déstabilise la structure du sol. Par conséquent, ces sols sont sensibles aux croûtes de surface qui favorisent le ruissellement de surface (Hassan, 2005). La consolidation du sol peut également réduire fortement l'infiltration d'eau dans le sol et conduire à une morphologie hydrique plus ou moins

prononcée du sol selon sa texture et sa localisation topographique dans le paysage (Douaoui et al., 2004).

Un taux de sodium échangeable élevé a pour effet une dispersion des agrégats, ce qui conduit à une réduction de la perméabilité, de la porosité et un tassement des sols. Du point de vue agricole, cela se traduit d'une part par la prise en masse du sol qui devient très compact, dur, difficile à labourer, et d'autre part, par des difficultés de germination, et d'enracinement des plantes (Fig. 3). Par ailleurs le sol devient totalement asphyxiant, ce qui s'accompagne d'une atrophie du système racinaire, de son développement de plus en plus superficiel, avec des conséquences défavorables sur la nutrition minérale des plantes, et la baisse considérable des rendements.

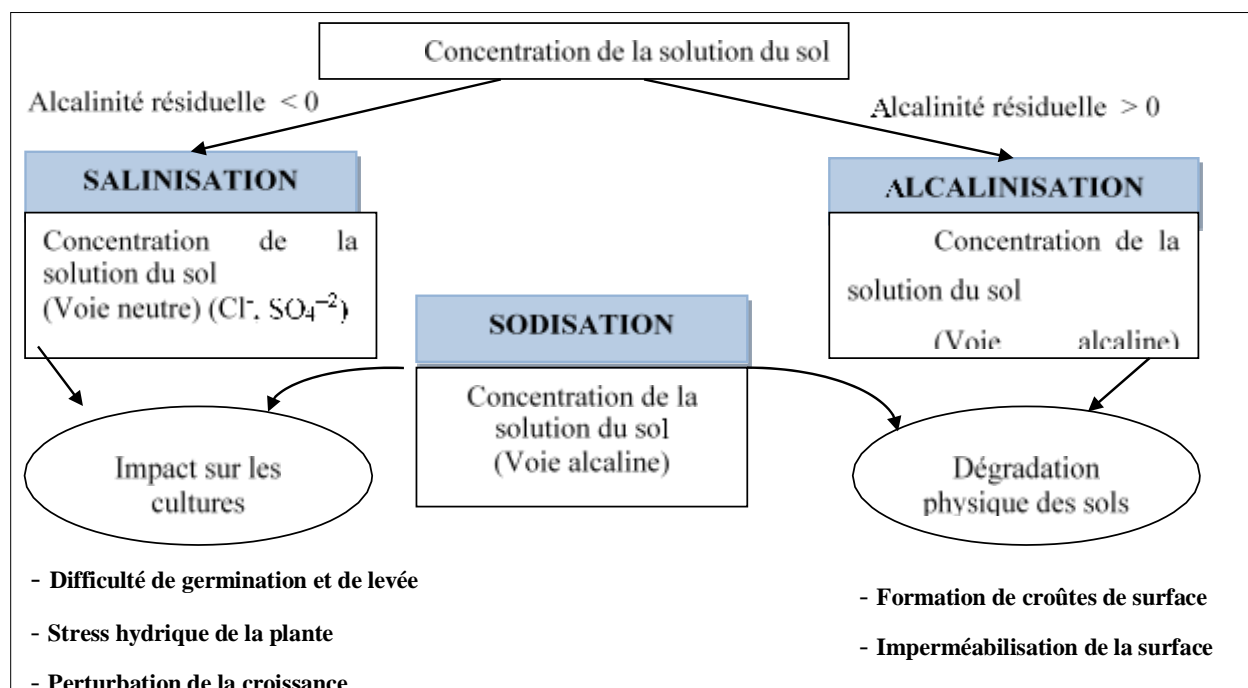


Figure 3 - Processus des différentes voies de la salinisation et leurs impact sur la dégradation des sols et sur les cultures. (Tabet, 1999)

Une grande quantité de sels solubles peut affecter les propriétés pédologiques, notamment la dispersion des colloïdes, la stabilité structurale et la chute de la perméabilité hydraulique (Servant, 1970 ; Cheverry, 1972 ; Agassi et al 1981 ; Aubert 1983 ; Halitim, et al 1984 ; Daoud, 1993).

L'excès de sels dans un sol modifie les propriétés physiques et chimiques. Cette altération des conditions édaphiques constitue un stress indirect pour la croissance des plantes (Gregory, 2005).

Effets sur les propriétés physiques

- ✓ C'est par leurs cations que les sels solubles affectent les propriétés du sol. Il s'agit essentiellement d'ions sodium. L'effet néfaste de cet ion à l'état échangeable se traduit par la dispersion des colloïdes du sol, ainsi :
- ✓ **Structure dégradée** : La structure soit complètement dégradée lorsque la teneur de sodium échangeable est de 12 à 15 % dans les sols salés (Derdour, 1981 in Kidari, 1991). La structure du sol est complètement dégradée, lorsque la teneur en Na échangeable est très élevée, ou il y aura une dispersion des argiles et la destruction de la structure (Duchaufour, 1983 ; Robert, 1996).
- ✓ **Réduction de la perméabilité** : L'influence du sodium sur la perméabilité du sol dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquelles le pourcentage d'argile et la nature minéralogique du sol, la concentration de la solution de celle-ci (Revee et al., 1954 ; Brooks, 1956 ; Gadnet et al., 1959, Kemper et Kock, 1956 in Kidari, 1991)
- ✓ Mauvaise stabilité structurale ;
- ✓ Faible disponibilité de l'eau à la plante (Halitim, 1973 ; Duchuffour, 1976).

C. Effets sur les propriétés chimiques

L'excès de sels présente un effet sur les propriétés chimiques, notamment sur le pH et l'ESP (Oustani, 2006).

- **pH** : la réaction du sol est influencée par la nature des sels. Alors que certains sels sont acidifiants (CaSO_4 , KCl , MgSO_4), d'autres sont alcalinisants (NaHCO_3 , CaCO_3 , NaCO_3).
- **ESP** : le taux de sodium échangeable a une grande importance dans les sols alcalins, vu que ces derniers retiennent de faible concentration en sels solubles et la grande quantité de sodium se trouve sous la forme échangeable. Tandis que dans le cas des sols salés, la grande partie du sodium se trouve dans la solution du sol.

d) Effets de la salinité sur les propriétés du sol

La salinité est un facteur limitant non négligeable du fait de diverses modifications physico-chimiques conduisant à une augmentation du taux de sodium échangeable dans le sol, ce qui conduit à la défloculation des argiles et au colmatage des pores, gênant ainsi la circulation de l'eau. Le sol devient ainsi imperméable et donc stérile.

Chez la plupart des plantes cultivées, l'effet de la salinité se manifeste généralement par une réduction de la croissance et du développement (Munns et al., 1983). Cet effet délétère entraîne des changements morphologiques, physiologiques, biochimiques et moléculaires qui affectent négativement la croissance et la productivité des plantes (Ashraf et Harris, 2004).

L'accumulation de salinité dans le sol est un grave problème environnemental qui menace les processus physiologiques des plantes et la fertilité du sol (Halitim, 1988).

E. Effet sur la structure du sol

Les cations de sodium ont tendance à causer des dommages structuraux en favorisant la dispersion des colloïdes minéraux. D'une manière générale, la dispersion dépend de deux facteurs :

1- Le nombre de cations Na^+ adsorbés (ESP), qui augmente pour faciliter la dispersion.

2- La concentration de la solution saline au contact de la phase solide dont l'augmentation limite la dispersion (Calvet, 2003).

Mise en valeur des sols salés

La restauration des terres salines et leur aménagement nécessitent des investissements très importants, qui doivent être évalués pour démontrer la rentabilité des investissements nécessaires aux différentes étapes (Oustani, 2006).

Une bonne utilisation agricole des sols salés nécessite :

- Éliminer l'excès de sel (lessivage) et éliminer les sources de sodium (vidange de la nappe phréatique). Si le sol est perméable et que l'eau (pluie, irrigation) est abondante et de bonne qualité.

- Utilisez des plantes qui tolèrent le sel.

- Supplémentation de la fertilité avec des améliorateurs organiques et minéraux.

3) Répartition des sols salés

Dans le monde

A l'échelle mondiale, les sols salés occupent des surfaces étendues et constituent une grande ampleur pour l'agriculture. Leurs distribution géographique se superpose presque entièrement à celle des zones arides et semi arides et des zones côtières (Durand, 1983 ; FAO, 2005). La surface affectée par la salinité dans le monde est évalué à 954,8 millions d'hectares (Tableau 1), soit 23 % des terres cultivés (FAO, 2008). Wri (2002), propose un classement des zones arides basé sur les valeurs du rapport ratio précipitation annuelle/évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (Figure 1), le monde est de ce fait, divisé en :

- Zone hyper aride couvrant environs 11 millions de Kilomètres carrés, soit 8% des terrestotales et elle correspond principalement au désert du Sahara.

- Zones arides, semi-arides et subhumides sèches qui couvrent près de 54 kilomètres carrés principalement concentrées en Asie et Afrique.

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

Régi ons	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

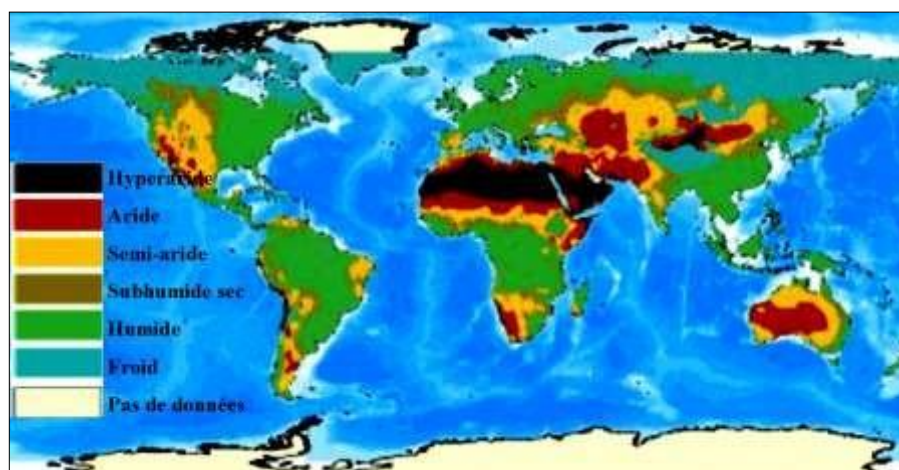


Figure 2: Carte des zones arides dans le monde (wri, 2002)

En Algérie

La salinisation des sols est un problème majeur dans le monde. La surface saline mondiale est estimée à environ 932,2 millions d'hectares et se répartit comme suit (Szabolcs, 1989), une surface isocèle de 450 mm apparaissant comme la limite supérieure pour les sols fortement salins. L'Algérie possède plusieurs types de sols, notamment sous les climats arides et semi-arides. le phénomène de salinisation dont une bonne partie se trouve localisée dans les régions steppiques où le processus de salinisation est plus marqué du fait des températures élevées durant presque toute l'année, du manque d'exutoire et de l'absence de drainage efficient.

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

Voir (figure 1).

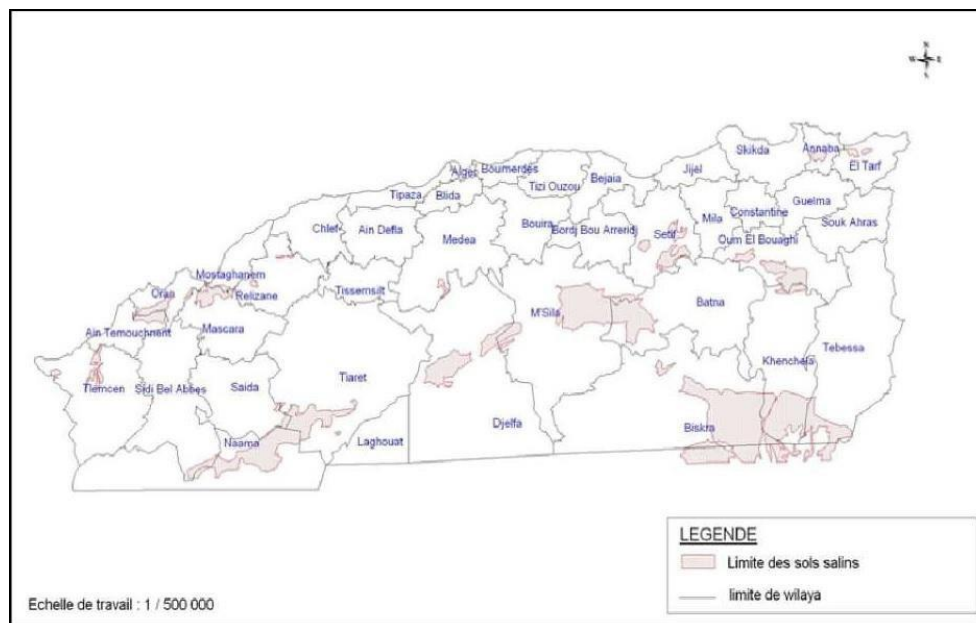


Figure I.1 : Répartition des sols salins au nord de l'Algérie.

Chapitre II

Liants hydrauliques et Techniques de Traitement

Chapitre II : Liant hydraulique et techniques de traitement

Le Ciment

Définition

Mélangé à des gravillons, du sable, des adjuvants et de l'eau, le ciment est l'élément de base indispensable pour la fabrication du béton dont il est le composant actif.

Le ciment est produit en portant à une température de 1450°C un mélange de calcaire et d'argile. On obtient alors des nodules durs appelés clinker.

Le clinker additionné de gypse est broyé très finement pour obtenir le ciment "Portland". L'ajout au clinker et au gypse, lors du broyage, d'autres éléments minéraux (laitiers de hauts fourneaux, cendres de centrales thermiques, fillers calcaires, pouzzolanes naturelles ou artificielles) permet l'obtention des différentes catégories de ciment à "ajout".

Mélangé à des gravillons, du sable, des adjuvants et de l'eau, le ciment est l'élément de base indispensable pour la fabrication du béton dont il est le composant actif.

Le ciment utilisé dans cette étude est le Ardia 600® un liant routier à base de clinker destiné aux travaux neufs ou d'entretien de différentes natures (traitement de sol, recyclage, chaussées rigides) ce ciment a été choisi pour sa capacité de résister aux agressions chimiques et pour le fait que tous les travaux en béton enterré sont faits avec ce ciment.



Figure II.1 : La Composition du Ciment

Le ciment c'est le matériau du 20e siècle, fréquemment une chaux, additionnée d'adjuvant comme les tuiles ou briques concassées dont l'argile a des propriétés hydrauliques. La pouzzolane (terre volcanique de Pouzzoles, région de Naples, Italie) est particulièrement utilisée comme adjuvant. Le ciment ne prend son acception contemporaine qu'au XIX^e siècle, quand Louis Vicat identifie le

Liants Hydrauliques et Technique De Traitement

phénomène d'hydraulicité en 1817 et celle des ciments (qu'il appelait chaux éminemment hydrauliques ou chaux limites) en 1840.

Ainsi, le XXe siècle a ouvert la voie aux ciments artificiels qui prendront progressivement le pas sur les chaux. L'accélération sera plus manifeste à l'issue de la deuxième guerre mondiale lorsque le secteur du bâtiment produit essentiellement des logements neufs bâtis à partir d'éléments préfabriqués et, n'utilisant plus les chaux. C'est l'époque charnière où la chaux est en passe d'abandon, où son ancienneté est une marque d'archaïsme alors que les ciments améliorent les performances des liants.

Le développement n'a pu s'effectuer que grâce à l'apparition de matériels nouveaux : fours rotatifs et broyeurs à boulets en particulier. La première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer. Le développement n'a pu se faire que grâce à la naissance de matériel nouveaux : four rotatif et broyeur à boulets surtout. Les procédés de fabrication se peaufinèrent sans cesse : en 1870, pour produire une tonne de clinker (constituant de base du ciment) il fallait 40 heures, aujourd'hui, il faut à peu près 3 minutes.

. La production en Algérie s'accroît comme le montre les statistiques suivantes (source : Secrétariat d'état au plan Algérien) :

1977 : 2,2 millions de tonnes, 1982 : 8,0 millions de tonnes

1979 : 4,5 millions de tonnes, 1985 : 10,5 millions de tonnes

Les étapes de la fabrication du ciment

Les étapes de fabrication de ciment passe par série d'étapes sont repartie comme suit :

- ✓ La carrière
- ✓ Le concassage
- ✓ Le broyage et le séchage
- ✓ Le préchauffage et la cuisson
- ✓ Le stockage du clinker, le broyage du ciment
- ✓ Le stockage et les expéditions
- ✓ La salle de contrôle et le contrôle qualité

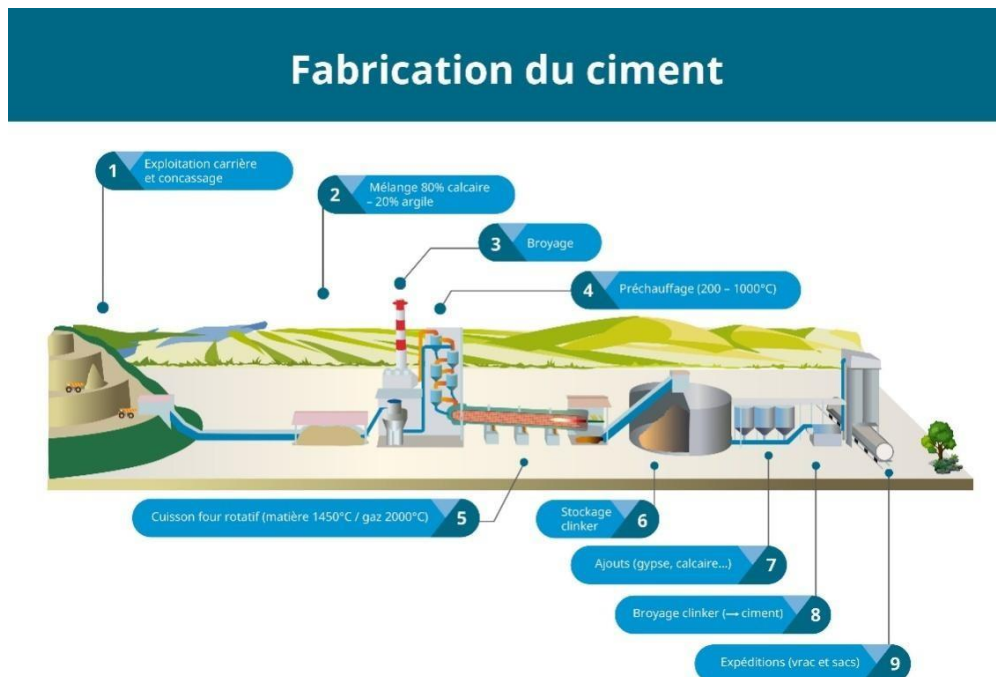


Figure II.2 : Fabrication du ciment

Types de ciment

Les ciments peuvent être classés en deux classes soit : en fonction de leur résistance normale à 28 jours soit en fonction de leur composition

Selon leur composition

Les ciments incorporent les composants suivants en diverses proportions : clinker et laitier de haut fourneau, éventuellement cendres volantes siliceuses et calcaires. Suivant la proportion de chacun de ces éléments, on peut les classer de manière standardisée. La désignation des ciments est en effet normalisée . Depuis 1981, il existe six catégories de ciments courants reconnus :

- ◆ Ciment Portland avec ajout CPJ35
- ◆ Ciment Portland artificiel (CEM I)
- ◆ Ciment Portland composé (CEM II)
- ◆ Ciment de haut fourneau (CEM III)
- ◆ Ciment pouzzolanique (CEM IV)
- ◆ Ciment composé (CEM V).

Les ciments blancs ne constituent pas une catégorie et rentrent dans la catégorie CEM I ou CEM II.

Selon leur résistance normale

Il y a trois classes de la résistance normale à 28 jours des sous classes sont associées à ces trois classes afin de désigner des ciments dont les résistances à jeune âge sont élevées, ces classes sont notées classe « 32,5 », classe « 42,5 », classe « 52,5 ».

• Réactions physico-chimiques du ciment

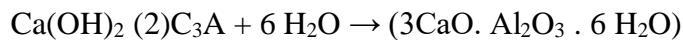
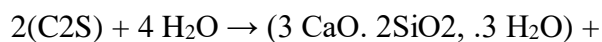
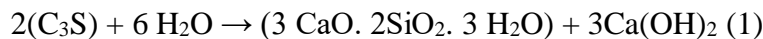
Le ciment est un liant hydraulique: une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Les ciments Portland sont des liants hydrauliques composés principalement de silicates de calcium hydrauliques qui font prise et durcissent en vertu d'une réaction chimique à l'eau appelée hydratation. La composition typique de son clinker est : 67% de CaO, 22% de SiO₂, 5% de Al₂O₃, 3% de Fe₂O₃

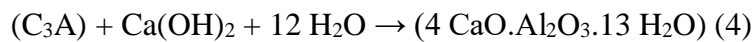
et 3% d'autres composés et il contient 4 phases majoritaires qui sont l'alite (3CaO.SiO₂ ou C₃S), la bélite (2CaO.SiO₂ ou C₂S), la célite qui est le mélange de l'aluminate de calcium (3CaO. Al₂O₃ ou C₃A) et du Ferro aluminate de calcium (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ ou C₄AF). Plusieurs autres phases, comme les sulfates d'alcalins ou l'oxyde de calcium s'y retrouvent en très faibles quantités.

Reaction Chimique :

Le ciment en présence d'eau se solidifie. Les principales réactions chimiques responsables de ce phénomène sont les suivantes :



(3)



La réaction (1) est rapide ; elle est à l'origine de l'augmentation des résistances mécaniques à court terme. Le produit (3 CaO. 2SiO₂. 3 H₂O) est un silicate de calcium hydraté : c'est une tobermorite. La réaction (2), quant à elle est lente et est responsable de l'amélioration des propriétés mécaniques à long terme.

L'aluminate tricalcique s'hydrate très vite et nécessite l'addition d'un régulateur de prise de masse, le gypse (CaSO₄ .2 H₂O) qui permet la formation de fins cristaux d'ettringite (3 CaO. Al₂O₃ .3 CaSO₄ .32 H₂O) retardant la prise en masse du ciment.

L'équation chimique de formation de l'ettringite est la suivante :



Lorsque l'on mélange une argile ou une latérite à du ciment en présence d'eau, on assiste aux mêmes réactions chimiques comme pour les mélanges argile-chaux. La portlandite produit lors de l'hydratation du ciment réagit avec le dioxyde de carbone de l'air et les minéraux argileux pour donner respectivement de la calcite et du silicate de calcium ou aluminate de calcium hydratés. L'échange cationique et la floculation-agglomération s'observent aussi dans les mélanges argile-ciment. La réaction pouzzolanique impliquant les

minéraux argileux n'est pas prépondérante compte tenu de la disponibilité de la portlandite.

Les principaux ciments selon la classification NA largement inspirée d'AFNOR, en fonction de leur composition et de leur résistance, sont :

- Les ciments CPA, ciments Portland purs (composé du seul clinker) ;
- Les ciments CPJ, ciments Portland composés, qui contiennent au moins 65% de clinker.
Ce sont les plus utilisés en l'Algérie,
- Les ciments CHF, ciments de hauts-fourneaux, qui contiennent entre 60 et 75% de laitier de hauts-fourneaux.
- Les ciments CLK, ciment de laitier de clinker, qui contiennent 80% de laitier de hauts-fourneaux,
- Les ciments CLX, ciment de laitier à la chaux,
- Les ciments prompts.

Les ciments sont également classés en fonction de leur résistance à la compression. Les ciments produits et commercialisés en Algérie, sont essentiellement constitués de CPJ32.5 et 42.5, types les plus demandés et CRS (Ciment résistant aux sulfates) largement utilisé dans les régions du sud. Le ciment fabriqué localement est livré en vrac, soit en sac double ou triples plis de 50Kg.

Réactions physiques

Différentes réactions physiques se produisent pendant la prise du ciment. Il y a d'abord la formation d'une pâte de particules solides. A cet effet, les espaces inter particules sont interconnectés et remplis d'eau dite eau « capillaire ». Se développe ensuite à la surface des grains de ciment, un revêtement d'ettringite empêchant la prise éclair. La réaction d'hydratation du ciment continue et après deux heures, il y a formation des cristaux fibreux qui sont des silicates de calcium hydratés (CSH). Ces composés connus sous le label de tobermorite lient les composantes du mélange argile-ciment. Ces cristaux se développent et contribuent de façon notable à l'amélioration des propriétés mécaniques de ces mélanges.

LES PROBLEMATIQUE

Définition

Liant Hydraulique Routier à délai de maniabilité élevé

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

Ardia 600®

produit localement, Ardia 600® est un liant routier à base de clinker destiné aux travaux neufs ou d'entretien de différentes natures (traitement de sol, recyclage, chaussées rigides).

Caractéristiques :

Spécifiques du liant :

Masse volumique = 3t/m^3

Densité apparente = 1,1

Refus $90\mu\text{m}$: $\leq 0,5\%$

Offre de service Ardia 600®

- Accompagnement technique (Étude d'identification des sols, Étude de formulation, Prescriptions techniques)
- Livraison du Liant Hydraulique Routier sur vos chantiers.
- Fourniture d'un stockage tampon sur chantier pour assurer la disponibilité continue du liant hydraulique routier.
- Support technique assuré par un expert international du traitement de sol : Contrôle et suivi de chantier. Pour toute commande supérieure à 400T.

Applications :

- **Amélioration et Traitement des sols** : Pour la réalisation des remblais, couches de forme et d'assises de chaussées, des pistes, des plates-formes industrielles, des aires de stockage, parkings, routes forestières et d'exploitations agricoles.
- **Traitement des arases / « PST » Partie Supérieure de Terrassement** : Les performances de l'ARDIA 600 permettent l'optimisation des structures aussi bien avec des sols fins qu'avec des sols sableux ou graveleux avec fines.
- **Retraitement en place des chaussées dégradées** : La solution ARDIA 600 permet de valoriser les matériaux en place pour les routes nationales, départementales et voiries communales.

Stabilisation et Traitement des Sols

Une Solution pour toutes les plates-formes (routières, logis- tiques...)

Le traitement des sols en place est une tech-nique d'amélioration et de stabilisation des remblais, de la partie supérieure des terrasse- ments de la couche de forme et des couches d'assise.

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

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

Les avantages du pack Ardia 600 :

En complément du liant, nous offrons les services suivants :

Accompagnement lors des campagnes d'échantillonnages sur site

Identification des sols en Laboratoire

- Granulométrie et sédimentométrie
- Limites d'Atterberg
- Teneur argile

Analyse technico-économique des possibilités de traitement

- Choix des options de traitement
- Simulation impact cout/délai

Formulation

- Indice de Portance Immédiat IPI et CBR
- Traficabilité et Délai d'ouvrabilité
- Comportement mécanique et classe

de résistance

Optimisation du dimensionnement

Prescriptions techniques Planche d'essai

- Réalisation

- Control et suivi

Recyclage de Chaussée :

Une Solution économique pour entretenir des chaussées dégradées

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

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

Chaussée Rigides

Une Solution pour la construction, le renforcement et l'entretien des chaussées

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

La chaussée rigide peut être en : dalles courtes non armées et non goujonnées, dalles courtes non armées et goujonnées ou béton armé continu, ou en BCR (Béton Compacté Routier).

La structure repose directement sur une couche de fondation en béton maigre ou sur une grave traitée au Liant Hydraulique routier, ou sur l'ancienne chaussée dans le cas d'un renforcement.

Ce type de structure est adapté au trafic spéciaux et au trafic lourds.

AVANTAGES DES CHAUSSÉES EN BÉTON :

- Le bilan économique à long terme est très favorable du fait de la longévité de la chaussée en béton et de son entretien réduit.
- Le béton apporte aux chaussées ses performances, notamment sa durabilité (résistance à la chaleur, au froid et au gel), et sa solidité (résistance aux charges, à l'érosion et aux agressions chimiques).
- Le béton permet de réaliser des chaussées intégrées à l'environnement en

employant des granulats, des colorants et des traitements de surface qui offrent de nombreuses possibilités décoratives.

- Le béton est un matériau simple à réaliser et à mettre en œuvre.

Chapitre III

Description du Site étudié

« Chott El-Hodna »

Chapitre III : Description du site étudié

III. Présentation de la zone d'étude « Chott El-Hodna »:

El-Hodna signifie la brassée dans un cadre montagneux. Le mot désigné pour ses habitants une région aux caractères précis. Ce sont les plaines situées à l'Est et au Nord d'une vaste Sebkhha, plaines qu'enrichissent de leurs eaux les rivières originaires des systèmes dutell au Nord et l'Atlas saharien au Sud (MIMOUNE, 1995).



Figure 1.1: Principales zones humides d'Afrique du Nord et situation du Chott El-Hodna (MAIGLER, 1999)

Description du Chott

Le Chott El-Hodna fait partie d'une série de chotts qui se sont développés là 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, orienté Ouest-Nord, Ouest- Est, Sud- Est, qui s'étend sur 220 Km le long et 90 Km de large, est coincé entre deux formations montagneuses atteignant 1800 à 1900 m d'altitude au Nord et 600 à 900 m au Sud, c'est hydrologiquement un bassin fermé de 26000 km².

La cuvette du Hodna, d'une superficie de 8 500 km², qui sert de niveau de base aux oueds du bassin, occupe en son milieu de bas fond-plat une superficie de 1 100 km², c'est cela que l'on appelle «le Chott El-Hodna».

Surface d'épandage des crues, le Chott a une forme elliptique, une eau salée et s'étend 77 Km de long et 19 km de large. Sa surface inondée, quoique variable, ne dépasse jamais 80 .000 ha. Son alimentation est assurée par au moins 22 cours d'eau principaux auxquels il faut ajouter des sources d'eau douce. Il se met en eau uniquement en hiver, sec et salé en été, des croûtes de sel couvrent toute son étendue (BOUMEZBEUR, 2002).

Aspect géographique et administratif

Chott El-Hodna avec sa superficie importante (362.000 hectares) ou (1.100Km²) (MESSAD et MOUSSAI, 2015) chevauche deux wilaya, M'sila (1000Km²) et Batna (100Km²) au Sud-Est d'Alger, il est isolé de la mer Méditerranée par 150 km² de chaînes de montagnes. Il occupe le centre la cuvette du Hodna, il se situe à 40 Km au Nord-Est de la ville de Boussaâda et à 80 Km au Nord-Ouest de la ville de Biskra.

Il est situé entre les lignes latitudinales (35°18' et 35°32') et longitudinales (4°15' et 5°06'), à une altitude moyenne de 392 m (MESSAD et MOUSSAI, 2015) et fait partie de dix communes de la wilaya de M'Sila et deux de la wilaya de Batna (FIG.1.2).

Le Chott El-Hodna est limitée :

- Au Nord par la chaîne du Bibans et les monts du Hodna (1400-1800 m).
- Au Sud par l'extrémité orientale de l'Atlas Saharien (prolongement des monts d'Ouled Naïl (1470 - 1675 m) et les Monts du Zab (980 m).
- A l'Est par le Djebel Metlili (1495 m).
- Au Sud-Est la ville de Barika et le Djebel Tsenia.

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

-

A l'Ouest par les hautes plaines steppiques algéro-oranaises (900 - 1200 m) (JEAN et FRANCO, 1995) (FIG. 1.3).

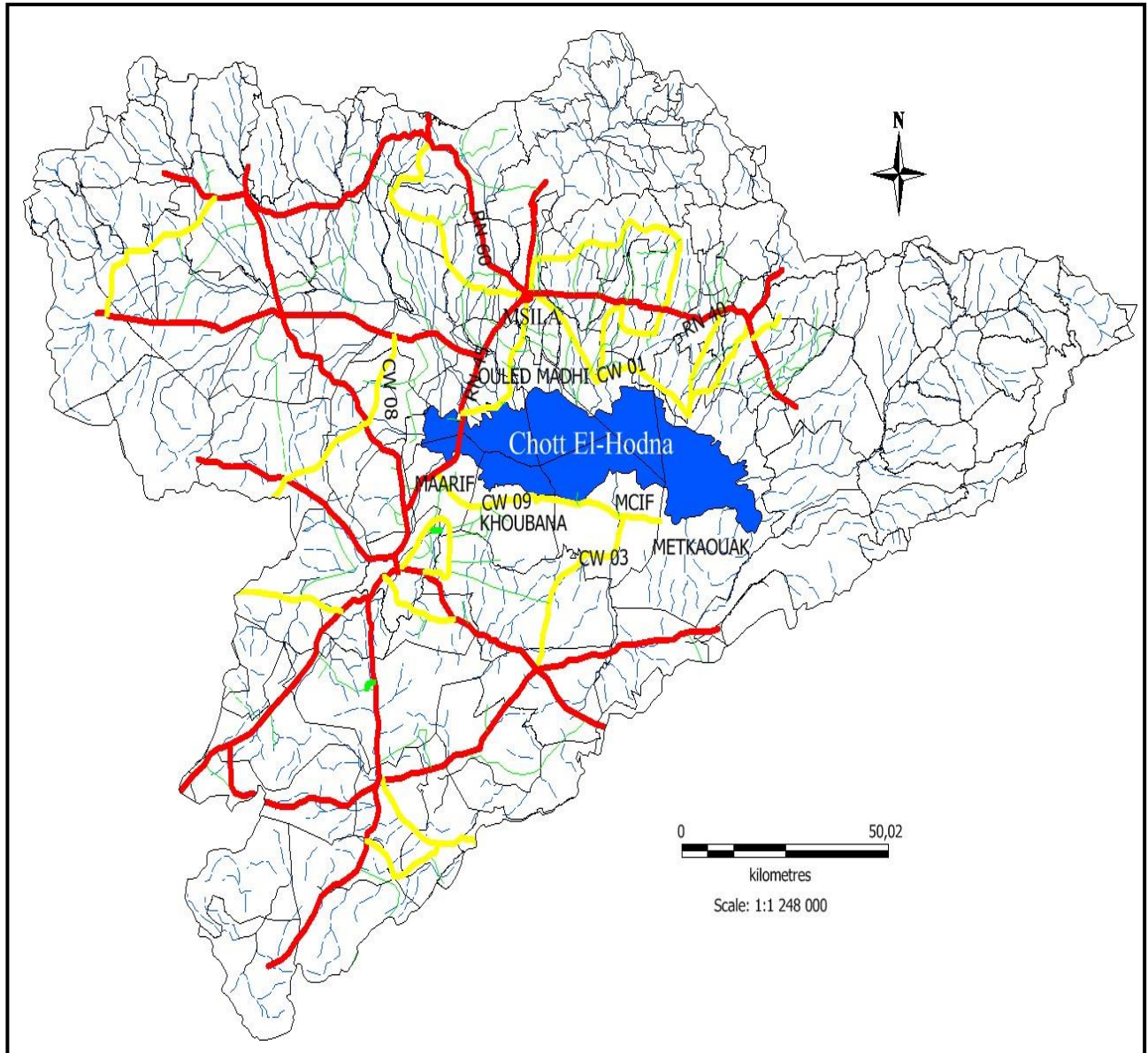


Figure 1. 2: Situation géographique de Chott El-Hodna.

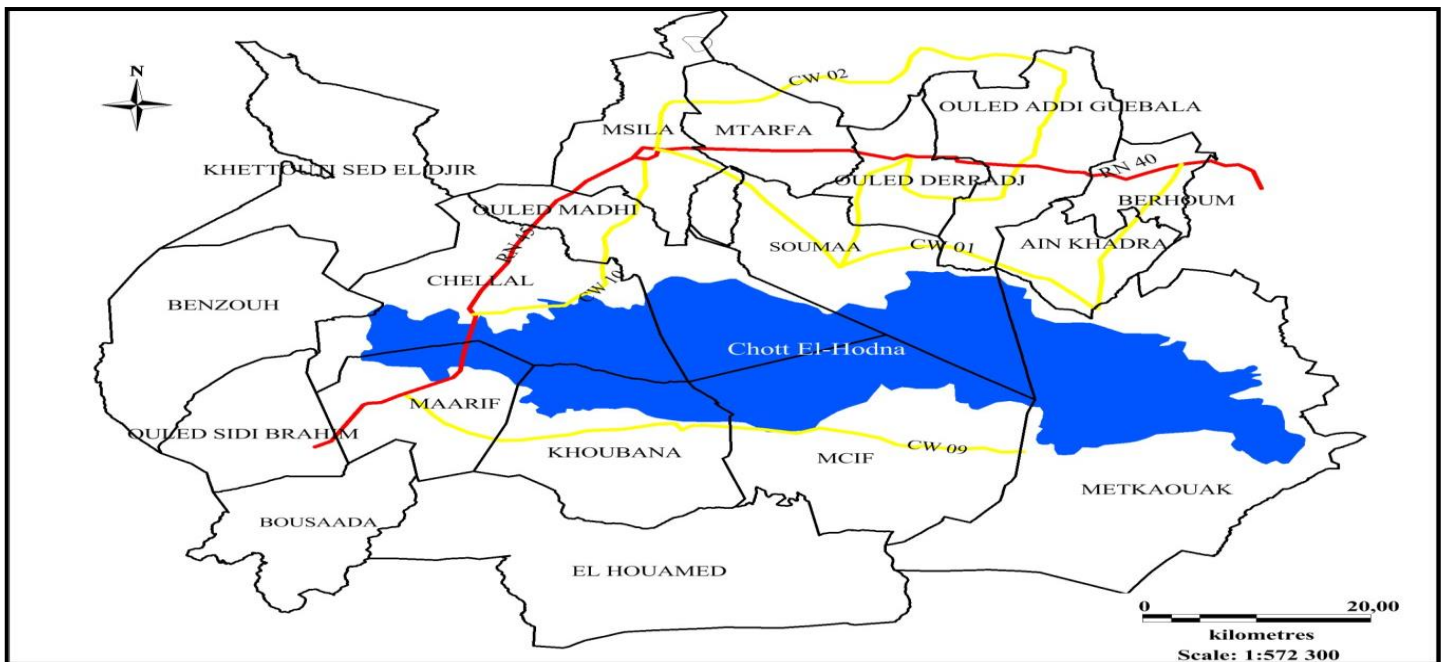


Figure 1.3: Localisation de Chott El-Hodna par rapport aux communes de M'sila.

Aspect physique

Géologie:

Dans cette vaste région qu'est le bassin endoréique hodnéen, où la géologie est à la fois complexe et diverse sur tous les plans (structure, stratigraphie, faciès ...), il serait plus aisé dans un premier temps de la résumer comme suit :

L'Atlas Saharien et l'Atlas Tellien, après leur choc frontal au niveau des Aurès, ont engendré une cuvette au début du Miocène, laquelle, à la fin de cette période et pendant le Quaternaire a subi un remplissage par les cours d'eau, constituant une plaine alluviale. (GRINE, 2009) (FIG. 1.4).

Stratigraphie

En dehors de l'Oligocène, du Miocène inférieur absent au domaine atlasique d'une part, et du Miocène supérieur et d'une partie du Pliocène basal au niveau de la chaîne tellienne, les séries sont presque complètes et vont du Trias au Quaternaire ancien, récent et actuel. (GRINE,2009).

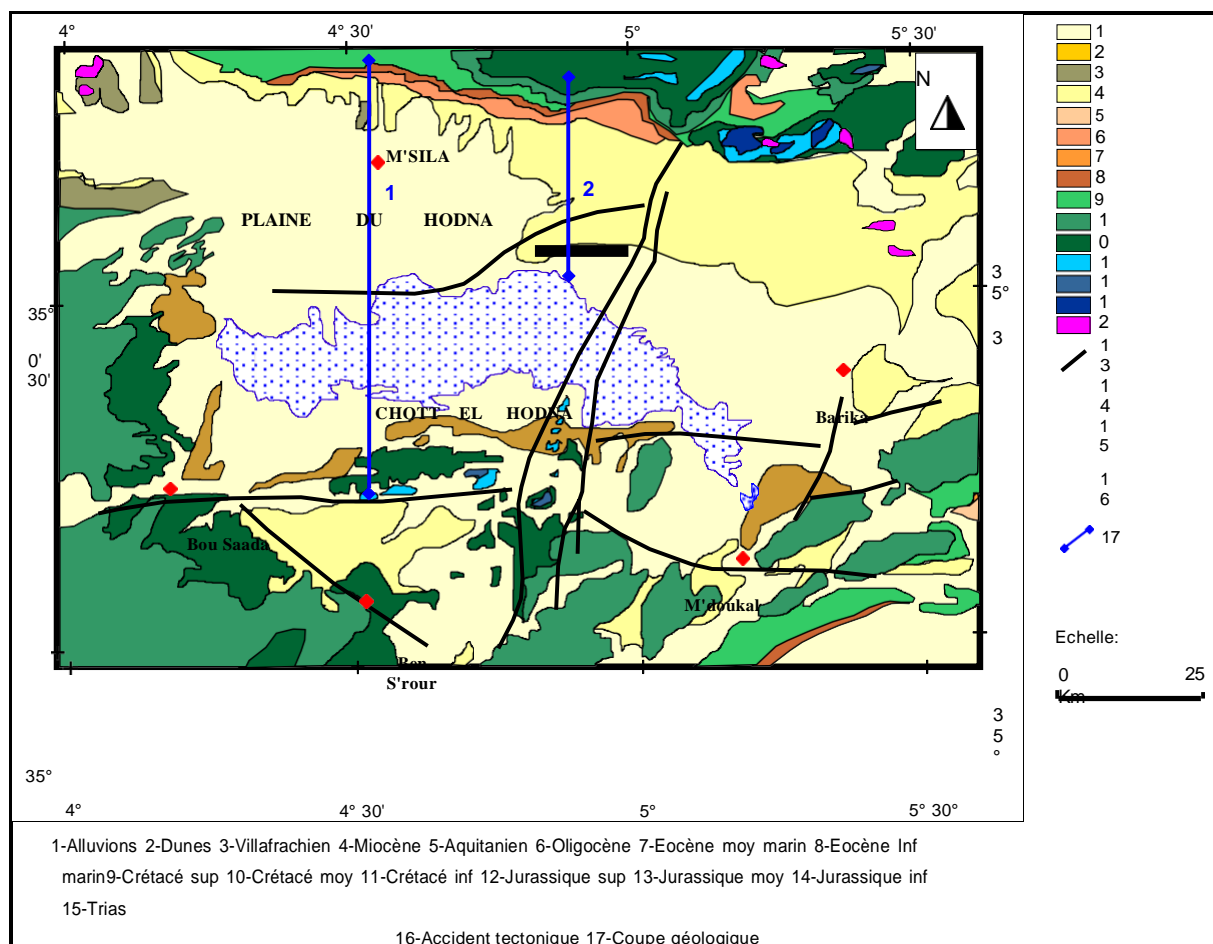


Figure 1.4: Extrait simplifié de la carte géologique de l'Algérie du Nord (GRINE, 2009).

Géomorphologie:

Doté d'un relief plat et d'un microrelief ondulé, Le Chott est une large dépression dont le fond atteint 391m, il sépare la région du Chott El-Hodna proprement dite de la

région saharienne. Il est constitué de deux zones concentriques, une zone périphérique ou « sebkha » (BOUMEZBEUR, 2002).

La zone périphérique : La zone nord du Chott occupe une partie de la plaine, et la zonesud se distingue par sa nature sableuse.

La Zone centre : La partie centrale du chott correspond à une cuvette ou se concentrent les eaux chargées en chlorures et sulfates (BOUDRISSA et *al.*, 2012)

L'unité structurale la plus dominante est la plaine, elle couvre les deux tiers du Hodna.

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, Barhoum et Soubella alimentés par des sources. A cela s'ajoute une multitude de petits cours d'eau (Chaàba) à sec pratiquement pendant toute l'année et qui coulent lors des chutes de pluies (FIG. 1.8).

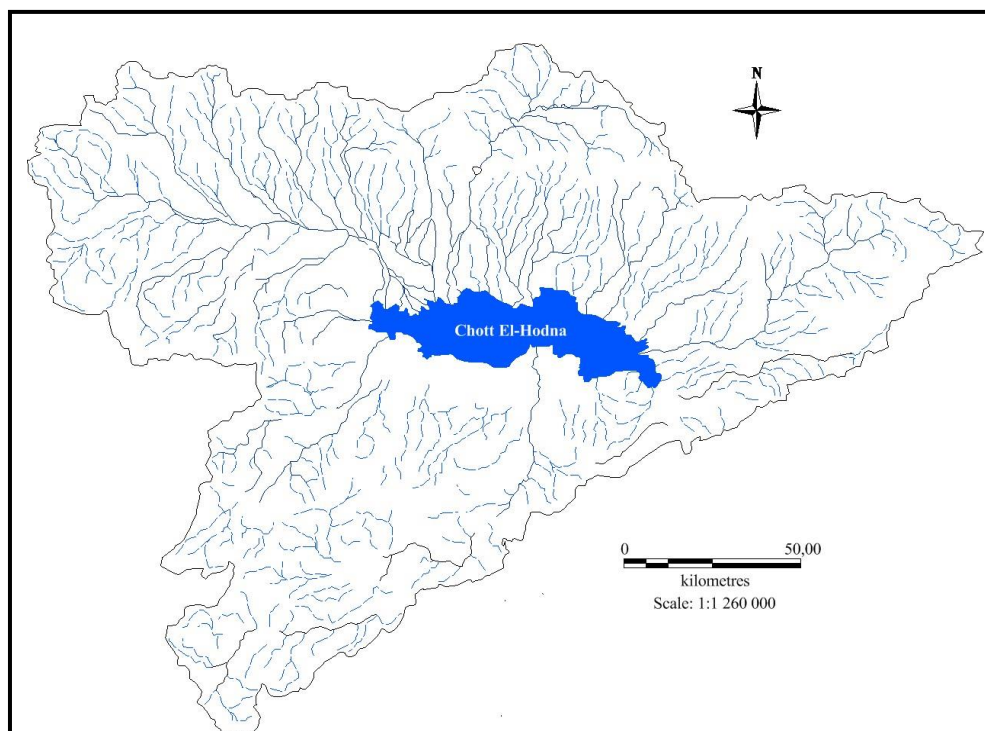


Figure 1.8: Réseau hydrologique de Chott El-Hodna

Quatre oueds seulement sont pérennes, quoique leurs débits soit très faible (BOUMEZBEUR, 2002). 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 nom, 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 (C.F.W.M., 2000).

Bassin versant :

Le Bassin versant d'El-Hodna avec une zone de drainage de 26 000 km² est le cinquième Bassin de l'Algérie, L'altitude des sommets d'El-Hodna diminuant de l'Est à l'Ouest. Ils oscillent entre 1000 et 1900 m, tandis que dans le Sud seulement quelques sommets de l'Atlas saharien atteignent 1200 m. La situation de ce bassin entre deux ensembles de montagnes du nord et du sud, organise comme un bassin endoréique autour d'un bol plat de 400 m d'altitude. (HASBAIA et *al.*, 2012)

Bilan hydrique du bassin versant:

Les ressources en eaux de surface disponibles annuellement pour l'ensemble du bassin versant d'El-Hodna s'évaluent d'une moyenne de 403 millions m³ d'eau et 11 millions tonnes de sédiments. Tenant compte de la variabilité temporelle, ces apports peuvent atteindre 860 millions m³ d'eau et 22 millions tonnes de sédiments. L'apport en sédiments augmente le niveau de terrain du Chott environ 2 cm/an, et l'apport en l'eau est équivalente à une profondeur d'eau de 74 cm sur l'ensemble de la région, ce qui augmente les risques de l'inondation, le dépôt de sédiments et la propagation de la salinité (HASBAIA et *al.*, 2012).

Les potentialités hydriques réelles du bassin versant d'El-Hodna varient d'une année à l'autre, car elles dépendent de l'ampleur des précipitations annuelles. Les deux tiers du total du débit des oueds d'El-Hodna dépendent des pluies. Ce chiffre est estimé entre 60-70% du ruissellement total d'El-Hodna. Le reste est le fait de petits cours d'eau temporaires et du ruissellement en nappe qui prend une grande importance lors des violents orages

(BOUMEZBEUR, 2002).

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 ensablé en complexe avec des sols minéraux bruts, xériques et inorganiques issus d'apports de région du R'mel.

Pédologie:

Les sols du chott et de la sebkha accumulent des gypso-salines de nappe qui deviennent franchement salins dans la sebkha grâce à l'évaporation (C.F.M., 2004). La répartition des sols est en rapport avec des phénomènes pédologiques majeurs tels que la fertilisation, l'holomorphie, la gypso morphie, la calcimorphie et la désertification (BOUDRISSA, 2005).

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

Dans le chott on observe la 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 hydro morphes à «redistribution de gypse ».
- **Sol halomorphe excessivement salin**, abiotique de la sebkha.
- **Sol halomorphe et sol hydro morphe** à redistribution de gypse ensablé en

complexe avec des sols minéraux bruts xérique et inorganiques issus d'apports de région du R'mel (FIG. 1.10).

R'mel : signifie sable, en raison de la présence de dévoile sableux d'origine éolienne.

Remarque : Chott El-Hodna se qualifie d'un point de vue pédologique comme zone subdésertique argileuse dont les sols sont très fortement à excessivement salins avec une conductivité de 180 mm hos/cm² et une texture lourde. A l'état sec, il est couvert par des polygones d'argiles surmontant en surface avec une structure faible à nombreux cristaux individualisés de Na Cl. En profondeur la structure est massive avec des tâches de rouilles et des tâches grises (ANONYME, 2005).

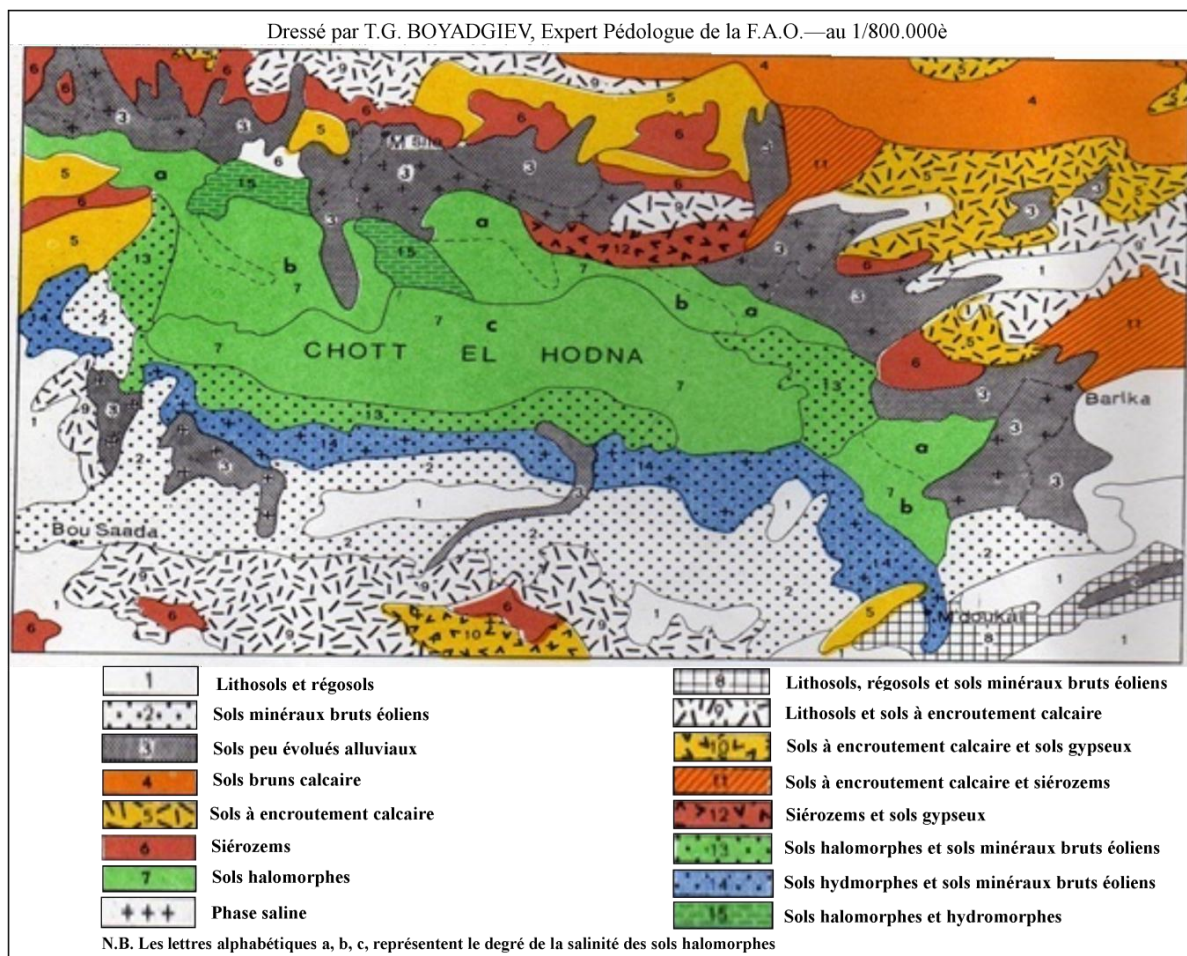


Figure 1.10: Carte pédologique de la région d'El-Hodna (BOYADGIEV, 1975) Au 1/800000.

Aspect climatologique:

Climat de la région

La région peut être subdivisée en trois zones climatiques différentes :

- ✓ Au sud, dans l'Atlas Saharien, où l'altitude est de l'ordre de 800 à 900 m en général, la pluviométrie est moins élevée avec, par contre, des températures nettement plus douces et même plus froides l'hiver.
- ✓ L'intérieur de la cuvette du Hodna, formé de plaines où les altitudes oscillent entre 400 et 700 m, se trouve isolée des influences maritimes par le Tell suffisamment élevé au nord, mais soumises aux tempêtes de sables desséchantes en raison de l'Atlas Saharien à relief relativement bas. Le climat y est rude, les hivers sont froids avec des périodes de gel et les étés sont très chauds.
- ✓ Au nord, dans l'Atlas Tellien qui culmine jusqu'à 1800 m d'altitude, le climat est nettement plus arrosé, avec plus à l'intérieur (la région de Bordj Bou Arreridj), des entrées des vents marins. (GRINE, 2009)

Données climatiques de la station météo de M'sila

Les données climatiques proviennent de la station météorologique de M'Sila et couvrent une période de 29 ans allant de 1988 à 2014.

Cette station, située d'environ 20 km au Nord de notre zone d'étude, d'une latitude de $35^{\circ} 40' N$, et d'une longitude de $04^{\circ} 30' E$, avec une altitude de 441 m (TAB. 1.2)

Les paramètres climatiques retenues sont les précipitations P (mm), les températures ($^{\circ}C$), Humidité relative (H), l'évaporation (E) et le vent (V) (TAB. 1.3)

TABLEAU. 1.2: Caractéristiques géographiques de la station météorologique de M'Sila

Station	Coordonnées		Altitude
	Latitude	Longitude	
M'sila	$35^{\circ}40' N$	$04^{\circ}30' E$	441 m

Source : Station météorologique de M'Sila 2014

TABLEAU. 1.3: Données Climatique de la station météorologique de M'sila

	Ja n	Fev	M ar	Av r	M ai	Jui n	Jui l	Aou	Se p	O ct	Nov	De c
P (mm)	17,4 5	12,72	15, 52	20,7 6	24, 45	9,57	3,8 7	7,37	26,1 3	24, 42	19,09	18, 66
T (°C)	10,4 4	11,17	15, 88	20,7 6	26, 08	32,9 5	37, 85	37,92	31,8 3	25	18,19	10, 44
H (%)	74,3 2	66,65	60, 83	56,7 2	50, 3	42,8 4	37, 22	39,66	54,9 0	61, 24	71,24	75, 77
V (m/s)	3,5 6	3,9	4,2 8	5,1 3	4,6 0	4,59	4,3 5	3,98	3,7 6	3,6 4	3,56	3,7 7
E (mm)	81, 5	107,3	16 5,2	194	25 3,7	320, 3	368	334,7	23 9	18 6	107,2	79, 5

Source : Station météorologique de M'Sila 2014

La pluviométrie:

L'origine des pluies en Algérie est plutôt orographique, qui est selon SELTZER (1946) influencée généralement par les reliefs, En effet la hauteur pluviométrique est donc déterminée par la direction des axes montagneux par rapport à la mer et aux vents humides Les pluies ont tendance à diminuer vers le Sud au fur et à mesure que les vents humides s'épuisent Cette dernière est typique au climat méditerranéen est présente un minimum en été et un maximum en hiver. Les précipitations annuelles avoisinent les 158,15 mm.

La figure 1.11 montre la répartition des pluviométries mensuelles moyennes sur une période de 29 ans.

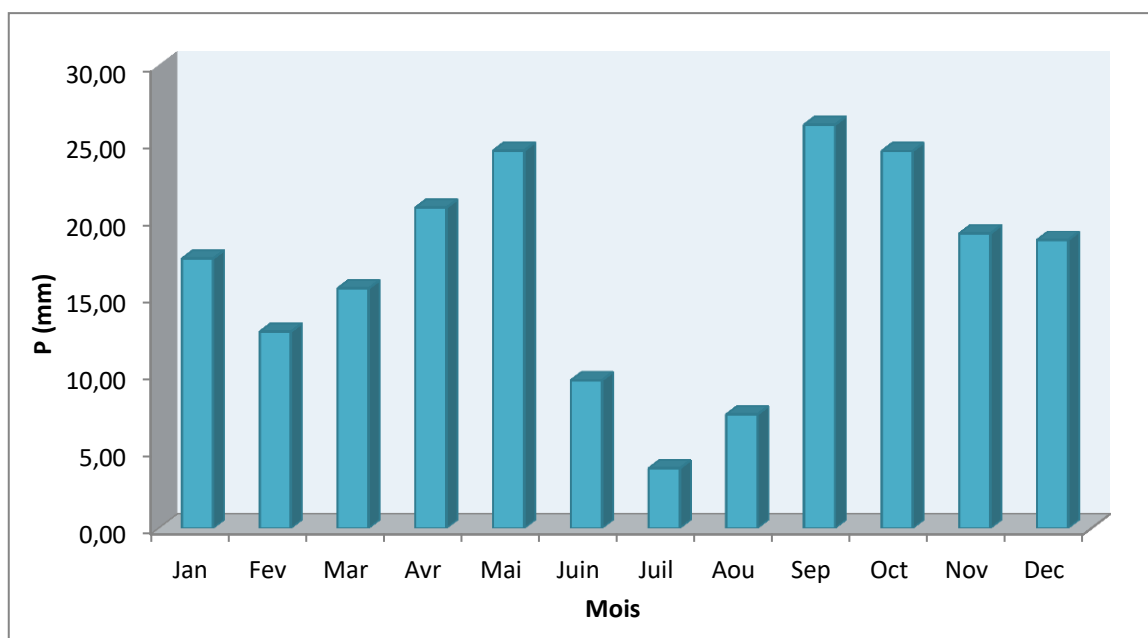


Figure 1.11: Précipitations mensuelles et annuelles moyennes en (mm) de la région de M'Siladurant la période (1988-2014).

La température:

La température de l'air est l'un des paramètres ayant une grande influence sur le climat et sur le bilan hydrique car il conditionne l'évaporation et l'évapotranspiration réelle. Elle est en fonction de l'altitude, de la distance de la mer, des saisons (OZENDA, 1982) et de la topologie (TOUBAL, 1986).

La Température moyenne annuelle est de 23,37 °C, le mois le plus froid est le mois de Janvier avec 10,44 °C et le mois le plus chaud est représenté par le mois d'Août avec une température de l'ordre de 37,92 °C (FIG. 1.12).

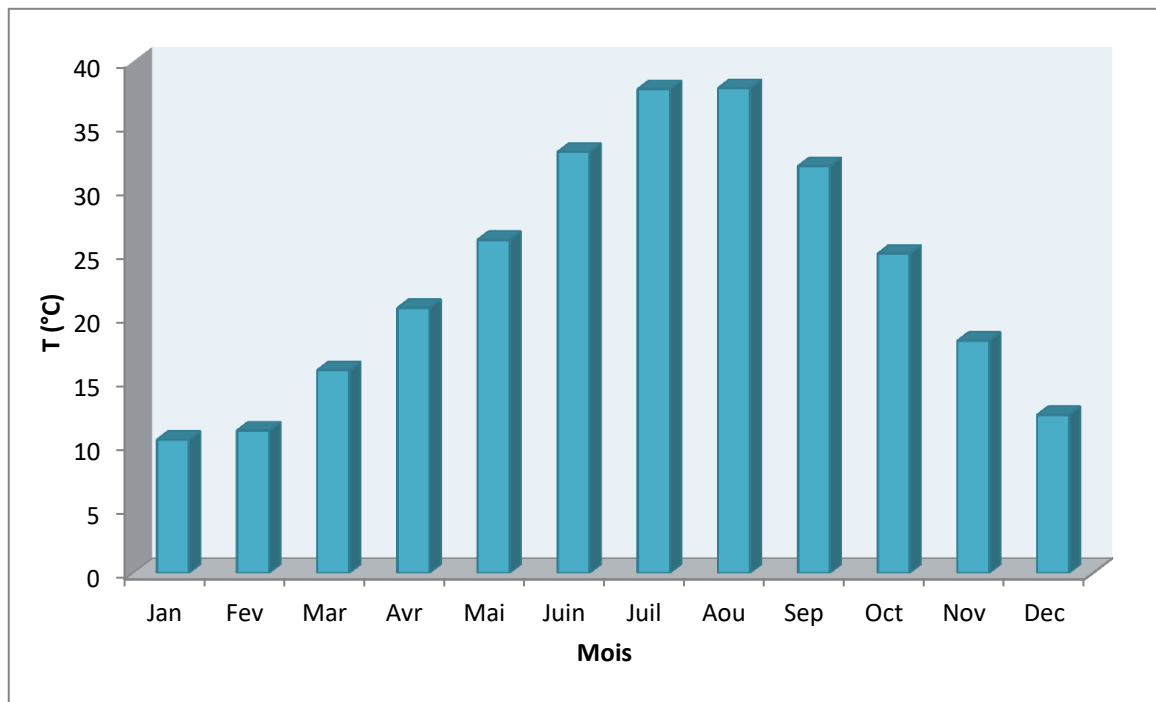


Figure 1.12: les températures mensuelles moyennes de M'Sila de la période de (1988-2014).

Le vent:

Les vents dominants qui soufflent dans la région de M'Sila sont :

- **Le vent d'ouest (W)**, dit « DAHRAOUI » est le plus pluvieux, il est fréquent en Automne, en hiver et au printemps.
- **Le vent de nord (N)**, dit « BAHRI » est moins fréquent, il est froid et sec.
- **Les vents à directions variables (Var)**, qui soufflent surtout pendant les saisons sèches.
- **Le sirocco** : vent chaud et sec, souffle en général du sud, il entrave le développement des cultures. Il constitue la cause du faible tapis végétal dans la

wilaya de M'Sila par

ce que les vents chauds et secs accentuent les dessèchements du substrat et limitent l'installation de la végétation (DEKKICHE, 1974).

Les vents du Nord sont fréquents pendant l'hiver, alors que ceux du Nord-est, bien répartis surtout l'année accèdent facilement dans la cuvette du Hodna par la vallée de l'Oued Barika. Ceux du Sud n'atteignent le Hodna qu'en été, période durant laquelle ils soufflent avec des rafales brûlantes (FIG. 1.13).

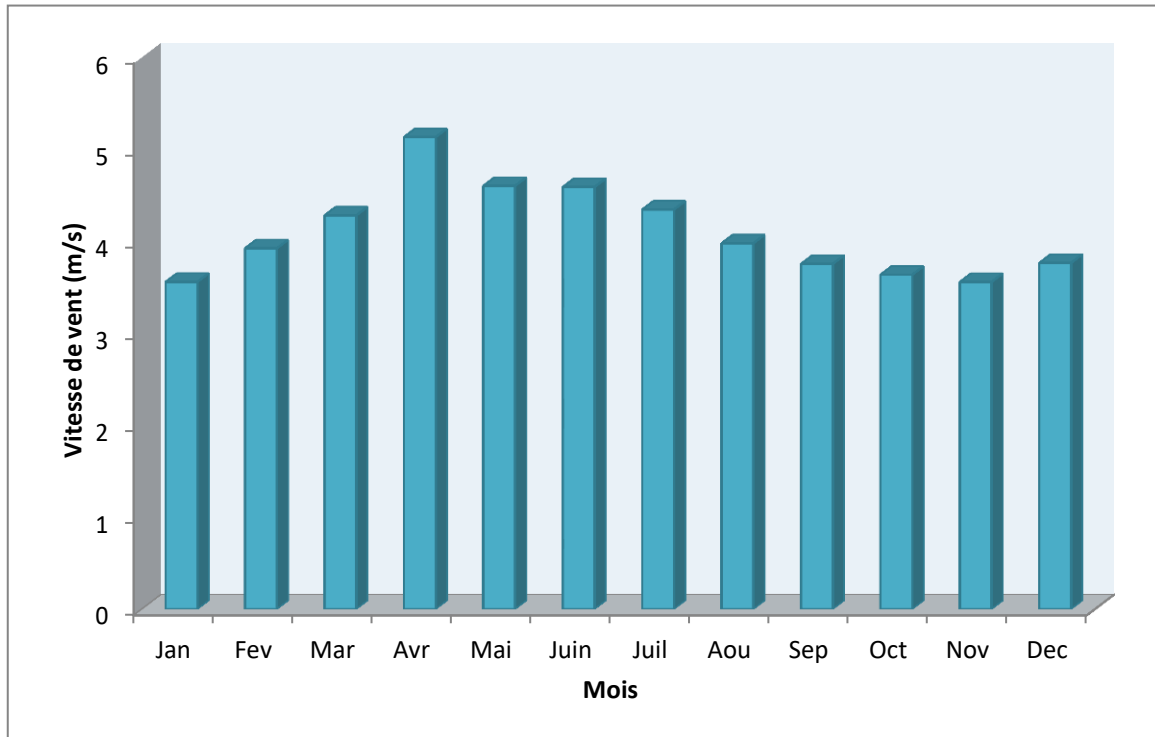


Figure 1.13: Vitesses moyennes du vent en m/s de la région de M'sila (Période 1988-2014).

Synthèse climatique:

Diagramme Pluviothermique de BAGNOULS et GAUSSEN :

BAGNOULS et GAUSSEN (1953) considèrent qu'un mois est sec quand le total de précipitation exprimé en mm est égal ou inférieur au double de la température (T) exprimé en degré centigrades (P inférieur ou égale $2T$) (GOUNOT, 1969).

Le Diagramme pluviothermique de BAGNOULS et GAUSSEN permet de mettre en évidence la période sèche de notre zone d'étude. Il est tracé avec deux axes d'ordonnées où les valeurs de la pluviométrie sont portées à une échelle double de celle des températures (BAGNOULS et GAUSSEN, 1953).

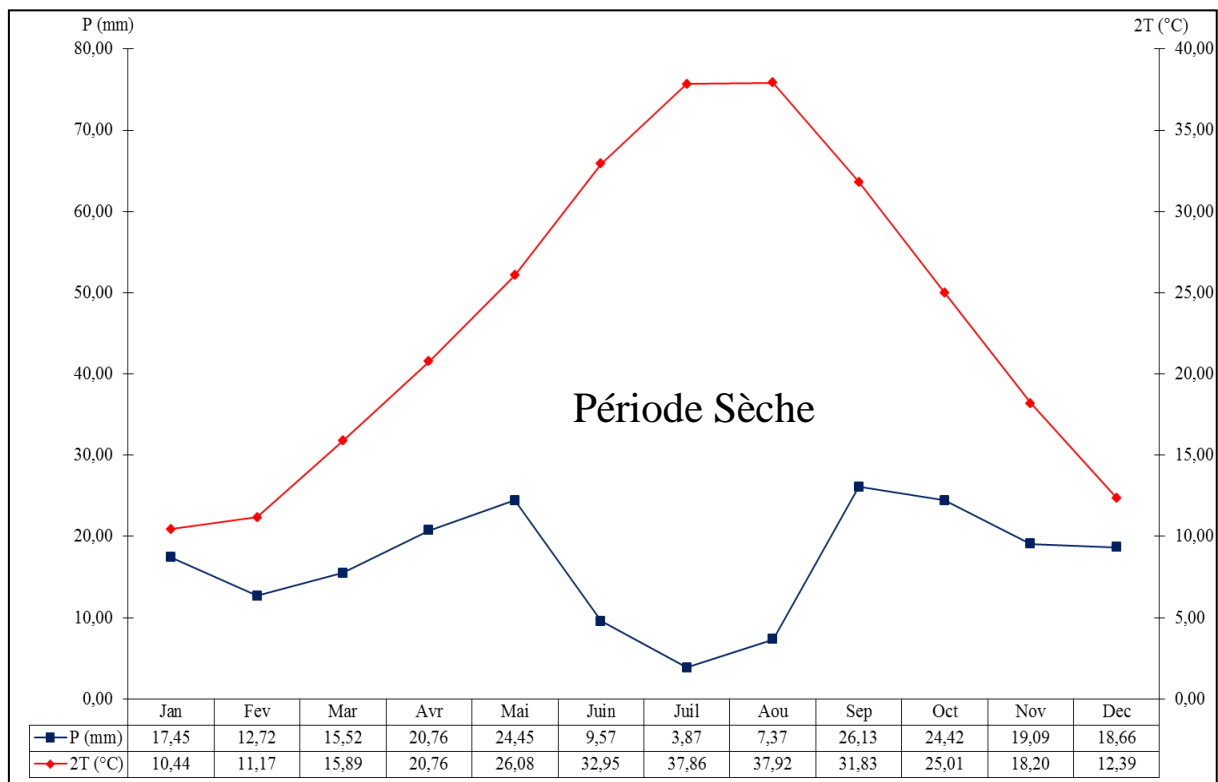


Figure 1.14: Diagramme pluiothermique de la région de Chott El-Hodna 1988-2014.

D'après la figure 1.14 la période sèche de la région de Chott El-Hodna est représentée durant toute l'année.

Quotient pluviométrique d'EMBERGER :

D'après DAJOZ (1972), le cilmagramme d'Emberger permet la classification des différents climats méditerranéens, grâce au calcul d'un quotient Q_2 qui donné par la formule suivante :

$$Q_2 = \frac{1000P}{\left(\frac{M+m}{2}\right)(M-m)}$$

P : Précipitation annuelle en mm.

$M \square m$

2 : Moyenne des températures annuelles.

$(M + m)/2$: Moyenne des températures
annuelles. $(M - m)$: Amplitude thermique
extrême en °K.

M : Moyenne des maxima du mois le plus chaud en
°K. m : Moyenne des minima du mois le plus froid en
°K.

°K : degré kelvin

STEWART (1968) simplifia la formule précédente en proposant le quotient suivant :

$$Q_2 = \frac{3.43P}{M - m}$$

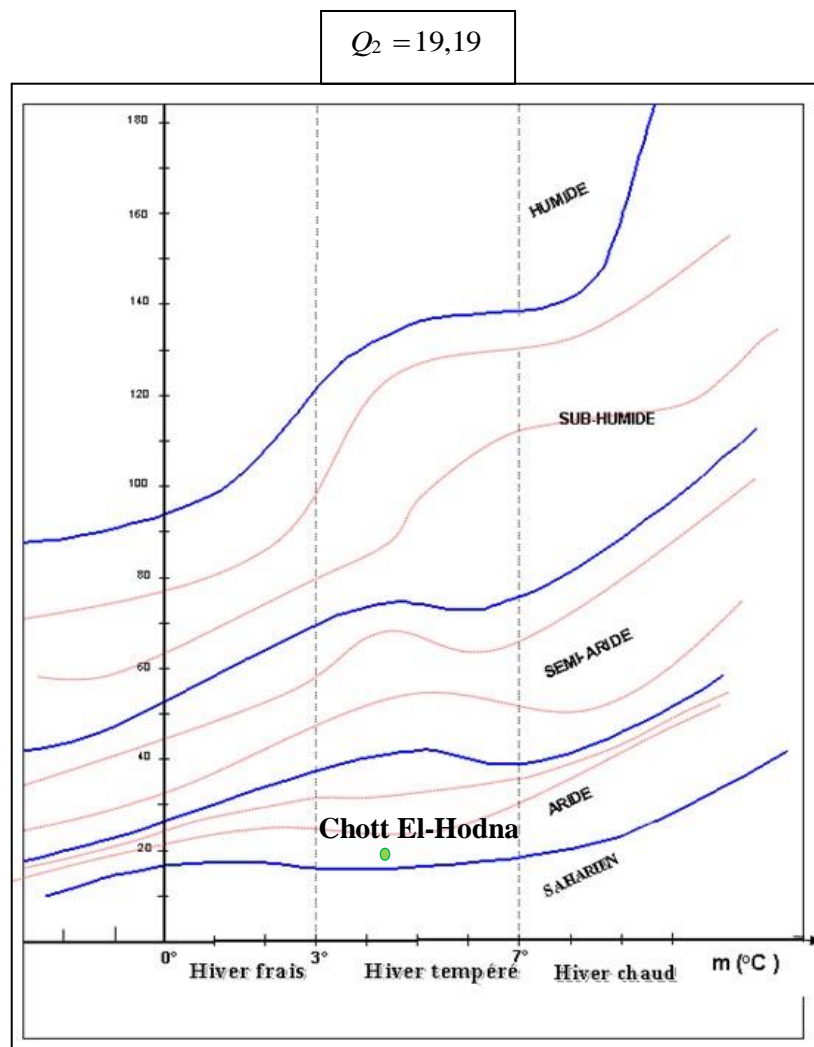
M : Moyenne des maximums du mois le plus chaud (°C).

m : Moyenne des maximums du mois le plus froid (°C).

Pour la station de M'Sila :

$P = 202.10 \text{ mm}$

$M = 39,14 + 273 = 312,14 \text{ °K}$



$m = 3,352 + 273 = 276,352 \text{ °K}$

Figure 1.15: Positionnement de la station de M'Sila dans le climagramme d'Emberger durant la période (1988-2014).

Aspect biotique:

Plusieurs travaux ont été consacrés à la connaissance de la biodiversité des zones humides des hauts plateaux centraux, en particulier du Chott El-Hodna.

Chott El Hodna zone humide d'importance internationale:

Type de zone humide:

Le Chott est une zone humide continentale (**R.Ss.Y**).

R : lacs et étendues/saumâtres/alcalins saisonniers/intermittent.

Ss : mares/marais salins/saumâtres/alcalins saisonniers/intermittents.

Y : source d'eau douce/oasis (BOUMEZBEUR, 2002).

Chapitre IV

**Programme expérimental
et procédures d'essais**

Chapitre IV : programme expérimental

Chapitre 4

Programme expérimental

procédures d'essais

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

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.

Propriétés du liant hydraulique utilisé

Le traitement est effectué en mélangeant le sol aux liants routier (dans notre cas le traitement de sol salé) dans les proportions données ci-après. Le ciment utilisé est le ciment Ardia 600 fabriqué localement dans la cimenterie Lafarge. (wilaya de Bouira).

Tableau IV.2 : Propriétés physico-chimiques du ciment utilisé.

Description	Commerciale	Mokaouem
Propriétés physiques	Consistance normale de la pâte de ciment (%)	25 à 28
	Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g)	3200 à 3800
	Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
	Expansion (mm)	≤ 2,0
	Chaleur hydratation (j/g)	< 270
	Début de prise à 20° (min)	> 60
	Fin de prise à 20° (min)	240 à 400
	Résistance à la compression à 2 jours (MPa)	≥ 10
	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	≥ 42,5
Propriétés chimiques	Perte au feu (%)	0,5 à 3
	Teneur en sulfurique SO ₃ (%))	1,8 à 3
	Teneur en C ₃ S (%)	≤ 50
	Teneur en C ₃ A (%)	≤ 5
	C ₄ AF +2C ₃ A (%)	≤ 22
	Teneur en magnésie MgO (%)	1,2 à 3
	Teneur en chlorures (%)	0,01 à 0,05
	Taux d'aluminate C ₃ A (%)	< 3.0

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 :

Sol non traité

Essais d'identification

- Analyse minéralogique : DRX, MEB.
- Analyse chimique : EDX.
- Analyse microstructurale : MIP.
- 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.

Essais de caractérisation

- Proctor normal
- Essai C.B.R immédiat et après imbibition.
- Essai de compression simple.

Sol traité :

Essais d'identification

- Limites d'Atterberg.
- Essai de bleu de méthylène.
- Analyse minéralogique : DRX, MEB.
- Analyse chimique : EDX.
- Analyse microstructurale : MIP.

Essais de caractérisation

-
- Proctor normal.
 - Essai C.B.R immédiat et après imbibition.
 - Essai de compression simple.

Description des essais

Les procédures suivies dans chaque type d'essai sont décrites en détail dans la norme spécifique. Aussi, se limitera-t-on à n'en rappeler ci-après que le principe et les paramètres caractéristiques intéressant l'objet de cette étude.

Essais d'identification

Analyse minéralogique

La diffraction des rayons X (DRX) est une méthode d'analyse physico-chimique. Celle-ci consiste à émettre des rayons X sur la matière cristalline, les rayons X provoquent un déplacement du nuage électronique dans le noyau des atomes. Ces oscillations induites provoquent une réémission d'ondes électromagnétique de même fréquences. La longueur d'onde des rayons X étant de l'ordre de grandeur des distances interatomiques (quelques angströms), le but est de déterminer la proportion des différents minéraux présents dans une matrice d'argile.

La Microscopie Electronique à Balayage (MEB) fournit des informations sous forme d'images utilisées pour visualiser la morphologie, la topographie ainsi que les contrastes chimiques des objets étudiés. En mode électrons rétrodiffusés, il est possible d'établir une image des numéros atomiques moyens, véritable cartographie des minéraux. Couplé à un système d'analyse par spectrométrie X à dispersion d'énergie, elle permet de réaliser des analyses chimiques multi-élémentaires quantitatives (MEB JEOL-JSM 5600 LV).



Figure IV.1 : L'appareil de DRX (à niveau de labo de LafargeHolcim)



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

b/ 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)

c/ Analyse microstructurale

L'analyse microstructurale à l'aide de porosimétrie par intrusion de mercure (MIP) est une technique destructrice et non portable, cette dernière est utilisée pour analyser la porosité

totale connectée, le volume des pores, la distribution de la taille des pores et la surface.

Cette technique implique l'intrusion d'un liquide non mouillant (souvent du mercure) à haute pression dans un matériau grâce à l'utilisation d'un prosimètre. La taille des pores peut



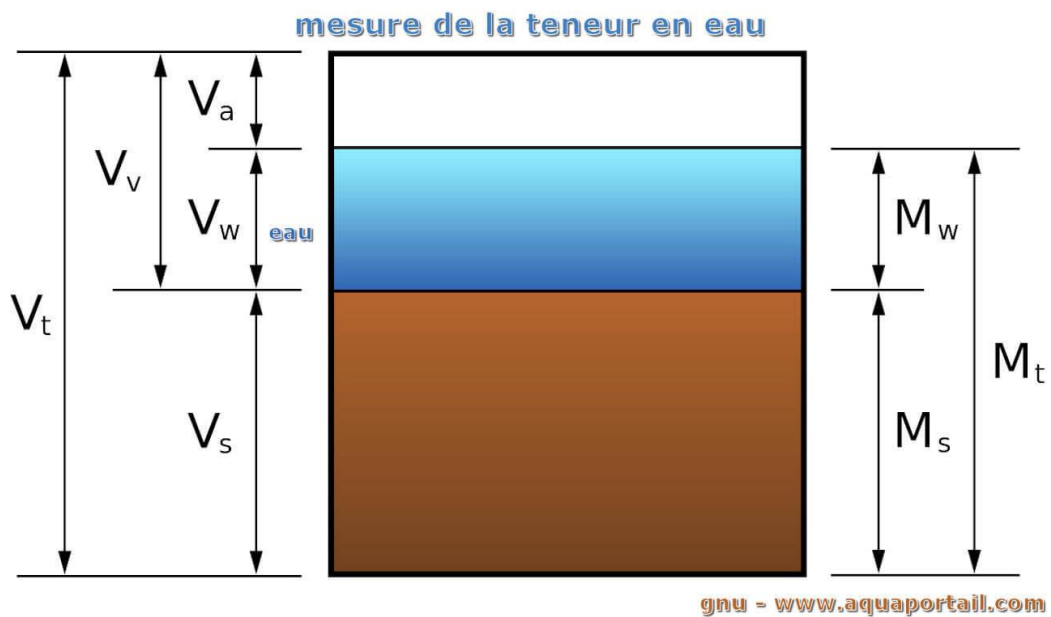
Figure IV.4 : Appareillage pour XRF S8

être déterminée sur la base de la pression externe nécessaire pour forcer le liquide dans un pore contre la force opposée de la tension superficielle du liquide.

d/ Teneur en eau (NF P 94-050 ; NA 5209)

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 :

$$w = m_w / m_d$$



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).

e/ Poids volumique humide et sec (NF P 94-053 ; NA 5210)

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 :

$$(\gamma_d = \gamma_h / (1 + w)).$$

f/ Analyse granulométrique (NF P94-056 ; NA 5232) et (NF P94-57 ; NA 5251)

Elle a pour but de déterminer la répartition en poids des grains du sol (norme NF P 94-056 ; NA 5232) pour l'analyse granulométrique par tamisage et la norme (NF P 94-057 ; NA 5251), pour l'analyse granulométrique par sédimentométrie).

f.1/ Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056 ; NA 5232)

Elle a pour but de déterminer la distribution des particules qui forment le squelette des sols en vue de leur classification.

L'essai consiste à séparer par lavage les grains agglomérés d'une masse connue de matériau, puis à les fractionner, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement après séchage le refus cumulé sur chaque tamis.

f.2/ Analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P 94-057 ; NA 5251)

Les particules inférieures à 80 μm séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans l'eau additionnée d'une défloculation. Les particules sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille. Au moyen d'un densitomètre est mesurée l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et de la profondeur d'immersion de l'appareil. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de ces données.



Figure IV.4 : Appareillage pour Analyse granulométrique

g/ Essai de limites de consistance (NF P 94-051 ; NA 16213)

Les limites de consistance, appelées 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 : limites de liquidité (W_l).
- Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limites 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 matière première brute.

$$I_p = W_L - W_P$$

défini 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.

L'encadré ci-après donne les intervalles de variations de l'indice de plasticité (I_p) pour chaque état de plasticité du sol.

I_p	< 5	5 - 15	15 – 40	> 40
Etat	non plastique	peu plastique	plastique	très plastique

Par ailleurs, l'abaque de Casagrande permet de classer le sol conformément à la norme de classification des sols fins et des sols organiques en vigueur (normes françaises : NF P 94- 500 et XP P 94-011).

Les limites de consistance procurent aussi un indice appelé indice de consistance (I_c), avec lequel on détermine l'état de consistance du sol. Cet dernier est défini comme suit :

$$I_c = (W_L - W_{nat}) / I_p$$

où W_{nat} désigne la teneur en eau naturelle du sol.



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

L'encadré ci-après donne les intervalles des variations de I_c pour chaque état de consistance du sol.

I_c	< 0	0 – 0,25	0,25 – 0,50	0,50 – 0,75	0,75 – 1,0	> 1
Etat	liquide	très mou	mou	ferme	très ferme	dur

On peut tirer aussi l'activité d'une argile (A_c) qui se définit comme suit :

$$A_c = \frac{\text{Indice de plasticité}}{C_2 = (\% \text{ éléments } < 2\mu\text{m})}$$

h/ Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068 ; NA 5288)

L'essai est réalisé sur la fraction 0/0.080 mm, il consiste à déterminer la quantité de bleu de méthylène nécessaire à la saturation des particules argileuses en suspension dans l'eau et en permanente agitation. La valeur de bleu VBS est la quantité de bleu de méthylène absorbé par 40 g de matériau.

Les paramètres qu'on peut tirer de l'essai du bleu au méthylène :

- La valeur du bleu : $VBS = \frac{\text{Volume en cm}^3 \text{ de solution}}{\text{Poids sec de la prise}}$
- La surface spécifique totale : $SST = 20.93 \times Vcc \times \frac{1}{Ps}$

Avec :

- SST : surface spécifique (m^2/g).
- Vcc : volume de la solution utilisée (cm^3).
- Ps : poids du matériau sec (g)

- 20.93 : surface correspondant à 1 cm³ de bleu de méthylène.

L'encadré ci-après donne les intervalles de variations du VBS pour chaque nature de sol.

V	< 0.2	0.2 – 2.5	2.5 - 6	6 - 8	>
BS					8
So	sableu	limoneux	limono-	argileux	très argileux
l	x		argileux		



Figure IV.9 : Appareillage de l'essai VBS

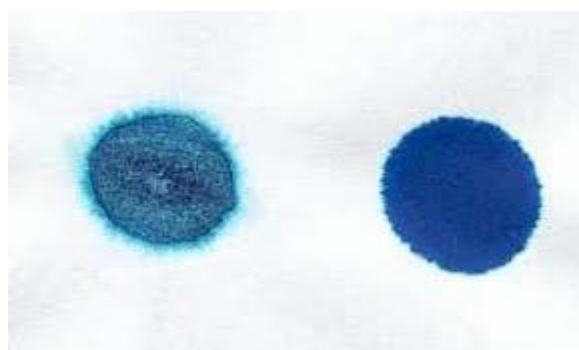


Figure IV.10 : Echantillonnages de l'essai VBS

Essais de caractérisation

a/ Essai Proctor normal (NF P 94-093 ; NA 5262)

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

Le matériau est porté à différentes teneurs en eau et chacun des mélanges est ensuite compacté par couche dans le moule cylindrique au moyen d'un marteau de dimension et de masse normalisées que l'on laisse tomber librement d'une hauteur normalisée. La masse volumique sèche de l'échantillon ainsi compactée est déterminé pour chaque teneur en eau. La courbe de compactage qui en résulte permet de déterminer la teneur en eau optimale W_{opt} et la densité sèche maximale $\gamma_{d-\text{max}}$ correspondante. Ces deux paramètres traduisent l'état de compacité du sol en laboratoire et conditionne les modalités de compactage en place.



Figure IV.11 : Machine d'essai Proctor

b/ Essai de portance C.B.R (NF P 94-078 ; NA 5252)

L'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportés aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements, l'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage, des deux rapports ainsi calculés.

b.1/ Essai C.B.R immédiat

On pose l'éprouvette sur la presse en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et on procède au poinçonnement de la manière suivante :

-
- Approcher la face supérieure de l'éprouvette vers le piston, à l'aide des dispositifs prévus sur la presse jusqu'à ce que le piston vienne affleurer le matériau.
 - Régler la mise à zéro du dispositif dynamométrique et celle du comparateur mesurant l'enfoncement du poinçon.
 - Noter les efforts du poinçonnement correspondant aux enfoncements suivants : 1.25 ; 2 ; 2.5 ; 5 ; 7.5 et 10 mm.
 - L'indice recherché et par conversion, la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (KN)}}{13.35} \times 100$$

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 5.0 mm d'enfoncement (KN)}}{19.93} \times 100$$

b.2/ Essai C.B.R après imbibition

Après quatre (4) jours d'immersion ($\pm 2h$) on mesure la hauteur de gonflement Δh indiquée par le comparateur, on extrait l'ensemble hors du bac d'immersion en observant un temps d'égouttage de 15 minutes puis on dépose le trépied, le comparateur, les surcharges et le disque de gonflement. La même procédure que la détermination de l'indice C.B.R immédiat.



Figure IV.14 : Appareil CBR

d/ Essai de compression simple (NF P 18-406 ; NA 427)

L'essai permet de mesurer la résistance à la rupture en compression simple R_c du sol. L'éprouvette généralement cylindrique de dimension normalisée de 10,2 cm de diamètre et 11 cm de hauteur est placée entre les deux plateaux d'une presse et soumise à des charges croissantes jusqu'à rupture.

La vitesse d'écrasement doit être suffisamment rapide (1,5 à 2 mm/min) pour qu'aucun drainage ne puisse se produire pendant l'essai.

La relation ($R_c = 4P / \pi D^2$) donne en fonction de la charge appliquée P à la rupture, la valeur de la résistance à la compression simple R_c .

Le but de l'essai est de déterminer la résistance à la compression simple du sol.

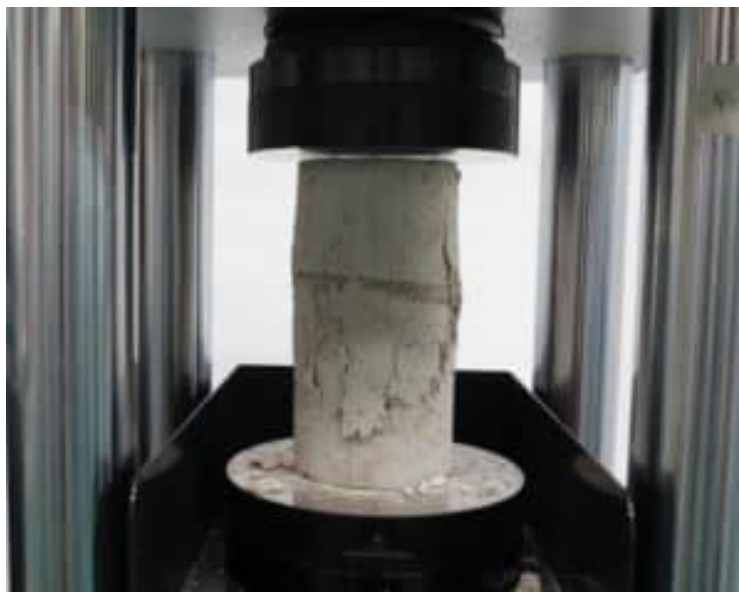


Figure IV.15 : Appareil de Compression

Après la confection de l'éprouvette, on retire le moule et on fait passer l'éprouvette à la presse qui permet la lecture de la force qui s'exerce sur les facettes latérales du cylindre de sol.

L'éprouvette sera placée entre les deux mâchoires de la machine et on lèvera une seule lecture. Celle de la force correspondante à la rupture de l'échantillon. Soit F cette force.

La résistance à la compression simple sera :

$$\delta = \frac{F}{S}$$

**F : force au
moment de la rupture.**

**S : section de
l'éprouvette.**

Chapitre V

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

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 sèche), la mesure de PH, la salinité, 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 différentes teneurs en chaux-ciment, 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, Proctor normal).

Les interprétations des résultats seront décrites à la fin de chaque partie. **Rappel** : Ce travail porte sur l'étude des effets du traitement mixte chaux-ciment 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-ciment :

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

Sol non traité

Cette partie présente en premier lieu les résultats des essais d'identification, les paramètres d'état (teneur en eau, poids volumique humide et sèche), la mesure de PH et la salinité, 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).

: Essais d'identification

: Analyse Minéralogique DRX

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

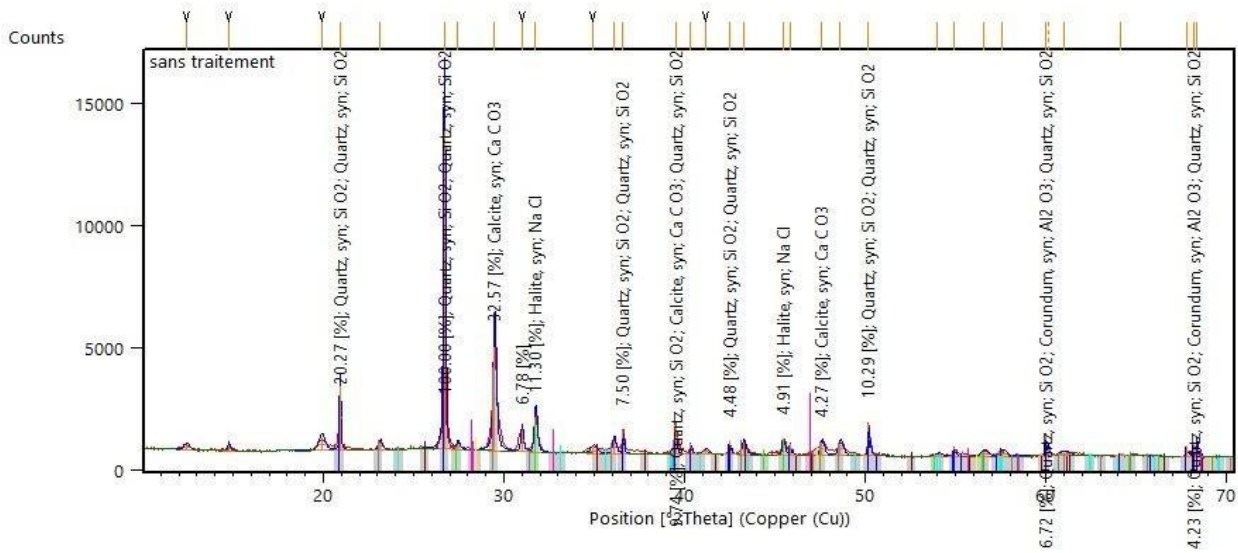


Figure V.1 : Résultats de l'analyse DRX

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	SiO ²	Al ² O ³	Fe ² O ³	CaO	MgO	SO ₃	K ² O	Na ² O	Pertes au feu
%	35,6 66	9,02	3,535	16,8 6	3,20 1	2,3 21	1,45 6	3,50 1	21,52

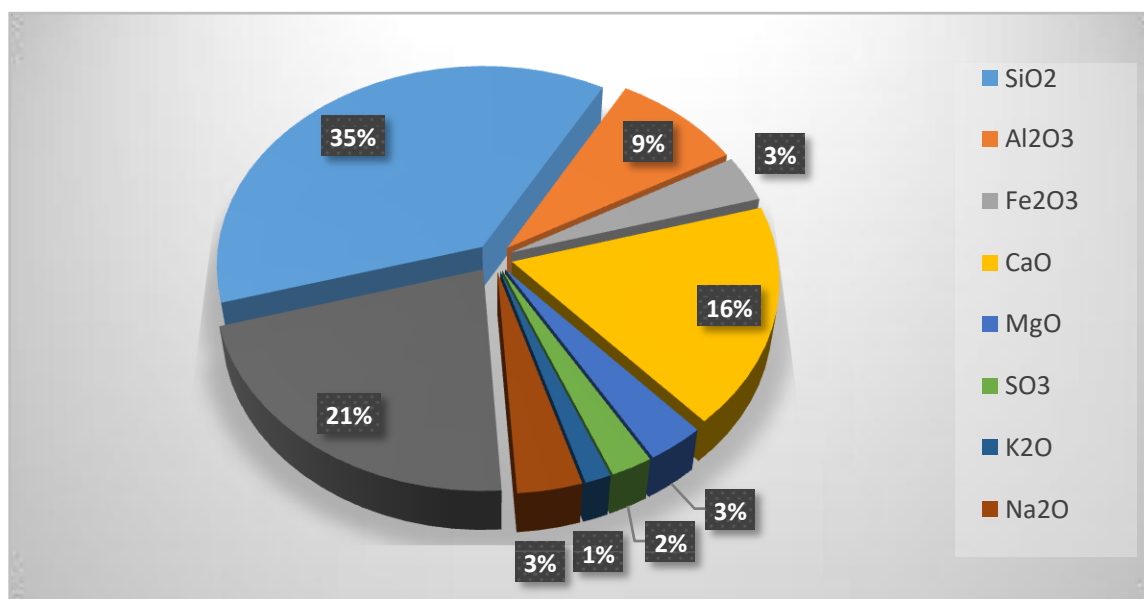


Figure V.2 : Résultats de l'analyse chimique

: 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)	5 0 0	200	100
Masse humide totale (g)	4022,2	2060 ,9	92 1,5
Masse sèche totale (g)	3896,7	2000 ,2	88 5,7
Masse du moule (g)	3083,3	1561 ,5	62 2,4
Masse du sol humide (g)	940,5	512, 2	19 6,2
Masse du sol sec (g)	803,4	418, 6	16 5,3
Masse d'eau (g)	148,1	81,8	32, 9
Teneur en eau W _{nat} (%)	15,56	16,3 4	16, 59
Masse volumique humide ρ_h (g/cm ³)	1,903	2,50 2	1,9 82
Masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)	1,6068	2,09 3	1,6 53
W _{nat} : moyenne (%)		17, 12	
ρ_d : moyenne (g/cm ³)		1,8 1	
ρ_h : moyenne g/cm ³)		2,1 6	

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	Moyen ne
5	100	100	100	100
2,5	100	99,98	9.99	99,99
1,2 5	99,94	99,92	99,93	99,93
0,6 3	99,71	99,64	99,73	99,69
0,3 15	98,66	98,65	98,65	98,65

0,1 6	94,26	94,32	94,26	94,28
0,0 8	87,48	86,98	87,48	87,31
0,0 75	87,42	85,09	87,42	86,64
0,0 55	83,22	83,02	83,23	83,16
0,0 38	79,09	79,07	79,07	79,08
0,0 25	74,95	75,11	74,95	75,00
0,0 17	70,75	71,18	70,75	70,89
0,0 12	66,37	67,04	66,36	66,59
0,0 08	61,65	54,41	61,69	59,25
0,0 05	52,45	45,54	52,45	50,15
0,0 02	3,63	3,65	3,61	3,63

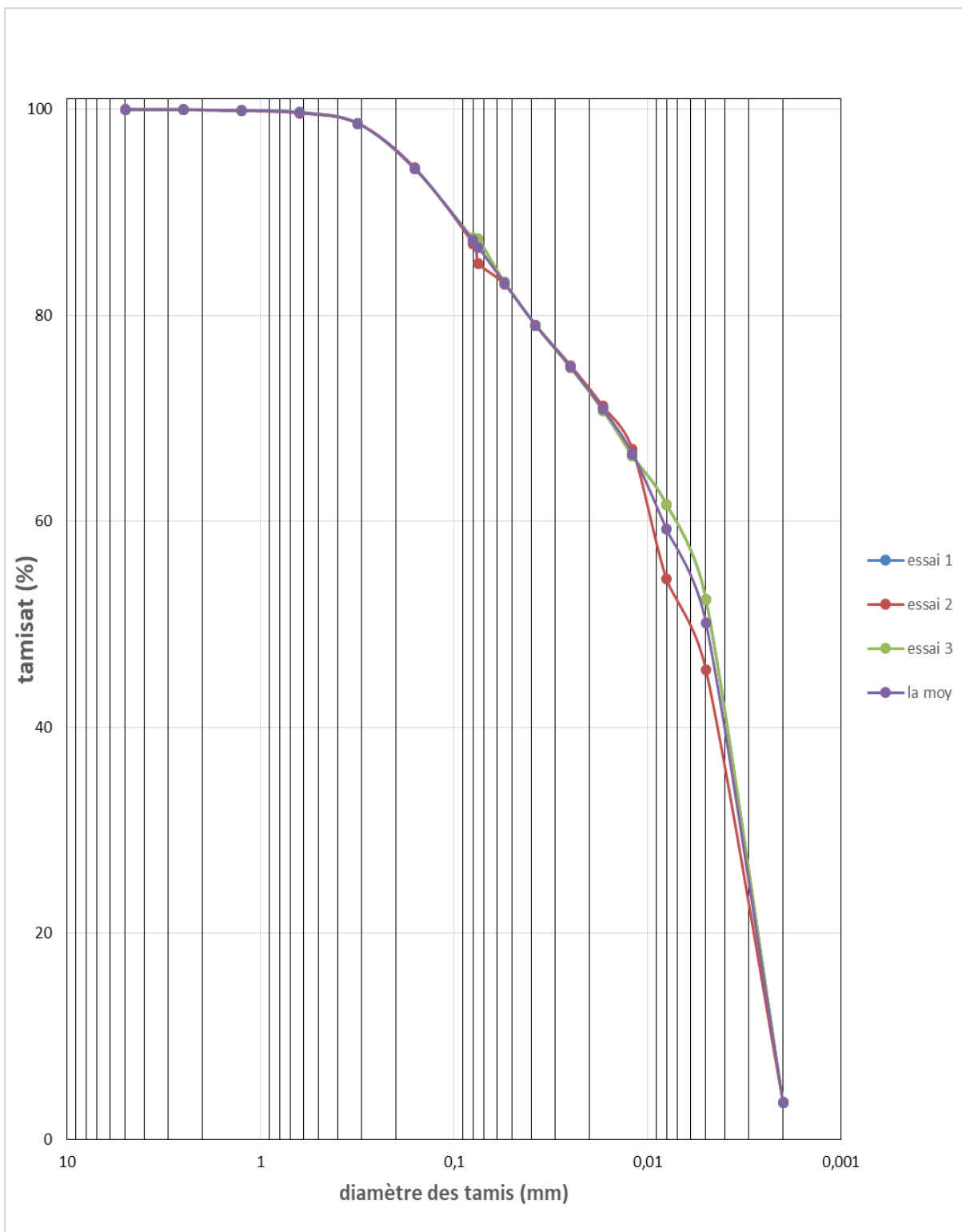


Figure V.3 Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sol non broyé).

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
1,2 5	99,94	99,99	99,94	99,96
0,6 3	99,69	99,65	99,69	99,67
0,3 15	98,09	97,95667	98,04	98,03
0,1 6	90,94	91,88	90,93	91,25
0,0 8	81,97	83,18	81,97	82,37
0,0 75	81,96	83,18	81,96	82,37
0,0 55	78,24	83,18	78,24	79,89
0,0 38	78,2	79,39	78,2	78,60
0,0 25	74,44	75,55	74,44	75
0,0 17	70,66	71,62	70,66	70,98
0,0 12	66,91	63,91	66,91	65,91
0,0 08	59,39	49,84	59,39	56,21
0,0 05	47,46	47,85	47,46	47,59
0,0 02	7,81	7,92	7,81	7,85

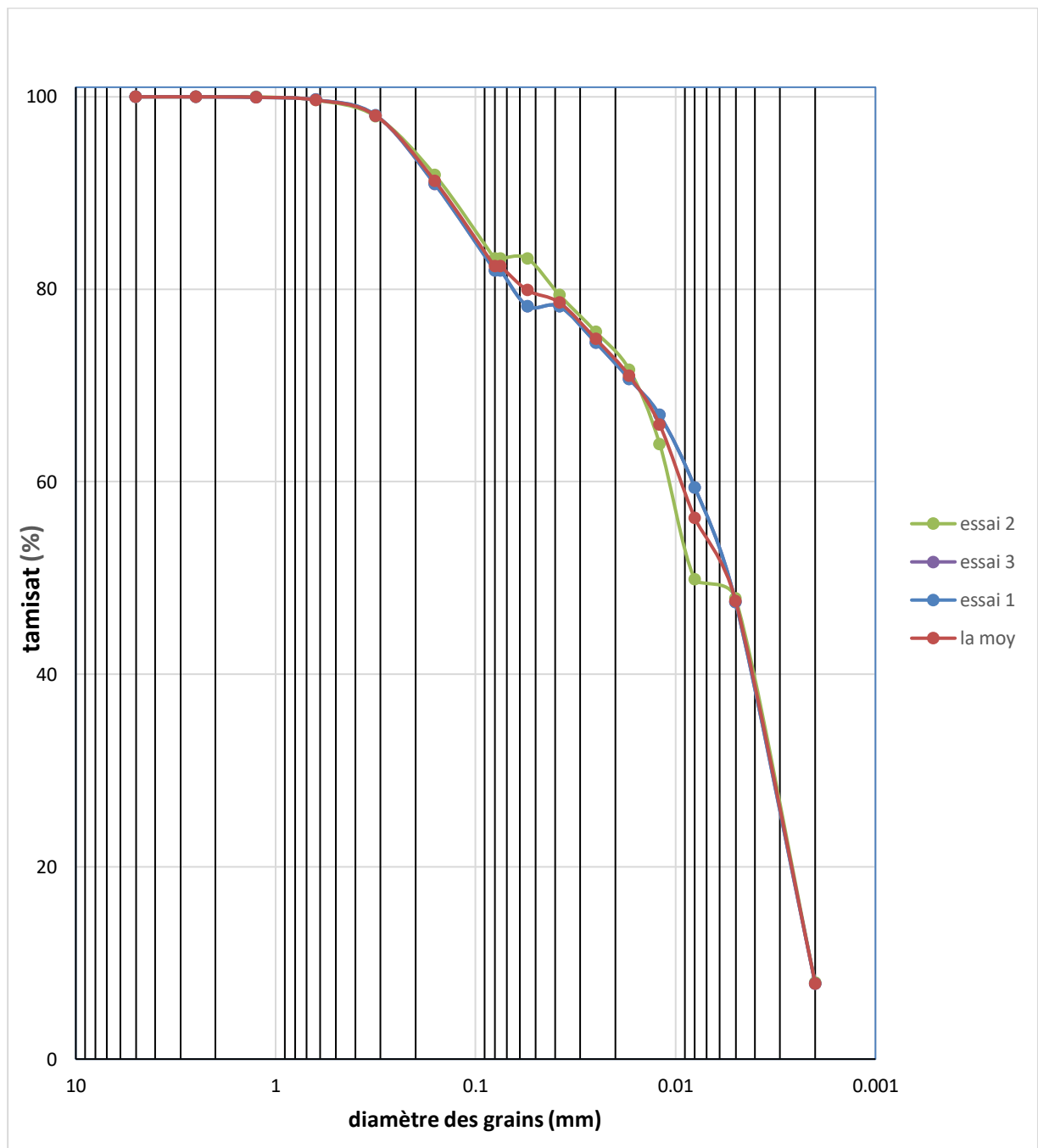


Figure V.4 Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (sol broyé)

Les limites d'Atterberg

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

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

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

Essai 1

Limite de liquidité WL

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
Nombre De Coupe	15	15	23	23	30	30	33	33
N° de la tare								
Masse totale humide (g)	13,294	11,985	15,734	13,773	10,2	9,832	11,697	10,584
Masse totale sèche (g)	11,165	10,218	13,51	12,179	8,188	7,812	9,524	9,079
Masse de la tare (g)	5,484	5,55	7,655	7,979	2,798	2,384	3,71	4,979
Masse de l'eau (g)	2,129	1,767	2,224	1,594	2,012	2,02	2,173	1,505
Masse du sol sec (g)	5,681	4,668	5,855	4,2	5,39	5,428	5,814	4,1
Teneur en eau%	50,93	51,04	50,91	50,71	51,17	50,88	51,13	51,07
Moyenne %	50,98		50,84		51,06		51,11	
Moyenne Générale %	51,04							

Limite de plasticité WP

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3
N° de la tare	AA	A13	B15	C2	GH	23
Masse totale humide (g)	10,5	10,7	6,745	5,238	9,697	7,53
Masse totale sèche (g)	10,1	10,2	6,076	4,83	9,334	7,18
Masse de la tare (g)	8,4	8,2	3,315	3,123	7,927	5,81
Masse de l'eau (g)	0,4	0,5	0,669	0,408	0,363	0,35
Masse du sol sec (g)	1,7	2	2,761	1,707	1,407	1,37
Teneur en eau%	27,23	28,10	27,98	27,63	27,97	27,93
Moyenne %	27,64		27,84		27,95	

Moyenne Générale %	27,81
---------------------------	--------------

Essai 2 :

Limite de liquidité WL

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
Nombre De Coupe	15	15	23	23	30	30	33	33
N° de la tare								
Masse totale humide (g)	12,186	10,871	13,552	11,56	10,487	10,812	14,552	12,56
Masse totale sèche (g)	10,289	9,281	11,556	10,164	8,589	8,991	12,587	11,179
Masse de la tare (g)	4,484	4,564	5,655	5,979	2,798	3,384	6,71	6,979
Masse de l'eau (g)	1,897	1,59	1,996	1,396	1,898	1,821	1,965	1,381
Masse du sol sec (g)	5,805	4,717	5,901	4,185	5,791	5,607	5,877	4,2
Teneur en eau%	50,43	51,04	50,91	50,71	50,17	50,88	50,13	51,07
Moyenne %	50,97		50,80		50,53		50,45	
Moyenne Générale %	50.73							

Limite de plasticité WP

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3
N° de la tare	AA	A13	B15	C2	GH	23
Masse totale humide (g)	8,41	7,396	10,218	6,226	5,686	5,54
Masse totale sèche (g)	8,15	7,128	9,957	5,843	5,387	5,234
Masse de la tare (g)	6,831	5,823	8,65	3,947	3,947	3,68
Masse de l'eau (g)	0,26	0,268	0,261	0,383	0,299	0,306
Masse du sol sec (g)	1,319	1,305	1,307	1,896	1,44	1,554
Teneur en eau%	27,25	28,17	28,01	27,51	28,07	27,96
Moyenne %	27,63		27,76		28,02	
Moyenne Générale %	27,80					

Essai 3 :

Limite de liquidité WL

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
Nombre De Coupe	15	15	23	23	30	30	33	33
N° de la tare	45	55	56	57	58	59	60	61
Masse totale humide (g)	9,56	9,56	11,552	9,88	11,2	10,709	11,552	11,186
Masse totale sèche (g)	8,079	8,079	9,524	8,218	9,188	8,904	9,524	9,177
Masse de la tare (g)	3,979	3,979	3,655	3,557	3,798	3,384	3,71	3,484
Masse de l'eau (g)	1,481	1,481	2,028	1,662	2,012	1,805	2,028	2,009
Masse du sol sec (g)	4,1	4,1	5,869	4,661	5,39	5,52	5,814	5,693
Teneur en eau%	51,13	51,07	50,91	50,71	51,17	51,88	51,13	51,07
Moyenne %	51,09745255		50,80954102		51,52638528		51,09745255	
Moyenne Générale %	51.13							

Limite de plasticité WP

	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3
N° de la tare	AA	A13	B15	C2	GH	23
Masse totale humide (g)	6,444	5,429	5,386	5,085	5,646	5,463
Masse totale sèche (g)	6,141	5,128	5,076	4,83	5,334	5,18
Masse de la tare (g)	4,831	3,823	3,723	3,707	3,927	3,943
Masse de l'eau (g)	0,303	0,301	0,31	0,255	0,312	0,283
Masse du sol sec (g)	1,31	1,305	1,353	1,123	1,407	1,237
Teneur en eau%	27,13	28,07	27,91	27,71	28,17	27,88
Moyenne %	27,09		27,809		27,926	
Moyenne Générale %	27.63					

Présente la récapitulation des résultats des essais des limites d'Atterberg.

	Essai01	Essai02	Essai03	Moyenne
Limite de liquidité %	51.13	50,73	51,07	51,02
Limite de plasticité %	27,63	27,80	27,81	27,75
Indice de plasticité	18,5	18,93	19,26	18,49

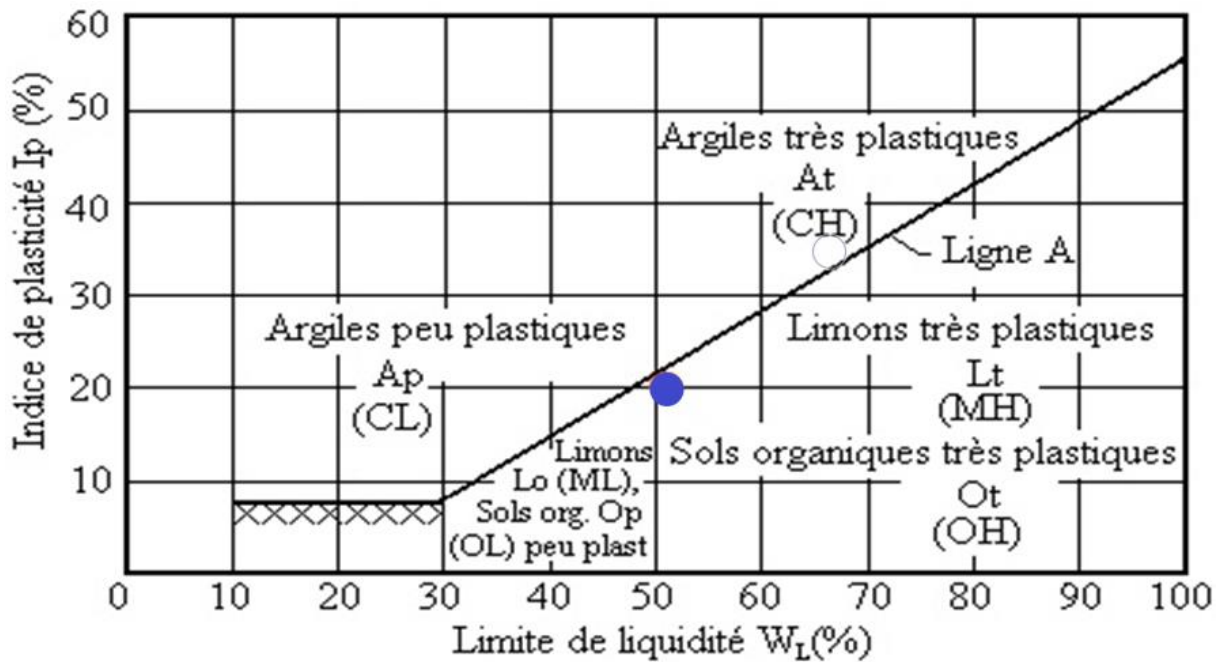


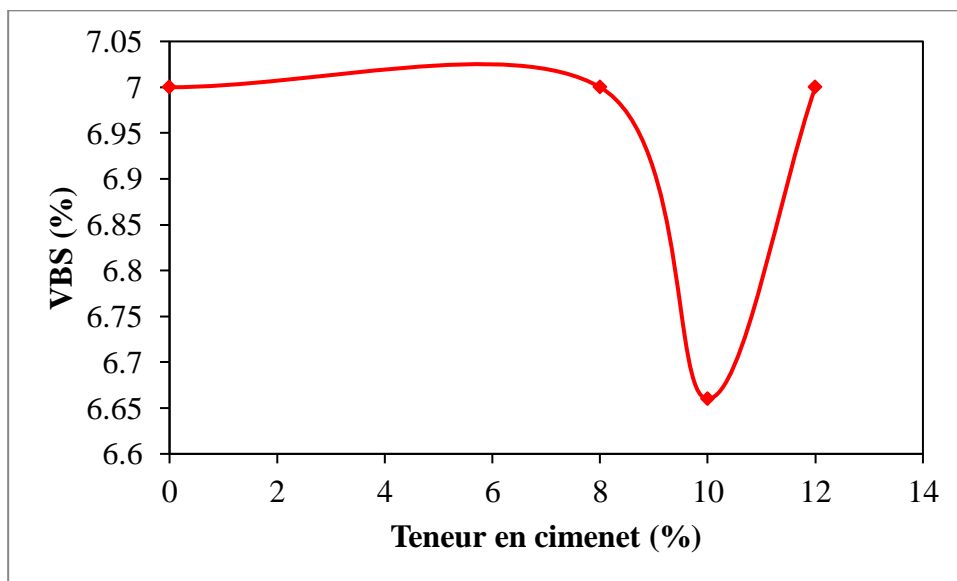
Figure V.5 Classe des sols étudiés selon l'abaque de Casagrande

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	420	7	147
2	400	6,66	140
3	420	7	147
Moyenne	413,33	6,88	144,66



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 γ_h (g/cm^3)	2,13
Poids volumique sec γ_d (g/cm^3)	1,78

Limite de liquidité w_L	35,33
Limite de plasticité w_P	22,81
Indice de plasticité I_p	12,52
Valeur de Bleu de méthylène VBS	6,88
La surface spécifique (m^2/g)	144,66
Passants à 2,5mm (%)	100
Passants à 0,08mm (%)	87,31
Passants à 0,025mm (%)	75,1
Passants à 0,002mm (%)	3,65
Indice de consistance I_c : $I_c = (W_L - W)/I_p$	2,02

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 35,33% et l'indice de plasticité I_p est de 22,81%.

Ces valeurs sont très peu dispersées pour le prélèvement exploré. Elles semblent

indiquer que le massif est homogène dans la zone étudiée.

Selon la classification LCPC en vigueur (Magnan ; 1980), il s'agit d'une argile 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 6,88 donc cette argile se classe parmi les sols argileux selon la norme française NF P 11 -300.

La surface spécifique est de 144,66 dépasse largement 100m²/g ce qui implique que notre argile est constituée essentiellement de minéraux de type vermiculite.

Les essais mécaniques

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	17,09	1,63	16,95	1,64	16,86	1,63	16,96	1,63
18	20,05	1,65	19,62	1,66	19,34	1,66	19,67	1,65
20	23,92	1,68	21,92	1,71	22,10	1,70	22,65	1,69
22	26,74	1,60	25,95	1,62	26,60	1,58	26,43	1,60
24	29,35	1,58	29,65	1,57	29,20	1,58	29,40	1,58

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

La teneur en eau à l'optimum Proctor normal $W_{opt} = 20,37\%$ et la masse volumique sèche à l'optimum Proctor normal $\rho_d = 1,68 \text{ g/cm}^3$.

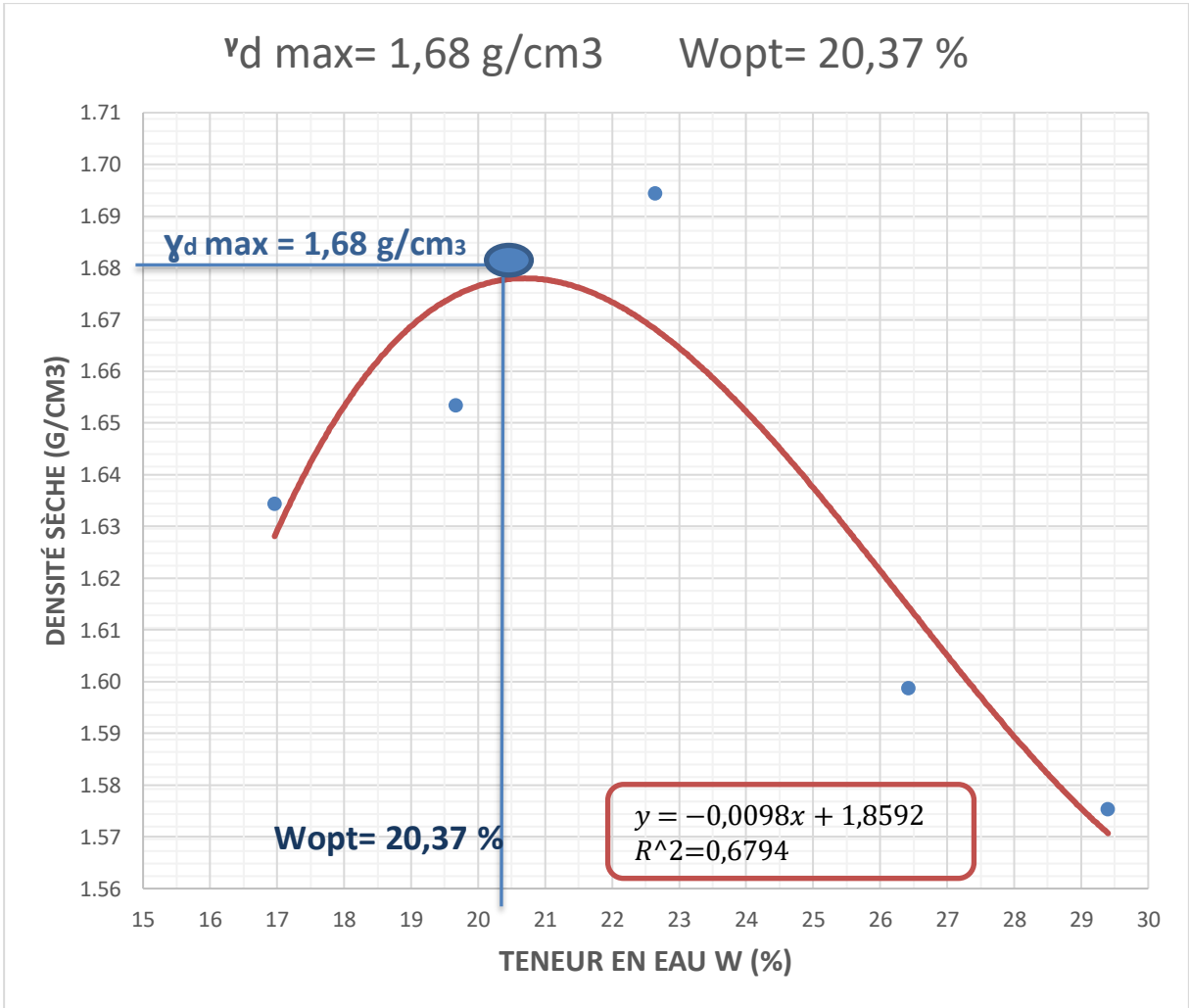


Figure V.6 Masses volumiques sèches en fonction des teneurs en eau

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.

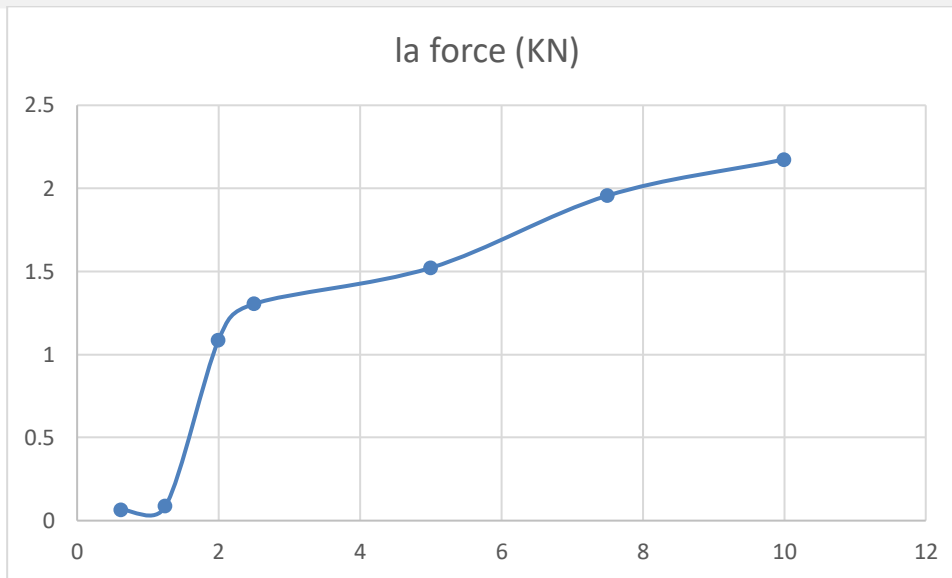
Tableau V.9 Forces de pénétration en fonction des enfoncements

dép. de piston	dép. de force (mm)	La force (KN)
0,625	0,03	0,06521
1,25	0,04	0,08695
2	0,05	1,0869
2,5	0,06	1,3042
5	0,07	1,5216
7,5	0,09	1,9563
10	0,1	2,1739

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
9,77	7,63	9,77

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

Essai de compression simple. :

Tableau V.11 Résultats de la compression

Essai	La charge (KN)	La résistance (Mpa)
1	2,9	24,65
2	3,3	26,35
3	3,9	25,15
Moyenne	3,37	25,38

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 ciment et confectionnées à la teneur en eau aux conditions de l'optimum du Proctor normal et ceux du Proctor modifié.

Essais d'identification :

Limite D'Atterberg

8 %

Essai 1

Limite de liquidité WL

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	15	16	22	23	27	28	32	33
N° de la tare	K	C	R	F	V	X	Q	W
Masse totale humide (g)	9,78	13,22	11,79	17,03	18,95	16,46	18,84	12,82
Masse totale sèche (g)	7,93	11,96	9,96	15,93	17,6	15,7	17,23	11,57
Masse de la tare (g)	1,83	10,23	3,57	13,8	23,87	10,27	12,58	2,84
Masse de l'eau (g)	2,08	1,8	2,83	2,75	2,35	2,06	2,07	1,95
Masse du sol sec (g)	6,2	3,33	5,39	5,33	4,73	4,13	4,19	4,03
Teneur en eau%	50,68	50,05	50,50	49,59	50,68	50,88	51,40	50,39
Moyenne %	50,43		50,05		50,28		50,90	
Moyenne Générale %	50,28							

Limite de plasticité WP

	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
N° de la tare	32	33	34	35	36	37
Masse totale humide (g)	11,41	5,84	18,78	16,77	18,53	22,51
Masse totale sèche (g)	11,09	5,56	18,34	16,51	18,21	22,14
Masse de la tare (g)	10,06	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)	1,03	0,83	1,54	0,82	1,04	1,16
Teneur en eau%	32,68	32,12	32,60	32,98	32,68	32,88
Moyenne %	32,90		32,79		32,78	
Moyenne Générale %	32,85					

Essai 2

Limite de liquidité WL

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	16	17	22	24	26	27	31	32
N° de la tare	M	B	N	L	S	A	Y	I
Masse totale humide (g)	9,84	13,07	11,59	16,83	18,75	16,24	18,69	12,63
Masse totale sèche (g)	7,91	11,92	9,87	15,88	17,52	15,61	17,16	11,51
Masse de la tare (g)	1,79	10,18	3,6	13,78	23,9	10,31	12,61	2,8
Masse de l'eau (g)	2,08	1,8	2,83	2,75	2,35	2,06	2,07	1,95
Masse du sol sec (g)	6,2	3,33	5,39	5,33	4,73	4,13	4,19	4,03
Teneur en eau%	51,68	50,05	50,50	50,59	50,68	50,88	51,40	50,39
Moyenne %	50,93		50,55		50,78		51,01	
Moyenne Générale %	50,82							

Limite de plasticité WP

	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
N° de la tare	78	79	80	84	85	86
Masse totale humide (g)	11,39	5,86	18,81	16,83	18,48	22,46
Masse totale sèche (g)	11,15	5,49	18,35	16,57	18,13	22,09
Masse de la tare (g)	10,10	4,80	16,85	15,74	17,21	21,04
Masse de l'eau (g)	0,35	0,30	0,45	0,23	0,30	0,36
Masse du sol sec (g)	1,07	0,85	1,51	0,81	1,07	1,17
Teneur en eau%	30,68	31,12	30,60	30,98	31,68	31,88
Moyenne %	32,90		32,79		32,78	
Moyenne Générale %	32,62					

Essai 3

VI Limite de liquidité WL

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	15	16	22	23	27	28	32	33
N° de la tare	13	14	15	16	17	18	19	20
Masse totale humide (g)	9,78	13,22	11,79	17,03	18,95	16,46	18,84	12,82
Masse totale sèche (g)	7,93	11,96	9,96	15,93	17,6	15,7	17,23	11,57
Masse de la tare (g)	1,83	10,23	3,57	13,8	23,87	10,27	12,58	2,84
Masse de l'eau (g)	2,08	1,8	2,83	2,75	2,35	2,06	2,07	1,95
Masse du sol sec (g)	6,2	3,33	5,39	5,33	4,73	4,13	4,19	4,03
Teneur en eau%	51,50	51,05	51,50	50,59	50,78	50,85	51,21	50,40
Moyenne %	51,27		50,95		50,81		50,94	
Moyenne Générale %	50,99							

Limite de plasticité WP

N° de la tare	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
	106	107	108	109	110	111
Masse totale humide (g)	11,40	5,87	18,81	16,79	18,55	22,53
Masse totale sèche (g)	11,11	5,60	18,36	16,51	18,22	22,14
Masse de la tare (g)	10,06	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)	1,03	0,83	1,54	0,82	1,04	1,16
Teneur en eau%	33,75	34,16	33,74	34,21	34,55	33,91
Moyenne %	34,01		34,16		34,23	
Moyenne Générale %	34,29					

10 %

Limite de liquidité WL

Nombre De Coupe	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
	18	18	22	23	27	28	32	33
N° de la tare	16	17	18	19	20	21	22	23
Masse totale humide (g)	23,72	15,22	11,54	21,81	30,87	16,38	18,79	8,76
Masse totale sèche (g)	20,51	13,59	8,99	19,17	28,66	14,45	16,81	6,92
Masse de la tare (g)	13,74	10,23	3,57	13,8	23,87	10,27	12,58	2,84
Masse de l'eau (g)	3,35	1,8	2,83	2,75	2,35	2,06	2,07	1,95
Masse du sol sec (g)	6,71	3,33	5,39	5,33	4,73	4,13	4,19	4,03
Teneur en eau%	49,93	49,05	49,50	49,59	48,68	49,88	49,40	49,39
Moyenne %	49,49		49,55		49,28		49,40	
Moyenne Générale %	49,43							

Limite de plasticité WP

N° de la tare	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
	57	58	59	60	61	62
Masse totale humide (g)	22,32	5,76	18,78	16,77	18,53	22,51
Masse totale sèche (g)	21,92	5,52	18,52	16,54	18,24	22,17
Masse de la tare (g)	20,5	4,73	16,8	15,69	17,17	20,98
Masse de l'eau (g)	0,41	0,28	0,44	0,26	0,32	0,37
Masse du sol sec (g)	1,92	0,83	1,50	0,78	1,24	1,14
Teneur en eau%	33,96	34,14	33,67	34,79	33,65	34,93
Moyenne %	34,05		34,23		34,29	
Moyenne Générale %	34,19					

12 %

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	15	18	23	23	27	27	33	33
N° de la tare	1	2	3	4	5	6	7	8
Masse totale humide (g)	22,7	15,36	11,79	21,88	30,95	16,46	18,84	8,82
Masse totale sèche (g)	18,52	13,56	8,96	19,13	28,6	14,4	16,77	6,87
Masse de la tare (g)	10,05	10,23	3,57	13,8	23,87	10,27	12,58	2,84
Masse de l'eau (g)	4,18	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%	48,35	48,05	49,50	48,20	48,68	48,88	49,40	48,39
Moyenne %	48,21		48,20		48,58		48,60	
Moyenne Générale %	48,21							

	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
N° de la tare	9	10	11	22	33	44
Masse totale humide (g)	11,61	5,84	18,78	16,77	18,53	22,51
Masse totale sèche (g)	11,28	5,56	18,34	16,51	18,21	22,14
Masse de la tare (g)	10,32	4,73	16,8	15,69	17,17	20,98
Masse de l'eau (g)	0,33	0,28	0,44	0,26	0,32	0,37
Masse du sol sec (g)	0,96	0,83	1,54	0,82	1,04	1,16
Teneur en eau%	34,38	33,73	34,57	34,71	34,50	34,60
Moyenne %	34,66		30,64		34,55	
Moyenne Générale %	34,62					

Présente les résultats moyens des limites de consistance aux différents dosages

Dosage de liant	WL	WP	IP
0%	51,02	27,75	18,29
8%	50,81	33,91	16,6
10%	49,52	34,12	15,4
12%	48,21	34,62	13,59

Tableau V.13 Limites de consistance pour différents dosages

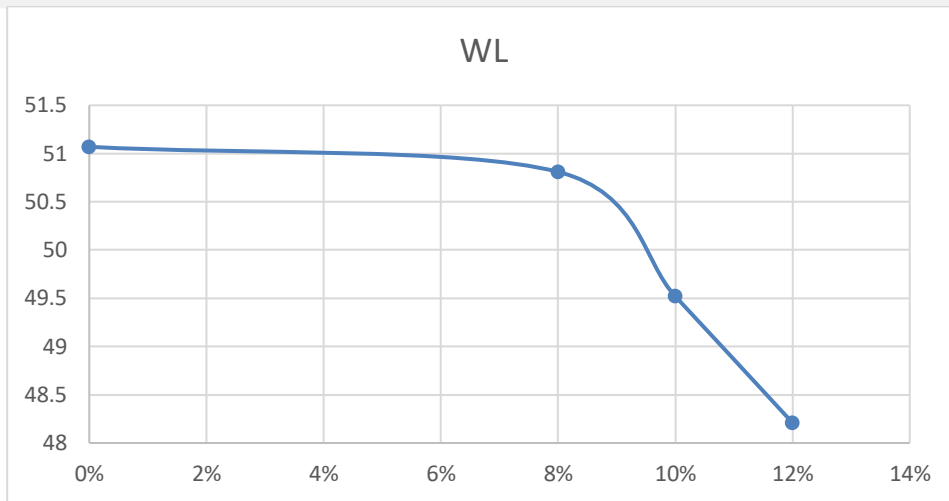


Figure V.21 Limite de liquidité

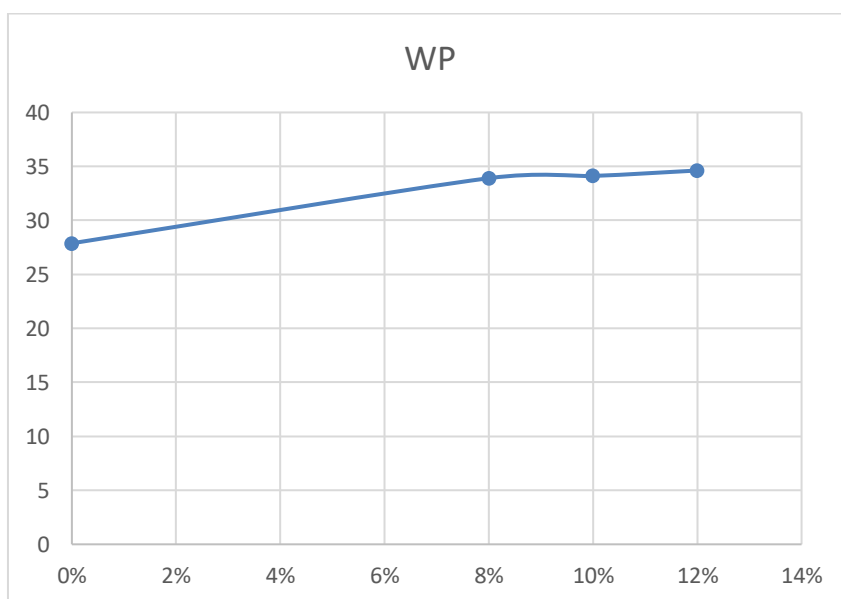


Figure V.22 Limite de plasticité

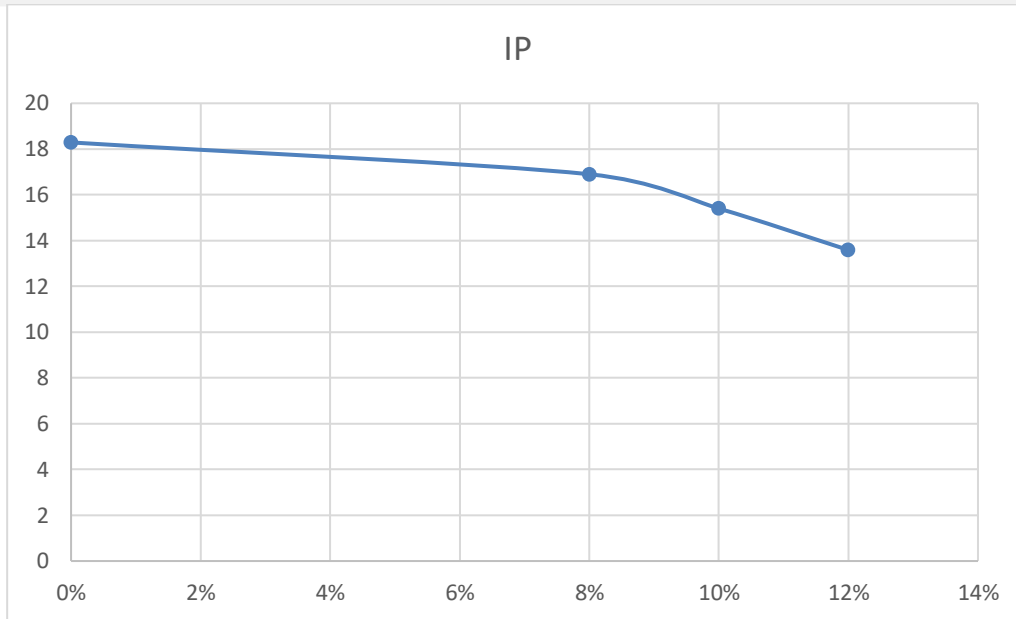


Figure V.23 Indice de plasticité

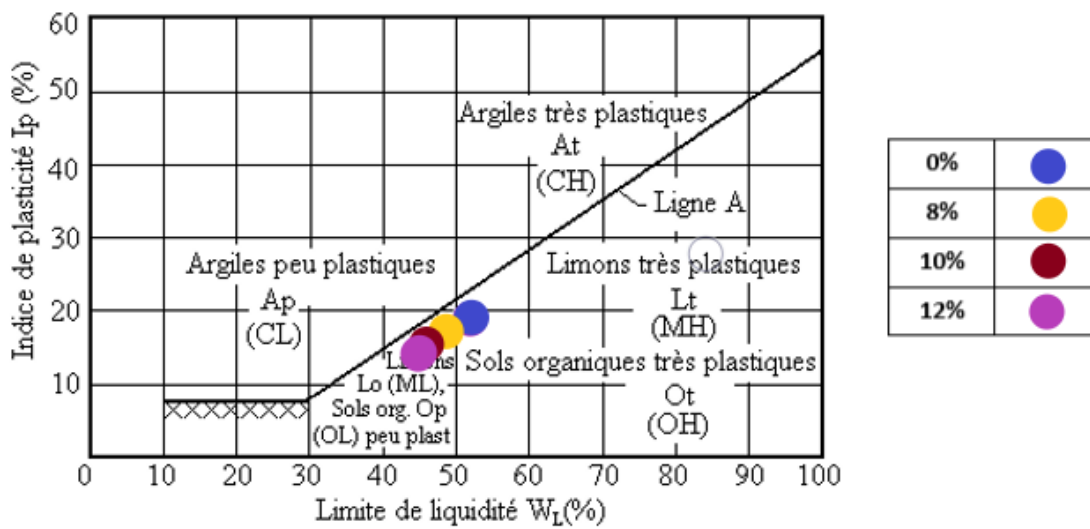
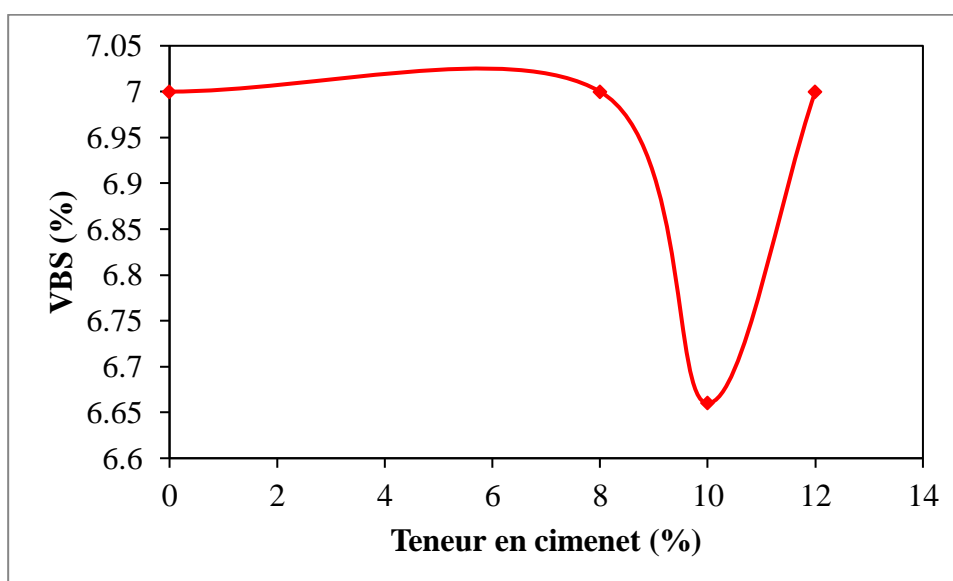


Figure V.24 Classification selon l'abaque de Casagrande

Essai au bleu de méthylène

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

Pourcentage	Volume de la solution (cm ³)	VBS (Cm ³)	Surface spécifique (g/cm ²)
8%	380	6,33	133
10%	360	6	126
12%	340	5,66	118,86
Moyenne	360	5,99	125,95



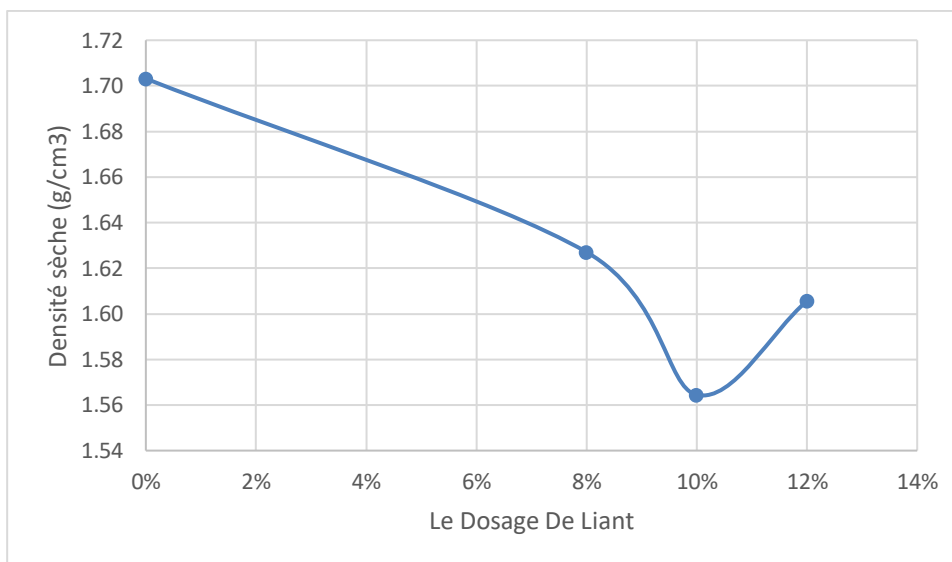
Essai mécanique

Proctor normal

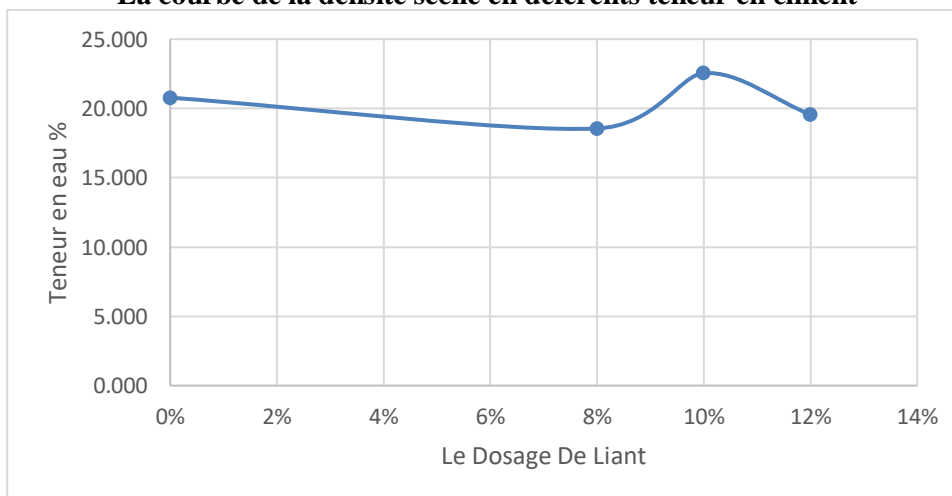
Tableau V.15 : Résultats des essais Proctor normal à différentes teneurs (chaux-ciment)

Essai 1 :

Réf/ échantillon	1	2	3	4
Le Dosage De Liant	0%	8%	10%	12%
Masse du sol humide, (g)	1941,84	1820,92	1809,86	1812,23
Masse du sol sec, (g)	1607,78	1535,95	1476,85	1515,75
Volume du moule, (cm ³)	944	944	944	944
Masse volumique du sol humide, (g/cm ³)	2,06	1,93	1,92	1,92
Masse volumique du sol sec (gr/cm ³)	1,70	1,63	1,56	1,61
Masse de l'eau, (g)	334,06	284,97	333,01	296,48
Teneur en eau %	20,778	18,553	22,549	19,560



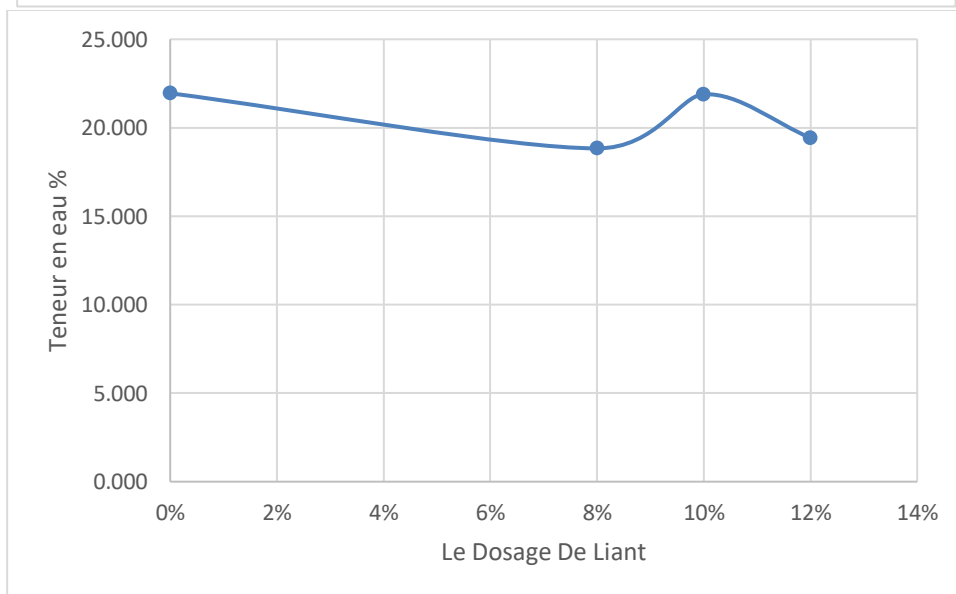
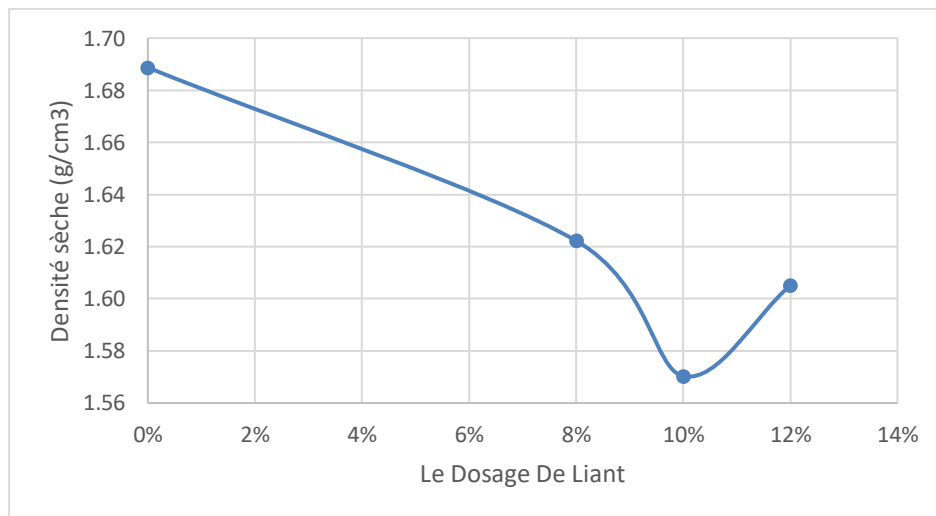
La courbe de la densité sèche en différents teneur en ciment



La courbe de la teneur en eau en différents teneur en ciment

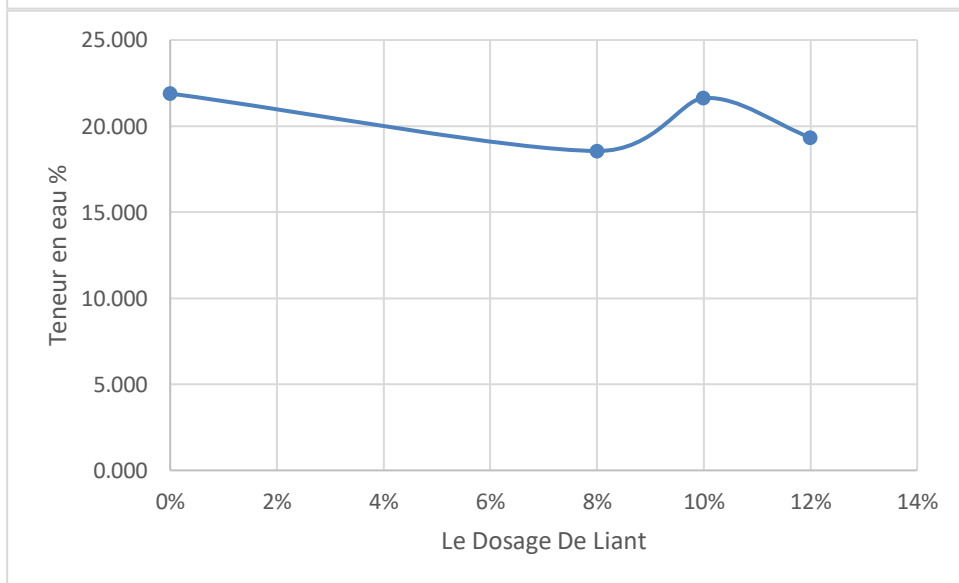
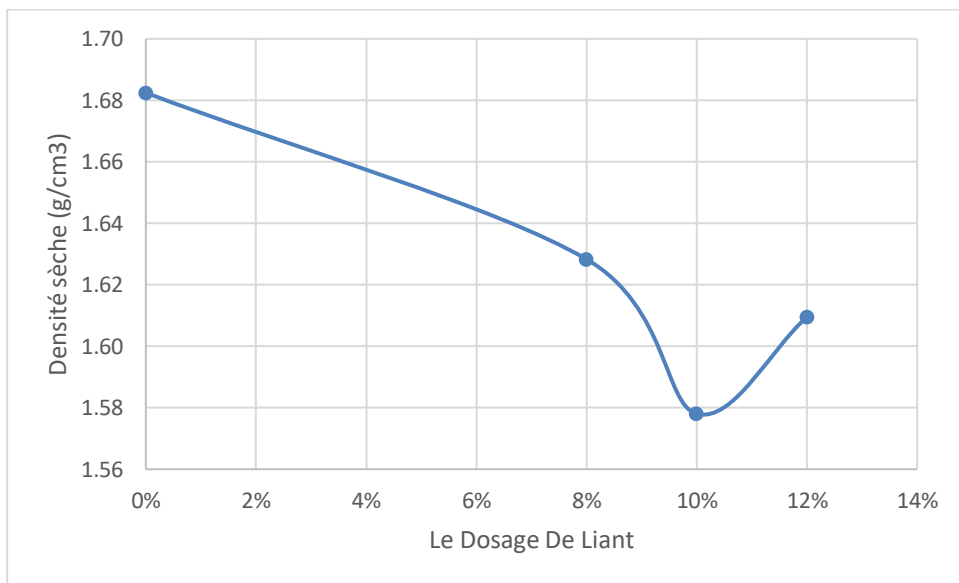
Essai 2 :

Réf/ échantillon	1	2	3	4
Le Dosage De Liant	0%	8%	10%	12%
Masse du sol humide, (g)	1944,08	1819,83	1806,94	1809,69
Masse du sol sec, (g)	1594,15	1531,39	1482,41	1515,25
Volume du moule, (cm³)	944	944	944	944
Masse volumique du sol humide, (g/cm³)	2,06	1,93	1,91	1,92
Masse volumique du sol sec (gr/cm³)	1,69	1,62	1,57	1,61
Masse de l'eau, (g)	349,93	288,44	324,53	294,44
Teneur en eau %	21,951	18,835	21,892	19,432



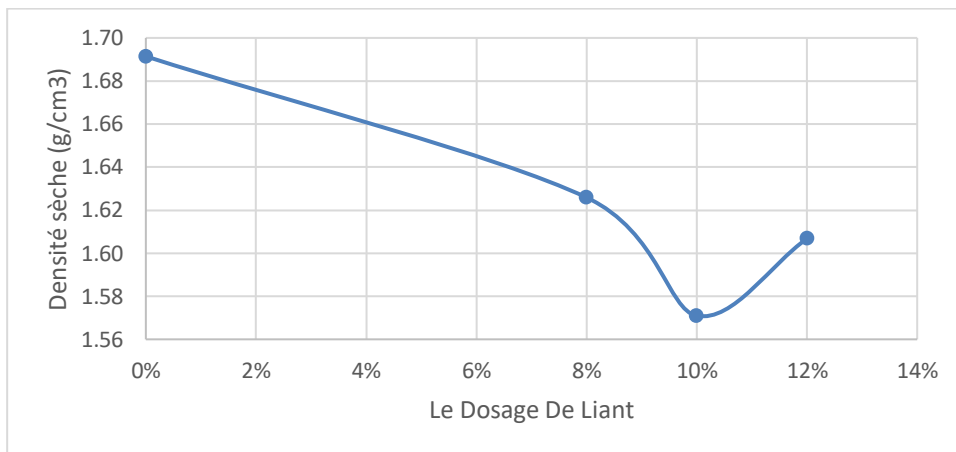
Essai 3 :

Réf/ échantillon	1	2	3	4
Le Dosage De Liant	0%	8%	10%	12%
Masse du sol humide, (g)	1935,93	1822,3	1811,86	1813,2
Masse du sol sec, (g)	1588,24	1537,11	1489,66	1519,41
Volume du moule, (cm ³)	944	944	944	944
Masse volumique du sol humide, (g/cm ³)	2,05	1,93	1,92	1,92
Masse volumique du sol sec (gr/cm ³)	1,68	1,63	1,58	1,61
Masse de l'eau, (g)	347,69	285,19	322,2	293,79
Teneur en eau %	21,892	18,554	21,629	19,336

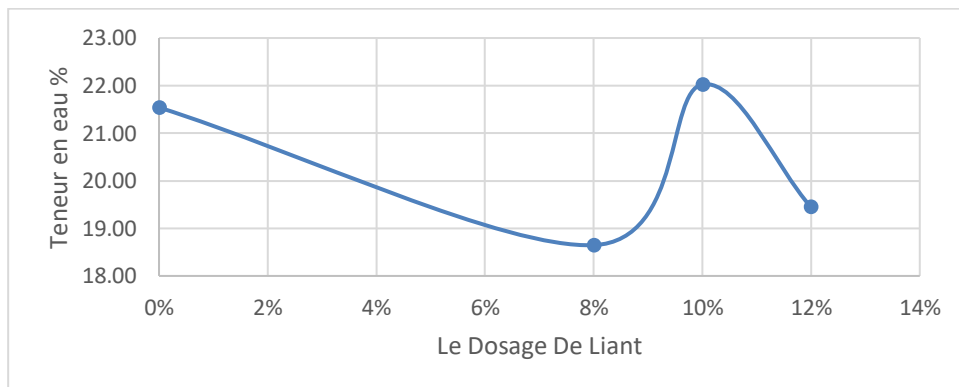


La moyenne :

Le Dosage De Liant	0%	8%	10%	12%
Masse volumique du sol sec (gr/cm ³)	1,69	1,63	1,57	1,61
Teneur en eau %	21,54	18,65	22,02	19,44



La courbe de la densité sèche en différents teneur en ciment



La courbe de la teneur en eau en différents teneur en ciment

CBR immédiat

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

Enfoncement	Force (kN) 8% ciment	Force (kN) 10% ciment	Force (kN) 12% ciment
0,625	0,064	1,3907	0,625
1,25	0,08	1,74	1,25
2	0,087	1,83	2
2,5	0,09	1,96	2,5
5	0,103	2,2382	5
7,5	0,123	2,67	7,5
10	0,143	3,1074	10

Indice à 2,5 mm

14,65

Indice à 5 mm

11,23

Indice C.B.R max

14,65

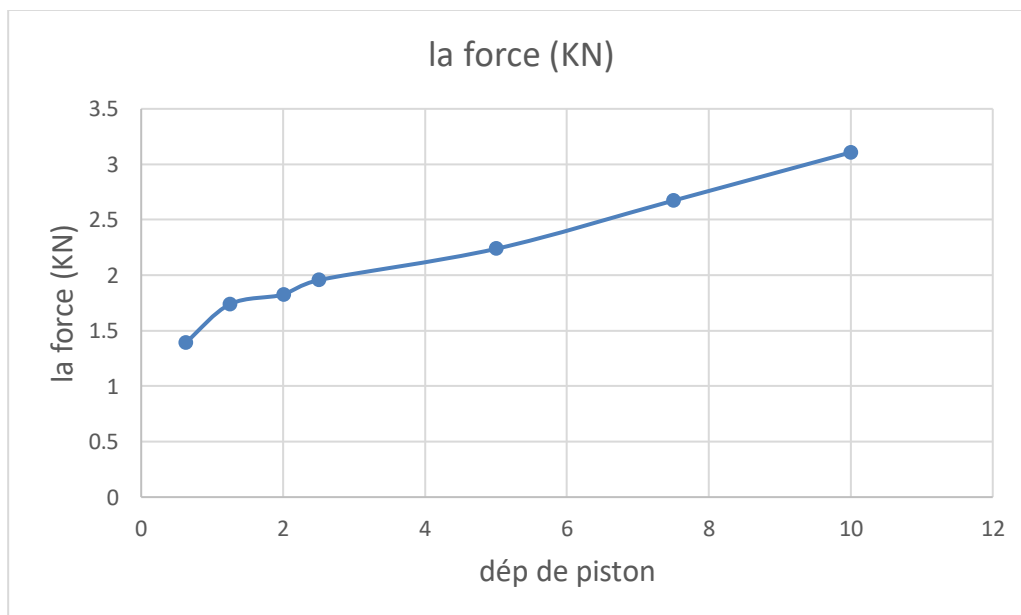


Figure V.28 : Forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en ciment Ardia

Tableau V.17 Forces en fonction du dosage ciment Ardia pour chaque enfoncement

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,062	1,3473
1,25	0,08	1,7384
2	0,085	1,8471
2,5	0,09	1,9557
5	0,102	2,2165
7,5	0,121	2,6293
10	0,141	3,0639

Indice à 2,5 mm

14,65

Indice à 5 mm

11,12

Indice C.B.R max

14,65

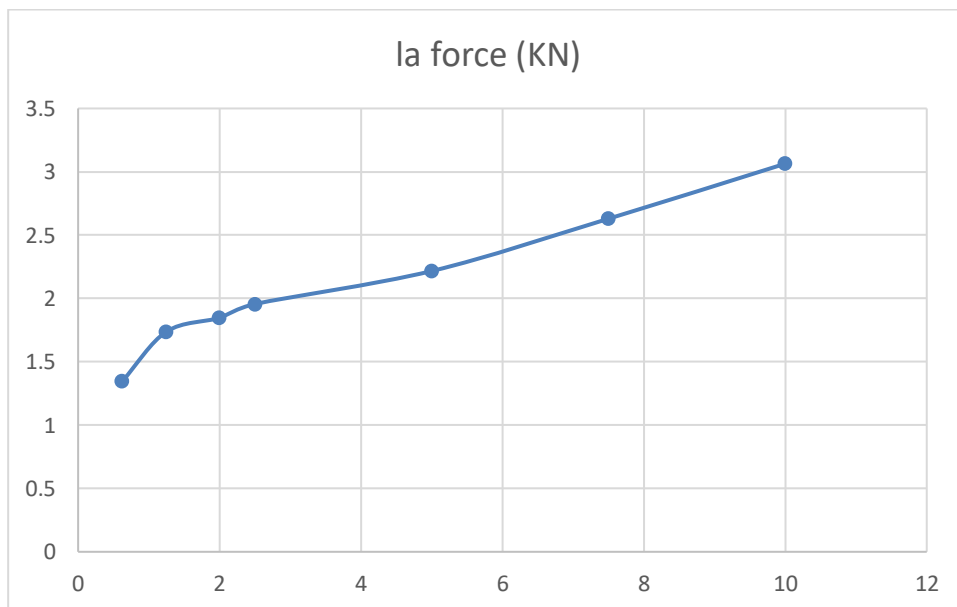


Figure V.29 Forces en fonction du dosage ciment ardia pour chaque enfoncement

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

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,066	1,4342
1,25	0,081	1,7601
2	0,089	1,934
2,5	0,091	1,9774
5	0,104	2,2599
7,5	0,125	2,7163
10	0,145	3,1509

Indice à 2,5 mm

14,81

Indice à 5 mm

11,34

Indice C.B.R max

14,81

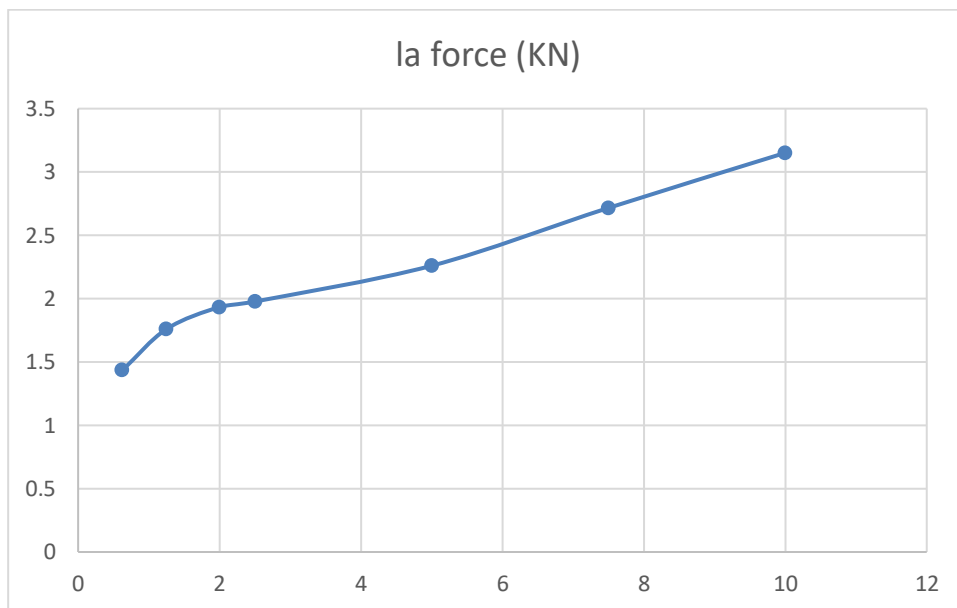


Figure V.30 Indices C.B.R immédiats pour différents dosages en Ciment Ardia

La moyenne :

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,064	1,3907
1,25	0,08	1,7462
2	0,087	1,8704
2,5	0,09	1,9644
5	0,103	2,2382
7,5	0,123	2,6719
10	0,143	3,1074

Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
14,71	11,23	14,71

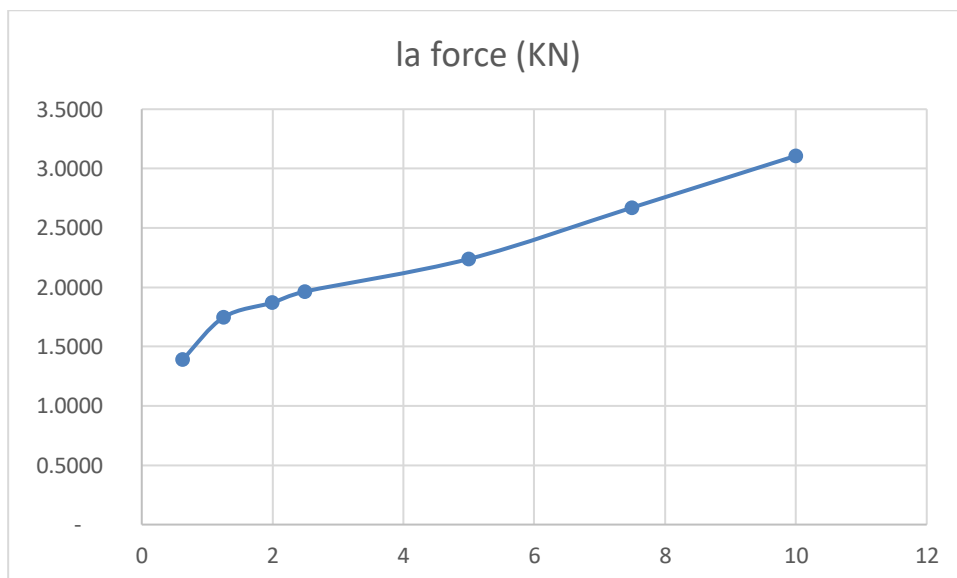


Figure V.31 Indices C.B.R immédiats pour différents dosages en Ciment Ardia

10 % :

Essai 1 :

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,045	0,9779
1,25	0,056	1,2169
2	0,093	2,021
2,5	0,116	2,5207
5	0,214	4,6502
7,5	0,26	5,6498
10	0,282	6,1279

Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
18,88	23,33	23,33

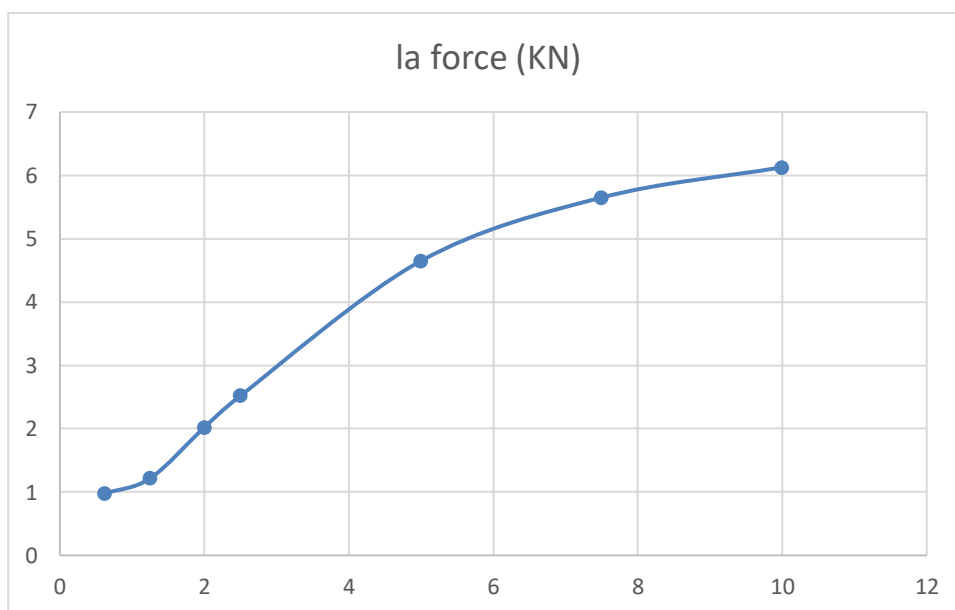


Figure V.32 Indices C.B.R immédiats pour différents dosages en Ciment Ardia

Essai 2 :

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,044	0,9561
1,25	0,056	1,2169
2	0,091	1,9557
2,5	0,115	2,4555
5	0,212	4,346
7,5	0,258	5,5412
10	0,28	6,0844

Indice à 2,5 mm

Indice à 5 mm

Indice C.B.R max

18,39

21,81

21,81

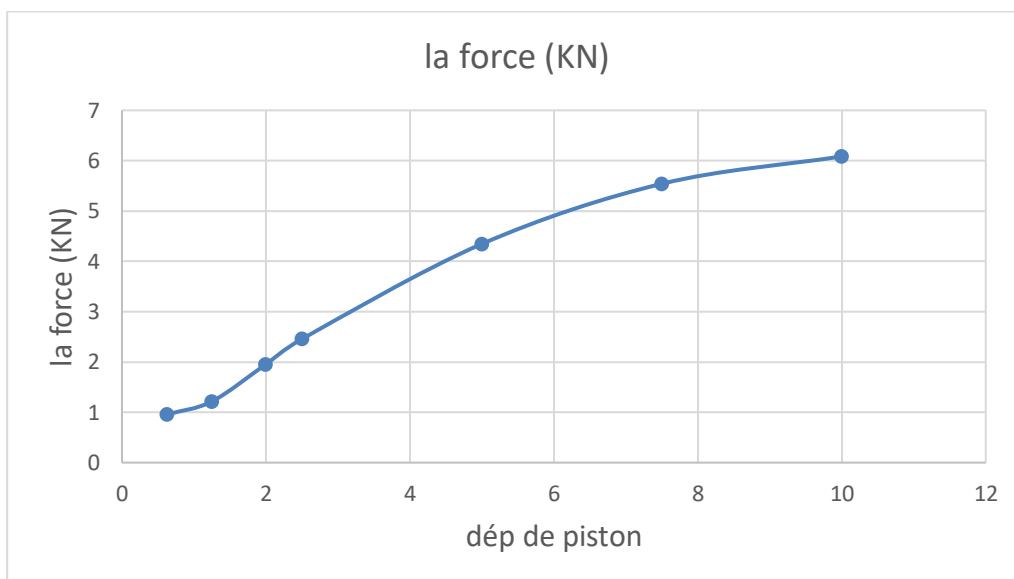


Figure V.33 Indices C.B.R immédiats pour différents dosages en Ciment Ardia

Essai 3 :

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,044	0,9561
1,25	0,057	1,2386
2	0,09	1,9557
2,5	0,114	2,4772
5	0,21	4,5633
7,5	0,257	5,5846
10	0,28	6,0844

Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
18,56	22,90	22,90

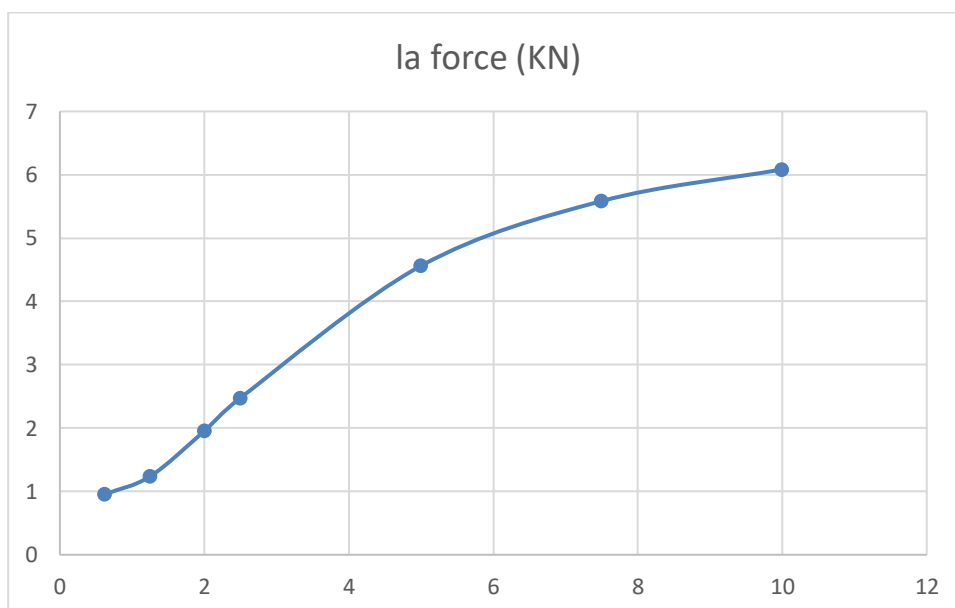


Figure V.34 Indices C.B.R immédiats pour différents dosages en Ciment Ardia

La moyenne :

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,044	0,9634
1,25	0,06	1,2241
2	0,091	1,9775
2,5	115,00	2,4845
5	0,212	4,5198
7,5	0,258	5,5919
10	0,28	6,0989

Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
18,61	22,68	22,68

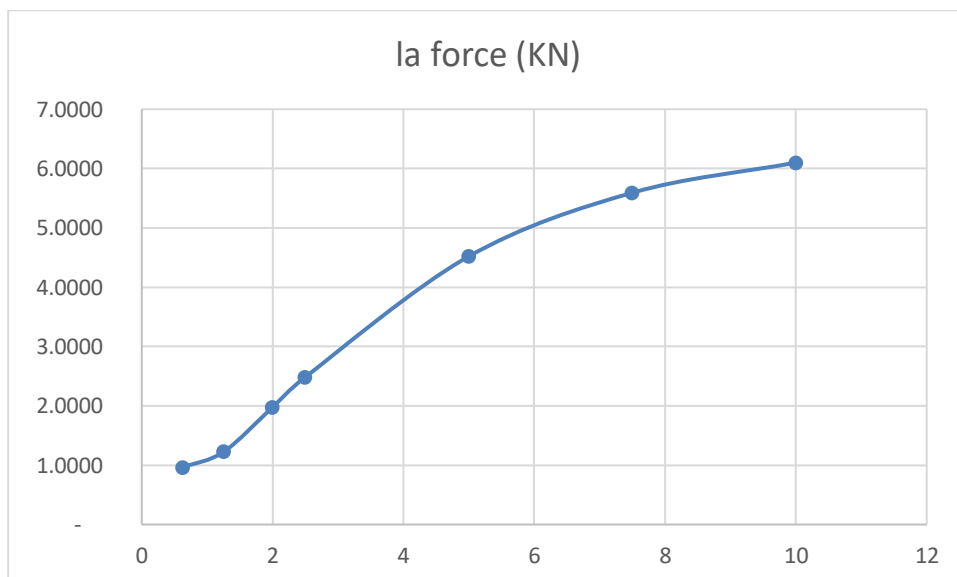


Figure V.35 Indices C.B.R immédiats pour différents dosages en Ciment Ardia

12 % :

Essai 1 :

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,028	0,6084
1,25	0,063	1,369
2	0,097	2,1078
2,5	0,115	2,499
5	0,177	3,8462
7,5	0,206	4,4547
10	0,226	4,8893

Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
18,72	19,30	19,30

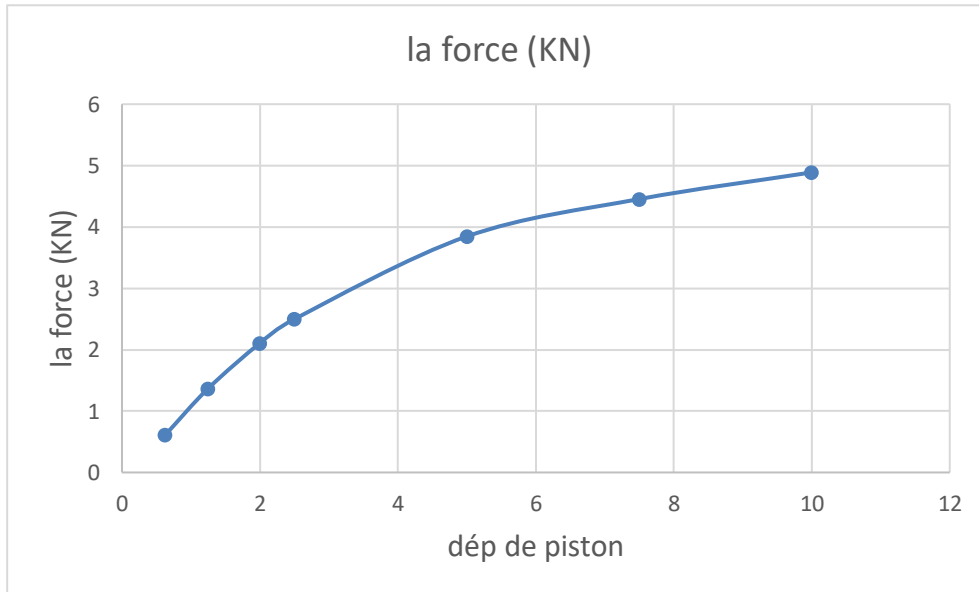


Figure V.36 Indices C.B.R immédiats pour différents dosages en Ciment Ardia

Essai 2 :

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,027	0,5867
1,25	0,062	1,3472
2	0,095	2,0644
2,5	0,113	2,4555
5	0,175	3,8028
7,5	0,205	4,4547
10	0,225	4,8893

Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
18,39	19,08	19,08

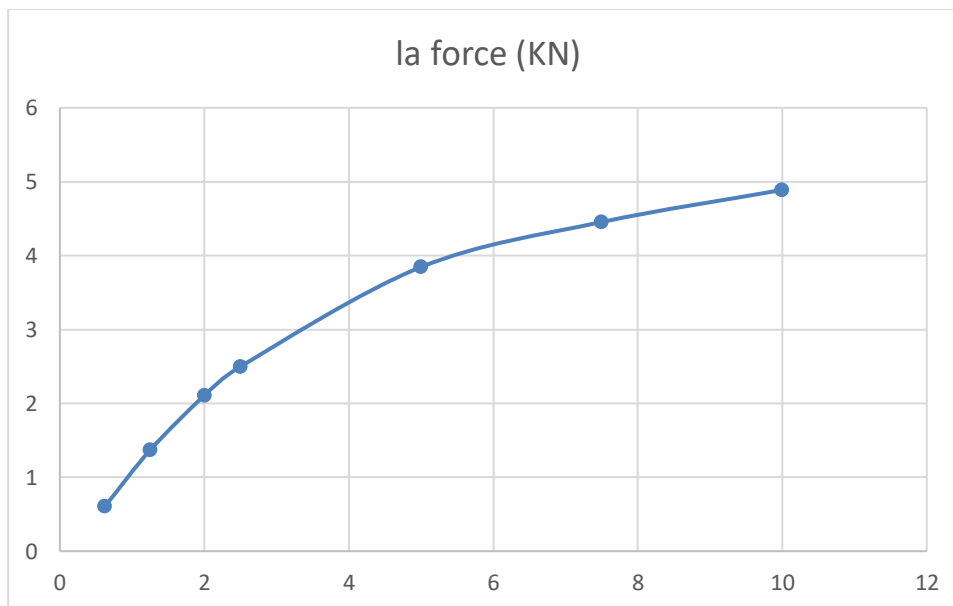


Figure V.37 Indices C.B.R immédiats pour différents dosages en Ciment Ardia

Essai 3 :

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,029	0,6302
1,25	0,064	1,3907
2	0,99	2,1513
2,5	0,117	2,5424
5	0,179	3,8897
7,5	0,207	4,4981
10	0,227	4,9327

Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
19,04	19,52	19,52

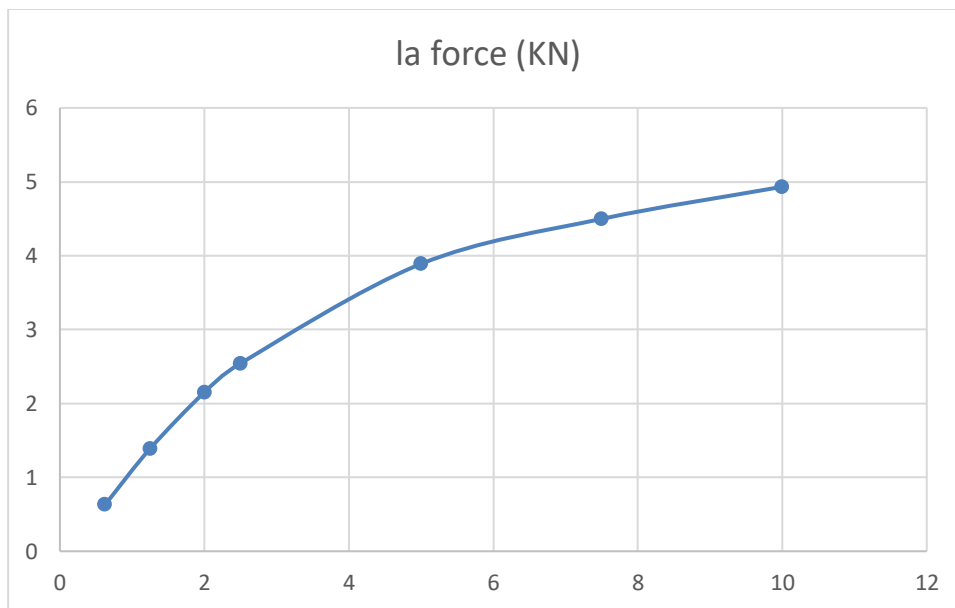


Figure V.38 Indices C.B.R immédiats pour différents dosages en Ciment Ardia

La moyenne :

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,028	0,6084
1,25	0,063	1,3690
2	0,097	2,1078
2,5	0,115	2,4990
5	0,177	3,8462
7,5	0,206	4,4692
10	0,226	4,9038

Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
18,72	19,30	19,30

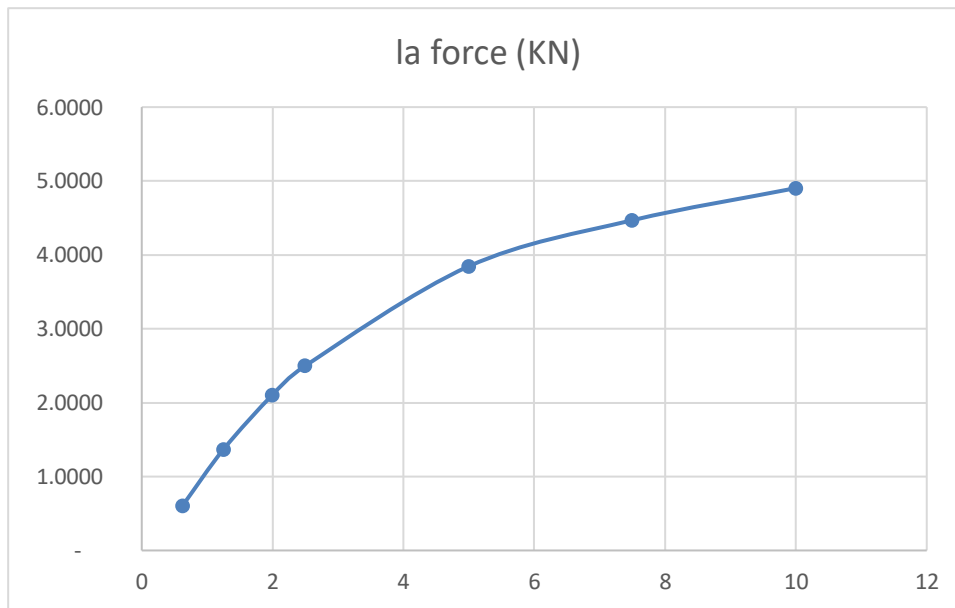
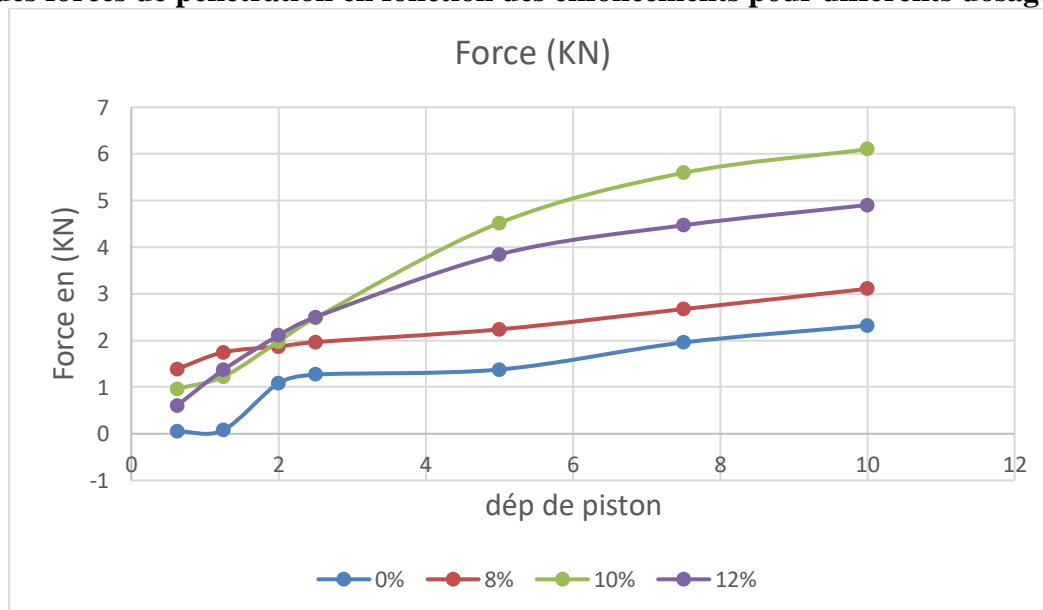


Figure V.39 Indices C.B.R immédiats pour différents dosages en Ciment Ardia

La moyenne :

dép de piston	La force (KN)			
	0%	8%	10%	12%
0,625	0,0507	1,3907	0,9634	0,6084
1,25	0,0797	1,7462	1,2241	1,3690
2	1,0869	1,8704	1,9775	2,1078
2,5	1,268	1,9644	2,4845	2,4990
5	1,3767	2,2382	4,5198	3,8462
7,5	1,9563	2,6719	5,5919	4,4692
10	2,3188	3,1074	6,0989	4,9038

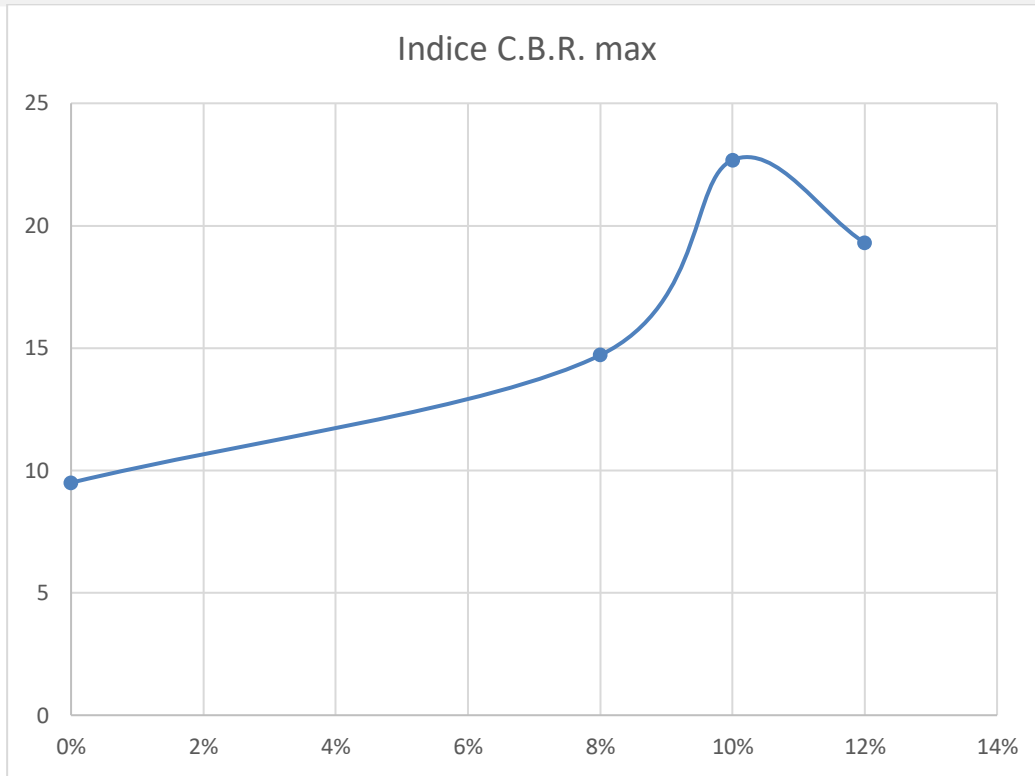
Résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en ciment



Courbe des Forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en ciment

DOSAGE	Indice C.B.R. immédiat à 2,5mm	Indice C.B.R. immédiat à 5mm	Indice C.B.R. max
0%	9,50	6,91	9,50
8%	14,71	11,23	14,71
10%	18,61	22,68	22,68
12%	18,72	19,30	19,30

Résultats des indices C.B.R immédiats pour différents dosages en ciment.



Courbe des indices C.B.R immédiats pour différents dosages en ciment

Compression simple

Tableau V.19 Résistance à la compression pour différents dosages en ciment Ardia

Dosage en liants	Charge (kN)	Résistance (Mpa)
0% ciment	25,38	3,37
8% ciment	71,16	10,22
10% ciment	79,12	10,97
12% ciment	93,72	11,88

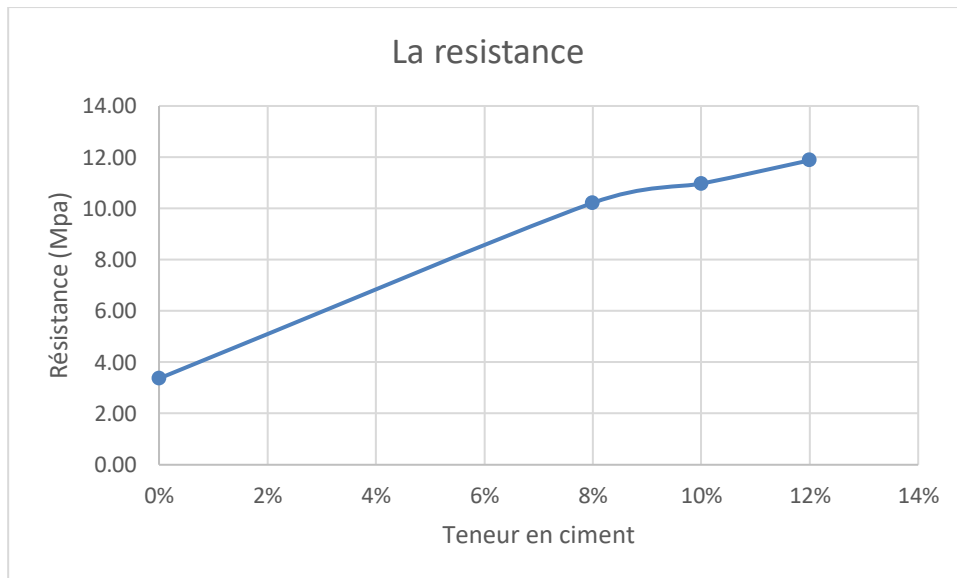


Figure V.31 Résistance à la compression pour différents dosages en ciment Ardia

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 province de Msila, la zone est considérée comme une zone semi-aride, cette dernière est considérée comme la capitale de Chott El Hodna (Sebkha), ce qui nous permet d'expliquer quelque chose sur le sol salé, Ce sont :

- ❖ 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 rendu utilisable à leur état naturel par un traitement spécifique aux liants hydrauliques (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 consisté après cette étude expérimentale a traité le sol de chott El-Hodna avec chaux-ciment, et ont conclues que :

- ❖ 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 (WL) vaut 51,75 %, la limite de plasticité (WP) est de 31,39 %, l'indice de plasticité (IP) vaut 20,36%, l'indice de consistance (IC) égale à 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 m^2/g , celle-ci dépasse les 100 m^2/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.

- ❖ La valeur du bleu de méthylène passe de la valeur 6,56 pour le sol non traité à la valeur de 3,22 pour un dosage de 10% de chaux et de 2% de ciment.
- ❖ L'indice de plasticité (I_p) passe 20,35 pour le sol non traité à 11,17 pour un dosage de 8% de chaux et de 4% de ciment.
- ❖ La densité sèche diminue sensiblement avec l'augmentation du dosage en liants chaux-ciment, de même pour la teneur en eau.
- ❖ La vitesse de propagation des ondes ultrasoniques reste pratiquement constante quel que soit le dosage, mais plus grande par rapport à la vitesse de propagation dans l'échantillon témoin.
- ❖ Les résultats montrent que l'ajout des liants (chaux-ciment) à ce sol contribue à l'amélioration de la résistance en compression, cependant la quantité maximale à ajouter doit être limitée à 12%. Quantitativement, il a été remarqué que la résistance est de 2,65 MPa pour l'échantillon témoin et passe à 12,09 MPa pour le dosage de 6% de chaux et 6% de ciment, qui donne presque la même valeur (12,22 MPa) pour un dosage de 0% de chaux et 12% de ciment.

Références Bibliographiqu es

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 (1996) Norme Française : **NF P 94-056** : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique des sols par tamisage à sec après lavage
- AFNOR (1992) Norme Française : **NF P 94-057** : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie.
- AFNOR (1993) Norme Française : **NF P 94-051** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.
- AFNOR (1993) Norme Française : **NF P 94-068** Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche.
- AFNOR (1997) Norme Française : **NF P 94-078** Sols : Indice CBR immédiat— Indice Portant Immédiat.
- AFNOR (1999) Norme Française : **NF P 94-093** Sols : Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié.
- 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 tolerance and salinity effect on plants: review. Ecotoxicology 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 Ciment ARdia .Thèse de Doctorat de l’Université d’Orléans (France).
- **Mahalinger-Iyer U, Williams DJ. 1997**. Properties and performance of lateritic soil inroad pavements. Eng Geol.
- **Akoto BKA, Singh G. 1981** Some geotechnical properties of a lime-stabilized laterite containing a high proportion of aluminium 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 ciment Ardia 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 Ciment ARdia. 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. – Journ 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 Chohh Merouane et Melghir. Thèse de doctorat en sciences agronomiques. Université Mohamed Khider, Biskra.
- **ANAT - 1993** - Plan d'Aménagement de la Wilaya de M'sila - Tome 1 - Alger, 217 p.
- **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 Toposequence 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.
- **Phénologie et structure des Tadornes** (Tadorne de Belon et Tadorne casarca) dans le Chott El-Hodna (wilaya de M'sila, Algérie). **THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES**

Baize, D., & Girard, M. (1995). *Référentiel Pédologique*. INRA Editions.

- **Bell F.G.** Lime stabilization of clay minerals and soils. *Eng. Geol. Env., Springer* 1996; 42:223-237.
- **Bell F.G.** Lime stabilization of clay soils. *Eng. Geol. Env., Springer* 1989;39(1):67-74.
- **Benabdallah E. (2010).** Mouvement des eaux souterraines et des ions majeurs dans une argile Champlain depuis sa formation. Thèse de doctorat en génie minéral, Université de Montréal.

Annexes

Tableau A.1

Analyse S8											
Dosage De Liant	N ^o éch	Constituants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Pertes au feu
Sans traitement	1	%	35,66	9,02	3,535	16,8	3,20	2,32	1,456	3,501	21,52

Tableau A.2

D R X											
	N ^o éch	R_wp	Calcite	Dolomite	Quartz	Pyrite	Illite	Chlorite	Kaolinite	Albite	CO ₂ _XRD
sans traitement	1	8,8	32,74	4,67	26,15	0,31	22	5,86	7,15	1,12	16,62

Tableau A.3

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	15	15	23	23	30	30	33	33
N° de la tare								
Masse totale humide (g)	13,294	11,985	15,734	13,773	10,2	9,832	11,697	10,584
Masse totale sèche (g)	11,165	10,218	13,51	12,179	8,188	7,812	9,524	9,079
Masse de la tare (g)	5,484	5,55	7,655	7,979	2,798	2,384	3,71	4,979
Masse de l'eau (g)	2,129	1,767	2,224	1,594	2,012	2,02	2,173	1,505
Masse du sol sec (g)	5,681	4,668	5,855	4,2	5,39	5,428	5,814	4,1
Teneur en eau%	50,93	51,04	50,91	50,71	51,17	50,88	51,13	51,07
Moyenne %	50,98	50,84	51,06	51,11	50,98	50,84		51,06
Moyenne Générale %	51,04							

Tableau A.4

	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
N° de la tare	AA	A13	B15	C2	GH	23
Masse totale humide (g)	10,5	10,7	6,745	5,238	9,697	7,53
Masse totale sèche (g)	10,1	10,2	6,076	4,83	9,334	7,18
Masse de la tare (g)	8,4	8,2	3,315	3,123	7,927	5,81
Masse de l'eau (g)	0,4	0,5	0,669	0,408	0,363	0,35
Masse du sol sec (g)	1,7	2	2,761	1,707	1,407	1,37
Teneur en eau%	27,23	28,10	27,98	27,63	27,97	27,93
Moyenne %	27,64	27,84	27,95	27,64		27,84
Moyenne Générale %	27,81					

Tableau A.5

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	15	15	23	23	30	30	33	33
N° de la tare								
Masse totale hu	12,186	10,871	13,552	11,56	10,487	10,812	14,552	12,56
Masse totale sèche mi	10,28	9,281	11,556	10,164	8,589	8,991	12,587	11,179
Masse de la tare	10,21	4,564	5,655	5,979	2,798	3,384	6,71	6,979
Masse de l'eau (g)	4,48	1,59	1,996	1,396	1,898	1,821	1,965	1,381
(g)								
(g)								
Moyenne %	54,14		53,44		51,39		50,57	
Moyenne Générale %					50.73			

Tableau A.6

	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
	AA	A13	B15	C2	GH	23
N° de la tare	AA	A13	B15	C2	GH	23
Masse totale humide (g)	8,41	7,396	10,218	6,226	5,686	5,54
Masse totale sèche (g)	8,15	7,128	9,957	5,843	5,387	5,234
Masse de la tare (g)	6,831	5,823	8,65	3,947	3,947	3,68
Masse de l'eau (g)	0,26	0,268	0,261	0,383	0,299	0,306
Masse du sol sec (g)	1,319	1,305	1,307	1,896	1,44	1,554
Teneur en eau%	27,25	28,17	28,01	27,51	28,07	27,96
Moyenne %	27,63	27,76	28,02	27,63	27,76	
Moyenne Générale %				27,80		

Tableau A.7

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	15	15	23	23	30	30	33	33
N° de la tare	45	55	56	57	58	59	60	61
Masse totale humide (g)	9,56	9,56	11,55 2	9,88	11,2	10,70 9	11,552	11,186
Masse totale sèche (g)	8,079	8,079	9,524	8,218	9,188	8,904	9,524	9,177
Masse de la tare (g)	3,979	3,979	3,655	3,557	3,798	3,384	3,71	3,484
Masse de l'eau (g)	1,481	1,481	2,028	1,662	2,012	1,805	2,028	2,009
Masse du sol sec (g)	4,1	4,1	5,869	4,661	5,39	5,52	5,814	5,693
Teneur en eau%	51,13	51,07	50,91	50,71	51,17	51,88	51,13	51,07
Moyenne %	51,09745255		50,80954102		51,52638528		51,09745255	
Moyenne Générale %				51.13				

Tableau A.8

	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
	AA	A13	B15	C2	GH	23
N° de la tare	AA	A13	B15	C2	GH	23
Masse totale humide (g)	6,444	5,429	5,386	5,085	5,646	5,463
Masse totale sèche (g)	6,141	5,128	5,076	4,83	5,334	5,18
Masse de la tare (g)	4,831	3,823	3,723	3,707	3,927	3,943
Masse de l'eau (g)	0,303	0,301	0,31	0,255	0,312	0,283
Masse du sol sec (g)	1,31	1,305	1,353	1,123	1,407	1,237
Teneur en eau%	27,13	28,07	27,91	27,71	28,17	27,88
Moyenne %	27,09	27,80 9	27,926	27,09	27,809	
Moyenne Générale %				27.63		

Tableau A.9

8%

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
	K	C	R	F	V	X	Q	W
Nombre De Coupe	15	16	22	23	27	28	32	33
N° de la tare	K	C	R	F	V	X	Q	W
Masse totale humide (g)	9,78	13,22	11,79	17,03	18,95	16,46	18,84	12,82
Masse totale sèche (g)	7,93	11,96	9,96	15,93	17,6	15,7	17,23	11,57
Masse de la tare (g)	1,83	10,23	3,57	13,8	23,87	10,27	12,58	2,84
Masse de l'eau (g)	2,08	1,8	2,83	2,75	2,35	2,06	2,07	1,95
Masse du sol sec (g)	6,2	3,33	5,39	5,33	4,73	4,13	4,19	4,03
Teneur en eau%	50,68	50,05	50,50	49,59	50,68	50,88	51,40	50,39
Moyenne %	50,43	50,05	50,28	50,90	50,43	50,05	50,28	
Moyenne Générale %							50,28	

Tableau A.10

	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
N° de la tare	32	33	34	35	36	37
Masse totale humide (g)	11,41	5,84	18,78	16,77	18,53	22,51
Masse totale sèche (g)	11,09	5,56	18,34	16,51	18,21	22,14
Masse de la tare (g)	10,06	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)	1,03	0,83	1,54	0,82	1,04	1,16
Teneur en eau%	32,68	32,12	32,60	32,98	32,68	32,88
Moyenne %	32,90		32,79	32,78	32,90	
Moyenne Générale %	32,85					

Tableau A.11

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	16	17	22	24	26	27	31	32
N° de la tare	M	B	N	L	S	A	Y	I
Masse totale humide (g)	9,84	13,07	11,59	16,83	18,75	16,24	18,69	12,63
Masse totale sèche (g)	7,91	11,92	9,87	15,88	17,52	15,61	17,16	11,51
Masse de la tare (g)	1,79	10,18	3,6	13,78	23,9	10,31	12,61	2,8
Masse de l'eau (g)	2,08	1,8	2,83	2,75	2,35	2,06	2,07	1,95
Masse du sol sec (g)	6,2	3,33	5,39	5,33	4,73	4,13	4,19	4,03
Teneur en eau%	51,68	50,05	50,50	50,59	50,68	50,88	51,40	50,39
Moyenne %	50,93		50,55		50,78		51,01	
Moyenne Générale %	50,82							

Tableau A.12

	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
N° de la tare	78	79	80	84	85	86
Masse totale humide (g)	11,39	5,86	18,81	16,83	18,48	22,46
Masse totale sèche (g)	11,15	5,49	18,35	16,57	18,13	22,09
Masse de la tare (g)	10,10	4,80	16,85	15,74	17,21	21,04
Masse de l'eau (g)	0,35	0,30	0,45	0,23	0,30	0,36
Masse du sol sec (g)	1,07	0,85	1,51	0,81	1,07	1,17
Teneur en eau%	30,68	31,12	30,60	30,98	31,68	31,88
Moyenne %	32,90	32,79	32,78	32,90	32,79	
Moyenne Générale %	32,62					

Tableau A.13

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	15	16	22	23	27	28	32	33
N° de la tare	13	14	15	16	17	18	19	20
Masse totale humide (g)	9,78	13,22	11,79	17,03	18,95	16,46	18,84	12,82
Masse totale sèche (g)	7,93	11,96	9,96	15,93	17,6	15,7	17,23	11,57
Masse de la tare (g)	1,83	10,23	3,57	13,8	23,87	10,27	12,58	2,84
Masse de l'eau (g)	2,08	1,8	2,83	2,75	2,35	2,06	2,07	1,95
Masse du sol sec (g)	6,2	3,33	5,39	5,33	4,73	4,13	4,19	4,03
Teneur en eau%	51,50	51,05	51,50	50,59	50,78	50,85	51,21	50,40
Moyenne %	51,27		50,95		50,81		50,94	
Moyenne Générale %	50,99							

Tableau A.14

	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
N° de la tare	106	107	108	109	110	111
Masse totale humide (g)	11,40	5,87	18,81	16,79	18,55	22,53
Masse totale sèche (g)	11,11	5,60	18,36	16,51	18,22	22,14
Masse de la tare (g)	10,06	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)	1,03	0,83	1,54	0,82	1,04	1,16
Teneur en eau%	33,75	34,16	33,74	34,21	34,55	33,91
Moyenne %	34,01	34,16	34,23	34,01	34,16	
Moyenne Générale %	34,29					

Tableau A.15

	10%							
	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	18	18	22	23	27	28	32	33
N° de la tare	16	17	18	19	20	21	22	23
Masse totale humide (g)	23,72	15,22	11,54	21,81	30,87	16,38	18,79	8,76
Masse totale sèche (g)	20,51	13,59	8,99	19,17	28,66	14,45	16,81	6,92
Masse de la tare (g)	13,74	10,23	3,57	13,8	23,87	10,27	12,58	2,84
Masse de l'eau (g)	3,35	1,8	2,83	2,75	2,35	2,06	2,07	1,95
Masse du sol sec (g)	6,71	3,33	5,39	5,33	4,73	4,13	4,19	4,03
Teneur en eau%	49,93	49,05	49,50	49,59	48,68	49,88	49,40	49,39
Moyenne %	49,49		49,55		49,28		49,40	
Moyenne Générale %	49,43							

Tableau A.16

	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
N° de la tare	9	18	19	20	21	22
Masse totale humide (g)	11,24	5,84	18,78	16,77	18,53	22,51
Masse totale sèche (g)	10,93	5,56	18,34	16,51	18,21	22,14
Masse de la tare (g)	10,06	4,73	16,8	15,69	17,17	20,98
Masse de l'eau (g)	0,31	0,28	0,44	0,26	0,32	0,37
Masse du sol sec (g)	0,87	0,83	1,54	0,88	1,04	1,16
Teneur en eau%	35,63	33,73	28,57	31,71	30,77	31,90
Moyenne %	35,32		30,14		31,33	
Moyenne Générale %			36,86			

Tableau A.17

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	57	58	59	60	61	62	57	58
N° de la tare	22,32	5,76	18,78	16,77	18,53	22,51	22,32	5,76
Masse totale humide (g)	21,92	5,52	18,52	16,54	18,24	22,17	21,92	5,52
Masse totale sèche (g)	20,5	4,73	16,8	15,69	17,17	20,98	20,5	4,73
Masse de la tare (g)	0,41	0,28	0,44	0,26	0,32	0,37	0,41	0,28
Masse de l'eau (g)	1,92	0,83	1,50	0,78	1,24	1,14	1,92	0,83
Masse du sol sec (g)	33,96	34,14	33,67	34,79	33,65	34,93	33,96	34,14
Teneur en eau%	57	58	59	60	61	62	57	58
Moyenne %	34,05		34,23		34,29		34,23	
Moyenne Générale %			34,19					

Tableau A.21

12%

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre De Coupe	15	18	23	23	27	27	33	33
N° de la tare	1	2	3	4	5	6	7	8
Masse totale humide (g)	22,7	15,36	11,79	21,88	30,95	16,46	18,84	8,82
Masse totale sèche (g)	18,52	13,56	8,96	19,13	28,6	14,4	16,77	6,87
Masse de la tare (g)	10,05	10,23	3,57	13,8	23,87	10,27	12,58	2,84
Masse de l'eau (g)	4,18	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%	48,35	48,05	49,50	48,20	48,68	48,88	49,40	48,39
Moyenne %	48,21		48,20		48,58		48,60	
Moyenne Générale %	48,21							

	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
N° de la tare	9	10	11	22	33	44
Masse totale humide (g)	11,61	5,84	18,78	16,77	18,53	22,51
Masse totale sèche (g)	11,28	5,56	18,34	16,51	18,21	22,14
Masse de la tare (g)	10,32	4,73	16,8	15,69	17,17	20,98
Masse de l'eau (g)	0,33	0,28	0,44	0,26	0,32	0,37
Masse du sol sec (g)	0,96	0,83	1,54	0,82	1,04	1,16
Teneur en eau%	34,38	33,73	34,57	34,71	34,50	34,60
Moyenne %	34,66		30,64		34,55	
Moyenne Générale %			34,62			

Tableau A.23

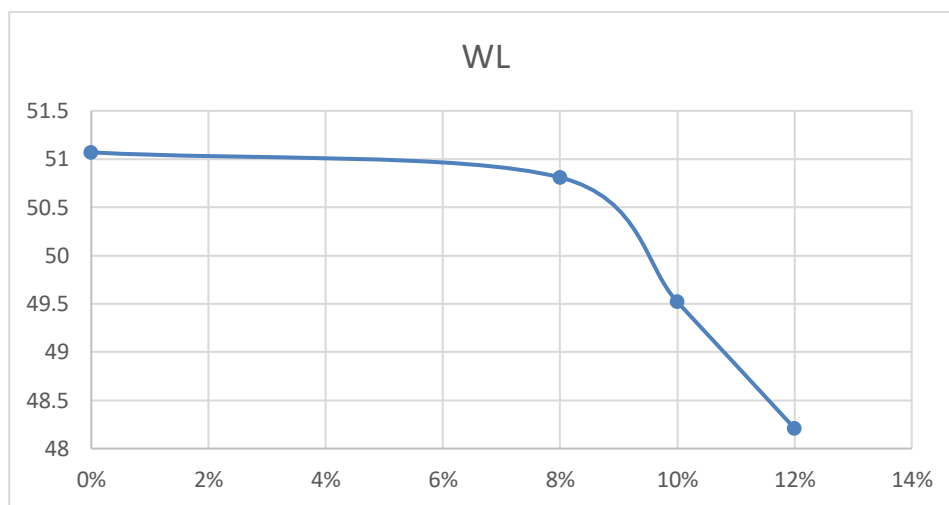


Figure V.21 Limite de liquidité

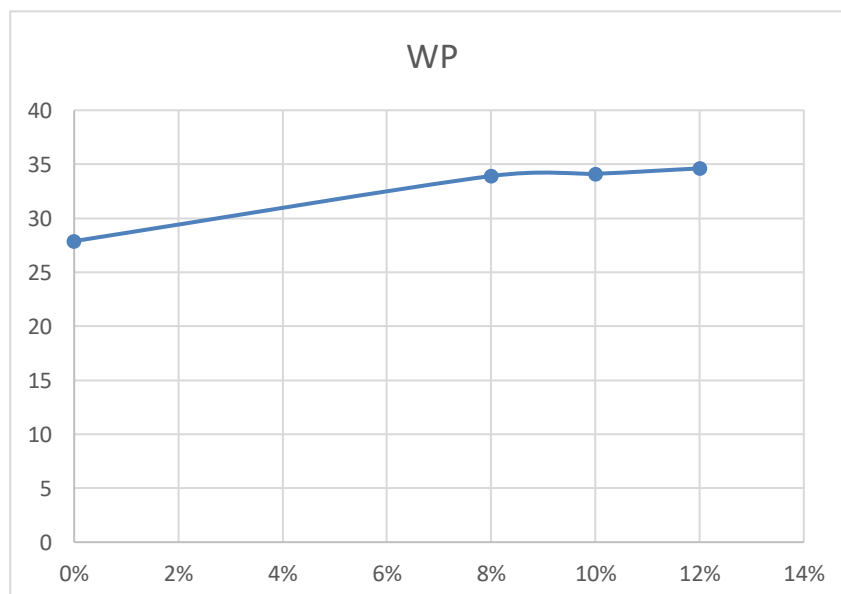


Figure V.22 Limite de plasticité

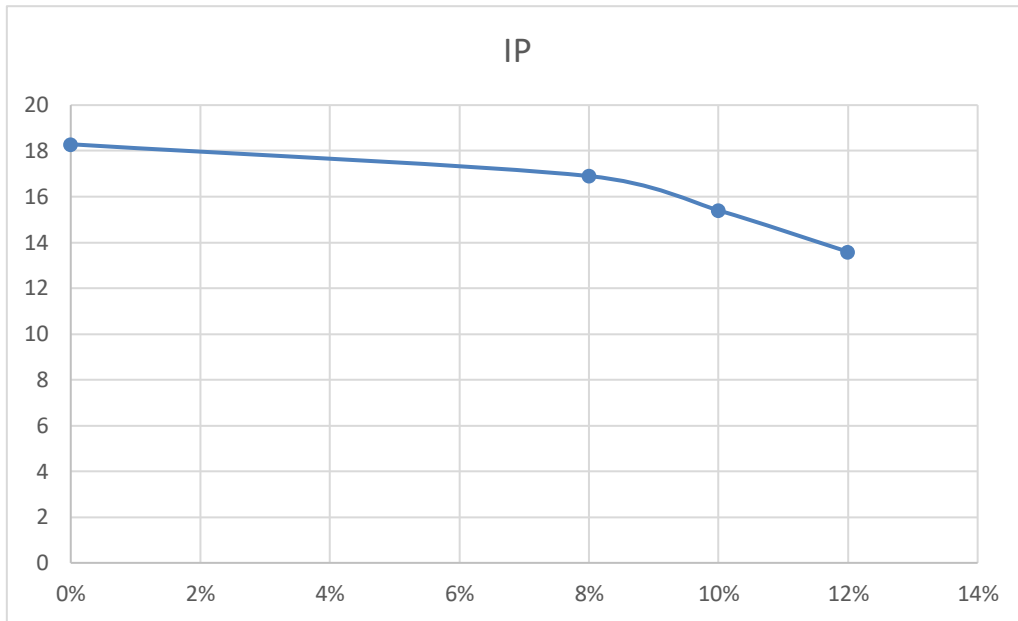
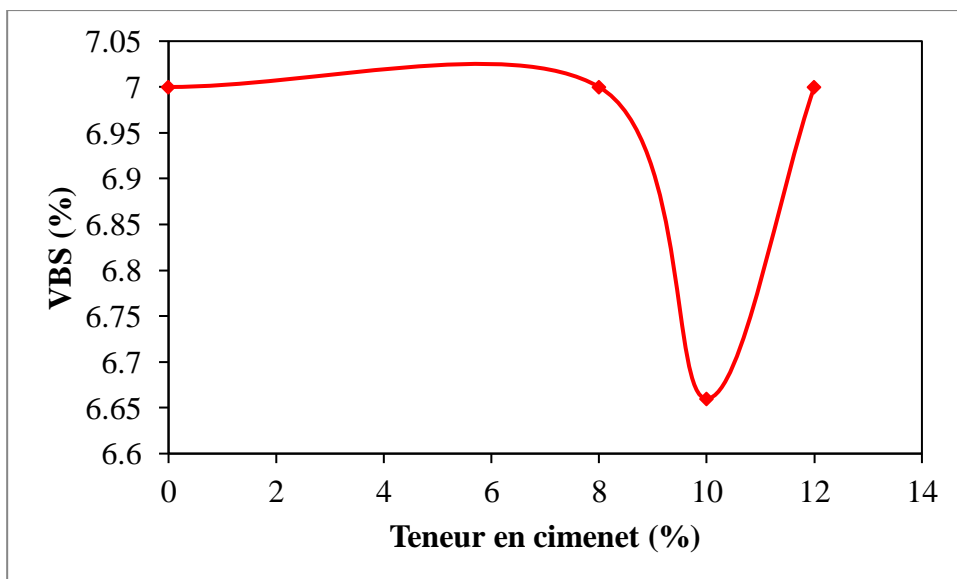


Figure V.23 Indice de plasticité

V
B
S

Tableau A.51

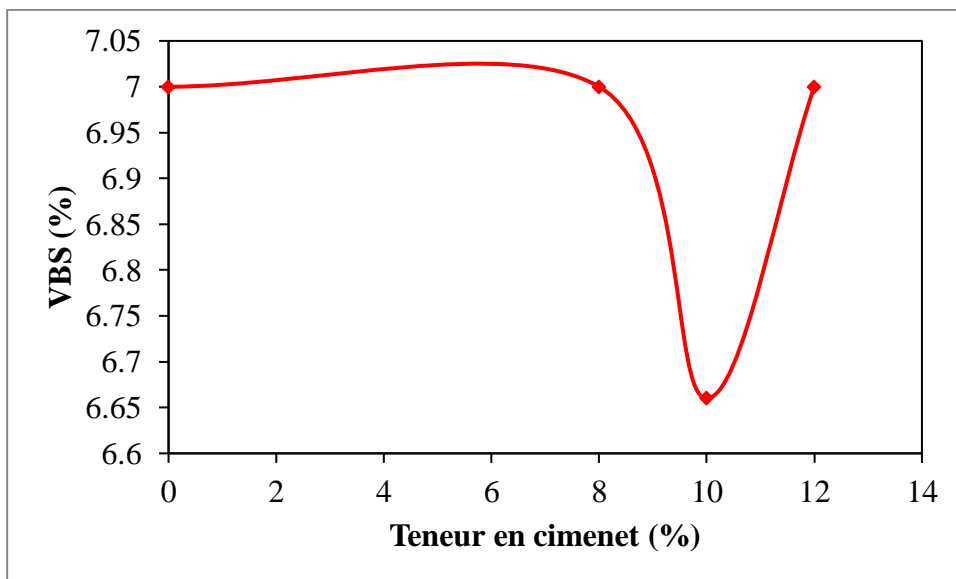
B	VBS (Cm3)	La surface spécifique (g/cm2)
420	7	147
400	6,66	140
420	7	147
196,67	6,88	144,66



12%

Tableau A.52

B	VBS (Cm3)	La surface spécifique (g/cm2)
380	6,33	133
360	6	126
340	5,66	118,86
360	5,99	125,95



**Essais
Mécaniques
Proctor
Tableau A.59**

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

Tableau A.60

ESSAI 1				
Réf/ échantil lon	1	2	3	4
Le Dosag eDe Liant	0%	8%	10%	12%
Masse du sol humide, (g)	1941,84	1820,92	1809,86	1812,23
Masse du sol sec, (g)	1607,78	1535,95	1476,85	1515,75
Volume du moule, (cm³)	944	944	944	944
Masse volumi que du sol humide (g/c m³)	2,06	1,93	1,92	1,92
Mass e volumi que du sol sec (gr/c m³)	1,70	1,63	1,56	1,61
Masse de l'eau, (g)	334,06	284,97	333,01	296,48
Teneur en eau %	20,778	18,553	22,549	19,560

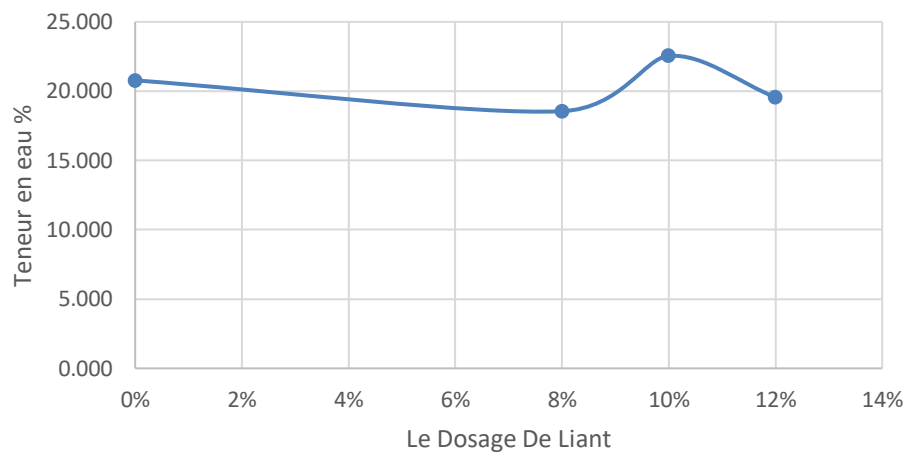
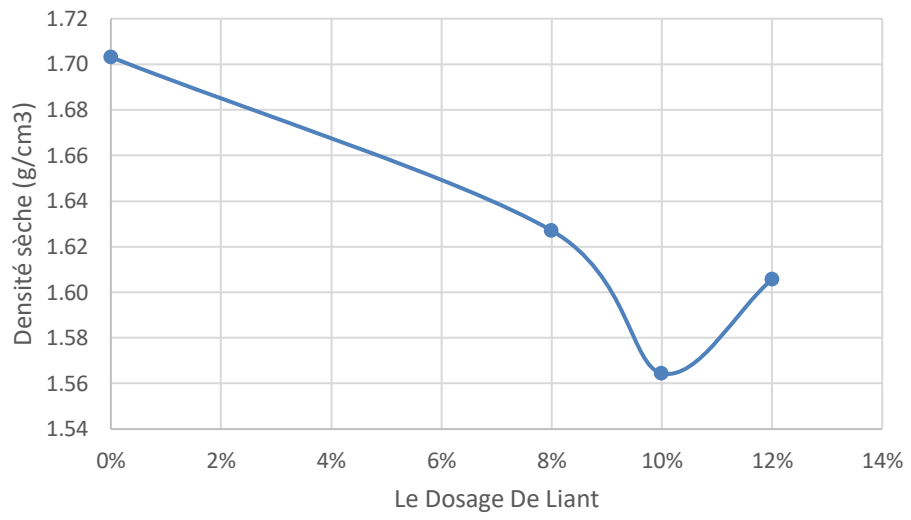
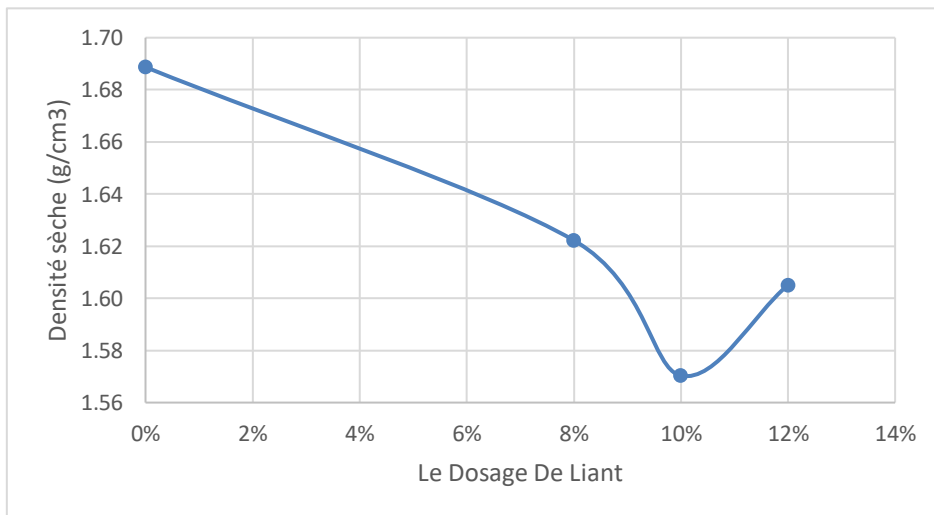


Tableau A.61

ESSAI 2				
Réf/ échantillon	1	2	3	4
Le Dosage De Liant	<i>0%</i>	<i>8%</i>	<i>10%</i>	<i>12%</i>
Masse du sol humide, (g)	1944,08	1819,83	1806,94	1809,69
Masse du sol sec, (g)	1594,15	1531,39	1482,41	1515,25
Volume du moule, (cm³)	944	944	944	944
Masse volumique du sol humide, (g/cm³)	2,06	1,93	1,91	1,92
Masse volumique du sol sec (gr/cm³)	1,69	1,62	1,57	1,61
Masse de l'eau, (g)	349,93	288,44	324,53	294,44
Teneur en eau %	21,951	18,835	21,892	19,432



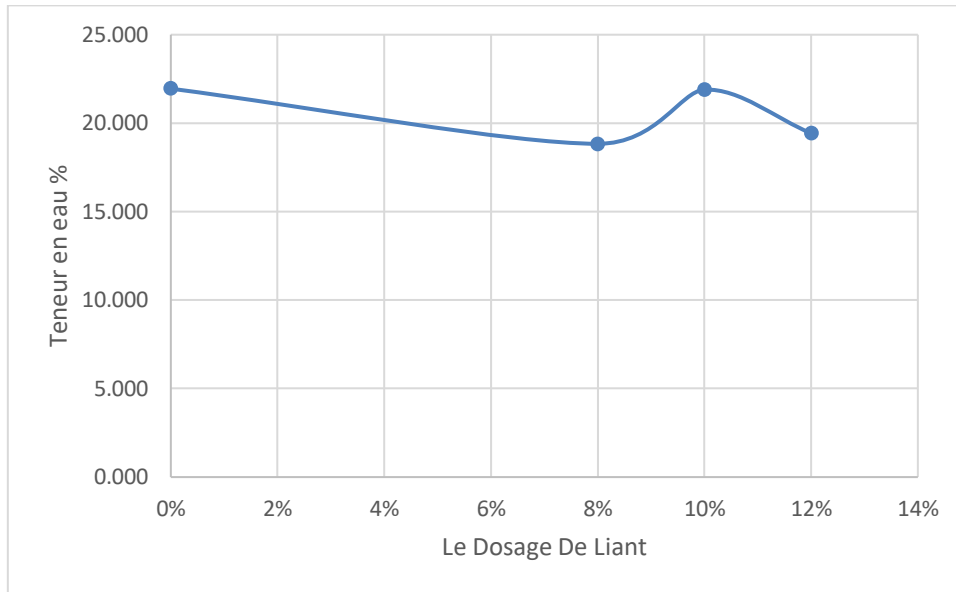
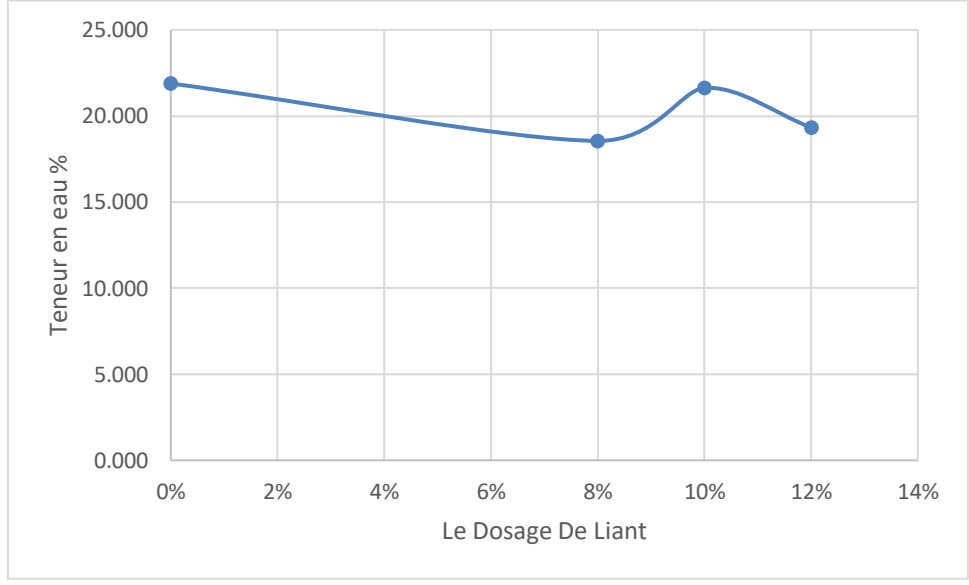
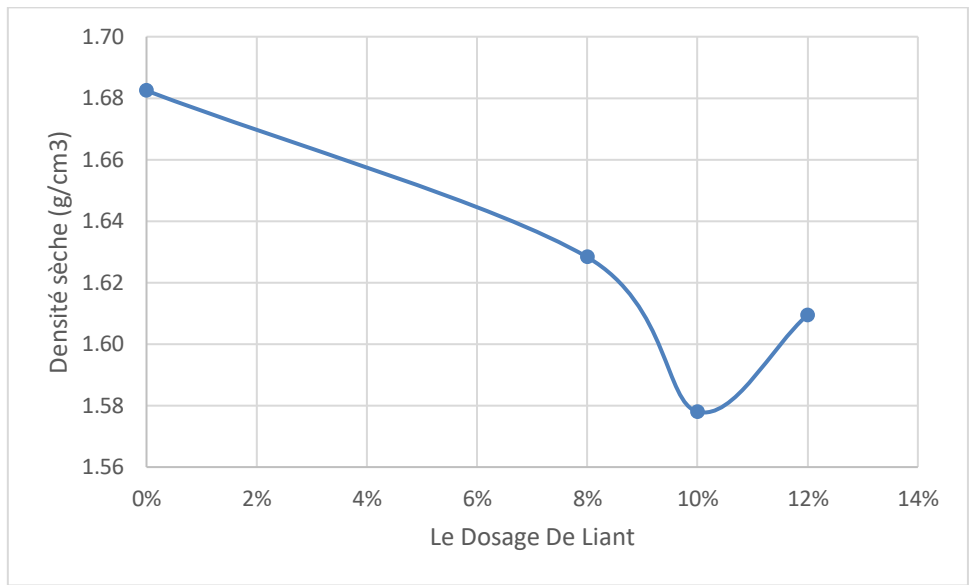


Tableau A.62

ESSAI 3				
Réf/ échantil lon	1	2	3	4
Le Dosag eDe Liant	0%	8%	10%	12%
Masse du sol humide, (g)	1935,93	1822,3	1811,86	1813,2
Masse du sol sec, (g)	1588,24	1537,11	1489,66	1519,41
Volume du moule, (cm³)	944	944	944	944
Masse volumi que du sol humide (g/c m³)	2,05	1,93	1,92	1,92
Mass e volumi que du sol sec (gr/c m³)	1,68	1,63	1,58	1,61
Masse de l'eau, (g)	347,69	285,19	322,2	293,79
Teneur en eau %	21,892	18,554	21,629	19,336



CBR

Tableau A.63

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

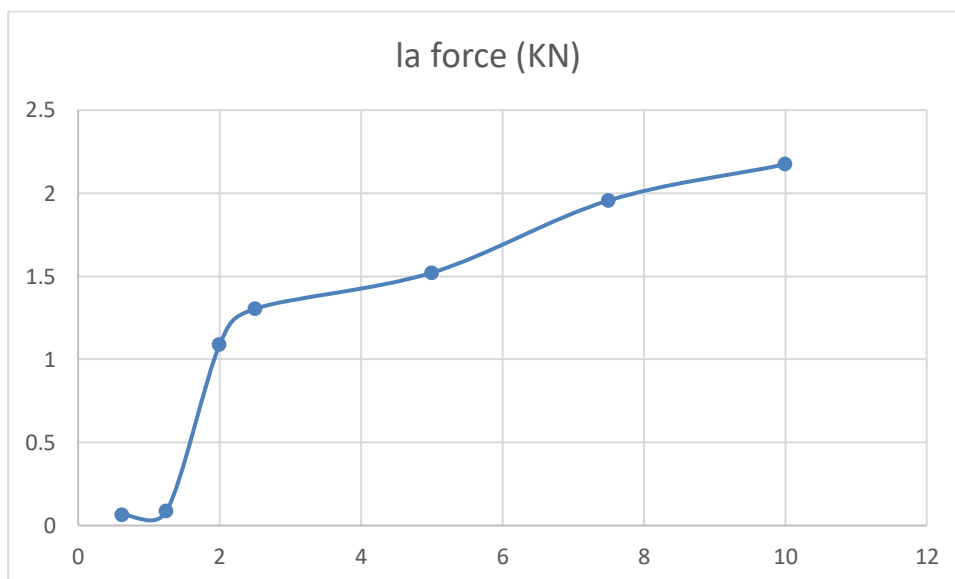


Tableau A.65

dép de piston	Force (kN) 8% ciment	Force (kN) 10% ciment	Force (kN) 12% ciment
0,625	0,064	1,3907	0,625
1,25	0,08	1,74	1,25
2	0,087	1,83	2
2,5	0,09	1,96	2,5
5	0,103	2,2382	5
7,5	0,123	2,67	7,5
10	0,143	3,1074	10
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max	
14,65	11,23	14,65	

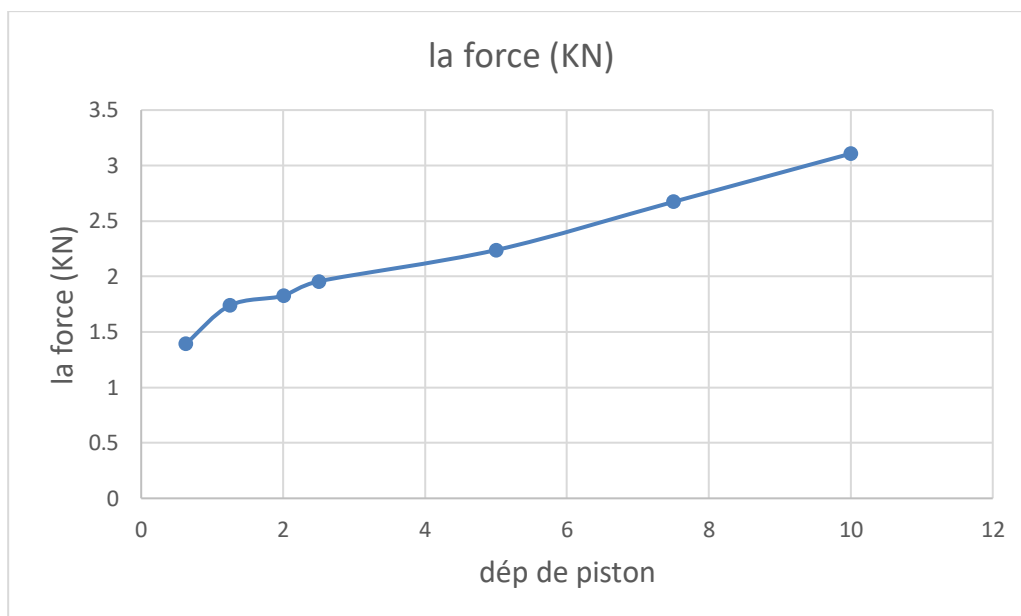


Tableau A.66

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,062	1,3473
1,25	0,08	1,7384
2	0,085	1,8471
2,5	0,09	1,9557
5	0,102	2,2165
7,5	0,121	2,6293
10	0,141	3,0639
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
14,65	11,12	14,65

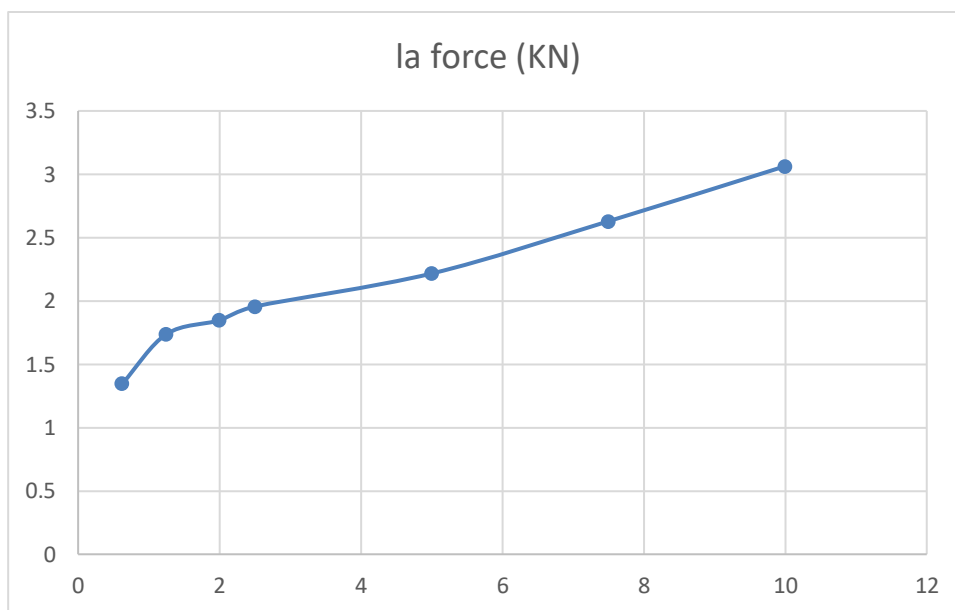


Tableau A.67

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,066	1,4342
1,25	0,081	1,7601
2	0,089	1,934
2,5	0,091	1,9774
5	0,104	2,2599
7,5	0,125	2,7163
10	0,145	3,1509
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
14,81	11,34	14,81

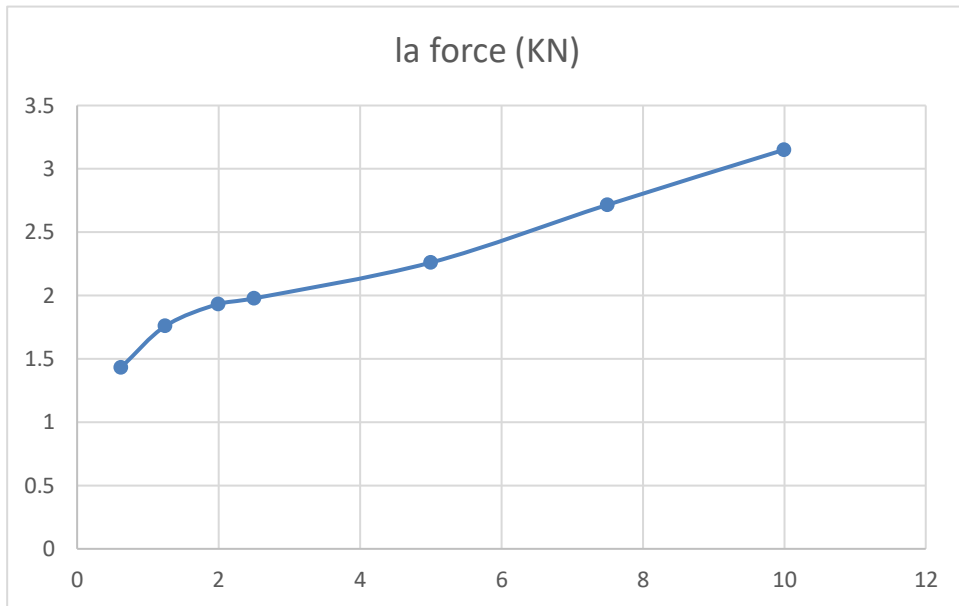
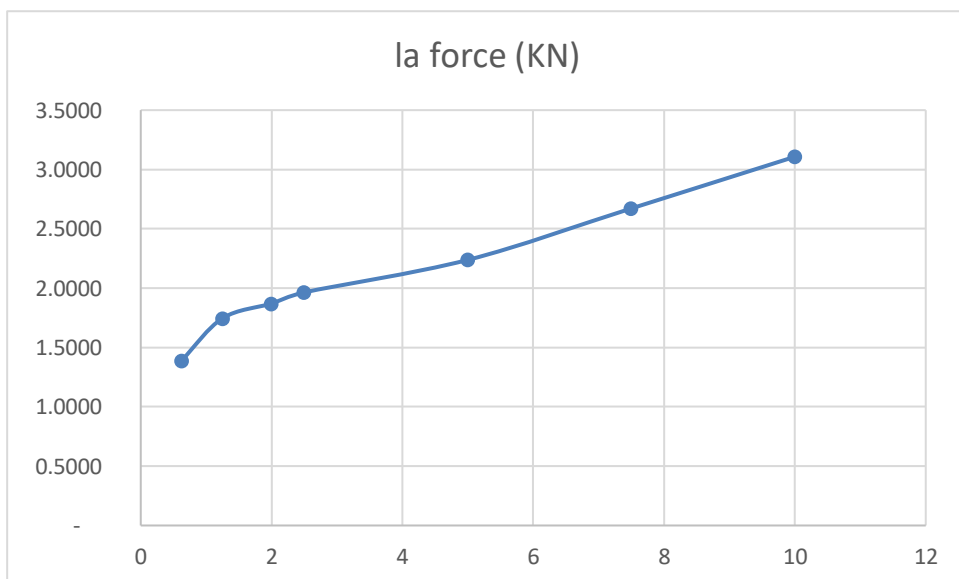


Tableau A.68

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,064	1,3907
1,25	0,08	1,7462
2	0,087	1,8704
2,5	0,09	1,9644
5	0,103	2,2382
7,5	0,123	2,6719
10	0,143	3,1074
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
14,71	11,23	14,71



10%

Tableau A.69

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,045	0,9779
1,25	0,056	1,2169
2	0,093	2,021
2,5	0,116	2,5207
5	0,214	4,6502
7,5	0,26	5,6498
10	0,282	6,1279
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
18,88	23,33	23,33

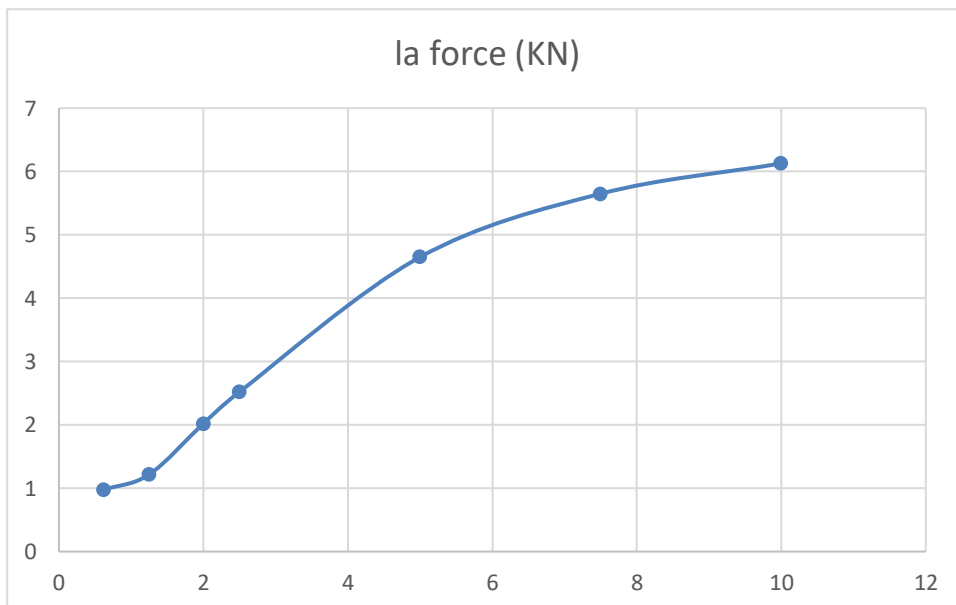


Tableau A.70
Essai 2

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,044	0,9561
1,25	0,056	1,2169
2	0,091	1,9557
2,5	0,115	2,4555
5	0,212	4,346
7,5	0,258	5,5412
10	0,28	6,0844
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
18,39	21,81	21,81

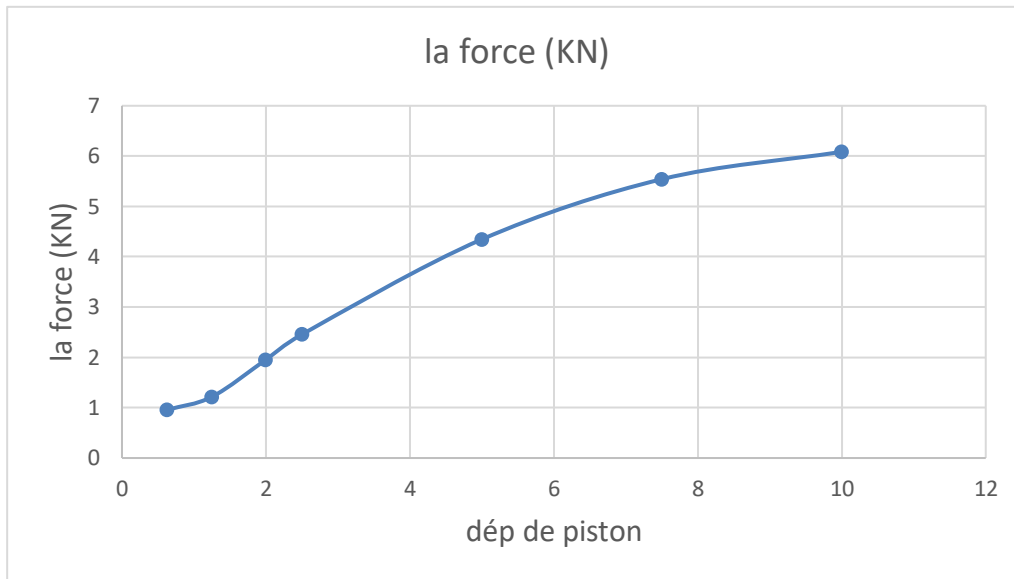
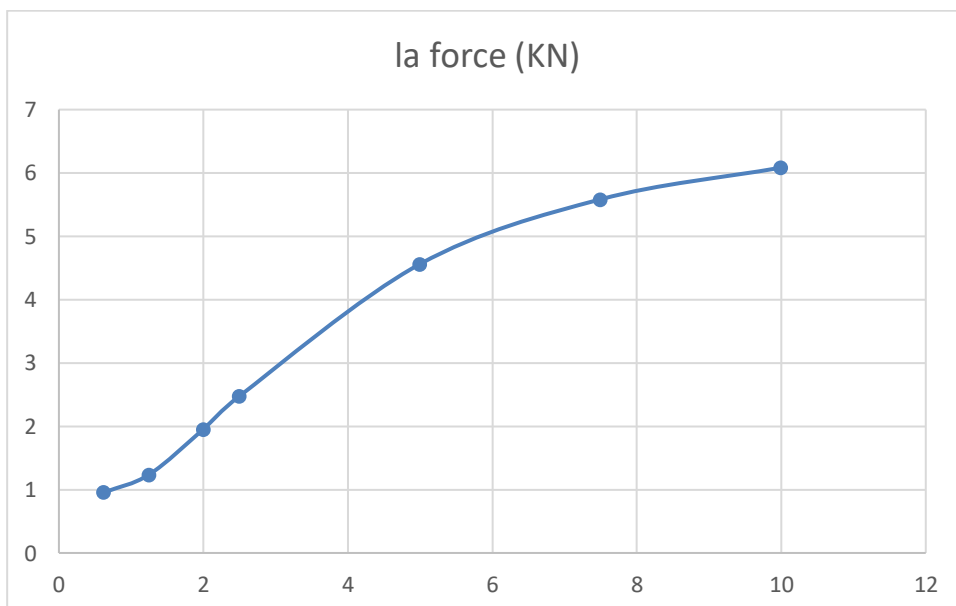


Tableau A.71

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,044	0,9561
1,25	0,057	1,2386
2	0,09	1,9557
2,5	0,114	2,4772
5	0,21	4,5633
7,5	0,257	5,5846
10	0,28	6,0844
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
18,56	22,90	22,90



12%

Tableau A.72

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,028	0,6084
1,25	0,063	1,369
2	0,097	2,1078
2,5	0,115	2,499
5	0,177	3,8462
7,5	0,206	4,4547
10	0,226	4,8893
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
18,72	19,30	19,30

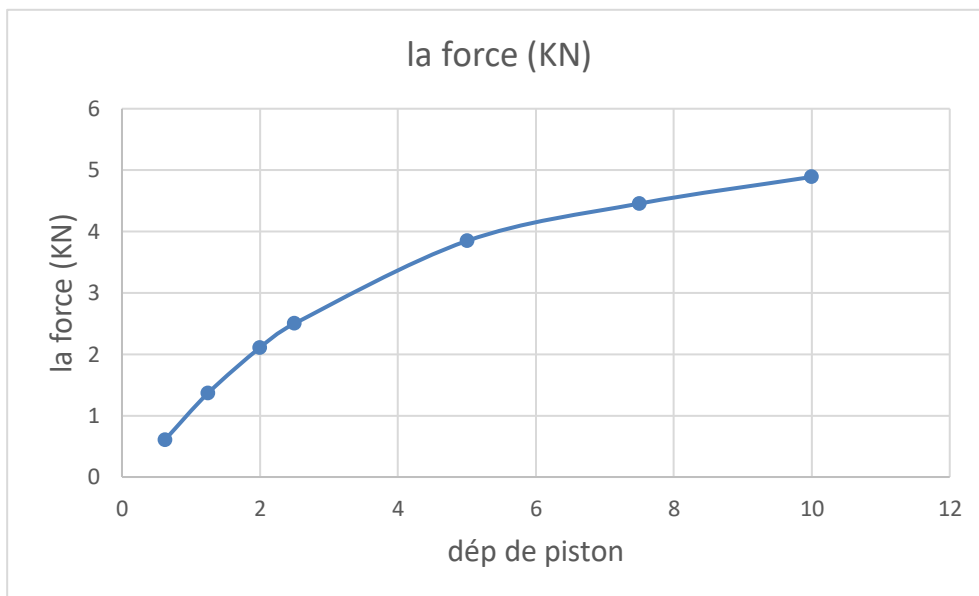


Tableau A.73

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,027	0,5867
1,25	0,062	1,3472
2	0,095	2,0644
2,5	0,113	2,4555
5	0,175	3,8028
7,5	0,205	4,4547
10	0,225	4,8893
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
18,39	19,08	19,08

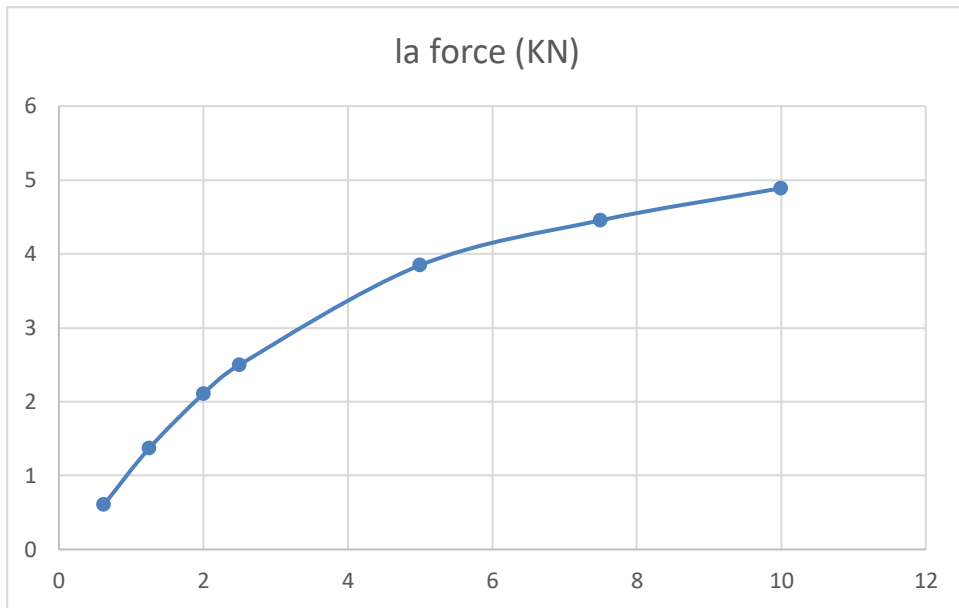


Tableau A.74
Essai 3 :

dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
0,625	0,029	0,6302
1,25	0,064	1,3907
2	0,99	2,1513
2,5	0,117	2,5424
5	0,179	3,8897
7,5	0,207	4,4981
10	0,227	4,9327
Indice à 2,5 mm	Indice à 5 mm	Indice C.B.R max
19,04	19,52	19,52

