

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierie
Département : Génie Civil
Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie Civil
Spécialité : Géotechnique.

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Investigation Expérimentale Pour Sol Renforcé Par Des
Nappes De Géotextiles**

Présenté par : BOUSSENANE Chahrazed

Encadrant : BOUKHATEM Ghania

M.C.A

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Président
KEFFAF TAREK	MA	BADJI MOKHTAR ANNABA	President
BOUKHATEM Ghania	MCA	BADJI MOKHTAR ANNABA	Encadreur
CHABBI Hsaine	MA	BADJI MOKHTAR ANNABA	Examineur

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Dieu merci pour nous avoir donné la santé, la volonté et le courage sans lesquels ce travail n'aurait pas été réalisé. Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au laboratoire national des travaux publics LTPest –Annaba-

Nous adressons nos vifs remerciements à notre encadreur Dr BOUKHATEM Ghania pour nous avoir suivi le long de ce travail et tous les efforts qu'elle a fait pour son accomplissement. Nous remercions profondément les membres du jury, qui nous ont fait l'honneur de juger ce travail.

Nous remercions également toute l'équipe du Laboratoire. Nous adressons aussi notre remerciement à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation. Nous remercions tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin afin de réaliser ce travail.

RESUME

RESUME

Les dernières années par manque de choix de sites et par obligation de construire, les conditions à problèmes que nous rencontrons nous poussent à faire des recherches avancées dans le domaine du génie civil en particulier en géotechnique dans le but de garantir une stabilité des infrastructures, dans notre étude nous rencontrons un sol qui est loin d'être médiocre mais nécessite un renforcement, avant de faire notre choix on a opté pour un traitement à la chaux ensuite un renforcement par géotextile et enfin nous avons combiné les deux solutions.

En premier le traitement à la chaux s'est fait à 3%. En second lieu le renforcement s'est fait de 1^{er} nappe de géotextile jusqu'à 3 nappes. Pour enfin avoir le résultat suivant :

Les caractéristiques de notre sol étaient beaucoup plus satisfaisantes à l'inclusion des géotextiles plutôt qu'au traitement à la chaux, enfin de compte nous avons opté pour le renforcement via les nappes de géotextiles vu qu'à chaque addition de nappe notre sol était plus résistant.

Mots clés

Traitement des sols- traitement des sols à la chaux- caractéristiques des sols argileux- renforcement des sols- renforcement des sols par géotextiles- géotextiles- essais géotechniques.

في السنوات الأخيرة بسبب عدم توفر فرصة الاختيار دائما مع ضرورة البناء دفعتنا الظروف الإشكالية التي نواجهها إلى بحث متقدم في مجال الهندسة المدنية وبالأخص في مجال الجيوتقني بهدف ضمان استقرار البنية التحتية.

في دراستنا هذه نلتقي بترربة بعيدة كل البعد على كونها هشة ولكنها بالرغم تتطلب التعزيز. قمنا أولا بالمعالجة عن طريق الجير بنسبة 3 بالمئة ثم التعزيز بواسطة طبقات من الترسية المخصصة للبناء من طبقة إلى 3 طبقات. للحصول أخيرا على النتيجة التالية

(خصائص أرضيتنا كانت أكثر إرضاء بالترسية الأرضية بدلا من المعالجة بالجير و هذا كان كافي لجعلنا نختار طريقة التعزيز بدلا من طريقة المعالجة).

الكلمات الدالة

معالجة التربة - معالجة التربة بالجير - خصائص التربة الطينية - تقوية التربة - تقوية التربة بواسطة الترسية الأرضية - الترسية الأرضية - الاختبارات الجيوتقنية.

ABSTRACT

In recent years, due to a lack of choice of sites and the obligation to build, the problematic conditions that we encounter have prompted us to carry out advanced research in the field of civil engineering, in particular in geotechnics with the aim of guaranteeing the stability of infrastructures, in our study we meet a soil which is far from being mediocre but requires reinforcement, before making our choice we opted for a lime treatment then a reinforcement by geotex and finally we combined both of the two solutions.

First the lime treatment was done at 3%. Secondly, the reinforcement was made from 1 layer of geotex up to 3 layers. To finally have the following result:

The characteristics of our soil were much more satisfactory with the inclusion of geotex rather than with lime treatment, finally we opted for the reinforcement by layers of geotex since with each addition of layer our soil was more resistant.

Key words:

Soil treatment – lime soil treatment – characteristics of clay soils – soil reinforcement – soil reinforcement by geotex – geotex – geotechnical tests.

Tables des matières

Remerciements	1
Résumé	2
ملخص.....	3
Abstract	4
Table des matières	5
Table des figures	10
Liste des tableaux	15
INTRODUCTION GENERALE.....	18

Chapitre I : Etude bibliographique

I. INTRODUCTION	19
I.1.GENERALITES SUR LE SOL	19
I.1.1. Définition d'un sol	19
I.1.2. La formation d'un sol.....	19
I.1.3. Les type de sol	19
1. Sol Sableux.....	19
2. Sol Limoneux	20
3. Sol Argileux	21
4. Sol Humifère	22
I.1.4. Propriété des sols	22
I.1.4.1 Les propriétés physiques.....	22
I.1.4.2. Propriétés mécaniques	23
I.1.4.3. Propriétés Chimiques	23
I.2. LES ARGILES.....	23
I.2.1. Généralité sur les Argiles.....	24
I.2.2.2 Formation des argiles	24
I.2.3. Caractéristiques d'un sol argileux.....	24
I.2.4.3. Activité des argiles.....	24
I.2.5.Différentes familles d'argiles.....	25

Tables des matières

I.3. Les Géo-synthétiques.....	27
I.3.1. Définitions des géo-synthétique.....	27
I.3.2. Les différents types de géo-synthétique.....	27
I.3.2.1. Définition de Géotextile.....	28
I.3.3. Les fonctions des géo-synthétiques	29
I.3.3.1. Séparation	30
I.3.3.2. Filtration.....	30
I.3.3.3. Drainage	30
I.3.3.4. Renforcement.....	30
I.3.3.5. Confinement des (barrières aux) fluides/gaz	30
I.3.3.6. Contrôle de l'érosion	31
I.4. AMELIORATION DES SOLS.....	31
I.4.1. Introduction.....	31
I.4.2. Définition de la chaux	31
I.4.3. Action de la chaux sur les sols	32
I.4.4. Avantage du traitement des sols	33
I.4.5. Stabilisation des sols à la chaux	33
I.4.5.1. Introduction.....	33
I.4.5.2. Effets du traitement des sols à la chaux	33
I.5. RENFORCEMENT DES SOLS	34
I.5.1. Historique sur le renforcement des sols	34
I.5.2. Principe de renforcement des sols.....	36
I.5.3. Objectifs de renforcement des sols	36
I.5.4. Renforcement de sol par géo-synthétiques	37
I.5.4.1. Avantage de l'utilisation de géo-synthétique pour le Renforcement.....	37
I.6. CONCLUSION.....	37

Chapitre II : Caractérisation et traitement des sols argileux

Partie 1

II.INTRODUCTION.....	38
II.1 MATERIAUX UTILISE	38
II.1.1. L'argile	38
II.2 IDENTIFICATION ET CLASSIFICATION DES MATERIAUX	40
1- Caractérisation mécanique	40
2- Caractérisation physique	40
3- Caractérisation chimique.....	40
II.2.1.Caractérisation physique.....	41
II.2.1.1.Teneur en eau (NF P 94-050)	41
II.2.1.2 Analyse granulométrique.....	42
II.2.1.3.L'essai de sédimentométrie.....	44
II.2.2.4.Limite d'Atterberg (NF P94-051).....	48
II.2.2 Caractérisation mécanique.....	54
II.2.2.1.L'essai Proctor (NF P94-093)	54
II.2.2.2.Essai CBR (NF P 94-078)	58
II.2.2.3. Essai Oedométrique (XP 94-090-01).....	61
II.2.2.4.Essai de cisaillement direct (NF P 94-071-1).....	64
II.2.2.5.Essai de Compression simple (NF P94-077).....	70
II.2.3.Caractérisation chimique	72
II.2.3.1.Essai au bleu de méthylène.....	72

Partie 2

II. INTRODUCTION	76
II.1.BUT DE L'ETUDE	76
II.2. MATERIAUX UTILISES	76
II.2.1 .Argile	76

Tables des matières

II.2.2. La chaux éteinte	76
II.2.3.Préparation du mélange	77
II.3.CARACTERISATION MECANIQUE	78
II.3.1Essai Proctor	78
II.3.2.Essai CBR.....	81
II.3.3.Essai de compressibilité à l'oedomètre	83
II.3.4. Essai de cisaillement.....	85
II.3.5. Essai de compression simple	89
II.3.6.CONCLUSION	91
<u>Chapitre III : Renforcement via géotextile</u>	
III. INTRODUCTION.....	93
III.1. BUT DE RENFORCEMENT DES SOLS	93
III.2. L'OBJECTIF DE RENFORCEMENT DES SOLS	93
III.3. MATERIAU UTILISE.....	93
1- L'argile	93
2- Le Géotextile	94
2.1. Les propriétés des géotextiles.....	94
2.1.1. Propriétés physiques... ..	94
2.1.2. Propriétés mécaniques	94
2.1.3. Propriétés hydrauliques.....	94
2.1.4. Durabilité (dégradation).....	95
III.3. PREPARTION DU MELANGE	97
III.4. CARACTERISATION MECANIQUE.....	97
III.4.1.Essai Proctor.....	97
III.4.2.Essai CBR	100
III.4.3.Essai de L'oedomètre	103
III.4.4.Essai de compression simple.....	105

Tables des matières

III.4.5.Essai de Proctor	109
III.4.6.Essai de CBR.....	111
III.4.7.Essai de compression simple.....	114
III.5.CONCLUSION	118
<u>Chapitre IV : Discussion et comparaison des résultats</u>	
IV. DISCUSSION ET COMPARAISON DES RESULTATS	119
IV.1. Essai Proctor	119
IV.2. Essai de CBR	120
IV.3. Essai de comparaison simple	124
IV.4. Comparaison avec d'autres auteurs.....	127
IV.4.1 Comparaison entre différents ajouts.....	127
IV.4.1.1. Par rapport à la teneur en eau et la densité sèche.....	127
IV.4.2. Par rapport au l'Indice de CBR.....	132
1. La Chaux.....	132
2. Trois nappes de Géotextile.....	132
3. Pourcentage de la chaux avec 3 nappes de géotextiles	133
IV.5. Par rapport à la résistance et la cohésion	138
1. La Chaux.....	138
2. Trois nappes de Géotextile.....	138
3. Pourcentage de la chaux avec 3 nappes de géotextiles	139
Conclusion générale	143
Bibliographie.....	145

Liste des figures

Chapitre I : étude bibliographique (généralités sur le sol)

Figure I.1 : sol sableux	20
Figure I.2 : sol limoneux	21
Figure I.3 : Sol Argileux	21
Figure I.4 : Sol Humifère	22
Figure I.5 : Structure de la kaolinite [lambe, 1953]	25
Figure I.6 : Structure de la montmorillonite [lambe, 1953]	26
Figure I.7 : Structure d'illite [lambe, 1953]	26
Figure I.8 : Géotextile	28
Figure I.9 : Géotextile non tissé	29
Figure I.10 : Géotextile tissé	29
Figure I.11 : la chaux	31
Figure I.12 : La chaux hydraulique	32
Figure I.13 : La chaux vive	33
Figure I.14 : La chaux éteinte	33
Figure I.15 : Traitement des sols	34
Figure I.16 : Historique sur le renforcement des sols	36
Figure I.17 : Vue d'un mur d'un Soutènement en terre armée	37

Chapitre II : caractérisation et traitement du sol argileux

Figure II.1 : Échantillon type du sol à étudier	38
Figure II.2 : L'origine de l'argile	39
Figure II.3 : Détermination de la teneur en eau	41
Figure II.4 : Une série de tamis	43
Figure II.5 : malaxeur	45
Figure II.6 : préparation de l'essai	46
Figure II.7 : La courbe de granulométrie	48
Figure II.8 : Matériel utilisé dans l'essai de Limites d'Atterberg	49

Liste des figures

Figure II.9 : Préparation de L'échantillon	50
Figure II.10 : Détermination la Limite de Plasticité	51
Figure II.11 : Courbe de limite d'atterberg.....	54
Figure II.12 : Appareillage nécessaire pour l'essai Proctor	56
Figure II.13 : Courbe de Proctor	58
Figure II.14 : Mode opératoire de CBR	60
Figure II.15 : La courbe de CBR sol naturel.....	61
Figure II.16 : Les composants de cellule oedométrique.....	62
Figure II.17 : l'appareil œdométrique.....	63
Figure II.18 : La courbe de l'oedomètre	64
Figure II.19 : Principe de l'essai de cisaillement.....	66
Figure II.20 : Boite de Cisaillement.....	66
Figure II.21 : préparation et appareil de Cisaillement Direct.....	68
Figure II.22 : La courbe de cisaillement.....	69
Figure II.23 : Déroulement de l'essai.....	71
Figure II.24 : Courbe de de la résistance en fonction du temps.....	72
Figure II.25 : courbe de la cohésion en fonction du temps.....	72
Figure II.26 : Essai au bleu de méthylène.....	75
Figure II.27 : Chaux éteinte.....	77
Figure II.28 : Mélange argile + la chaux.....	77
Figure II.29 : Les étapes de l'essai Proctor	78
Figure II.30 : Courbe Proctor avant l'ajout de la chaux.....	80
Figure II.31 : Courbe Proctor après l'ajout de la chaux.....	80
Figure II.32 : préparation du moule de CBR	81
Figure II.33 : courbe du CBR avant l'ajout de la chaux	82
Figure II.34 : La courbe du CBR après l'ajout de la chaux.....	83

Liste des figures

Figure II.35 : Courbe Œdométrique sol naturel.....	84
Figure II.36 : Courbe Œdométrique mélange sol +3% de chaux.....	84
Figure II.37 : Détermination du cisaillement	86
Figure II.38 : La courbe de cisaillement Argile reconstituée	87
Figure II.39 : La courbe de cisaillement du mélange (Argile + 3% chaux).....	88
Figure II.40 : Courbe de La variation de la résistance en fonction du temps	90
Figure II.41 : Courbe de la cohésion en fonction du temps avant l'ajout de la chaux	90
Figure II.42 : Courbe de la résistance en fonction du temps après l'ajout de la chaux.....	91
Figure II.43 : Courbe de la cohésion en fonction du temps après l'ajout de la chaux	91

Chapitre III : renforcement via géotextile

Figure III.1 : Echantillon prélevé.....	93
Figure III.2 : Le géotextile tissé (AS 25).....	95
Figure III.3 : Préparation au Proctor.....	97
Figure III.4 : Proctor avec une nappe de géotextile.....	98
Figure III.5 : La courbe de CBR avec seule nappe de géotextile.....	101
Figure III.6 : La courbe de CBR avec deux nappes de géotextile.....	102
Figure III.7 : La courbe de CBR avec trois nappes de géotextile	103
Figure III.8 : Résultat de l'essai oedométrique avec une nappe de géotextile.....	104
Figure III.9 : La courbe de la résistance en fonction du temps avec une nappe	105
Figure III.10 : La courbe de la cohésion en fonction du temps une nappe.....	106
Figure III.11 : La courbe de la résistance en fonction du temps avec deux nappes.....	107
Figure III.12 : La courbe de la cohésion en fonction du temps avec deux nappes.....	107
Figure III.13 : courbe de la résistance en fonction du temps avec trois nappes.....	108
Figure III.14 : La courbe de la cohésion en fonction du temps avec trois nappes.....	108
Figure III.15 : La courbe de CBR avec une nappe de géotextile + 3% chaux	112
Figure III.16 : La courbe de CBR avec deux nappes de géotextile + 3% chaux	113
Figure III.17 : La courbe de CBR avec trois nappes de géotextile + 3% de chaux	114

Liste des figures

Figure III.18 : La courbe de la résistance en fonction du temps avec une nappe + 3 % de chaux.	115
Figure III.19 : La courbe de la cohésion en fonction du temps avec une nappe + 3 % de chaux.	115
Figure III.20 : La courbe de la résistance en fonction du temps avec deux nappes + 3 % de chaux	116
Figure III.21 : La courbe de la cohésion en fonction du temps avec deux nappes + 3 % de chaux	116
Figure III.22 : La courbe de la résistance en fonction du temps avec trois nappes + 3 % de chaux	117
Figure III.23 : La courbe de la cohésion en fonction du temps avec trois nappes + 3 % de chaux	118

Chapitre VI : discussions et comparaisons

Figure IV.1 : La courbe de compactage du mélange (Argile+ 3 nappes de géotextile).	119
Figure IV.2 : La courbe de compactage du mélange (Argile + chaux + 3 nappes de géotextile).	120
Figure IV.3 : La variation de la force en fonction de déplacement (sol naturel).	121
Figure IV.4 : La variation de force en fonction de de déplacement (sol + chaux).	121
Figure IV.5 : Courbe de variation de l'indice de CBR à 2.5mm avec les 3 nappes de géotextile.	122
Figure IV .6 : Courbe de variation de l'indice de CBR à 5mm avec les 3 nappes de géotextile.	122
Figure IV .7 : la courbe de l'indice de CBR à 2.5mm, argile et argile + chaux avec les 3 nappes	123
Figure IV .8 : la courbe de l'indice de CBR à 5mm, argile et argile + chaux avec les 3 nappes	123
Figure IV .9: La variation de la résistance en fonction du temps (sol naturel).	124
Figure IV .10 : La variation de la résistance en fonction du temps (sol naturel + la chaux)	124
Figure IV.11 : Variation de la résistance en fonction des nappes de géotextile.	125
Figure IV.12 : Variation de la cohésion en fonction de nombre des nappes.	125
Figure IV.13 : Variation de la résistance en fonction de nombre des nappes	126
Figure IV.14 : La variation de la cohésion en fonction de nombre des nappes	126
Figure IV.15 : Variation de la masse sèche en fonction de déférents ajouts.	130
Figure IV.16 : Variation de la masse sèche en fonction de déférents ajouts.	130
Figure IV.17 : Variation de la masse sèche en fonction de déférents ajouts.	131

Liste des figures

Figure IV.18 : Variation de la masse sèche en fonction de différents ajouts.....	131
Figure IV.19 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de différents ajouts.....	134
Figure IV.20 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de différents ajouts.....	134
Figure IV.21 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de différents ajouts.....	135
Figure IV.22 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de différents ajouts.....	135
Figure IV.23 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de différents ajouts.....	136
Figure IV.24 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de différents ajouts.....	136
Figure IV.25 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de différents ajouts.....	137
Figure IV.26 : Variation de la résistance en fonction de différents ajouts.....	140
Figure IV.27 : Variation de la résistance en fonction de différents ajouts.....	140
Figure IV.28 : Variation de la résistance en fonction de différents ajouts.....	141
Figure IV.29 : Variation de la résistance en fonction de différents ajouts.....	141

Liste des tableaux

Chapitre I : étude bibliographique (généralités sur les sols)

Pas de tableaux

Chapitre II : étude bibliographique (généralités sur les sols)

Tableau II.1. Localisation de Bouzzaaroura	40
Tableau II.2. Propriétés des argiles.....	40
Tableau II.3. Résultat de la teneur en eau.....	42
Tableau II.4. Résultat de l'analyse granulométrie.....	44
Tableau II.5 : Présentation des résultats.....	47
Tableau II.6. Détermination de la plasticité des sols vis-à-vis de l'indice de plasticité IP ...	51
Tableau II.7. Détermination du potentiel de gonflement des sols vis-à-vis de l'indice de plasticité	51
Tableau II.8. Détermination de l'indice de consistance des sols vis-à-vis de l'indice de plasticité IP	52
Tableau II.9 : limite de liquidité	52
Tableau II.10 Tableau de limite de plasticité.....	53
Tableau II.11. Résultat de limite d'atterberg	53
Tableau II.12 : paramètres Proctor	57
Tableau II.13. Résultat de Proctor.....	57
Tableau II.14. Résultat de l'oedomètre.....	58
Tableau II.15. Résultats de l'essai de cisaillement.....	68
Tableau II.16. Résultat de compression.....	71
Tableau II.17 : Résultats de l'essai au bleu de méthylène.....	73
Tableau II.18 : Résultat de l'essai au bleu de méthylène.....	74
Tableau II.19 : Classification du sol selon les classes	75
Tableau II.20 : Classification du sol selon le bleu de méthylène	75
Tableau II.21 : Les paramètres de l'essai Proctor.....	79
Tableau II.22 : Résultats du Proctor	79
Tableau II.23 : L'influence du pourcentage de la chaux sur le Proctor	79

Liste des tableaux

Tableau II.24 : Les résultats obtenus : Argile +3(%) de chaux	81
Tableau II.25 : Les résultats obtenus : Argile +3(%) de chaux	82
Tableau II.26 : Résultats de l'oedomètre	83
Tableau II.27 : La classification selon l'indice de compressibilité	85
Tableau II.28 : Résultats de cisaillement	86
Tableau II.29 : Résultats de l'essai du CBR	86
Tableau II.30 : Résultats obtenus : Argile + 3% chaux en compression simple.....	89
Tableau II.31 : Résultats de compression simple	89

Chapitre III : renforcement via géotextile

Tableau III.1 : Caractéristiques physiques	96
Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques	96
Tableau III.3 : Caractéristiques hydrauliques.....	96
Tableau III.4 : Caractéristiques du rouleau	96
Tableau III.5 : données du Proctor avec une seule nappe	98
Tableau III.6 : résultats de l'essai de Proctor	98
Tableau III.7 : Données du Proctor avec 2 nappes de géotextile	99
Tableau III.8 : résultats obtenus	99
Tableau III.9 : Données du Proctor avec 3 nappes de géotextile	99
Tableau III.10 : Résultats obtenus	100
Tableau III.11 : Résultat de l'essai CBR avec une seule nappe de géotextile.....	100
Tableau III.12 : Résultat de l'essai CBR avec deux nappes de géotextile	101
Tableau III.13 : Résultats de l'essai CBR avec trois nappes de géotextille	102
Tableau III.14 : Résultat de l'essai oedométrique avec une seule nappe de géotextile	103
Tableau III.15 : Résultats de l'essai de compression avec une nappe de géotextile	105
Tableau III.16 : Paramètre de Proctor après l'ajout de la chaux avec une nappe.....	109
Tableau III.17 : résultats obtenus	110
Tableau III.18 : Paramètre du Proctor après l'ajout de la chaux avec deux nappes	110

Liste des tableaux

Tableau III.19 : résultats obtenus	110
Tableau III.20 : Paramètre du Proctor après l'ajout de la chaux avec trois nappes.....	111
Tableau III.21 : résultats obtenus	111
Tableau III.22 : Les résultats de CBR avec une nappe de géotextile + 3% chaux	112
Tableau III.23 : Les résultats de l'essai de CBR pour l'argile avec deux nappes + 3% chaux	113
Tableau III.24 : Les résultats de l'essai de CBR pour l'argile avec trois nappes + 3% de chaux	117
Tableau III.25 : Les résultats de l'essai de compression simple pour l'argile+3% chaux et une nappe de géotextile	114
Tableau III.26 : Les résultats de l'essai de compression simple pour l'argile + 3% de chaux	116

Chapitre IV : discussions et comparaisons

Tableau IV.1 : Variation de la masse sèche en fonction des nappes de géotextile	119
Tableau IV.2 : Variation de la masse sèche en fonction des nappes de géotextile et la chaux	119
Tableau IV.3 : Variation de l'indice de CBR en fonction des nappes de géotextile.....	121
Tableau VI.4 : variation de l'indice de CBR en fonction des nappes et de la chaux	122
Tableau IV.5 : la variation de la résistance en fonction des nappes de géotextiles	125
Tableau IV.6 : La variation de la résistance en fonction des nappes de géotextile (sol naturel+ la chaux)	126
Tableau IV.7 : Variation de la teneur en eau et la densité sèche en fonction de pourcentage de la chaux.....	127
Tableau IV.8 : Variation de la teneur en eau et la densité sèche en fonction de nombre des nappes de géotextile.....	128
Tableau IV.9 : Variation de la teneur en eau et la densité sèche en fonction de nombre des nappes de géotextile + 3% de chaux.....	129
Tableau IV.10 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de pourcentage de la chaux.....	132
Tableau IV.11 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de pourcentage de la chaux.....	132
Tableau IV.12 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de pourcentage de la chaux et nombre des nappes.....	133
Tableau IV.13 : Variation de la résistance et la cohésion en fonction de la chaux.....	138
Tableau IV.14 : Variation de la résistance et la cohésion en fonction de la chaux	138

Liste des tableaux

Tableau IV.15 : Variation de la résistance et la cohésion en fonction de la chaux 139

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Le sol a toujours été un matériau utilisé dans la construction à cause de sa Disponibilité et son coût qui représentent ses principaux avantages.

Parmi les différentes particules minérales qui forment le sol on a L'argile.

L'argile est une matière première utilisée depuis l'antiquité dans divers domaines de la vie courante comme la poterie et les matériaux de constructions. A l'heure actuelle son champ d'exploitation s'est encore développé jusqu'au le domaine des travaux publics et du bâtiment.

Les matériaux argileux constituent souvent des mélanges naturels complexes de minéraux Dont la granulométrie et les propriétés physico-chimiques et mécaniques sont très variables. Ainsi dans ce mémoire nous allons étudier les possibilités d'amélioration des caractéristiques Physico-mécaniques des sols argileux de médiocres qualités en leurs rajoutant soit des nappes de géotextile soit de la chaux, afin de rendre l'argile plus renforcé à l'exploitation dans le domaine des infrastructures routières.

Le présent rapport est structuré comme suit:

- **Chapitre I: Etude bibliographique (généralités sur les sols)**

Ce chapitre est subdivisé comme suit: Généralité sur les sols, caractéristiques des argiles, une introduction et recherche simplifiée sur les géosynthétique.

Et enfin les différents méthodes de traitement et renforcement des sols.

- **Chapitre II : Caractérisation et traitement du sol argileux.**

Contient les définitions, objectifs, matériels utilisés, modes opératoires et principes des différents essais d'identifications:

Physiques, mécaniques et chimiques réalisés au niveau du Laboratoire LTP EST ANNABA.

On discutant l'influence de la chaux sur les essais précédents.

- **Chapitre III : Renforcement via géotextile**

Aborde les propriétés ainsi que la fiche technique de géotextile utilisé.

Aussi, il a également traité l'influence des nappes de géotextile dans le renforcement sur le sol naturel, et le sol avec la chaux.

- **Chapitre IV : Discussion et comparaison**

Les résultats des essais sont interprétés et comparé afin de critiquer la faisabilité et l'adéquation de cette technique de renforcement sur les sols.

Enfin, une conclusion générale qui résume les intérêts de l'étude et présente les recommandations essentielles tirées de cette étude.

- **Conclusion générale**

CHAPITRE I

Étude bibliographique (généralités sur les soles)

INTRODUCTION

Le sol généralement un matériau hétérogène avec des caractéristique très variables .les principaux problèmes liés aux sols de manière générale se manifestent par une capacité portante faible, des déformations (tassements absolus et différentiels).

Nous avons exposé dans ce chapitre une étude bibliographique détaillée sur le sol, et les différentes techniques de renforcement de sol par des nappes géo-synthétiques qui représente une alternative économiquement et techniquement intéressante, ces dernières permettent une amélioration des caractéristiques mécaniques des sols. Et aussi parmi les méthodes de traitements des sols, on a étudié la technique d'amélioration par la chaux.

Chaque technique présente ses avantages et ses inconvénients en termes de portance, de nuisance sonore, de contrainte, de fiabilité et de coût.

I.1.GENERALITES SUR LE SOL

I.1.1. Définition d'un sol

Comme beaucoup de mots communs, le mot sol a plusieurs significations. Dans son sens traditionnel, le sol est le milieu naturel pour la croissance des plantes. Le sol a également été défini comme un corps naturel comprenant des couches (horizons) qui sont composées de matériaux altérés minéraux, de matières organiques, d'air et d'eau. Le sol est le produit final de l'effet combiné du climat, de la topographie, des organismes (flore, faune et êtres humains) sur les matériaux de base (roches et minéraux d'origine) au fil du temps.

Le sol est une des composantes essentielles de la «terre» et des «écosystèmes» qui sont tous deux des concepts plus larges englobant la végétation, l'eau et le climat dans le cas des terres, et en plus de ces trois aspects, des considérations sociales et économiques dans le cas des écosystèmes.

I.1.2. La formation d'un sol

Le sol met beaucoup de temps à se constituer (plusieurs milliers d'années). Dans certaines conditions, la roche-mère, élément minéral est altérée par l'air et l'eau. Cela permet l'installation de premières plantes pionnières. Ensuite, la matière organique provenant de plantes et d'animaux morts forme en surface une litière. Décomposée par la faune du sol, elle est transformée en humus. Puis mélangé à des éléments minéraux, le sol devient cultivable, c'est ce que l'on appelle de la terre arable.

Une fois formées, les propriétés du sol continuent à évoluer (structure du sol, porosité, activité biologique, teneurs en certains éléments nutritifs..).

I.1.3. Les type de sol

1. Sol Sableux

- **Texture** : Contient surtout du sable ; sol très poreux qui ne retient pas l'eau; sèche et se réchauffe en peu de temps.

- **Structure:** Glisse entre les doigts en raison de l'absence de cohésion entre les particules; très sensible à l'érosion par le vent et au lessivage.
- **Culture:** Ne convient pas aux végétaux ayant besoin de beaucoup d'eau; ne convient qu'à la culture de l'asperge, de la carotte, de la pomme de terre, des cactus, etc.
- **Avantages:** Sol qui se travaille bien et qui draine bien l'eau, peut être réchauffé très rapidement.
- **Désavantages:** Sol peu fertile qui ne retient pas l'eau; très propice à l'érosion.



Figure I.1 : Sol Sableux

2. Sol Limoneux

- **Texture:** Contient surtout du limon; adhésion partielle des particules du sol qui se désagrègent en petits morceaux sous l'effet de l'environnement; porosité moyenne.
- **Structure:** Particules relativement serrées permettant à l'air et à l'eau de circuler plus ou moins facilement; sujet à la formation superficielle d'une croûte sèche qui limite l'infiltration d'eau, tout en favorisant le ruissellement; très grande sensibilité à l'érosion par l'eau, surtout là où les pentes sont abruptes.
- **Culture:** Convient à la culture du blé, du maïs, des betteraves, etc.
- **Avantages:** Sol qui se travaille bien et qui est très fertile.
- **Désavantages :** Sol très fragile, qui s'érode facilement



Figure I.2 : Sol Limoneux

3. Sol Argileux

- **Texture :** Contient surtout de l'argile; sol lourd et compact dont les particules demeurent collées entre elles comme de la pâte à modeler; risque de compaction du sol si des masses lourdes (comme des camions) se retrouvent en surface ; un sol compacté sera alors difficilement drainé ; souvent désigné sous le nom de « glaise ».
- **Structure :** Peu de place pour la circulation de l'eau et de l'air ; retient bien l'eau et les éléments nutritifs ; sensibilité à l'érosion par le vent, car si la surface est sèche, cette couche superficielle peut être littéralement pulvérisée ; tendance à être alcalin.
- **Culture :** Sol très fertile, car il est riche en éléments nutritifs ; il ne doit pas être gorgé d'eau afin de ne pas affecter la croissance végétale ; convient à la culture de la tomate, de l'orge, du soja, etc.
- **Avantages :** Sol qui retient bien l'eau et qui est très fertile.
- **Désavantages :** Sol qui se travaille mal et qui réagit mal aux variations de température (gèle facilement).



Figure I.3 : Sol Argileux

4. Sol Humifère

- **Texture:** Contient surtout de la matière organique; particules foncées relativement lâches qui glissent entre les doigts; permet à l'eau de s'écouler facilement.
- **Structure:** Peut retenir une grande quantité d'eau sans devenir collant comme le sol argileux; retient bien les engrais; peut être sensible à l'érosion par le vent.
- **Culture:** Souvent utilisé pour la culture des légumes.
- **Avantages:** Sol très fertile, qui retient bien l'eau et qui se réchauffe facilement.
- **Désavantage:** Sol parfois très acide qui peut nuire au développement des végétaux...



Figure I.4 : Sol Humifère

I.1.4. Propriété des sols

I.1.4.1 Les propriétés physiques

1. **Structure du sol :** La structure du sol affecte l'aération, le mouvement de l'eau, la conduction de la chaleur, la croissance des racines des plantes et la résistance à l'érosion. L'eau a l'effet le plus important sur la structure du sol du fait de la solubilisation et de la précipitation des minéraux et ses effets sur la croissance des plantes.
2. **Profondeur du sol :** La profondeur du sol "efficace" était alors considérée comme l'épaisseur du solum. Cependant, les racines et l'activité biologique se trouvent souvent dans l'horizon C et la profondeur du sol devrait donc inclure cette couche.
3. **Caractéristiques de l'eau dans le sol :** L'eau stockée ou qui circule dans le sol affecte la formation des sols, la structure, la stabilité et l'érosion et est une préoccupation majeure en ce qui concerne la croissance des plantes.
4. **Texture du sol :** Les éléments minéraux du sol (sable, limon et argile) déterminent sa texture. La texture influe sur le comportement d'un sol, en particulier sa capacité de rétention des éléments nutritifs et de l'eau.
Les constituants du sol de plus de 2,0 mm sont considérés comme des roches et des graviers et peuvent être inclus dans la classe texturale.

5. **Consistance** : La consistance est la capacité du sol à rester cohérent et résister à la fragmentation. Cette mesure est utilisée pour prévoir les problèmes de mise en culture et d'ingénierie des fondations. La consistance est mesurée à trois niveaux d'humidité: sol séché, à l'air, humide et mouillé.
6. **Porosité** : L'espace poral est la partie du volume apparent qui n'est occupée ni par les matières minérales ni par les organiques : cet espace ouvert est occupé par l'air ou par de l'eau. Idéalement, l'espace poral total devrait être de 50% du volume du sol.
7. **Densité** : La densité est le poids par unité de volume d'un objet. La densité particulière est la densité des particules minérales qui composent un sol, c'est à dire, qu'elle exclut l'espace poral et la matière organique. La densité particulière est d'environ $2,65 \text{ g/cm}^3$.
8. **Flux D'eau** : L'eau se déplace à travers le sol du fait de la gravité, de l'osmose et de la capillarité. De zéro à un tiers de bar, l'eau se déplace à travers le sol en raison de la gravité, c'est ce qu'on appelle le flux saturé. Avec des succions plus élevées, le mouvement de l'eau est appelé flux non saturé.

I.1.4.2. Propriétés mécaniques

Les caractéristiques mécaniques des sols peuvent être séparées en deux catégories :

On parle des :

- 1- caractéristiques mécaniques de compressibilité des sols d'une part.
 - 2- caractéristiques mécaniques de cisaillement des sols d'autre part.
- **Les caractéristiques mécaniques de compressibilité** vont servir dans le calcul des ouvrages afin de déterminer les déformations du sol, c'est-à-dire généralement les tassements, qui se produisent à long terme ou à court terme.
- **Les caractéristiques mécaniques de cisaillement** vont servir pour leur part à déterminer la résistance (au sens large du terme) du sol aux sollicitations qui lui sont appliquées.

I.1.4.3. Propriétés Chimiques

Les propriétés chimiques du sol correspondent aux teneurs et disponibilités des éléments minéraux nutritifs pour les plantes et aux paramètres chimiques du sol en lien avec leur restitution ou disponibilité. Les résultats sur l'azote et le phosphore sont présentés en détail. D'autres effets sur les propriétés chimiques sont présentés : sur le pH et la capacité d'échanges cationiques.

I.2. LES ARGILES

Les argiles ont été utilisées très tôt dans l'histoire de l'humanité, après le silex et la pierre taillée. Ce matériau possède des propriétés plastiques particulières : facilement modelable, il peut être figé de façon irréversible, ce qui a permis les premières applications domestiques (vases, plats, etc.) et culturelles (statuettes, supports d'écriture...). Depuis lors, les applications industrielles et domestiques n'ont cessé de se développer. Les argiles se trouvent aujourd'hui dans de nombreux produits, qu'elles soient utilisées comme matière première de base (par

exemple, le kaolin dans la fabrication de céramique) ou comme adjuvant ou additif (le kaolin pour la fabrication de charges minérales utilisées dans l'industrie papetière).

I.2.1. Généralité sur les Argiles

I.2.1.1 Définition

L'argile est le résultat de plusieurs années de sédimentation. Elle se présente sous la forme d'une pâte malléable plus ou moins homogène. Une argile désigne une grande variété de roches argileuses, qui peuvent être de différentes couleurs (verte, rouge, bleue, jaune, grise, blanche, brune, rose...). De manière générale, le mot argile(s) sert à désigner l'ensemble des particules dont la taille est inférieure à 2 (μm).

I.2.2.2 Formation des argiles

On trouve des roches argileuses presque partout à la surface de la terre, mais toutes ne sont pas identiques. Leurs propriétés et leur composition diffèrent selon les conditions géologiques dans lesquelles elles se sont formées, c'est-à-dire :

- Les conditions climatiques: (vent, pluie, neige, gel et dégel).
- La topographie des sites qu'elles traversent (transport des roches de l'amont vers l'aval sur les versants montagneux).
- Les roches d'origine dont elles sont issues : basalte, granit...

I.2.3. Caractéristiques d'un sol argileux

En géologie, on appelle "argile" les minéraux d'une roche qui mesurent moins de 2 μm (micromètres). La terre argileuse est donc composée d'un grand nombre de minuscules particules de roche. Pour cette raison, le sol argileux est extrêmement lourd et compact :

Il laisse difficilement passer l'eau :

- En période de sécheresse, il devient très dur et peut se fendiller. La réhydratation est alors longue et difficile.
- Par temps humide, l'eau a tendance à s'accumuler à la surface du sol, ce qui le rend boueux et collant.

Avoir un sol argileux est à la fois un atout et une contrainte :

- En effet, en raison de sa richesse en minéraux, le sol argileux est très fertile et permet de cultiver de nombreuses plantes.
- En revanche, son caractère imperméable et dense le rend relativement difficile à travailler.

I.2.4.3. Activité des argiles

Skempton (1953), a considéré que les valeurs des limites d'Atterberg sont liées à la quantité d'eau retenue à la surface des particules et donc à la quantité d'argile présente dans le sol .Cet

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE (GENERALITES SUR LES SOLS)

l'auteur a défini l'activité d'une argile par le rapport de l'indice de plasticité (I_p) et du pourcentage des éléments inférieurs à deux microns ($C_2 < 2 \mu m$).

$$A_1 = I_p / C_2$$

Skempton a proposé la nomenclature suivante :

- Argile inactives : les argiles qui ont une activité inférieure à 0,75. Ces argiles sont à base de Kaolinite, ou des argiles contenant peu de minéraux argileux.
- Argile normale : qui a une activité comprise entre 0,75 et 1,25.
- Argile active : qui ont une activité comprise entre 1,25 et 2.
- Argile très actives : qui a une activité supérieure à 2.

En ce qui concerne les argiles compactées, Seed et al (1962), ont introduit une modification à la définition de Skempton sous la forme suivante :

$$A_2 = I_p / (C_2 - n)$$

Sachant que :

$n = 5$ cas des sols naturels.

$n = 10$ cas des sols reconstitués.

I.2.5. Différentes familles d'argiles

Kaolinite : la kaolinite est constituée d'une succession alternée de feuillets en tétraèdre (Silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite).

Les deux feuillets sont liés de telle manière que les sommets du feuillet de silice et ceux d'une des couches du feuillet en octaèdre ne forment qu'une seule et même couche.

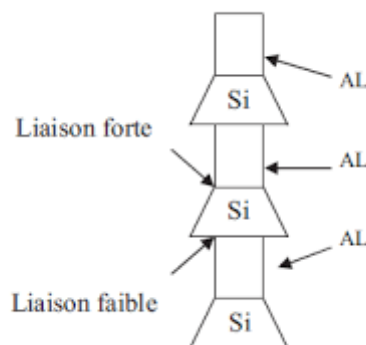


Figure I.5 : Structure de la kaolinite [lambe, 1953]

Montmorillonite : la montmorillonite, parfois appelée (Smectite), est un minéral argileux important composé de deux feuillets de Silice et d'un feuillet d'Alumine (Gibbsite).

Les feuillets en octaèdres se trouvent entre deux feuillets de Silice et les sommets des tétraèdres se confondent avec les hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former qu'une seule couche. Les sols qui contiennent de la montmorillonite peuvent être gonflants lorsque leur teneur en eau augmente, les pressions de gonflements qui en résultent peuvent facilement causer des dommages aux structures légères et pavages.

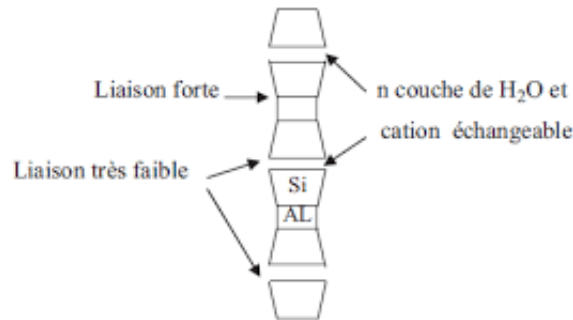


Figure I.6 : Structure de la montmorillonite [lambe, 1953]

Illites : l'illite est une autre composante importante des sols argileux, elle a une structure analogue à la montmorillonite mais il y a des ions de potassium intercalés entre les feuillets tétraédriques. Grâce à ces ions la liaison est relativement forte et les molécules d'eau ne peuvent pratiquement plus s'intercaler. Aux extrémités de la particule d'argile, il y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations. Ces cations dits échangeables jouent un rôle important dans le comportement des argiles.

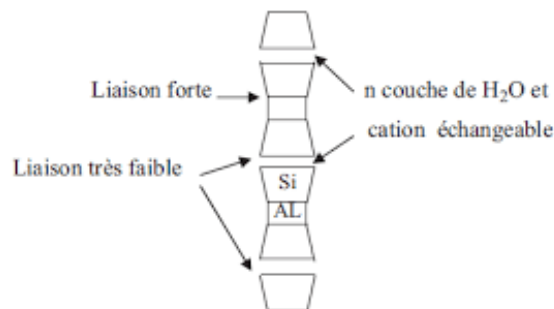


Figure I.7 : Structure d'illite [lambe, 1953]

Vermiculites : les vermiculites sont des argiles ayant une origine volcanique, riches en magnésium. Elles sont formées par hydratation de minéraux basaltiques. Lorsqu'elle est chauffée, elle éprouve un phénomène de dilatation, la rendant particulièrement utile comme isolant thermique pour les constructions, ce matériau ayant une faible masse, une incapacité à brûler et étant impuissant et inaltérable.

Les argiles fibreuses

- Les feuillets sont discontinus et forment des rubans.

- On les trouve dans les milieux confinés.

La Glauconie :

- Minéral vert ferrifère proche de l'illite exclusivement formé en milieu marin peu profond.

I.3. Les Géo-synthétiques

I.3.1. Définitions des géo-synthétiques

Les géo-synthétiques sont définies comme des produits dont le principal constituant est à base de polymère synthétique ou naturel, se présentant sous forme de nappe, de bande ou de structure tridimensionnelle, utilisé en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil. Ces produits sont utilisés dans les domaines tels que la construction routière, les travaux hydrauliques, les chemins de fer, les terrains d'aviation, etc...

De nos jours, les fonctions remplies par les géo-synthétiques, spécifiquement dans le domaine du génie civil, sont :

- La séparation des sols.
- le renforcement des structures (horizontale et verticale).
- Le drainage des liquides.
- La filtration des sols.
- L'imperméabilisation des ouvrages.
- Le contrôle de l'érosion.
- La protection des ouvrages.

Dans beaucoup de cas, l'utilisation d'un géo-synthétique permet l'augmentation de manière significative du facteur de sécurité, l'amélioration de la performance, et la réduction des coûts en comparaison avec une conception conventionnelle et une construction alternative.

I.3.2. Les différents types de géo-synthétique

Les centaines de produits géo-synthétiques existant actuellement sur le marché peuvent être classés en 6 groupes, d'après les matières premières utilisées, les modes de fabrication et les domaines d'utilisation :

- 1- Géotextiles.
- 2- Géotextile tricoté.
- 3- Géotextile tube (géo-tuyaux).
- 4- Géo-grille, Il y a deux types de géo-grilles : uni axiale et bi-axiale
- 5- Géo-filet.
- 6- Géo-composite.
- 7- Les géo-membranes.

- 8- Les géo-synthétiques bentonitiques (GSB).
- 9- Les géo-synthétiques alvéolaires.

Et l'un des types les plus importants sur lesquels nous allons étudier est : Le **Géotextile**.

I.3.2.1. Définition de Géotextile

Matière textile, plane, perméable et à base de polymère (naturel ou synthétique), peuvent être non tissé, tissé ou tricoté utilisé en contact avec le sol ou d'autres matériaux dans des divers domaines. Les géotextiles sont utilisés pour des applications en séparation, filtration, drainage, renforcement et contrôle de l'érosion.



Figure I.8 : Géotextile

a. Géotextile non tissé

C'est un géotextile qui se présente sous forme d'une feuille manufacturée, qui constitue un voile ou une nappe de fibre, orientée selon une direction ou distribuée aléatoirement, et dont la liaison peut être de différents types :

- **La liaison mécanique** : est faite par entrelacement des fibres, à partir d'une série d'aiguilles qui s'enfoncent dans la nappe qui défile (non tissées, aiguillées).
- **La liaison chimique** : est réalisée soit à l'aide de résines soit d'émulsions qui appartiennent à des décomposées proches des caoutchoucs naturels.
- **la liaison thermique** : est faite par calandrage (effets conjugués de la chaleur et de la pression) entre deux rouleaux presseurs chauffants. On obtient une fusion partielle des points de contacts des fibres (non tissées mais thermo soudées).



Figure I.9 : Géotextile non tissé

b. Géotextile tissé

Les tissés sont soit des tissés de fils mono filaments, soit des tissés de fils multi filaments dont chaque fil est constitué de plusieurs brins élémentaires, soit des tissés de bandelettes de films extrudés à base de polyéthylène, ou de polypropylène. Le tissage permet d'obtenir un module de traction élevé, une faible déformabilité et une régularité des pores intéressante sur le plan hydraulique cependant il entraîne une anisotropie en plan.

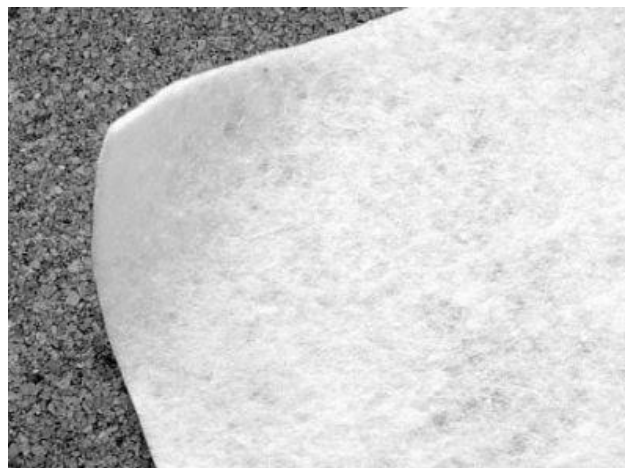


Figure I.10 : Géotextile tissé

I.3.3. Les fonctions des géo-synthétiques

Les géo-synthétiques comprennent une variété de matériaux en polymères synthétiques spécialement fabriqués pour une utilisation dans les domaines du génie civil et de la protection de l'environnement ainsi que dans les ouvrages hydrauliques et de transport. On distingue communément les fonctions principales suivantes pour un géo-synthétique : séparation, filtration, drainage, renforcement, confinement des liquides/gaz ou contrôle de l'érosion. Dans certains cas, le géo-synthétique peut remplir une double fonction.

I.3.3.1. Séparation

Par exemple, des géotextiles sont utilisés pour empêcher les matériaux de la couche de forme d'une route de pénétrer dans les sols mous de la couche de fondation sous-jacente, maintenant ainsi l'épaisseur de projet et l'intégrité de la chaussée. Les séparateurs permettent également d'empêcher les sols fins sous-jacents d'être "aspirés" dans les couches de base en matériaux granulaires des routes.

I.3.3.2. Filtration

Le géo-synthétique agit comme un filtre de sable en permettant à l'eau de circuler dans le sol tout en retenant en amont les particules du sol. Par exemple les géotextiles sont utilisés pour empêcher la migration des sols dans les matériaux granulaires drainants ou les drains tout en maintenant l'écoulement au travers du système. Les géotextiles sont également utilisés en dessous des enrochements ou d'autres matériaux dans les systèmes de protection des cotés ou des berges de rivières pour empêcher l'érosion des sols.

I.3.3.3. Drainage :

Le géo-synthétique agit comme un drain pour conduire les écoulements de fluides dans les sols moins perméables. Par exemple les géotextiles sont utilisés pour dissiper les pressions interstitielles à la base des remblais routiers. Pour des débits plus importants, des géo-composites drainants ont été développés. Ces matériaux ont été utilisés comme écrans drainants de rives de chaussées, épis drainants sur talus et comme drains dans les culées et murs de soutènement. Des drains verticaux préfabriqués (DVP) sont utilisés pour accélérer la consolidation des sols mous cohésifs sous remblais et remblais pré-chargés.

I.3.3.4. Renforcement

Le géo-synthétique agit comme élément de renfort au sein d'une masse de sol ou en combinaison avec le sol pour produire un composite ayant des propriétés en déformation et résistance améliorées par rapport à un sol non renforcé. Par exemple, des géotextiles et géo-grilles sont utilisés pour augmenter la résistance à la traction d'une masse de sol afin de créer des pentes verticales ou subverticales (murs en sol renforcé). Le renforcement permet la construction de remblais sur sols de fondation très mous et la PVD géo-synthétique Q geosynthetic separator Séparation par géo-synthétique DVP réalisation de pentes de talus de remblais plus raides qu'avec des sols non renforcés. Des géo-synthétiques (habituellement des géo-grilles) sont également utilisés pour le franchissement de cavités qui peuvent se développer sous des couches support en matériau granulaire (routes et voies ferrées) ou sous les systèmes de couverture dans les installations de stockage de déchets.

I.3.3.5. Confinement des (barrières aux) fluides/gaz

Le géo-synthétique se comporte comme une barrière relativement imperméable aux fluides. Par exemple, des géo-membranes, des composites en films minces et géotextiles, des géo-synthétiques bentonitiques et des géotextiles enduits sur site sont utilisés comme barrière aux fluides pour limiter le débit de ces derniers. Cette fonction est également utilisée dans les

couches de chaussées en béton bitumineux, en capsulage de sols gonflants et confinement de déchets.

I.3.3.6. Contrôle de l'érosion

Le géo-synthétique agit pour réduire l'érosion des sols causée par l'impact des pluies et les eaux de ruissellement. Par exemple, des couvertures géo-synthétiques temporaires et des matelas géo-synthétiques légers définitifs sont disposés sur la surface du sol exposé sur pentes. Des fascines en géotextile sont utilisées pour retenir les particules en suspension des eaux de ruissellement chargées en sédiments. Certains matelas pour le contrôle de l'érosion sont fabriqués avec des fibres de bois biodégradables.

I.4.AMELIORATION DES SOLS

I.4.1.Introduction

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20^{ème} siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains, et, sont jugées efficaces. Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation. Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années, un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets.

I.4.2.Définition de la chaux

La chaux est un liant issu de la cuisson du calcaire, la calcination, à très haute température : environ 900 °C. Après traitement, elle se présente sous la forme d'une poudre claire conditionnée en sacs, généralement de 10 à 15 kilos. Ce liant est notamment utilisé dans l'industrie de la construction pour préparer les mortiers et les peintures. C'est un matériau bon marché et écologique.



Figure I.11 : la chaux

La Chaux : Selon la composition des roches à l'origine de sa fabrication, on distingue différents types de chaux. Pour simplifier, on distingue surtout **la chaux aérienne**, constituée presque exclusivement de calcaire, et **la chaux hydraulique**, qui contient davantage d'argile et nécessite une température de cuisson plus élevée.

1- La chaux aérienne vive : Ce type de chaux dénommé « chaux vive » tout court dans la suite est le premier liant à avoir été utilisé en traitement de sols. Il s'agissait essentiellement de rendre possibles les terrassements de grands chantiers dans des limons argileux très humides.

Les actions immédiates de la chaux vive avec l'eau, est la modification de la structure des particules et l'accroissement de la résistance au gonflement - retrait c'est-à-dire à la sensibilité à l'eau. La modification transforme les sols argileux, ils deviennent friables et facilement compactables. Le séchage des sols humides par ajout de chaux réduit au minimum le retard de la construction dû aux conditions atmosphériques. Ce qui se traduit par des économies du temps et d'argent.

2- La chaux aérienne éteinte: La chaux éteinte est moins utilisée que la chaux vive. Sa densité foisonnée est sensiblement inférieure à celle de la chaux vive, ce qui rend son transport et sa manutention plus coûteux. De plus, son seul effet d'assèchement est son apport en tant que matière sèche; il est donc très limité.

Les actions immédiates de la chaux éteinte sur les caractéristiques géotechniques sont semblables à celles de la chaux vive. Elles sont simplement moins marquées, car la chaux éteinte n'est pas utilisée avec des sols très humides.

3- La chaux hydraulique naturelle - ou chaux maigre : Fait sa prise plus rapidement avec l'air mais aussi avec l'eau. Elle offre une meilleure résistance mécanique, mais sa perméabilité à la vapeur d'eau est moindre (régulation de l'humidité d'une paroi).



Figure I.12 : La hydraulique



Figure I.13 : La chaux vive



Figure I.14 : La chaux éteinte

I.4.3. Action de la chaux sur les sols

Les sols fins à teneur élevées en argiles ou limons ne présentent aucune stabilité au regard des conditions météorologiques : ils gonflent en présence d'eau, se rétractent par sécheresse et foisonnent quand il gèle. Leur utilisation routière est donc très incertaine. Le traitement à la chaux est recommandé pour les sols dont la teneur en argile est supérieure à 40%. Le dosage en chaux varie en fonction des sols et des résultats recherchés généralement entre 1 et 3%.

I.4.4. Avantage du traitement des sols

- ✓ **Avantages économiques :** L'utilisation du sol en place est économique dans la mesure où tout en étant un facteur de rapidité du chantier, elle évite les coûts du déblaiement, de la mise en décharge et du transport.
- ✓ **Avantages environnementaux :** Le traitement du sol en place, en limitant le transport de matériaux réduit la pollution et la consommation d'énergie liée aux transports. Il évite aussi l'extraction de granulats qui sont des ressources naturelles non renouvelables.



Figure I.15 : Traitement des sols

I.4.5. Stabilisation des sols à la chaux

I.4.5.1. Introduction

La stabilisation des sols à la chaux permet l'amélioration immédiate et dans le temps, des performances des sols traités. Ces performances sont obtenues parfois à de très faibles taux de chaux ce qui représente un grand intérêt économique. Les performances se traduisent de manière remarquable sur toutes les caractéristiques du sol traité, à savoir la réduction de la plasticité, du potentiel et de la pression de gonflement, de la densité sèche maximale et de la déformabilité.

La chaux est très utilisée pour modifier les propriétés des sols fins et des fractions fines des sols grenus. Elle est plus efficace dans le traitement des sols plastiques capables de prendre une grande quantité d'eau.

L'ajout de chaux au sol fin déclenche en présence d'eau plusieurs réactions parmi ces réactions:

1- Réactions pouzzolanique

Cette réaction a lieu entre la chaux, l'eau et les silicates et ou des aluminates des sols argileux pour donner dans le temps, des agents cimentant qui sont essentiellement les silicates de calcium hydratés ou les aluminates de calcium hydratés. Ceci est rendu possible par l'augmentation substantielle du pH du milieu, apportée par la chaux qui autorise la dissolution des aluminates et silicates. Ces réactions de cimentation provoquent les augmentations principales de la résistance dans le mélange sol-chaux dans le temps. On observe aussi l'augmentation de la cohésion, de l'indice CBR, l'amélioration de la perméabilité des argiles, la diminution des variations volumiques pour les argiles

gonflantes et le renforcement de la structure due aux phénomènes de prise et de cristallisation.

2- Carbonatation

Simultanément avec la réaction pouzzolanique, la réaction de carbonatation peut aussi mener à une augmentation de résistance à long terme dans les sols stabilisés à la chaux. La carbonatation se produit quand la chaux réagit avec le dioxyde de carbone dans l'air pour produire un carbonate de calcium relativement insoluble. Cette réaction peut être avantageuse et mener à une augmentation de résistance à long terme.

I.4.5.2.Effets du traitement des sols à la chaux

Les effets immédiats sont réalisés dans la première phase de la stabilisation. Ils sont atteints rapidement et sans cure. Ils sont le résultat de l'échange cationique et les réactions de floculation qui se produisent dès que le sol est mélangé à la chaux en présence de l'eau. Ils sont d'un intérêt principal durant la phase de construction des chaussées.

En revanche, les effets à long terme, appelés effets de stabilisation, s'amorcent durant la construction et continuent dans le temps. Ils concernent la résistance et la durabilité. Bien que ces effets soient générés par l'échange cationique et la floculation, ils sont principalement le résultat du gain de la résistance pouzzolanique.

I.5.RENFORCEMENT DES SOLS

I.5.1. Historique sur le renforcement des sols

Le renforcement des sols est connu depuis l'ancienne Egypte, les bâtisseurs des grandes pyramides utilisaient des rampes en remblais de 20 mètres de hauteur, renforcées par des lits de roseaux et des poutres en bois de palmier. La figure 1.1 montre le principe du renforcement dans une rampe d'après les bâtisseurs des pyramides.

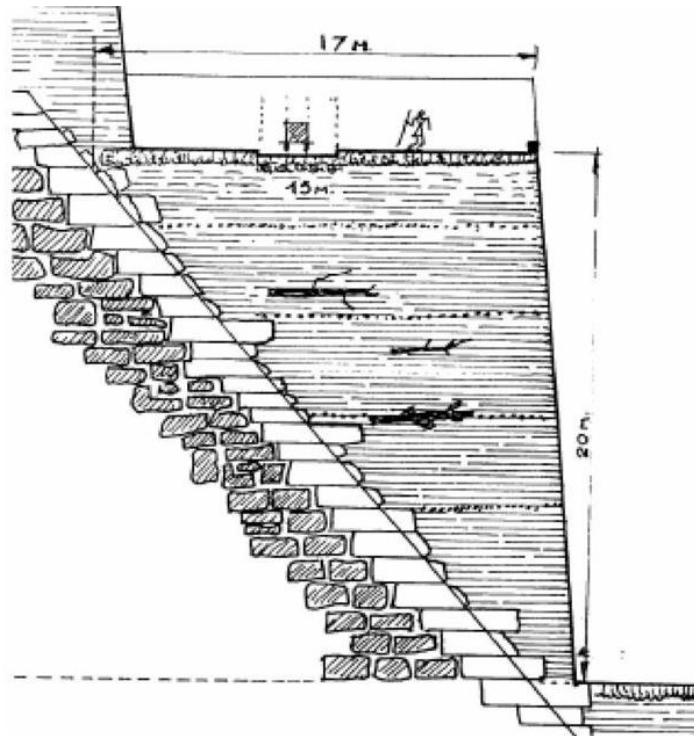


Fig.1.1 Rampes de pyramides

(D'après les bâtisseurs des grandes pyramides, G.Goyon, pygmalion, 1990)

Figure I.16 : Historique sur le renforcement des sols

Au début de 20ème siècle, la technique de renforcement des sols a été développée, dont les inclusions de poutre, tirants, ancrés en bois ou en métal et grillage ont été employés.

Depuis 1965, cette technique a été le sujet de nombreuses évolutions en France, les efforts se sont concentrés sur le développement et l'optimisation des éléments de renforcements dans des formes et matériaux divers. En effet plusieurs travaux de recherches expérimentales et théoriques ont été entrepris dans les laboratoires et les universités pour atteindre une meilleure compréhension de la conduite de la terre armée.

En 1966, au cours d'une conférence, l'inventeur de la terre armée Henri Vidal, a présenté pour la première fois ce nouveau matériau, devant le Comité Français de Mécanique des sols.

A cette occasion, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, a pris connaissance de cette technique et des possibilités qu'elle pouvait offrir pour la solution de problèmes difficiles, la construction des remblais de grande hauteur sur des pentes naturelles instables a été propagée.

En 1972, Cette procédure est généralisée dans le monde entier. Des ouvrages ont été construits dans trente-deux pays, et il existe actuellement plusieurs spécifications d'organisme.

De 1978 jusqu'à l'an 2000, le nombre d'ouvrages construits dans le monde, dont un peu moins de la moitié est réalisé en France, concorde à 1 500 000 m² de surface des parements.

La plus part de ces ouvrages sont des murs de soutènement et des culées de pont. La figure 1.2 illustre une vue d'un mur en terre armée.

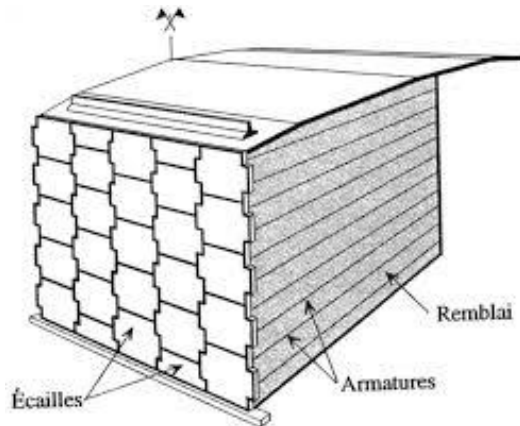


Figure I.17 : Vue d'un mur d'un Soutènement en terre armée

I.5.2. Principe de renforcement des sols

Le principe de l'amélioration du sol se décline en trois méthodes différentes. La première se fait par inclusions de souples composants comme les graviers pour obtenir un sol élastique qui résiste au cisaillement. Ainsi, cette technique a pour objectif de garantir une meilleure portance. Pour information, plus la compressibilité est réduite, plus la consolidation des sols est rapide et le coefficient de sécurité par rapport à la liquéfaction est augmenté.

La seconde méthode consiste à améliorer la consistance du sol, en utilisant les méthodes de vibro-compactage et d'apport hydraulique pour que l'effet désiré se produise. Elles permettent également d'accroître les propriétés mécaniques du sol en influençant ses propriétés d'origine.

La dernière technique est réalisée par les inclusions rigides nommées les Colonnes à Module Mixte. Cette technique est réalisée essentiellement par du mortier ou du béton. Généralement, elles n'améliorent pas la particularité du sol en place, mais permettent son renforcement en réduisant les charges exercées sur ce dernier. Le poids sera donc transféré en profondeur sur un horizon porteur par une concentration de celui-ci directement en tête et par frottement le long du fût. L'objectif de cette méthode n'est pas du tout de donner une résistance au sol.

I.5.3. Objectifs de renforcement des sols

On fait le renforcement des sols pour les objectifs suivants :

- Permettre le percement d'un tunnel dans un terrain difficile.
- Accélérer la consolidation d'un dépôt d'argile.
- Contrôler les infiltrations d'eau autour d'un ouvrage.
- Diminuer le potentiel de déformation volumique des sols.
- Homogénéiser les sols pour réduire le risque de tassement différentiel.
- Effectuer des travaux de reprise en sous-œuvre.
- Stabiliser un remblai nouvellement mis en place.
- Augmenter la résistance du sol afin d'améliorer sa capacité portante.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE (GENERALITES SUR LES SOLS)

- Assurer la stabilité temporaire des travaux d'excavation sans recours aux systèmes d'étaïonnement conventionnels.
- Arrêter le mouvement d'une pente instable pour permettre des travaux.
- Diminuer la compressibilité des sols en place.
- Diminuer la perméabilité des sols.

I.5.4. Renforcement de sol par géo-synthétiques

I.5.4.1. Avantage de l'utilisation de géo-synthétique pour le Renforcement

- Réduction de l'interpénétration des matériaux d'apport avec les sols en place et Diminution des mouvements de terre.
- Réduction du mélange indésirable des terres et diminution des exigences de Transfert de matériau.
- Modification des structures routières et ferroviaires pour en augmenter les Capacités.
- Diminution des emprises.
- Création de merlons antibruit d'aspect naturel.
- Réduction des délais de construction (possibilité de travailler pendant la période Hivernale).
- Augmentation de la sécurité et de la stabilité des remblais.
- Préservation de l'aspect naturel du paysage.
- Optimisation des coûts de construction.
- Amélioration des caractéristiques mécaniques des sols.

I.6. Conclusion

Il a été entrepris dans ce chapitre quelques notions générales sur les sols particulièrement les argiles.

- ✓ Les principaux problèmes des sols instables et les différentes techniques d'amélioration et renforcement des sols.
- ✓ Finalement des notions sur la chaux et géotextile deux ajouts utilisés dans ce mémoire pour voir leur influence sur les sols argileux.

CHAPITRE II

Caractérisation et traitement du sol argileux

Partie 1

II. INTRODUCTION :

La reconnaissance des caractéristiques géotechniques d'un sol passe par un certain nombre d'essais au laboratoire.

Ce chapitre a pour but de présenter dans son ensemble notre démarche expérimentale ainsi que les moyens mis en œuvre et les protocoles développés pour atteindre les 2objectifs de ce travail, à savoir évaluer les propriétés mécaniques du sol utilisé en fonction des différents paramètres d'identification géotechniques du sol rencontré (classification, granulométrie, teneur en eau et poids volumiquesetc.).

L'étude expérimentale a été réalisée au sein du laboratoire des travaux publics de l'Est de Annaba.



Figure II.1 : Échantillon type du sol à étudier

II.1 MATERIAUX UTILISE

II.1.1. L'argile

- **Origine**

Le sol a été extrait à une profondeur d'environ 2m à 3m situé dans la Daïra d'Annaba, les prélèvements d'échantillons effectués par une pelle mécanique. Après l'extraction, le sol a été

CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

placé dans des sachets en plastique et transporté au laboratoire pour préparation et exécution des essais géotechniques d'identification et de caractérisation. Sa classification a été déterminée selon les normes.



Figure II.2 :L'origine de l'argile

CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

Tableau II.1. Localisation de Bouzzaaroura

Lieu	Commune	Daira	Wilaya
Bouzzaaroura	EL bouni	El bouni	Annaba

Tableau II.2. Propriétés des argiles.

Limites de liquidité (%)	34
Indice de plasticité (%)	14
Limites de plasticité (%)	20
Teneur en eau (%)	25.04
Cohésion (bars)	0.393
Angle de frottement (o)	29

II.2 IDENTIFICATION ET CLASSIFICATION DES MATERIAUX

UTILISES :

Dans ce chapitre les différents matériaux utilisés lors de ce travail ont été identifiés et caractérisés par une série d'essais géotechniques, qui peuvent être divisés en :

- 1- Caractérisation mécanique
 1. Proctor.
 2. Essai de Cisaillement rectiligne.
 3. Essai Oedométrique.
 4. CBR
 5. Compression simple.
- 2- Caractérisation physique
 1. La teneur en eau
 2. Analyse granulométrique.

3. Limites d'Atterberg.

3- Caractérisation chimique

1. Essai au bleu de méthylène

II.2.1. Caractérisation physique

II.2.1.1. Teneur en eau (NF P 94-050)

- Définition

La teneur en eau est un paramètre d'état qui permet d'approcher certaines caractéristiques mécaniques et d'apprécier la consistance d'un sol fin.

C'est une grandeur physique définie théoriquement comme étant le rapport du poids de la matière sèche, Ce paramètre est noté (w) et exprimé en pourcentage.

- But de l'essai

Le but de cet essai est la détermination au laboratoire des différentes densités afin de caractériser un sol pour prévoir son comportement.

- Principe de l'essai

L'objectif de cet essai est la détermination de la teneur en eau d'un sol, cette dernière se fait au laboratoire, afin de prévoir le comportement du sol. Elle est déterminée lorsque les conditions de prélèvement sur site, ainsi que pendant le transport et lors de la conservation de l'échantillon n'ont entraîné aucune modification de celle.-ci.

- Appareillage utilisé

- Une balance électronique précise et fiable.
- Une étuve électrique.
- Des tares.



Figure II.3 : Détermination de la teneur en eau.

- **Mode opératoire**
 - Prendre trois tares et on les pèse vide.
 - Peser les échantillons avec les tares.
 - Noter le poids humide.
 - Mettre l'échantillon à l'étuve.

➤ Après étuvage :

Noter le poids sec de l'échantillon.

La différence entre le poids humide et le poids sec donne le poids de l'eau.

➤ Puis nous distinguons :

La teneur en eau gravimétrique : utilisée en géotechnique et définie par :

$$W = \frac{M_w}{M_s} \times 100$$

M_s : la masse sèche mesurée après le passage à l'étuve.

M_w : la masse de l'eau dans l'échantillon.

- **Résultats obtenus :**

Tableau II.3. Résultat de la teneur en eau.

Paramètres Echantillons	M_{tare} (g)	M_h (g)	M_s (g)	W (%)	Moyenne (W%)
1	48.7	469.2	370.9	26.5	25.04
2	45.8	410.1	325.2	26.10	
3	42.2	398.1	324.9	22.13	

$$M_h - M_s = M_e \rightarrow \frac{M_e}{M_s} \cdot 100 = w \%$$

$$\text{Moyenne (W\%)} = \frac{w_1 + w_2 + w_3}{3}$$

La teneur en eau du sol étudiée est :

$$W = 25.04\%$$

II.2.1.2 Analyse granulométrique

- **Définition**

CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

L'analyse granulométrique est une étape fondamentale pour la classification d'un sol. Elle a pour but de déterminer les proportions de grains de différentes tailles dans le sol.

L'analyse granulométrique s'obtient par deux opérations successives et complémentaires

Le tamisage sous l'eau (par voie humide) pour les particules de dimensions $\geq 80\mu\text{m}$ (0.08mm), l'essai est effectué selon la norme NF P94-056.

La sedimentometrie pour les particules de dimensions $< 80\mu\text{m}$ qui complète la première, elle est effectuée selon la norme (NF P94-056).

Le principe de cet essai est fondé sur la loi de Stokes ou la vitesse de sédimentation des particules en suspension dans un milieu dépend de leurs diamètres.

- **Principe de l'essai**

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série des tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

- **Appareillage**

- Série de tamis.
- Pinceau.
- Récipient.
- Balance.
- Des cylindres de sédimentation.



Figure II.4 : Une série de tamis.

- **Mode opératoire :**

CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

- Détermination de la masse sèche de l'échantillon (24h étuvage à 105°C).
- Diviser en une ou plusieurs fois, la totalité du matériau à analyser sur une colonne de tamis d'ouvertures croissantes de bas en haut et procéder au lavage.
- Séparer par brassage manuel combiné à un arrosage afin d'éliminer les particules fines et commencer à constater les masses de refus sur les mailles larges (ouvertures avec grand diamètre)
- malgré le brassage et le brossage, des particules fines adhèrent aux grains, un trempage est nécessaire.
- Verser le contenu de chaque tamis dans un récipient.
- Placer les récipients dans l'étuve, de façon à ce que deux pesées successives ne varient pas de plus de 2/1000.
- Peser le récipient contenant le refus sur le tamis de la plus grande ouverture, puis Peser le refus cumulés successifs R.

On appelle :

Refus sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.

Tamisât (ou passant) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

- **Les résultats obtenus :**

Tableau II.4. Résultat de l'analyse granulométrie.

Tamis	5	2	1	0.4	0.2	0.08
Refus cumulés (%)	0.21	1.16	1.51	2.05	2.91	8.93
passant (%)	99.78	98.84	98.48	97.95	97.08	91.06

II.2.1.3.L'essai de sédimentométrie

- **Le but de l'essai**

L'analyse granulométrique d'un sol par la méthode de sédimentation a pour objet de déterminer la distribution pondérale de la taille des particules d'un sol fin. Cet essai s'applique sur les particules passant au travers d'un tamis maille carré de 0.080 μm ,

CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

cependant les particules d'une taille inférieure à $0.001 \mu\text{m}$ ne peuvent être différenciées, par cet essai.

- **Principe**

L'essai ne se fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des grains fins à très fins est fonction de leurs dimensions. La loi de Stokes donne, dans le cas des grains sphériques de même masse volumique, la relation entre le diamètre et leur vitesse de sédimentation. Par convention, cette loi est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer les diamètres équivalent des particules.

- **Appareillage**

- 80g de sol (l'échantillon doit être passé par le tamis $0.08 \mu\text{m}$).
- Bicher.
- Éprouvette.
- Densimètre.
- Chronomètre.
- Thermomètre.
- Eau distillée.
- Solution d'EXAMITAPHOSPHATE.
- Malaxeur.



Figure II.5 : malaxeur

- **Mode opératoire**

- Mettre la quantité de sol dans le bicher.
- Ajouter 60 ml solution d'EXAMITAPHOSPHATE.
- Ajouter l'eau distillée jusqu'à la référence 500 ml.
- Après 24h, verser le mélange dans une éprouvette et ajouter l'eau distillée jusqu'à la référence 1400 ml.

CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

- la lecture de la densité et de la température se font d'après le densimètre et le chronomètre, puis, il est préférable de laisser la dernière lecture 24h après l'essai.

- La préparation de l'essai



Figure II.6 : préparation de l'essai

CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

Tableau II.5 : Présentation des résultats

Temps de lecture	Lecture densimètre	Température	Correction température	Lecture corrigée	Passant de l'échantillon(%)	Diamètre équivalent
	R	T °C	Ct	Rc	P	D(mm)
30	1.026	23	-0.0015	1.025	90.25	0.061752
60	1.025	23	-0.0015	1.024	86.639	0.043665
120	1.024	23	-0.0015	1.023	83.029	0.030876
300	10.23	23	-0.0015	1.022	79.419	0.020461
600	1.022	23	-0.0015	1.155	55.955	0.014486
1200	1.015	22	-0.0015	1.014	50.540	0.010732
2400	1.014	22	-0.0015	1.013	46.930	0.007638
4800	1.012	22	-0.0015	1.011	39.710	0.00547
14400	1.011	22	-0.0015	1.01	36.100	0.003178
86400	1.007	23	-0.0015	1.006	21.660	0.001329

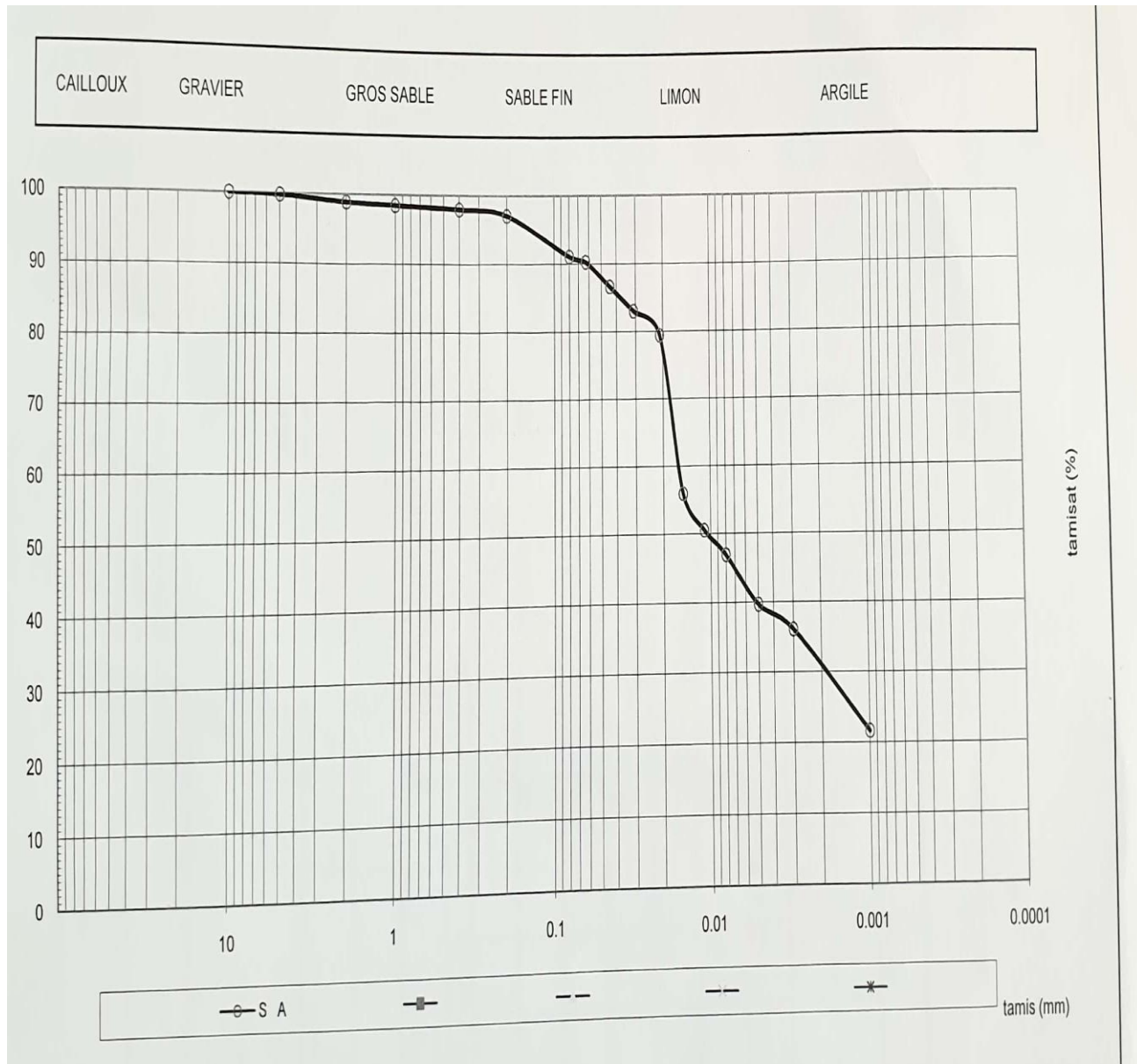


Figure II.7 : La courbe de granulométrie

- **Interprétation des résultats :**

- Le pourcentage des éléments passant à travers le tamis (80 μ m) est de 91.06 % supérieur à 50% indique que **le sol est fin**.
- La courbe granulométrique est étalée et continue.

II.2.2.4.Limite d'Atterberg (NF P94-051)

- **Définition**

Les limites d'atterberg sont des essais qui permettent de définir des indicateurs qualifiant la plasticité d'un sol, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau.

- **But de l'essai**

Le but de ces tests est de déterminer les limites de consistance qui sont exprimées en termes de teneur en eau marquant les limites entre état solide, plastique, et liquide. Il est important de noter que ces tests ne s'appliquent que pour les sols fins, définis comme ayant des grains de diamètres inférieurs à 0.06 [mm].

- **Appareillage**

Le matériel nécessaire à la préparation du sol est distingué du matériel utilisé.

1- Matériel pour la préparation du sol

- Un récipient.
- Un bac de dimension minimales en centimètres 30x20x8.
- Un tamis à maile de 400 μm d'ouverture.

2- Matériel pour la détermination de la limite de liquidité

Un appareil de casagrande, se compose :

- D'un socle.
- D'un support métallique.
- D'une coupelle : la surface interne de la coupelle est (soit lisse, soit rugueuse).
- D'un outil à rainurer.
- D'une cale de 10 mm d'épaisseur.
- Une étuve dessiccation.
- Une balance.
- Des capsules ou boites de pétri, spatules, truelles.



Figure II.8 : Matériel utilisé dans l'essai de Limites d'Atterberg

- **Préparation du sol**

- Après échantillonnage du sol et homogénéisation par brassage, une masse de matériau (m) est mise à imbiber dans un récipient d'eau à la température ambiante, pendant 24 h.
- Cette masse m, exprimée en grammes, doit être supérieure à 200 fois la dimension des plus gros éléments de sol.
- Une fois imbibé, le matériau est tamisé par voie humide au tamis de 400 μm .
- Après une durée de décantation d'au moins 12 h, l'eau claire du bac est siphonnée sans entrainer de particules solides.
- L'eau excédentaire est évaporée à une température ne dépassant pas 50 C
- La totalité du tamisât est malaxée afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide.

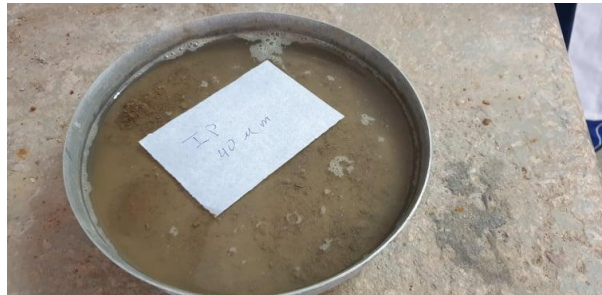


Figure II.9 : Préparation de L'échantillon.

- **Mode opératoire**

- a)- **Détermination de la limite de liquidité**

On utilise la coupelle de Casagrande. Pour réaliser ce test il faut :

- 1- Humidifier l'échantillon de sol fin et l'homogénéiser.
- 2- Etaler l'échantillon dans le bol, de manière à avoir une épaisseur à peu près constante, de 1cm avec une surface horizontale.
- 3- Appliquer une rainure au milieu, séparant l'échantillon en deux parties distinctes et égales, de manière à voir le fond du bol.
- 4- Tourner la manivelle en comptant le nombre de fois que le bol s'est élevé puis rabattu jusqu'à ce que la fente se referme.
- 5- Prendre un peu de l'échantillon où la fente se referme, le peser, et calculer sa teneur en eau.

- b)- **Détermination de la limite de plasticité**

- 1- Prendre un échantillon séché du sol fin.
- 2- Y ajouter un peu d'eau.
- 3- Former trois fils de 3 mm de diamètre et de 10 cm de longueur sur le modèle d'une petite barre de fer.
- 4- Rouler les fils sur une planche de bois, servant à l'assécher au fur et à mesure, jusqu'à l'apparition des premières fissures. Les rétrécir si nécessaire pour maintenir la même longueur de 10cm.
- 5- Récupérer l'échantillon, le peser, et calculer sa teneur en eau.



Figure II.10 : Détermination la Limite de Plasticité.

Tableau II.6.Détermination de la plasticité des sols vis-à-vis de l'indice de plasticité IP

IP	Degré de plasticité
$0 < IP < 5$	Non plastique
$5 < IP < 15$	Moyennement plastique
$15 < IP < 40$	Plastique
$40 < IP$	Très plastique

Tableau II.7.Détermination du potentiel de gonflement des sols vis-à-vis de l'indice de plasticité.

IP %	Potentiel de gonflement
0-15 %	Faible
10-25 %	Moyen
25-55 %	Elevé
> 55 %	Très élevé

CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

Tableau II.8.Détermination de l'indice de consistance des sols vis-à-vis de l'indice de plasticité IP.

IC	L'indice de consistance
0 %	Liquide
0.25%	Très molle
0.5%	Molle
0.85%	Mi-consistante
1%	Consistante
1<	Très consistante

Tableau II.9 : tableau de limite de liquidité

N° essai	1 ^{er} Essai		2 ^{eme} Essai		3 ^{eme} Essai	
Nombre de coups	16		23		30	
N° de la tare	T 408	SB	ABE	Vy	MA	MS
Masse de l'ensemble (échantillon humide+Tare) m_2	29.60	24.80	24.86	25.73	24.4	23.49
Tare m_1	21.90	16.40	16.48	17.80	16.70	15.88
Masse de l'échantillon humide $m = m_2 - m_1$ (g)	7.70	8.40	8.2	7.93	7.74	7.61
Masse de l'échantillon sec $m_w = m_2 - m_3$	5.70	6.20	6.10	5.90	5.80	5.70
Masse de l'eau	2.0	2.20	2.10	2.03	1.94	1.91
Teneur en eau	35.09	35.48	34.43	34.41	33.45	33.50
Moyenne	35.29		34.42		33.48	

Tableau II.10 Tableau de limite de plasticité

Nombre des essais	Essai 1	Essai 2
R	SA	SB
Masse de l'ensemble (échantillon humide +Tare) m_2	19.08	18.28
Tare m_1	16.76	15.90
Masse de l'échantillon humide $m = m_2 - m_1$ (g)	232	238
Masse de l'échantillon sec $m_w = m_2 - m_3$	1.93	1.98
Masse de l'eau	0.39	0.40
Teneur en eau	20.20	20.21
Moyenne	20.20 20.00	

- **Résultats**

Les limites d'Atterberg ont été effectuées à partir d'un échantillon du sol et les résultats sont les suivantes :

Tableau II.11.Résultat de limite d'atterberg

Paramètres	WL(%)	WP(%)	Ip(%)
Argile	34	20	14

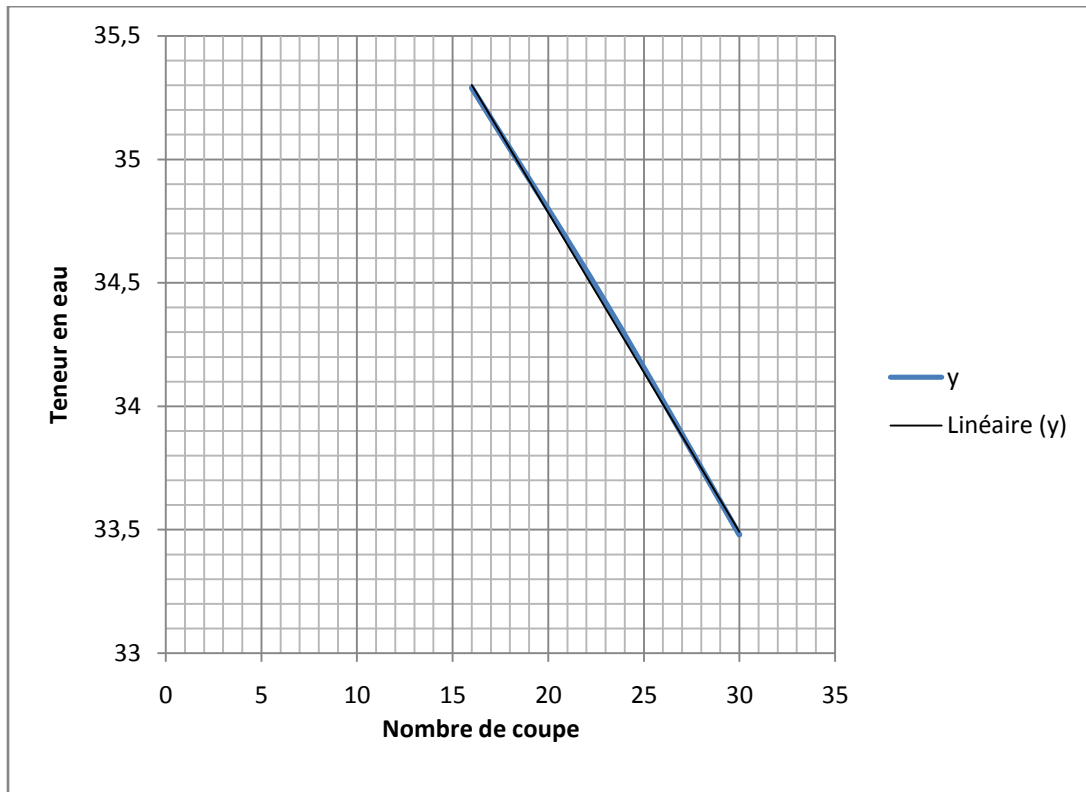


Figure II.11 : Courbe de limite d'atterberg

L'indice de plasticité:

$$I_p = W_l - W_p = 14$$

Interprétation des résultats

- L'indice de plasticité du sol est égal à 14 %.
- $5 < I_p < 15$ c'est ce qui indique que le sol est reconstitué, de classement moyennement plastique, de gonflements faible à moyen.

II.2.2 Caractérisation mécanique

II.2.2.1.L'essai Proctor (NF P94-093)

- **Introduction**

Le « compactage » est le procédé le plus économique toujours utilisé dans la construction des remblais pour améliorer la densité sèche du sol (γ_d).

Le « compactage » est une réduction pratiquement instantanée du volume du sol dû à la réduction des vides (air). Il n'y a aucune expulsion d'eau ce qui différencie le compactage de la consolidation.

L'étude du compactage s'effectue à l'aide d'un tamis normalisé connu sous le nom de « l'essai Proctor ».

- **But de l'essai**

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale (w) pour un sol de remblai donnée à laquelle il doit être compacté pour obtenir la densité sèche maximum (γ_d) et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale.

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir des essais dits : Essai Proctor normal.

- **Principe de l'essai**

L'essai Proctor consiste à mesurer le poids volumique d'un sol (argile), qui est disposé en trois couches dans un moule Proctor de volume connu, dans chaque couche étant compacté avec la dame Proctor, l'essai est répété plusieurs fois en variant à chaque fois la teneur en eau (12%, 14%, 16% et 18%...24%) et on fixe l'énergie de compactage (3×25).

- **Appareillage**

- Dame Proctor normal.
- Moule Proctor avec embase et hausse.
- Règle à araser.
- Disque d'espacement.
- Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau.
- Tamis 5 et 20 mm (contrôle et écrêtage le cas échéant de l'échantillon).
- Truelle, spatule, pinceau, etc...
- Eprouvette graduée et burette d'eau pour humidifier le sol.
- Petits récipients (mesures des teneurs en eau).
- Etuve.
- Balance de portée supérieure à 6 kg.
- Balance de précision 200 g, précision $\pm 0,1$ g.



Figure II.12 : Appareillage nécessaire pour l'essai Proctor.

- **Mode opératoire**

- Préparer le matériau d'abord.
- Assembler moule + embase + disque de papier au fond du moule (facilite le démoulage) ; puis peser l'ensemble.
- Introduire la 1er couche et la compacter, placer le moule sur un socle en béton d'au moins 100kg, ou sur un plancher en béton de 25 cm d'épaisseur, pour que l'ensemble de l'énergie appliquée le soit à l'échantillon.
- Recommencer l'opération pour chaque couche (3 pour un compactage normal).
- Après compactage de la dernière couche, enlever la rehausse. Le sol compacté doit dépasser le moule de 1 cm environ .si non recommencer l'essai.
- Araser soigneusement à partir du centre ; on veillera au cours de l'écrasement à ne pas créer de trous sur la surface arasée.
- Peser l'ensemble juste arasé.
- Enlever l'embase et prélever 2 prises sur l'échantillon, l'une en haut et l'autre en bas, déterminer la teneur en eau w et on prendra la moyenne des deux valeurs obtenues.
- Augmenter de 2% la teneur en eau w de votre échantillon de départ et recommencer 5 à 6 fois l'essai ; après avoir à chaque fois bien nettoyer votre moule.

- **Présentation des résultats**

- Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du matériau et l'on trace la courbe des variations de cette masse en

CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

fonction de la teneur en eau. Chaque point tracé sur la courbe représente un essai de compactage. La détermination complète de la courbe requiert généralement 5 points.

Tableau II.12 : paramètres du proctor

Paramètre	12%	14%	16%	18%	20%
Volume d'eau (ml)	300	350	400	450	500
Poids de sol (g)	2500	2500	2500	2500	2500
Poids de moule vide (g)	1734.3	1734.3	1734.3	1734.3	1734.3
Poids de moule + sol (g)	3523.1	3617.3	3656	3658.7	3649
Poids de l'éprouvette (g)	1789.1	1848.1	1922.6	1924	1914.7
Volume (m ³)	955	955	955	955	955

Tableau II.13. Résultat de Proctor

Paramètre	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Pourcentage d'eau (%)	12	14	16	18	20
W (%)	12.94	16.66	17.51	19.06	19.88
γ_d sèche (t/m ³)	1.67	1.72	1.73	1.70	1.68

- **Résultat obtenu**

L'optimum Proctor normal est égal : 16(%) d'eau.

Avec :

$$W = 16.93(\%)$$

$$\gamma_d(\text{seche}) = 1.73(\text{t/m}^3)$$

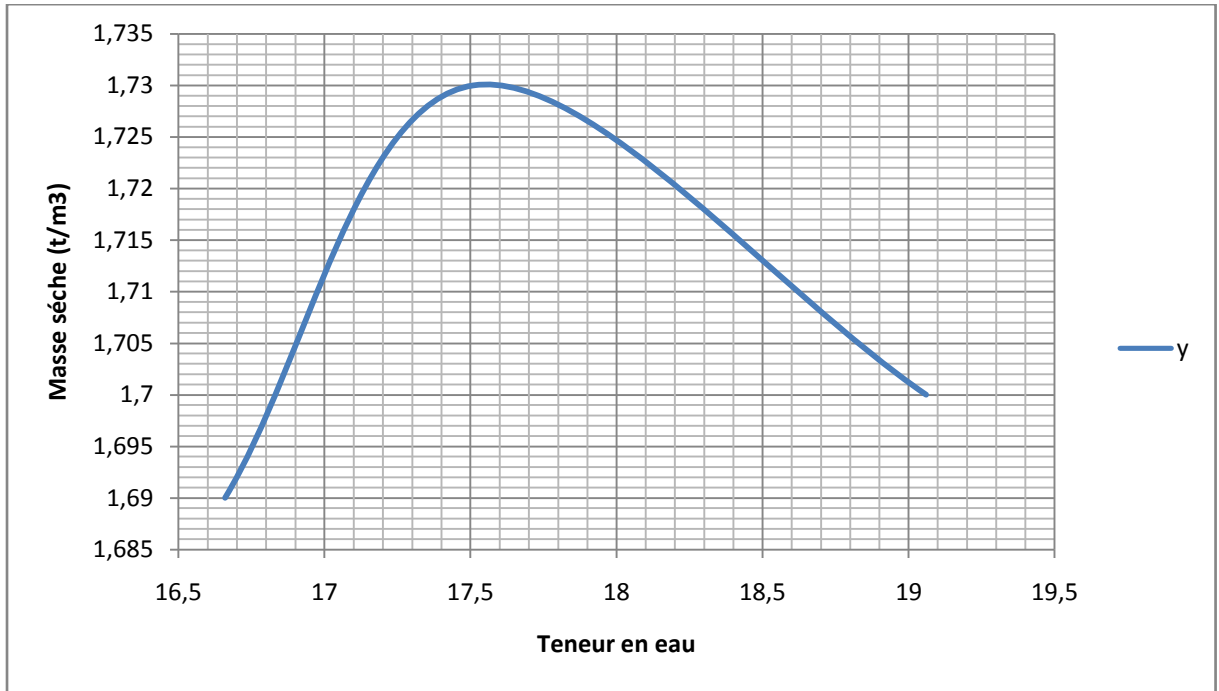


Figure II.13 : Courbe de Proctor

- **Interprétation des résultats**

La courbe $\gamma_d = f(W)$ permet d'apprécier le comportement au compactage du matériau en fonction de la teneur en eau. Notre sol a une teneur en eau optimum de 16.93(%) et une masse sèche à l'optimum de 1.73 (t/m^3).

II.2.2.2.Essai CBR (NF P 94-078)

- **Introduction**

Cet essai est utilisé partout dans le monde pour déterminer l'épaisseur des couches de fondation, établir une classification des sols et permettre d'étudier la traficabilité. Il peut être réalisé soit en laboratoire, soit in-situ. Cependant cette dernière option n'est pas souvent réalisée. Il nous donne un des paramètres indispensables dans les essais géotechniques précédant la construction. Il y a différents types d'essais CBR à réaliser en fonction du type et de la qualité du sol. La norme qui définit cet essai porte la référence NF P 94-078

- **But de l'essai**

L'essai permet de déterminer la capacité de portance d'un sol compacté, en estimant sa résistance au poinçonnement, en fonction de son état, sa densité et son humidité, ainsi que les charges appliquées. Il mesure la résistance à l'effort tranchant d'un sol sous conditions d'humidité et de densité contrôlées et du niveau de compactage variable, en permettant d'obtenir un pourcentage du rapport de portance.

Cet essai CBR est utilisé pour le dimensionnement des structures des chaussées et l'orientation des travaux de terrassements.

- **Domaine d'application du CBR**

Géotechnique routière – dimensionnement de chaussées

- **Principe de l'essai**

Au cours de cet essai, le matériau est poinçonné par un piston de 19,3 (cm²) de section enfoncée à la vitesse constante de 1,27(mm/min).

Les particulières des deux forces ayant provoquées les enfoncements de 2,5 et 5 (mm) sont alors rapportées aux valeurs 13,35 et 19.93 (kN) qui sont les forces observées dans les mêmes conditions sur un matériau de références.

- **Appareillage**

- Moules standard CBR.
- Disques d'espacement.
- Dame Proctor modifié.
- Piston cylindrique.
- Presse hydraulique pouvant assurer une vitesse de poinçonnement.
- Pelle à main, truelles, mains métalliques, pinceau.
- Eprouvette graduées par la mesure de la quantité d'eau d'humidification.
- Chronomètre.

- **Mode opératoire**

- Préparer le matériau à une teneur en eau égale à W, le pulvériser en brisant les mottes mais en prenant soin de ne pas briser les graviers et pierres éventuelles
- Moule CBR dame lourde, 5 couches, 56 coups par couche
- Araser le moule et déterminer la teneur en eau de la partie ainsi enlevée.
- Enlever la plaque de base et le disque d'espacement puis retourner le moule, pour fixer sur la plaque de base l'extrémité qui était en haut, en interposant une feuille de papier filtre.
- Le but de l'opération (mesure de gonflement) et de placer le sol dans les plus mauvaises conditions hygrométrique qu'il est susceptible de rencontrer dans la pratique.

- **Poinçonnement**

- Le moule est placé sur le plateau de la presse et centré de telle façon que le piston de poinçonnement soit bien dans le prolongement de l'axe du moule.
- La tête du piston est amenée en contact avec la surface de l'échantillon en faisant monter le plateau de la presse. remettre alors les surcharges annulaires. La mise en place du piston de poinçonnement est achevée en manœuvrant lentement le volant de

CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

la presse jusqu'au moment où l'aiguille du comparateur de l'anneau dynamométrie commence à bouger. A ce moment le piston est bien en contact avec la surface de l'échantillon.

- fixer alors un comparateur au 1/100 de millimètre derrière le cadran de l'indicateur, de cadence – comparateur qui est mobile sur le long d'une tige verticale solidaire du bâti de la presse, qui est fixé de telle façon que la pointe du palpeur du comparateur vienne reposer sur le bord du moule. Le comparateur est amené à zéro, puis l'indicateur de la cadence mis en marche.
- L'opérateur se met alors au volant de la presse et commence le poinçonnement au moment où le rayon repère de l'indicateur de cadence vient se superposer à l'aiguille du comparateur, il manœuvre lentement le volant de façon à maintenir en coïncidence l'aiguille du comparateur et le rayon repère. En procédant de cette façon le poinçonnement s'effectue avec la vitesse constante normalisée (soit 1,27mm / minute).
- Au cours de l'essai on note les pressions lues sur l'anneau dynamométrique qui correspondent aux enfoncements suivants : 1 – 1,5 – 2 – 2,5 – 5 – 7.5 et 10 (mm).



Figure.II.14 : Mode opératoire de CBR

• Résultats obtenus

E(mm)	F(kn)	P(N/mm ²)	I _{CBR}
1.25	0.322	1.66	
2	0.473	2.44	
2.5	0.58	3.00	4.34
5	1.025	5.30	5.14
7.5	1.388	7.17	
10	1.695	8.76	

- **Méthode de calcul :**

$$P = \frac{F}{19.35} * 100$$

$$I_{CBR(2.5)} = \frac{F*100}{13.35}$$

$$I_{CBR(5)} = \frac{F*100}{19.93}$$

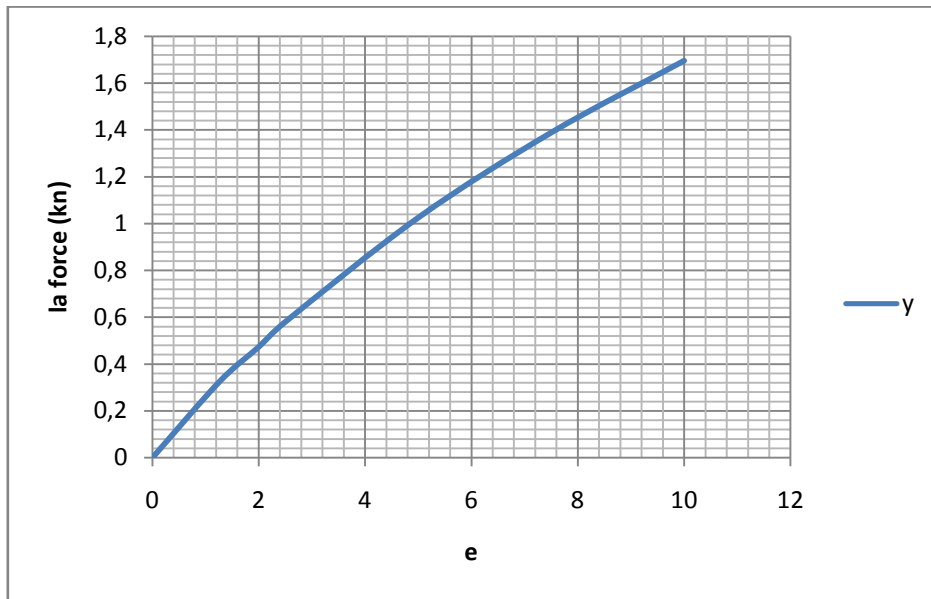


Figure II.15 : La courbe de CBR sol naturel

- **Interprétation des résultats**

L'essai CBR a donné les résultats suivantes : CBR, $I_{CBR(2.5mm)} = 4.34$ et $I_{CBR(5mm)} = 5.14$

II.2.2.3. Essai Oedométrique (XP 94-090-01)

- **Introduction**

Lorsqu'un sol saturé est soumis à une charge, elle est généralement supportée initialement par l'eau interstitielle. L'eau est ensuite chassée suite au gradient de pression qui s'établit. Ainsi, les surpressions interstitielles diminuent alors que les contraintes effectives augmentent et on atteint un nouvel état d'équilibre. La consolidation est le terme qui regroupe l'ensemble de ces phénomènes.

- **But De L'essai**

C'est un essai de compression par paliers et de gonflement à l'œdomètre. L'éprouvette cylindrique est confinée latéralement et en général, soumise à des incréments discrets de chargement ou déchargement axial vertical, le drainage pouvant s'effectuer dans la direction axiale. À partir de cet essai on détermine les caractéristiques suivantes :

- C_c l'indice de compressibilité.
- C_g l'indice de gonflement.
- P_c l'indice de consolidation.
- σ_p la contrainte de pré consolidation du sol.

Cet essai constitue une application directe de la théorie de Terzaghi proposée pour l'étude de la consolidation verticale des sols fins saturés. A partir des résultats de cet essai on procède à l'évaluation de l'amplitude du tassement de consolidation primaire d'une couche de sol compressible ainsi que le temps de consolidation qu'elle nécessite.

• Principe de l'essai

L'essai s'effectue sur une éprouvette de matériaux placée dans une enceinte cylindrique rigide (oedomètre). Un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial vertical, l'éprouvette étant drainée en haut et en bas est maintenue saturée pendant l'essai.

La charge est appliquée par paliers maintenus successivement croissants et décroissants suivant un programme défini. Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge.

• Appareillage

L'appareil spécifique à l'essai oedomètre :

- le bâti permettant d'appliquer les contraintes de chargement sur l'éprouvette.
- La cellule oedométrique.
- Le dispositif d'application de charge.
- Le système de mesurage.

La réalisation de l'essai nécessite en outre l'appareillage courant pour l'extraction des échantillons de leur conteneur, la préparation des éprouvettes et la détermination des teneurs en eau et des masses volumiques des échantillons de sol.



Figure II.16 : Les composants de cellule oedométrique



Figure II.17 : l'appareil œdométrique

- **Mode Opérateur**

- Déformation de la cellule oedométrique sur son bâti de chargement.
- Une mesure de déformation de la cellule est effectuée avec éprouvette témoin métallique placée entre les deux disques drainants, éventuellement recouverts de papier-filtre, en passant par les mêmes paliers de chargement que pour l'essai.
- Afin de déterminer l'amplitude des corrections à prendre en compte. Suivant les cas, cette mesure est effectuée avant ou après l'essai lui-même. Elle reste utilisable pendant un temps maximum de six mois sans modification de matériel.
- Cette mesure de déformation de l'appareillage est nécessaire en présence de sols gonflants et lors d'essais sous des contraintes supérieures à 1.6 MPA.

- **Déroulement de l'essai**

L'essai consiste à soumettre une éprouvette de section transversale à une série de palier de chargement d'intensité constante et à mesurer ; pour chacun des paliers, la variation de hauteur (ΔH) de cette éprouvette au cours du temps.

Le palier de chargement de rang n correspond à une contrainte verticale moyenne $\sigma_v(n)$ sous la charge $N(n)$ appliquée à l'éprouvette

Tableau II.14. Résultat de l'oedomètre.

Paramètre	Cc(%)	Cg(%)	Pc (bars)
Argile	0.088	0.018	0.925

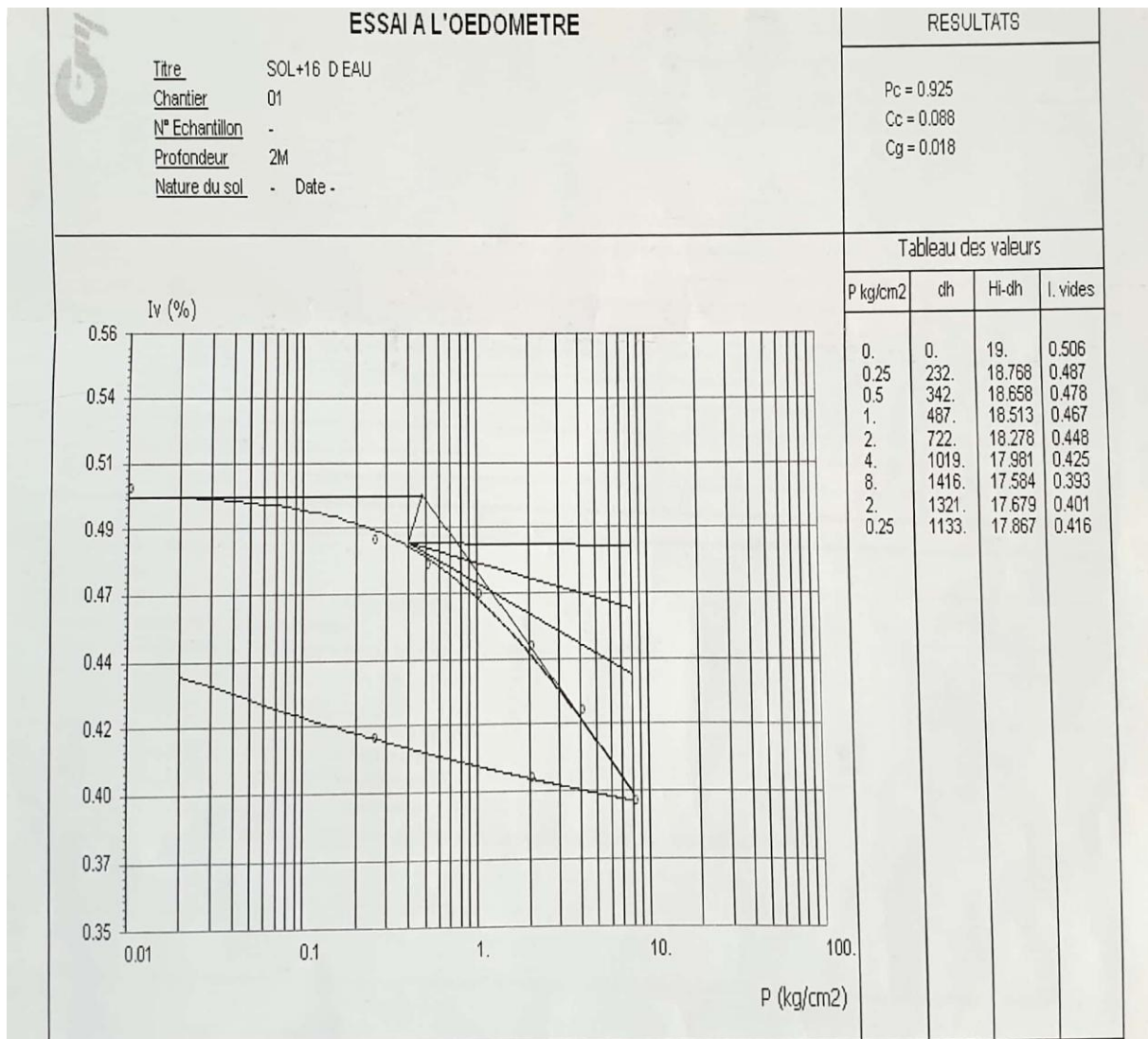


Figure II.18 : La courbe de l'oedomètre

- **Interprétation des résultats**

L'essai oedométrique a donné les résultats de : la pression de pré-consolidation P_c (0.925bars), indice de compression C_c (0.088%), coefficient de gonflement C_g (0.018%).

II.2.2.4.Essai de cisaillement direct (NF P 94-071-1)

Introduction

L'étude de la résistance au cisaillement d'un sol constitue un problème complexe de la mécanique des sols. La résistance au cisaillement dépend du type de sol rencontré, ceci dit qu'il est cohérent ou non, que le matériau est grossier ou fin. Dans la résolution des problèmes de stabilité en mécanique des sols, il est nécessaire de connaître les paramètres de résistance au cisaillement du sol. Ainsi, l'angle de frottement interne et la cohésion interviennent dans les calculs de stabilité des barrages ou des digues par la tangente de l'angle de frottement (notée $\tan \phi$) et par la cohésion effective (notée C) ou non drainée (notée C_u), dans les calculs

de poussée par le coefficient de poussée active de la théorie de Rankine K_a , ou encore dans la justification des fondations superficielles par la contrainte de rupture du sol q_u .

Évaluer expérimentalement précisément les propriétés de résistance au cisaillement des sols constitue un enjeu important en mécanique des sols (Perrot, 1968). En effet, de petites variations sur l'angle de frottement interne et/ou sur la cohésion peuvent induire des dimensionnements sensiblement différents des ouvrages géotechniques, et par exemple, avoir des impacts importants sur les volumes des sols à mettre en œuvre pour la réalisation d'un barrage en terre ou d'une digue. L'appareil expérimental le plus complet et privilégié en mécanique des sols pour évaluer les propriétés de résistance au cisaillement est l'essai triaxial.

- **Principe de l'essai**

Dans l'essai de cisaillement à la boîte, on cherche à provoquer la rupture de l'échantillon suivant un plan imposé. L'échantillon est placé dans une boîte constituée de deux parties qui peuvent glisser horizontalement l'une sur l'autre. On applique à l'échantillon un effort normal de compression N , verticalement, par l'intermédiaire d'un piston et d'un effort tranchant T , horizontalement, en déplaçant la demi-boîte inférieure. Un comparateur mesure la variation de hauteur de l'échantillon.

Plusieurs essais sont effectués en faisant varier la force et puis on trace la courbe intrinsèque.

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans un bâti de cisaillement constitué de deux demi-boîtes indépendantes. L'essai consiste (selon la norme NF P94-071-1).

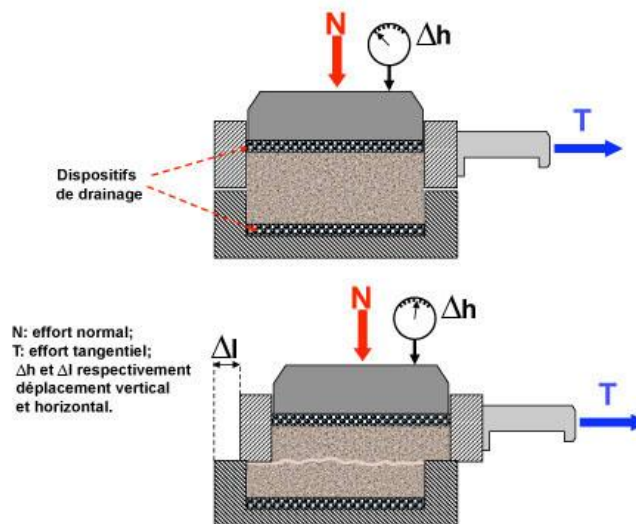


Figure II.19 : Principe de l'essai de cisaillement.

- **Appareillage**

L'appareillage spécifique à l'essai comprend :

- Le bâti.
- La boîte de cisaillement.
- Le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette.
- Le dispositif produisant un déplacement relatif horizontal entre les deux demi- boîtes.
- Un système de mesurage des efforts, des déplacements et du temps.
- Balances de portées maximale et minimale compatibles avec les masses à peser et telles que les pesées sont effectuées avec une incertitude de 1/1000 de la valeur mesurée.
- Une étuve.
- Les outils nécessaires au découpage et à la préparation des éprouvettes.
- Un chronomètre donnant la seconde.



Figure II.20 : Boîte de Cisaillement.

- **Mode opératoire**

Mise en place de l'échantillon

- Assembler les deux demi- boîtes avec 2 goupilles.
- Positionner les stries perpendiculaires au sens de déformation.
- Mettre l'échantillon bien tassé (jusqu'à 3 mm de l'arase supérieure).
- Placer le piston de chargement (positionner les stries perpendiculaires au sens de déformation).

Mise en place dans la boîte

- La demi- boîte inférieure doit être bloquée dans le chariot par des vis de blocage.
- La demi- boîte supérieure est solidaire de l'anneau dynamométrique (un écrou à visser).
- Mettre en place le dispositif de chargement de la boîte.
- Appliquer sur le dispositif prévu la charge désirée (bras de levier avec un rapport de 10).
- Vérifier le bon positionnement des comparateurs (boîte et anneau).

CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

- Enlever les vis de fixation des demi- boîtes.

a) Mise en marche

- ✓ Chronomètre à zéro.
- ✓ Compateur à zéro.
- ✓ Réglage de la vitesse d'essai sur le pupitre de contrôle.
- ✓ Relever seulement les déplacements du compateur de l'anneau toutes les 15 secondes.

b) Fin de l'essai

- ✓ Lorsque la contrainte de cisaillement est devenue constante.
- ✓ Arrêter l'essai en appuyant sur la touche « off » du pupitre de contrôle.
- ✓ Relever la valeur du déplacement de la boîte sur le pupitre de contrôle ainsi que sur le compateur correspondant.

❖ Remettre les vis de fixation de ses deux semi- boîtes, enlever et nettoyer la boîte.



Figure II.21 : préparation et appareil de Cisaillement Direct.

• **Résultats des essais de cisaillement à la boîte**

CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

L'objectif de cette partie expérimentale, en premier, est la détermination des paramètres de cisaillement du sol et qui sont : l'angle de frottement interne φ , la cohésion C et la résistance au cisaillement.

Tableau II.15.Résultats de l'essai de cisaillement.

Contrainte normale (bars)	0.75	1.25	1.75
Contrainte cisaillement (bars)	0.794	1.121	1.35
Angle de frottement	29		
Cohésion	0.393		

CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

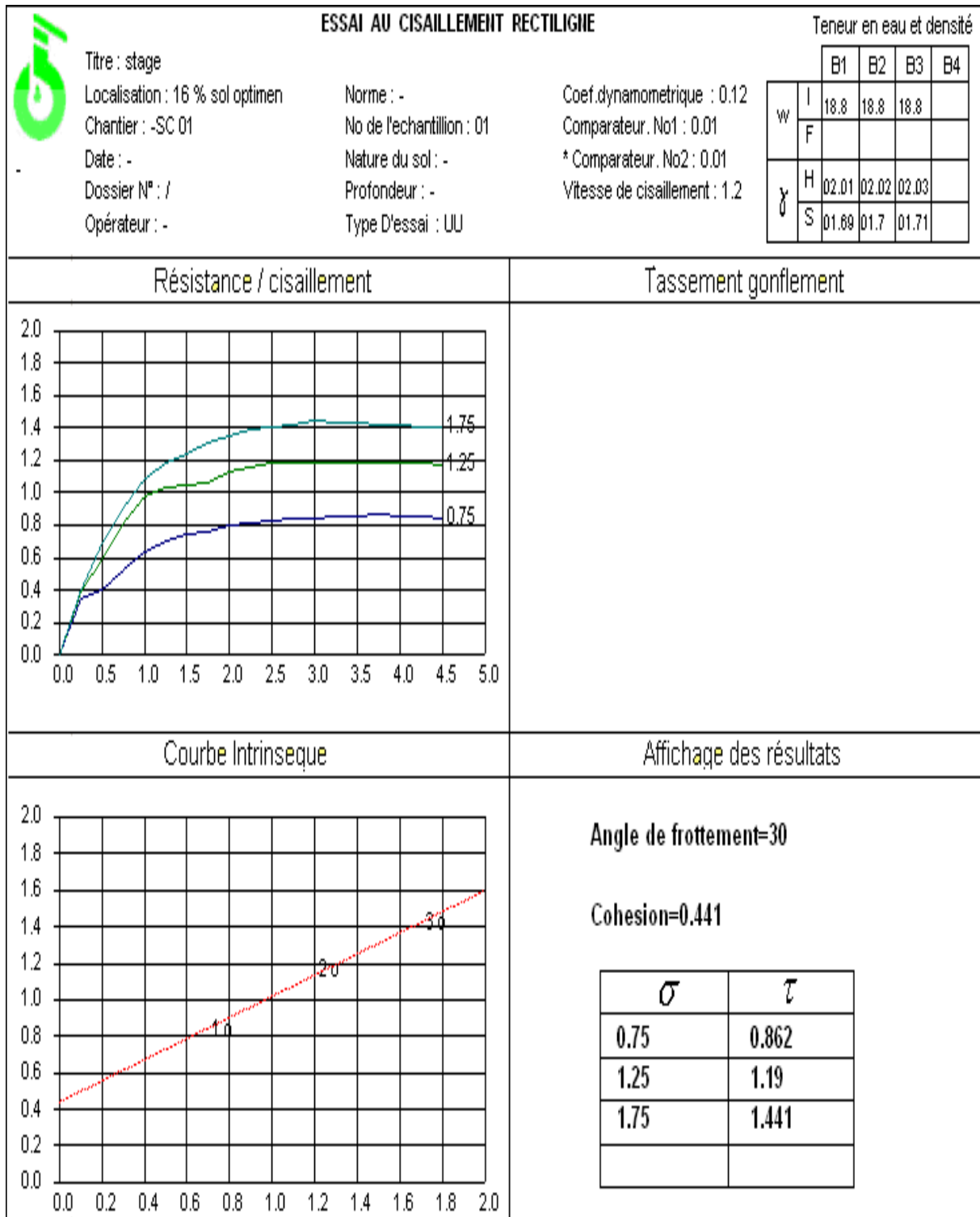


Figure II.22 : La courbe de cisaillement

- Interprétation ces résultats**

L'essai de cisaillement a donné les résultats de 0.393 (bars) cohésion de, et 29° d'angles de frottements.

II.2.2.5. Essai de Compression simple (NF P94-077)

- **Introduction**

Les essais de compression servent à la caractérisation de différentes propriétés de compression, telles le module de compression et la résistance à la compression. Ils sont réalisés sur des matériaux composites avec une organisation unidirectionnelle des fibres, dans une direction de 0° ou dans une direction de 90° , sur stratifiés multidirectionnels, tissés ou non-tissés et matériaux à matrices élaborées à partir de plastiques durcis sables ou thermoplastiques.

- **But de l'essai**

- Déterminer la résistance, et les caractéristiques à partir d'un échantillon sous forme d'éprouvettes.
- A l'âge de 28 jours d'où la détermination du f_{c28}
- A l'âge de 7 jours pour déterminer la résistance donnant une idée sur la résistance qu'il faudra obtenir à 28 jours.

- **Principe de l'essai**

Cet essai consiste à appliquer un effort de compression à un échantillon reposant sur une surface indéformable. Cette sollicitation provoque un écrasement de l'éprouvette.

On mesure simultanément les contraintes et déformations au cours de l'essai.

La norme définit entre autre :

- La contrainte de rupture.
- La contrainte au seuil d'écoulement.
- La déformation à la rupture
- La déformation au seuil d'écoulement.

Pour obtenir des résultats comparatifs en compression il est nécessaire d'employer des éprouvettes de forme, de dimensions et de mode d'obtention identiques, et de les soumettre à des essais dans des conditions bien définies de traitement préalable, de température, d'humidité et de vitesse de mise en charge.

- **Machine d'essai**

La machine d'essai est une presse de force, conforme aux normes NFP 18-411.

Les plateaux ou contre plateaux de la presse doivent avoir des dimensions égales ou légèrement supérieures à celle des faces de l'éprouvette soumise à l'essai.

- **Mode opératoire**

- Préparation et positionnement des éprouvettes :

CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

- Essuyer toute humidité excessive de la surface de l'éprouvette avant de la positionner dans la machine d'essai.
- Tous les plateaux de la machine d'essai doivent être essuyés et toutes particules ou corps étrangers retirés des surfaces de l'éprouvette qui seront en contact avec eux.
- Positionner les éprouvettes de façon que le chargement s'effectue perpendiculairement au sens de coulage.
- Centrer l'éprouvette sur le plateau inférieur avec une précision de 1 % de la dimension nominale pour les éprouvettes cubiques ou du diamètre pour les éprouvettes cylindriques. Avec des machines d'essai à deux colonnes, il convient de placer la surface moulée des éprouvettes cubiques en face de l'un des montants.
- Appliquer la charge d'une manière continue et sans chocs jusqu'à rupture de l'éprouvette, la vitesse de chargement doit être constante pendant toute la durée de l'essai.



Figure II.23 : Déroulement de l'essai

- **Résultat obtenu**

Tableau II.16. Résultat de compression.

Temps (min)	F(KN)	Rc(MPA)	C
1	0.310	0.39	0.19
1.5	0.520	0.66	0.33
2	0.675	0.86	0.43
4(max)	0.982	1.25	0.62

- **Méthode de calcul :**

$$R_c = \frac{F \cdot 100}{S}, \quad C = \frac{R_c}{2}$$

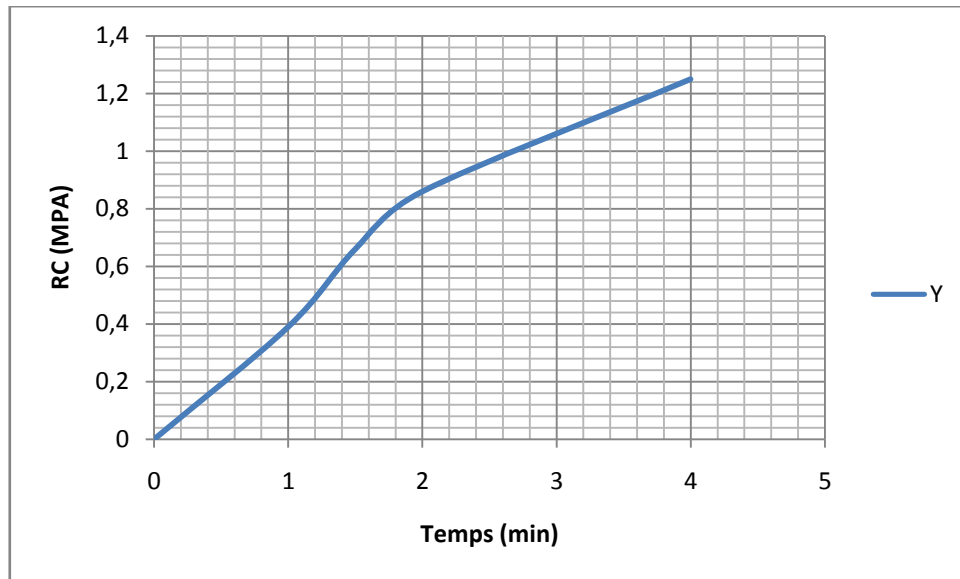


Figure II.24 : Courbe de de la résistance en fonction du temps

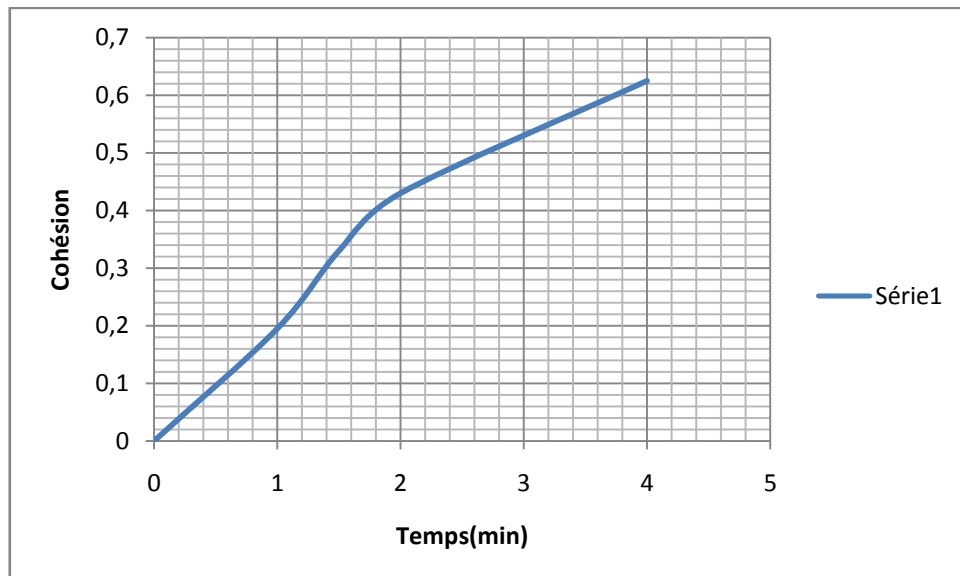


Figure II.25 : courbe de la cohésion en fonction du temps

- **Interprétation des résultats**

L'essai de compression simple dans 4 min (max) a donné 1.25(MPA) de résistance, avec 0.982 (KN) de force, et 0.62 comme cohésion.

II.2.3.Caractérisation chimique

II.2.3.1.Essai au bleu de méthylène

- **Objet de l'essai**

Évaluer la quantité et la qualité de la fraction argileuse, à partir de la surface spécifique.

- **Principe de l'essai**

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur la prise d'essai. Cette valeur est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol, qui est avant tout régie par l'importance et l'activité des minéraux argileux présents dans la fraction fine du sol. Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce fait, on a prélevé une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante se produit à la périphérie de la tâche lorsqu'une auréole bleu clair persistante se produit à la périphérie de la tâche.

- **Appareillage et Matériel d'Essai**

- **Appareillage Spécifique** : Un agitateur à ailettes, Une burette, Une baguette de verre et Un papier filtre.
- **Appareillage d'Usage Courant** : Balance électrique, Chronomètre, Un tamis de 5 mm, Pissette de 500ml, Bécher de verre et Spatule.
- **Produits** : Solution de bleu de méthylène et eau distillée.

- **Mode Opérateur**

- Tamiser l'échantillon à étudié au tamis 5 mm.
- Prélever une masse de 60g.
- Verser l'échantillon dans le bécher et ajouter avec de l'eau distillée jusqu'à 500ml.
- Démarrer l'agitation à 400tr/min jusqu'à 700tr/min pendant 5 min.
- Ajouter 5 cm de bleu de méthylène dans le bécher.
- Effectuez les tests des taches sur papier filtre.

- **Expression des résultats**

Le tableau résume les résultats des essais précédant et les différentes caractéristiques du sol utilisé ainsi que sa classification.

Tableau II.17 : Résultats de l'essai au bleu de méthylène.

Paramètres Sols	V_{BS}
Argile + 05 % V_B	0.16
Argile + 10% V_B	0.33

Argile + 20% V_B	0.66
Argile + 30% V_B	1
Argile + 40% V_B	1.33
Argile + 50% V_B	1.66
Argile + 60% V_B	2
Argile + 70% V_B	2.33
Argile + 80% V_B	2.66
Argile + 90% V_B	3
Argile + 100% V_B	3.33
Argile + 110% V_B	3.66
Argile + 120% V_B	4

Tableau II.18 : Résultat de l'essai au bleu de méthylène.

Masse sèche de la prise d'essai m_0 ($m_0 = \frac{mh1}{1+m}$) (g)	30
Volume de bleu introduit V (cm³)	120
Masse de bleu introduite $B = V \cdot 0.01$ (cm³)	1.2
Volume de bleu $V_{BS} = \frac{B}{m_0} \cdot 100$	4



Figure II.26 : Essai au bleu de méthylène.

- **Interprétation des résultats :**

Tableau II.19 : Classification du sol selon les classes

Classe	Nature de sol
Classe A	sols fins.
Classe B	sols sableux et graveleux avec fines.
Classe C	sols comportant des fines et de gros éléments.
Classe D	sols insensibles à l'eau.

Tableau II.20 : Classification du sol selon le bleu de méthylène :

V_{BS}	Classification
$V_{BS} < 0,1$	Sols sensibles à l'eau
$0,2 \leq V_{BS} < 1,5$	sols sablo limoneux, sensibles à l'eau
$1,5 \leq V_{BS} < 2,5$	sols sablo argileux, peu plastiques.
$2,5 \leq V_{BS} < 6$	Sol limoneux de plasticité moyenne
$6 \leq V_{BS} < 8$	Sol argileux
$V_{BS} > 8$	Sol très argileux

✓ Le sol est de la classe **A₂ : Sol fins argileux, limoneux, de plasticité moyenne**

Partie 2

II. INTRODUCTION

Le traitement des sols est une technique très ancienne et utilisée, dont l'application tant au niveau des travaux de terrassement qu'au niveau de la réfection des routes ainsi que les pistes d'accès connaît actuellement un essor très important au niveau international. Le recours massif à cette technique qui valorise les matériaux en place ce qui entraîne une diminution notable des coûts qui est dû principalement à la raréfaction des glissements naturels des matériaux de bonne qualité.

Le souci écologique croissant imposant de préserver une part des ressources naturelles existantes en optimisant leur utilisation et de limiter d'autre part la mise en dépôt des matériaux impropres à la réutilisation en remblais ou en couches de forme et enfin le renchérissement des matériaux de substitution et des transports.

Ce chapitre examine l'effet de la chaux sur certaines propriétés mécaniques des sols argileux telles que le compactage, le CBR, la compression, la résistance au cisaillement, Et l'œdomètre.

II.1. But de l'étude

Le but de cette étude est l'observation du comportement des argiles et l'influence de l'ajout de la chaux en vue du traitement des caractéristiques de ces argiles et leur exploitation dans les différents domaines des travaux publics en particulier les travaux routiers.

II.2. Matériaux utilisé

II.2.1 .Argile

L'échantillon prélevé est un matériau argileux qui provient d'un site de bouzaarourade profondeur de 2 m.

Ce matériau est une argile moyennement plastique de couleur marron.

II.2.2. La chaux éteinte

La chaux éteinte est obtenue après la réaction complète de la chaux vive avec de l'eau et un séchage rigoureux. Cette base, hydroxyde caustique peu corrosif, très peu soluble dans l'eau, est constituée d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). D'un point de vue minéralogique, il s'agit de l'espèce minérale naturelle nommée « portlandite ».

La chaux aérienne ou chaux grasse, un liant de chaux, composant de base de mortier en très faible partie argileux, qualifié pour sa prise lente au gaz carbonique de l'air, car elle réagit avec le dioxyde de carbone (CO_2).



Figure II.27 : Chaux éteinte

II.2.3. Préparation du mélange

La méthode utilisée pour la préparation des mélanges (Argile +chaux) est simple; elle nécessite un matériel de laboratoire approprié (Bacs, petites pelles, étuve, balance électrique, tamis....).

On prend à chaque fois une quantité d'argile tamisée à différentes granulométries selon la spécificité de chaque essai puis on rajoute des quantités de la chaux selon le pourcentage désigné 3%.



Figure II.28 : Mélange argile + la chaux

II.3.Caractérisation mécanique

II.3.1.Essai Proctor

➤ **Influence du pourcentage de la chaux sur le compactage :**

La présente expérience consiste à réaliser l'essai Proctor Normal (NF P 94- 093) sur un échantillon d'argile reconstitué puis après la substitution d'une quantité de 3% de la chaux en particules fines et de mesurer les éventuelles variations de la consistance du matériau composé.

Afin de voir l'influence du pourcentage d'ajout sur les paramètres de compactage de l'argile traitée à la chaux, une série de 6 essais au compactage Proctor Normal a été effectuée au niveau du laboratoire LTP EST ANNABA.



Figure II.29 : Les étapes de l'essai Proctor

CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

Tableau II.21 : Les paramètres de l'essai Proctor

Paramètre	12%	14%	16%	18%	20%	22%
Volume d'eau (ml)	300	350	400	450	500	550
Poids de sol (g)	2425	2425	2425	2425	2425	2425
Poids de moule vide (g)	1734.3	1734.3	1734.3	1734.3	1734.3	1734.3
Poids de moule + sol (g)	3432.2	3533.5	3586.3	3644.7	3711.7	3692
Poids de l'éprouvette (g)	1698.4	1765.3	1818.3	1910.7	1943.7	1924
Volume (m ³)	955	955	955	955	955	955
Poids de la chaux (g)	75	75	75	75	75	75

- **Résultats obtenus : Argile + 3 (%) de chaux**

Tableau II.22 : Résultats du Proctor

Paramètre	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6
(%) d'eau	12	14	16	18	20	22
Teneur en eau (%)	9.91	8.96	10.01	12.15	15.01	15.86
Γ dsèche (t/m ³)	1.58	1.62	1.64	1.69	1.75	1.64

Tableau II.23 : L'influence du pourcentage de la chaux sur le Proctor

Paramètre	Teneur en eau (%)	γ d(sèche)(t/m ³)
Argile	16.93	1.73
Argile + 3(%) chaux	15.01	1.75

CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

Les variations de la densité sèche en fonction de la teneur en eau sont représentées dans les figures suivantes :

- A l'état naturel (sol reconstitué) :

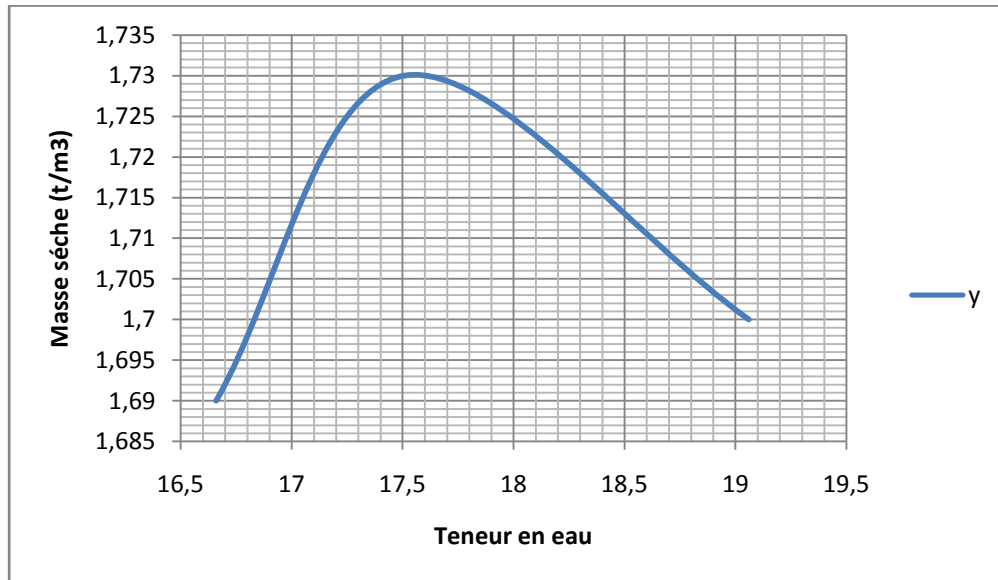


Figure II.30 : Courbe Proctor avant l'ajout de la chaux

- Après ajout de la chaux :



Figure II.31 : Courbe Proctor après l'ajout de la chaux

- **Interprétation des résultats :**

A travers ces figures, nous avons constaté que la valeur de teneur en eau optimale de l'argile + 3% de la chaux diminue et la densité sèche maximale augmente, Cela est dû à une augmentation de la dose de 3% de chaux.

II.3.2.Essai CBR

➤ Influence du pourcentage de la chaux sur le CBR

Afin d'étudier l'influence du traitement de la chaux sur les paramètres de l'indice du CBR des sols reconstitués une campagne d'essais au CBR.

Les échantillons de sol reconstitué traité à un pourcentage de 3(%) de chaux sont compactés à une teneur en eau optimal et masse volumique sèche maximale.



Figure II.32 : préparation du moule de CBR

Tableau II.24 : Les résultats obtenus : Argile +3(%) de chaux

E (mm)	F(KN)	P(N/mm ²)	I cbr
1.25	0.472	2.44	
2	0.497	2.57	
2.5	0.624	3.22	4.67
5	1.146	5.92	5.75
7.5	1.482	7.66	
10	1.756	9.07	

Tableau II.25 : Les résultats obtenus : Argile +3(%) de chaux

Paramètre	2.5	5
I_{CBR} (Argile)	4.34	5.14
I_{CBR} (Argile + de 3(%) de chaux)	4.67	5.75

➤ **Influence du pourcentage de la chaux sur le CBR**

La variation de la force (KN) en fonction du déplacement est représentée dans les courbes suivantes :

➤ **A l'état naturel :**

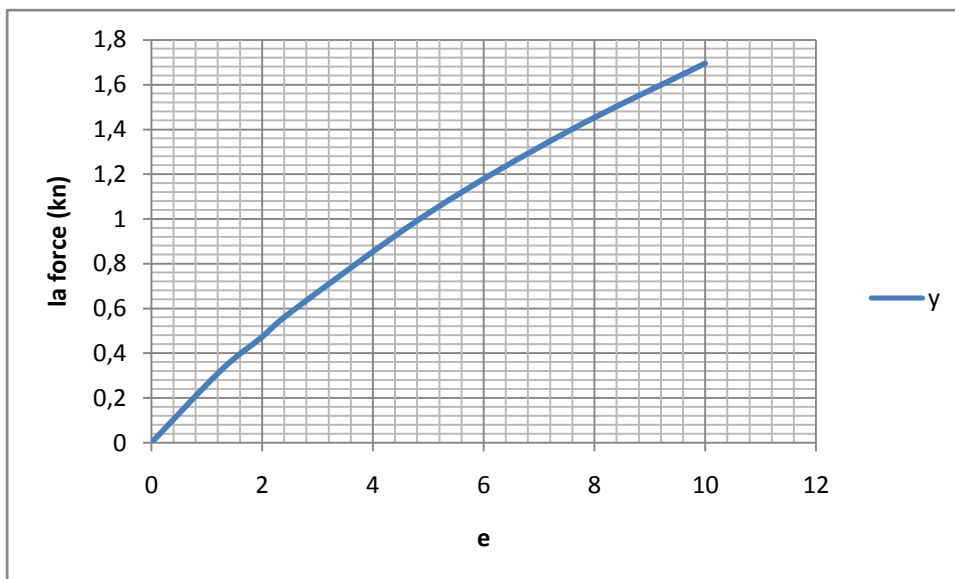


Figure II.33 : courbe du CBR avant l'ajout de la chaux

Après ajout de la chaux :

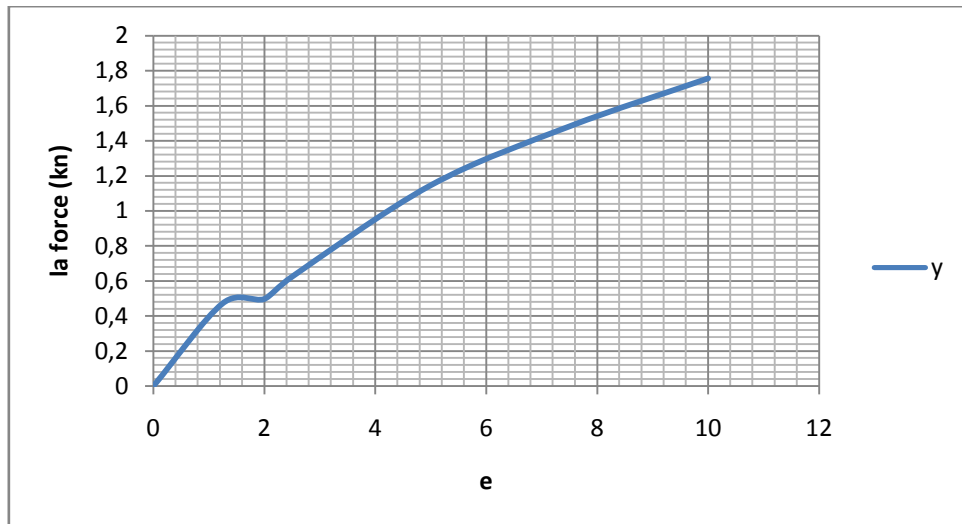


Figure II.34 : La courbe du CBR après l'ajout de la chaux

- **Interprétation des résultats :**

A cause de ces courbes, nous avons constaté que la valeur l'indice de CBR argile + 3% de la chaux augmente par apport à l'argile naturel, Cela est dû à une augmentation de la dose de 3% de chaux

II.3.3.Essai de compressibilité à l'œdomètre

➤ **Influence du pourcentage de la chaux sur les paramètres de consolidation du sol**

Les résultats de l'essai œdométrique pour l'argile traitée à 3% de la chaux sont représentés sur le tableau suivant :

- **Les résultats obtenus :**

Tableau II.26 : Résultats de l'œdomètre

Paramètre	C _c (%)	P _C (bars)	C _g (%)
Argile + 3% chaux	0.110	2.605	0.003

Paramètre	C _c (%)	P _C (bars)	C _g (%)

CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

Argile	0.088	0.018	0.925
Argile + 3% chaux	0.110	2.605	0.003

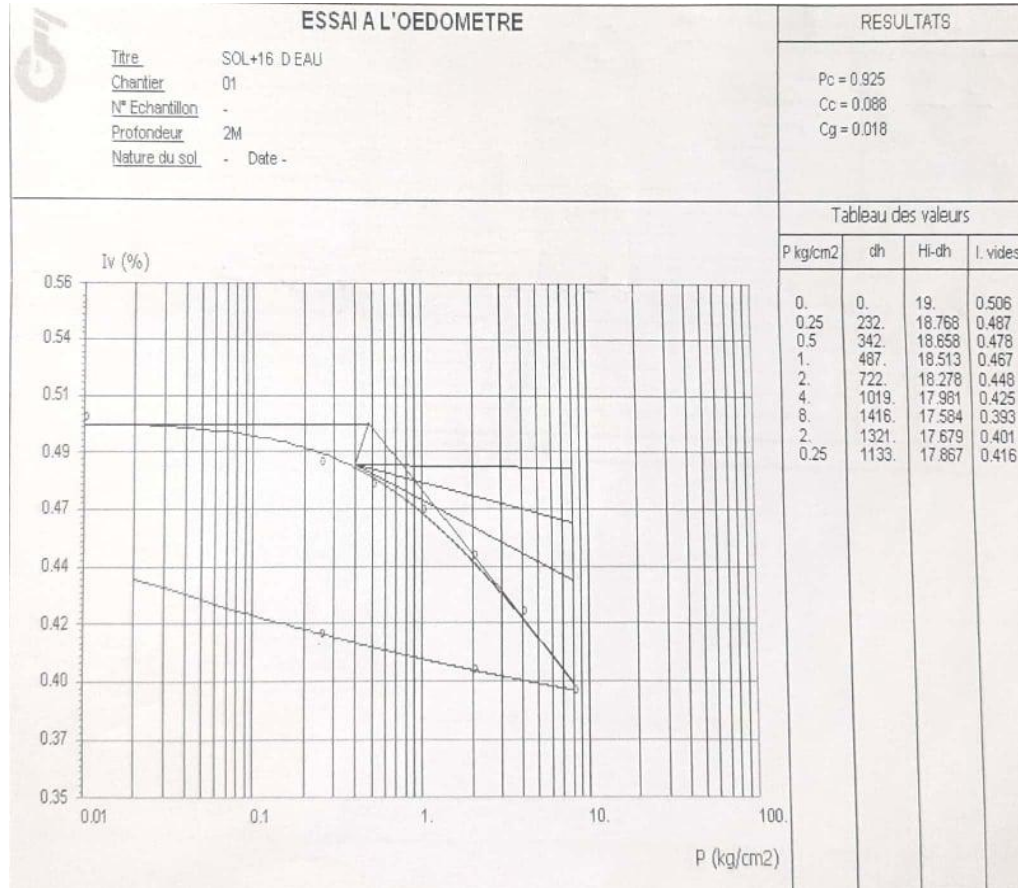


Figure II.35 : Courbe Œdométrique sol naturelle

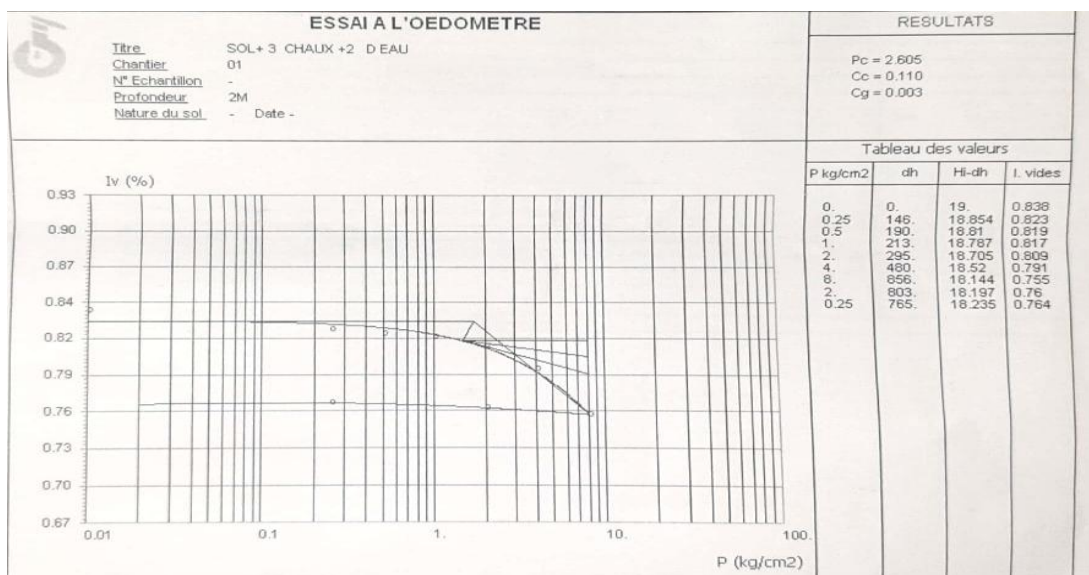


Figure II.36 : Courbe Œdométrique mélange sol +3% de chaux

Tableau II.27 : La classification selon l'indice de compressibilité :

$C_c < 0.020$	Sol incompressible
$0.020 < C_c < 0.050$	sol très peu compressible
$0.050 < C_c < 0.100$	Sol compressible
$0.100 < C_c < 0.200$	Sol moyennement compressible
$0.200 < C_c < 0.300$	Sol assez fortement compressible
$0.300 < C_c < 0.500$	Sol très compressible
$C_c < 0.500$	Sol Extrêmement compressible

- **Interprétation**

L'essai de compressibilité à l'oedomètre a donné une diminution graduelle de l'indice de gonflement et une augmentation de l'indice de compressibilité en fonction du pourcentage de l'ajout. Admet le passage d'un état compressible vers un état moyennement compressible.

II.3.4. Essai de cisaillement

➤ **Influence du pourcentage de la chaux sur le cisaillement :**

Afin d'étudier l'influence du traitement de la chaux sur les paramètres de résistance des sols reconstitués une campagne d'essais au cisaillement directe à la boîte de Casagrande a été conduite. Les échantillons de sol reconstitué traité à un pourcentage de 3% de la chaux sont compactés à une teneur en eau optimal et masse volumique sèche maximale.



Figure II.37 : Détermination du cisaillement

- **Résultats obtenus : Argile + 3% de chaux :**

Tableau II.28 : Résultats de cisaillement

Contrainte normale (bars)	0.75	1.25	1.75
Contrainte cisaillement (bars)	0.908	1.099	1.452
Angle de frottement	28		
Cohésion	0.473		

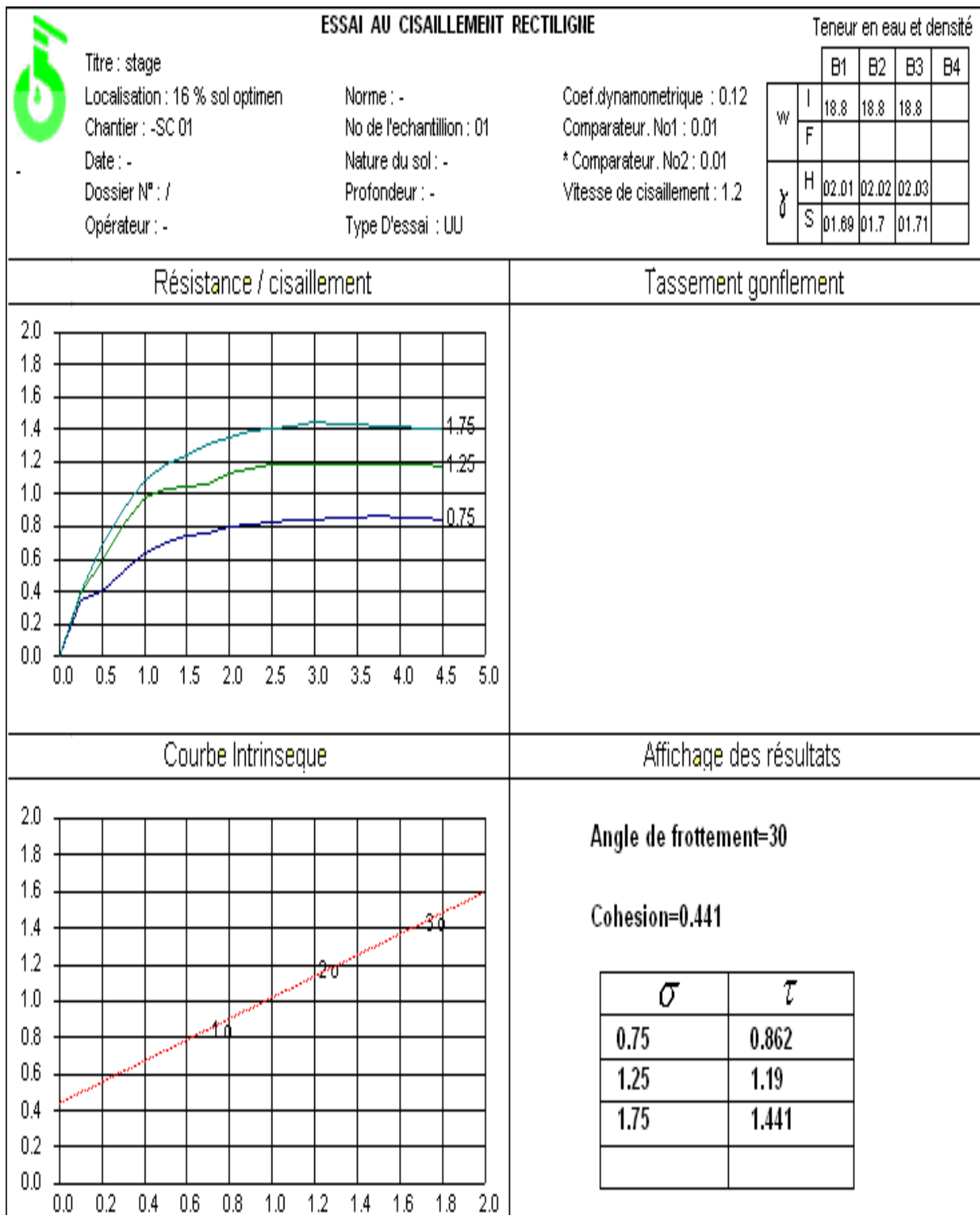
Tableau II.29 : résultats de l'essai du CBR

Paramètres	cohésion (%)	Angle de frottement (°)
Argile	0.393	29
Argile+ 3% chaux	0.473	28

➤ **Influence du pourcentage de la chaux sur le cisaillement**

La variation de la contrainte normale en fonction de la contrainte de cisaillement est représentée dans les figures suivantes :

- **Sol naturel :**



CHAPITRE II : CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU SOL ARGILEUX

Figure II.38 : La courbe de cisaillement Argile reconstituée

➤ Argile + 3% chaux :

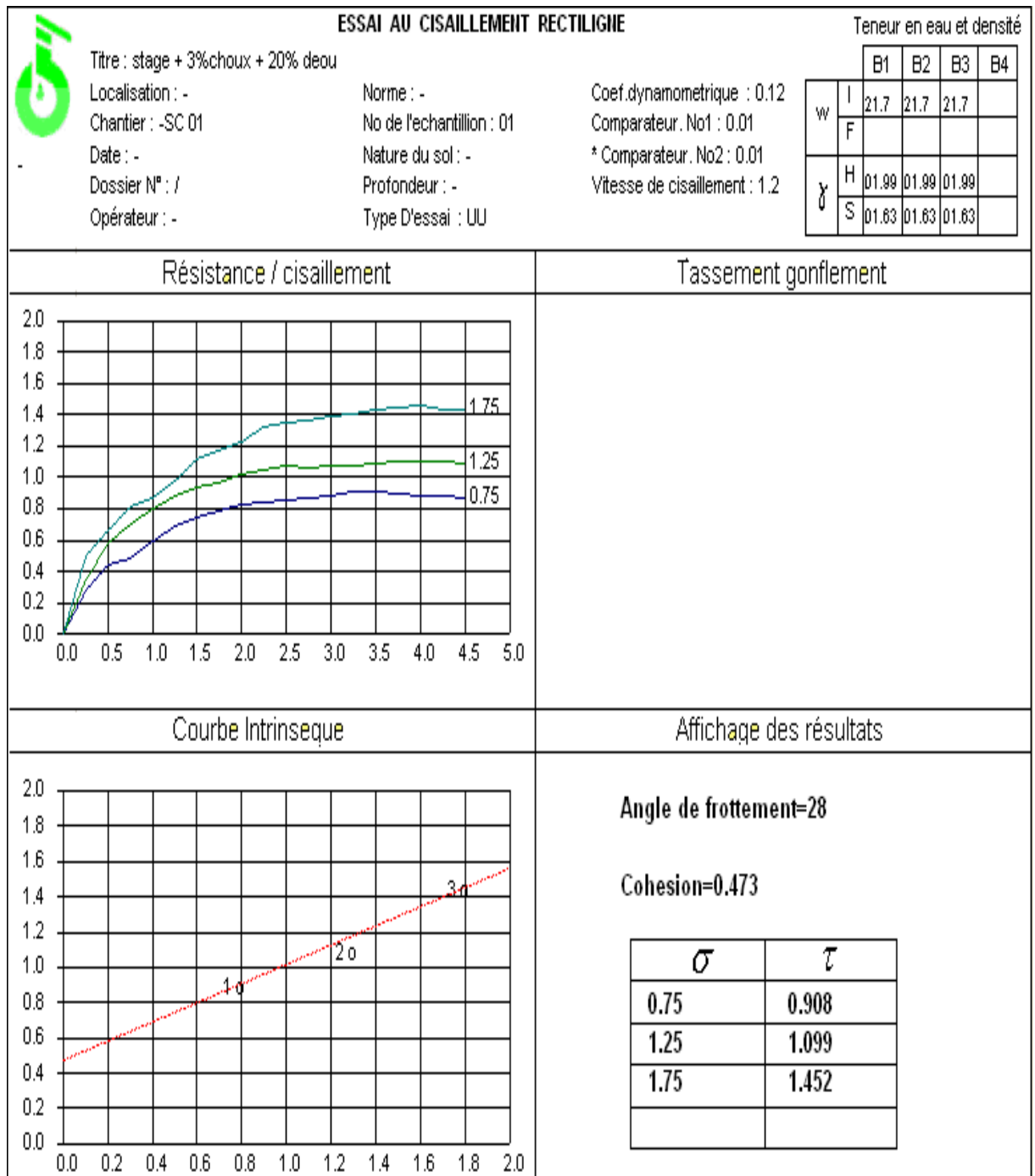


Figure II.39 : La courbe de cisaillement du mélange (Argile + 3% chaux)

➤ **Interprétation des résultats**

Les résultats de l'essai de cisaillement montrent que la cohésion de l'argile + 3% de la chaux augmente par rapport à la cohésion du sol naturel et l'angle de frottement diminue à cause du pourcentage de l'ajout, ce qui a permis le passage d'un état cohérent vers un état granulaire, et par la suite une augmentation de la résistance.

II.3.5. Essai de compression simple

➤ Influence du pourcentage de la chaux sur les paramètres de résistance du sol :

Les résultats de l'essai compression simple pour l'argile traitée à 3% de chaux sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau II.30 : Résultats obtenus : Argile + 3% chaux en compression simple

Temps (min)	F (KN)	Rc (MPA)	C
1	0.390	0.50	0.25
1.5	0.610	0.78	0.39
2	0.810	1.03	0.51
3(max)	0.900	1.15	0.57

Tableau II.31 : Résultats de compression simple

Temps	F(KN)	Rc (MPA)	C
Max : argile	0.982	1.25	0.62
Max :Argile + 3%chaux	0.900	1.15	0.57

• Résultats de l'influence du pourcentage de la chaux sur la compression

La variation de la résistance en fonction du temps de compression est représentée dans les figures suivantes :

➤ Sol naturel :

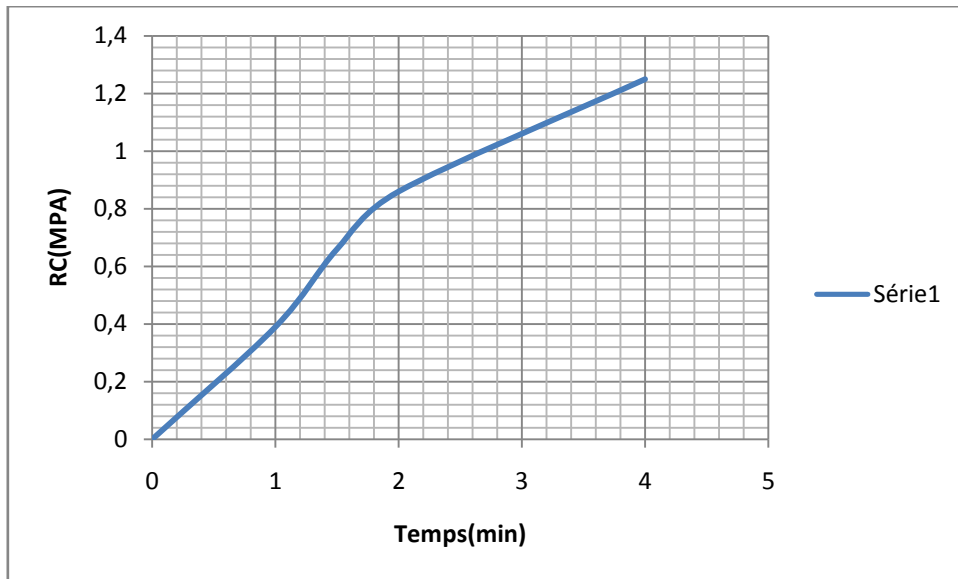


Figure II.40 : Courbe de La variation de la résistance en fonction du temps

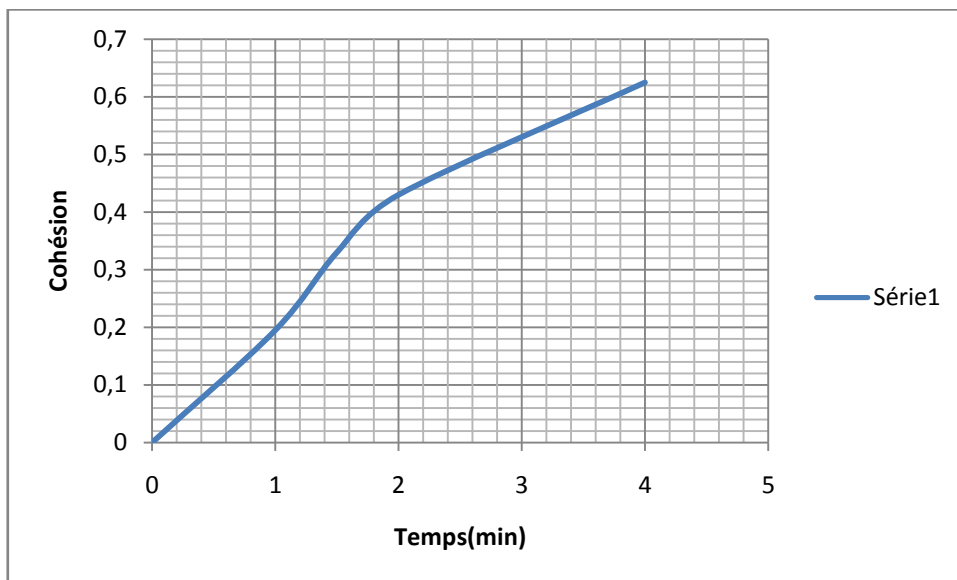


Figure II.41 : Courbe de la cohésion en fonction du temps avant l'ajout de la chaux

➤ **Sol naturel + la chaux :**

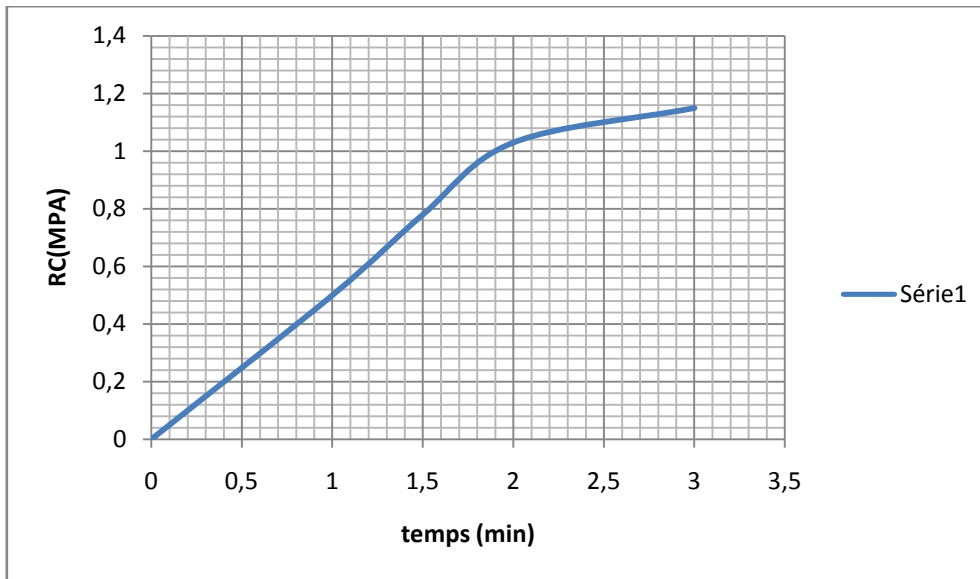


Figure II.42: Courbe de la résistance en fonction du temps après l'ajout de la chaux

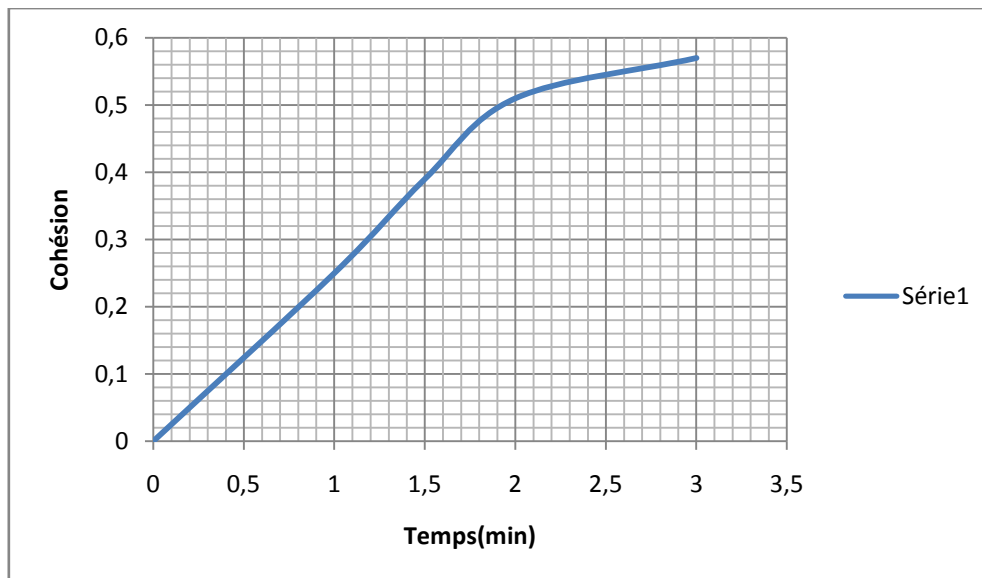


Figure II.43 : Courbe de la cohésion en fonction du temps après l'ajout de la chaux

- **Interprétation des résultats**

L'essai de compression simple a donné une diminution graduelle de la résistance et la cohésion en fonction de pourcentage de l'ajout.

II.3.6. Conclusion

- ✓ Nous constatons d'après les résultats obtenus au laboratoire que l'ajout de la chaux a fortement amélioré les caractéristiques de notre sol, par rapport au Proctor nous avons

remarqué une réduction de la teneur en eau proportionnelle à l'augmentation de la masse volumique sèche, puis aussi une augmentation relative à cet ajout de l'indice du CBR.

- ✓ Ainsi que du côté de l'oedomètre, on a vu une amélioration due à la chaux de la pression de consolidation avec l'indice de compression qui a fait que le coefficient de gonflement diminue de façon relative.
- ✓ Lors de l'essai du cisaillement La chaux a contribué à l'augmentation de la cohésion ce qui fait que cette dernière améliore la liaison des particules ce qui engendre une diminution de l'angle de frottement qui va aussi en notre faveur.
- ✓ Une fois la chaux ajoutée on a aussi noté que notre échantillon était plus résistant en sa présence par rapport à la force appliquée et la cohésion obtenue après cet essai de compression simple.

CHAPITRE III

Renforcement via géotextile

III. INTRODUCTION

Les techniques de renforcement se sont très largement répandues et nous entourent au quotidien (fondation, mur de soutènement, remblais, routiers, voies de chemin de fer...etc.)

Plus qu'un défi technologique, la réalisation des structures dans les zones classifiées inconstructibles, représente un réel enjeu stratégique, économique et environnemental.

III.1. BUT DE RENFORCEMENT DES SOLS

Le renforcement des sols est un domaine récent et particulier de l'amélioration des sols qui consiste à modifier les caractéristiques d'un sol par une action physique, dans le but de :

- Augmenter la capacité portante et / ou la résistance au cisaillement.
- Diminuer les tassements, tant absolus que différentiels, et le cas échéant les accélérés.
- Diminuer ou éliminer le risque de liquéfaction en cas de tremblement de terre ou de vibrations importantes.

III.2. L'OBJECTIF DE RENFORCEMENT DES SOLS

L'objectif de renforcement des sols fins est de modifier le massif du sol, soit par substitution partielle avec un matériau de meilleure caractéristique, soit par transformation de la structure du sol, les caractéristiques globales du sol sont alors radicalement améliorées.

III.3. MATERIAU UTILISEE

1- L'argile

L'échantillon prélevé est un matériau argileux qui provient d'un site de Bouzaaroura de profondeur de 2 m.

Ce matériau est une argile moyennement plastique de couleur marron.



Figure III.1 : Echantillon prélevé

2- Le Géotextile

Le feutre géotextile, tissé ou non tissé, est un matériau composé principalement de polypropylène. On s'en sert dans de nombreux domaines comme le bâtiment, le génie civil, l'agriculture, le paysagisme...

De couleur blanc-gris, doté d'une particularité de ne pas se déchirer. D'ailleurs vous serez obligés d'utiliser un cutter ou des ciseaux si vous souhaitez le découper.

2.1. Les propriétés des géotextiles

La connaissance des propriétés des géotextiles permet à l'ingénieur de suivre sa philosophie rationnelle de dimensionnement et de sélectionner le type de géotextile à prescrire. Du fait du développement rapide des produits géotextiles et de leurs modes d'application, il n'a pas été possible d'unifier les méthodes d'analyse du comportement des géotextiles. Les propriétés des géotextiles sont généralement regroupées dans les cinq catégories suivantes :

- 1- Propriétés physiques.
- 2- Propriétés mécaniques.
- 3- Propriétés hydrauliques.
- 4- Comportement à long terme.
- 5- Durabilité.

2.1.1. Propriétés physiques

Les principales propriétés physiques des géotextiles sont la masse par unité de surface et l'épaisseur. On utilise aussi la masse volumique des fibres et la flexibilité.

2.1.2. Propriétés mécaniques

Les caractéristiques mécaniques déterminent largement le domaine d'application des géotextiles car elles indiquent la résistance aux contraintes mécaniques issues des forces extérieures appliquées ou des conditions d'application (construction).

- Compressibilité.
- Comportement en traction.
- Résistance au déchirement.
- Résistance au percement.
- Résistance des joints (couture).
- Résistance à la fatigue.

2.1.3. Propriétés hydrauliques

Les propriétés hydrauliques ont une immense influence lorsque le géotextile doit assurer une fonction de filtre ou de drainage. Les principales propriétés hydrauliques sont la distribution des pores, la permittivité et la transmittivité. Elles sont moins influencées par la matière première que par le mode de fabrication des géotextiles.

2.1.4. Durabilité (dégradation)

- Dégradations à l'installation.
- Dégradations de température.
- Dégradations biologiques.
- Dégradations dues aux rayons ultraviolets.

➤ Notre étude est basée sur le géotextile tissé.

- **Le Géotextile tissé :**

Ce sont des fines bandelettes de polypropylène qui sont tissées entre elles comme un tissu de laine ou de coton, un sens de chaîne et un sens de trame qui s'entrecroisent. Les géotextiles tissés sont légers et économiques mais ils n'ont pas la souplesse et l'élasticité d'un non-tissé. Les géotextiles tissés ont plus de chances de se déchirer sur les arêtes que peuvent présenter les matériaux d'apport.



Figure III.2 : Le géotextile tissé (AS 25)

Fiche technique de géotextile tissé (AS 25)

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

Tableau III.1 : Caractéristiques physiques

Caractéristiques	Normes	Unité	AS25
Masse surfacique	ISO 9864	g/m ²	250
Epaisseur sous 2 kPa	ISO 9863-1	Mm	1.25

Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques

Caractéristiques	Normes	Unité	AS25
Résistance à la traction SP*	ISO 10319	KN/m	16
Résistance à la traction ST*	ISO 10319	KN/m	20
Déformation à la force maximale SP*	ISO 10319	%	75
Déformation à la force maximale SP*	ISO 10319	%	95
Perforation dynamique	ISO 13433	Mm	15
Résistance au poinçonnement statique CBR	ISO 12238	KN	2.90
Résistance au poinçonnement pyramidal	ISO 14474	KN	1.50

Tableau III.3 : Caractéristiques hydrauliques

Caractéristiques	Normes	Unité	AS25
Perméabilité normale au plan	ISO 11.58	m/sec	0.048
Ouverture de filtration	ISO 12956	µm	70

Tableau III.4 : Caractéristiques du rouleau

Caractéristiques	Unité	AS25
Largeur	m	5.80
Longueur	m	160
Surface	m ³	928
Poids	Kg	232

III.3. PREPARATION DU MELANGE

La méthode utilisée pour la préparation des mélanges (**Argile + 3 nappes de géotextiles identique**) est simple, nécessite un matériel de laboratoire approprié (Bacs, petites pelles, étuve, balance, électrique, tamis....).

On prend à chaque fois une quantité d'argile tamisée à différentes granulométries selon la spécificité de chaque essai puis on rajoute à chaque fois une nappe de géotextile de diamètre 8 (mm).

III.4. CARACTERISATION MECANIQUE

✓ Sol naturel

III.4.1.Essai Proctor

➤ **L'influence d'une nappe de géotextile sur le compactage :**

Le moule de Proctor constitué de 3 couches de sol au milieu de ses trois couches on met la nappe de géotextile.

Afin de voir l'influence d'une nappe de géotextile sur les paramètres de compactage de l'argile, l'essai de compactage Proctor Normal a été effectué au niveau du laboratoire LTP EST ANNABA.



Figure III.3 : Préparation au Proctor



Figure III.4: Proctor avec une nappe de géotextile

➤ Influence d'une nappe de géotextile sur le Proctor

Tableau III.5 : données du Proctor avec une seule nappe

Pourcentage d'eau (%)	16
Diamètre de moule (mm)	10
Diamètre de géotextile (mm)	8
Poids de moule vide (g)	1734
Poids de moule + sol (g)	3720.9
Poids de sol (g)	1986.9
Volume de moule (m ³)	955
La masse volumique humide (t/m ³)	2.08
La masse volumique sèche (t/m ³)	1.79

Tableau III.6 : résultats de l'essai de Proctor

La teneur en eau (W%)	16.93
La masse volumique sèche (t/m ³)	1.79

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

➤ L'influence de deux nappes de géotextile sur le compactage

Les résultats de l'essai de Proctor pour l'argile deux trois nappes de géotextile sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau III.7 : Données du Proctor avec 2 nappes de géotextile

Pourcentage d'eau (%)	16
Diamètre de moule (mm)	10
Diamètre de géotextile (mm)	8
Poids de moule vide (g)	1734
Poids de moule + sol (g)	3732
Poids de sol (g)	1998
Volume de moule (m ³)	955
La masse volumique humide (t/m ³)	2.09
La masse volumique sèche (t/m ³)	1.80

Tableau III.8 : Résultat obtenus

La teneur en eau (W%)	16.93
La masse volumique sèche (t/m ³)	1.80

➤ L'influence des trois nappes de géotextile sur le compactage :

Les résultats de l'essai de Proctor pour l'argile avec trois nappes de géotextile sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau III.9 : Données du Proctor avec 3 nappes de géotextile

Pourcentage d'eau (%)	16
Diamètre de moule (mm)	10
Diamètre de géotextile (mm)	8
Poids de moule vide (g)	1734

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

Poids de moule + sol (g)	3613
Poids de sol(g)	1879
Volume de moule (m³)	955
La masse volumique humide (t/m³)	1.96
La masse volumique sèche (t/m³)	1.69

Tableau III.10 : Résultats obtenus :

La teneur en eau (W%)	16.93
La masse volumique sèche (t/m³)	1.69

- **Interprétation des résultats :**

L'essai Proctor permet d'apprécier le comportement au compactage du matériau en fonction de la teneur en eau.

Notre sol à une teneur en eau optimum de 17.51% et une masse sèche de 1.79 t/m³ avec une seule nappe de géotextile, en rajoutant une 2^{ème} nappe on remarque une petite augmentation de la masse sèche ce qui équivalant à 1.80 t/m³, mais après avoir mis la troisième nappe elle a diminué à 1.69 t/m³.

III.4.2.Essai CBR

➤ **L'influence d'une nappe de géotextile sur le CBR :**

Les résultats de l'essai CBR pour l'argile avec une nappe de géotextile sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau III.11 : Résultat de l'essai CBR avec seule nappe

E(mm)	F (kN)	P(N/mm²)	I_{CBR}
1.25	0.320	1.65	
2	0.475	2.45	
2.5	0.550	2.84	4.12
5	0.920	4.75	4.62
7.5	1.219	6.3	
10	1.443	7.45	

Les variations de la force en fonction du déplacement sont représentés dans la courbe suivante :

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

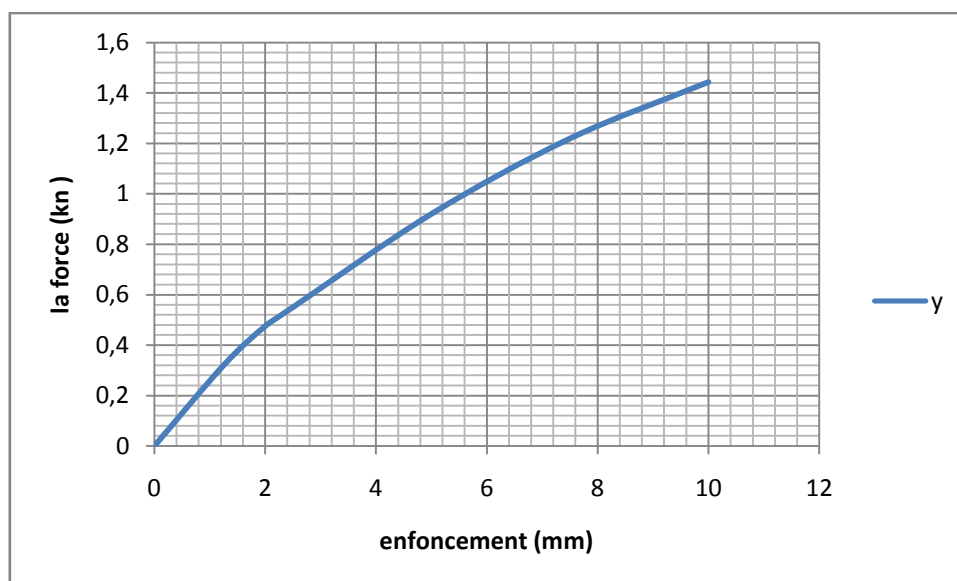


Figure III.5 : La courbe de CBR avec seule nappe de géotextile

➤ L'influence des deux nappes de géotextile sur le CBR :

Les résultats de l'essai de CBR pour l'argile avec deux nappes de géotextile sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau III.12 : Résultat de l'essai CBR avec deux nappes de géotextile

E (mm)	F(KN)	P(N/mm ²)	I cbr
1.25	0.272	1.40	
2	0.344	1.78	
2.5	0.390	2.01	2.92
5	0.640	3.30	3.21
7.5	0.919	4.75	
10	1.195	6.17	

Les variations de la force en fonction du déplacement sont représentées dans la courbe suivante :

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

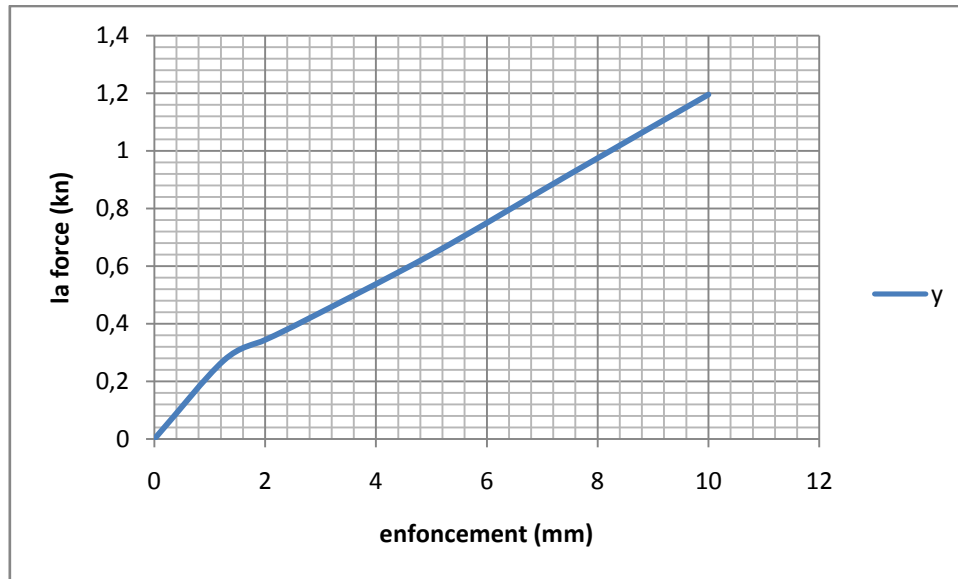


Figure III.6 : La courbe de CBR avec deux nappes de géotextile

➤ **L'influence des trois nappes de géotextile sur le CBR :**

Les résultats de l'essai de CBR pour l'argile avec trois nappes de géotextile sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau III.13 : Résultat de l'essai CBR avec trois nappes de géotextile

E(mm)	F(KN)	p(N/mm²)	I_{CBR}
1.25	1.450	7.49	
2	1.921	9.93	
2.5	2.210	11.42	16.55
5	3.471	17.93	17.41
7.5	4.612	23.83	
10	5.700	29.46	

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

Les variations de la force en fonction du déplacement sont représentés dans la courbe suivante

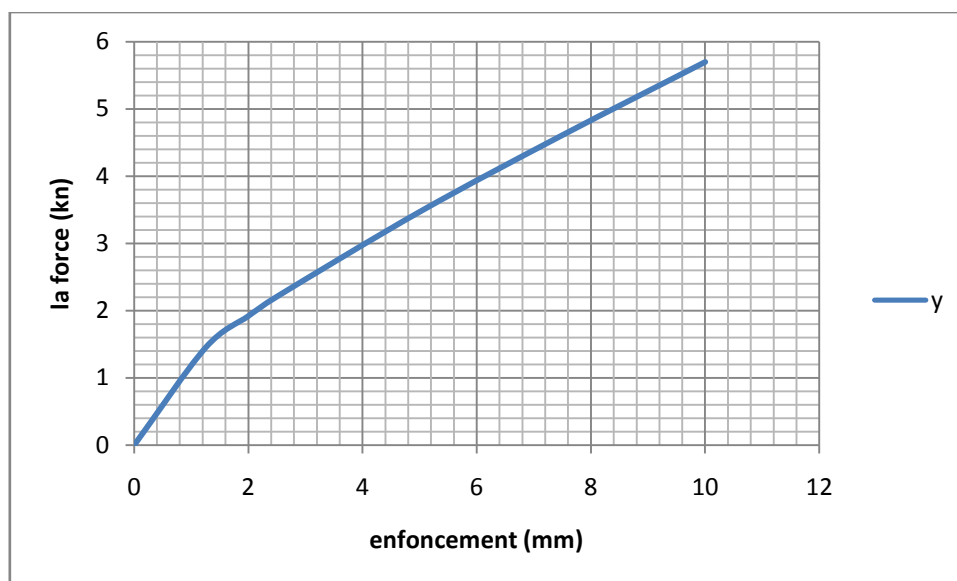


Figure III.7 : La courbe de CBR avec trois nappes de géotextile

- **Interprétation des résultats de CBR sur les trois essais :**

Les résultats de l'indice du CBR pour une nappe de géotextile à 2.5 (mm) est 4.12 et à 5 (mm) a donné 4.62, par contre pour deux nappes de géotextile on a constaté une diminution graduelle à l'indice du CBR représentée par 2.92 à 2.5 (mm) et 3.21 à 5 (mm), avec une autre augmentation pour la troisième nappes de géotextile représentée par 17.51 à 2.5 (mm) et 17.41 à 5 (mm).

III.4.3.Essai de L'oedomètre

➤ **Influence d'une nappe de géotextile sur les paramètres de consolidation du sol :**

Les résultats de l'essai oedométrique pour l'argile avec une nappe de géotextile sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau III.14 : Résultat de l'essai oedométrique avec une nappe de géotextile

Cc(%)	Pc(bars)	Cg(%)
0.117	1.105	0.026

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

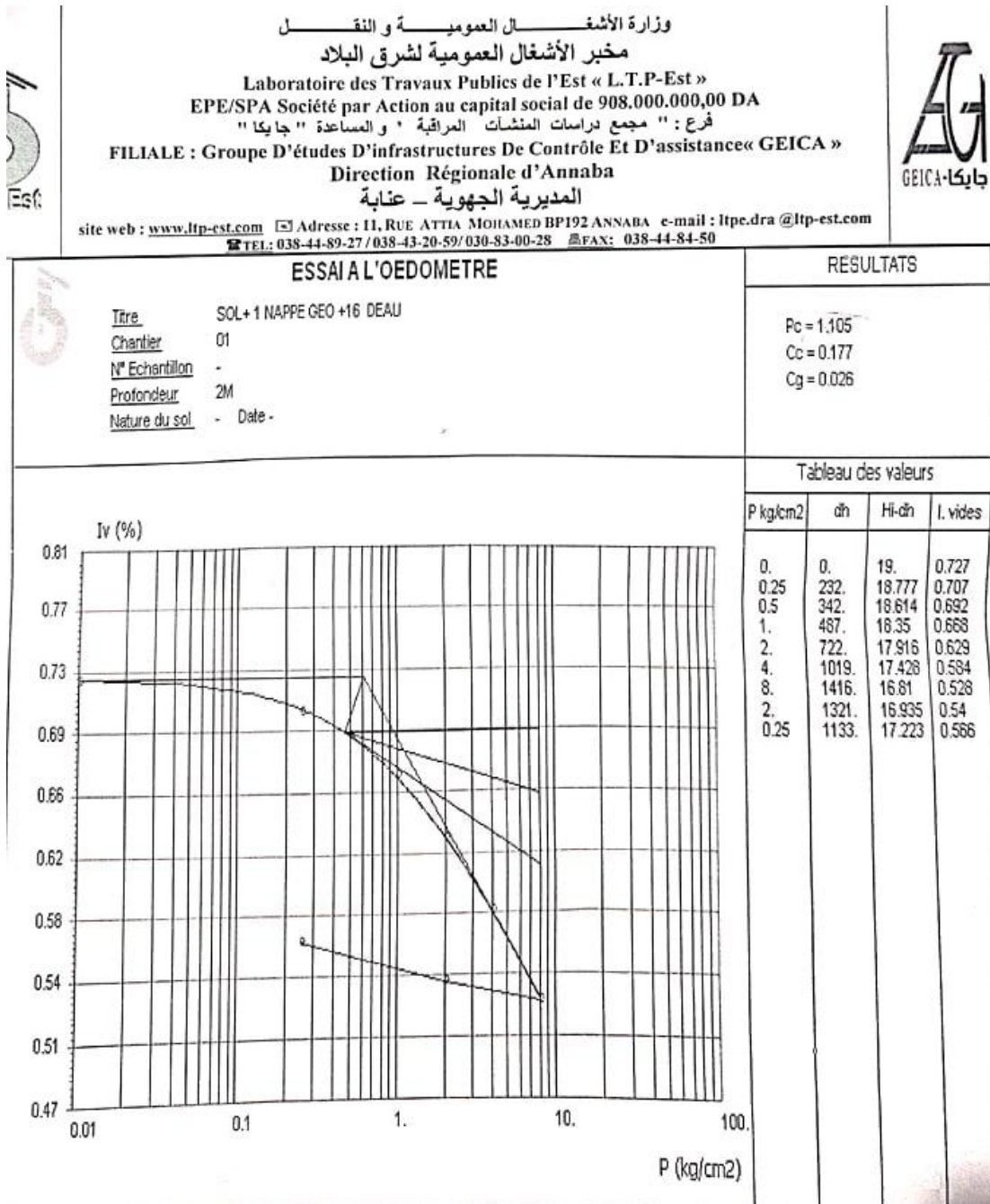


Figure III.8 : Résultat de l'essai oedométrique avec une nappe de géotextile

- Avec 2 et 3 nappes de géotextile

❖ Justification

Lors de l'essai oedométrique une trousse doit passer par l'échantillon afin de le contenir, sans les nappes l'essai était possible avec une seule nappe était possible aussi, mais au-delà de cette nappe c'est à dire avec 2 ou 3 la trousse a du mal à passer, surtout par rapport à l'épaisseur du géotextile qui était à la base déjà dur à manier, donc une superposition de 2 voire 3 est logiquement pas facile à pénétrer par la trousse.

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

III.4.4. Essai de compression simple

➤ **Influence d'une nappe de géotextile sur les paramètres de compression simple :**

Les résultats de l'essai de compression simple pour l'argile avec une nappe de géotextile sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau III.15 : Résultats de l'essai de compression avec une nappe de géotextile

Temps (min)	F(KN)	Rc (MPA)	C
1	0.192	0.24	0.12
1.5	0.243	0.31	0.16
2	0.38	0.48	0.24
4	0.684	0.87	0.44
6	0.841	1.07	0.53
8(max)	0.846	1.08	0.54

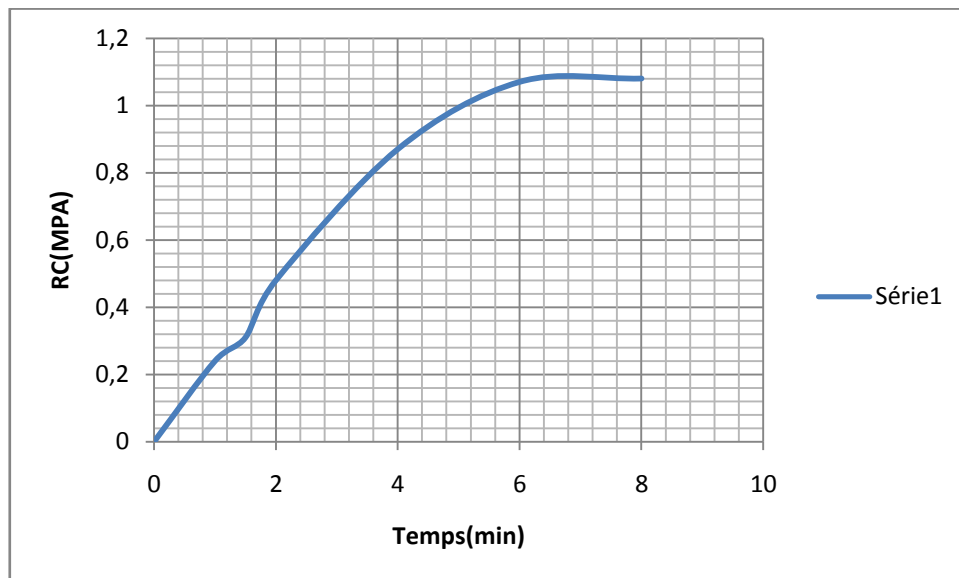


Figure III.9 : La courbe de la résistance en fonction du temps avec une nappe.

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

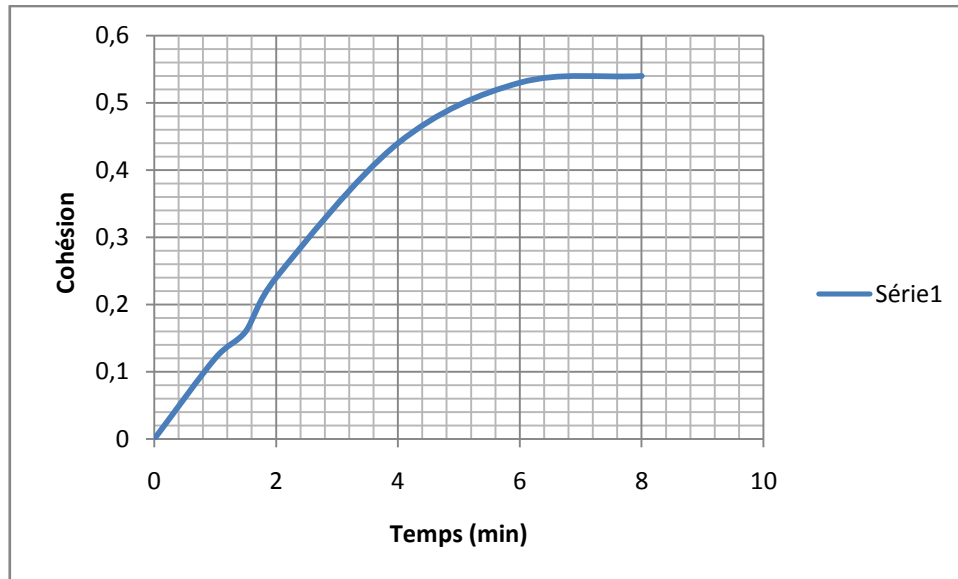


Figure III.10 : La courbe de la cohésion en fonction du temps avec une nappe

➤ Influence des deux nappes de géotextile sur les paramètres de compression simple :

Les résultats de l'essai de compression simple pour l'argile avec deux nappes de géotextile sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau III.16 : Résultat de l'essai de compression avec deux nappes

Temps (min)	F(kN)	Rc (MPa)	C
1	0.253	0.32	0.16
1.5	0.342	0.44	0.22
2	0.410	0.52	0.26
4	0.625	0.80	0.40
6	0.722	0.92	0.46
8	0.800	1.02	0.51
10(max)	0.860	1.10	0.55

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

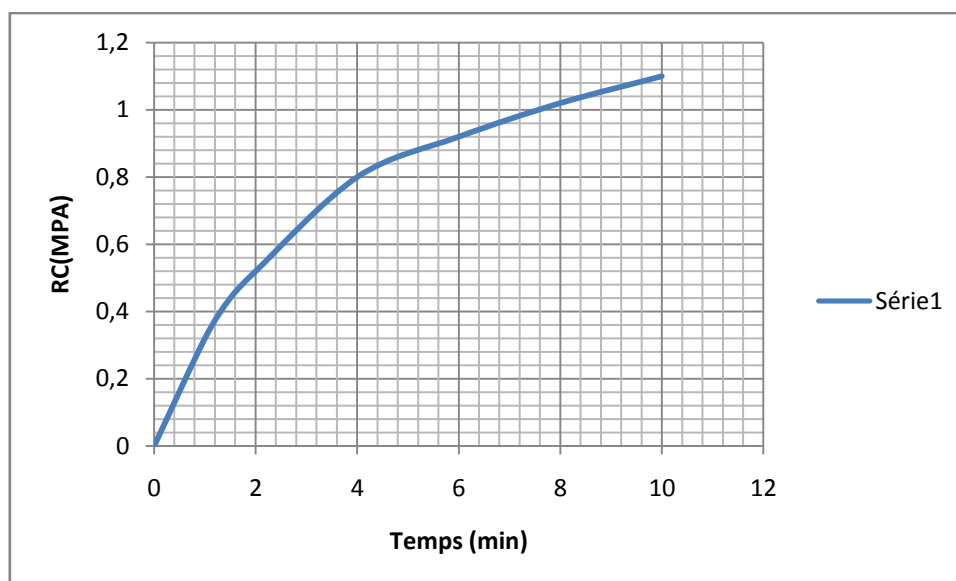


Figure III.11 : La courbe de la résistance en fonction du temps avec deux nappes

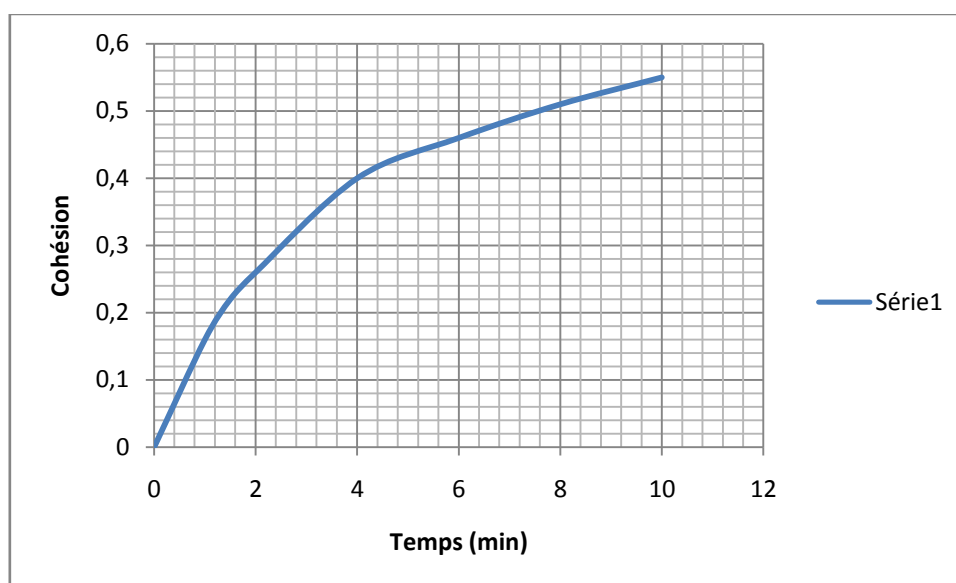


Figure III.12 : La La courbe de la cohésion en fonction du temps avec deux nappes

➤ Influence des trois nappes de géotextile sur les paramètres de compression simple :

Les résultats de l'essai de compression simple pour l'argile avec trois nappes de géotextile sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau III.15 : Les résultats de compression simple avec trois nappes

Temps (min)	F(kN)	Rc(MPA)	C
1	0.117	0.15	0.07
1.5	0.229	0.29	0.14
2	0.378	0.48	0.24

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

4	0.941	1.20	0.60
6	1.148	1.46	0.73
8	1.287	1.64	0.81
10	1.370	1.75	0.87
Max	3.357	4.28	2.14

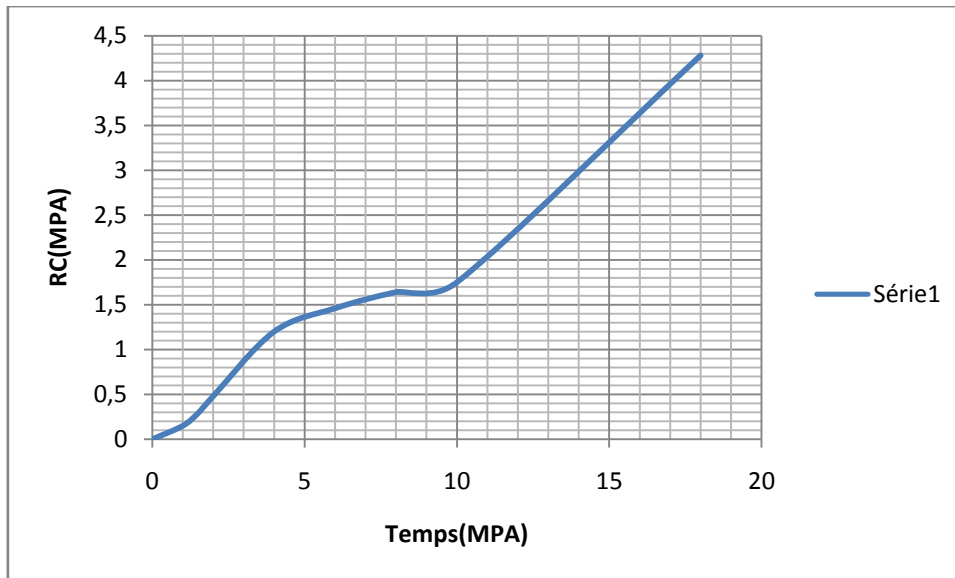


Figure III.13 : La courbe de la résistance en fonction du temps avec trois nappes

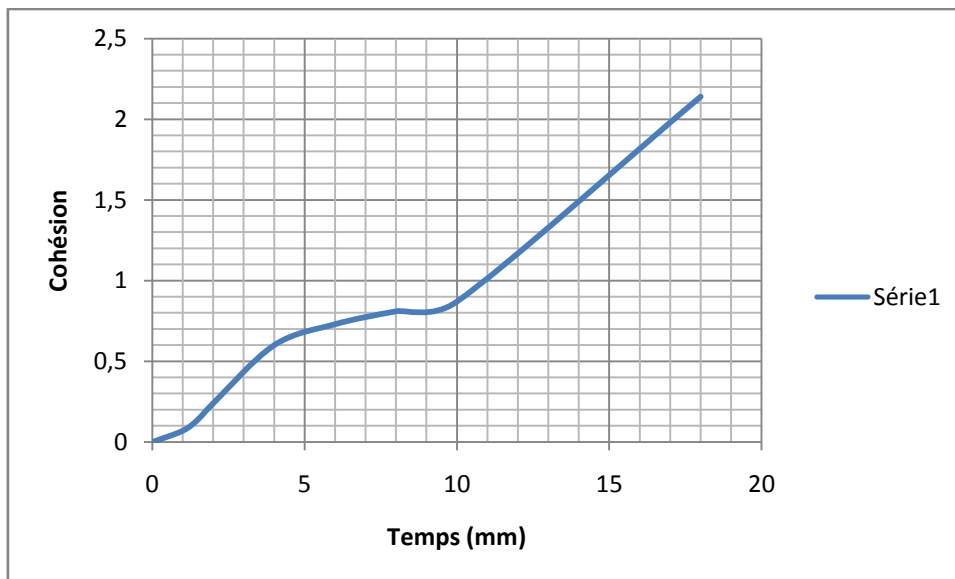


Figure III.14 : La courbe de la cohésion en fonction du temps avec trois nappes

Interprétation des résultats de compression sur les trois essais :

Les résultats de la résistance de compression pour une nappe de géotextile à 8 (min) max est 1.08 (MPa) avec 0.54 de cohésion, par contre pour deux nappes on a constaté une augmentation graduelle à la résistance représentée par 1.10 (MAP) à 10 (min) avec 0.55 de cohésion, et une autre augmentation pour les troisièmes nappes de géotextile représentée en 4.28 (MPa) à 18 (min) avec une diminution de la cohésion 2.14.

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

- Sol naturel + 3% de la chaux

III.4.5.Essai de Proctor

- L'influence d'une nappe de géotextile avec 3 % de la chaux sur le compactage :

Le moule Proctor contenant trois couches de sol amélioré avec la chaux au milieu de ses trois couches on met la nappe de géotextile.

Les résultats de l'essai de Proctor pour l'argile + 3% de chaux avec une nappe de géotextile sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau III.16 : Paramètre de Proctor après l'ajout de la chaux avec une nappe

Pourcentage d'eau (%)	20
Diamètre de moule(mm)	10
Diamètre de géotextile(mm)	8
Poids de moule vide (g)	1768
Poids de moule + sol (g)	3691
Poids de sol (g)	1923
Volume de moule (m³)	955
La masse volumique humide (t/m³)	2.01
La masse volumique sèche (t/m³)	1.68

Tableau III.17 : Résultats obtenus

La teneur en eau (W%)	15.01
La masse volumique sèche (t/m³)	1.68

- L'influence de deux nappes de géotextile avec 3% de chaux sur le compactage :

Les résultats de l'essai de Proctor pour l'argile avec trois nappes de géotextile sont représentés sur le tableau suivant :

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

Tableau III.18 : Paramètre du Proctor après l'ajout de la chaux avec deux nappes

Pourcentage d'eau (%)	20
Diamètre de moule (mm)	10
Diamètre de géotextile (mm)	8
Poids de moule vide (g)	1768
Poids de moule + sol (g)	3668.5
Poids de sol (g)	1900.5
Volume de moule (m³)	955
La masse volumique humide (t/m³)	1.99
La masse volumique sèche (t/m³)	1.65

Tableau III.19 : Résultats obtenus :

La teneur en eau (W%)	15.01
La masse volumique sèche (t/m³)	1.65

➤ **L'influence de trois nappes de géotextile avec 3% de chaux sur le compactage :**

Les résultats de l'essai de Proctor pour l'argile avec trois nappes de géotextile sont représentés sur le tableau suivant

Tableau III.20 : Paramètre du Proctor après l'ajout de la chaux avec trois nappes

Pourcentage d'eau (%)	20
Diamètre de moule (mm)	10
Diamètre de géotextile (mm)	8
Poids de moule vide (g)	1768
Poids de moule + sol (g)	3627.5
Poids de sol (g)	1859.5
Volume (m³)	955
La masse volumique humide (t/m³)	1.94

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

La masse volumique sèche (t/m^3)	1.62
--------------------------------------	------

Tableau III.21 : Résultats obtenus :

La teneur en eau (W%)	15.01
La masse volumique sèche (t/m^3)	1.62

- **Interprétation des résultats :**

Notre sol à une teneur en eau optimum de 15.01% et une masse sèche de $1.68 t/m^3$ avec une seule nappe de géotextile, en rajoutant une 2^{ème} nappe on remarque une diminution de la masse sèche ce qui équivaut à $1.65 t/m^3$, avec une autre diminution à la troisième nappes avec une valeur de $1.62 t/m^3$.

III.4.6.Essai de CBR

➤ **L'influence d'une nappe de géotextile+ 3%de chaux sur le CBR**

Les résultats de l'essai de CBR pour l'argile + 3% chaux avec une nappe de géotextile sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau III.22 : Les résultats de CBR avec une nappe de géotextile + 3% chaux

E (mm)	F(KN)	P (N/ mm^2)	Icbr
1.25	0.520	2.60	
2	0.740	3.82	
2.5	0.890	4.60	6.67
5	1.632	8.43	8.19
7.5	2.263	11.95	
10	2.807	14.51	

Les variations de la force en fonction de déplacement sont représentées dans la courbe suivante :

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

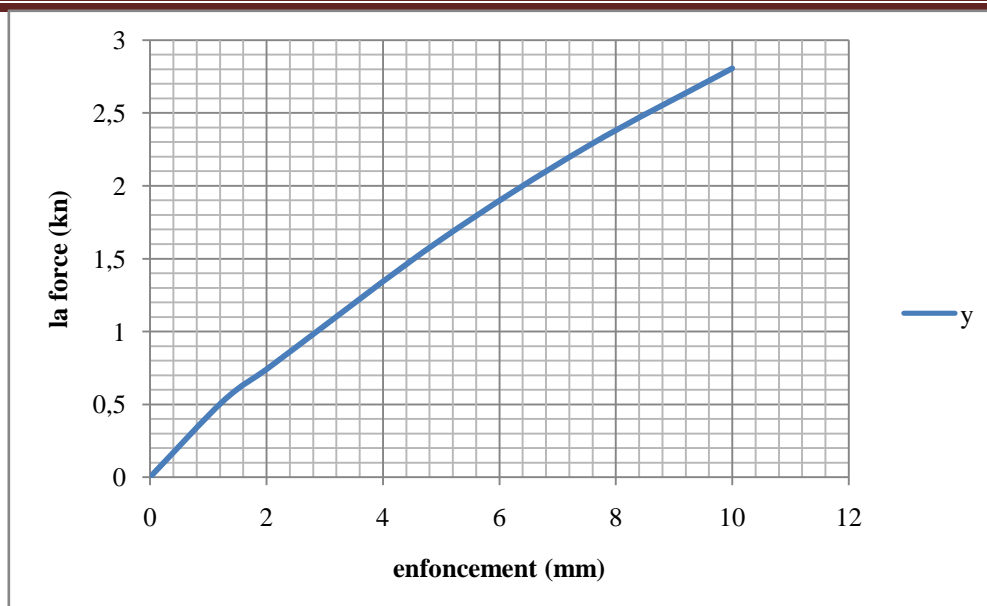


Figure III.15 : La courbe de CBR avec une nappe de géotextile + 3% chaux

➤ L'influence des deux nappes de géotextile + 3% chaux sur le CBR ;

Les résultats de l'essai de CBR pour l'argile avec deux nappes + 3% chaux sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau III.23 : Les résultats de l'essai de CBR pour l'argile avec deux nappes + 3% chaux

E (mm)	F(KN)	P (N/mm ²)	Icbr
1.25	0.165	0.85	
2	0.343	1.77	
2.5	0.520	2.69	3.90
5	0.996	5.15	5.00
7.5	1.485	7.67	
10	1.948	10.07	

Les variations de la force en fonction de déplacement sont représentées dans la courbe suivante :

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

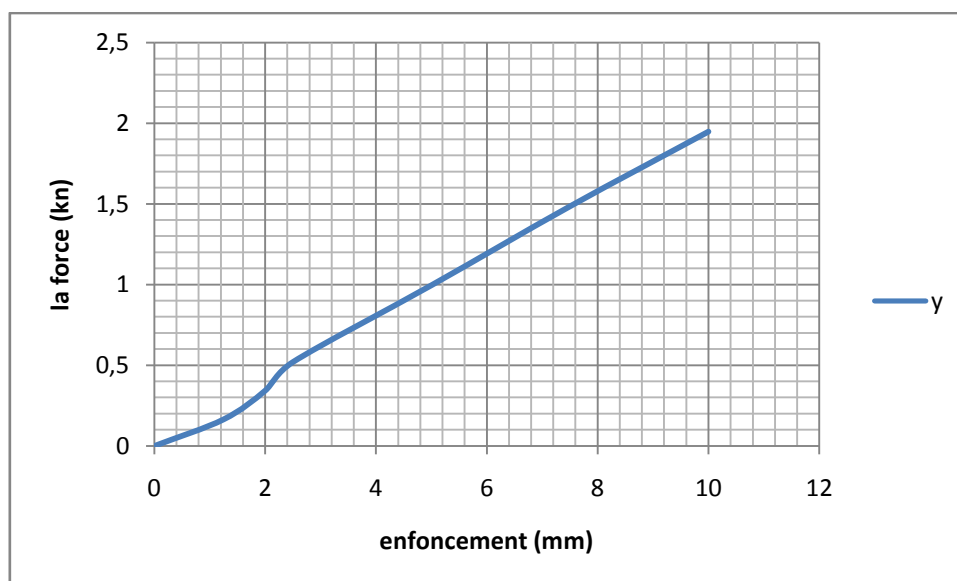


Figure III.16 : La courbe de CBR avec deux nappes de géotextile + 3% chaux

➤ L'influence des trois nappes de géotextile + 3% de chaux sur le CBR :

Les résultats de l'essai de CBR pour l'argile avec trois nappes + 3% de chaux sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau III.24 : Les résultats de l'essai de CBR pour l'argile avec trois nappes + 3% de chaux

E (mm)	F(KN)	P (N/mm ²)	I _{cbr}
1.25	0.216	1.12	
2	0.3	1.55	
2.5	0.354	1.83	2.65
5	0.668	3.45	3.35
7.5	0.970	5.01	
10	1.26	6.51	

Les variations de la force en fonction du déplacement sont représentées dans la courbe suivante :

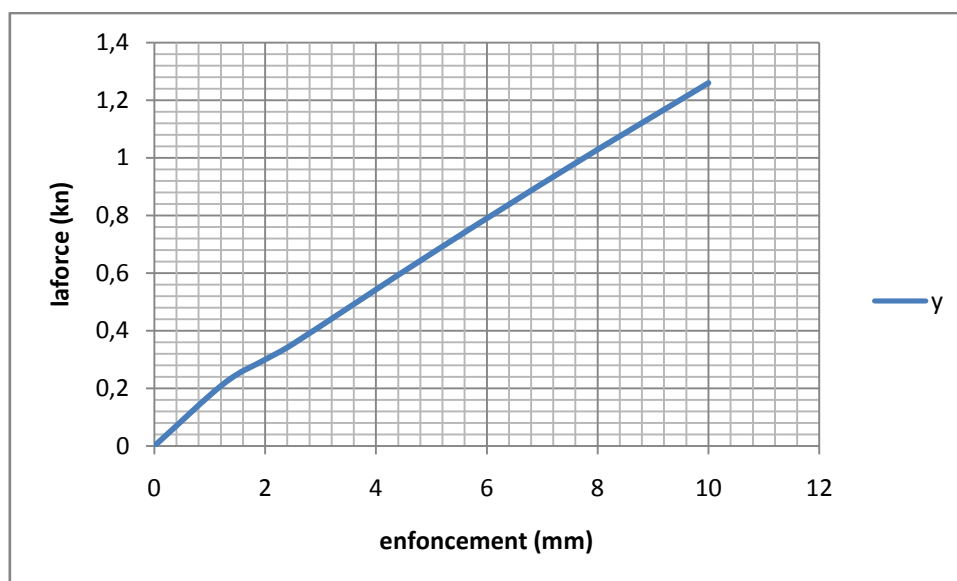


Figure III.17 : La courbe de CBR avec trois nappes de géotextile + 3% de chaux

- **Interprétation des résultats du CBR sur les trois essais :**

Les résultats de l'indice du CBR pour une nappe de géotextile + 3% de chaux à 2.5 (mm) est 6.67 et à 5 (mm) à donner 8.19, par contre pour deux nappes on a constaté une diminution graduelle à l'indice du CBR représenté en 3.90 à 2.5 (mm) et 5 à 5 (mm), avec une autre diminution pour la troisième nappes représentée en 2.65 à 2.5 (mm) et 3.35 à 5 (mm).

III.4.7.Essai de compression simple :

➤ **Influence d'une nappe de géotextile + 3% de chaux sur les paramètres de compression simple :**

Les résultats de l'essai de compression simple pour l'argile+3% chaux avec une nappe de géotextile sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau III.25 : Les résultats de l'essai de compression simple pour l'argile+3% chaux et une nappe de géotextile

T (min)	F (KN)	Rc (MPA)	C
1	0.549	0.67	0.34
1.5	0.867	1.10	0.55
2(max)	1.279	1.63	0.81

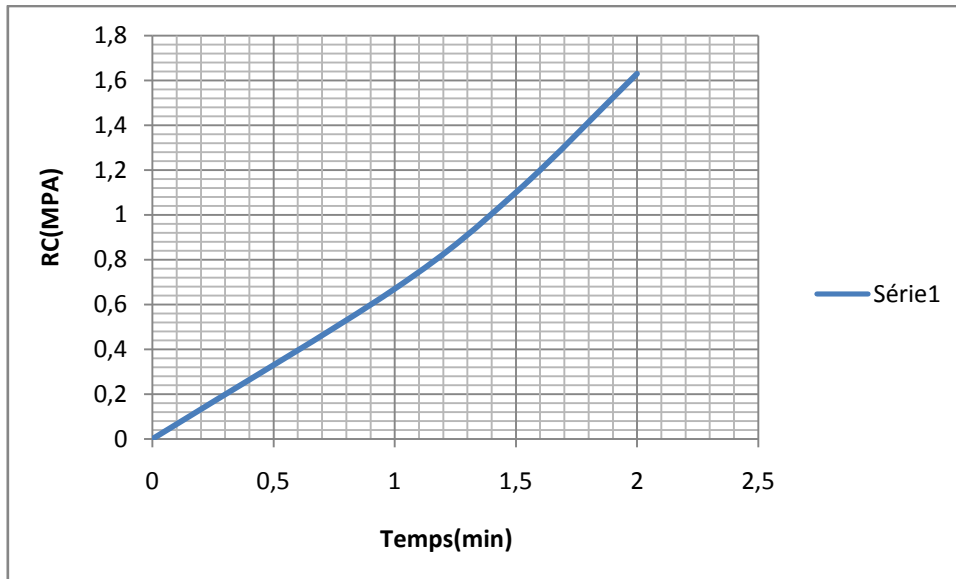


Figure III.18 : La courbe de la résistance en fonction du temps avec une nappe + 3 % chaux

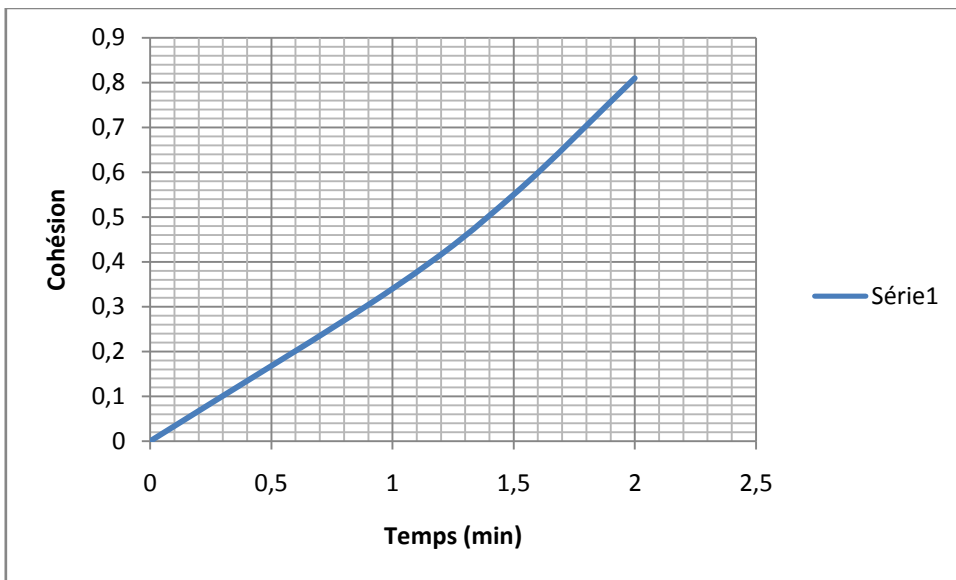


Figure III.19 : La courbe de la cohésion en fonction du temps avec une nappe + 3 % chaux

Influence des deux nappes de géotextile + 3% de chaux sur les paramètres de compression simple :

Les résultats de l'essai de compression simple pour l'argile + 3% de chaux avec deux nappes de géotextile sont représentés sur le tableau suivant :

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

Tableau III.26 : Les résultats de l'essai de compression simple pour l'argile + 3% de chaux :

T (min)	F (Kn)	Rc (MPa)	C
1	0.185	0.24	0.12
1.5	0.283	0.36	0.18
2	0.535	0.68	0.34
4	2.135	2.72	1.36
Max	2.140	2.73	1.36

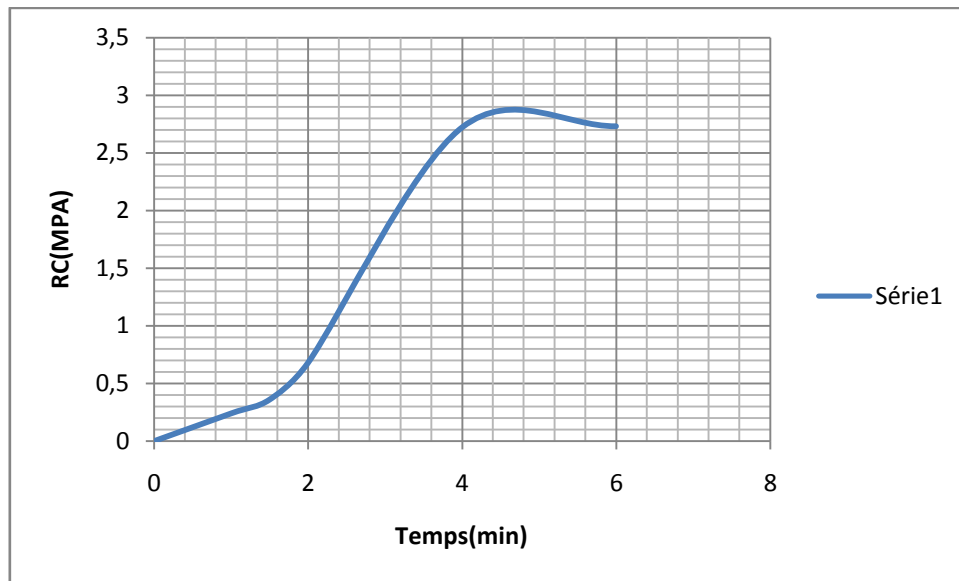


Figure III.20 : La courbe de la résistance en fonction du temps avec deux nappes + 3 % chaux

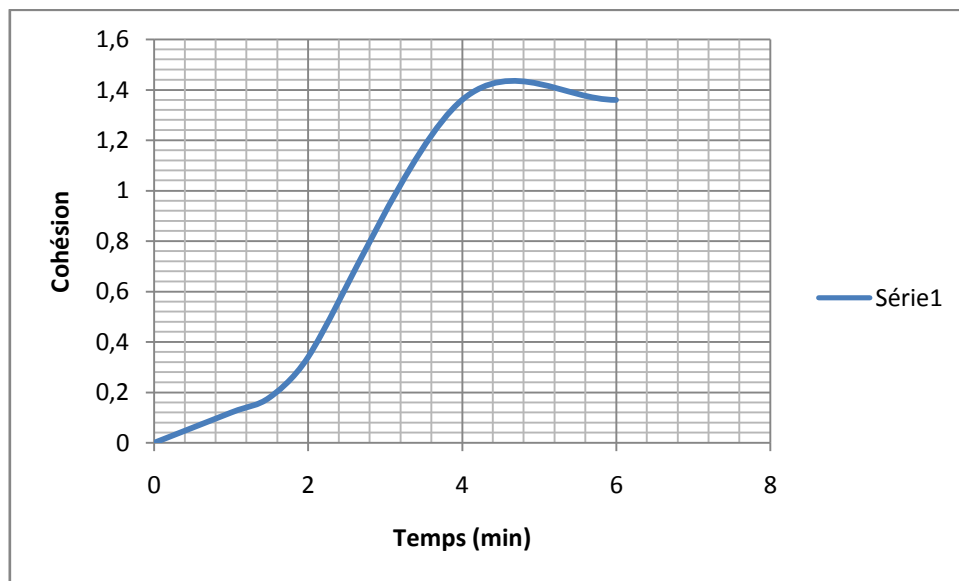


Figure III.21 : La courbe de la cohésion en fonction du temps avec deux nappes + 3 % chaux

CHAPITRE III : RENFORCEMENT VIA GEOTEXTILE

Influence des trois nappes de géotextile + 3% chaux sur les paramètres de compression simple :

Les résultats de l'essai de compression simple pour l'argile+ 3% de chaux avec trois nappes de géotextile sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau III.24 : Les résultats de l'essai de compression pour l'argile+ 3% chaux avec trois nappes

T (min)	F (KN)	Rc (MPA)	C
1	0.281	0.36	0.18
1.5	0.475	0.61	0.30
2	0.768	0.98	0.49
4	1.752	2.23	1.12
6	1.800	2.29	1.15
Max	1.867	2.38	1.19

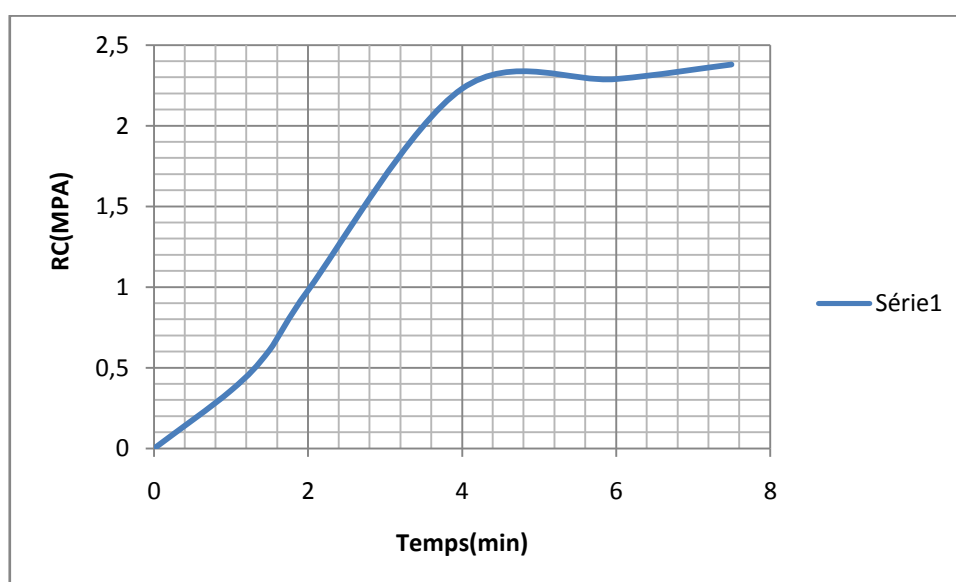


Figure III.22 : La courbe de la résistance en fonction du temps avec trois nappes + 3 % chaux

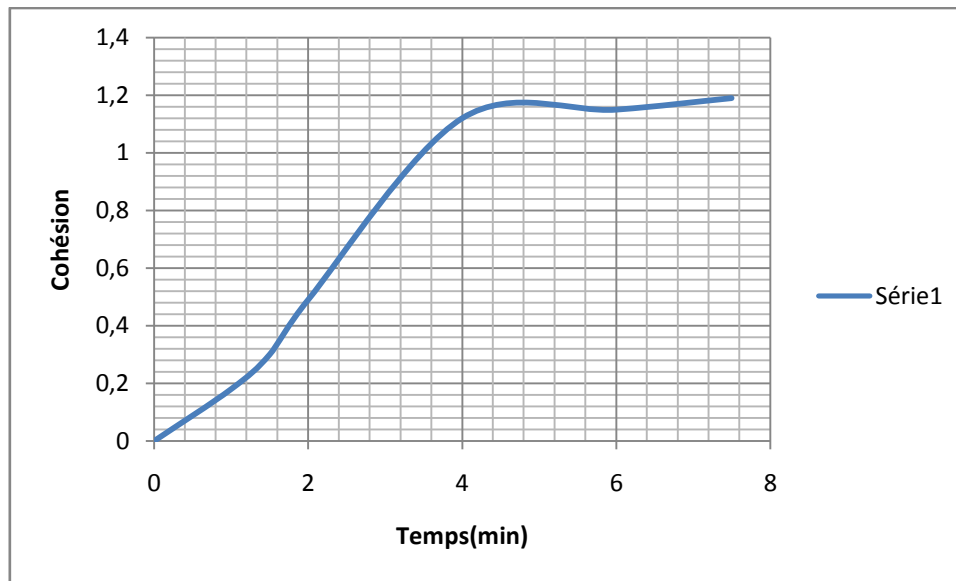


Figure III.23 : La courbe de la cohésion en fonction du temps avec trois nappes + 3 % chaux

- **Interprétation des résultats de compression sur les trois essais :**

Les résultats de la résistance de compression pour une nappe de géotextile à 2 (min) max est 1.63 (MPa), par contre pour deux nappes on a constaté une augmentation à la résistance représenté en 2.73 (MAP) à 12 (min), avec une autre diminution pour la troisième nappes représenté en 2.38 (MPa) à 10(min).

III.5.CONCLUSION

- ✓ En conclusion, nous avons constaté d'après les résultats au sujet de notre sol obtenus au LTPest que pour la résistance il ne nous en fallait pas beaucoup mais une solution des deux proposées alors soit la chaux soit les géotextiles.
- ✓ Et encore, à un certain dosage via la chaux ça faisait parfaitement un équilibre à la hauteur de nos attentes, aussi au bout d'une seule nappe de géotextile la résistance était parfaite, mais à aller au-delà du dosage ou des deux nappes de géotextile nous avons constaté une diminution de la masse volumique sèche contrairement aux autres paramètres extraits d'autres essais de labo.
- ✓ Nous devons en déduire de cela que les deux ajouts combinés jouent un rôle néfaste par rapport à notre sol, d'après les résultats du laboratoire la combinaison a provoqué une baisse au niveau des paramètres mécaniques qui sont important à la résistance de notre sol.

CHAPITRE IV

Discussions et comparaisons

IV. DISCUSSION ET COMPARAISON DES RESULTATS

IV.1. Essai Proctor

Tableau IV.1 : Variation de la masse sèche en fonction des nappes de géotextile

Paramètre	Sol + 0 nappe	Sol+1nappe	sol+2nappes	Sol+3nappes
Masse sèche du sol naturel (t/m ³)	1.73	1.79	1.80	1.83

- La variation de la densité sèche maximale avec les 3 nappes de géotextile sont représentées dans les figures suivantes

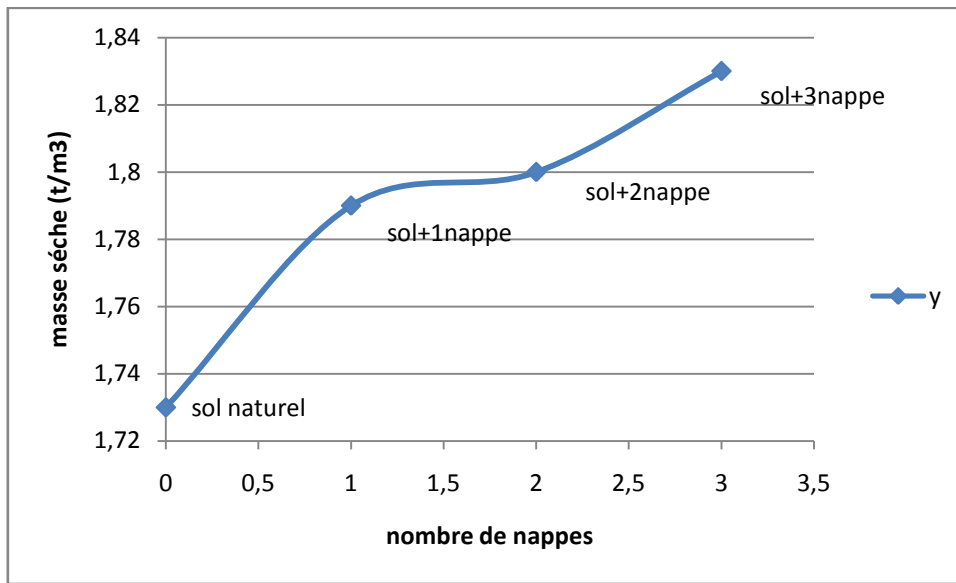


Figure IV.1 : La courbe de compactage du mélange (Argile+ 3 nappes de géotextile)

Tableau IV.2 : Variation de la masse sèche en fonction des nappes de géotextile et la chaux

Paramètre	Sol + 0 nappe	Sol+1nappe	sol+2nappe	Sol+3nappe
Masse sèche du sol + la chaux (t/m ³)	1.75	1.68	1.65	1.62

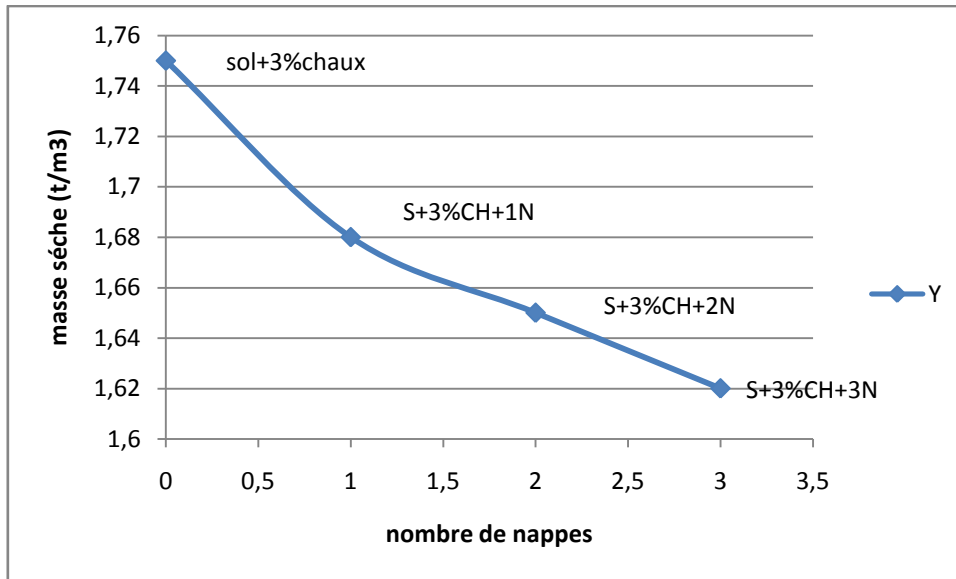


Figure IV.2 : La courbe de compactage du mélange (Argile + chaux + 3 nappes de géotextile)

- **Comparaison des résultats**

- 1- En se basant sur les résultats obtenus, nous remarquons d'après le tableau et la courbe 4.2 une augmentation de la masse volumique sèche suite à la réaction du traitement à la chaux, ceci dit que la chaux contribue à la liaison des grains du sols en le rendant moins poreux, plus compacte par rapport au remplissage des vides par les fines particules de la chaux d'où cette augmentation favorable.
- 2- Concernant les résultats obtenus au cours de l'essai avec géotextiles comme ajout, nous avons aussi constaté une augmentation de la masse sèche qui est aussi en notre faveur.
- 3- Au début nous avons une masse de 1.75 pour (sol+chaux), et 1.79 pour (sol+1nappe de géotextile), en combinant les deux, les résultats s'opposent à notre objectif de renforcement, le sol perd de ses caractéristiques mécanique concernant le Proctor, ce qui fait que sa masse volumique sèche est en baisse, et tend vers presque 1.62, et c'est une baisse remarquable.

IV.2. Essai de CBR

- **Résultats obtenus**

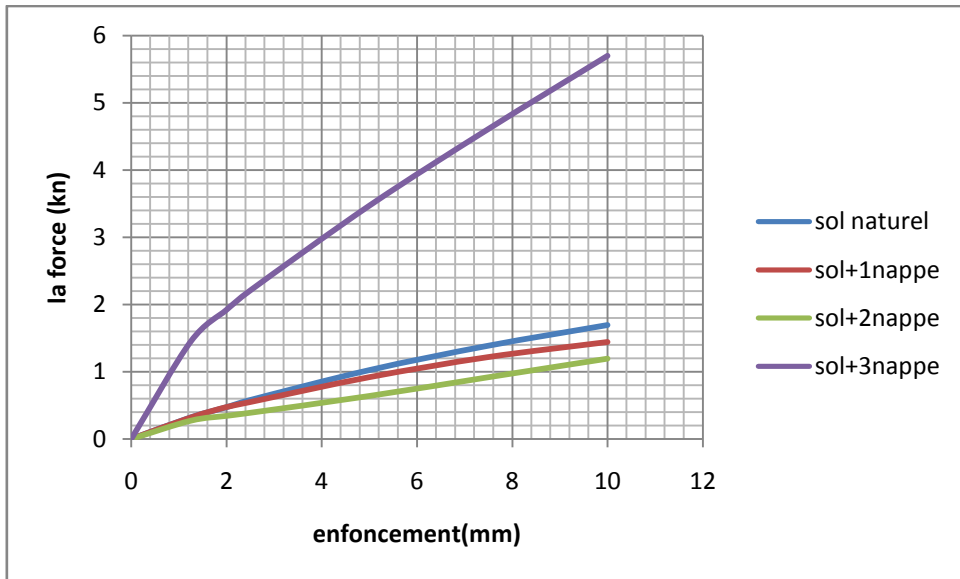


Figure IV.3 : La variation de la force en fonction de déplacement (sol naturel)

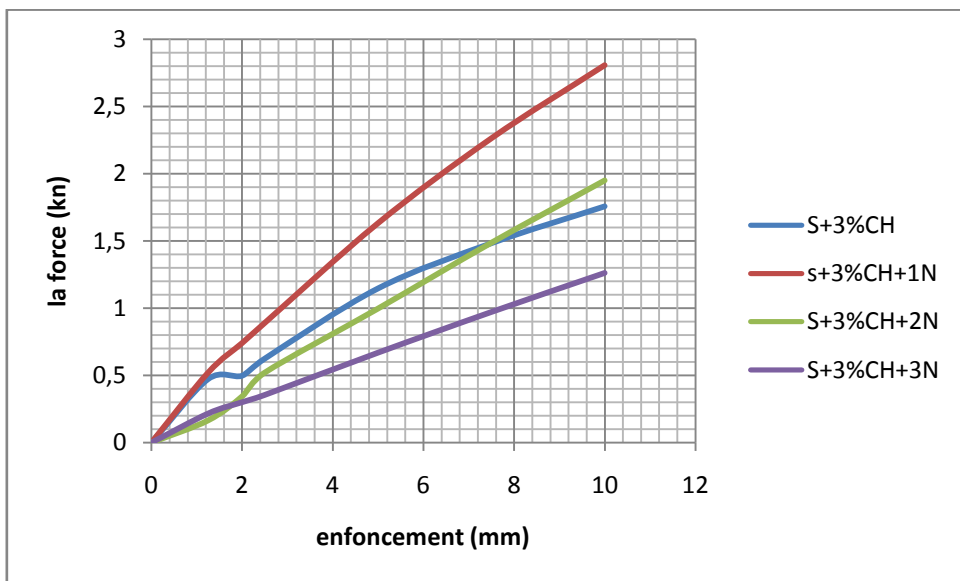


Figure IV.4 : La variation de force en fonction de déplacement (sol + chaux)

Tableau IV.3 : Variation de l'indice de CBR en fonction des nappes de géotextile

Paramètre	Sol (0 Nappe)	sol +1 nappe	Sol +2nappe	Sol + 3nappe
$I_{CBR(2.5)}$ (sol naturel)	4.34	4.12	10.56	16.55
$I_{CBR(5)}$ (sol naturel)	5.14	4.62	11.81	17.41

- La variation de l'indice de CBR avec les 3 nappes de géotextile (sol naturel) est représentée dans la figure suivante :

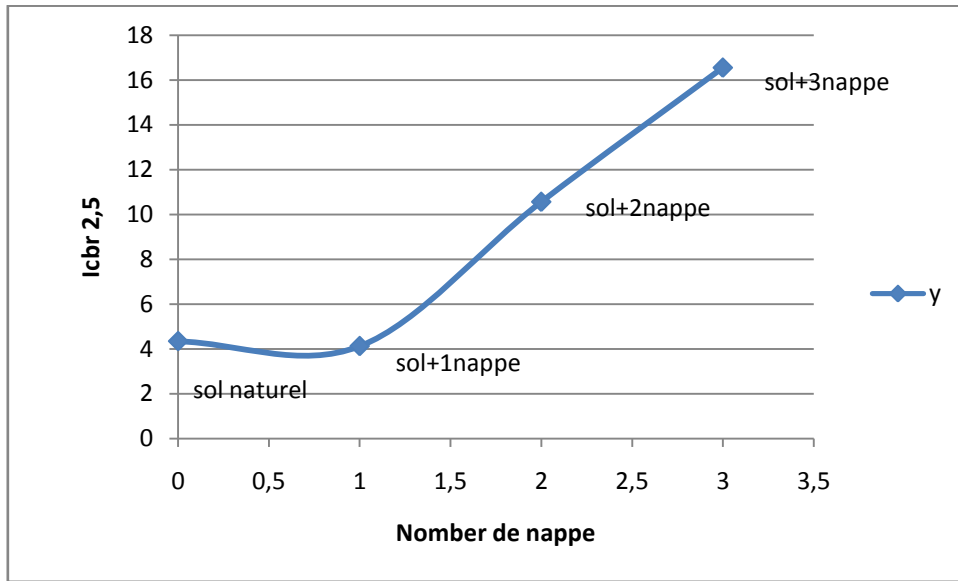


Figure IV .5 : Courbe de variation de l'indice de CBR à 2.5mm avec les 3 nappes de géotextile

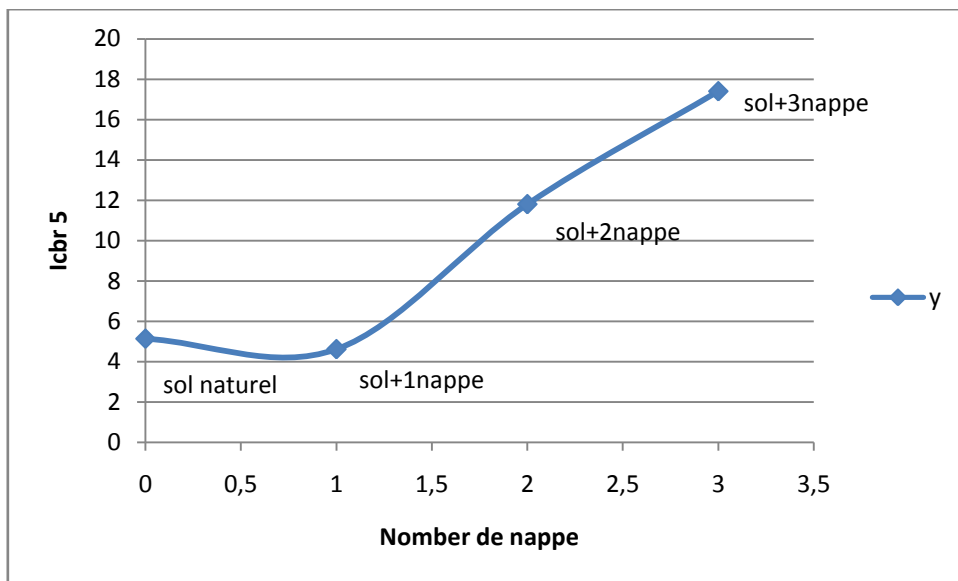


Figure IV .6 : Courbe de variation de l'indice de CBR à 5mm avec les 3 nappes de géotextile

Tableau VI.4 : variation de l'indice de CBR en fonction des nappes et de la chaux

paramètres	Sol +la chaux	Sol +la chaux +1 nappe	Sol +la chaux +2nappe	Sol +la chaux + 3nappe
Icbr2.5	4.67	6.67	3.90	2.65
Icbr5	5.75	8.19	5.00	3.35

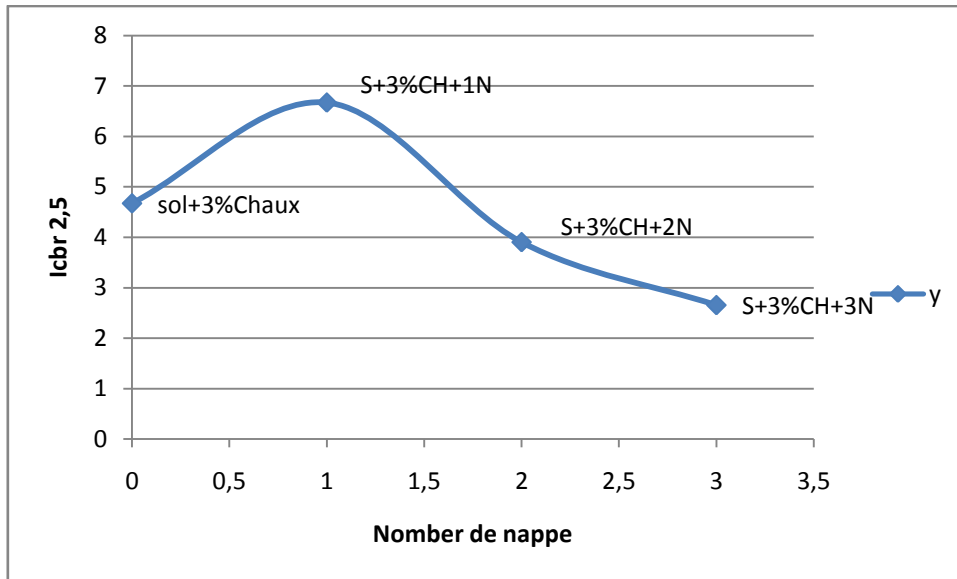


Figure IV .7 : la courbe de l'indice de CBR à 2.5mm, argile et argile + chaux avec les 3 nappes

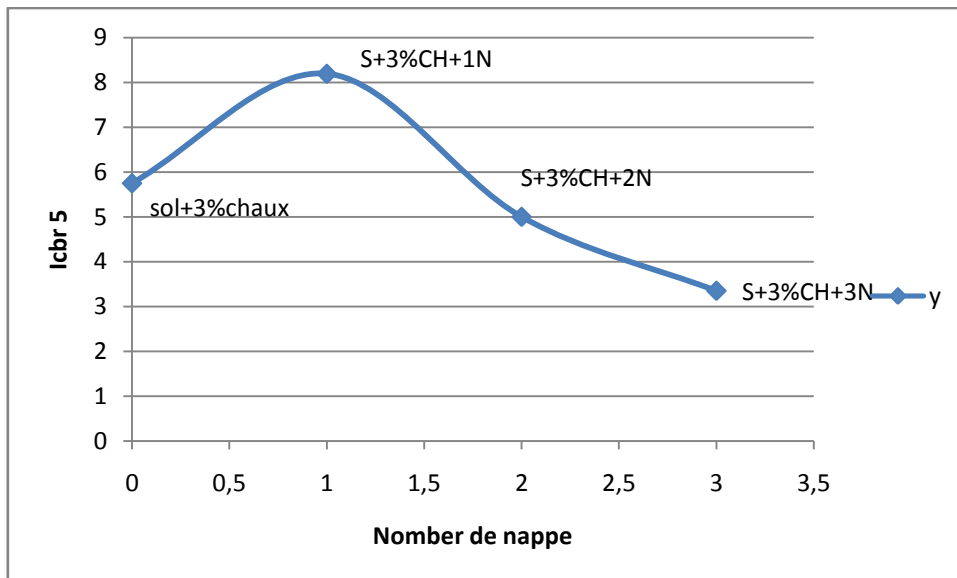


Figure IV .8 : la courbe de l'indice de CBR à 5mm, argile et argile + chaux avec les 3 nappes

Comparaison entre les courbes de l'indice de CBR (argile et argile + chaux) avec les 3 nappes :

- **Comparaison des résultats**

- 1- **Sol+ la chaux** : les résultats obtenus démontrent que le sol réagit très bien à l'ajout de la chaux, on a pu avoir une parfaite combinaison.
- 2- **Sol+ géotextile** : aussi les résultats que nous avons eu lors de cet essai de CBR, prouvent que le sol réagit parfaitement bien en présence des géotextiles.
- 3- **Sol + la chaux+ géotextiles** : nous avons remarqué qu'à la première tentative ou essai les résultats étaient pas mal mais en repoussant plus loin l'essai avec l'addition de secondes nappes, nous avons eu une réduction remarquable de la masse volumique, et

de l'indice de portance immédiat. Jusqu'à ici on conclut que (sol+ 3% chaux+1nappe de géotextile) donne des meilleurs résultats.

IV.3. Essai de compression simple

- **Résultats obtenus :**

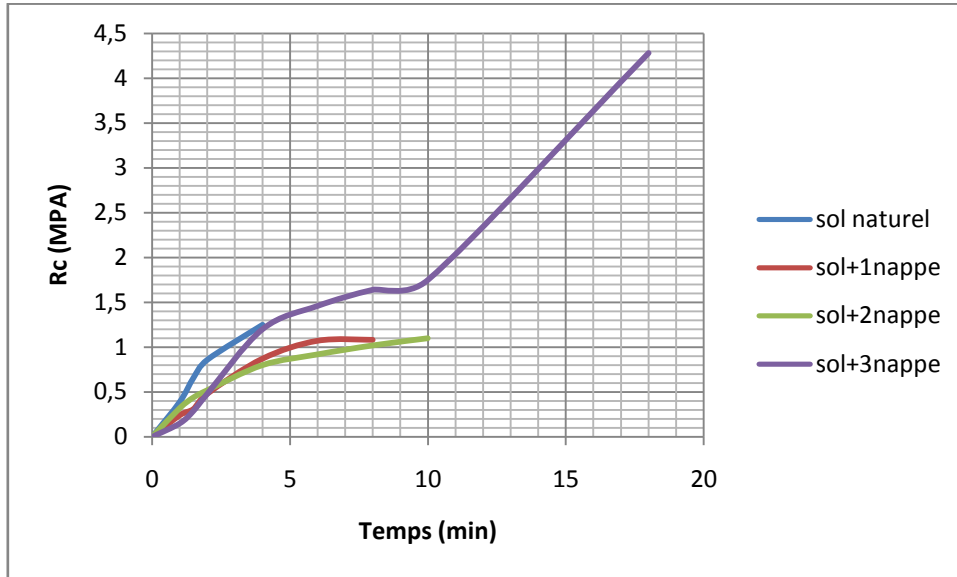


Figure IV.9: La variation de la résistance en fonction du temps (sol naturel)

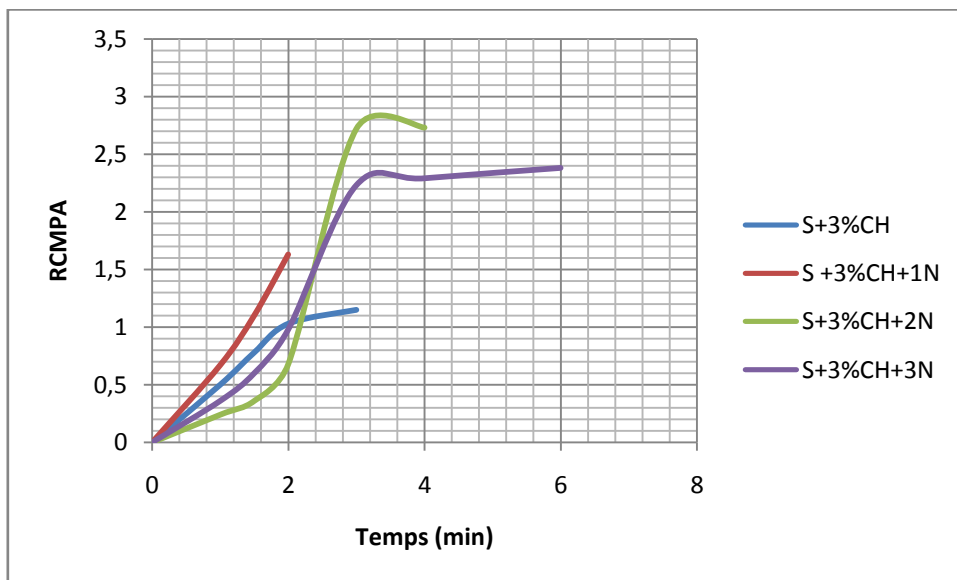


Figure IV.10 : La variation de la résistance en fonction du temps (sol naturel + la chaux)

Tableau IV.5 : la variation de la résistance en fonction des nappes de géotextiles.

CHAPITRE IV : DISCUSSION ET COMPARAISON

Paramètre	Sol (0 nappe)	Sol+ 1 nappe	Sol +2nappe	Sol + 3nappe
R_C (sol naturel) (MPa)	1.25	1.08	1.10	4.27

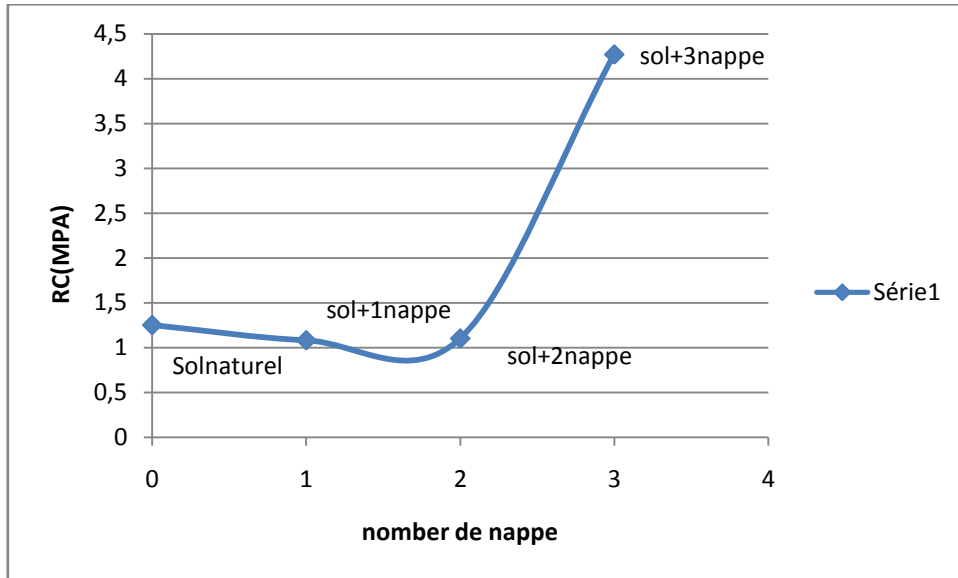


Figure IV.11 : Variation de la résistance en fonction des nappes de géotextile

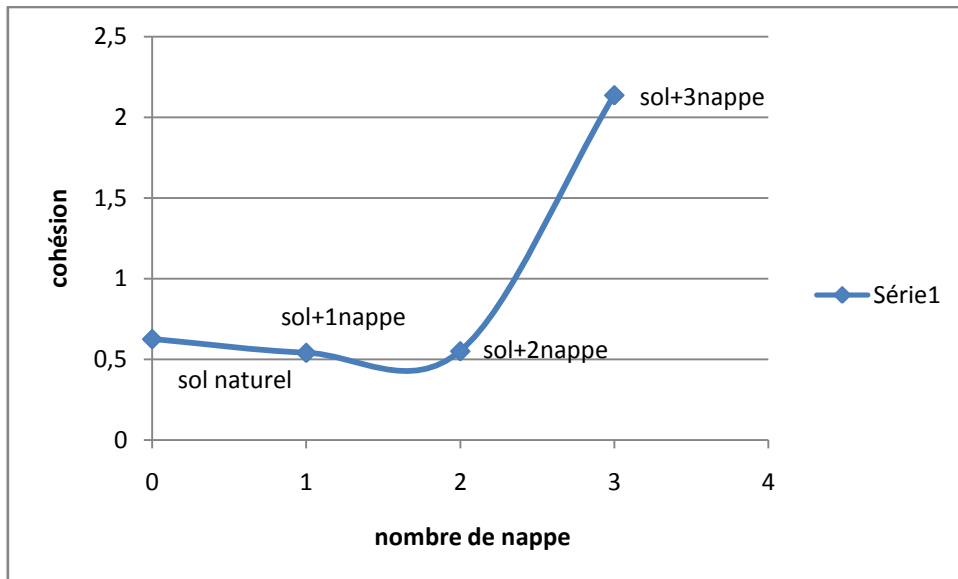


Figure IV.12 : Variation de la cohésion en fonction de nombre des nappes.

CHAPITRE IV : DISCUSSION ET COMPARAISON

Tableau IV.6 : La variation de la résistance en fonction des nappes de géotextile (sol naturel+ la chaux)

Temps max	Sol +la chaux	Sol +la chaux +1 nappe	Sol +la chaux +2nappe	Sol +la chaux + 3nappe
RC	1.15	1.57	2.73	2.38

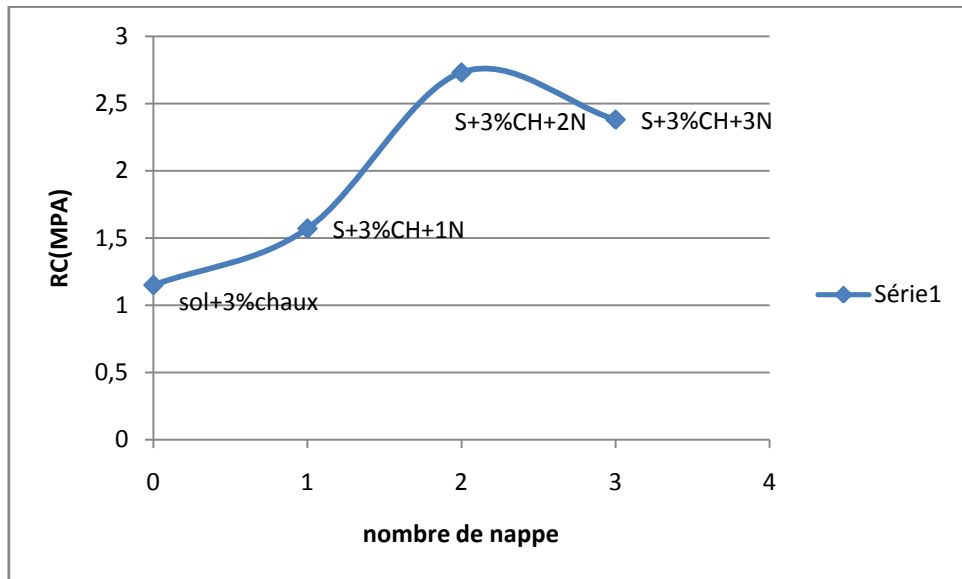


Figure IV.13 : Variation de la résistance en fonction de nombre des nappes.

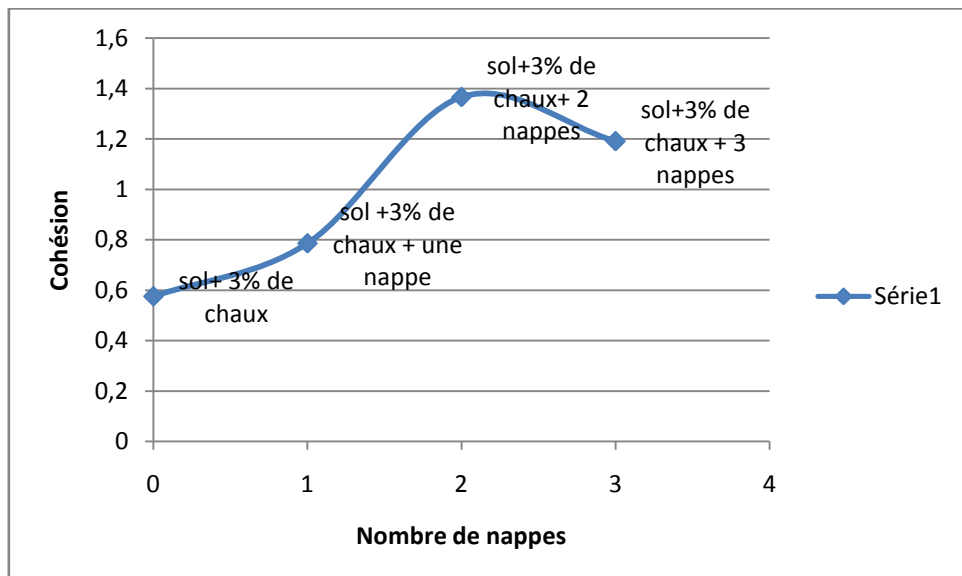


Figure IV.14 : La variation de la cohésion en fonction du nombre de nappes de géotextiles

Comparaison des résultats

- 1- **Sol naturel** : après 7 jours d’attente pour l’essai nous avons eu de bons résultats en compression qui étaient de 1.25 MPA.
- 2- **Sol naturel + la chaux** : après aussi 7 jours d’attente, les résultats étaient 1.15MPA
- 3- **Sol naturel + géotextile** : le sol réagit bien aux géotextiles, ceci se caractérise par la résistance à la compression qui était en croissance de façon permanente jusqu’à l’atteinte de la valeur $R_c = 4.27$ MPA, pour (sol +3nappes), mais (sol +2nappes) à long terme.
- 4- **Sol naturel + la chaux+ géotextiles** : cette fois ci notre essai se contente que de 2 nappes de géotextile en combinaison avec la chaux les résultats obtenus à ce fait sont satisfaisant mais au-delà de la 2ème nappe voir la 3ème, la résistance serait en réduction au bout de 7 minutes 50.pour cet essai nous pouvons nous contenter de 2 nappes.

IV.4. Comparaison avec d’autres auteurs

Introduction

La chaux éteinte est utilisés afin d’améliorer les caractéristiques mécaniques d’un sol, ainsi que le géotextile permet de le renforcer, en passant par un processus de :

- la teneur en eau (la densité sèche)
- l’indice de gonflement.
- l’indice de compressibilité.
- la résistance.
- l’indice de CBR.
- l’angle de frottement et la cohésion.

Dans ce chapitre, certaines recherches ont abouti à certains résultats en utilisant des ajouts spécifiques et ont été comparés aux résultats de l’ajout utilisé dans cette recherche avec un même pourcentage de 3% de chaux, et de 3 nappes de géotextile.

IV.4.1 Comparaison entre différents ajouts :

IV.4.1.1. Par rapport à la teneur en eau et la densité sèche

- **3 % de la chaux**

Tableau IV. 7: Variation de la teneur en eau et la densité sèche en fonction de pourcentage de la chaux.

Mélange (argile +la chaux)							
Auteurs	(%) de l’ajout	Teneur en eau (%)		Densité sèche (t/m^3)		Le rapport(%)	
		Avant	Après	Avant	Après	Teneur	Densité

CHAPITRE IV : DISCUSSION ET COMPARAISON

		ajout	ajout	ajout	ajout	en eau (%)	sèche (t/m^3)
Roumaissa et chahrazed (2021)	3	16.93	15.01	1.73	1.75	10.12	0.98
Andrews. Z, McGowan (2018)	3	20,9	20.98	1.41	1.49	0.99	0.94
M. MizrababoEi (2013)	3	16,4	16.60	1.9	2.10	0.98	0.90
Andrea Dominijanni et Mario Manasero (2018)	3	17	17.3	1.9	1.95	0.98	0.97

- Avec Trois nappes de Géotextile :

Par rapport à la teneur en eau et à la densité sèche :

Tableau IV.8 : Variation de la teneur en eau et la densité sèche en fonction de nombre des nappes de géotextile.

Mélange (argile +3 nappes)							
Auteurs	Nombre des nappes	Teneur en eau (%)		Densité sèche (t/m^3)		Le rapport(%)	
		Avant ajout	Après ajout	Avant ajout	Après ajout	Teneur en eau (%)	Densité sèche (t/m^3)
Roumaissa et chahrazed (2021)	3	16.93	16.93	1.73	1.83	1	0.94
Andrews k. Z, McGowan A (2018)	3	20.09	21	1.41	1.51	0.95	0.93
M. MizrababoEi (2013)	3	16,4	17	1.9	2.12	0.96	0.89
Andrea Dominijanni et Mario Manasero (2018)	3	17	18.88	1.90	2.31	0.90	0.82

- Pourcentage de la chaux avec 3 nappes de géotextile :

CHAPITRE IV : DISCUSSION ET COMPARAISON

Tableau IV.9 : Variation de la teneur en eau et la densité sèche en fonction de nombre des nappes de géotextile + 3% de chaux.

Mélange (argile +3% chaux + 3 nappes)							
Auteurs	Nombre des nappes+ % de la chaux	Teneur en eau (%)		Densité sèche (t/m^3)		Le rapport(%)	
		Avant ajout	Après ajout	Avant ajout	Après ajout	Teneur en eau (%)	Densité sèche (t/m^3)
Roumaissa et chahrazed (2021)	3	16.93	16.93	1.73	1.62	1	1.06
Andrews k. Z, McGowan A (2018)	3	20.09	21	1.41	1.49	0.95	0.94
M. MizrababoEi (2013)	3	16,4	16.89	1.90	1.99	0.97	0.95
Andrea Dominijanni et Mario Manasero (2018)	3	17	18.21	1.9	2.21	0.90	0.85

(Chahrazed et Roumaissa) :

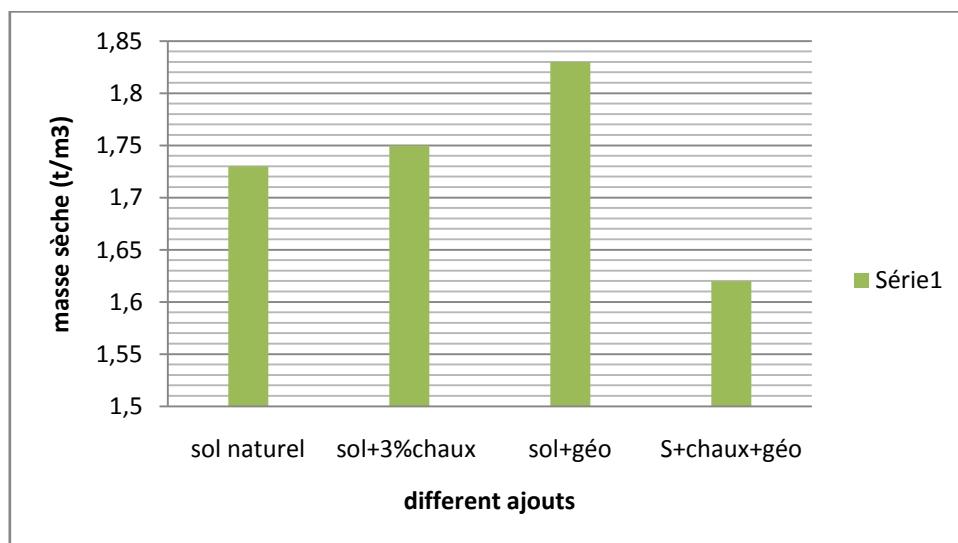


Figure IV.15 : Variation de la masse sèche en fonction de différents ajouts.

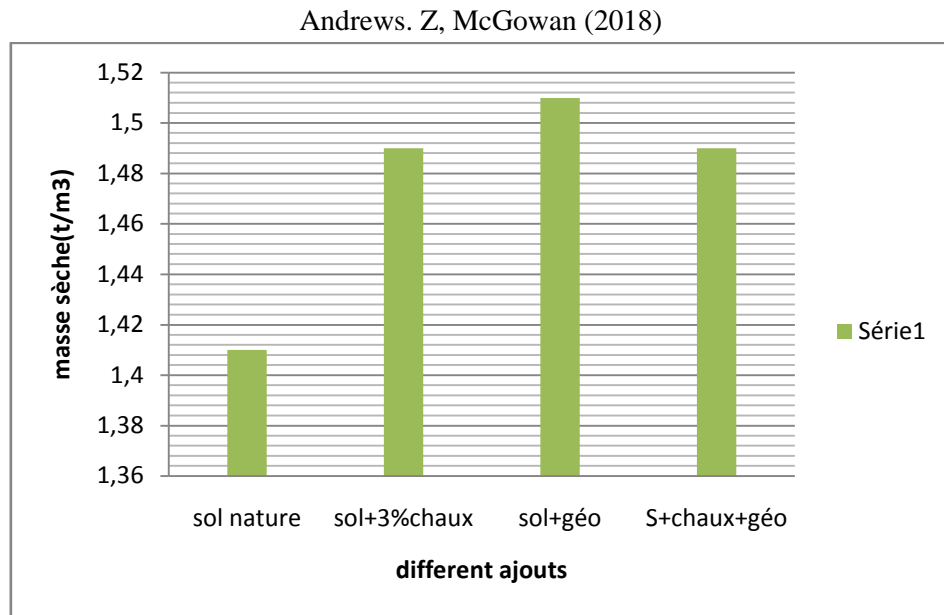


Figure IV.16 : Variation de la masse sèche en fonction de différents ajouts.

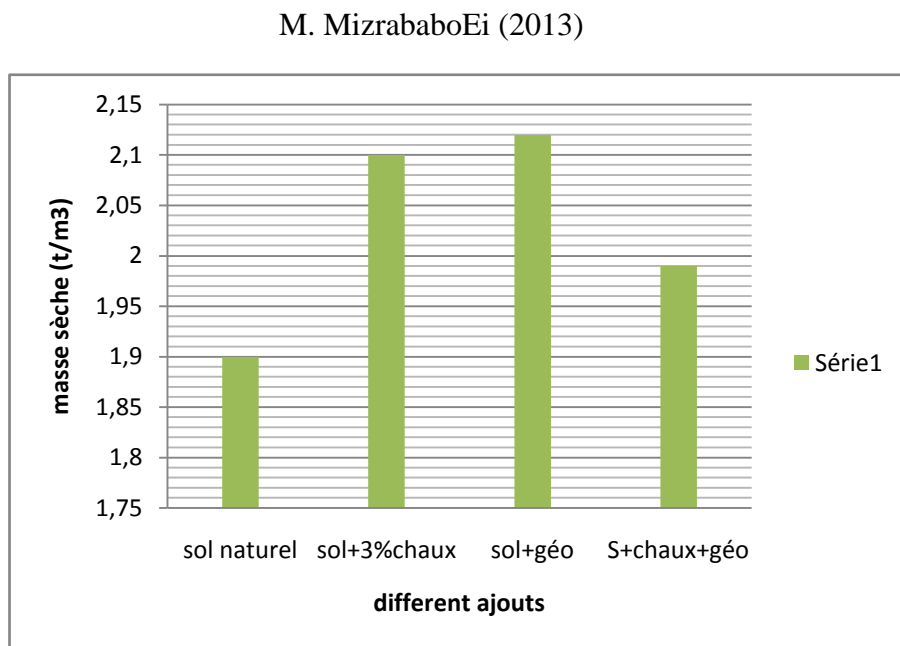


Figure IV.17 : Variation de la masse sèche en fonction de différents ajouts.

Andrea Dominijanni et Mario Manasero (2018)

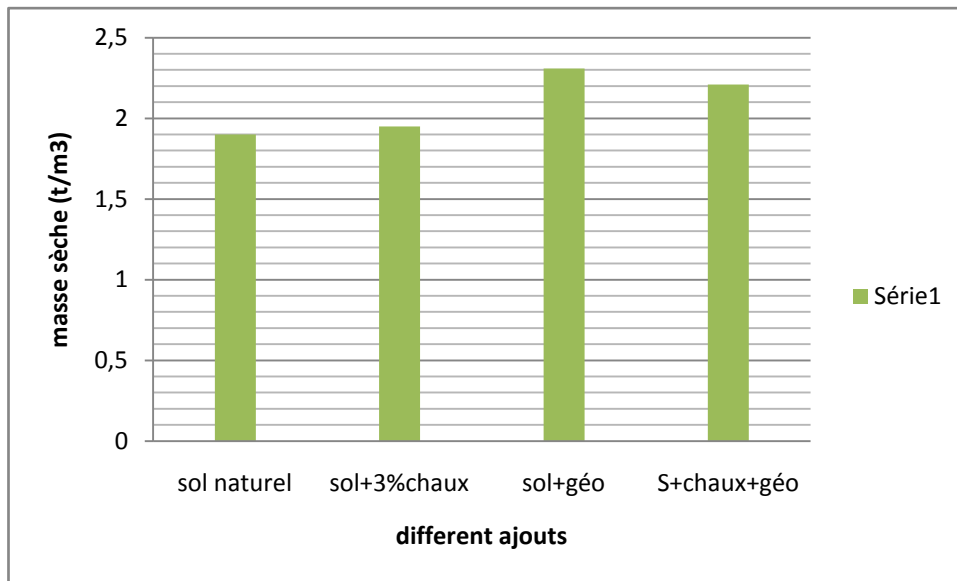


Figure IV.18 : Variation de la masse sèche en fonction de différents ajouts.

Interprétation

Il est remarquable que la densité optimale de la chaux et le géotextile ait augmenté comme l'expérience le confirme ça (Andrews k. Z, McGowan A (2018), M. MizrababoEi (2013), Andrea Dominijanni et Mario Manasero (2018), mais elle diminue avec le mélange de la chaux + les nappes.

En comparant avec les différents ajouts, le Géotextile est le meilleur parce qu'il n'absorbe presque pas bien d'eau au contraire il facilite le drainage de l'eau d'où notre sol atteint une densité maximale.

IV.4.2. Par rapport au l'Indice de CBR

1. La Chaux

Tableau IV.10: Variation de l'Indice de CBR en fonction de pourcentage de la chaux.

Mélange (argile +3% chaux)							
Auteurs	% de la chaux	Indice de CBR (2.5mm)		Indice de CBR (5mm)		Le rapport(%)	
		Avant ajout	Après ajout	Avant ajout	Après ajout	I _{CBR} (2.5mm)	I _{CBR} (5mm)
Roumaissa et Chahrazed (2021)	3	4.34	4.67	5.14	5.75	0.92	0.89

CHAPITRE IV : DISCUSSION ET COMPARAISON

C Silvani, P Villard (2016)	3	3.23	3.52	4.21	4.47	0.91	0.94
R, Kaouch, RE, Slimani (2018)	3	5.15	5.66	6.17	6.77	0.90	0.91
Philippe REIFFSTECK (2020)	3	4.40	4.55	5.22	5.63	0.96	0.92

2. Trois nappes de Géotextile :

Tableau IV.11: Variation de l'Indice de CBR en fonction de pourcentage de la chaux.

Mélange (argile +3 nappes)							
Auteurs	Nombre de nappes	Indice de CBR (2.5mm)		Indice de CBR (5mm)		Le rapport(%)	
		Avant ajout	Après ajout	Avant ajout	Après ajout	I _{CBR} (2.5mm)	I _{CBR} (5mm)
Roumaissa et Chahrazed (2021)	3	4.34	16.55	5.14	17.41	0.26	0.29
C Silvani, P Villard (2016)	3	3.23	5.36	4.21	7.13	0.62	0.59
R, Kaouch, RE, Slimani (2018)	3	5.15	8.01	6.17	7.90	0.64	0.78
Philippe REIFFSTECK (2020)	3	4.40	6.30	5.22	7.69	0.69	0.69

3. Pourcentage de la chaux avec 3 nappes de géotextile :

Tableau IV.12 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de pourcentage de la chaux et nombre des nappes.

Mélange (argile +3% chaux + 3 nappes)							
Auteurs	% de la chaux + N° des nappes	Indice de CBR (2.5mm)		Indice de CBR (5mm)		Le rapport(%)	
		Avant ajout	Après ajout	Avant ajout	Après ajout	I_{CBR} (2.5mm)	I_{CBR} (5mm)
Roumaissa et Chahrazed (2021)	3	4.34	6.67	5.14	8.19	0.65	0.62
C Silvani, P Villard (2016) (2016)	3	3.23	4.01	4.21	5.80	0.80	0.72
R, Kaouch, RE, Slimani (2018)	3	5.15	6.01	6.17	7.03	0.85	0.87
Philippe REIFFSTECK (2020)	3	4.40	5.01	5.22	5.90	0.63	0.81

- Variation de l'Indice de CBR a (2.5 mm)

Chahrazed et Roumaissa (2021)

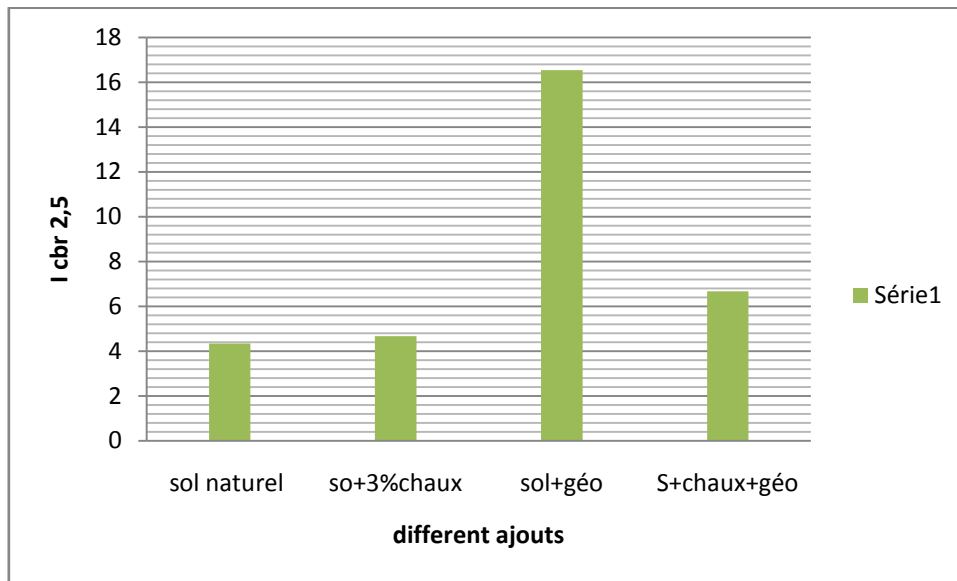


Figure IV.19 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de différents ajouts.

C. Silvani, P. Villard (2016)

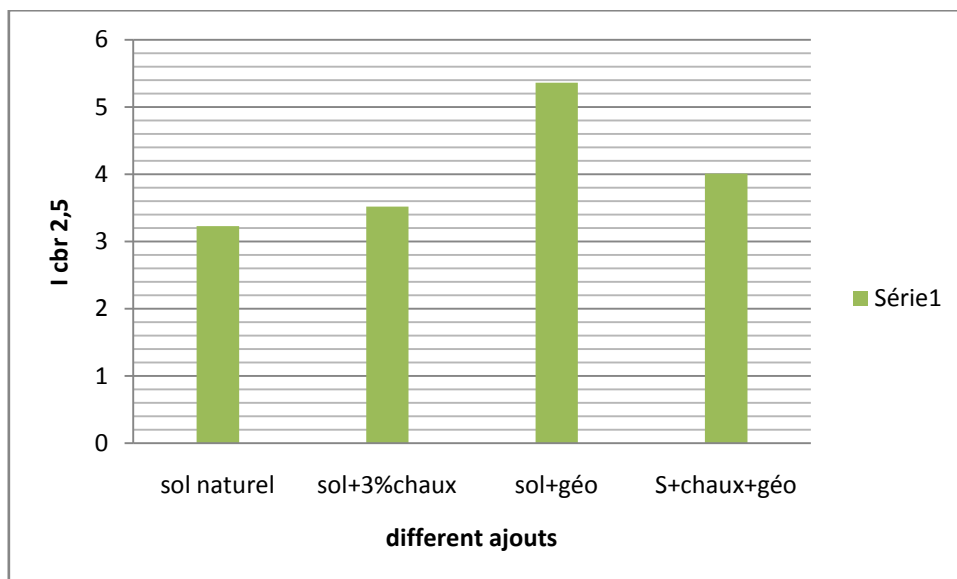


Figure IV.20: Variation de l'Indice de CBR en fonction de différents ajouts.

R. Kaouche, RE. Slimani (2018)

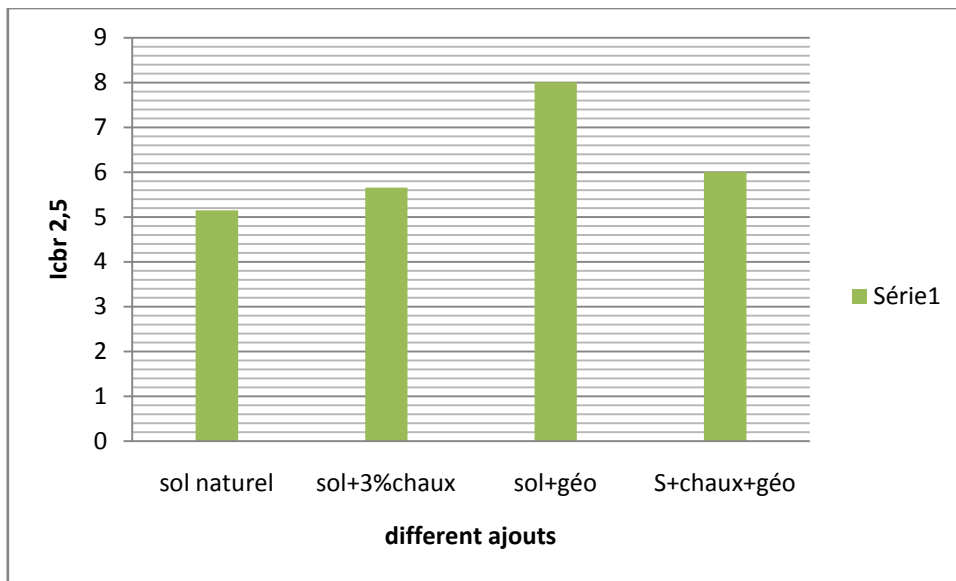


Figure IV.21 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de différents ajouts.

Philippe REIFFSTECK (2020)

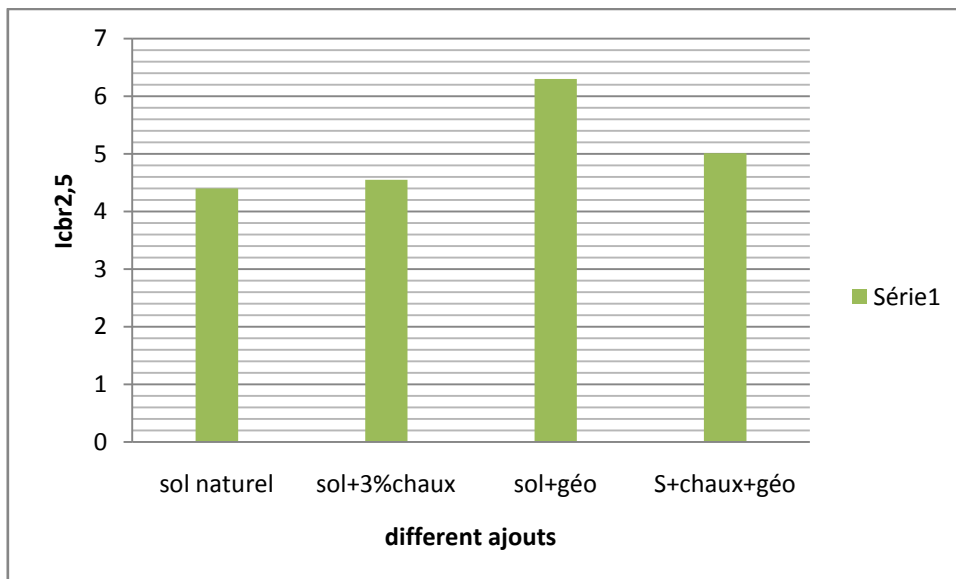


Figure IV.22 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de différents ajouts.

- Variation de l'Indice de CBR a (5 mm) :

Chahrazed et Roumaissa (2021)

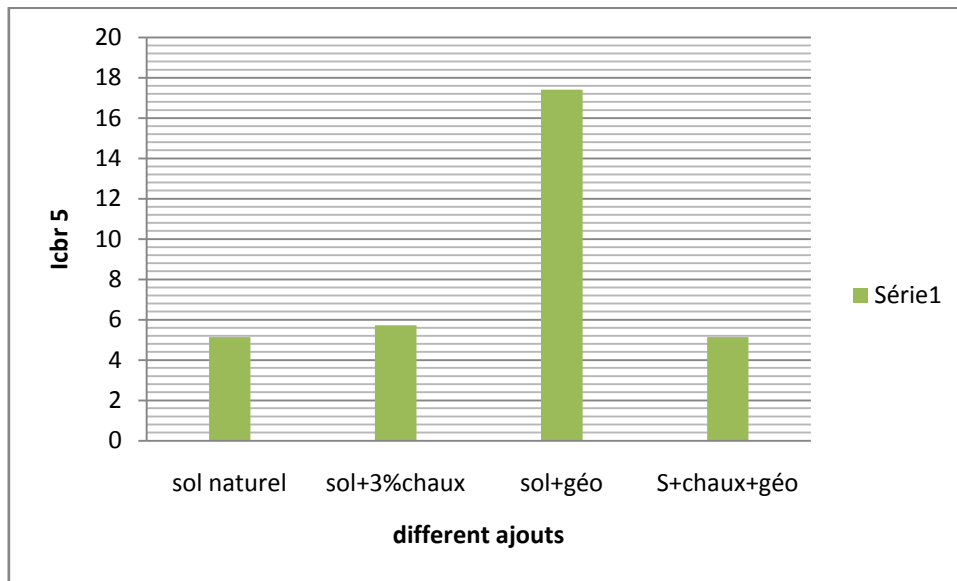


Figure IV.23 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de différents ajouts.

C. Silvani, P, Villard (2016)

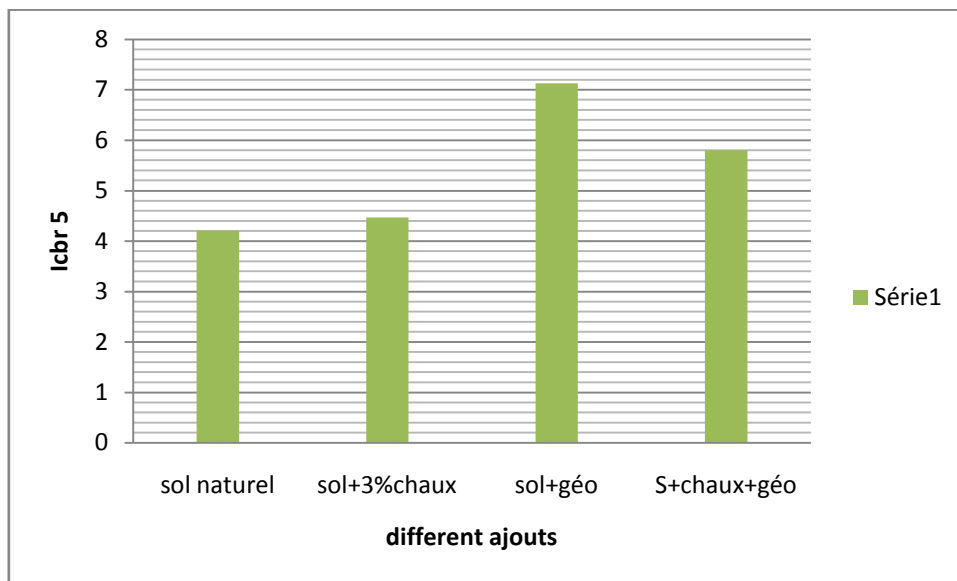


Figure IV.24 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de différents ajouts.

R. Kaouche, RE.Slimani (2018)

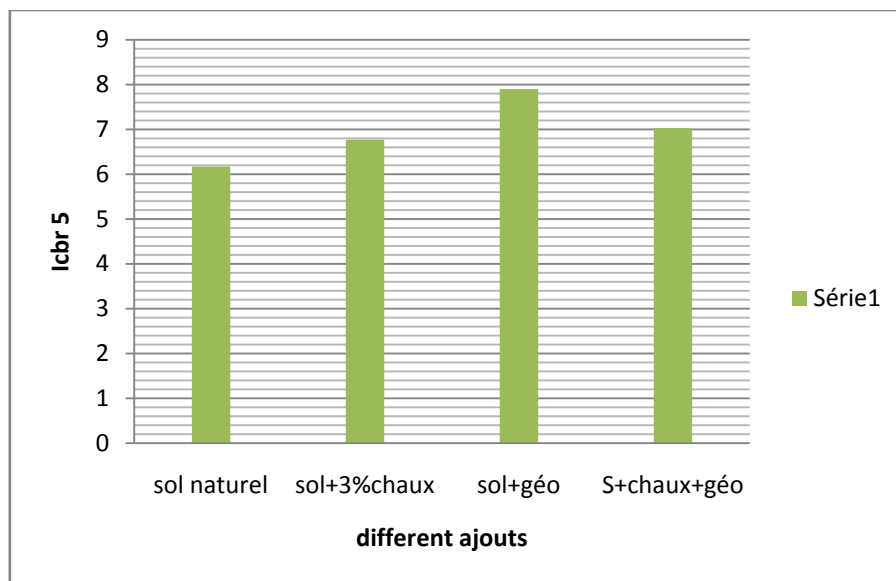


Figure IV.25 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de différents ajouts.

PhilippeReiffsteck (2020)

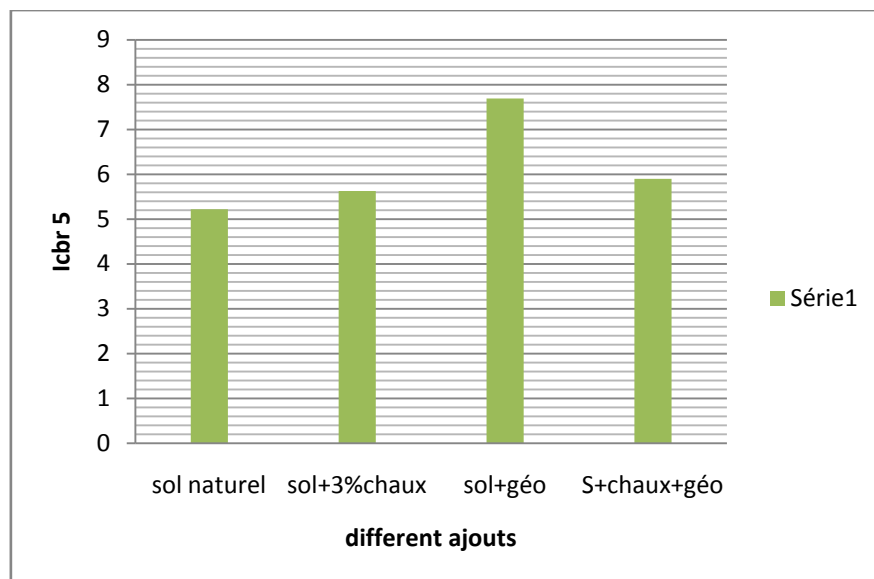


Figure IV.26 : Variation de l'Indice de CBR en fonction de différents ajouts.

Interprétation :

Il est clair que l'indice de CBR à 2.5 et à 5mm pendant le traitement (sol + la chaux) ainsi que pendant le renforcement (sol+ géotextile) a augmenté comme l'expérience des auteurs précédents le confirme, (Philippe Reiffsteck (2020), R. Kaouche, RE.Slimani (2018),C. Silvani, P. Villard (2016))

Aussi en comparant les différents ajouts (la chaux et géotextile) on a des résultats plus satisfaisants avec les nappes de géotextile.

IV.5. Par rapport au la résistance et la cohésion

1. La Chaux :

Tableau IV.13 : Variation de la résistance et la cohésion en fonction de la chaux

Mélange (argile +la chaux)							
Auteurs	(%) de l'ajout	RC(MPA)		C		Le rapport(%)	
		Avant ajout	Après ajout	Avant ajout	Après ajout	RC(MPA)	C(MPA)
Roumaissa et Chahrazed (2021)	3	1.25	1.15	0.62	0.57	1.08	1.08
M. khelifi , H. hadbi (2016)	3	1.14	1.06	0.57	0.40	1.22	1.42
A.huckert, P.Villard (2016)	3	1.43	1.22	0.71	0.46	1.16	1.54
R. djennah (2016)	3	0.98	0.79	0.49	0.22	1.24	2.22

2. Trois nappes de Géotextile :

CHAPITRE IV : DISCUSSION ET COMPARAISON

Tableau IV.14 : Variation de la résistance et la cohésion en fonction de la chaux

Mélange (argile +3nappe géo)							
Auteurs	Nombre de nappe	RC(MPA)		C		Le rapport(%)	
		Avant ajout	Après ajout	Avant ajout	Après ajout	RC(MPA)	C(MPA)
Roumaissa et Chahrazed (2021)	3	1.25	4.26	0.62	2.13	0.29	0.29
M.khelifi ,H. hadbi (2016)	3	1.14	4.23	1.19	2.71	0.43	0.43
A.huckert, P.Villard (2016)	3	1.43	3.69	0.99	1.51	0.65	0.65
R.djennah (2016)	3	0.98	4.90	0.52	1.45	0.35	0.35

3. Pourcentage de la chaux avec 3 nappes de géotextile :

Tableau IV.15 : Variation de la résistance et la cohésion en fonction de la chaux

Mélange (argile +la chaux+3nappe géo)							
Auteurs	3%chaux +3nappes géo	RC(MPA)		C		Le rapport(%)	
		Avant ajout	Après ajout	Avant ajout	Après ajout	RC(MPA)	C(MPA)
Roumaissa et Chahrazed (2021)	3	1.15	2.38	0.57	1.19	0.48	0.48
M.khelifi, H.hadbi (2016)	3	1.14	2.40	1.01	1.48	0.68	0.68

CHAPITRE IV : DISCUSSION ET COMPARAISON

A.huckert, P.Villard (2016)	3	1.43	1.98	0.6	1.11	0.54	0.54
R.djennah (2016)	3	0.98	2.03	1.16	1.56	0.74	0.74

Chahrazed et Roumaissa (2021)

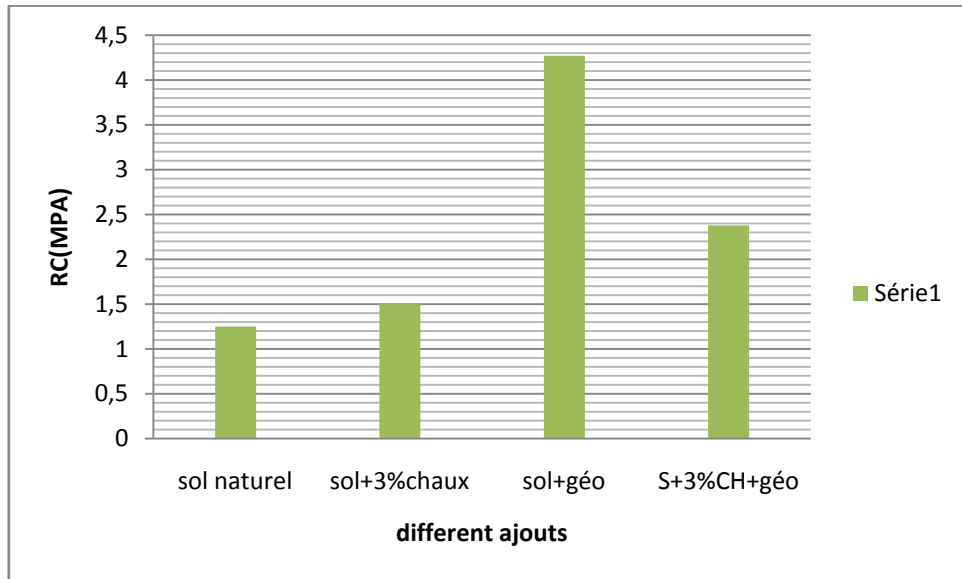


Figure IV.26 : Variation de la résistance en fonction de différents ajouts.

M.khelifi, H. hadbi (2016)

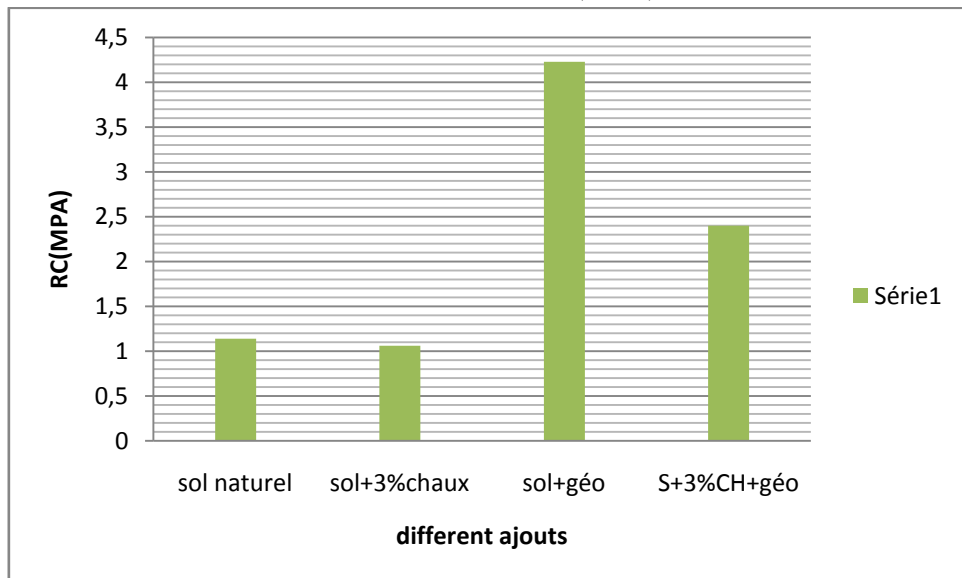


Figure IV.27 : Variation de la résistance en fonction de différents ajouts.

A.huckert, P.Villard (2016)

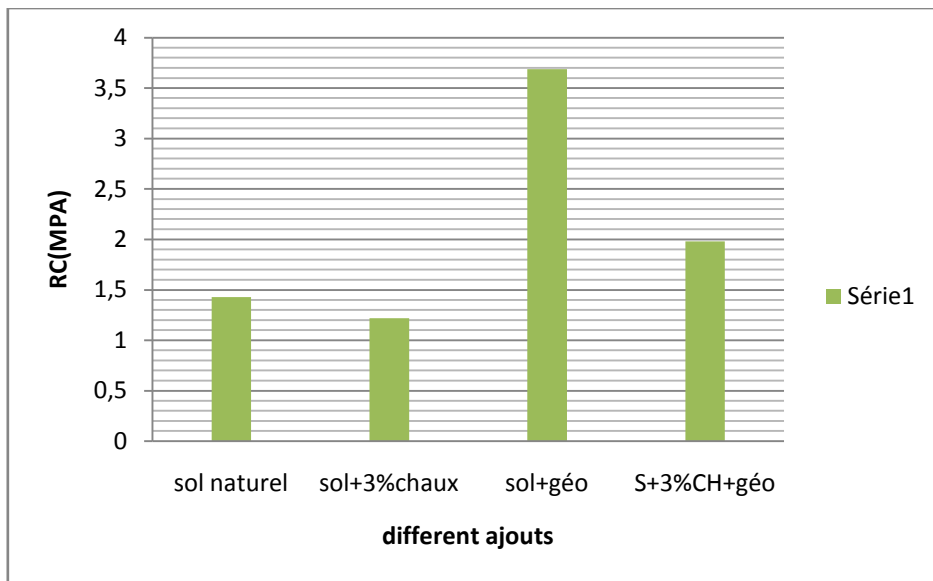


Figure IV.28 : Variation de la résistance en fonction de différents ajouts.

R. djennah (2016)

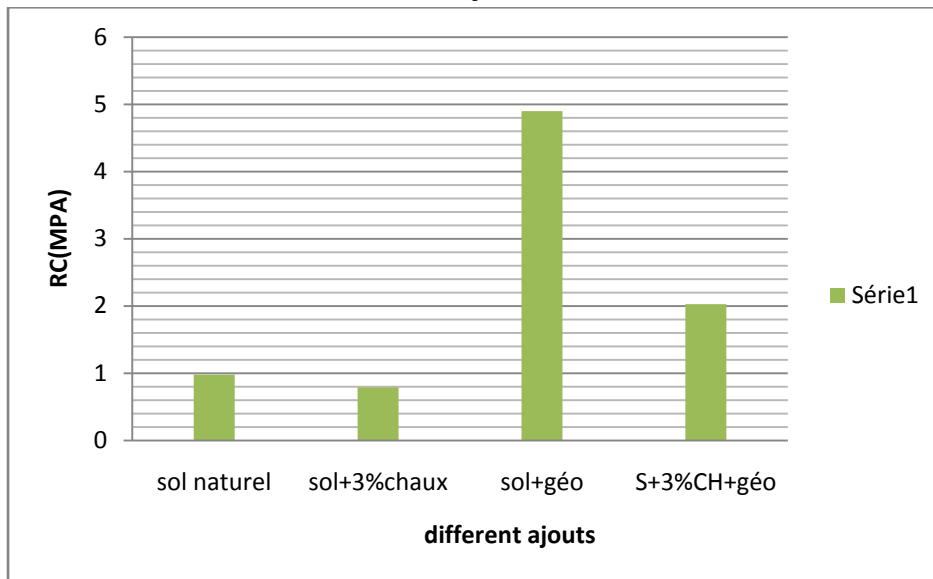


Figure IV.29 : Variation de la résistance en fonction de différents ajouts.

- **Interprétation compression**

- ✓ Lors de cet essai la résistance de compression et la cohésion ont toutes les deux augmenté avec la chaux et le géotextile simultanément.
- ✓ En tenant en comptes les résultats de références obtenus par d'autres auteurs (M.khelifi, H. hadbi (2016), R. djennah (2016), A.huckert, P. Villard (2015)), le géotextile reste le meilleur moyen d'amélioration des caractéristiques du sol.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans le but de l'amélioration de notre sol, dans cette étude on est passées par plusieurs essais histoire de nous approfondir, au tout début nous devions l'identifier, le classer puis le traiter et enfin le renforcer.

Donc pour l'identifier et le classer on est passées par caractérisation physique et mécanique qui contient des essais physiques démontrant que :

- ✓ La teneur en eau : moins y avait de l'eau dans notre sol plus sa masse volumique avait tendance à accroître.
- ✓ La granulométrie de notre échantillon de sol a prouvé que nous avons plus de 50% de particules fines, ce qui a engendré une courbe étalée et continue.
- ✓ Les limites d'Atterberg, nous ont mené à avoir un IP de 14 ce qui implique que notre sol est reconstitué, de classement moyennement plastique, de gonflements faible à moyen.
- ✓ Les résultats du proctor ont aussi confirmé les résultats de la teneur en eau moins y a de l'eau plus la masse volumique sèche est en hausse et ceci dit que ça évolue dans le sens voulu.
- ✓ Puis concernant le Californian bearing ratio les résultats étaient les suivants : CBR, $I_{CBR(2.5mm)} = 4.34$ et $I_{CBR(5mm)} = 5.14$ ce qui confirme que notre sol n'est pas vraiment mauvais, peut-être pas vraiment résistant mais ça ne fait pas de lui un sol médiocre non plus.
- ✓ En étude oedométrique, le coefficient de gonflement obtenu confirme plutôt les résultats des limites d'Atterberg, notre sol sans traitement tend vers le gonflement.
- ✓ Lors du cisaillement nous avons constaté une toute petite cohésion de 0.393 et un angle de frottement de 29° ceci dit que même si y a plus de 50% de particules infimes inférieures à $80\mu m$, les particules de dimensions plus importantes jouent un rôle d'où l'angle de frottement de 29°
- ✓ En compression simple au bout de 4 min la résistance a atteint 1.25(MPA), avec 0.982 (KN) de force, et 0.62 comme cohésion, une preuve de plus que les caractéristiques de notre sol naturel ne font pas de lui un sol médiocre.

Nous procéderons au traitement par la chaux en premier lieu puis aux géotextiles en second.

A un premier temps, lors du traitement à la chaux nous sommes passées par les mêmes essais, mais en reportant les résultats ou les conclusions obtenues de manière brève, nous avons constaté qu'avec la chaux, notre sol était résistant, ce qui fait que cette dernière a contribué au renforcement des liaisons mais au bout d'une semaine lors de l'essai de compression la chaux était sèche et l'échantillon s'était fissuré voir cassé.

Quant au renforcement par géotextile, au bout d'une nappe pareille la résistance était au rendez-vous, même en ajoutant une 2^{ème} puis une 3^{ème}, c'était un effet beaucoup mieux. Lors de l'essai oedométrique a affiché des résultats souhaité, mais après à la suite des 2 autres géotextiles l'essai n'a pas pu aboutir, suite au passage de la trousse qui était empêchée par les nappes.

Conclusion générale

Entre le traitement à la chaux et le renforcement via géotextile, on a vécu une contrariété, car pour certains essais tels que le CBR et la compression les 3 nappes ne posaient aucun souci, mais ce n'était pas le cas concernant l'oedomètre. Nous aurons recours à une alternative presque approximative et optons pour une solution des deux soit se limiter à une seule nappe soit avoir les 2 autres en plus, cela reste dépanadant du type de notre ouvrage.

Donc récapitulons, à la fin des essais mécaniques nous avons constaté que lors du Proctor, du CBR ainsi que la compression simple notre sol avec géotextile était plus résistant qu'avec la chaux d'après les calculs.

Pareil lorsque le sol est traité à la chaux et renforcé au géotextile, notre sol a donné de meilleurs résultats avec uniquement les nappes de géotextile et ceci toujours lors des essais mécaniques.

Enfin nous déduisons que pour notre sol, il ne nous en fallait pas beaucoup,

Plutôt un choix des deux soit la chaux soit le renforcement par géotextile et encore concernant les géotextiles nous nous contenterons d'une seule nappe, cette dernière assure sécurité, économie et rapidité.

Verdict, il est préférable d'opter pour le renforcement par géotextile.

Même en utilisant les résultats de d'autres auteurs comme référence, afin d'effectuer d'amples comparaisons, nous avons non seulement aboutis aux mêmes déductions et aussi nous avons soutenu ou confirmé notre choix qui tend vers le géotextile

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ZAIMA Y. BOUBEZARI I. (2019). Introduction. Etude du comportement statique et dynamique d'un massif en sol renforcé.
- [2] Mtaterre.(2017).comment se forme le sol.*Les sols pourquoi et comment les protéger*
<https://www.mtaterre.fr/dossiers/les-sols-pourquoi-et-comment-les-protger/comment-se-forme-le-sol>
- [3] alloprof. (2014). Les types de sol. *Sciences et technologies*.
<https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/les-types-de-sols-s1330>.
- [4] organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture. Les propriétés physiques des sols. *Portail d'informations sur les sols*.
<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/proprietes-du-sol/proprietes-physiques/fr/>
- [5] Wikipedia. (2007). Propriétés mécaniques des sols. *Sol pédologie*
https://fr.wikipedia.org/wiki/Caract%C3%A9ristiques_m%C3%A9caniques_des_sols_s%20sols%20d'autre%20part
- [6] VERI. qualiagro. (14 décembre 2011). Mis à jour (17 janvier 2013). Propriétés chimiques du sol. *Propriétés des sols*
<https://www6.inrae.fr/qualiagro/Efficacite-Agronomie/Proprietes-chimiques-du-sol>
- [7] Mémoireonline. (15 juin 1991). Définition des argiles. *Propriétés physico-chimique des argiles et minéraux argileux*.
<https://www.memoireonline.com/06/15/9140/Argile-et-mineraux-argileux-proprietes-physico-chimiques-et-proprietes-et-proprietes-collo.html>
- [8]Les experts ooreka. Ooreka. Sol argileux caractéristiques et plantes compatibles. *Les bases du jardinage*
<https://jardinage.ooreka.fr/astuce/voir/276327/sol-argileux-caracteristiques-et-plantes-compatibles#:~:text=Caract%C3%A9ristiques%20d'un%20sol%20argileux&text=Il%20a%20difficilement%20passer%20l,le%20rend%20boueux%20et%20collant>
- [9] François HERNOT. (2016). Différentes familles des argiles. *Thèse doctorale. L'argile, son utilisation à l'officine*
<https://dune.univ-angers.fr/fichiers/20073109/2016PPHA5426/fichier/5426F.pdf>
- [10] Houda HAOUAM. (2010). Définition des géo-synthétiques. *Etude numérique d'un mur de soutènement en sol stabilisé et renforcé avec fibres et géo-grilles*
<https://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2015/02/HAOUAM-HOUDA.pdf>
- [11]ZAIMA Y. BOUBEZARI I. (2019). Les différents types de géo-synthétique. *Etude du comportement statique et dynamique d'un massif en sol renforcé*
[file:///C:/Users/ECC/Downloads/M-GC.GEO-2019-11%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/ECC/Downloads/M-GC.GEO-2019-11%20(1).pdf)
- [12] Novintis.com. Définition des géotextiles. *Nos produits géotextiles*.
<http://www.novintiss.com/fr/definition-geotextile.html>
- [13] R. Richard, J. Bathurst, Traduit par François Caquel, La Société Internationale des Géo-synthétiques IGS, fonctions des géo-synthétiques.

BIBLIOGRAPHIE

<https://www.geosyntheticssociety.org/wpcontent/plugins/resources/documents/Functions/French.pdf>

[14] Futura science. Définitions de la chaux. *Futura maison*.
<https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-chaux-5840/>

[15] Terre vivante. Forums. *Les différents types de chaux. Terre vivante l'écologie pratique*.
<https://www.terrevivante.org/202-les-differents-types-de-chaux>

[16] Philippe SOUCHU. (23 janvier 2015). Seteclerm. Action de la chaux sur le sol. *Le traitement des sols en place à la chaux*.
<http://doc.lerm.fr/traitement-sols-en-place-chaux/#>

[17] GRAYMONT. Stabilisation de sol. *La chaux dans la stabilisation des sols*.
<https://www.graymont.com/fr/marches/materiaux-de-contruction/la-chaux-dans-la-stabilisation-des-sols>

[18] Houda HAOUAM. (2010). Historique de renforcement des sols. . *Etude numérique d'un mur de soutènement en sol stabilisé et renforcé avec fibres et géo-grilles*.
<https://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2015/02/HAOUAM-HOUDA.pdf>

[19] Terrassier.net. Principe de renforcement. *Travaux de terrassements*.
<https://www.terrassier.net/technique-de-renforcement-du-sol/>

[20] Nivellement.com. (2014). objectif du renforcement. *Les procédés des renforcements du sol*.
<http://www.nivellement.com/le-procede-de-renforcement-du-sol>

[21] AUTRET, PLAN. (20/11/2010). Essai au bleu de méthylène. *The national academies of sciences engineering*.
<https://trid.trb.org/view/1044143>

[22] M.GHOMARIF et A.BENDI-OUIS. (2007/2008). Essai de la teneur en eau. *Science des matériaux de construction*.
https://ft.univ-tlemcen.dz/assets/uploads/pdf/departement/gc/tp/teneur_en_eau.pdf

[23] optimisé par GOOGLE. (2011). Essai de la granulométrie. *Les essais de laboratoire de génie civil*.
<https://essai-laboratoire.blogspot.com/>

[24] IFSTTAR. (1987). Essai des limites d'Atterberg. *Méthode d'essai LPC n° 19*.
https://www.ifsttar.fr/fileadmin/user_upload/editions/lcpc/MethodeDEssai/MethodeDEssa i-LCPC-ME19.pdf

[25] optimisé par GOOGLE. (2011). Essai proctor. *Les essais de laboratoire de génie civil*.
<https://essai-laboratoire.blogspot.com/2013/03/essai-de-proctor.html>

[26] sol mesure géotechnique et agronomie. Essai de cisaillement. *Mécanique des sols : essai de cisaillement*.
<http://www.sols-mesures.com/wp-content/uploads/2015/11/memo-essais-cisaillement.pdf>

BIBLIOGRAPHIE

[27] Ghiles MEBARKI. (25/1/2018). Essai CBR (californian bearing ratio). *Exposé du module mécanique des milieux granulaires.*

<https://fr.slideshare.net/GhilesMEBARKI/lessais-et-la-mthode-cbr>

[28] Geo.S.Lab. essai oedométrique. *Mécanique des sols exposés.*

<http://www.geoslab.fr/Gonflement-oedometrique.php>