

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'ingénierat
- Département : Génie Civil
- Domaine : Sciences et techniques
- Filière : Génie Civil
- Spécialité : Géotechnique.

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème :

**ETUDE DES CHANGEMENTS DES PROPRIETES MECANIQUES
D'UN SOL RENFORCE AVEC DIFFERENTES TYPES DE
GEOTEXTILES.**

Présenté par : TELLAI YOUB

Encadrant : *BOUKHATEM GHANIA M.C.A Université Badji Mokhtar – ANNABA*

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Président
HACENE CHAOUCHE ABDELMADJID	PROFESSEUR	Badji Mokhtar Annaba	Président
BOUKHATEM GHANIA	M.C.A	Badji Mokhtar Annaba	Encadrant
OTHMANI NADIA	M.C.A	Badji Mokhtar Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

REMERCIEMENTS

D'abord dieu merci qui nous 'a donné tous pour accomplir ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur

*Mme : **BOUKHATEM GHANIA**, le maître de conférences à Université Badji Mokhtar Annaba qui a suivi de près notre travail. Nous la remercions beaucoup pour sa confiance, et sa patience.*

*Nous tenons à remercier tous nos enseignants, du primaire jusqu'au l'étude supérieurs, En particulier : Pr **MEKSAOUINE MOHAMED**, Dr **HAMMOUDA ABDELAZIZ**, Mr **CHIHEB ABDESLEM** et Mme **KENHANI ATIKA**.*

Nous remercions le président et membres de jury qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail.

Nous remercions nos chers parents et toutes nos grandes familles pour leur soutien et encouragement.

*Nous remercions toute l'équipe du laboratoire des travaux publique de l'est qui nous a bien orientés pendant notre période de stage en particulier : Mr **SEDIRA NABIL**.*

*Nous remercions tous nos amis pour leur encouragement en particulier : Mr **BRAHAM SALAH**, Mr **DJEMILI MED RAFIK**, Mr **HADDAD OMAR***

Nous remercions tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin afin de réaliser ce travail.

Résumé

La faible portance et résistance de certains types de sols nous oblige de construire les ouvrages sur des grandes profondeurs, ou changer la mauvaise partie du sol par une autre couche de bonne qualité, ou chercher un autre endroit pour faire le projet. Afin d'éviter ce choix coûteux, on peut faire comme solution l'amélioration du sol avec de la chaux et l'ajout des nappes de géotextile de renforcement. Grace à notre étude expérimentale, nous présentons l'effet de la chaux et ces nappes sur le sol. Les différentes caractéristiques de géotextile permettent de diminuer les tassements dans un sol et d'améliorer la capacité portante des sols d'assise pour construire dans les meilleures conditions.

Mots clés : Portance, la chaux, géotextile, capacité portante.

Abstract

The low bearing capacity and resistance of certain types of soil obliges us to build the structures to great depths, or change the bad part of the soil by another layer of good quality, or to look for another place to do the project. In order to avoid this costly choice, one can do as a solution, improving the soil with lime and adding layers of reinforcing geotextile. Thanks to our experimental study, we present the effect of lime and these slicks on the soil. The different characteristics of geotextile make it possible to reduce settlements in the soil and improve the bearing capacity of the foundation soils to build in the best conditions.

Key words : bearing capacity, lime, geotextile.

ملخص

إن قدرة التحمل المنخفضة والمقاومة لأنواع معينة من التربة تجبرنا على بناء الهياكل على أعماق كبيرة، أو تغيير الجزء السيئ من التربة بطبقة أخرى ذات نوعية جيدة، أو البحث عن مكان آخر للقيام بالمشروع. من أجل تجنب هذا الاختيار المكلف، يمكن لنا ان نعمل على حل للمشكل، كتحسين التربة مع الجير وإضافة طبقات من الجيوتكستيل للتقوية. بفضل دراستنا التجريبية، نقدم تأثير الجير وهذه الطبقات على التربة. تجعل الخصائص المختلفة للجيوتكستيل من الممكن تقليل الهبوط في التربة وتحسين قدرة تحمل التربة الأساسية للبناء في أفضل الظروف.

الكلمات المفتاحية: قدرة التحمل، الجير، الجيوتكستيل.

Liste des figures

Chapitre 01 : Etude bibliographique.

Figure 1.1 Constituants d'un sol. [1].....	1
Figure 1.2 Phase liquide d'un sol.[1].....	2
Figure 1.3 Processus de formation de l'argile (Dananaj et al, 2005).....	5
Figure 1.4 Les différents types de philo silicates formés au cours de L'altération (Tucker, 2001).....	6
Figure 1.5 Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite. Gueddouda, M. K. (2004).....	7
Figure 1.6 Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite. Hafsi, A. (1993).....	7
Figure 1.7 Vue isométrique de la structure atomique de l'illite. (cité par Bengraa, 2004).....	8
Figure 1.8 Les géotextiles [6].	9
Figure 1.9 Les géo membranes [6].....	9
Figure 1.10 Les géo synthétique benthonique(GSB) [6].....	10
Figure 1.11 Géo espaceur.....	10
Figure 1.12 Géo grille.....	11
Figure 1.13 Les fonctions des géo synthétiques [6].....	12
Figure 1.14 Les tissés de fils monofilaments, les tissés de fils multifilaments, les tissés de bandelettes.Reiffsteck Philippe.....	14
Figure 1.15 Géotextile tissé [Web1].....	14
Figure 1.16 Géotextile non tissé [Web1].....	15
Figure 1.17 Fonction de Séparation..DuPont Typar	16
Figure 1.18 Fonction de Filtration. Fibertex France SARL.	17
Figure 1.19 Fonction de drainage. Fibertex France SARL.....	18
Figure 1.20 Fonction de Renforcement. Stéphane Lambert.	19
Figure 1.21 Fonction de Protection. Fibertex France SARL.....	19
Figure 1.22 Fonction anti-érosion [Web3].....	20
Figure 1.23 Déversement des matériaux sans rouler dessus le géotextile. DuPont Typar.....	21
Figure 1.23.1 Les différentes formes de défauts du géotextile	22
Figure 1.24 Durée maximale d'exposition des géotextiles.[6].....	22
Figure 1.25 Traitement de sol par épandage de chaux. Photo (razel).....	26
Figure 1.26 Cycle de la chaux. Maison nature.....	27
Figure 1.27 Le renforcement du sol. Gozzoli shutterstock.....	31

Chapitre 02 : Etude expérimentale.

Figure 2.1	Le matériau utilisé.....	33
Figure 2.1.1	Terrassement du sol.....	33
Figure 2.2	Le lieu de prélèvement. Google maps.....	33
Figure 2.3	La chaux utilisée.....	34
Figure 2.4	Echantillon de matériau.....	34
Figure 2.5	La balance.....	34
Figure 2.6	L'étuve.....	35
Figure 2.7	Série des tamis.....	36
Figure 2.8	Bicher de 500 ml.....	38
Figure 2.9	solution d'EXAMITAPHOSPHATE.....	38
Figure 2.10	Malaxeur.....	39
Figure 2.10.1	Solution de 2000 ml.....	39
Figure 2.10.2	Solution de 500 ml au bicher.....	39
Figure 2.11	Courbe Granulométrie avec sédimentation. Feuille d'essai.....	40
Figure 2.12	matériels utilise dans l'essai Limite D'Atterberg.....	41
Figure 2.13	Boite de Casagrande limite de liquidité.....	42
Figure 2.14	La limite de plasticité.....	43
Figure 2.15	Malaxeur d'essai bleu de méthylène.....	44
Figure 2.16	Papier filtre.....	44
Figure 2.17	exécution de l'essai de bleu méthylène.....	44
Figure 2.18	Photo personnelle.....	45
Figure 2.19	moule et dame Proctor.....	46
Figure 2.20	Matériaux tamisé en 5 mm.....	46
Figure 2.21	courbe essai Proctor normal.....	48
Figure 2.22	La machine CBR.....	48
Figure 2.22.1	Enfoncements pour indice CBR.....	49
Figure 2.23	presse CBR.....	50
Figure 2.24	dame CBR.....	50
Figure 2.25	moles CBR.....	50
Figure 2.26	courbe essai CBR.....	52
Figure 2.27	l'essai compression simple RC.....	53
Figure 2.28	Courbe de la résistance RC.....	54
Figure 2.28.1	Courbe de la cohésion C _{uu}	54
Figure 2.30	Boite de Casagrande.....	55

Figure 2.31 L'appareil des poids.....	55
Figure 2.32 chariot comparateur.....	55
Figure 2.33 Couteau, Tampon, Trousse, règle.....	56
Figure 2.34 Poids de la trousse.....	56
Figure 2.35 Boite de casagrande.....	57
Figure 2.36 Echantillon après cisaillement.....	57
Figure 2.37 les courbes d'essai cisaillement rectiligne.....	58
Figure 2.38 Bâtis œdométriques.....	59
Figure 2.39 Disques de poids.....	60
Figure 2.40 préparation de l'échantillon.....	60
Figure 2.41 courbe de l'essai œdométrique.....	61
Figure 2.42 Mélange du sol sec avec la chaux.....	62
Figure 2.43 courbe d'essai Proctor normal.....	63
Figure 2.44 courbe d'essai CBR.....	64
Figure 2.45 la courbe de la cohésion C _{uu}	65
Figure 2.45.1 La courbe de la résistance RC.....	65
Figure 2.46 Courbes de l'essai cisaillement rectiligne.....	67
Figure 2.47 La courbe de L'essai oedometrique.....	68

Chapitre 03 : Essais sur sol renforcé et amélioré.

Figure 3.1 fiche technique de géotextile gamme AS.....	70
Figure 3.2 Fiche technique de géotextiles gamme AL.....	70
Figure 3.3 Mise en place des nappes de géotextile.....	71
Figure 3.4 Courbe d'essai Proctor normal du sol renforcé avec 1 nappe.....	72
Figure 3.5 courbe essai Proctor normal du sol renforcé avec 2 nappes.....	73
Figure 3.6 courbe essai Proctor normal du sol renforcé avec 3 nappes.....	74
Figure 3.7 Moule CBR après l'essai.....	74
Figure 3.8 courbe essai CBR du sol renforcé avec 1 nappe.....	75
Figure 3.9 courbe essai CBR du sol renforcé avec 2 nappes.....	76
Figure 3.10 courbe essai CBR du sol renforcé avec 3 nappes.....	78
Figure 3.11 courbe de la résistance RC du sol renforcé avec 1 nappe.....	79
Figure 3.11.1 Courbe de la cohésion C _{uu} du sol renforcé avec 1 nappe.....	80
Figure 3.12 courbe de la résistance RC du sol renforcé 2 nappes.....	81
Figure 3.12.1 Courbe de la cohésion C _{uu} du sol renforcé avec 2 nappes.....	81
Figure 3.13 courbe de la résistance RC du sol renforcé 3 nappes.....	82
Figure 3.13.1 Courbe de la cohésion C _{uu} du sol renforcé avec 3 nappes.....	83

Figure 3.14 courbe essai œdométrique du sol renforcé.....	84
Figure 3.15 courbe essai Proctor normal du sol amélioré et renforcé avec 1 nappe.....	85
Figure 3.16 courbe essai Proctor normal du sol amélioré et renforcé avec 2 nappes.....	86
Figure 3.17 courbe essai Proctor normal du sol amélioré et renforcé avec 3 nappes.....	87
Figure 3.18 courbe essai CBR du sol amélioré et renforcé avec 1 nappe.....	88
Figure 3.19 courbe essai CBR du sol amélioré et renforcé avec 2 nappes.....	89
Figure 3.20 courbe essai CBR du sol amélioré et renforcé avec 3 nappes.....	90
Figure 3.21 courbe de la résistance RC du sol renforcé avec 1 nappe.....	91
Figure 3.21.1 Courbe de la cohésion C _{uu} du sol renforcé avec 1 nappe.....	92
Figure 3.22 courbe de la résistance RC du sol renforcé avec 2 nappes.....	93
Figure 3.22.1 Courbe de la cohésion C _{uu} du sol renforcé avec 2 nappes.....	93
Figure 3.23 courbe de la résistance RC du sol renforcé avec 3 nappes.....	94
Figure 3.23.1 Courbe de la cohésion C _{uu} du sol renforcé avec 3 nappes.....	95
Figure 3.24 courbe essai œdométrique du sol amélioré et renforcé.....	96

Chapitre 04 : Interprétations et résultats.

Figure 4.1 les courbes de l'essai Proctor normal du sol renforcé.....	97
Figure 4.2 les courbes de l'essai CBR du sol renforcé.....	98
Figure 4.3 Les courbes de résistance RC du sol renforcé.....	100
Figure 4.3.1 Les courbes de cohésion C _{uu} du sol renforcé.....	100
Figure 4.4 les courbes de l'essai Proctor normal du sol amélioré et renforcé.....	101
Figure 4.5 les courbes de l'essai CBR du sol amélioré et renforcé.....	102
Figure 4.6 Les courbes de résistance RC du sol amélioré et renforcé.....	104
Figure 4.6.1 Les courbes de cohésion C _{uu} du sol amélioré et renforcé.....	104

Etude comparative

Figure 5.1 Résultat de la densité sèche pour différents ajouts (Chiheb et Tellai 2021)..	106
Figure 5.2 Résultat de la densité sèche pour différents ajouts (Muhammet VEFA Akpınar et Erhan Burak Pancar (2016).....	106
Figure 5.3 Résultat de la densité sèche pour différents ajouts (Nitin Tiwari et Neelima Satyam(2020).....	107
Figure 5.4 Résultat de la densité sèche pour différents ajouts Azra Haris, Mary Dhanya (2020).....	107
Figure 5.5 Variation d'I.CBR en fonction des différents ajouts, Chiheb et Tellai (2021).	108
Figure 5.6 Variation de I.CBR en fonction des différentes ajouts Muhammet VEFA Akpınar et Erhan Burak Pancar (2016).....	109
Figure 5.7 Variation de I.CBR en fonction des différentes ajouts Nitin Tiwari et Neelima Satyam (2020).....	109
Figure 5.8 Variation de I.CBR en fonction des différentes ajouts Azra Haris, Mary Dhanya (2020).....	110

Liste des tableaux

Chapitre 1 Etude bibliographique

Tableau 1.1	Classification des particules solides d'un sol.....	2 et 3
--------------------	---	--------

Chapitre 02 Etude expérimentale

Tableau 2.1	Résultats de la teneur en eau pour sol naturel.....	35
Tableau 2.2	Résultats de la granulométrie pour sol naturel.....	37
Tableau 2.3	Résultats de sédimentation pour sol naturel.....	39
Tableau 2.4	Résultats de la limite de liquidité.....	42
Tableau 2.5	Résultats de la limite de plasticité.....	43
Tableau 2.6	Résultats de l'essai proctor pour sol naturel.....	47
Tableau 2.7	Résultats de l'essai CBR pour sol naturel 16% optimum.....	52
Tableau 2.8	Résultats de l'essai compression simple pour sol naturel.....	53
Tableau 2.9	Les données de cisaillement.....	57
Tableau 2.10	Résultats de l'odomètre pour sol naturel.....	61
Tableau 2.11	Résultats de l'essai proctor pour sol amélioré.....	62
Tableau 2.12	Résultats essai CBR pour sol naturel+20% eau+3% chaux.....	63
Tableau 2.13	Résultats de l'essai compression Rc pour sol amélioré.....	64
Tableau 2.14	Résultats essai cisaillement rectiligne pour sol+3% chaux.....	66
Tableau 2.15	Résultat de l'odomètre pour sol amélioré.....	68

Chapitre 03 : Essais sur sol renforcé et amélioré

Tableau 3.1	Résultats d'essai : Sol naturel + 1 nappe géotextile AS25.....	71
Tableau 3.2	Résultat : essai Proctor sol+ 2nappes de géotextile AS25et AS35.....	72
Tableau 3.3	Résultat : essai Proctor sol+ 3nappes de géotextile AS25et AS35et AL10.....	73
Tableau 3.4	Résultats d'essai CBR sol naturel + 1 nappe géotextile.....	75
Tableau 3.5	Résultats d'essai CBR sol naturel+ 2 nappes géotextile.....	76
Tableau 3.6	Résultats d'essai CBR sol naturel+ 3 nappes géotextile.....	77
Tableau 3.7	Résultats d'essai Compression sol naturel + 1 nappe.....	79
Tableau 3.8	Résultats d'essai Compression sol naturel + 2 nappes	80
Tableau 3.9	Résultats d'essai Compression sol naturel + 3 nappes.....	82
Tableau 3.10	Résultat de l'odomètre.....	83
Tableau 3.11	Résultats d'essai Proctor sol amélioré et renforcé avec 1 nappe AS 25.....	85

Tableau 3.12	Résultats d'essai Proctor sol amélioré et renforcé avec 2nappes AS25+AS 35...	86
Tableau 3.13	Résultats d'essai Proctor sol amélioré et renforcé avec 3nappes S25+AS35+AL10.....	87
Tableau 3.14	Résultats d'essai CBR Sol naturel + 3% chaux renforcée avec 1 nappe.....	88
Tableau 3.15	Résultats d'essai CBR Sol naturel + 3% chaux renforcée avec 2 nappes	89
Tableau 3.16	Résultats d'essai CBR Sol naturel + 3% chaux renforcée avec 3.....	90
Tableau 3.17	Résultats d'essai Compression sol naturel +3% de la chaux + 1 nappe.....	91
Tableau 3.18	Résultats d'essai Compression sol naturel +3% de la chaux + 2 nappes.....	92
Tableau 3.19	Résultats d'essai Compression sol naturel +3% de la chaux + 3 nappes.....	94
Tableau 3.20	Résultat de l'odomètre.....	95

Chapitre 04 : interprétation des résultats

Tableau 4.1	Résultats générales essai Proctor pour sol naturel et renforcé.....	97
Tableau 4.2	Résultats générales L'essai CBR pour sol naturel et renforcé	98
Tableau 4.3	Résultats générales compression simple pour sol naturel et renforcé	99
Tableau 4.4	Résultats générales essai Proctor pour sol amélioré et renforcé	101
Tableau 4.5	Résultats générales essai CBR pour sol amélioré et renforcé	102
Tableau 4.6	Résultats générales compression simple pour sol amélioré et renforcé.....	103
Tableau 5.1	Comparaison d'essai Proctor pour nos résultats et l'obtenus par d'autres chercheurs....	105
Tableau 5.2	Comparaison d'essai CBR pour nos résultats et l'obtenus par d'autres chercheurs.....	108

Sommaire :

Remercîments	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	

Chapitre 1 : Etude bibliographique.

1. Définition du Sol	1
1.2 Mécanique des sols	1
1.2.1 Constituants d'un sol.....	1
1.2.2 Caractéristiques physiques d'un sol.....	3
1.2.3 Propriétés des sols.....	4
1.3 Les argiles.....	4
1.3.1 Introduction.....	4
1.3.2 Notions sur les argiles.....	5
1.3.2.1 Définition.....	5
1.3.2.2 Origine.....	5
1.3.2.3 structure des argiles.....	6
1.3.2.4 Classification des minéraux argileux	6
1.3.2.5 le familles d'argile.....	6
1.4 Géo synthétiques.....	8
1.4.1 Introduction.....	8
1.4.2 Présentation des géo synthétiques.....	8
1.4.2.1 Les différentes types des géo synthétiques.....	9
1.4.2.2 origine des géo synthétiques.....	11
1.4.2.3 Fonctions des géo synthétiques.....	12
1.4.2.4 Durée de vie.....	12
1.4.1. Rayonnement ultraviolet.....	12
1.4.3 Oxydation.....	12
1.4.3.1 Micro-organismes.....	13
1.4.3.2 Compatibilité chimique.....	13
1.5 Le géotextile.....	13
1.5.1 Introduction.....	13
1.5.2 Définition.....	13
1.5.2.1 La structure des géotextiles.....	13
1.5.2.2 Géotextiles tissés.....	14
1.5.2.3 Géotextiles non-tissés.....	15
1.5.2.4 Les fonctions élémentaires des géotextiles.....	15
1.5.2.5 La séparation.....	15
1.5.3 La filtration.....	16
1.5.3.1 Le drainage.....	17
1.5.3.2 Le renforcement.....	18
1.5.3.3 La protection.....	19

1.5.3.4	La lutte contre l'érosion.....	20
1.5.3.5	Caractéristiques hydrauliques.....	20
1.5.4	La mise en œuvre.....	21
1.5.4.1	Résistance à l'endommagement au cours de l'installation.....	21
1.5.4.2	formes de défauts d'un géotextile.....	22
1.5.4.3	Durée de vie des géotextiles.....	22
1.6	Amélioration et traitement des sols.....	23
1.6.1	Introduction.....	23
1.6.1.1	But de l'amélioration des sols.....	23
1.6.2	les techniques d'amélioration des sols	23
1.6.2.1	Le choix d'une méthode d'amélioration des sols.....	25
1.7	Le traitement des sols	25
1.7.1	Définition	25
1.7.2	Les techniques de traitement	25
1.7.2.1	Avantage du traitement des sols.....	26
1.7.2.2	Avantages économiques.....	26
1.7.2.3	Avantages environnementaux.....	26
1.8	La chaux	27
1.8.1	Introduction.....	27
1.8.2	Définition.....	27
1.8.2.1	Cycle de la chaux	27
1.8.2.2	Les différents types de la chaux.....	28
1.8.2.3	Caractéristiques de la chaux.....	29
1.8.2.4	Le traitement des sols en place à la chaux.....	29
1.8.2.5	Etude préalable.....	29
1.8.3	Action de la chaux sur les sols.....	30
1.8.3.1	Le comportement de ces sols fins est modifié par l'ajout de chaux.....	30
1.8.3.2	Amélioration des propriétés géotechniques.....	30
1.8.3.3	Modification à long terme d'un sol par l'ajout de chaux	30
1.8.3.4	Éléments perturbateurs de la prise du liant hydraulique.....	31
1.9	Le renforcement du sol.....	31
1.9.1	Introduction.....	31
1.9.2	Définition	31
1.9.2.1	Principe de renforcement du sol.....	31
1.9.2.2	Techniques du renforcement des sols	32
1.10	Conclusion.....	32

Chapitre 2 : Techniques expérimentales.

2.1	Partie étude du sol naturel.....	33
2.1.1	Introduction.....	33
2.2	Matériaux.....	33
2.2.1	Le lieu de prélèvement.....	33
2.2.1.1	Matériau pour stabilisation et amélioration	34
2.3	Les essais d'identification.....	34
2.3.1	Essais physiques	34
2.3.1.1	La teneur en eau (NF P 94-050).....	34
2.3.2	But de l'essai	34
2.3.2.1	Matériels utilisés	34

2.3.2.2	Préparation de l'échantillon et résultats.....	35
2.4	La Granulométrie et sédimentometerie	36
2.4.1	But de l'essai.....	36
2.4.1.1	Matériels utilisés	36
2.4.2	Préparation de l'échantillon	36
2.4.2.1	Exécution de l'essai	36
2.4.2.2	Présentation des résultats	36
2.5	Essai granulométrie avec sédimentation.....	37
2.5.1	Le but de l'essai	37
2.5.1	Principe.....	37
2.5.1.1	Appareillage.....	38
2.5.2	Mode opératoire	38
2.5.2.2	Interprétation.....	40
2.6	Limite D'Atterberg.....	41
2.6.1	Définition	41
2.6.1.1	Principe de la méthode.....	41
2.6.2	Mode opératoire.....	41
2.6.2.1	Matériel utilisé	41
2.6.2.2	Préparation de l'échantillon.....	41
2.6.2.3	La limite de liquidité	42
2.6.2.4	Interprétation des résultats	42
2.6.2.5	La limite de plasticité.....	43
2.6.3	Résultats et calculs.....	43
2.6.3.1	Interprétation.....	43
2.7	Essais Chimiques	44
2.7.1	Valeur de Bleu de Méthylène.....	44
2.7.1.1	But de l'essai.....	44
2.7.2	Mode opératoire.....	44
2.7.2.1	Préparation de l'échantillon.....	44
2.7.2.2	Exécution de l'essai	44
2.7.2.3	Interprétation	45
2.8	Les essais mécaniques.....	45
2.8.1	L'essai Proctor	45
2.8.1.1	But du TP.....	45
2.8.2	Principe de l'essai	45
2.8.2.1	Matériel utilisé.....	46
2.8.2.2	Manipulation	47
2.8.2.3	Résultats et calculs	47
2.8.2.4	Interprétation.....	48
2.9	L'essai CBR.....	48
2.9.1	Introduction.....	48
2.9.1.1	Définition et but.....	49
2.9.2	Appareillage.....	50
2.9.2.1	Matériel de poinçonnement.....	50
2.9.2.2	Manipulation.....	51
2.9.2.3	Confection des éprouvettes.....	51
2.9.2.4	Poinçonnement de l'échantillon.....	51

2.9.2.5 Résultats essais CBR pour son naturel 16% optimum	52
2.9.2.6 Interprétation	52
2.10 L'essai de la compression simple RC.....	53
2.10.1 Principe.....	53
2.10.1.1 But de l'essai	53
2.10.2 Appareillage.....	53
2.10.2.1 Mode opératoire	53
2.10.2.2 Interprétation des courbes	54
2.11 Cisaillement rectiligne : UU (non consolidé non drainé)	55
2.11.1 But de l'essai	55
2.11.1.1 Principe de l'appareil.....	55
2.11.2 Composants de l'appareil	55
2.11.2.1 Mode opératoire.....	56
2.11.2.2 Matériels utilisés.....	56
2.11.2.3 Préparation de l'échantillon	56
2.11.2.4 Exécution de l'essai.....	56
2.11.2.5 Préparation de l'essai	57
2.11.3 Interprétation	58
2.12 L'essai œdométrique.....	59
2.12.1 Définition.....	59
2.12.1.1 Principe de l'essai	59
2.12.2 Les principes de l'essai œdométrique à chargement par paliers.....	59
2.12.1 Appareillage.....	60
2.12.1.1 Réalisation de l'essai.....	60
2.12.2.1 Résultats.....	61
2.12.2.1.1 Interprétation.....	61
3.Partie 2 : etude du sol amélioré avec la chaux.....	62
3.1 Introduction	62
3.1.1 L'essai proctor.....	62
3.2 Manipulation	62
3.2.1 Résultats	62
3.2.1.1 Interprétation.....	63
3.3 L'essai CBR	63
3.3.1 Manipulation.....	63
3.3.1.1 Résultats.....	63
3.3.2 Interprétation.....	64
3.4 L'essai de compression RC.....	64
3.4.1 Manipulation.....	64
3.4.1.1 Résultats.....	64
3.4.2 Interprétation.....	65
3.5 Cisaillement rectiligne UU.....	66
3.5.1 Manipulation.....	66
3.5.1.1 Résultats.....	66
3.5.2 Interprétation	67
3.6 L'essai oedometrique.....	68
3.6.1 Manipulation.....	68
3.6.1.1 Résultat de l'odomètre.....	68

3.6.2 Interprétation.....	69
3.7 Conclusion.....	69

Chapitre 3 : Essais sur le sol amélioré et renforcé.

4.1 Introduction.....	70
4.1.1 Le matériau utilisé	70
4.2 Partie 01 Renforcement du sol naturel avec géotextile.....	71
4.2.1 L'essai Proctor	71
4.2.1.1 But de l'essai	71
4.2.2 Mise en place du géotextile.....	71
4.2.2.1 Manipulation	71
4.2.2.2 Résultats : Sol naturel + 1 nappe géotextile	71
4.2.2.3 Interprétation	72
4.2.2.4 Résultat : essai Proctor sol+ 2 nappes de géotextile	72
4.2.2.5 Interprétation	73
4.3 Résultat : essai Proctor sol+ 3 nappes de géotextile	73
4.3.1 Interprétation	74
4.4 L'essai CBR.....	74
4.4.1 But de l'essai	74
4.4.1.1 Mise en place du géotextile dans le moule CBR	74
4.4.2 Manipulation d'essai : sol naturel + 1 nappe géotextile	74
4.4.2.1 Résultats	75
4.4.2.2 Interprétation.....	75
4.4.2.3 Manipulation d'essai : sol naturel+ 2 nappes géotextile	76
4.4.2.4 Résultats	76
4.4.2.5 Interprétation	77
4.4.3 Manipulation d'essai : sol naturel+ 3 nappes géotextile	77
4.4.3.1 Résultats	77
4.4.3.2 Interprétation	78
4.5 L'essai de compression RC.....	78
4.5.1 But de l'essai	78
4.5.1.1 La manipulation	78
4.5.2 Résultats d'essai : sol naturel + 1 nappe	79
4.5.2.1 Interprétation	80
4.5.2.2 Résultats d'essai : sol naturel + 2 nappes	80
4.5.2.3 Interprétation	81
4.5.2.4 Résultats d'essai :sol naturel + 3 nappes	82
4.5.2.5 Interprétation	83
4.6 L'essai œdométrique	83
4.6.1 Manipulation.....	83
4.6.1.1 Résultat de l'odomètre	83
4.6.2 Interprétation	84
4.7 Remarque 01	84
4.7.1 Remarque 02.....	84
4.8 Partie 02 Renforcement du sol amélioré avec 3% de la chaux.....	85
4.8.1 L'essai Proctor.....	85
4.8.1.0 Manipulation.....	85
4.8.1.1 Résultats d'essai : sol amélioré et renforcé avec 1 nappe	85
4.8.2 Interprétation	86
4.8.2.1 Résultats d'essai : sol amélioré et renforcé avec 2 nappes	86
4.8.2.2 Interprétation	86
4.8.2.3 Résultats d'essai : sol amélioré et renforcé avec 3 nappes	87
4.8.2.4 Interprétation.....	87

4.9 L'essai CBR	88
4.9.1 Manipulation.....	88
4.9.1.1 Résultats d'essai :Sol naturel + 3% chaux renforcée avec 1 nappe	88
4.9.2 Interprétation	89
4.9.2.1 Résultats d'essai : Sol naturel + 3% chaux renforcée avec 2 nappes	89
4.9.2.2 Interprétation.....	89
4.9.2.3 Résultats d'essai : Sol naturel + 3% chaux renforcée avec 3 nappes	90
4.9.2.4 Interprétation	90
4.10 L'essai de compression RC.....	91
4.10.1 Manipulation.....	91
4.10.1.1 Résultats d'essai : sol naturel +3% de la chaux + 1 nappe	91
4.10.2 Interprétation	92
4.10.2.1 Résultats d'essai : sol naturel +3% de la chaux + 2 nappes	92
4.10.2.2 Interprétation	93
4.10.2.3 Résultats d'essai : sol naturel +3% de la chaux + 3 nappes.....	94
4.10.2.4 Interprétation	95
4.11 L'essai œdométrique.....	95
4.11.1 Manipulation.....	95
4.11.1.1 Résultat de l'odomètre.....	95
4.11.2 Interprétation	96
4.12 Remarque	96
4.13 Conclusion	96

Chapitre 4 : Interprétations des résultats.

5. Introduction	97
5.1 Partie 01 : interprétation des résultats sur le sol naturel renforcé	97
5.1.1 L'essai Proctor.....	97
5.2 Résultats générales.....	97
5.2.1 Interprétation.....	98
5.3 L'essai CBR	98
5.3.1 Résultats générales.....	98
5.3.1.1 Interprétation	99
5.4 L'essai de compression simple RC.....	99
5.4.1 Résultats générales.....	99
5.4.1.1 Interprétation	100
5.5 Partie 02 : interprétation des résultats sur le sol amélioré et renforcé	101
5.5.1 L'essai Proctor	101
5.5.1.1 Résultats générales.....	101
5.5.1.2 Interprétation	101
5.6 L'essai CBR	102
5.6.1 Résultats générales.....	102
5.6.1.1 Interprétation	103
5.7 L'essai compression RC.....	103
5.7.1 Résultats générales.....	103
5.7.1.1 Interprétation	104
5.8 Conclusion.....	105
5.9 Etude comparative.....	105
5.10 Etude économique.....	111
Conclusion générale.....	112
Références bibliographiques.....	113

Introduction générale

Tous les ouvrages tels que les bâtiments, routes, les ponts, les châteaux d'eau, les barrages... doivent passer par l'étude de sol qui permettra de déterminer la résistance de ce dernier et ces caractéristiques et la susceptibilité pour la construction. Ce choix dépend de plusieurs facteurs tels que la nature du sol support, ces caractéristiques, ainsi quelle importance et la valeur des charges de l'ouvrage...

Réaliser un ouvrage dans l'endroit voulu, ce n'est pas toujours possible, pas mal de fois on est obligé de changer l'endroit à cause du sol d'assise médiocre. La stabilité du sol support de n'importe quel ouvrage est parmi les premiers soucis des géotechniciens et constructeurs, qui cherchent de fonder les structures sur un bon sol pour éviter tout problème de tassement, mais certaine fois on est obligé de construire sur des sols de faible portance, dans ce cas une amélioration de la portance du sol est indispensable pour protéger la structure de tout risque de tassement ou de poinçonnement. Mais, avec le Géotextile le problème peut être résolu, car avec sa résistance à la traction, il peut donner au sol un bon comportement mécanique et améliore sa portance, aussi avec la chaux qui diminue l'eau dans le sol pour obtenir la bonne amélioration, les études et l'expérience ont montré l'efficacité des géo synthétiques comme des matériaux de renforcement pour les murs de soutènement, les talus, les remblais et les sols de fondations.

-Le présent travail contient quatre chapitres

-Le premier chapitre : parle sur les généralités sur les sols, mécanique des sols, types des sols aussi les géo synthétiques, la chaux détaillée ainsi le renforcement et amélioration des sols.

-Le deuxième chapitre : présente le sol étudié, le matériau d'amélioration ainsi les essais physiques, chimiques et mécaniques sur le sol étudié seul et amélioré.

-Le troisième chapitre : Présente les essais mécaniques sur le sol seul et sol amélioré, les deux derniers renforcés avec différentes nappes de géotextiles.

- Le quatrième chapitre : présente les différents résultats obtenus et nos interprétations.

Chapitre 1

Etude bibliographique

1. Généralités sur le sol.

1.1 Définition du Sol

Un sol se définit comme un agrégat naturel de grains minéraux résultant de la désagrégation mécanique (ou chimique pour les sols les plus fins comme les argiles) des roches. Certains sols, qu'on dit organiques, contiennent des débris végétaux ou d'animaux (tourbes).

Le sol est un matériau discontinu et triphasique.

1.2 Mécanique des sols

Application des lois hydrauliques et mécaniques aux sols. En mécanique des sols. L'expérience a une importance capitale.

1.2.1 Constituants d'un sol

La Figure 1.1, donne une représentation des constituants d'un sol comme un mélange d'éléments solides (squelette), d'eau (libre ou non) et de gaz (air).

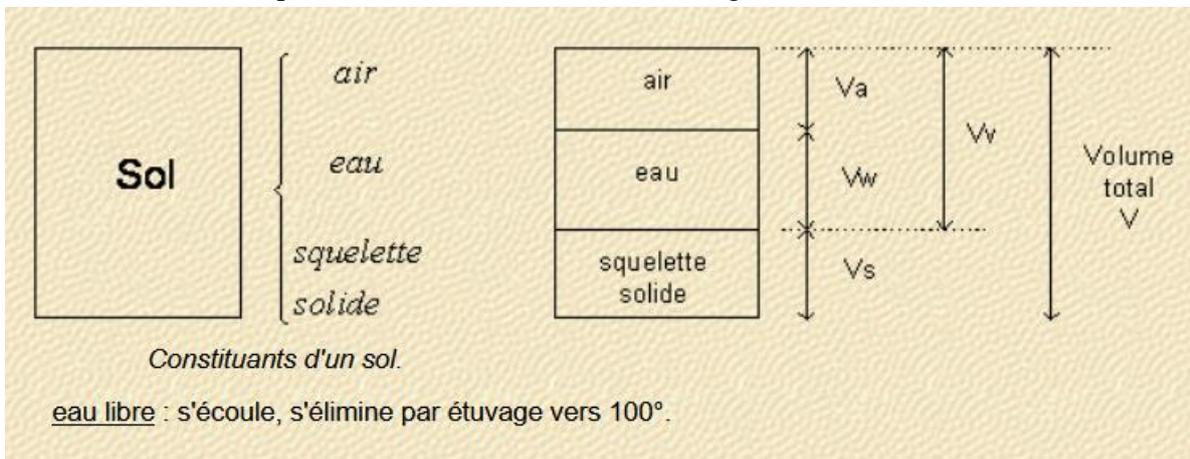


Figure 1.1 Constituants d'un sol

Phase gazeuse : air + gaz de décomposition ou vapeur d'eau. Un sol est saturé lorsque les vides sont remplis. En pratique, dans nos régions tempérées, la plupart des sols sont saturés à quelques mètres de profondeur. On étudiera uniquement le comportement de ces derniers en raison de l'extrême complexité des sols triphasiques.

Eau absorbée : constitue un film entre les grains jouant ainsi un rôle de lubrifiant. Ne s'écoule pas, s'élimine par chauffage très intense (>300°).

Phase liquide (Figure 1.2) :

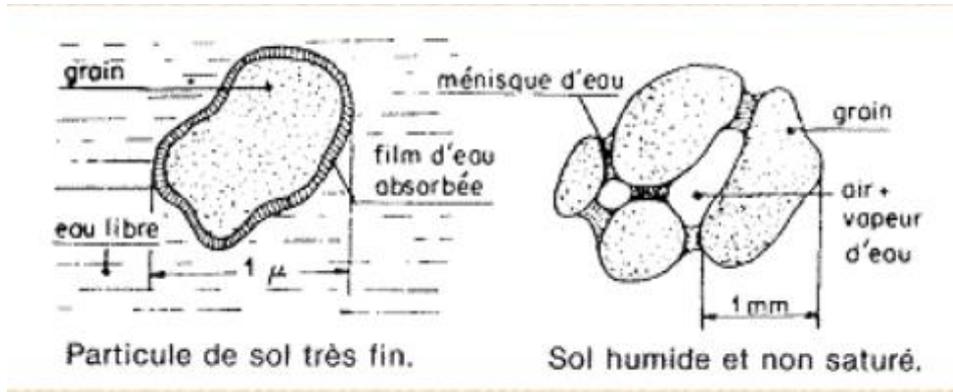


Figure 1.2 Phase liquide d'un sol

Phase solide :

Tableau 1.1 Classification des particules solides d'un sol

Sols fins	Sols grenus
<p>Argile</p> 	<p>Sable fin</p> 
<p>Limon</p> 	<p>Sable grossier</p> 

	 <p>Gravier</p>
	 <p>Cailloux</p>
	 <p>Enrochement</p>

1.2.2 Caractéristiques physiques d'un sol

Différence entre sols fins et sols grenus

Sols grenus (pulvérulents) - Sols fins Les forces d'attractions intergranulaires (force électrique, force de Van Der Waals ,etc.) influencent le comportement des sols pour les grains de dimension très petite. Dans ce cas, le sol présente de la cohésion. On distingue deux catégories de sols :

les sols fins(ou sols cohérents) $d < 20$ avec cohésion (argile, limon) : comportement très différent en fonction des teneurs en eau (état solide, plastique ou liquide)

Les sols grenus $d > 20 \mu\text{m}$ sans cohésion (sable, gravier, etc.) : comportement régi par les propriétés du squelette solide (peu influencé par l'eau) Dans la réalité, les sols sont constitués d'un mélange de particules de différentes dimensions, soit un état intermédiaire entre les sols grenus et les sols fins. Propriétés des sols grenus (pulvérulents) □forces de frottement entre les grains sont : -dépendants de la forme, l'angularité et la compacité des grains-indépendants de la teneur en eau □résistance au cisaillement □aucune résistance à la traction □perméables .

1.2.3 Propriétés des sols

Sols grenus

Les vides inter granulaires sont de grande dimension. L'eau libre y circule très facilement et l'eau absorbée est inexistante.

Ce sont les paramètres caractérisant le squelette solide qui définissent le comportement du sol. Ainsi un sable sec, humide ou saturé a le même comportement.

Dans l'étude des sols grenus, on ne tiendra pas compte de la présence (ou pas) d'eau.

Sols fins

L'eau joue un rôle très important sur le comportement des sols fins. Les propriétés mécaniques évoluent sensiblement entre l'état solide (teneur en eau w faible) et l'état liquide (w élevée). Entre les deux, l'état plastique caractérise un sol capable de se déformer rapidement et considérablement sans se fendiller ou se casser.

On définit arbitrairement des limites appelées **Limites d'Atterberg** qui donnent les teneurs en eau lors des changements d'états du sol fin (solide, plastique ou liquide)

w_P : limite de plasticité ;

w_L : limite de liquidité ;

w_S : sépare l'état solide en 2 états : avec retrait (eau absorbée encore présente) et sans retrait (sans eau absorbée).

1.3 Les argiles

1.3.1 Introduction :

L'argile est un matériau naturel qui a été utilisé par l'homme depuis très longtemps, notamment dans l'antiquité. Pour la poterie. Son intérêt est considérable dans divers domaines en raison, à la fois de son abondance et de ses propriétés en agriculture, étant donné que tous les sols cultivés en contiennent plus au moins mais parfois en grand quantité. On sait depuis longtemps que les sols argileux sont fertiles mais souvent difficiles à travailler en raison de leurs propriétés mécaniques. Ces mêmes propriétés font des roches argileuses des substrats difficiles pour le génie civil.

1.3.2 Notions sur les argiles :

1.3.2.1 Définition :

Roches composées principalement de silicates en feuillets (Phyllosilicates) d'Al, plus ou moins hydratés.

Les plus abondants des roches sédimentaires : 50% des sédiments (69 % des sédiments continentaux). Constituants principaux des sols.

Formées de particules fines, de l'ordre du μm ; techniques d'étude et de caractérisation délicates (RXD, MEB, ATD)

1.3.2.2 Origine :

Les minéraux argileux résultant de la destruction des roches, peuvent soit restés sur place, soit être transportés sur de longues distances. Les argiles sont issues d'une érosion naturelle, effectuée pendant des milliers d'années (Tucker, 2001).

Les reliefs qui forment la surface de la terre sont composés de différentes roches, pour certaines magmatiques (issues directement du magma) pour d'autres, métamorphiques (seconde cristallisation de sédiments ou de roches magmatiques) (Figure I.2). En fonction des roches mères et du climat, les minéraux argileux résultant sont différents (Tucker, 2001). En climat froid : L'altération est faible, les minéraux argileux sont identiques ou peu différents des minéraux de la roche (illite et chlorite), ils sont hérités de la roche d'origine.

En climat chaud et humide, l'hydrolyse est poussée, la kaolinite se forme en milieu drainé, les Smectite en milieu confiné.

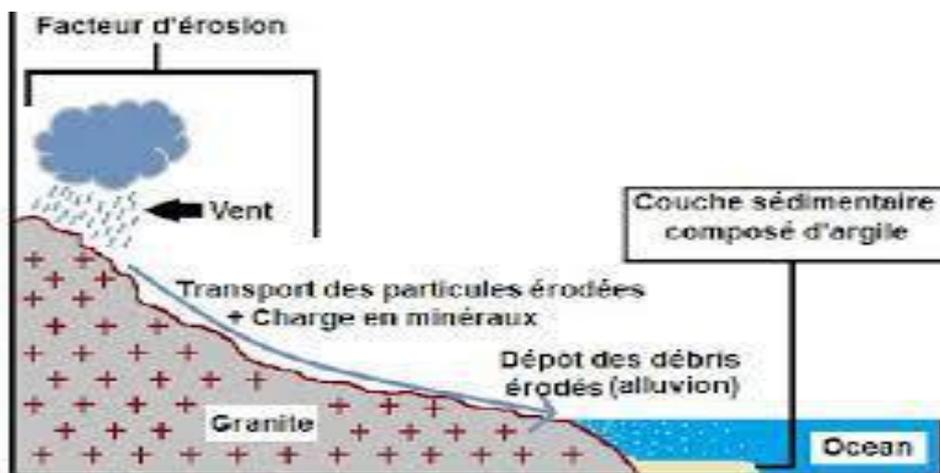


Figure 1.3 Processus de formation de l'argile

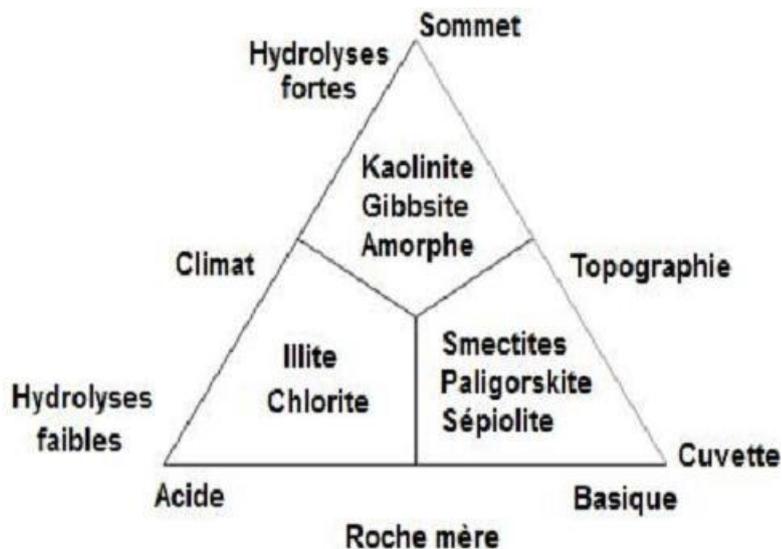


Figure 1.4 Les différents types de philo silicates formés au cours de L'altération

1.3.2.3 Structure des argiles :

L'ion aluminium Al^{3+} se trouve dans le feuillet logé dans l'espace compris entre six ions O^{2-} ou OH^- , géométriquement, Al^{3+} occupe le centre d'un octaèdre dont les six sommets seraient les centres des six ions O^{2-} ou OH^- périphériques ; l'aluminium est dit en position octaédrique. Electriquement, les trois charges positives de l'ion aluminium sont neutralisées par trois des charges négatives des anions de l'octaèdre ; pour utiliser complètement leurs charges négatives, les ions O^{2-} et OH^- compensent des charges positives appartenant soit à des octaèdres voisins soit, à des tétraèdres voisins.

Dans les feuillets, les dispositifs octaédriques apparaissent disposés les uns à côté des autres, constituant la couche octaédrique. La juxtaposition de couches tétraédriques et octaédriques forme le feuillet. Chaque feuillet est séparé du suivant par un espace inter foliaire (Jones, 1988 ; Tessier, 1989 ; Dyer and Gallardo, 1990).

1.3.2.4 Classification des minéraux argileux :

On distingue parmi les minéraux argileux trois grands groupes (1/1, 2/1 et 2/1/1), leur distinction a été établie en fonction de la composition chimique, de l'épaisseur des feuillets, de la grandeur de l'espace inter foliaire et de la valeur de la capacité d'échange de cations (c.e.c.) (Du chaufour, 1988 ; Chevalier et al, 1994) .

1.3.2.5 Les Familles d'argile :

:

- **La famille de la kaolinite** (T-O ou 1:1) A une couche d'octaèdres et une couche de tétraèdres, l'épaisseur du feuillet élémentaire est de 7 Å. Ces feuillets élémentaires adhèrent assez fortement entre eux par leurs faces basales, des liaisons hydrogènes existant entre les oxhydroyles de la base d'un feuillet et les oxygènes du haut du feuillet en dessous. Il constitue ainsi une particule primaire (Mering et Oberlin, 1971), qui comprend de 70 à 100 feuillets accolés. L'hallowysite résulte de l'adjonction des couches d'eau entre les feuillets, l'équidistance entre les feuillets hydratés est donc variable dans ce cas. La formule générale d'un feuillet de Kaolinite est donnée par la formule suivante.



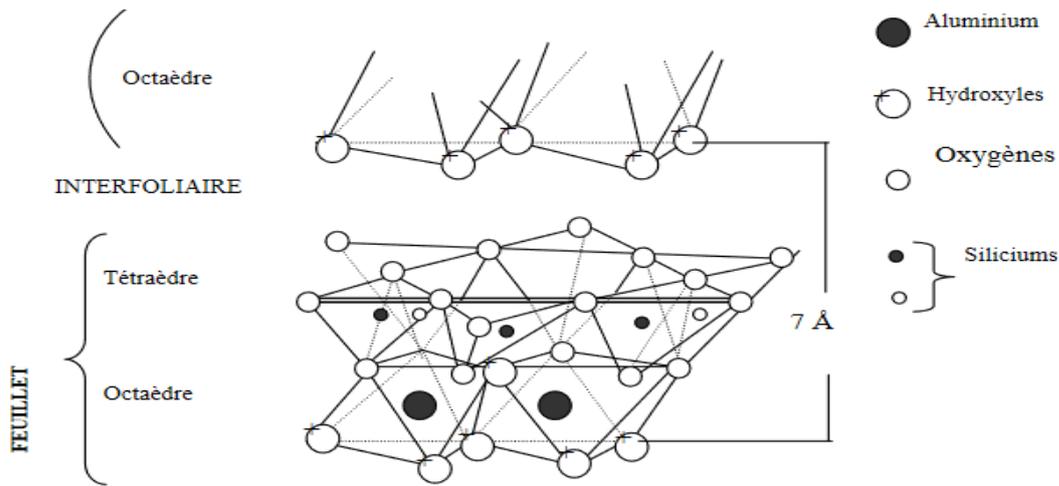


Figure 1.5 Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite

Famille de la montmorillonite (T-O-T ou 2:1) A une couche d’octaèdre encadrée par deux couches tétraédriques, les feuillets, épais de 10 Å, sont très faiblement liés les uns aux autres ; aussi des couches d’eau peuvent se fixer entre les feuillets, l’épaisseur de ces couches pouvant atteindre 9 Å. Ce matériau est donc gonflant. La montmorillonite peut exister sous la forme de cristaux isolés épais de 10 Å. Pour la vermiculite, l’absorption d’eau est limitée à 2 couches de molécules d’eau. La formule générale de la montmorillonite est la suivante

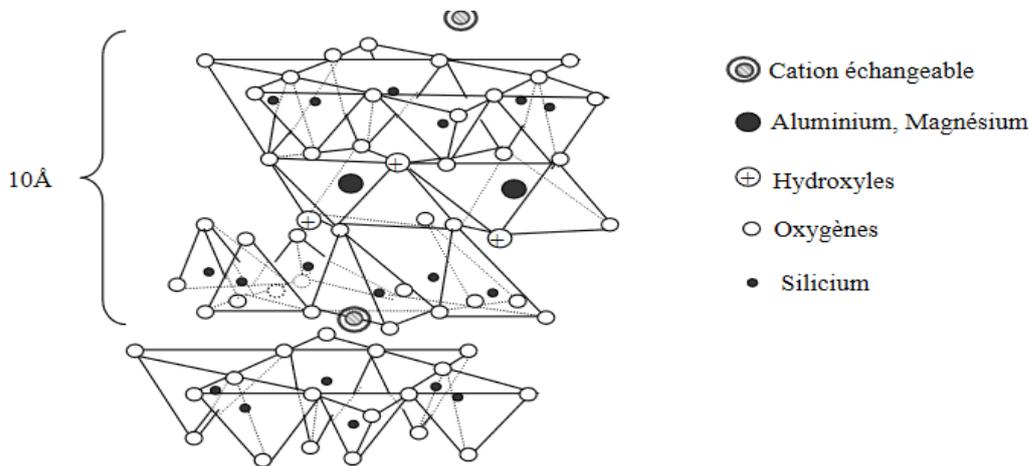
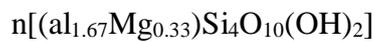


Figure 1.6 Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite

Famille de l’illite (T-O-T ou 2:1) (argiles micacées, ou hydro micas) A une couche d’octaèdre encadrée par deux couches tétraédriques, les feuillets d’équidistance 10 Å sont assez fortement liés les uns aux autres par des ions potassium (K⁺), l’équidistance est donc

constante. Les propriétés sont intermédiaires entre celles de la kaolinite et celles de la montmorillonite.

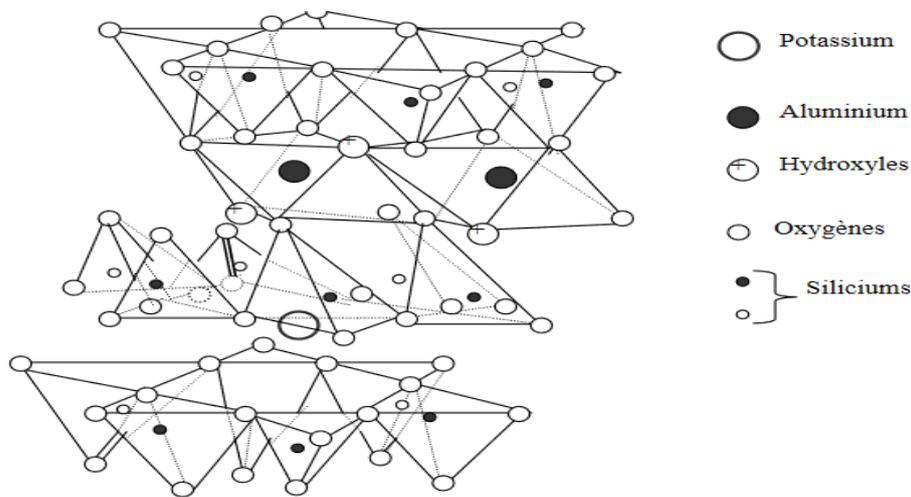


Figure 1.7 Vue isométrique de la structure atomique de l'illite

1.3.2.6 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 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 ($C_2 < 2 \mu m$).

1.4 Géo synthétiques

1.4.1 Introduction

Depuis leur apparition dans les années 1960 les géo synthétiques (géotextiles géo membranes et produits apparentés) sont devenus des matériaux Majeurs dans tous les domaines du génie civil les premiers géotextiles et les premières géo membranes ont été Perfectionnés Pour étendre leurs applications Des essais et des normes ont été établis avec des systèmes de Contrôle de la qualité.

1.4.2 Présentation des géo synthétiques

Que sont les géo synthétiques ?

Un géo synthétique est un produit dont au moins un des constituants est à base de polymère synthétique (polyéthylène, poly-amide, polyester ou polypropylène, par exemple) ou naturel. Il se présente sous forme de nappe, de bande ou de structure tridimensionnelle. Il est utilisé en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil. Un certain nombre de géo synthétiques sont définis par la norme de terminologie NF EN ISO 10318 [1]. Certains termes qui ne sont pas définis dans cette norme peuvent être trouvés dans la terminologie établie par l'International Geosynthetic Society (IGS).

Les ouvrages dans lesquels les géo synthétiques sont utilisés sont multiples : infrastructures linéaires de

transport (routes, voies ferrées), ouvrages hydrauliques (barrages, bassins, canaux), ouvrages pour la protection de l'environnement (installations de stockage de déchets, stockage de déchets miniers, sites et sols pollués), bâtiments. Ces différentes applications seront illustrées dans la suite de ce document. Pour le cas particulier des tunnels, le fascicule 67 Titre III du cahier des clauses techniques générales (CCTG) régit l'utilisation des géosynthétiques [2]. Il n'est pas repris ici.

Les géosynthétiques sont généralement répartis en deux grandes familles :

- les géotextiles et produits apparentés aux géotextiles qui sont des produits perméables ;
- les géomembranes et les géosynthétiques bentonitiques qui sont essentiellement imperméables.

Les géosynthétiques sont définis par des caractéristiques physiques, mécaniques et hydrauliques selon des essais normalisés, identifiés pour l'essentiel par des normes internationales de type ISO, européennes de type EN, ou nationales de type NF, DIN, ASTM...

1.4.2.1 les différents types de géo synthétiques

Un **géotextile** est défini par la norme NF EN ISO 10318 comme une matière textile plane, perméable et à base de polymère (naturel ou synthétique), pouvant être non tissée, tricotée ou tissée, utilisée en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans le domaine de la géotechnique et du génie civil

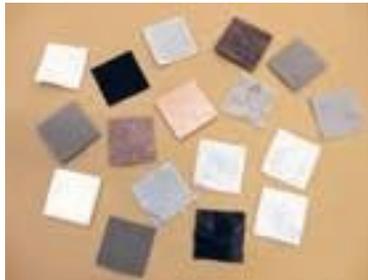


Figure 1.8 Les géotextiles [6].

Une **géo membrane** est définie par la norme NF P84-500 [3] comme un produit manufacturé adapté au génie civil, se présentant sous la forme de lés, d'une largeur minimale de 1,50 m. Mince, souple, continue et étanche aux fluides à la sortie de la chaîne de fabrication, elle présente une épaisseur effective de 1 mm minimum sur toute la surface du lé. Elle est soudable en continu, quelles que soient les faces des lés en contact, par soudure thermique, par vulcanisation ou par bandes adhésives autocollantes selon la nature du produit. Elle correspond aux définitions des barrières géo synthétiques polymériques ou bitumineuses données dans la norme **NF EN ISO 10318**.

Les matériaux d'épaisseur inférieure au millimètre sont appelés « géo films ».

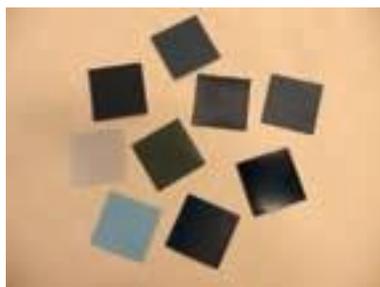


Figure 1.9 Les géo membranes [6].

Un géo synthétique benthonique(GSB) est défini par la norme XP P84-700 [4] comme un produit manufacturé en forme de nappe, constitué d'un assemblage de matériaux comportant au moins de la bentonite, en poudre ou en granulés, celle-ci assurant la fonction étanchéité, et d'un ou plusieurs géo synthétiques utilisés comme supports ou conteneurs. Il est utilisé dans le domaine de la géotechnique et du génie civil. Cette définition correspond à celle des barrières géo synthétiques argileuses donnée dans la norme **NF EN ISO 10318**.



Figure 1.10 Les géo synthétique benthonique(GSB) [6]

Une géo bande est définie comme un matériau à base de polymère, qui se présente sous la forme de bandes dont la largeur n'excède pas 200 mm. Elle est utilisée en contact avec le sol et/ou d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil.

Un géo conteneur est défini comme un conteneur en géo synthétique rempli de sol ou d'un autre matériau.

Un géo espaceur est défini comme une structure tridimensionnelle à base de polymère, conçue pour créer un espace dans le sol



Figure 1.11 Géo espaceur

Une géo grille est définie comme une structure plane à base de polymère constituée par un réseau ouvert et régulier d'éléments résistants à la traction et pouvant être assemblés par extrusion, par collage ou par entrelacement. Les ouvertures des géo grilles ont des dimensions supérieures à celles des constituants.

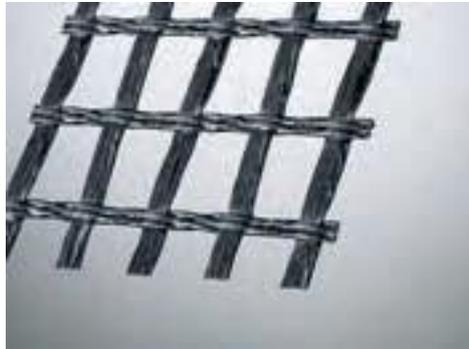


Figure 1.12 Géo grille

Un géo composite est un produit issu de la combinaison industrielle de deux ou plusieurs géo synthétiques.

1.4.2.2 Origine des géo synthétiques

De manière à asseoir les ouvrages sur des fondations ayant une meilleure capacité portante, et ainsi permettre une meilleure durabilité de ceux-ci, tout en maîtrisant la qualité des produits d'ajout, le renforcement des sols est à l'origine de la fabrication des géo synthétiques. La littérature parle d'une première date en 1926, en Caroline du Sud, où les premières parcelles de route utilisent des tissus de coton. Le résultat est probant, puisque la route reste en bon état jusqu'à ce que le matériel se dégrade. Ainsi s'est ouvert un marché pour des matériaux synthétiques, de même que la viabilité de deux fonctions des produits géo synthétiques, soit la séparation et le renforcement des sols. La deuxième innovation dans ce domaine fut l'utilisation de textile technique comme drain et comme filtre. Le fait que le liquide puisse traverser un matériel poreux tout en retenant le sol (ou une partie sélectionnée du sol) adjacent a permis le développement d'un matériau synthétique plus performant. Ainsi, le géotextile permet de remplacer la couche de sable, drainante et filtrante, jusqu'alors incontournable. Enfin, une troisième application importante des géo synthétiques fut la réalisation de barrière imperméable permettant d'empêcher le mouvement des liquides. Historiquement, l'argile a toujours été largement utilisée, et l'est encore dans de nombreux cas. Son installation et le contrôle de sa qualité sont par contre relativement exigeants. Dans un premier temps fabriquées de caoutchouc synthétique vers 1940, les premières géo membranes polymériques telles que le Polyéthylène de Haute Densité (PEHD) voient le jour au début des années 80 et n'ont cessé de se développer depuis. Enfin, plus récemment, à la fin des années 80, le mélange d'un support synthétique avec un matériau naturel comme l'argile est utilisé sous le nom de géo composite bentonitique (GCB). Au Québec, l'utilisation de géotextiles de renforcement apparaît dans le courant des années 60 dans des applications routières (chemin de terre) sur fondation à très faible portance. Ce sont les grands projets hydro-électriques, dès le début des années 70, qui permettent aux géo synthétiques de prendre tout leur essor dans le domaine du génie routier

(renforcement de sol à faible portance, séparation, filtration, drainage) et de permettre à des manufacturiers de se développer.

1.4.2.3 Fonctions des géo synthétiques

Tableau 1 : Fonctions principales assurées par les principaux géosynthétiques élémentaires [6]

	Géotextile	Géoespaceur	Géogrille	Géoconteneur	Géomembrane	Géosynthétique bentonitique
Étanchéité					x	x
Protection	x			x		
Drainage	x	x				
Filtration	x		x	x		
Séparation	x					
Renforcement	x		x	x		
Résistance à l'érosion	x	x		x		

Figure 1.13 Les fonctions des géo synthétiques [6]

1.4.2.4 Durée de vie

Afin d'obtenir une durée de vie en adéquation avec la fonction du géosynthétique dans l'ouvrage, les concepteurs doivent prendre en compte les facteurs environnementaux impactant la pérennité des géo synthétiques. Le vieillissement des géo synthétiques exposés est principalement dû au rayonnement ultraviolet, à la chaleur et à l'oxygène, mais aussi à d'autres facteurs climatiques tels que l'humidité, la pluie.

Une caractérisation adéquate des matériaux en contact avec les géosynthétiques est par ailleurs essentielle pour une bonne prise en compte de la durabilité des géosynthétiques enfouis :

pH, présence d'oxygène, agressivité chimique, teneur en eau, température, matière organique et micro-organismes

1.4.2.5 Rayonnement ultraviolet

Selon leur composition, les géosynthétiques sont plus ou moins sensibles à l'action du rayonnement ultraviolet. Leur comportement est amélioré par l'adjonction de stabilisants leur formulation de base.

La mise en place d'une structure de protection supprime ce problème. La cinétique de dégradation des géosynthétiques liée aux rayonnements ultraviolets dépend également de l'ensoleillement de la localisation géographique (altitude, orientation des talus) de l'ouvrage.

1.4.3 Oxydation

Le phénomène d'oxydation dégrade les caractéristiques mécaniques des géosynthétiques. Ce phénomène est lié à la présence d'agents oxydants au contact des géosynthétiques (oxygène,

ozone, effluents...). Selon leur composition, les géosynthétiques sont plus ou moins sensibles à l'oxydation.

1.4.3.1 Micro-organismes

L'expérience montre que de manière générale les géosynthétiques résistent à l'action des micro-organismes. Cependant certains doivent faire l'objet d'un traitement spécifique.

1.4.3.2 Compatibilité chimique

Le concepteur doit choisir les géosynthétiques adéquats (ce qui peut parfois nécessiter des essais préliminaires de compatibilité phase de conception) en fonction de leur bonne compatibilité chimique avec le produit stocké (liquide, solide, gaz). Les conditions de service de l'ouvrage doivent être définies dès le départ (par exemple : type du produit stocké, dans le cas d'un bassin). Toute modification de ce produit doit être proscrite sans étude de compatibilité chimique préalable. La résistance chimique d'un géo synthétique, au contact d'un produit donné, dépend des facteurs suivants :

-concentration du produit stocké (compatibilité en fonction des concentrations moyennes annuelles et pics de concentration) ; -temps de contact ; -température (compatibilité en fonction des températures-moyennes annuelles et pics de température) ; -pH (compatibilité en fonction des pH moyens annuels et pics de pH).

1.5 Le géotextile

1.5.1 Introduction

Depuis une trentaine d'années, l'utilisation des géotextiles s'est largement étendue à tous types d'ouvrages de génie civil. Parce qu'ils sont faciles à mettre en œuvre et assez peu coûteux, ils ont supplanté des matériaux traditionnels, y compris dans la construction d'ouvrages audacieux.

1.5.2 Définition

Les géotextiles sont définis comme des produits textiles à base de fibres polymères se présentant sous forme de nappes perméables, souples, résistantes et filtrantes, utilisés dans le domaine de la géotechnique et du génie civil. Ces ont en fait des textiles, au sens commun du terme, utilisés au contact du sol.

On recense plusieurs dizaines de domaines d'utilisation des géotextiles, de la géotechnique routière aux ouvrages hydrauliques en passant par la stabilisation des sols. Dans tous ces ouvrages les géotextiles remplissent l'une au moins des six fonctions élémentaires : la séparation, la filtration, le drainage, le renforcement, la protection, la lutte contre l'érosion.

1.5.2.1 La structure des géotextiles

Les géotextiles sont classés selon leur structure, c'est-à-dire en fonction du mode de fabrication qui, à partir de fibres de polymères (principalement du polypropylène), permis d'obtenir un matériau fini. Ces «familles» portent des noms issus de l'industrie textile.

Ainsi, les géotextiles peuvent être :

1.5.2.2 Géotextiles tissés

Ils sont des produits à partir de fils mono filaments, de fils multi filaments, ou de bandelettes ; qui ont une déformabilité varie de 10 à 25 % (la déformabilité est le pourcentage d'allongement à la rupture), 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.

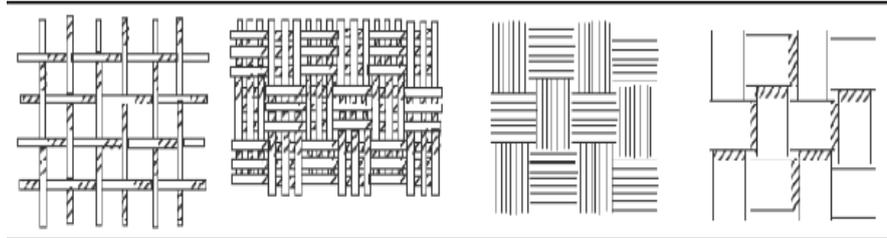


Figure 1.14 Les tissés de fils monofilaments, les tissés de fils multifilaments, les tissés de bandelettes

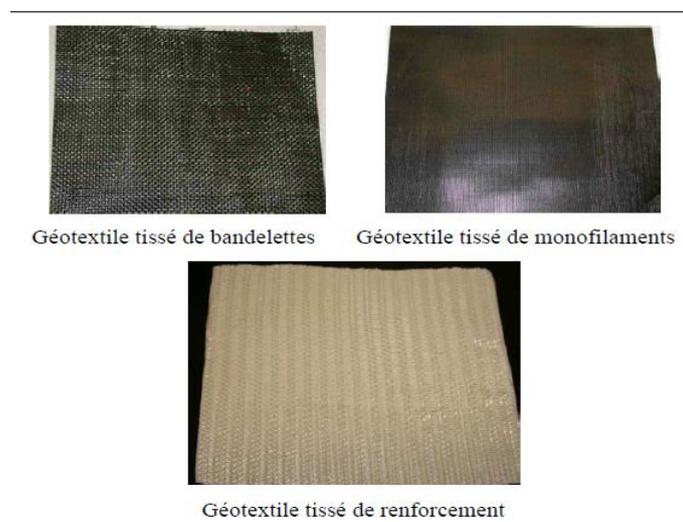


Figure 1.15 Géotextile tissé

1.5.2.3 Géotextiles non-tissés

Ils peuvent être aiguilletés ou thermo liés, ou bien encore tricotés ; qui ont une déformabilité de l'ordre de 60 %. Les fibres ou filaments sont répartis directionnellement ou de façon désordonnée par deux types de nappage. Le nappage mécanique est réalisé par des outils qui peignent les fils et les orientent de manière unidirectionnelle.



Géotextiles non tissés aiguilletés



Géotextiles non tissés thermoliés



Géotextile tricoté



Géotextile tricoté circulaire

Figure 1.16 Géotextile non tissé

1.5.2.4 Les fonctions élémentaires des géotextiles

1.5.2.5 La séparation

- Afin d'éviter le mélange des couches de la construction
 - Afin d'augmenter la capacité portante en évitant la perte de matériaux dans le sol support
 - Afin d'améliorer les caractéristiques de la couche de matériaux granulaires compactés
 - Afin d'assurer une stabilité à long terme des couches de fondation
- La séparation est la fonction principale des géotextiles et elle est largement utilisée dans la construction de routes et de voies ferrées. Selon les normes EN ISO, la fonction de séparation est définie comme étant « la prévention du mélange de sols différents adjacents et/ou de matériaux de remblai par l'utilisation d'un géotextile ». Le géotextile, lorsqu'il assure une fonction de séparation, est placé entre deux sols très dissemblables par leur granulométrie, l'un fin et l'autre plus grossier, et a pour vocation de conserver l'intégrité et les performances de chacun des matériaux. Il empêche l'interpénétration des deux milieux, sans être un obstacle à la circulation des fluides.

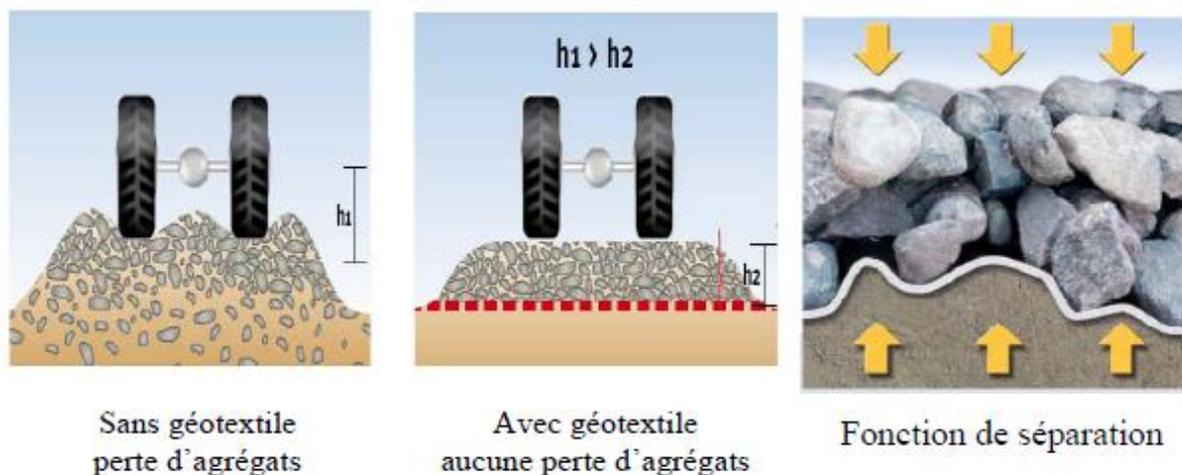


Figure 1.17 Fonction de Séparation

Le géotextile empêche la fondation en agrégats d'être contaminée par le sol de la plateforme, évitant par là même toute réduction de la portance. La migration des fines particules du sol vers les agrégats propres intervient particulièrement sous l'effet de contraintes dynamiques.

Cette fonction de séparation, donne les avantages suivants :

- Empêche la perte d'agrégats par pénétration
- Prévient la remontée des particules fines dans la fondation granulaire (effet de pompage)
- Conserve l'homogénéité des matériaux de fondation
- Préserve les matériaux naturels
- Réduit les volumes d'excavation

1.5.3 La filtration

- Afin d'éviter la migration des fines dans les matériaux granulaires résultant de l'écoulement d'eau dans le sol
- Afin de préserver l'écoulement d'eau tout en réduisant au minimum la perte de pression
- Afin d'éviter la migration des fines due à des phénomènes de pompage provenant de charges dynamiques telles que la circulation.

Les géotextiles sont largement utilisés pour assurer la filtration dans la construction de routes et de voies ferrées ainsi que dans la protection des côtes. La fonction de filtration d'un géotextile a le même but que la fonction de séparation, mais dans d'autres circonstances. Selon les normes EN ISO, la fonction de filtration est définie comme étant « la retenue de sol ou d'autres particules soumises à des forces hydrodynamiques tout en permettant le passage des fluides dans ou à travers un géotextile ».

Un géotextile jouant un rôle de filtre doit autoriser le passage d'eau perpendiculairement à son plan, mais pas celui des particules de sol. Le géotextile assurant cette fonction doit être plus perméable que le sol à filtrer. Ainsi, la filtration est un compromis entre l'érosion interne du sol par perte de fines particules et le colmatage du filtre qui peut causer une

augmentation de pression interstitielle dommageable à l'ouvrage. Cette fonction est principalement recherchée pour protéger les drains contre le colmatage, qu'ils soient de nature granulaire, tubulaire ou géotextile. Des géotextiles ont ainsi été utilisés dès 1970 dans des barrages en terre. Cette fonction peut aussi être recherchée pour la protection des berges contre le battillage dans ce cas le géotextile est placé sous un enrochement.

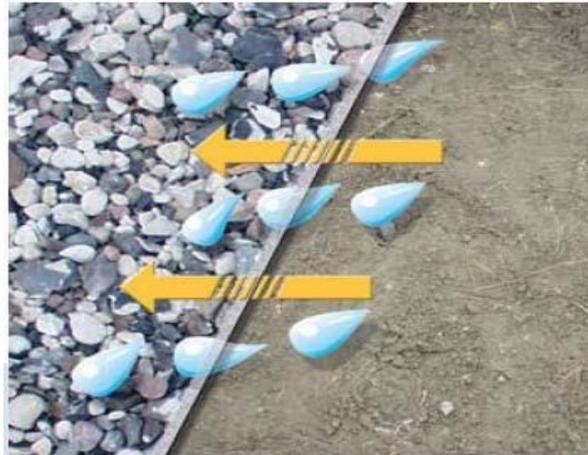


Figure 1.18 Fonction de Filtration

Cette fonction de filtration, donne les avantages suivants :

- Remplace un filtre inversé de matériaux granulaires ;
- Facile à installer ;
- Réduit les volumes d'excavation.

1.5.3.1 Le drainage

- Afin d'assurer le drainage de l'eau et/ ou d'autres fluides tout en réduisant au minimum la perte de pression.
- Afin d'assurer un drainage continu.

Les géotextiles sont largement utilisés pour assurer le drainage dans les travaux de terrassement et de construction. Selon les normes EN ISO, la fonction de drainage est définie comme étant « la collecte et le transport des eaux pluviales, souterraines et/ou d'autres fluides dans le plan du géotextile ». En d'autres termes, c'est la capacité du géotextile à drainer seul les fluides, ce qui veut dire qu'il n'est pas associé à un système drainant mais qu'il est le système drainant lui-même. La fonction de drainage est souvent confondue avec la fonction de filtration. Lorsqu'un géotextile fait partie d'un système drainant dans lequel il est utilisé dans le but de séparer un sol et la couche drainante constituée de matériaux grossiers, la fonction qu'il assure est une fonction de filtration. Lorsqu'il est utilisé en tant que drain, un géotextile permet un écoulement dans son plan de pose. On assimile dans ce cas le géotextile à un drain capable de dissiper les pressions interstitielles, de collecter et de conduire les fluides vers un exutoire. Cette fonction

suppose aussi l'existence d'un filtre, géotextile ou autre, limitant l'entraînement de particules de sol. Comme les géotextiles se présentent sous forme de nappes, la surface de contact avec les sols à drainer est grande et donc leur possibilité de captage d'eau est importante. Cette utilisation peut en particulier concerner le drainage sous fondations, sous remblai (sur sol compressible), dans le corps de barrages en terre, entre un sol et un ouvrage tel que mur vertical ou tunnel ou en association avec une géomembrane.

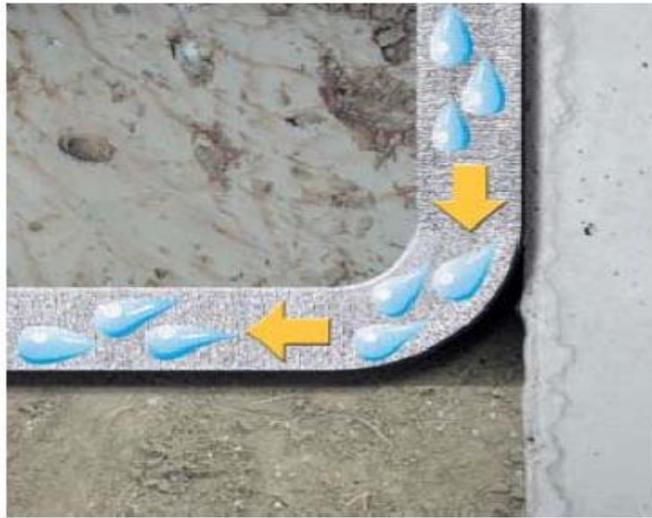


Figure 1.19 Fonction de drainage

Cette fonction de filtration, donne les avantages suivants : Permet un plan de drainage continu, Assure une capacité drainante à long terme, Réduit les volumes d'excavation, Permet une économie de matériaux granulaires.

1.5.3.2 Le renforcement

Le géotextile utilisé en renforcement améliore la résistance mécanique d'un massif de sol dans lequel il est inclus. Le géotextile améliore à la fois la résistance à la traction du massif et sa capacité à se déformer avant la rupture. Le renforcement peut aussi concerner la reprise de sollicitations sur un autre élément ou sur une interface faible. C'est le cas lorsque l'on recouvre une géomembrane posée sur pente avec une couche de sol ; il peut y avoir ruine soit par rupture en traction de la géomembrane, soit par glissement de la couche de sol. Dans ce cas, un géotextile placé entre la géomembrane et le sol permet la reprise des sollicitations. L'utilisation des géotextiles en renforcement a pris de l'importance au milieu des années quatre-vingt pour des ouvrages tels que les murs de renforcement à talus vertical ou quasi-vertical, les remblais de géométrie traditionnelle avec des sols peu résistants, les radiers sous chaussée ou fondations, sur sols compressibles ou karstiques.

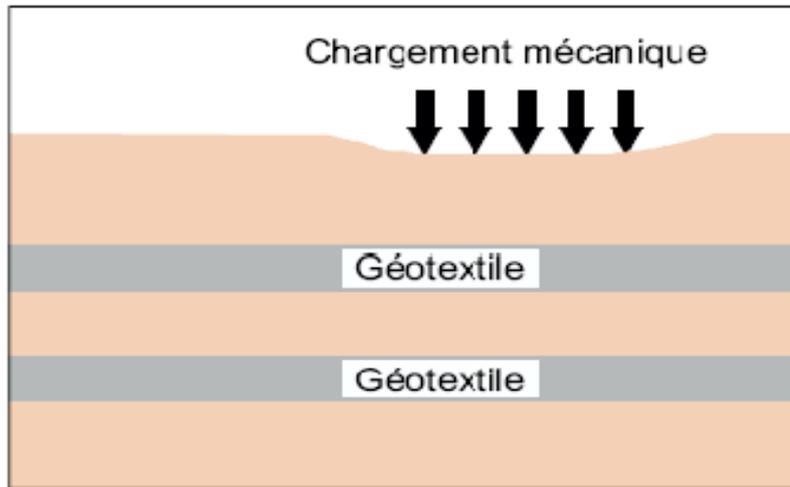


Figure 1.20 Fonction de Renforcement

Cette fonction de filtration, donne les avantages suivants :

- Redistribue les charges plus efficacement sur une plus grande surface
- Augmente la résistance au cisaillement de l'assise
- Augmente la capacité portante.

1.5.3.3 La protection

Le terme de protection se définit de la manière suivante « Fonction consistant à empêcher ou à limiter les endommagements localisés concernant un élément ou un matériau donné en utilisant un géotextile ou un produit apparenté aux géotextiles ». Un élément sensible, comme une géomembrane, est susceptible d'être endommagé par des éléments poinçonnant (matériaux grossiers), par effet dynamique ou statique. Interposé entre un élément sensible et des éléments poinçonnant, le géotextile assure une fonction de protection.

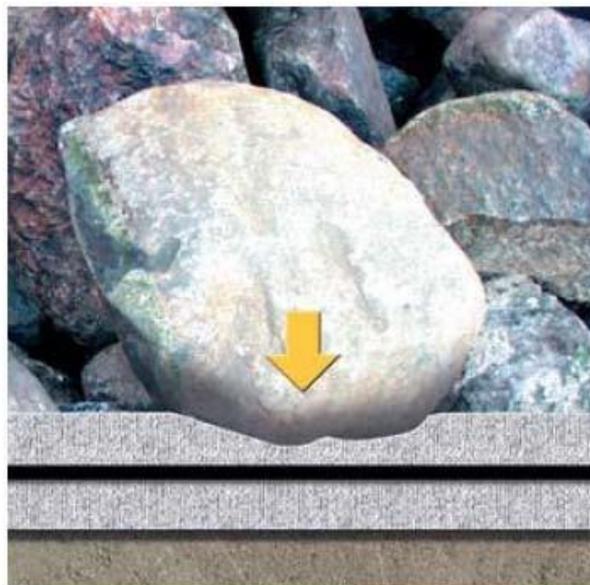


Figure 1.21 Fonction de Protection

1.5.3.4 La lutte contre l'érosion

La lutte contre l'érosion se définit comme suit : « l'utilisation d'un géotextile ou d'un produit de nature similaire pour empêcher les mouvements du sol ou d'autres particules à la surface, par exemple, d'une pente».



Figure 1.22 Fonction anti-érosion

Le géotextile limite dans ce cas les mouvements de particules de sol en surface, mouvements causés par l'eau ou le vent. Plusieurs techniques sont employées pour la lutte contre l'érosion. Un géotextile relativement ouvert maintiendra une couche de sol sur la pente (couche superficielle à épaisse), un géotextile fermé agira comme un matelas de protection. La lutte contre l'érosion par géotextiles est en général compatible avec des objectifs de végétalisation. Ces deux techniques sont souvent associées. La protection est alors principalement assurée par des produits apparentés (fibres végétales, ...) et concerne-

- les berges de canaux ou voies navigables soumises à l'érosion fluviale (batillage) ;
- les torrents ou ouvrages hydrauliques particuliers soumis à un écoulement turbulent ;
- les côtes soumises à l'érosion maritime et éolienne ;
- les pentes, talus ou plates-formes exposés à l'érosion pluviale.

Le plus souvent, outre sa fonction principale, le géotextile doit aussi rencontrer une ou plusieurs fonctions secondaires.

1.5.3.5 Caractéristiques hydrauliques

Trois caractéristiques sont nécessaires pour qualifier le comportement hydraulique des géotextiles : la permittivité, la transmissivité et l'ouverture de filtration.

La permittivité y d'un géotextile vaut k/e , avec k et e respectivement coefficient de perméabilité perpendiculairement au plan (m/s) et épaisseur (m) du géotextile. Plus la valeur est grande, plus facile est le passage de l'eau.

La transmissivité θ d'un géotextile vaut $k \times e$, où k et e sont respectivement la perméabilité dans le plan (m/s) et l'épaisseur (m) du géotextile. Les valeurs typiques vont de 10^{-3} à 10^{-7} m²/s pour un gradient de 1. Les produits ayant une fonction de drainage dans un ouvrage ont rarement une transmissivité inférieure à 5.10^{-6} m²/s ; cependant, un géotextile ayant une transmissivité plus faible peut avoir une fonction de drain lorsqu'il est utilisé pour drainer

un sol très imperméable, puisque le choix d'un géotextile de drainage se fait en tenant compte de la perméabilité du sol. Par unité de largeur, le débit transporté dans le plan du géotextile vaut $Q = \theta \times \Delta h / L$, avec Δh la perte de charge de l'écoulement, et L la longueur du géotextile(m).

L'ouverture de filtration O_f est déterminée par un essai qualifié parfois de porométrie, elle sera comparée à la taille des particules du sol à retenir. Les valeurs d'ouverture de filtration varient de 63 microns (seuil minimum de la mesure) à plusieurs centaines de microns.

1.5.4 La mise en œuvre

En ordre général, le sol support ne nécessite qu'une préparation minimale, évacuation des matériaux risquant d'endommager le géotextile. Un nivellement sommaire ainsi que le passage d'un compacteur lisse sont de bons moyens de préparer le sol support. Le géotextile est déroulé, le chevauchement des laizes se fait par recouvrement en utilisant la méthode de tuilage. Le recouvrement varie en fonction des caractéristiques du sol support.

- 0,30 m pour des sols à portance moyenne

- 1,00 m pour des sols à portance faible

Pour des applications de renforcement les laizes peuvent être cousues.

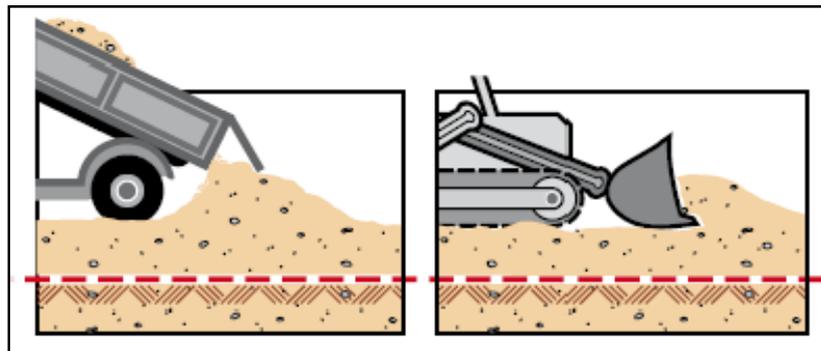


Figure 1.23 Déversement des matériaux sans rouler dessus le géotextile

1.5.4.1 Résistance à l'endommagement au cours de l'installation

Le géotextile ne jouera plus aucun rôle s'il est détruit pendant ou immédiatement après l'installation. Les analyses démontrent en effet que la période critique dans le cycle de vie d'un géotextile intervient plutôt lors du processus de mise en place qu'après la suite. 95 % des dégâts ont ainsi habituellement lieu lors de l'installation. Il s'agit simplement très souvent du résultat des dommages dus aux impacts en cours de déchargement et décompactions des agrégats. Habituellement, si le géotextile survit à ces contraintes liées à l'installation, il résistera aussi aux contraintes en cours d'utilisation.

Un travail considérable a été entrepris pour tenter de comprendre la relation existant entre les propriétés physiques d'un géotextile de séparation et ses performances réelles sur le terrain. Ces études ont confirmé l'existence d'une corrélation proche entre la capacité d'un géotextile

à absorber l'énergie de l'impact et sa susceptibilité à l'endommagement au cours de l'installation.

1.5.4.2 formes de défauts d'un géotextile

Les figures suivantes montrent les différentes formes de défauts d'un géotextile et l'importance d'une capacité élevée d'absorption de l'énergie :

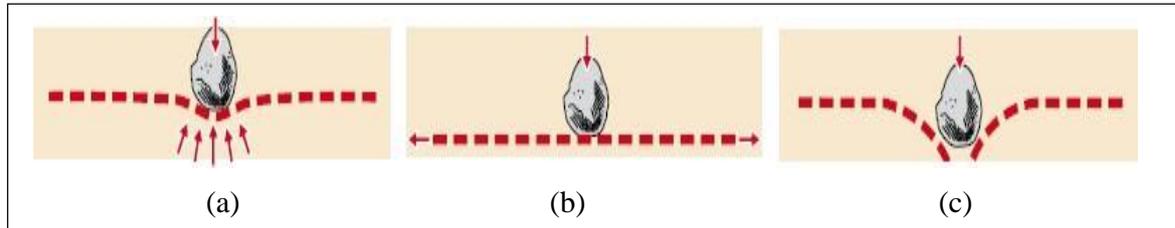


Figure 1.24 Les différentes formes de défauts du géotextile

- (a) Une grande élongation permet au géotextile de s'allonger autour de la pierre en train de pénétrer.
- (b) Une résistance élevée permet au géotextile de résister à la force d'une pierre en train de tomber.
- (c) Endommagement du géotextile dû à un manque de résistance ou à un manque d'élongation.

1.5.4.3 Durée de vie des géotextiles

Les exigences concernant le temps maximum d'exposition et éventuellement le coefficient de réduction correspondant sont définis dans la norme NF EN 13251 [8] et dans le guide ISO TR 20432. À moins que les géotextiles ne soient destinés à être recouverts rapidement, ils doivent être soumis à l'essai accéléré de résistance aux agents climatiques selon la norme NF EN 12224. La résistance résiduelle du géotextile ou du produit apparenté à l'issue de l'essai, ainsi que l'application spécifique du produit, définiront la durée pendant laquelle le matériau peut rester exposé sur le site. Les durées maximales d'exposition sont données dans le tableau. En cas d'exposition prolongée, il faut donc s'assurer, auprès du fournisseur, de la résistance résiduelle du produit à l'issue de la période d'exposition ou envisager des solutions alternatives de protection ou d'autres dispositions constructives.

Tableau 2 : Durée maximale d'exposition des géotextiles et produits apparentés [10]

Application	Résistance résiduelle après essai de vieillissement	Durée maximale d'exposition pendant la mise en œuvre
Renforcement ou autres applications dans lesquelles la résistance à long terme est un paramètre significatif	> 80 %	1 mois ⁽¹⁾
	60 à 80 %	2 semaines
	< 60 %	1 jour
Autres applications	> 60 %	1 mois ⁽¹⁾
	20 à 60 %	2 semaines
	< 20 %	1 jour

Figure 1.23.1 Durée maximale d'exposition des géotextiles

1.6 Amélioration et traitement des sols

1.6.1 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 20ème 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.

1.6.1.1 But de l'amélioration des sols

- Augmenter sa résistance en place, pour augmenter sa capacité portante.
- Améliorer la stabilité d'un talus existant.
- Assurer la stabilité temporaire des travaux d'excavation sans recours aux systèmes d'étaïonnements conventionnels.
- Arrêter le mouvement d'une pente instable pour permettre des travaux de confortement permanent.
- Augmenter la résistance latérale des sols offerte aux pieux installés.
- Diminuer la compressibilité des sols en place.
- Diminuer la perméabilité des sols.
- 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.
- Réduire les risques de liquéfactions des dépôts granulaires lâches.
- Diminuer le potentiel de déformation volumique des sols.
- Homogénéiser les sols pour réduire le risque de tassement différentiel.
- Réduire la gélivité.
- Effectuer des travaux de reprise en sous-œuvre.
- Stabiliser un remblai nouvellement mis en place.

1.6.2 Les techniques d'amélioration des sols

Les techniques d'amélioration des sols consistent à modifier les caractéristiques d'un sol par une action physique (vibrations par exemple) ou par l'inclusion dans le sol ou le mélange au sol d'un matériau plus résistant, dans le but de :

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

- **Compactage dynamique et plots ballastés**

Cette méthode permet de traiter le sol en profondeur, par des actions de surface. La consolidation dynamique provoque un compactage des sols granulaires. Le principe consiste à laisser tomber, en chute libre et de façon répétée une masse de plusieurs dizaines de tonnes depuis une hauteur de quelques dizaines de mètres. Dans les terrains cohérents, on procède à une incorporation de ballast sous la masse, réalisant ainsi des plots ballastés.

- **Drains verticaux**

Les drains verticaux sont utilisés pour l'amélioration des sols fins saturés en eau.

La technique consiste à foncer verticalement dans le terrain, suivant un maillage régulier, un drain préfabriqué. Lors de la mise en charge du terrain, les drains facilitent l'évacuation de l'eau interstitielle jusqu'à la surface, permettant ainsi une consolidation accélérée des sols traités. La surcharge est apportée soit par un remblai de pré-chargement, soit par d'autres méthodes.

- **Vibroflottation**

La vibroflottation, (parfois appelée vibrocomp action), s'applique essentiellement aux sols granulaires non cohérents, tels que sables et graviers. Les vibrations engendrent un phénomène temporaire de liquéfaction du sol environnant le vibreur. Dans cet état, les forces inter granulaires sont quasiment annulées, et les grains sont réarrangés dans une configuration plus dense présentant de meilleures caractéristiques mécaniques.

- **Colonnes ballastées**

La technique des colonnes ballastées est une extension de la vibroflottation aux terrains qui comportent des couches limoneuses ou argileuses dont les éléments ne peuvent être réarrangés par la vibration. Les colonnes ballastées permettent de traiter ces sols par incorporation de matériaux granulaires (couramment appelés ballast) compactés par passes remontantes. Ces colonnes peuvent être également cimentées ou constituées de mortier.

Elles servent également de drains et permettent une accélération du processus naturel de consolidation. En zone sismique, elles réduisent les risques de liquéfaction.

- **Inclusions**

Utilisable pour fonder tous types d'ouvrage sur sols compressibles de toute nature, ce procédé permet de réduire fortement les tassements. Les inclusions sont généralement verticales et disposées suivant un maillage régulier. Elles doivent présenter des caractéristiques intrinsèques de déformation et de raideur, compatibles avec les terrains encaissants et les structures à porter.

Différents modes de mise en œuvre (forage avec ou sans refoulement, battage, vibration) et différents types de matériaux (ballast, gravier, mélange sol-ciment et tous types de mortier ou béton) sont utilisables pour permettre de réaliser à moindre coût un système de fondations superficielles en lieu et place d'un système de fondations profondes.

1.6.2.1 Le choix d'une méthode d'amélioration des sols

La plupart du temps le sol initial, dans son état non amélioré, est identifié par sa couche granulométrique qui demeure un facteur primordial en vue de choisir une technique d'amélioration à ce sol.

Les méthodes d'amélioration utilisées dans notre cas se regroupent en trois familles :

- Le vibrocompactage (ou vibroflottation);
- Les colonnes ballastées ;
- Les drains verticaux ;

1.7 Le traitement des sols

1.7.1 Définition

Le traitement : est une opération qui consiste à mélanger un sol naturel avec de la chaux et/ou un liant hydraulique. Il permet, en améliorant ses caractéristiques, d'utiliser un sol qui était impropre à l'état naturel. Par ailleurs, cette technique conduit à préserver l'environnement : en utilisant les matériaux du site, on sauvegarde les ressources naturelles nobles (roches massives) et on réduit les nuisances (pas de circulation de camions de transport sur les voiries publiques).

Le traitement à la chaux (vive) permet de diminuer très rapidement la teneur en eau et ainsi de rendre « portant » des sols non circulables à l'état naturel.

Lorsque le sol est argileux, le traitement à la chaux (vive, éteinte ou lait de chaux) augmente à long terme ses caractéristiques mécaniques. Les dosages moyens en chaux sont de l'ordre de 1 à 4 %. Le traitement au liant hydraulique procure au mélange des caractéristiques mécaniques pérennes et permet ainsi de l'utiliser en couche de forme ou en assises de chaussées.

Les liants hydrauliques habituellement utilisés en traitement de sols sont les ciments et surtout les liants hydrauliques routiers (liant hydraulique à base de laitier avec peu ou pas de clinker) Le dosage moyen en liant hydraulique est de l'ordre de 4 à 8 % (si le sol est argileux et donc plastique, il est nécessaire de le prétraiter à la chaux - 1% environ - pour obtenir une « mouture » fine avant de le traiter au liant hydraulique)

1.7.2 Les techniques de traitement : sont au nombre de 2 : dans une centrale de malaxage ou en place. Dans le cas de la centrale le sol naturel est amené de l'emprunt à la centrale où il est mélangé avec le(s) liant(s) puis re transporté sur le lieu d'utilisation. Une centrale est une installation fixe qui est constituée de trémie, de silos de stockage de liants, de tapis transporteurs et/ou doseurs, d'un système réglable d'apport d'eau et d'un malaxeur à arbre horizontal.

Dans le cas du traitement en place le sol naturel est traité sur le lieu d'utilisation. Le matériel nécessaire est composé de :

- une épandeuse de liants : citerne tractée de 12 à 16 m³ avec système de dosage pondéral asservi à la vitesse d'avancement ;
- une arroseuse de 10 à 15 m³, avec une rampe munie d'injecteurs, tractée ou automotrice ;
- un malaxeur : soit une charrue à socs tractée par un bouteur, soit un pulvérisateur automoteur (pulvi-mixer) à rotor horizontal. La profondeur de malaxage est d'environ 0.40 à 0.50 m.



Figure 1.25 Traitement de sol par épandage de chaux
(Photo razel)

1.7.2.1 Avantage du traitement des sols

1.7.2.2 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, du transport.

1.7.2.3 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.

1.8 La chaux

1.8.1 Introduction

L'utilisation de la chaux a plus de 4000 milles ans. On suppose même beaucoup plus. La chaux a été complètement oublié dans nos pays industrialisés il y a environ 150 ans : date de la découverte du ciment. Mais depuis une quarantaine d'années on se remet à travailler la chaux pour ses propriétés. Respirant et étanche à l'eau elle est le liant idéal des maçonneries en pierre. Elle a de plus, un pouvoir bactéricide du fait de son pH basique (pH de 12, 13). Malheureusement, le savoir-faire de la chaux se transmettait très souvent oralement, c'est pour cela qu'aujourd'hui nous devons tout reprendre et transmettre ce savoir. La chaux, il y a longtemps, était utilisée que sous forme de chaux en pâte.

1.8.2 Définition

La chaux est un corps chimique minéral, l'oxyde de calcium de formule brute CaO . Il s'agit d'une espèce minérale naturelle rare, de maille cubique (ou isométrique), qu'il est possible d'observer en petites masses blanches avec les éjectas transformés à haute température parmi lesquels les laves communes sur les flancs des formations volcaniques, par exemple sur le Vésuve en Italie. Référencée officiellement en 1935 dans le champ de la minéralogie, elle fait partie du groupe iso structural $\text{Fm}3\text{m}$ du périclase MgO^1 .

1.8.2.1 Cycle de la chaux

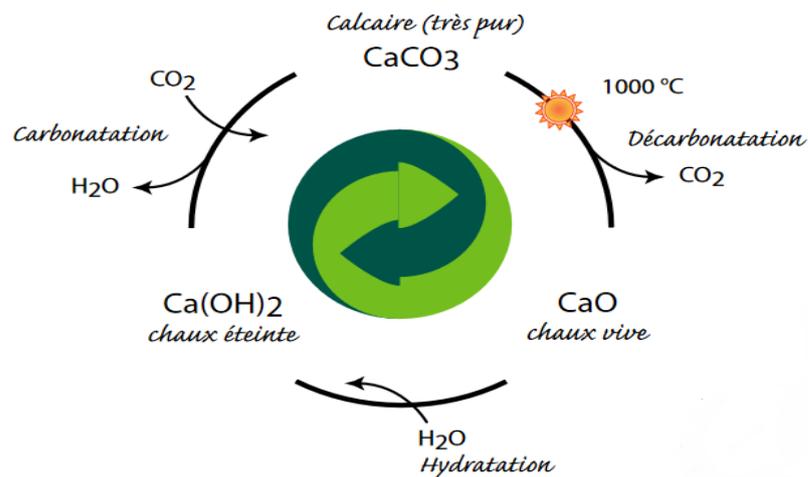


Figure 1.26 Cycle de la chaux

1.8.2.2 Les différents types de la chaux

La chaux vive est simplement la chaux sortie du four à chaux, c'est une chaux qui n'a pas été éteinte. Elle prend l'apparence de pierres pulvérulentes en surface. Le principal constituant de la chaux vive est l'oxyde de calcium, qui a pour formule CaO .

Le nom minéralogique correspondant à la matière naturelle est portlandien. Il s'agit d'une base chimique quasi-forte, peu corrosive et facile d'emploi, peu coûteuse et la plus utilisée pour les procédés industriels à grands développements massiques.

En France, l'appellation conseillée par la norme NF EN 459-1 est **CL-Q**.

La chaux vive est un produit potentiellement dangereux, principalement employé dans l'industrie et l'agriculture. Hydrophile, elle est utilisée pour assécher, détruire les matières organiques riches en eau. En cas de mélange de grandes quantités de **chaux vive** et d'eau, la chaleur dégagée est telle que l'eau peut se mettre à bouillir et projeter de la chaux, qui est corrosive. Il est de ce fait conseillé d'utiliser des lunettes et des gants lors de la manipulation.

Il est recommandé de verser progressivement la poudre dans l'eau et non pas l'inverse.

La chaux éteinte est obtenue après la réaction complète de la chaux vive avec de l'eau. Elle est appelée chaux aérienne ou chaux hydraulique selon sa capacité à faire prise sous eau, soit son hydraulicité.

La chaux aérienne (chaux hydratée, chaux éteinte, chaux grasse, chaux maigre) est obtenue par hydratation de chaux vive issue d'un calcaire très pur. Plus la teneur en oxyde de calcium est élevée, plus la chaux est dite « grasse ».

La chaux aérienne sert depuis l'Antiquité à réaliser des mortiers pour la construction, des enduits et des badigeons sur les murs. Elle est aussi utilisée pour protéger les arbres fruitiers, ou lutter contre la putréfaction des cadavres en cas d'épidémie.

On la trouve sous différentes appellations : chaux éteinte, en France CAEB (ancienne normalisation : chaux aérienne éteinte pour le bâtiment). L'appellation conseillée par la norme NF EN 459-1 est **CL** (Calcic Lime traduit par « chaux calcique ») pour les chaux contenant moins de 5 % d'oxyde de magnésium suivi d'un chiffre (90, 80 ou 70) indiquant le pourcentage de CaO .

La chaux hydraulique (chaux maigre) est issue de calcaire argileux contenant une proportion de 10 à 20 % d'argile, qui lors de la calcination donne des silicates et aluminates de calcium. Elle fait prise, en quelques heures, au contact de l'eau, d'où son appellation.

Il ne faut pas confondre la chaux hydraulique avec la chaux aérienne, qui contient quant à elle moins d'impuretés d'argile (environ 5 % contre 10 à 20 %).

Plus une chaux est hydraulique, plus elle présente de résistance à la compression, moins elle est plastique.

Sa masse volumique est d'environ $800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Pour avoir de la chaux hydraulique, il est nécessaire d'employer la quantité juste d'eau, afin de ne pas permettre la prise du matériau. La matière obtenue est sous forme de poudre blanche. Pour avoir de la chaux aérienne, la quantité d'eau ajoutée n'est pas limitée. Le produit obtenu est sous forme de pâte ayant un pH élevé ($\sim 12,3$) et sa formule chimique est $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

L'appellation normalisée NF EN 459-1 est **NHL** (*Natural Hydraulic Lime*) suivi d'un nombre (2, 3,5 ou 5) indiquant son degré d'hydraulicité. Plus le nombre est grand, plus la chaux réagit avec l'eau. L'ancienne dénomination était XHN.

1.8.2.3 Caractéristiques de la chaux

La chaux est un liant naturel et écologique. Elle offre des avantages tel que : - un pouvoir assainissant et désinfectant - une esthétique que l'on ne peut obtenir avec un autre liant (badigeon, patine, stuc tadelakt,...) - une participation à la respiration de l'ouvrage. - une élasticité - une tenue dans le temps encore inégalité (regarder les ruines romaines) - une absorption de CO_2 lors de sa carbonatation. - un excellent comportement au feu.

1.8.2.4 Le traitement des sols en place à la chaux

Le traitement des sols par un liant hydraulique vise à rendre un sol, dont les caractéristiques ne seraient pas adéquates, apte à supporter une chaussée, une plateforme (parking, aire commerciale ou industrielle) ou tout simplement le passage d'engins de travaux. Ce traitement vise également à le rendre résistant aux aléas climatiques auxquels il peut être soumis.

L'idée de base, éminemment économique, du traitement de sol est de considérer le sol lui-même comme un matériau.

Cette technique, développée dans les années 50 pour la réalisation d'assises de chaussées dans des pays tropicaux, s'est acclimatée en France dans les années 60.

1.8.2.5 Etude préalable

Une étude d'analyse des sols avant traitement est toujours nécessaire afin que celui-ci soit aussi adapté que possible. Cette étude est confiée à des laboratoires spécialisés qui peuvent :

- caractériser la nature de l'argile par diffraction du rayon X.
- évaluer la teneur en argile par sédimentation.
- évaluer différentes teneurs des sols par des analyses chimiques : teneur en carbone organique, teneur en nitrates, capacité d'échanges ioniques.

Le traitement du sol proprement dit est précédé de planches d'essais qui permettent d'approcher les formulations et les dosages adéquats. Les sols étant très hétérogènes, les chantiers de grandes surfaces doivent multiplier ces types d'essais.

1.8.3 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%.

1.8.3.1 Le comportement de ces sols fins et modifié par l'ajout de chaux.

Teneur en eau : La teneur en eau du sol est abaissée du fait de la consommation d'eau liée à l'hydratation de la chaux vive, $\{CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 12 \text{ kJ.mol}^{-1}\}$, de l'évaporation provoquée par la chaleur d'hydratation de la chaux, par l'apport de matériau sec, enfin par l'aération du sol provoquée par le malaxage.

Pour mémoire, la teneur en eau d'un sol peut baisser de 1 à 2% pour un ajout de 1% de chaux.

1.8.3.2 Amélioration des propriétés géotechniques

L'agglomération par floculation des particules argileuses sous l'action de la chaux modifie très rapidement les paramètres géotechniques du sol considéré :

- Diminution de l'indice de plasticité
- Augmentation de l'indice portant immédiat
- Diminution de la densité de l'optimum Proctor et augmentation de la teneur en eau optimale.

En d'autres termes, le sol passe d'un état plastique à un état solide.

1.8.3.3 Modification à long terme d'un sol par l'ajout de chaux

La chaux, qui est une base forte, élève le pH du sol. Ce fort pH favorise l'attaque des constituants du sol (silice et alumine). Ces produits en solution réagissent avec le calcium du sol pour produire des aluminates et des silicates de calcium hydratés, ainsi que des silicoaluminates de calcium hydratés qui jouent le rôle de liant en cristallisant entre les grains du sol (réaction pouzzolanique). Cette réaction peut se prolonger sur des mois et même des années.

1.8.3.4 Eléments perturbateurs de la prise du liant hydraulique

Certains éléments sont défavorables à une prise normale du liant hydraulique et peuvent même l'empêcher. D'autres éléments provoqueront des gonflements dommageables : minéraux soufrés, micas, matière organique, fertilisants et engrais, teneur excessive en argile... Ces perturbations peuvent être anticipées par des études préalables menées dans les laboratoires compétents.

1.9 Le renforcement du sol

1.9.1 Introduction

Quand le sol que l'on a choisi pour bâtir notre maison n'a pas toutes les qualités pour en recevoir les fondations, on se dit que le coût des travaux va encore grimper. Pas forcément : grâce aux techniques de renforcement du sol, on peut considérablement augmenter la qualité des sols de fondations sans se ruiner ou trop rallonger les travaux. Explications...



Figure 1.27 Le renforcement du sol

1.9.2 Définition

Le renforcement du sol consiste à améliorer les difficultés liées à la liquéfaction, la portance ou la fondation pour tout type de construction. En réalité, il fait intégralement partie des travaux de terrassement. Il permet de garantir la qualité des fondations ainsi que les techniques de terrassement. Grâce à cette opération, l'activité est moins onéreuse et plus facile à réaliser.

1.9.2.1 Principe de renforcement du sol

Le principe de l'amélioration du sol se décline en trois méthodes différentes. La première se fait par inclusions souples composant 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.

Entre autres, il existe des techniques d'infiltration de liants ou de mortier. Ces techniques sont surtout utilisées dans le cas où le sol est constitué d'argiles gonflantes. Elles s'adaptent aussi bien aux constructions neuves qu'aux ouvrages anciens.

1.9.2.2 techniques du renforcement des sols

Pour préparer votre terre à posséder un bon support pour la fondation, il existe d'autres techniques de renforcement des sols communément utilisées qui sont d'une part les colonnes ballastées. Elles sont utilisées dans les sols mous et nécessite une inclusion de renforcement par laquelle une colonne verticale en sable, gravier fortement compacté est installé. Cette technique a pour objectif d'augmenter la résistance et le module du sol de fondation.

D'autre part, les micropieux consistent à mettre en place dans le sol de petits pieux injectés. Cette méthode est efficace pour une meilleure stabilisation des pentes, car elle se classe dans les inclusions rigides dont les actions principales sont la traction et la compression.

1.10 Conclusion

Ce chapitre concerne les problèmes rencontrés dans les sols étudiés, dans notre cas l'argile, ainsi le renforcement et l'amélioration des sols détaillées, à savoir les solutions proposées chimiques ou mécaniques (chaux, géotextiles).

Chapitre 02

Etude expérimentale

2.1 Partie 1 : étude du sol naturel

2.1.1 Introduction

Le chapitre décrit le matériau utilisé dans le travail de recherche. Le mode opératoire des différents essais avec leurs procédures et techniques employées pour préparer les différentes éprouvettes, l'exécution de l'essai et leurs déroulements sont aussi détaillés.

2.2 Matériaux

Le sol utilisé est une argile limoneuse sa couleur marron clair, prélevé d'une profondeur de 1,60 – 2 m dans un chantier de construction près de route nationale N° 16 BOUZAAROURA, daïra EL BOUNI, commune EL BOUNI, wilaya de ANNABA.



Figure 2.1 Le matériau utilisé.



Figure 2.1.1 Terrassement du sol

2.2.1 Le lieu de prélèvement



Figure 2.2 Le lieu de prélèvement

2.2.2 Matériau pour stabilisation et amélioration

LA chaux : la chaux utilisée est une chaux éteinte d'Annaba sac de 5 kg



Figure 2.3 La chaux utilisée

2.3 Les essais d'identification

2.3.1 Essais physiques

2.3.1.1 La teneur en eau (NF P 94-050)

2.3.2 But de l'essai

Cet essai a pour but ; la Détermination de la **Teneur en eau pondérale** par la méthode de l'étuvage, effectuée à partir d'un échantillon de sol intact, remanié ou reconstitué. 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.

2.3.2.1 Matériels utilisés

- ✓ Balance
- ✓ Tare.
- ✓ Etuve.



Figure 2.4
Echantillon de matériau



Figure 2.5 la balance

2.3.2.2 Préparation de l'échantillon

- S'assurer de la provenance et de la nature géologique du matériau (sols sensibles à la chaleur) en procédant à une identification visuelle.
- S'assurer de la température de la salle.
- Préparation de l'échantillon ; c.à.d prendre la partie de carotte que l'on doit déterminer sa teneur en eau, la couper en quelques morceaux, les mettre dans une tare.
- Peser immédiatement le matériau dans son état naturel.
- Sécher le matériau pendant (24h étuve 105°C pour sols insensibles et 48h étuve 50°C pour sols sensibles)
- Peser le matériau sec.



Figure 2.6 L'étuve

Tableau 2.1 Résultats de la teneur en eau pour sol naturel

	M _{Tare} (g)	M _h (g)	M _s (g)	W%	W% moyenne
Echantillon 1	48,7	469,2	370,9	26,5	
Echantillon 2	45,8	410,1	325,2	26,1	25,04
Echantillon 3	42,2	398,1	324,9	22,53	

$$M_h - M_s = M_e$$

$$W\% = \frac{M_e}{M_s} \times 100$$

$$W\% \text{ moyenne} = \frac{w_1 + w_2 + w_3}{3}$$

La teneur en eau du sol étudié est w= 25,04%

2.4 La Granulométrie et sédimentométrie

2.4.1 But de l'essai

Cet essai a pour but ; la Détermination de la granularité des granulats dont les dimensions sont comprises entre 80 µm et 80 mm.

Il consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

2.4.1.1 Matériels utilisés

- ✓ Etuve.
- ✓ Série de tamis (0.08 ; 0.2 ; 0.4 ; 1.0 ; 2.0 ; 5.0).
- ✓ Balance.

2.4.2 Préparation de l'échantillon

- prendre une masse de poids connu après échantillonnage **Ms**.
- Imbibition de l'échantillon pendant plusieurs heures suivant la nature du sol.
- Lavage du matériau sur la plus petite maille de la colonne.
- Sécher à l'étuve à une température de 105c°.
- Le poids de l'échantillon à analyser est choisi en fonction de la formule $200D < P < 600D$.
- Pour notre essai, nous avons pris **Ms = 180gr**.

2.4.2.1 Exécution de l'essai

- Tamisage : passage du matériau par les différents tamis de la colonne.
- Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille **RI**.
- Reprendre la même opération pour la suite des tamis immédiatement inférieurs.

2.4.2.2 Présentation des résultats

- Porter les différentes pesées sur la feuille d'essai.
- Calculer les différents refus de chaque tamis :
- **Refus (%) = $\frac{RI}{Ms} * 100$.**
- Calculer les différents tamisât de chaque tamis
- **Tamisât (%) = 100 – Refus.**



Figure 2.7 Série des tamis

Cet essai est effectué en faveur du projet : **Hangar des grains bouzaaroura el bouni**
Sondage de profondeur 1,60 / 2,00 m

Tableau 2.2 Résultats de la granulométrie pour sol naturel

Paramètre 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
Total (%)	100	100	100	100	100	100

2.5 Essai granulométrie avec sédimentation

La sédimentométrie est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage des sols. Elle s'applique aux éléments de diamètre inférieur à 0,100 mm (module AFNOR 21). Les grains de diamètre différent sédimentent dans un milieu liquide au repos à vitesses différentes. La relation entre diamètre des grains et vitesse de sédimentation est donnée par la loi de Stokes.

2.5.1 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 mm, cependant les particules d'une taille inférieure à

0.001 mm ne peut être différencié, par cet essai.

2.5.1 Principe

L'essai utilise le 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 des diamètres équivalent des particules.

2.5.1.1 Appareillage

- 80g de sol
(l'échantillon doit être passé par le tamis 0.08 mm).
- Bicher.
- Éprouvette.
- Densimètre.
- Chronomètre.
- Thermomètre.
- Eau distillée.
- Malaxeur.
- Solution d'EXAMITAPHOSPHATE.

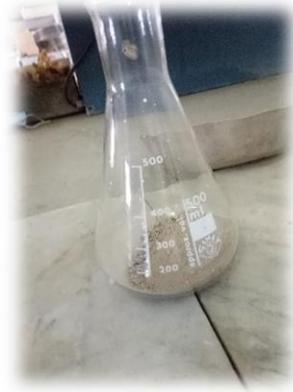


Figure 2.8 Bicher de 500 ml.

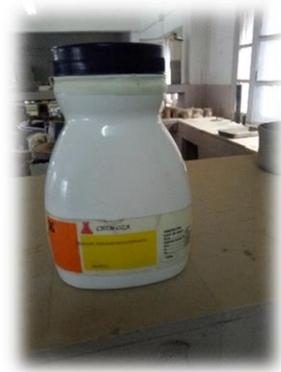


Figure 2.9 solution d'EXAMITAPHOSPHATE

2.5.2 Mode opératoire

- Mètre la quantité de sol dans le bicher.
- Ajouter 60 ml solution d'EXAMITAPHOSPHATE.
- Ajouter l'eau distillée jusqu'à arriver à 500 ml.
- Après 24h, versant le mélange dans une éprouvette et on ajoute l'eau distillée jusqu'à 1440 ml.
- D'après le densimètre et le chronomètre, la lecture de la densité et la température chaque période en utilisant le densimètre et le chronomètre, la dernière lecture est après 24h.



Figure 2.10
Malaxeur.



Figure 2.10.1
Solution de 2000 ml.

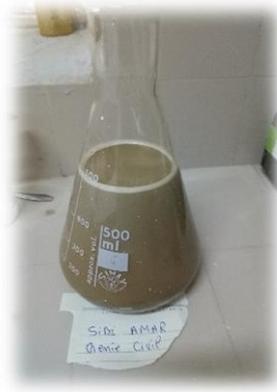


Figure 2.10.2
Solution de 500 ml au bicher

Tableau 2.3 Résultats de sédimentation pour sol naturel

Volume Cm ³	2000	Cm= 0,001	Ht = 11,84	Passant au 80µm = 91,1
P _s	2,7	P _w = 0,998	Masse = 80	P _s - P _w = 1,7

Temps de lecture		Lecture densimètre	Température	Correction température	Lecture corrigée	% passants de l'échantillon	Diamètre équivalent
H, min, sec		R	T°C	Ct	RC	P%	D mm
1/2	30	1,026	23	-0,0015	1,025	90,25	0,061752
1	60	1,025	23	-0,0015	1,024	86,639	0,043665
2	120	1,024	23	-0,0015	1,023	83,029	0,030876
5	300	1,023	23	-0,0015	1,022	79,419	0,020461
10	600	1,022	23	-0,0015	1,0155	55,955	0,014468
20	1200	1,015	22	-0,0015	1,014	50,540	0,010732
40	2400	1,014	22	-0,0015	1,013	46,930	0,007638
80	4800	1,012	22	-0,0015	1,011	39,710	0,00547
240	14400	1,011	22	-0,0015	1,01	36,100	0,003178
1440	86400	1,007	23	-0,0015	1,006	21,660	0,001329

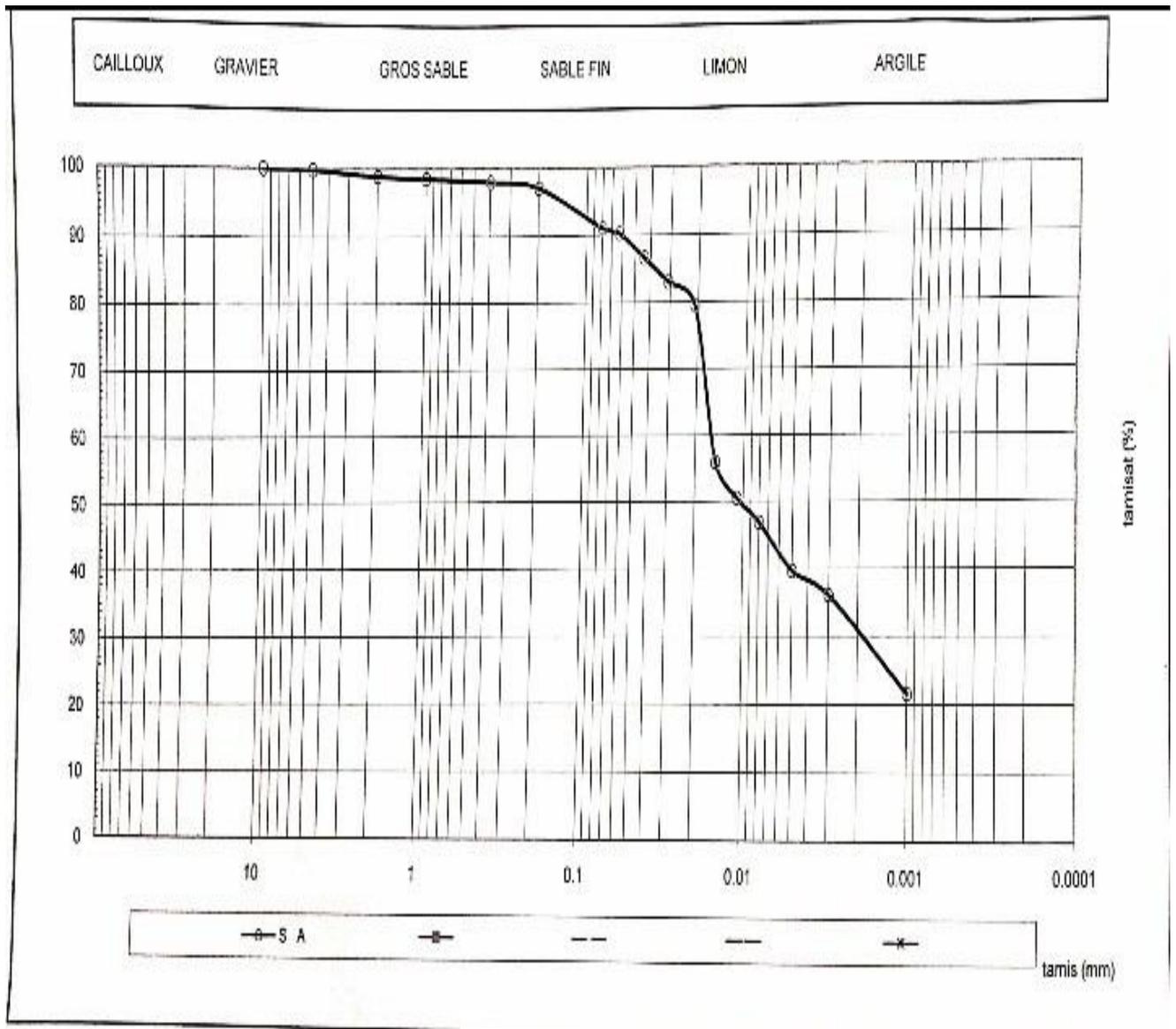


Figure 2.11 Courbe Granulométrie avec sédimentation

2.5.2.2 Interprétation : la courbe granulométrique de cette argile montre que :
 - Les pourcentages des fines est $70\% > 50\%$ ça veut dire que l'argile est fine.

2.6 Limite D'Atterberg

2.6.1 Définition

Lorsque les quantités d'eau que contient un sol (eau dans les pores et eau absorbée) varient, la consistance de ce sol varie dans des limites très larges.

Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques conventionnelles.

- Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique → Limite de liquidité (W_L)
- Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide → Limite de plasticité (W_P)



Figure 2.12 matériels utilisés dans l'essai Limite D'Atterberg

2.6.1.1 Principe de la méthode

- Détermination de **la limite de liquidité** par l'appareil de Casagrande.
- Détermination de **la limite de plasticité** par confection de rouleaux de 3mm de diamètre.

2.6.2 Mode opératoire

2.6.2.1 Matériel utilisé

- Boite de Casagrande.
- Coupelle.
- Spatule.
- Grattoir.
- Outil à rainure.
- Boite de pétri.

2.6.2.2 Préparation de l'échantillon

- Après échantillonnage du sol et homogénéisation par brassage, une masse de matériaux m est mise à imbiber dans un récipient d'eau à la température ambiante pendant 24h.
- Une fois imbibé, le matériau est tamisé par voie humide au tamis de $400\mu\text{m}$.
- L'eau de lavage et le tamisât sont recueillis dans un bac.
- Après une durée de décantation de moins de 2h, 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.

2.6.2.3 La limite de liquidité

- Répartir avec la spatule, dans la coupelle propre et sèche, une masse d'environ 70g de pâte. Cette pâte est étalée en plusieurs couches afin d'éviter d'emprisonner des bulles d'air, présente en fin d'opération : un aspect symétrique.
- Partager la pâte en deux, au moyen de l'outil de rainure.
- Fixer délicatement la coupelle sur le support métallique de l'appareil de Casagrande de 2 coups par seconde.
- Noter le nombre N de chocs nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 1cm.

Si $N < 15$, le processus est recommencé avec un matériau plus sec et homogénéisé à nouveau.



Figure 2.13 Boite de Casagrande limite de liquidité

- Si $N > 35$, l'opération est renouvelée sur un prélèvement de pâte auquel a été ajouté un peu d'eau distillée.
 - L'essai n'est poursuivi que lorsque N est compris entre 15 et 35.
- Prélever dans la coupelle à l'aide d'une spatule environ 5g de pâte de chaque côté des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit où elles se sont refermées, afin d'en déterminer la teneur en eau.
- Le prélèvement est placé dans une boîte de Petrie de masse connue et pesé immédiatement avant d'être introduit dans l'étuve.
- ✚ L'opération complète est effectuée au moins quatre fois sur la même pâte, mais avec une teneur en eau différente à chaque fois.

2.6.2.4 Interprétation des résultats

Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à une fermeture de 25 coups.

Tableau 2.4 Résultats de la limite de liquidité

	Essai 01		Essai 02		Essai 03	
	Boitier T 408	Boitier SB	Boitier ABE	Boitier VY	Boitier MA	Boitier MS
P.sol humide (g)	7,7	8,4	8,38	7,93	7,7	7,61
sol sec (g)	5,7	6,20	6,10	5,90	5,80	5,70
eau (g)	2,0	2,20	2,10	2,03	1,94	1,91
W (%)	35,09	35,48	34,43	34,41	33,45	33,50
moyennes (%)	35,29		34,42		33,48	

P. eau = poids sol humide – poids sol sec

$$W\% = \frac{\text{Poids eau}}{\text{Poids sol sec}} ; \quad W\% \text{ moyenne} = \frac{W1+W2}{2}$$

2.6.2.5 La limite de plasticité

- Former une boulette à partir de la pâte préparée.
- Rouler la boulette sur une plaque lisse, à la main ou éventuellement à l'aide d'une plaquette, de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3mm de diamètre.
- le rouleau, au moment où il atteint un diamètre de 3,0 mm±0.5mm doit avoir environ 10cm de longueur et ne doit pas être creux.



Figure 2.14 La limite de plasticité

la **limite de plasticité w_p** est la teneur en eau en pourcentage % du fuseau qui se brise en tronçons de 1 à 2 centimètres de longueur au moment où le diamètre atteint 3mm.

- ✚ Si aucune fissure n'apparaît, le rouleau est réintégré à la boulette, la pâte est malaxée tout en étant sèche légèrement.
- Reformuler un nouveau rouleau.
- Prélever une fois les fissures apparues, la partie centrale du rouleau et la placer dans une boîte de pétri de masse connue, la peser immédiatement et l'introduire dans l'étuve, afin de déterminer sa teneur en eau.

2.6.3 Résultats et calculs

Tableau 2.5 Résultats de la limite de plasticité

	Essai	
	Boitier SA	Boitier SB
P.sol humide (g)	2,32	2,38
P.sol sec (g)	1,93	1,98
P.eau (g)	0,39	0,40
W (%)	20,2	20,21
W moyennes (%)	20,2 ≈ 20	

2.6.3.1 Interprétation

L'indice de plasticité : $I_p = W_L - W_P = 14 \rightarrow 5 < I_p < 15$: Selon casagrande sol reconstitué d'une classe :

Moyennement plastique, à potentiel de gonflement faible à moyen.

Cet essai est effectué en faveur du projet : **Hangar des grains bouzaaroura el bouni**

Sondage de profondeur 1,60 / 2,00

2.7 Essais Chimiques

2.7.1 Valeur de Bleu de Méthylène

2.7.1.1 But de l'essai

Cet essai consiste à déterminer la propreté du matériau, ainsi l'argilosité.

2.7.2 Mode opératoire

2.7.2.1 Matériels utilisés

- ✓ Etuve.
- ✓ Tamis à 2mm.
- ✓ Balance.
- ✓ Becher.
- ✓ Agitateur électrique.

- ✓ Solution de Bleu de Méthylène.
- ✓ Chronomètre.
- ✓ Bague en verre.
- ✓ Papier filtre.
- ✓ Burette graduée.

2.7.2.1 Préparation de l'échantillon

- Sécher le sous-échantillon à 105°C.
- Tamiser à sec l'échantillon à analyser au tamis de 2mm.
- Récupérer un sous-échantillon 0/2mm de 30 g.
- Peser une masse de **30g** minimum, soit ; **M1**.

2.7.2.2 Exécution de l'essai

- Placer la masse **M1** dans un bécher contenant **500ml**.
- Mettre en agitateur à **700 Tr/min** pendant **5min**, l'ensemble : (eau + masse).
- Dégrader la vitesse de l'agitateur électrique jusqu'à **400 Tr/min** pendant la durée de l'essai.
- Injecter **V** (ml) de solution de bleu de Méthylène à l'aide de la burette.
-
- Après 2min, ajouter une dose de 5ml de solution de bleu.
- Prélever à l'aide d'une bague en verre une goutte en suspension et déposer la, sur le papier filtre. (la goutte prélevée doit avoir un diamètre de dépôt de 8 à 12mm).
- ✚ Le test est dit positif si dans la zone humide apparente autour du dépôt central, une auréole bleu clair persistant).
- On procède jusqu'à ce qu'il devienne positif. Effectuer des tests à la tâche, chaque minute pendant 5minutes.



Figure 2.15 malaxeur d'essai
bleu de méthylène



Figure 2.16 Papier filtre



Figure 2.17 exécution
de l'essai

2.7.2.3 Interprétation des résultats

La valeur au bleu de méthylène est exprimée en (gr) de bleu pour 1Kg de la fraction 0/2 mm.

Cas d'un matériau riche en fines : $MB = \frac{V}{M} \times 100$

Avec : **V1** : Volume total de solution injectée (120+ 500ml).

M1 : masse de la prise d'essai = 30 g.

$$MB = \frac{120 \times 0,01}{30} \times 100 = 4 \rightarrow VBS = 4$$

La VBS est une grandeur qui exprime globalement la quantité et l'activité de l'argile contenu dans le matériau étudié.

Le GTR retient 6 seuils :

>0,1 : seuil d'insensibilité à l'eau.

- >0,2 : seuil au-dessus duquel apparaît à coup sûr la sensibilité à l'eau.
- >1,5 : seuil entre les sols sablo-limoneux et sablo-argileux.
- >2,5 : seuil entre les sols limoneux peu plastiques et ceux de plasticité moyenne.
(notre cas)
- >6,0 : seuil entre les sols limoneux et argileux.
- >8,0 : seuil entre les sols argileux et très argileux.

2.8 Les essais mécaniques

2.8.1 L'essai Proctor

2.8.1.1 But du TP

L'essai de Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale.

2.8.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, 2.5kg de sol à étudier on lui ajoute 4% d'eau et on mesure sa teneur en eau et son poids spécifique sec après compactage.

L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau. On définit ainsi plusieurs points d'une courbe ; on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale et l'ordonnée la densité sèche optimale.



Figure 2.18 Photo personnelle

2.8.2.1 Matériel utilisé

- Moule Proctor.
- Dame Proctor normal.
- Règle à araser.
- Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau.
- Tamis 5 et 20mm.
- Eprouvette graduée.
- Pinceau, truelle et brosse.
- Petites boîtes (mesures des teneurs en eau).
- Balance et balance de précision.
- Etuve.
- Burette à huile (pour lubrifier le moule).



Figure 2.19 moule
et Dame Proctor



Figure 2.20
Matériau tamisé en 5mm

2.8.2.2 Manipulation

1. Préparation de l'échantillon (peser 2500 g du sol)

L'échantillon est déjà prêt à l'emploi, il a été préalablement remanié et mis à l'étuve.

- Humidifier le sol avec 300, 350, 400, 450 ml de l'eau pour chaque pourcentage.

2. Assembler le moule et le peser.

3. Introduire une première couche de sol dans le moule et la compacter à l'aide du mouton en Appliquant 25 coups.

4. Recommencer l'opération de compactage pour la deuxième et troisième couche.

5. Enlever la rehausse après le troisième compactage, le sol dépasse un peu le moule : Nécessité d'asurer soigneusement.

6. Peser le moule avec le sol dedans.

7. Démontez le moule et prélever un échantillon de sol qui sera mis à l'étuve pour la Détermination de la teneur en eau ω .

Les étapes précédentes sont reprises pour d'autres teneurs en eau initiales obtenues en ajoutant de l'eau au sol à l'aide d'une éprouvette graduée (100 ml à chaque fois).

2.8.2.3 Résultats et calculs

- Poids volumique d'un sol sec (notation γ_d)

$$\gamma_d = \frac{(W_s + W_a)}{(V_s + V_w + V_a)} = \frac{W_s}{V}$$

- Poids volumique (ou spécifique) des grains solides (notation γ_s)

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

- Teneur en eau (notation w) s'exprime en %:

$$W = \frac{100 \times W_w}{W_s}$$

Tableau 2.6 Résultats de l'essai Proctor pour sol naturel

Paramètre \ Essais	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Essai 04
Pourcentage d'eau (%)	12	14	16	18
Masse du moule (g)	1734	1768	1734	1734
Masse du sol+moule (g)	3523,1	3617,3	3656	3658,7
Volume (cm ³)	955	955	955	955
Teneur en eau W (%)	11,87	16,66	16,93	17,05
γ_d densité (sèche) (t/m ³)	1,67	1,69	1,73	1,70

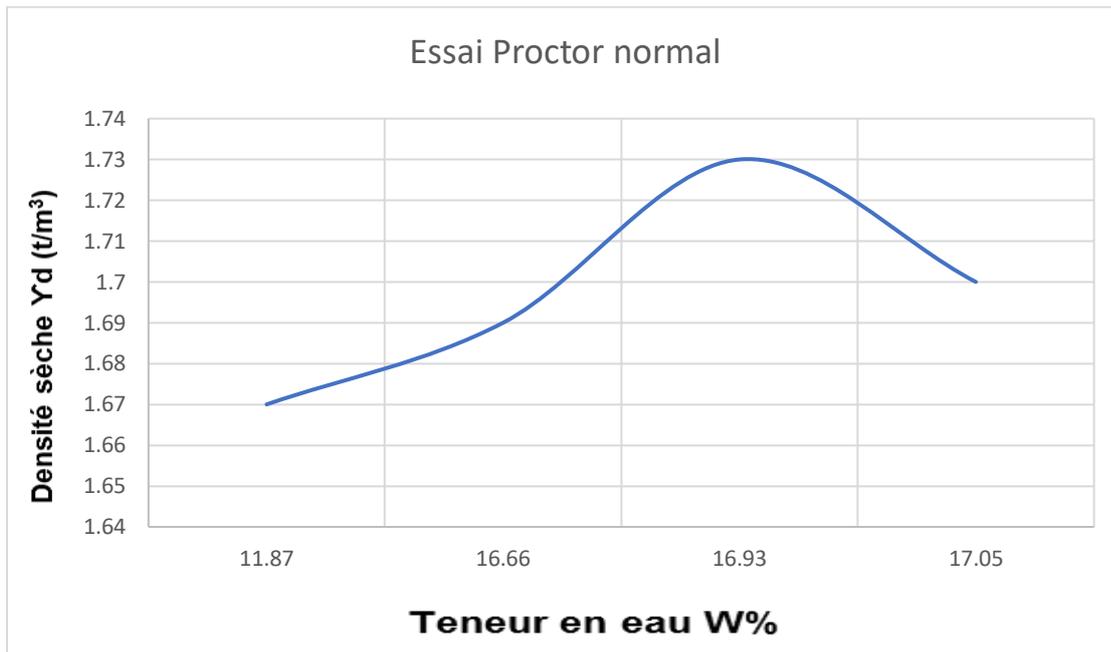


Figure 2.21 courbe essai Proctor normal

2.8.2.4 Interprétation: on voit que la pic de la courbe est dans la valeur 1,73 qui s'accorde la teneur en eau 16,93% puis elle diminue donc notre optimum est de 16%.

2.9 L'essai CBR

2.9.1 Introduction

La portance est définie comme étant l'aptitude d'un matériau à supporter une charge sans se déformer de façon excessive.

La portance dépend de nombreux facteurs ; on peut notamment citer :

- La nature du matériau : matériau de remblai ou de couche de forme, présence d'un traitement
- Le « taux » de compactage du matériau
- L'état hydrique du matériau

Il s'agit de quantifier cette portance par une valeur numérique ; alors, on réalise en laboratoire l'essai CBR : Californian Bearing Ratio.

C'est à partir de tel essais que l'on peut :

- Vérifier que la portance de la plate-forme que l'on vient de compacter est suffisante pour supporter la future chaussée, un ouvrage à construire ou le trafic des engins de chantier en phase de construction.



Figure 2.22

La machine CBR

- Apprécier l'état hydrique d'un matériau
- Définir la structure de chaussée à mettre en œuvre sur telle ou telle plate-forme

2.9.1.1 Définition et but

Les essais C.B.R. permettent, selon le processus utilisé, la détermination :

- De l'Indice CBR (California Bearing Ratio)
- Pour caractériser le matériau en tant que support ou constituant de chaussée.
- de l'Indice Portant Immédiat (IPI).
- Pour caractériser l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins.
- Pour évaluer l'état hydrique du matériau d'un sol ou d'un matériau utilisé dans la construction des ouvrages en terre ou des assises de chaussées.

La méthode CBR donne une évaluation de la portance, c'est-à-dire de l'aptitude des matériaux à supporter les charges.

-L'indice recherché est un nombre sans dimension exprimant le rapport entre les pressions produisant un enfoncement donné dans le matériau étudié d'une part et dans le matériau type d'autre part.

Principe

Il s'agit de poinçonner, dans des conditions de compactage déterminées (selon l'essai PROCTOR NORMAL) et de teneur en eau connu, un échantillon de matériau (généralement un sol) et de mesurer les efforts qui correspondent à certaines valeurs de l'enfoncement de la tige de poinçonnement.

On compare alors ces efforts à ceux qui produisent les mêmes enfoncements dans un matériau de référence : sol de Californie.

<i>Enfoncement de la tige de poinçonnement</i>	<i>Effort développé dans le matériau testé</i>	<i>Effort développé dans le matériau de référence</i>
2.5 mm	F ₁	13.35 kN
5 mm	F ₂	19.93 kN

Figure 2.22.1 Enfoncements pour indice CBR

Cela permet de définir 2 indices CBR :

- $CBR1 = 100 * (F1 / Fr1)$
- $CBR2 = 100 * (F2 / Fr2)$

La valeur de l'indice CBR du sol sera le plus grand des indices précédents :

$CBR = \text{Max} (CBR1 \text{ et } CBR2)$

Cet indice quantifie bien la portance du matériau :

- Une valeur faible correspond à un faible effort résistant donc à un matériau peu porteur dont

plutôt « mou »

- Une valeur élevée correspond au contraire à un effort résistant important donc à un matériau très portant dont plutôt «dur ».

2.9.2 Appareillage

Matériel de confection des éprouvettes :

Il comprend :

- Le moule CBR
- Les dames et le matériel de compactage Proctor normal et modifié
- L'ensemble des accessoires (rehausse, disque d'espacement, règle à araser,...),
- Le matériel d'usage courant : balance, bacs, étuve.

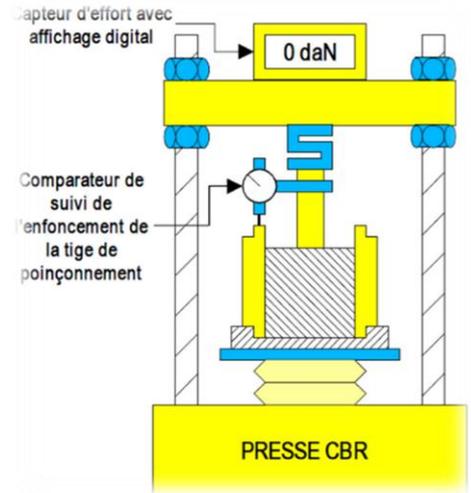


Figure 2.23 Presse CBR



Figure 2.24 Damme CBR



Figure 2.25 Les Moules CBR.

2.9.2.1 Matériel de poinçonnement

Il comprend :

Une presse de compression de 50 KN minimum et de course d'au moins 10 mm, Cette presse doit être équipée :

- D'un poinçon cylindrique en acier
- D'un dispositif permettant la manœuvre de la partie mobile de la presse
- D'un dispositif dynamométrique permettant de mesurer les efforts de poinçonnement.

2.9.2.2 Manipulation

- Solidariser la plaque de base et le moule CBR.
- Mettre le disque d'espacement.
- Placer une feuille de papier filtre sur le disque d'espacement.
- Fixer la rehausse.

2.9.2.3 Confection des éprouvettes

- Préparer deux échantillons de 5,5 kg du matériau après le tamiser à 5mm
- Humidifier le matériau d'un échantillon à une teneur de 16% (pour l'I. CBR) et l'autre à une même teneur en eau (pour l'IPI) puis les malaxer afin de rendre les mélanges le plus homogène possible.
- Diviser la quantité du matériau en 5 parts.
- Compacter le matériau selon le processus Proctor modifié.
- Araser soigneusement à partir du centre vers la périphérie.
- Enlever la plaque de base ; retourner le moule ; le fixer à nouveau sur la plaque de base.
- Extraire le disque d'espacement.
- Placer le moule sur le plateau de la presse CBR.

2.9.2.4 Poinçonnement de l'échantillon

- Placer l'ensemble sur la presse, en position centrée par rapport au piston.
- Amener la tige de poinçonnement au contact de l'échantillon.
- Positionner le comparateur de suivi de l'enfoncement de la tige ; le remettre à « 0 ».
- Mettre la presse en marche.

Relever les efforts correspondant aux enfoncements de 1,25 / 2/2,5/5/7,5 et 10 mm de la tige de poinçonnement.

- Pour l'indice CBR immédiat, placer l'ensemble sur la presse, Interposer dans le volume libéré par le disque d'espacement deux surcharges, la surcharge en une pièce placée sur l'échantillon et celle en deux pièces au-dessus.

2.9.2.5 Résultats de l'essai CBR pour sol naturel 16% optimum

Tableau 2.7 Résultats de l'essai CBR pour sol naturel 16% optimum

mm	F(KN)	P(N/mm ²)	I _{CBR}
1,25	0,322	1,66	
2	0,473	2,44	
2,5	0,580	2,99	4,34
5	1,025	5,29	5,14
7,5	1,388	7,17	
10	1,695	8,75	

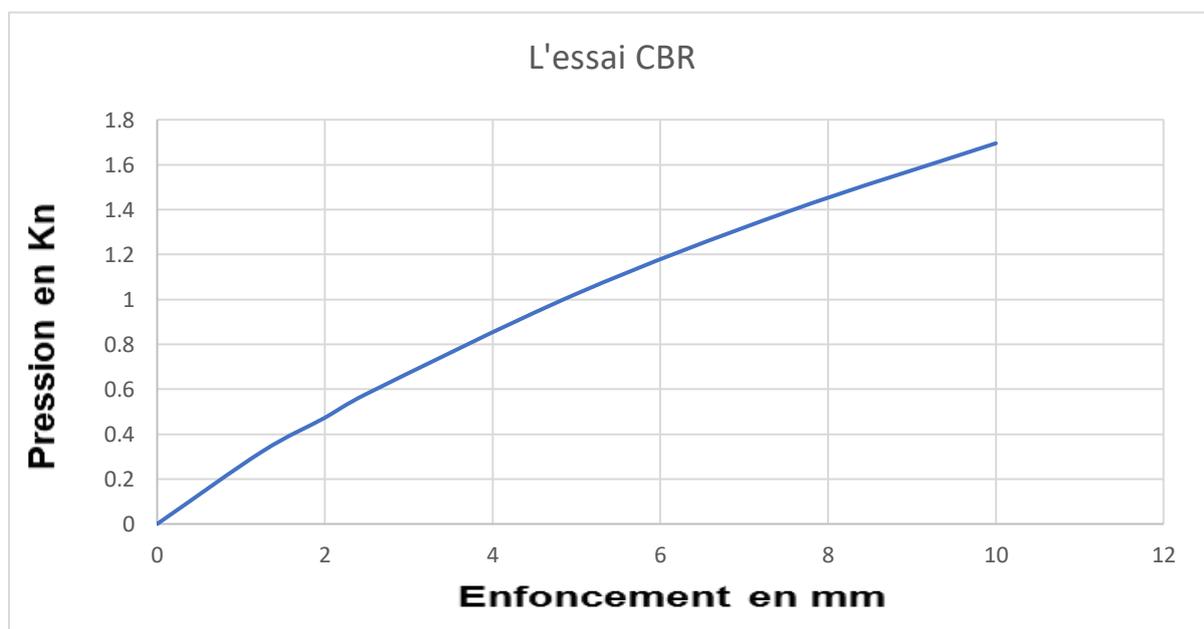


Figure 2.26 Courbe d'essai CBR

2.9.2.6 Interprétation : on voit que la courbe est dans un sens croissant, mais la pression est faible par rapport à l'enfoncement, donc c'est un sol faible.

2.10 L'essai du compression simple RC

2.10.1 Principe

Cet essai consiste à appliquer un effort de compression à un échantillon reposant sur une surface indéformable, cette sollicitation provoque la déformation de l'éprouvette. On mesure chaque fois les contraintes et la force de compression chaque fois au cours de l'essai.



Figure 2.27 l'essai
Compression simple RC

2.10.1.1 But de l'essai

Dans l'essai de compression simple Rc on doit déterminer la résistance du sol et la cohésion ainsi la capacité portante du sol.

2.10.2 Appareillage

- Eprouvette du sol (préparé avec méthode de Proctor)
- La machine de compression simple.
- Chronomètre.

2.10.2.1 Mode opératoire

- Préparation d'une éprouvette avec l'essai de Proctor.
- monter l'éprouvette sur la machine de compression.
- Application de la force de compression sur l'éprouvette avec la lecture chaque : (1 / 1,5/ 2 / 4/ 6/8 /10 minutes ou plus).
- Arrêt de l'essai lorsque l'éprouvette est fissuré et prendre la lecture maximum.

Interprétation et résultats :

On peut théoriquement déduire de R_c la cohésion c_{uu} par la relation $C_{uu} = 1/2 RC$

Tableau 2.8 Résultats de l'essai compression simple pour sol naturel

T(min)	F(KN)	RC(MPA)	Cuu(MPA)
1	0,310	0,39	0,19
1,5	0,520	0,99	0,33
2	0,675	0,86	0,43
4	0,982	1,25	0,62

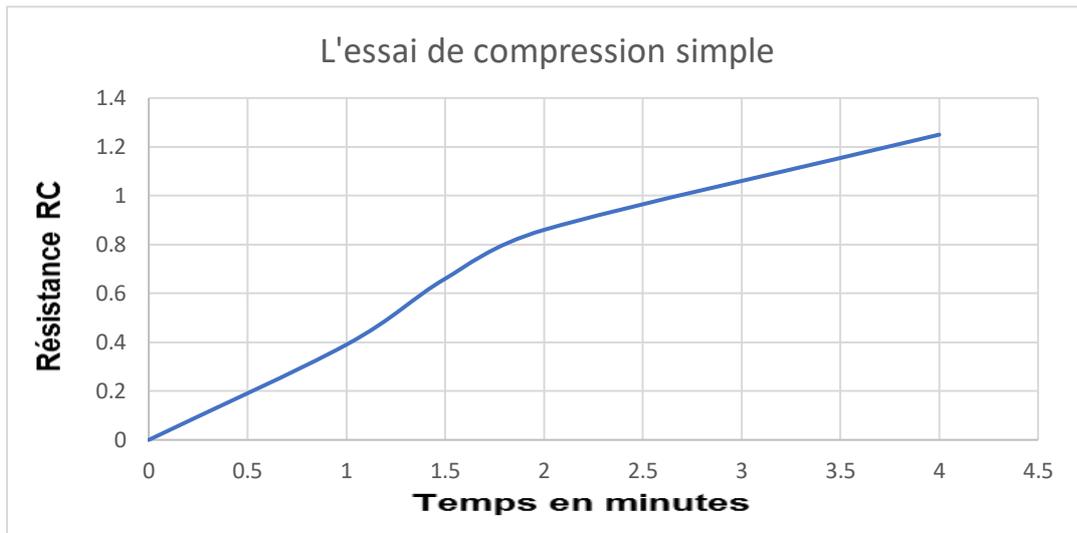


Figure 2.28 Courbe de la résistance RC

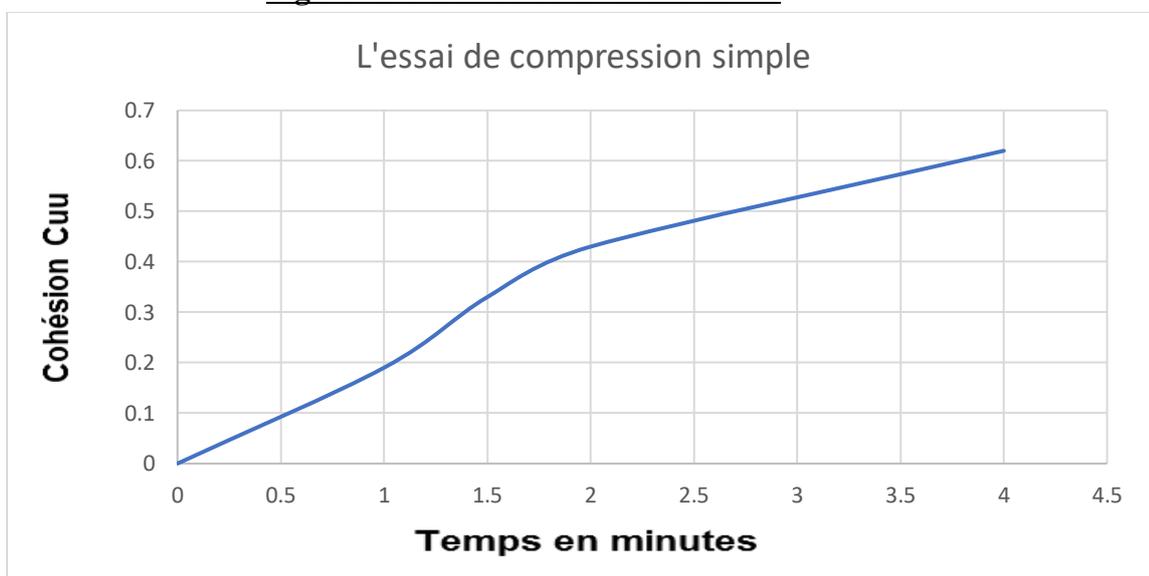


Figure 2.28.1 Courbe de la cohésion Cuu

2.10.2.2 Interprétation des courbes

Dans les deux courbes on voit que la résistance et la cohésion augmentent par rapport au temps.

2.11 Cisaillement rectiligne : UU (non consolidé non drainé)

2.11.1 But de l'essai

Cet essai a pour but de déterminer les paramètres de résistance au cisaillement : (Cohésion C et l'Angle de frottement ϕ) d'un matériau utile pour les études de stabilité de terrain (talus, fondation profonde).

2.11.1.1 Principe de l'appareil

L'essai consiste à soumettre le sol à un cisaillement direct, rectiligne, suivant un plan imposé. L'éprouvette de sol (section circulaire ou carrée) est placée à l'intérieur de deux demi-bottes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre et sans contact (Elles sont séparées par l'échantillon).

Un piston permet d'exercer sur le sol un effort normal N constant pendant la durée de l'essai.

2.11.2 Composants de l'appareil

- ✓ Boite de Casagrande

{	pierre poreuse	}	La partie inférieure (fixe).	
	plaque drainante			La partie supérieure (mobile).
	piston			
- ✓ L'appareil des poids.



Figure 2.31 L'appareil des poids



Figure 2.30 Boite de Casagrande

{ chariot.
comparateur.



Figure 2.32 chariot comparateur

2.11.2.1 Mode opératoire

2.11.2.2 Matériels utilisés

- ✓ couteau.
- ✓ Piston extracteur.
- ✓ Tare.
- ✓ Règle.
- ✓ Balance.
- ✓ Trousse coupante.
- ✓ Etuve.



Figure 2.33 Couteau, Tampon, Trousse, règle

*

2.11.2.3 Préparation de l'échantillon

- Prendre le morceau de sol et enfoncer dedans la trousse coupante.
- Retirer le surplus à l'aide du couteau et de la règle.
- Extraire l'échantillon à analyser avec le piston extracteur.
- Refaire ces étapes pour obtenir 3 ou 4 échantillons similaires.
- Laisser **250g** du sol et le mettre à l'étuve à 105°C pendant 24h pour déterminer sa teneur en eau.



Figure 2.34 Poids de la trousse

2.11.2.4 Exécution de l'essai

- Placer l'échantillon dans la boîte de Casagrande.
- Faire fonctionner le système.
- Prendre les lectures jusqu'au cisaillement de l'échantillon.
- Placer les autres échantillons dans la boîte successivement et refaire l'essai.



Figure 2.35 Boite de casagrande



Figure 2.36 Echantillon après cisaillement.

2.11.2.5 Préparation de l'essai cisaillement UU pour :1 éprouvette du sol naturel 16% optimum

Tableau 2.9 Les donne de cisaillement

Caractéristiques de l'éprouvette	Echantillons		
	0,75	1,25	1,75
Contrainte σ (Kg /cm ²)	0,75	1,25	1,75
Masse humide + trousse (g)	159,5	160,3	160,5
Masse de la trousse (g)	46	46	46
Masse nette de l'éprouvette (g)	113,5	114,3	114,5
Volume de l'éprouvette (g)	56,52	56,52	56,52
N° de la tare :	FB	FB	FB
Masse totale humide + tare (g)	250	250	250
Masse totale sèche + tare (g)	217,1	217,1	217,1
Masse de la tare (g)	41,7	41,7	41,7
Masse de l'eau (g)	32,9	32,9	32,9
Masse sèche de l'éprouvette (g)	175,4	175,4	175,4
Teneur en eau initiale W_i (%)	18,8	18,8	18,8
Teneur en eau de saturation (%)	22,1	21,8	21,5
Degrés de saturation (%)	85	86	87
Masse volumique humide γ_h (g/cm ³)	2,01	2,02	2,03
Masse volumique sèche γ_d (g/cm ³)	1,69	1,70	1,71

2.11.3 Interprétation

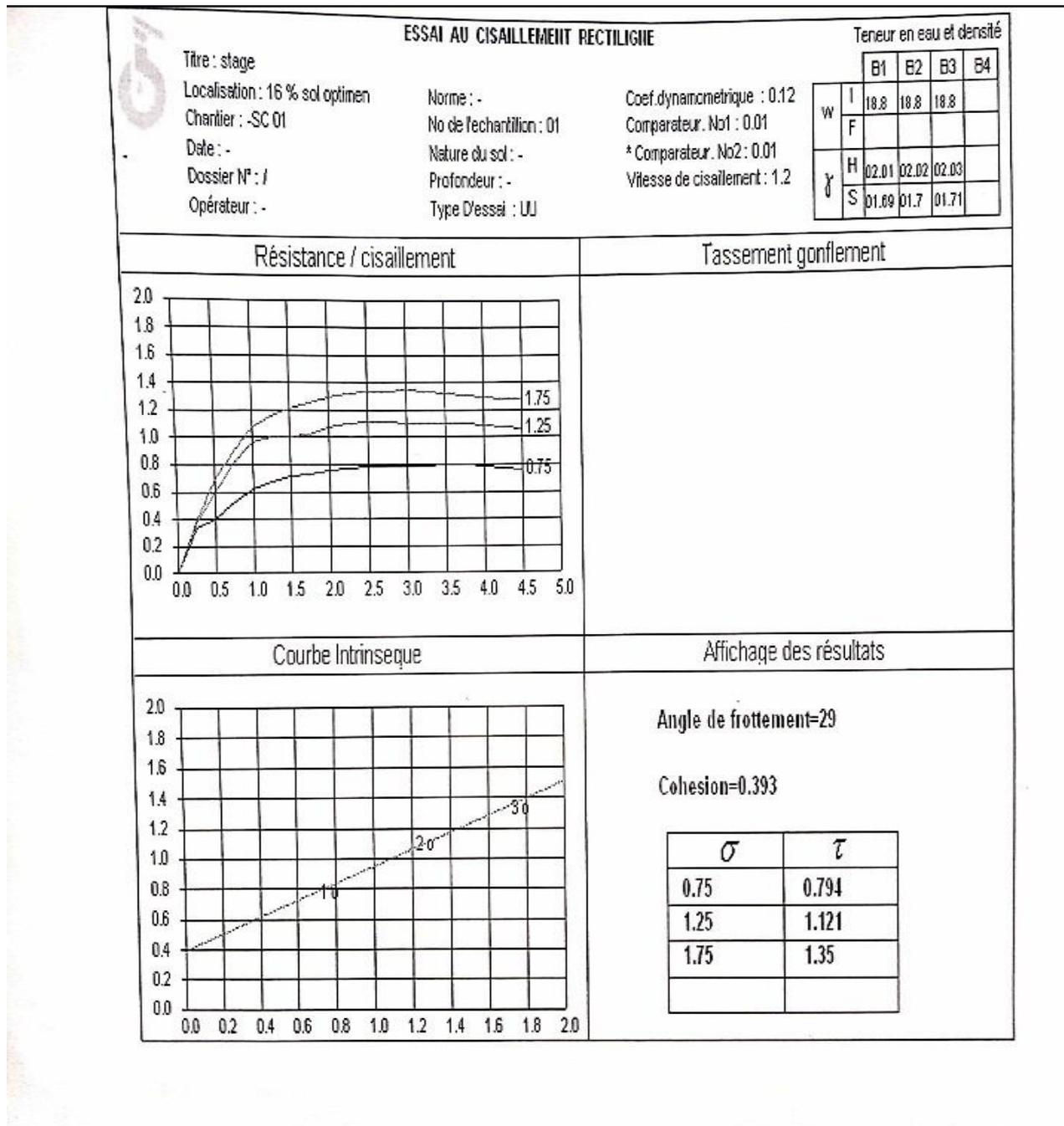


Figure 2.37 les courbes d'essai cisaillement rectiligne

Cet essai de cisaillement rectiligne nous a donné deux paramètres : l'angle de frottement $\phi = 29$ et une cohésion $C = 0,393$.

2.12 L'essai œdométrique

2.12.1 Définition : Chaque construction doit être respectée par des normes de stabilités et consolidations des sols, tel que le phénomène de consolidation est la déformation du sol fin saturé au fur et à mesure de l'évacuation de l'eau interstitielle, suite à l'application d'une surcharge en surface du sol.

Il est prépondérant dans un sol argileux et s'exprime par une évolution du tassement dans le temps.



Figure 2.39 Bâties œdométriques

2.12.1.1 Principe de l'essai

L'essai œdométrique consiste à soumettre l'échantillon à une série de pressions verticales et de suivre l'évolution des déformations verticales du matériau dans le temps, sous une surcharge donnée, à l'aide des comparateurs.

Les principaux paramètres pouvant être déduits de l'essai œdométrique réalisé sur des échantillons non remaniés sont :

Les paramètres de compressibilité ;

Le coefficient de consolidation ;

La contrainte apparente de pré consolidation ou la résistance du matériau ;

Le coefficient de consolidation secondaire ;

Les paramètres de gonflement.

2.12.2 Les principes de l'essai œdométrique à chargement par paliers sont les suivants :

Le chemin de contraintes correspond à une déformation unidimensionnelle ;

Le drainage est axial et unidimensionnel.

Les chemins de contraintes et les conditions de drainage sous des fondations sont généralement tridimensionnels et des différences peuvent apparaître au niveau des valeurs calculées pour le tassement ou pour sa vitesse.

Un tel type d'essai représente le tassement d'une couche de faible hauteur soumise à une surcharge de grande surface.

Dans le cas où la surcharge est ponctuelle, cet essai devient irréaliste, du fait que dans ce cas les déformations latérales du sol sont non négligeables.

Une méthode a été proposée par Skempton et Bjerrum pour le calcul du tassement à partir de l'essai œdométrique en tenant compte des déformations latérales dans ce cas.

L'analyse d'un essai de consolidation repose généralement sur l'hypothèse que le sol est saturé.

Dans le cas de sols non saturés, certains paramètres déduits de l'essai peuvent ne pas avoir de signification physique.

2.12.1 Appareillage

L'appareil comporte essentiellement :

Moule œdométrique ayant une paroi lisse indéformable.

Bâti de chargement. Il comprend essentiellement un levier
Qui transmet les surcharges au piston.

Disques de poids connus pour charger l'échantillon.

Comparateur mécanique pour la mesure des tassements.

Deux pierres poreuses avec le papier filtrent.

Ce dernier sert à protéger les Pierres du colmatage dû aux
grains fins.

Chronomètre donnant la seconde.



Figure 2.39 Disques de poids

2.12.1.1 Réalisation de l'essai

Un essai œdométrique par paliers comporte l'application d'une série de pressions dont
chacune peut durer 24 heures.

On se propose dans cette expérience d'étudier un
échantillon sableux sec, pour lequel le tassement est
essentiellement instantané et peut éventuellement évoluer
par fluage.

Le programme de chargement de l'échantillon exprime en
termes d'effort vertical appliqué par le piston, est comme
suit : 3,75 ; 9,75 ; 20 ; 75 ; 9,75 ; 3,75 et enfin 0 kg.

Chaque palier doit durer 5 minutes.

On mesure le tassement suivant la cadence suivante : 0,15
secondes, 30 s, 45 s, 1 min et 2 minutes.

On mesure les dimensions du moule et celles de chaque
pierre poreuse.



Figure 2.40 préparation
De l'échantillon.

On mesure le bras de levier permettant de calculer l'effort revenant au moule.

On pèse le moule œdométrique vide et la pierre poreuse munie d'un papier filtre et on met
la pierre poreuse inférieure à la base du moule. Le bac contenant le moule doit être sec tel que
La pierre poreuse joue ici le rôle d'une base pour le moule œdométrique.

On remplit le moule par du sable sec à partir d'une hauteur de 20 cm par rapport à la pierre
poreuse. Les mains doivent former ainsi un entonnoir de faible ouverture.

Une fois le moule rempli, on arase la surface supérieure à l'aide d'une règle ou d'un élément
rigide et plan et on pose la pierre poreuse supérieure.

On pèse l'ensemble moule + échantillon + pierres poreuses et on fixe le moule sur le bac et
serre les vis de fixation.

Par mettre en place le piston et régler le comparateur à zéro on pose le poids correspondant au
premier chargement et on repère tout de suite la position du comparateur, et ainsi de suite.

Une fois qu'on atteint l'effort maximum, on procède d'une façon identique au chargement de
l'échantillon.

2.12.2 Résultat de l'odomètre

Tableau 2.10 Résultats de l'odomètre pour sol naturel

Paramètre	Cc(%)	Cg(%)	Pc (bars)
Sols			
Argile limoneuse	8,8	1,8	0,925

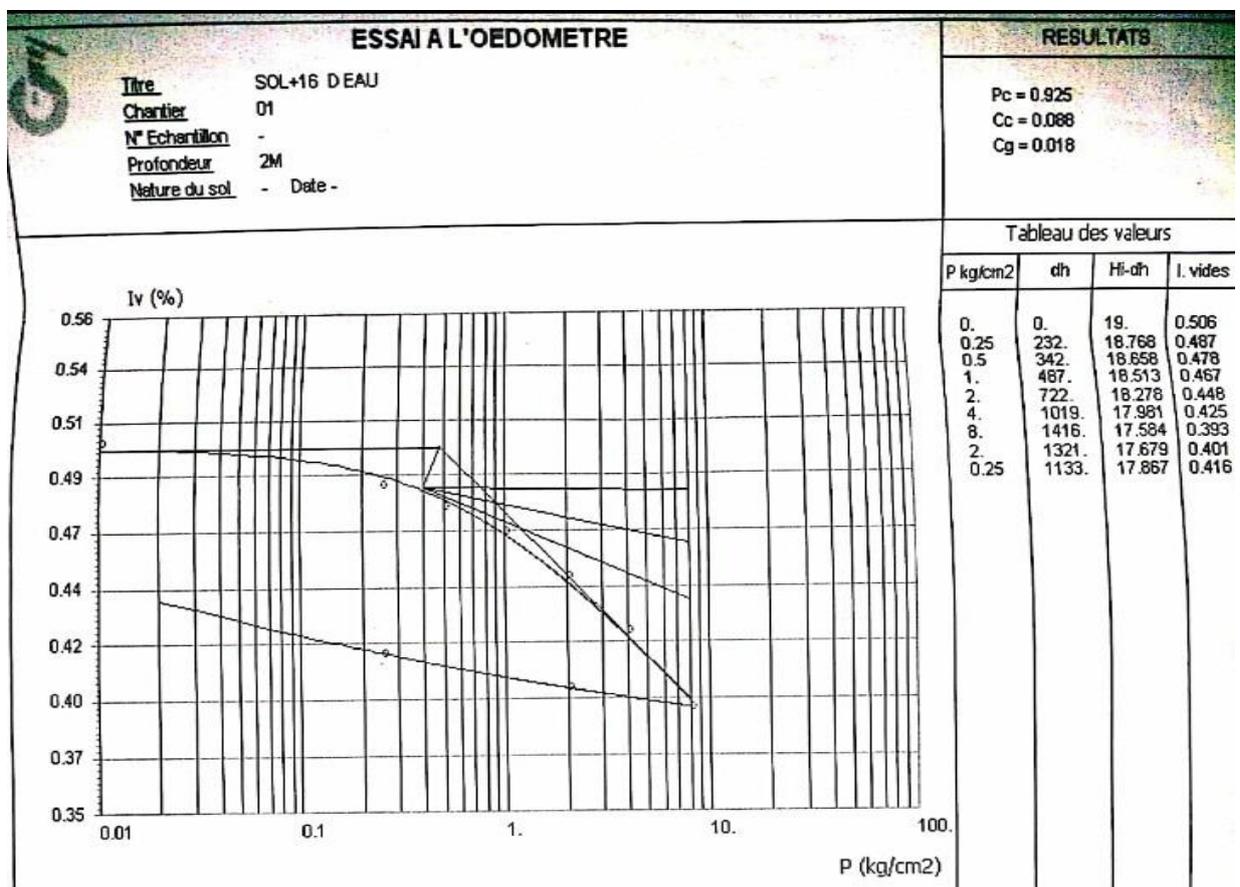


Figure 2.41 courbe de l'essai œdométrique

La courbe $\sigma=f(e)$ (Sol naturel 16% optimum)

2.12.2.1 Interprétation

D'après l'essai on a trouvé les paramètres suivantes pression de consolidation 0.925 bars, coefficient de compressibilité 8.8 % et gonflement de 1.8 %.

3.Partie 2 : etude du sol amélioré avec la chaux

3.1 Introduction

Dans cette partie on va etudier les essais mecaniques pour le sol amélioré avec la chaux ainsi les tableaux, courbes et interprétations :

3.1.1 L'essai proctor

Dans la partie 01 on a détaillé l'essai Proctor (principe , but, appareillage ainsi le mode opératoire.)



Figure 2.42 Mélange du sol sec avec la chaux

3.2 Manipulation

La manipulation e l'essai Proctor Sol naturel + 3% de la chaux

- 1- Préparation du sol 24h dans l'étuve)
- 2- Tamiser le sol dans un tamis 5 mm
- 2- Peser 2500 g du sol
- 2- Peser 3% de la chaux éteinte (75 g)
- 3-Mélanger le sol sec avec la chaux

3- malaxer le mélange avec l'eau (300g ; 350 g ; 400g ; 450 g ; 500g ; 550 g selon le pourcentage exécuté.)

4- Assembler le moule Proctor et graisser le.

5- Introduire la première couche et compacter 25 coups puis la deuxième couche, puis la troisième avec le même nombre de compactage.

6-Enlever la rehausse après le troisième compactage, le sol dépasse un peu le moule : Nécessité d'araser soigneusement.

7- Peser le moule et prendre un échantillon pour la teneur en eau.

3.2.1 Résultats

Tableau 2.11 Résultats de l'essai Proctor pour sol amélioré

Paramètre \ Essais	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Essai 04	Essai 05	Essai 06
Pourcentage d'eau (%)	12	14	16	18	20	22
Masse du moule (g)	1734	1768	1768	1734	1768	1768
Masse du sol+moule (g)	3432,2	3533,5	3586,3	3644	3711,7	3692
Volume (cm ³)	955	955	955	955	955	955
Teneur en eau W (%)	9,91	8,96	10,01	12,15	15,01	15,06
Yd densité (sèche) (t/m ³)	1,58	1,62	1,64	1,69	1,75	1,64

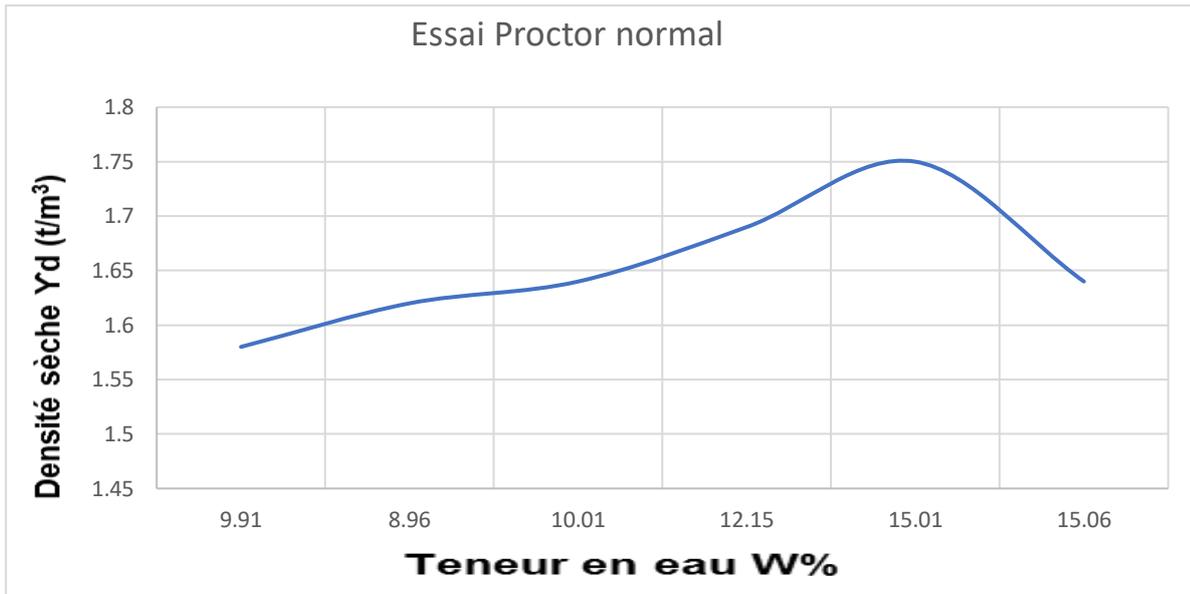


Figure 2.43 courbe d'essai Proctor normal

3.2.1.1 Interprétation: on voit que le pic de la courbe est dans la valeur 1,75 qui s'accorde la teneur en eau 15,01% puis elle diminue donc notre optimum est de 20%.

3.3L'essai CBR

Dans la partie 01 on a détaillé l'essai CBR

3.3.1 Manipulation

La meme manipulation précédente avec une addition de 165 g de la chaux et mélangé avec le sol a sec avant humidifier avec 20% de l'eau pour l'amélioration.

3.3.1.1 Résultats essai CBR pour sol naturel + 20% eau + 3% chaux

Tableau 2.12 Résultats essai CBR pour sol naturel + 20% eau + 3% chaux

mm	F(KN)	P(N/mm ²)	I _{CBR}
1,25	0,472	2,43	
2	0,497	2,568	
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	

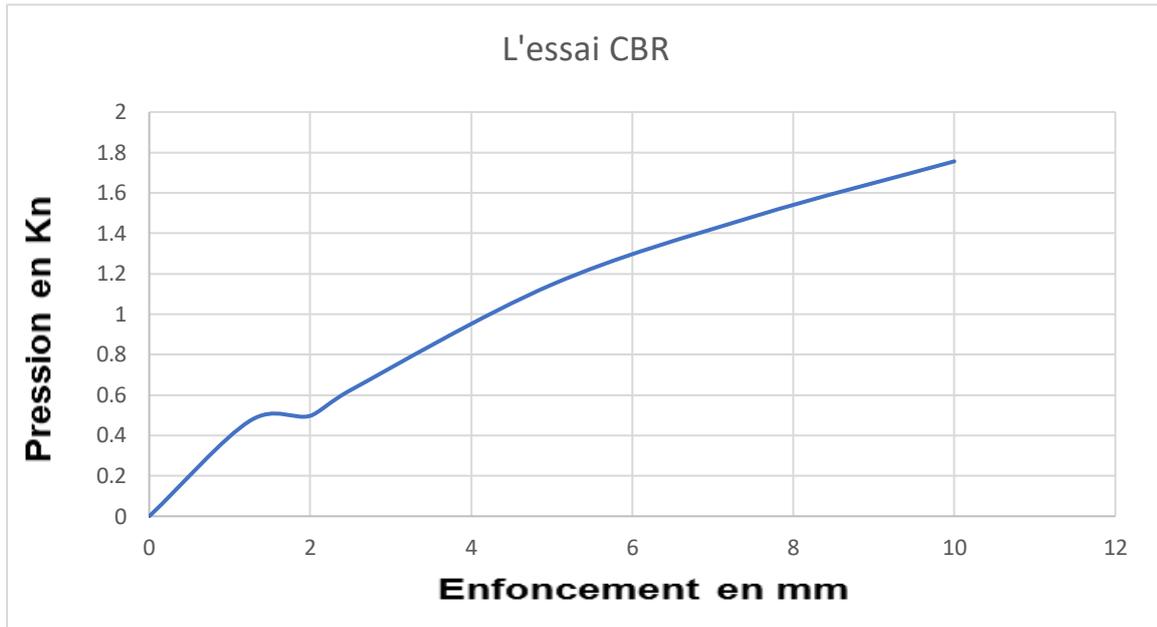


Figure 2.44 courbe d'essai CBR

3.3.2 Interprétation : on voit que la courbe est dans un sens croissant, malgré le résultat avec le sol amélioré est augmenté par rapport au sol naturel, mais la pression n'est pas assez suffisante.

3.4 L'essai de compression Rc

Dans la partie 01 on a détaillé l'essai de Compression Rc.

3.4.1 Manipulation

La même manipulation précédente avec une éprouvette améliorée avec 3% de la chaux et humidifié avec 20% de l'eau.

3.4.1.1 Résultats de l'essai compression Rc

Tableau 2.13 Résultats de l'essai compression Rc pour sol amélioré

T(min)	F(Kn)	Rc(MPA)	Cuu(MPA)
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

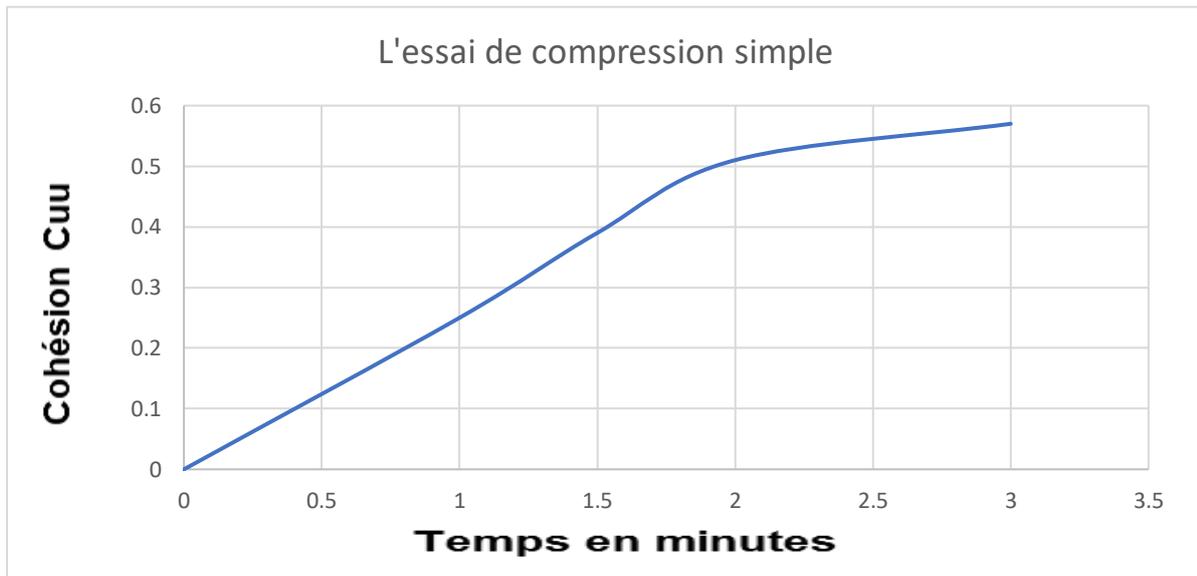


Figure 2.45 la courbe de la cohésion Cuu

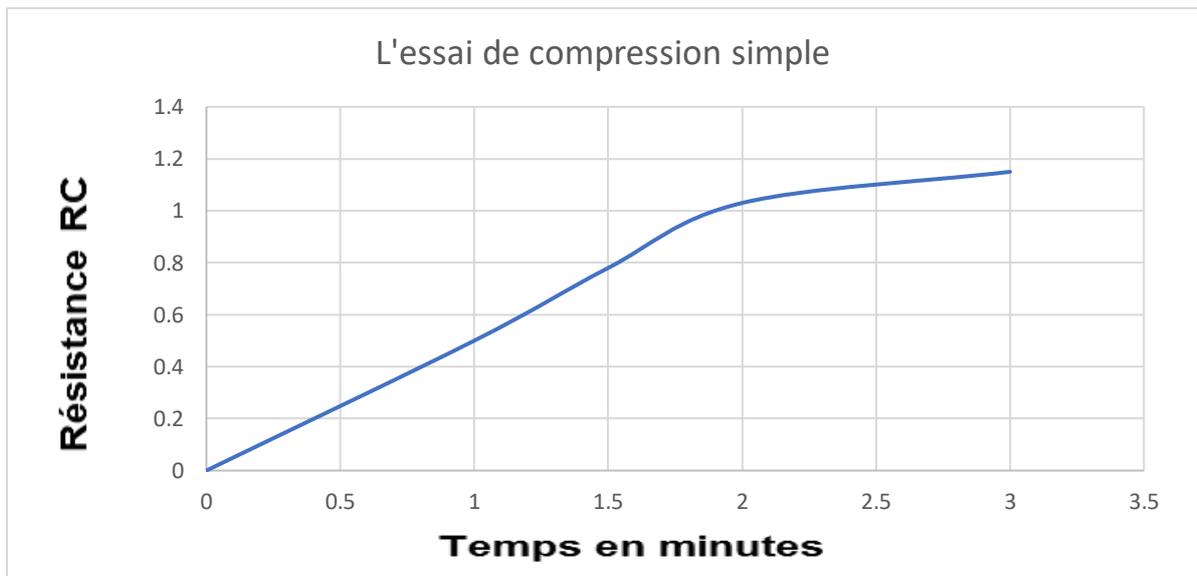


Figure 2.45 la courbe de la cohésion Cuu

3.4.2 Interprétation

Dans les deux courbes on voit que la résistance et la cohésion augmentent par rapport au temps, mais les résultats de sol amélioré ont diminué par rapport au sol naturel.

3.5 Cisaillement rectiligne UU

Dans la partie 01 on a détaillé l'essai de cisaillement rectiligne ;

3.5.1 Manipulation

La meme manipulation précédente avec une éprouvette améliorée avec 3% de la chaux.

3.5.1.1 Résultats essai cisaillement rectiligne pour sol+3% chaux

Tableau 2.14 Résultats essai cisaillement rectiligne pour sol+3% chaux

Caractéristiques de l'éprouvette	Échantillons		
Contrainte σ (Kg /cm ²)	0,75	1,25	1,75
Masse humide + trousse (g)	158,3	158,4	158,5
Masse de la trousse (g)	46	46	46
Masse nette de l'éprouvette (g)	112,3	112,4	112,5
Volume de l'éprouvette (g)	56,52	56,52	56,52
N° de la tare :	WM	WM	WM
Masse totale humide + tare (g)	250	250	250
Masse totale sèche + tare (g)	214,2	214,2	214,2
Masse de la tare (g)	49,3	49,4	49,3
Masse de l'eau (g)	35,8	35,8	35,8
Masse sèche de l'éprouvette (g)	164,9	164,9	164,9
Teneur en eau initiale W_i (%)	21,7	21,7	21,7
Teneur en eau de saturation (%)	24,3	24,3	24,3
Degrés de saturation (%)	89	89	89
Masse volumique humide γ_h (g/cm ³)	1,99	1,99	1,99
Masse volumique sèche γ_d (g/cm ³)	1,63	1,63	1,63

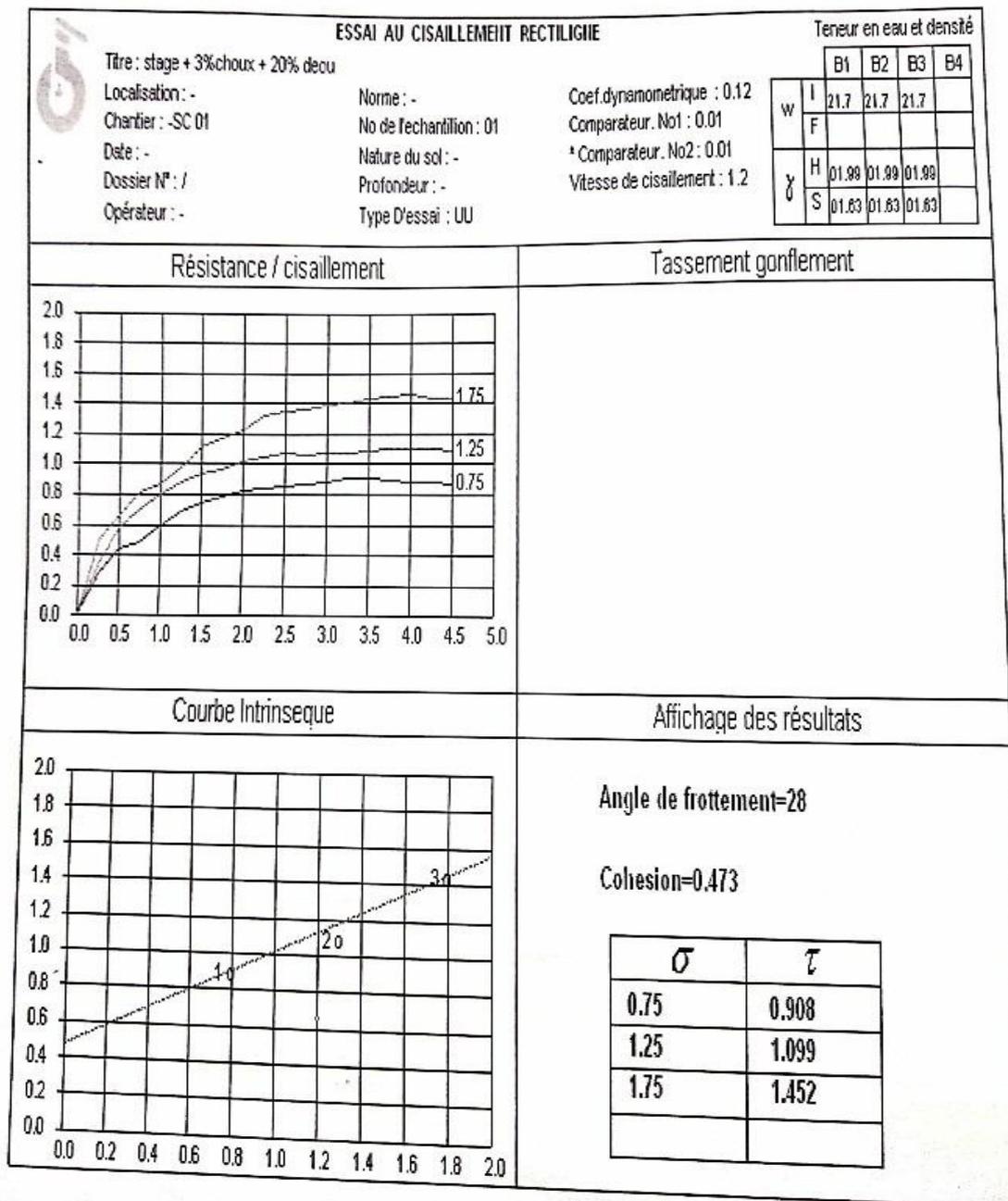


Figure 2.46 Courbes de l'essai cisaillement rectiligne

3.5.2 Interprétation

Cet essai de cisaillement rectiligne nous a donné deux paramètres suivants : l'angle de frottement $\phi = 28$ et une cohésion $C = 0,473$.

On comparant avec le sol naturel il Ya une diminution dans l'angle de frottement et augmentation de cohésion.

3.6 L'essai oedometrique

3.6.1 Manipulation

Avec la meme manipulation de l'essai dans la partie 01, cette fois on utilise un sol amélioré avec 3% de la chaux et humidifié avec 20% de l'eau.

On exécute l'essai, on trouve :

3.6.1.1 Résultat de l'odomètre

Tableau 2.15 Résultat de l'odomètre pour sol amélioré

Paramètre	Cc(%)	Cg(%)	Pc (bars)
Sols			
Argile limoneuse	11	0,3	2,605

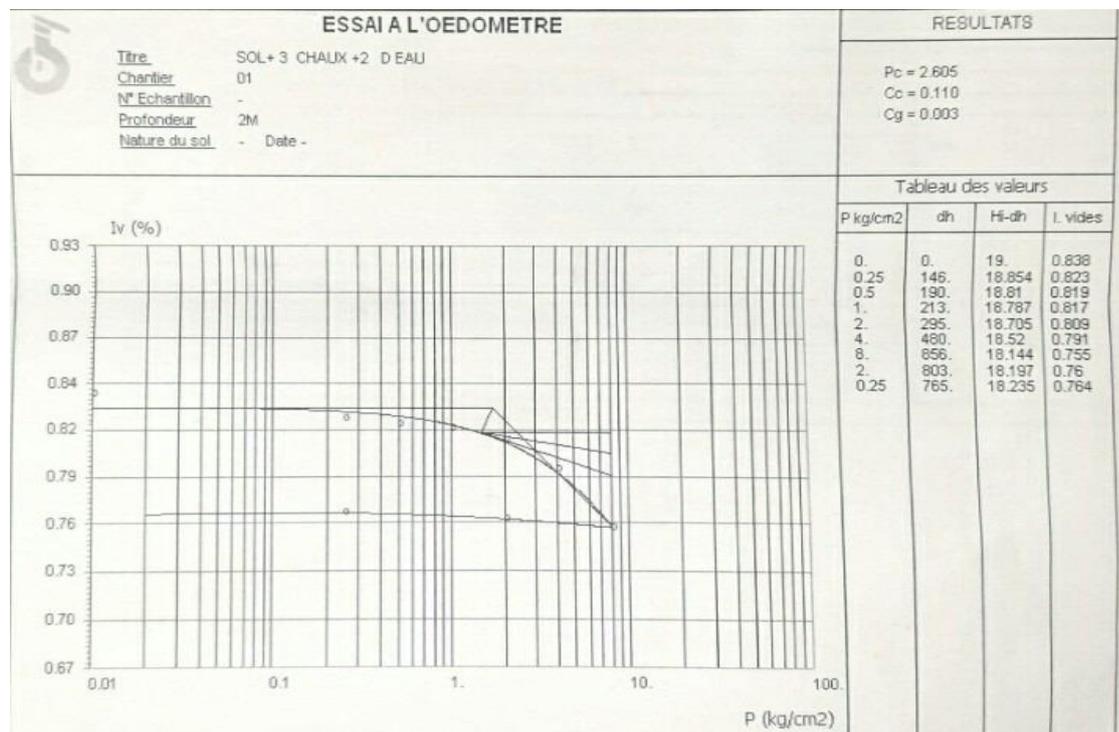


Figure 2.47 La courbe de L'essai oedometrique

3.6.2 Interprétation

D'après l'essai on a trouvé les paramètres suivants : pression de consolidation 2.605bars, coefficient de compressibilité 11 % et gonflement de 0.3 %.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté le sol étudié, est une argile limoneuse, on a appliqué des essais physiques, chimiques et mécaniques en deux parties : sol naturel seul et sol amélioré avec la chaux, on a vu que la chaux a donné de bons résultats dans quelques essais par rapport au sol naturel on cite les essais mécaniques comme, la diminution de la teneur en eau, la densité sèche, coefficient de consolidation et indice CBR.

Donc en conclusion que la chaux est un bon choix pour l'amélioration des sols

Chapitre 03

Essais sur sol renforcé et amélioré

4.1 Introduction : Le chapitre décrit le matériau utilisé dans le travail présenté pour le renforcement du sol étudié. La mise en place du géotextile et leurs procédures et techniques employées pour Préparer les différentes éprouvettes, l'exécution de l'essai et leurs déroulements détaillés aussi courbes et interprétations.

4.1.1 Le matériau utilisé : est un géotextile non-tissé de couleur blanche de références : GAMME AS25, AS35, et GAMME AL10 par la société AFITEX ALGERIE. Fiches techniques ci-joint

AFITEX ALGERIE Drainage - Soutènement - Etanchéité									
Gamme AS									
Géotextile non-tissé aiguilleté en fibres courtes haute ténacité 100% polypropylène.									
 SEPARATION					 FILTRATION				
Caractéristiques	Normes	Unités	AS10	AS15	AS20	AS25	AS30	AS35	AS40
Caractéristiques physiques									
Masse surfacique	ISO 9864	g/m ²	100	150	200	250	300	350	400
Épaisseur sous 2 kPa	ISO 9863-1	mm	0,50	0,80	1,00	1,25	1,60	1,70	2,20
Caractéristiques mécaniques									
Résistance à la traction SP*	ISO 10319	kN/m	6	10	13	16	20	23	27
Résistance à la traction ST*	ISO 10319	kN/m	7	12	16	20	25	30	33
Déformation à la force maximale SP*	ISO 10319	%	70	70	70	75	75	80	80
Déformation à la force maximale ST*	ISO 10319	%	90	90	90	95	100	100	105
Perforation dynamique	ISO 13433	mm	30	25	17	15	11	10	9
Résistance au poinçonnement statique CBR	ISO 12236	kN	1,00	1,70	2,10	2,90	3,40	4,00	4,40
Résistance au poinçonnement pyramidal	EN 14574	kN	0,70	1,00	1,20	1,80	1,80	1,90	2,30
Caractéristiques hydrauliques									
Perméabilité normale au plan	ISO 11056	m/sec	0,080	0,065	0,050	0,045	0,040	0,020	0,020
Ouverture de filtration	ISO 12956	µm	90	90	70	70	65	60	55
Caractéristiques du rouleau									
Largeur		m	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80
Longueur		m	300	250	200	160	140	120	100
Surface		m ²	1.740	1.450	1.160	928	812	696	580
Poids		kg	174	218	232	232	244	244	232

SP* : Sens Production, ST* : Sens Travers
Durabilité :
 ✓ Durabilité : 25 années avec sols 4 < PH < 9, température < 25°C.
 ✓ Couverture après mise en œuvre : 30 jours.

Figure 3.1 Fiche technique de géotextile gamme AS

AFITEX ALGERIE Drainage - Soutènement - Etanchéité			
Gamme AL			
Géotextile non-tissé aiguilleté en fibres courtes 100% polyester.			
 RENFORCEMENT			
Caractéristiques	Normes	Unités	AL10
Caractéristiques physiques			
Masse surfacique	ISO 9864	g/m ²	100
Épaisseur sous 2 kPa	ISO 9863-1	Mm	0,80
Caractéristiques mécaniques			
Résistance à la traction SP*	ISO 10319	kN/m	2
Résistance à la traction ST*	ISO 10319	kN/m	2
Déformation à la force maximale SP*	ISO 10319	%	70
Déformation à la force maximale ST*	ISO 10319	%	90
Perforation dynamique	ISO 13433	mm	40
Résistance au poinçonnement statique CBR	ISO 12236	kN	0,30
Caractéristiques du rouleau			
Largeur		m	1,16
Longueur		m	50 / 75 / 100
Surface		m ²	58 / 87 / 116
Poids		kg	5,8 / 8,7 / 11,6

SP* : Sens Production, ST* : Sens Travers
Utilisation :
 ✓ Renfort pour étanchéité liquide.
Stockage :
 ✓ Les rouleaux doivent être stockés dans un endroit sec.

Figure 3.2 Fiche technique de géotextiles gamme AL

4.2 Partie 01 Renforcement du sol naturel avec géotextile

4.2.1 L'essai Proctor

4.2.1.1 But de l'essai

Renforcement du sol pour avoir une capacité portante élevée avec une séparation et protection pendant le compactage.

4.2.2 Mise en place du géotextile

Avec les mêmes étapes de l'essai Proctor précédentes on ajoute la nappe de géotextile d'une forme circulaire (un diamètre de 8 cm).

4.2.2.1 Manipulation : On a déjà cité les étapes de préparation d'une éprouvette Proctor de sol naturel.

Pour le renforcement avec géotextile on exécute la manipulation suivante :

Assembler le moule Proctor et graisser le.

5- Introduire la première couche du sol + la nappe du géotextile AS 25 et compacter 25 coups puis la deuxième couche + la nappe AS35 et compacter 25 fois, puis la troisième couche + la nappe AL 10 avec le même nombre de compactage.

6- Enlever la rehausse après le troisième compactage, le sol dépasse un peu le moule

: Nécessité d'araser soigneusement.

7- Peser le moule et prendre un échantillon pour la teneur en eau.



Figure 3.3 Mise en place

des nappes de géotextile

4.2.2.2 Résultats d'essai : Sol naturel + 1 nappe géotextile AS 25

Tableau

Tableau 3.1 Résultats d'essai : Sol naturel + 1 nappe géotextile AS 25

Paramètre Essais	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Essai 04
Pourcentage d'eau (%)	12	14	16	18
Masse du moule (g)	1734	1768	1734	1734
Masse du sol+moule (g)	3588	3682,2	3720,9	3723,6
Volume (cm ³)	955	955	955	955
Teneur en eau W (%)	11,87	16,66	16,93	17,05
Yd densité (sèche) (t/m ³)	1,73	1,75	1,79	1,76

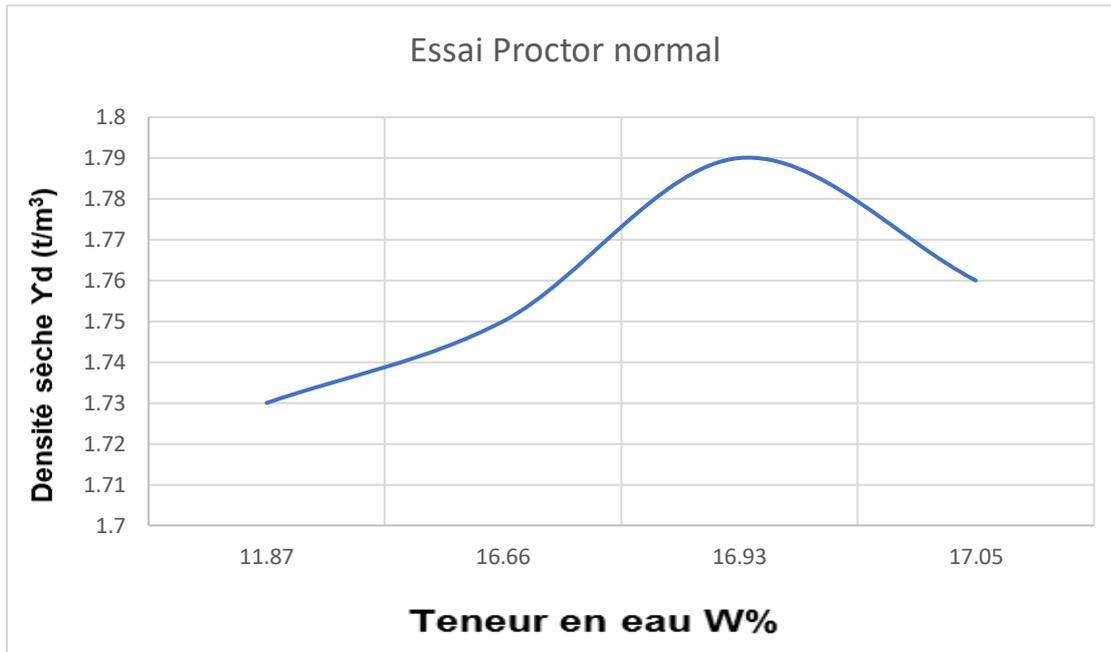


Figure 3.4 Courbe d'essai Proctor normal du sol renforcé avec 1 nappe

4.2.2.3 Interprétation : on voit que la pic de la courbe est dans la valeur 1,79 qui s'accorde la teneur en eau 16,93% puis elle diminue donc notre optimum est de 16%.

4.2.2.4 Résultat : essai Proctor sol+ 2 nappes de géotextile AS25 et AS 35

Tableau

Tableau 3.2 Résultat essai Proctor sol+ 2 nappes de géotextile AS25 et AS 35

Paramètre Essais	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Essai 04
Pourcentage d'eau (%)	12	14	16	18
Masse du moule (g)	1734	1768	1734	1734
Masse du sol+moule (g)	3526,1	3620,3	3659	3661,7
Volume (cm ³)	955	955	955	955
Teneur en eau W (%)	11,87	16,66	16,93	17,05
Yd densité (sèche) (t/m ³)	1,67	1,70	1,74	1,70

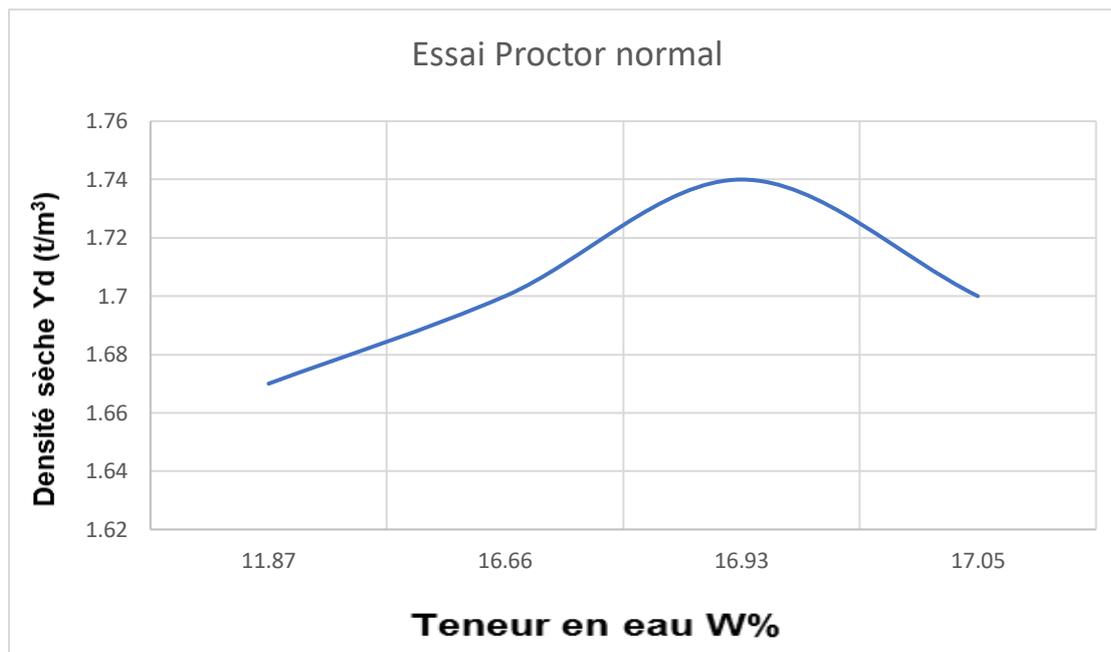


Figure 3.5 courbe essai Proctor normal du sol renforcé avec 2 nappes

4.2.2.5 Interprétation : on voit que la pic de la courbe est dans la valeur 1,74 qui s'accorde la teneur en eau 16,93% puis elle diminue donc notre optimum est de 16%.

4.3 Résultat : essai Proctor sol+ 3 nappes de géotextile AS25 et AS 35 et AL 10

Tableau 3.3 Résultat essai Proctor sol+ 3 nappes de géotextile AS25 et AS 35 et AL 10

Paramètre Essais	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Essai 04
Pourcentage d'eau (%)	12	14	16	18
Masse du moule (g)	1734	1768	1768	1768
Masse du sol+moule (g)	3560,1	3654,3	3690	3695,7
Volume (cm ³)	955	955	955	955
Teneur en eau W (%)	11,87	16,66	16,93	17,05
Yd densité (sèche) (t/m ³)	1,70	1,73	1,74	1,72

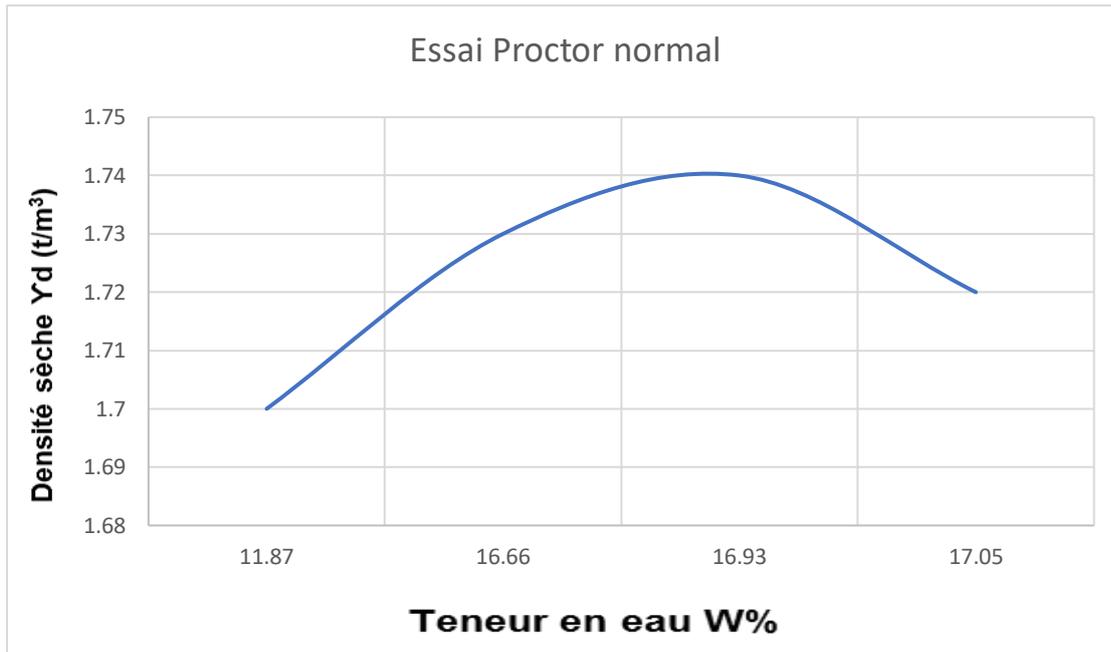


Figure 3.6 courbe essai Proctor normal du sol renforcé avec 3 nappes

4.3.1 Interprétation : on voit que la pic de la courbe est dans la valeur 1,74 qui s'accorde la teneur en eau 16,93% puis elle diminue donc notre optimum est de 16%.

4.4 L'essai CBR

4.4.1 But de l'essai : même but de l'essai dans chapitre 02.

4.4.1.1 Mise en place du géotextile dans le moule CBR

Avec les mêmes étapes précédentes de l'essai CBR on ajoute les nappes de géotextile d'une forme circulaire entre les couches et d'un diamètre de 15 cm.

4.4.2 Manipulation pour sol naturel + 1 nappe géotextile

- Préparation du moule CBR.
- Ajouter la première couche du sol avec compactage 55 coups
- Le même avec la deuxième et troisième couche du sol, puis ajouter la nappe AS 25 du géotextile puis ajouter la quatrième et cinquième couches.
- Enlever la rehausse après le troisième compactage, le sol dépasse un peu le moule
- Nécessité d'araser soigneusement.
- Préparation de la machine CBR et exécuter :



Figure 3.7 Moule CBR après l'essai

4.4.2.1 Résultats d'essai sol naturel + 1 nappe géotextile

Tableau 3.4 Résultats d'essai sol naturel + 1 nappe géotextile

mm	F(KN)	P(N/mm ²)	I _{CBR}
1,25	0,340	1,76	
2	0,485	2,51	
2,5	0,561	2,90	4,2
5	0,953	4,92	4,78
7,5	1,290	6,67	
10	1,455	7,52	

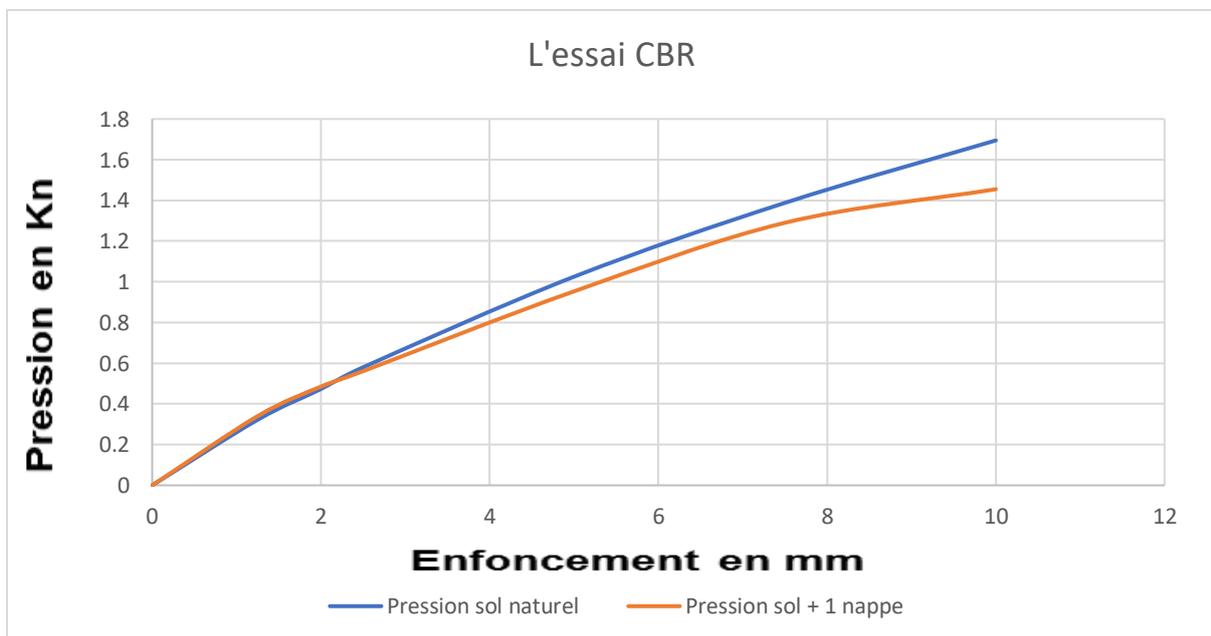


Figure 3.8 courbe essai CBR du sol renforcé avec 1 nappe

4.4.2.2 Interprétation : D'après les deux courbes on a un sens croissant pour ces derniers mais on a vu que dans ce cas le sol renforcé avec 1 nappe a donné des bonnes résultats on comparant avec sol naturel.

4.4.2.3 Manipulation pour sol naturel+ 2 nappes géotextile

Préparation du moule CBR

Ajouter la première couche du sol avec compactage 55 coups

Le même avec deuxième couche puis ajouter la nappe AS 25 du géotextile et continuer avec la troisième couche du sol, puis ajouter la quatrième couche puis ajouter la nappe AS 35 du géotextile et continuer avec la cinquième couches.

-Enlever la rehausse après le troisième compactage, le sol dépasse un peu le moule

-Nécessité d'araser soigneusement.

-Préparation de la machine CBR et exécuter :

4.4.2.4 Résultats d'essai sol naturel+ 2 nappes géotextile

Tableau 3.5 Résultats d'essai sol naturel+ 2 nappes géotextile

mm	F(KN)	P(N/mm ²)	I _{CBR}
1,25	0,274	1,42	
2	0,413	2,13	
2,5	0,510	2,63	3,98
5	1,027	5,31	5,15
7,5	1,350	6,98	
10	1,748	9,03	

La courbe : Comparaison avec le sol naturel

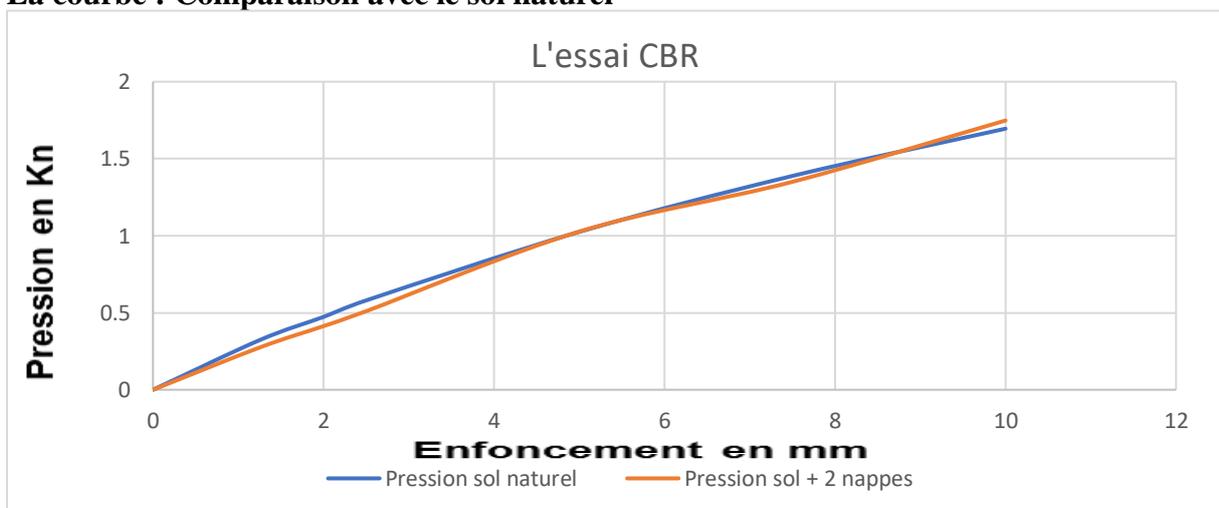


Figure 3.9 courbe essai CBR du sol renforcé avec 2 nappes

4.4.2.5 Interprétation : Dans ce cas on a aussi un sens croissant pour les deux courbes, mais on a presque une égalité entre sol naturel et sol renforcé, mais l'avantage était pour le sol renforcé donc un bon résultat.

4.4.3 Manipulation pour sol naturel+ 3 nappes géotextile

-Préparation du moule CBR.

-Ajouter la première couche du sol avec compactage 55 coups puis ajouter la nappe AS25 du géotextile, ajouter la deuxième couche et continuer avec la troisième couche du sol puis ajouter la nappe AS 35 du géotextile puis la quatrième couche du sol et ajouter la nappe AL 10 du géotextile et continuer avec la cinquième couches.

-Enlever la rehausse après le troisième compactage, le sol dépasse un peu le moule

- Nécessité d'araser soigneusement.

Préparation de la machine CBR et exécuter :

4.4.3.1 Résultats d'essai : sol naturel+ 3 nappes géotextile

Tableau 3.6 Résultats d'essai : sol naturel+ 3 nappes géotextile

mm	F(KN)	P(N/mm ²)	I _{CBR}
1,25	1,432	7,40	
2	1,903	9,83	
2,5	2,200	11,37	16,48
5	3,421	17,68	17,16
7,5	4,531	22,48	
10	5,65	29,19	

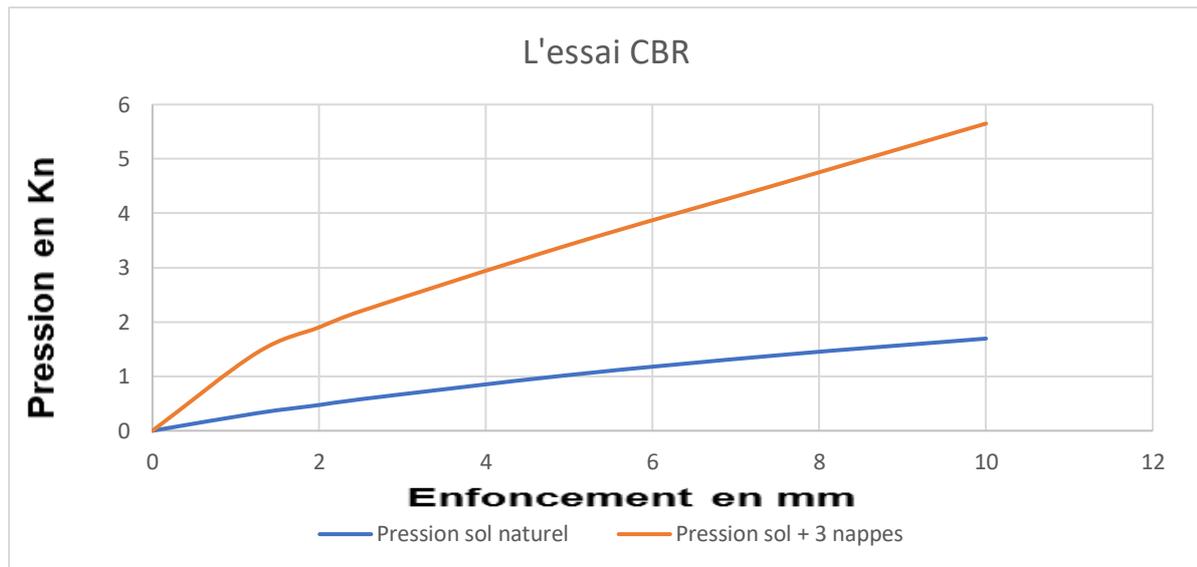


Figure 3.10 courbe essai CBR du sol renforcé avec 3 nappes

4.4.3.2 Interprétation : Dans cet essai on voit que la troisième nappe a donné des très bons résultats car la courbe du sol renforcé à une grande valeur de pression par rapport au sol naturel dans leurs sens croissant.

4.5 L'essai de compression RC

4.5.1 But de l'essai

L'essai de compression du sol renforcé avec géotextile est pour obtenir une grande résistance ainsi une capacité portante élevée et protection.

4.5.1.1 La manipulation

Préparation d'un éprouvette renforcé avec 1 nappe AS 25 puis éprouvette renforcé avec 2 nappes AS 25 et AS 35 puis éprouvette renforcé avec 3 nappes AS 25 et AS 35 et AL 10 (avec la méthode de l'essai Proctor).

On exécute l'essai pour chaque éprouvette avec la méthode cité déjà :

4.5.2 Résultats d'essai : sol naturel + 1 nappe

Tableau 3.7 Résultats d'essai : sol naturel + 1 nappe

T(min)	F(KN)	RC(MPA)	Cuu(MPA)
1	0,189	0,24	0,12
1,5	0,233	0,29	0,15
2	0,378	0,48	0,24
4	0,664	0,84	0,42
6	0,809	1,03	0,52
8 (max)	0,833	1,06	0,53

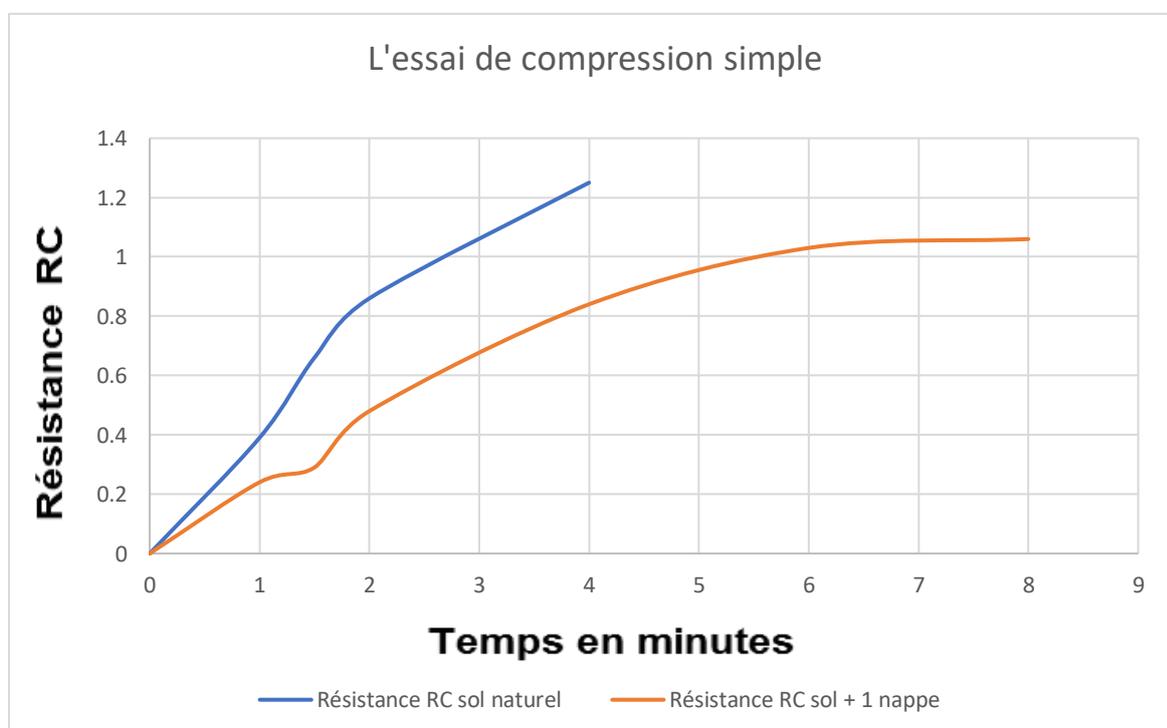


Figure 3.11 courbe de la résistance RC du sol renforcé avec 1 nappe

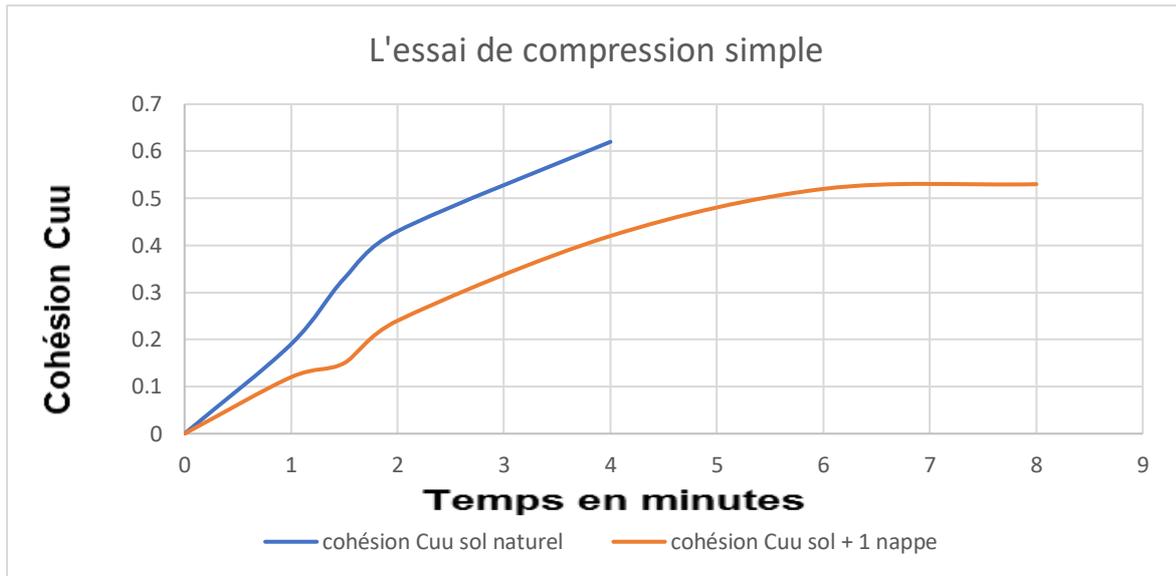


Figure 3.11.1 Courbe de la cohésion C_{uu} du sol renforcé avec 1 nappe

4.5.2.1 Interprétation : On interprète, les deux courbes ont un sens croissant toujours, mais le sol renforcé a bien résisté par rapport au sol naturel (presque le double du temps)

4.5.2.2 Résultats d'essai :sol naturel + 2 nappes

Tableau 3.8 Résultats d'essai :sol naturel + 2 nappes

T(min)	F(KN)	RC(MPA)	Cuu(MPA)
1	0,290	0,37	0,18
1,5	0,377	0,48	0,24
2	0,453	0,58	0,29
4	0,638	0,81	0,41
6	0,734	0,94	0,47
8	0,791	1,01	0,50
10	0,853	1,09	0,54
15	1,819	2,32	1,16

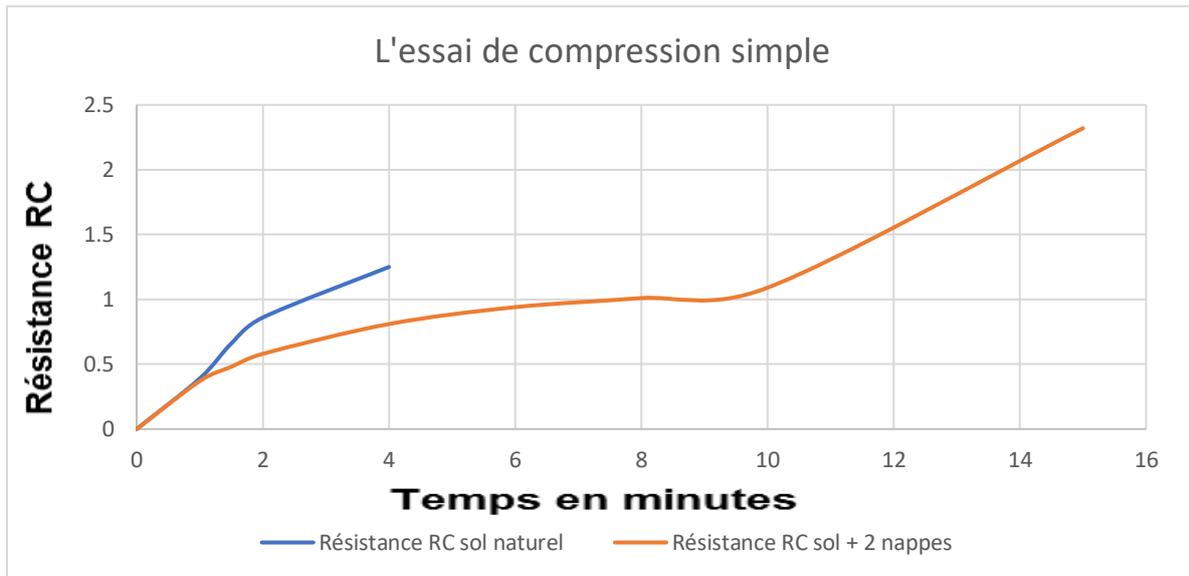


Figure 3.12 courbe de la résistance RC du sol renforcé 2 nappes

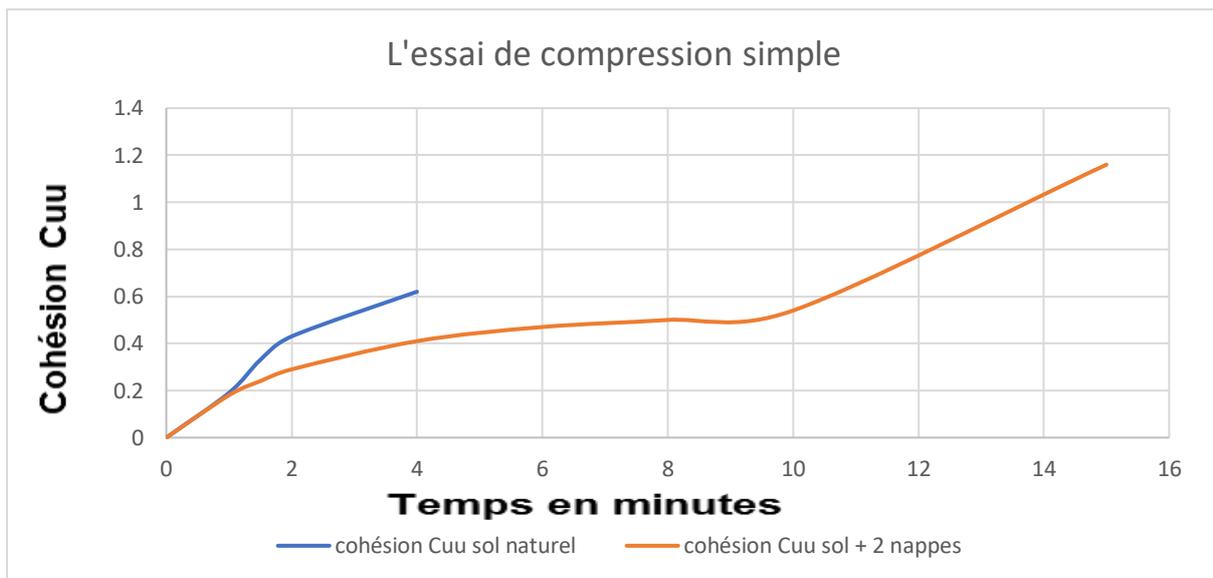


Figure 3.12.1 Courbe de la cohésion Cuu du sol renforcé avec 2 nappes

4.5.2.3 Interprétation : on interprète les deux courbes ont toujours un sens croissant, mais l'avantage aussi est pour le sol renforcé qui a donné une bonne résistance avec longtemps par rapport au sol naturel seul et par rapport au première nappe aussi, ainsi une valeur élevée de cohésion.

4.5.2.4 Résultats d'essai : sol naturel + 3 nappes

Tableau 3.9 Résultats d'essai : sol naturel + 3 nappes

T(min)	F(KN)	RC(MPA)	Cuu(MPA)
1	0,398	0,50	0,25
1,5	0,690	0,88	0,44
2	0,830	1,06	0,53
4	1,162	1,48	0,74
6	1,172	1,49	0,75
8	1,187	1,51	0,77
10	1,233	1,57	0,79
18	3,241	4,13	2,06

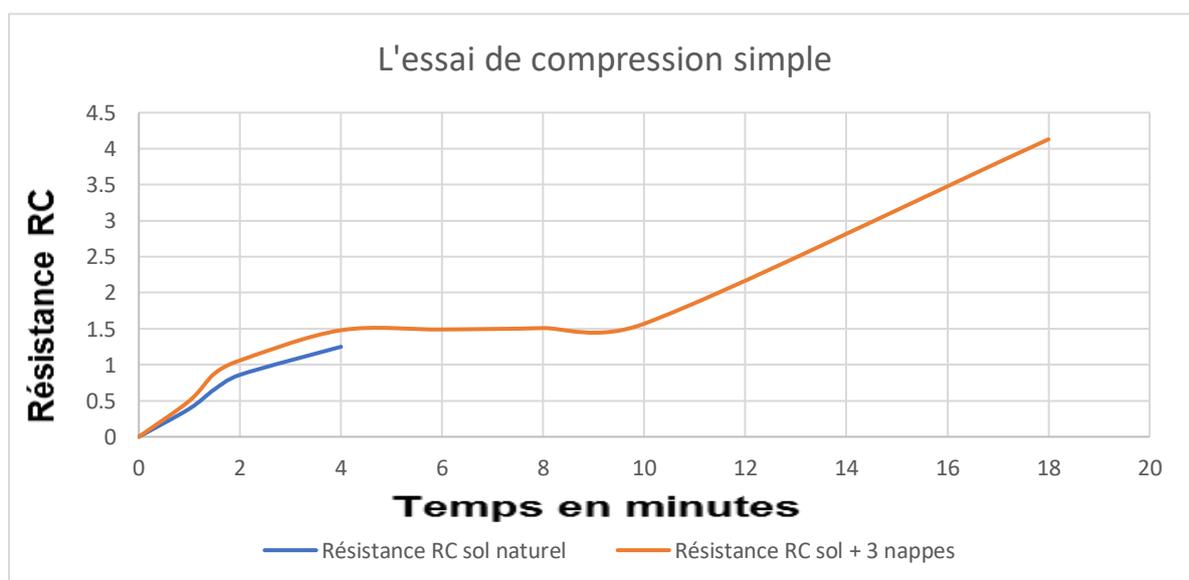


Figure 3.13 courbe de la résistance RC du sol renforcé 3 nappes

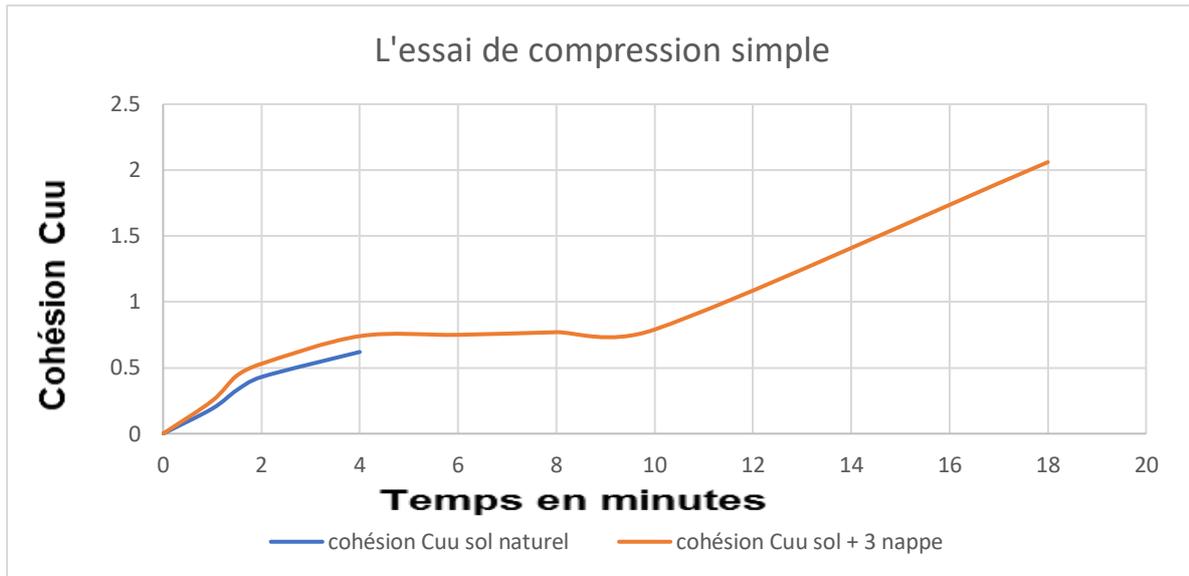


Figure 3.13.1 Courbe de la cohésion C_{uu} du sol renforcé avec 3 nappes

4.5.2.5 Interprétation : On voit que la valeur de résistance est en augmentation pour le sol renforcé avec une valeur qui a dépassé le sol naturel et qui a résisté un longtemps par rapport a ce premier et les deux essais précédents, aussi une bonne cohésion.

4.6 L'essai œdométrique

4.6.1 Manipulation

Avec le même but et principe et manipulation de l'essai cité dans le chapitre 02 on va exécuter l'essai avec une trousse du sol naturel humidifié avec 16% de l'eau, renforcé avec une nappe de géotextile gamme AS 25 et de diamètre 6 cm d'une forme circulaire.

4.6.1.1 Résultat de l'odomètre

Tableau 3.10 Résultats de l'odomètre

Paramètre	Cc(%)	Cg(%)	Pc (bars)
Sols			
Argile limoneuse	17,7	2,6	1,105

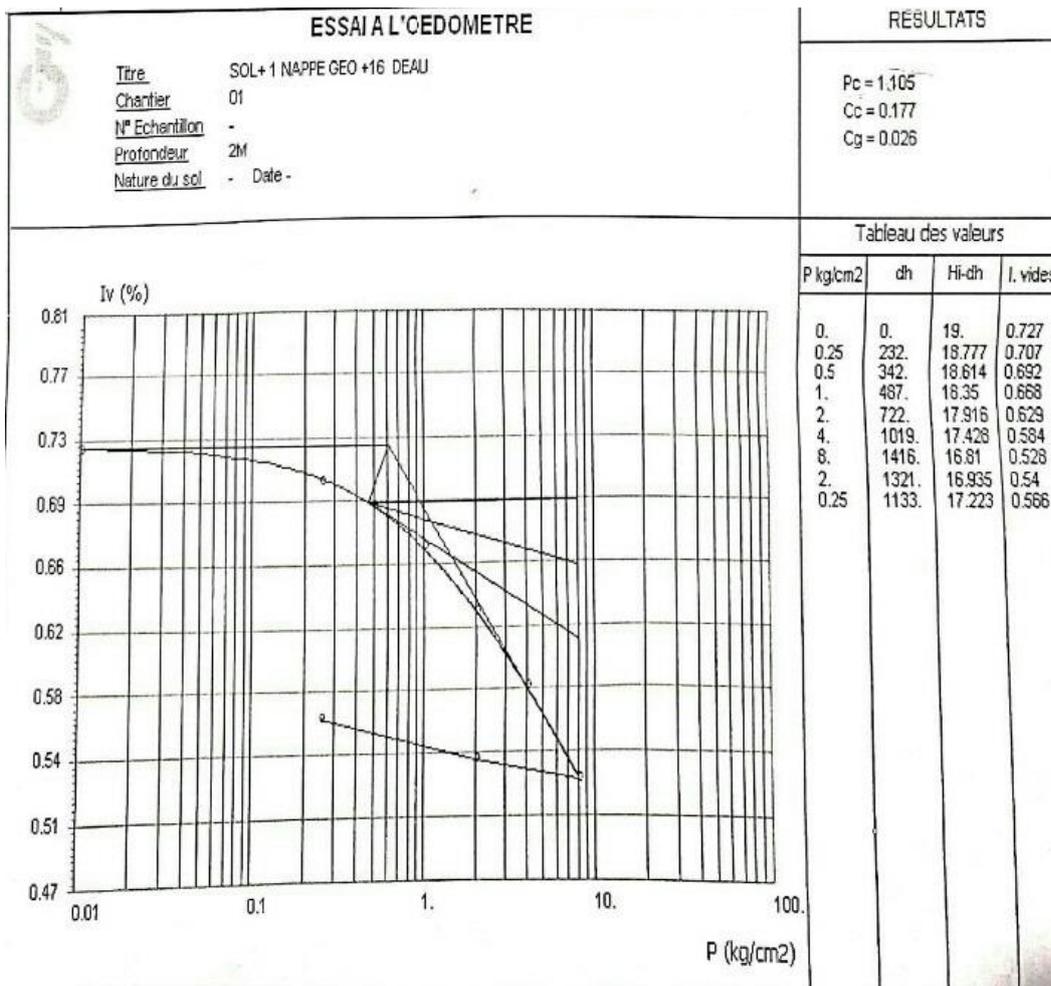


Figure 3.14 courbe essai œdométrique du sol renforcé.

4.6.2 Interprétation : D'après l'essai on a trouvé les paramètres suivantes pression de consolidation 1.105 bars, coefficient de compressibilité 17.7 % et gonflement de 2.6 %.

4.7 Remarque 01 : on ne peut pas exécuter cet essai pour le renforcement du sol avec 2 et 3 nappes parce que la trousse de l'essai est très petite elle a pris 1 nappe c'est tous.

4.7.1 Remarque 02 : On ne peut pas exécuter l'essai de cisaillement rectiligne sur un sol renforcé avec géotextile parce que le cisaillement est horizontal alors n'a aucune influence sur le matériau de renforcement.

4.8 Partie 02 Renforcement du sol amélioré avec 3% de la chaux

4.8.1 L'essai Proctor

Avec le même but et principe et mise en place de géotextile d'essai précédant dans partie 01 on utilise un sol amélioré avec 3% de la chaux et humidifié avec 20% de l'eau.

4.8.1.1 Résultats d'essai : sol amélioré et renforcé avec 1 nappe AS 25

Tableau 3.11 Résultats d'essai sol amélioré et renforcé avec 1 nappe AS 25

Paramètre Essais	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Essai 04	Essai 05	Essai 06
Pourcentage d'eau (%)	12	14	16	18	20	22
Masse du moule (g)	1734	1768	1768	1734	1768	1768
Masse du sol+moule (g)	3382,2	3483,5	3536,3	3594	3661,7	3642
Volume (cm ³)	955	955	955	955	955	955
Teneur en eau W (%)	9,91	8,96	10,01	12,15	15,01	15,06
Yd densité (sèche) (t/m ³)	1,54	1,57	1,59	1,65	1,66	1,60

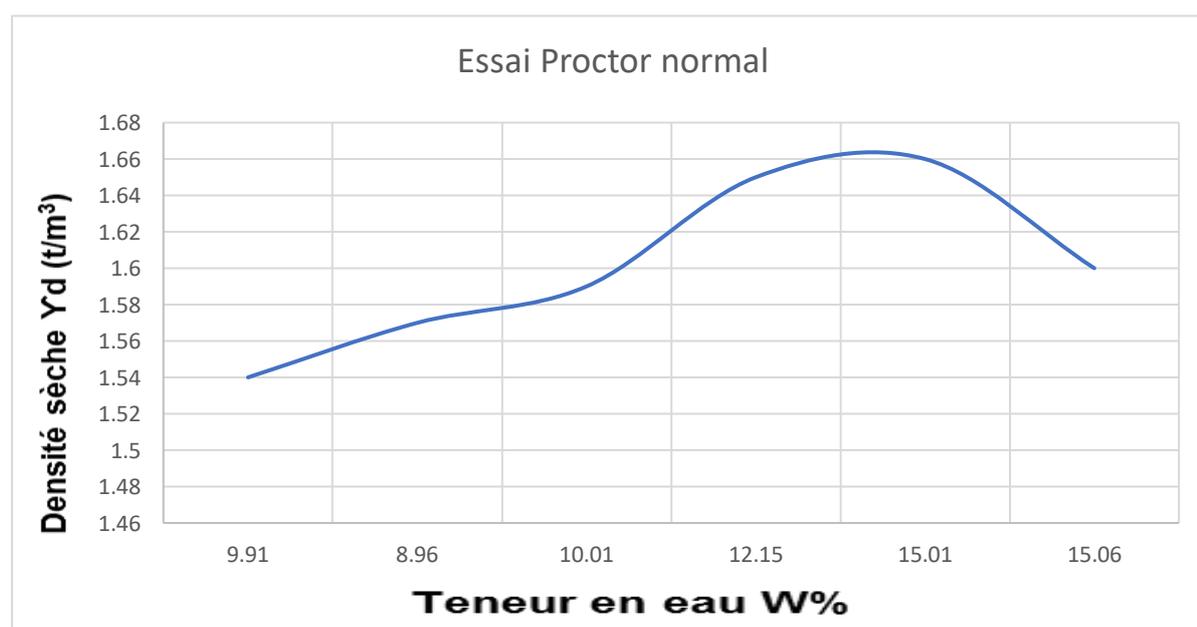


Figure 3.15 courbe essai Proctor normal du sol amélioré et renforcé avec 1 nappe

4.8.2 Interprétation : on voit que la pic de la courbe est dans la valeur 1,66 qui s'accorde la teneur en eau 16,93% puis elle diminue donc notre optimum est de 20%.

4.8.2.1 Résultats d'essai : sol amélioré et renforcé avec 2 nappes AS 25 + AS 35

Tableau 3.12 Résultats d'essai sol amélioré et renforcé avec 2 nappes AS 25 + AS 35

Parameter Essais	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Essai 04	Essai 05	Essai 06
Pourcentage d'eau (%)	12	14	16	18	20	22
Masse du moule (g)	1734	1768	1768	1734	1768	1768
Masse du sol+moule (g)	3352	3453,3	3506,1	3563,8	3631,5	3611,8
Volume (cm ³)	955	955	955	955	955	955
Teneur en eau W (%)	9,91	8,96	10,01	12,15	15,01	15,06
Yd densité (sèche) (t/m ³)	1,51	1,54	1,57	1,62	1,63	1,58

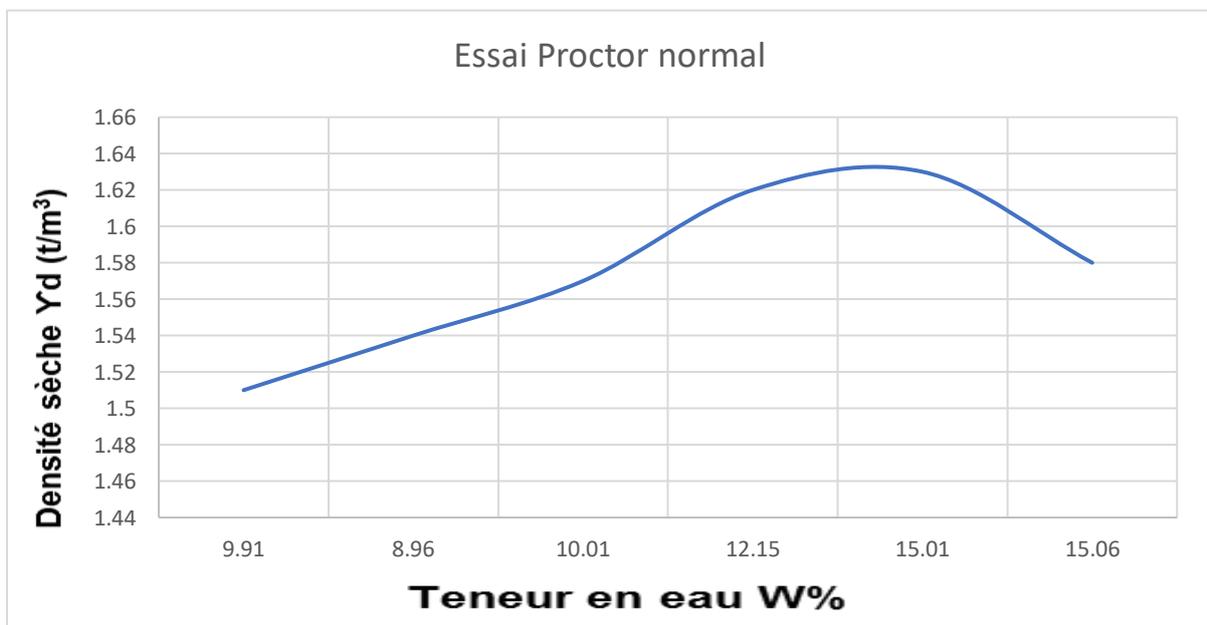


Figure 3.16 courbe essai Proctor normal du sol amélioré et renforcé avec 2 nappes

4.8.2.2 Interprétation : on voit que la pic de la courbe est dans la valeur 1,63 qui s'accorde la teneur en eau 16,93% puis elle diminue donc notre optimum est de 20%.

4.8.2.3 Résultats d'essai : sol amélioré et renforcé avec 3 nappes S 25 + AS 35 + AL 10

Tableau 3.13 Résultats d'essai sol amélioré et renforcé avec 3nappes S25+AS35+AL10

Paramètre Essais	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Essai 04	Essai 05	Essai 06
Pourcentage d'eau (%)	12	14	16	18	20	22
Masse du moule (g)	1734	1768	1768	1734	1768	1768
Masse du sol+moule (g)	3356,5	3457,8	3510,6	3568,3	3636	3616,3
Volume (cm ³)	955	955	955	955	955	955
Teneur en eau W (%)	9,91	8,96	10,01	12,15	15,01	15,06
Yd densité (sèche) (t/m ³)	1,52	1,55	1,57	1,62	1,63	1,58

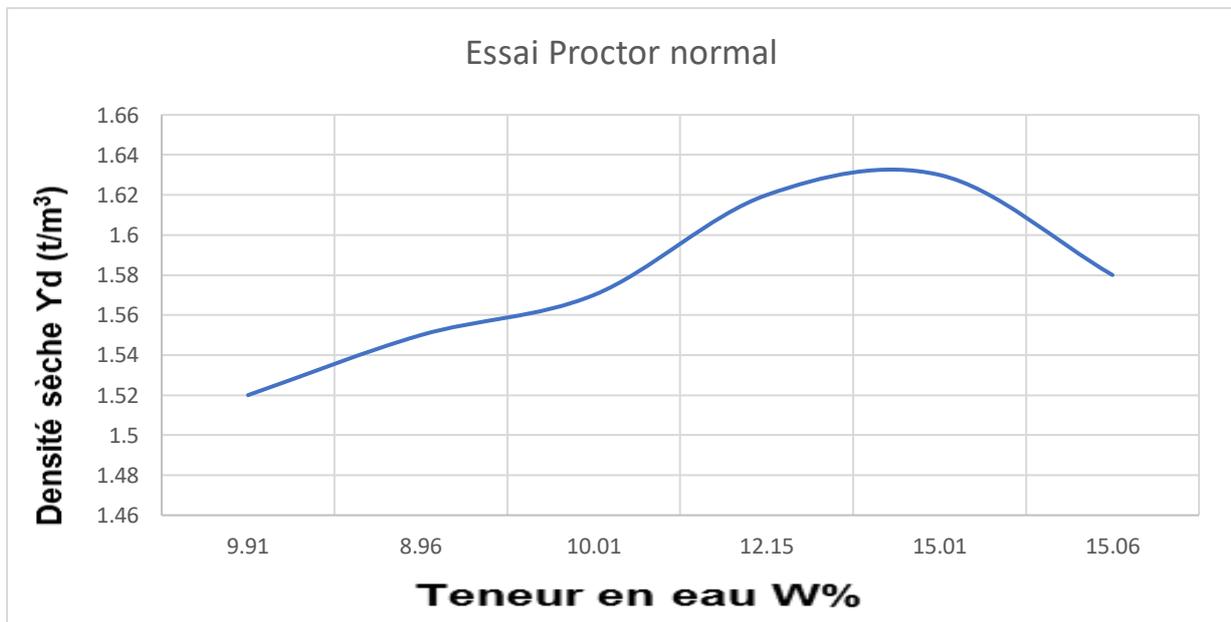


Figure 3.17 courbe essai Proctor normal du sol amélioré et renforcé avec 3 nappes

4.8.2.4 Interprétation : on voit que la pic de la courbe est dans la valeur 1,63 qui s'accorde la teneur en eau 16,93% puis elle diminue donc notre optimum est de 20%.

4.9 L'essai CBR

4.9.1 Manipulation

Avec amélioration pour notre sol avec 3% de la chaux (165 g) et la même manipulation précédente et mise en place des nappes de géotextile on exécutent notre essai :

4.9.1.1 Résultats d'essai : Sol naturel + 3% chaux renforcée avec 1 nappe

Tableau 3.14 Résultats d'essai Sol naturel + 3% chaux renforcée avec 1 nappe

mm	F(KN)	P(N/mm ²)	I _{CBR}
1,25	0,491	2,54	
2	0,722	3,73	
2,5	0,801	4,14	6,00
5	1,641	8,48	8,23
7,5	2,164	11,18	
10	2,847	14,71	

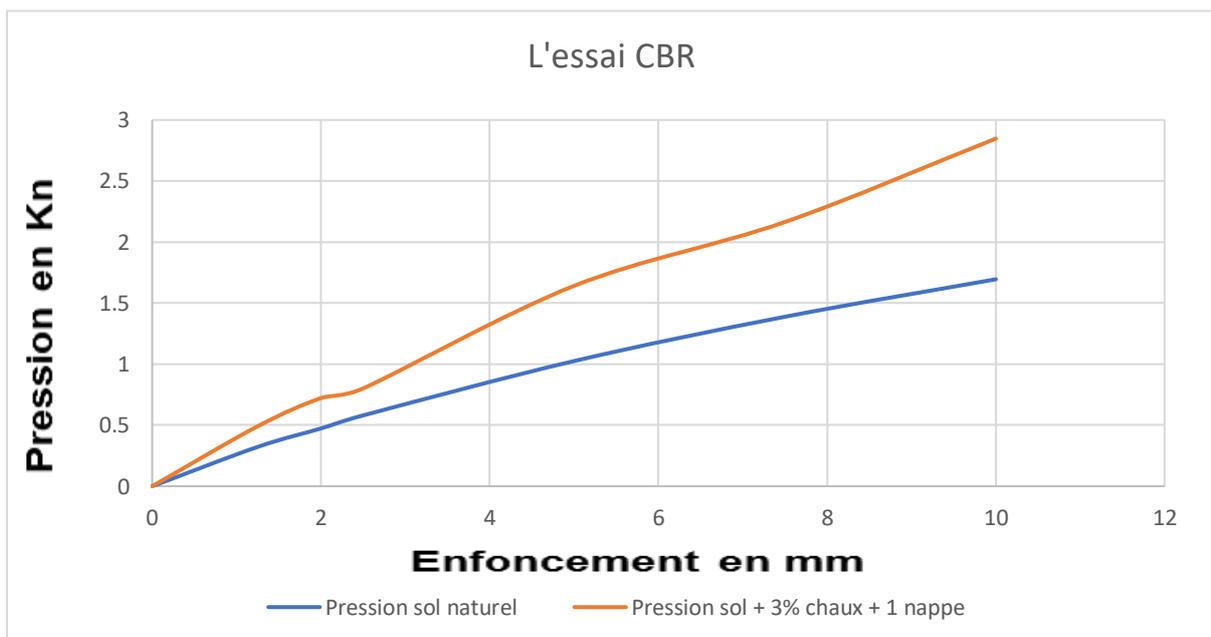


Figure 3.18 courbe essai CBR du sol amélioré et renforcé avec 1 nappe

4.9.2 Interprétation : on voit que les deux courbes ont un sens croissant, mais l'avantage est pour le sol renforcé et amélioré car il a marqué une valeur supérieure par rapport au sol naturel.

4.9.2.1 Résultats d'essai : Sol naturel + 3% chaux renforcée avec 2 nappes

Tableau 3.15 Résultats d'essai Sol naturel + 3% chaux renforcée avec 2 nappes

mm	F(KN)	P(N/mm ²)	I _{CBR}
1,25	0,304	1,57	
2	0,485	2,51	
2,5	0,580	2,30	4,34
5	1,088	5,62	5,46
7,5	1,580	8,16	
10	2,040	10,54	

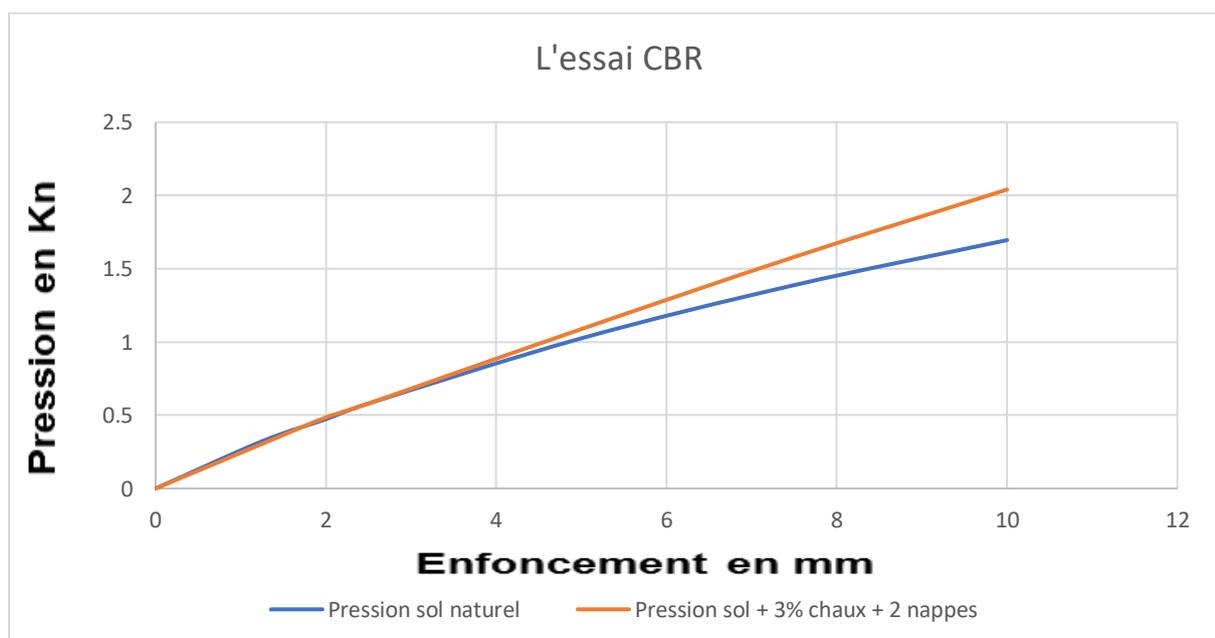


Figure 3.19 courbe essai CBR du sol amélioré et renforcé avec 2 nappes

4.9.2.2 Interprétation : on voit que on a eu presque les mêmes valeurs au démarrage de l'essai jusqu'à 4mm mais l'avantage après était pour le sol renforcé et amélioré.

4.9.2.3 Résultats d'essai : Sol naturel + 3% chaux renforcée avec 3 nappes

Tableau 3.16 Résultats d'essai Sol naturel + 3% chaux renforcée avec 3

mm	F(KN)	P(N/mm ²)	I _{CBR}
1,25	0,212	1,09	
2	0,323	1,67	
2,5	0,390	2,01	2,92
5	0,800	4,13	4,01
7,5	1,258	6,50	
10	1,750	9,04	

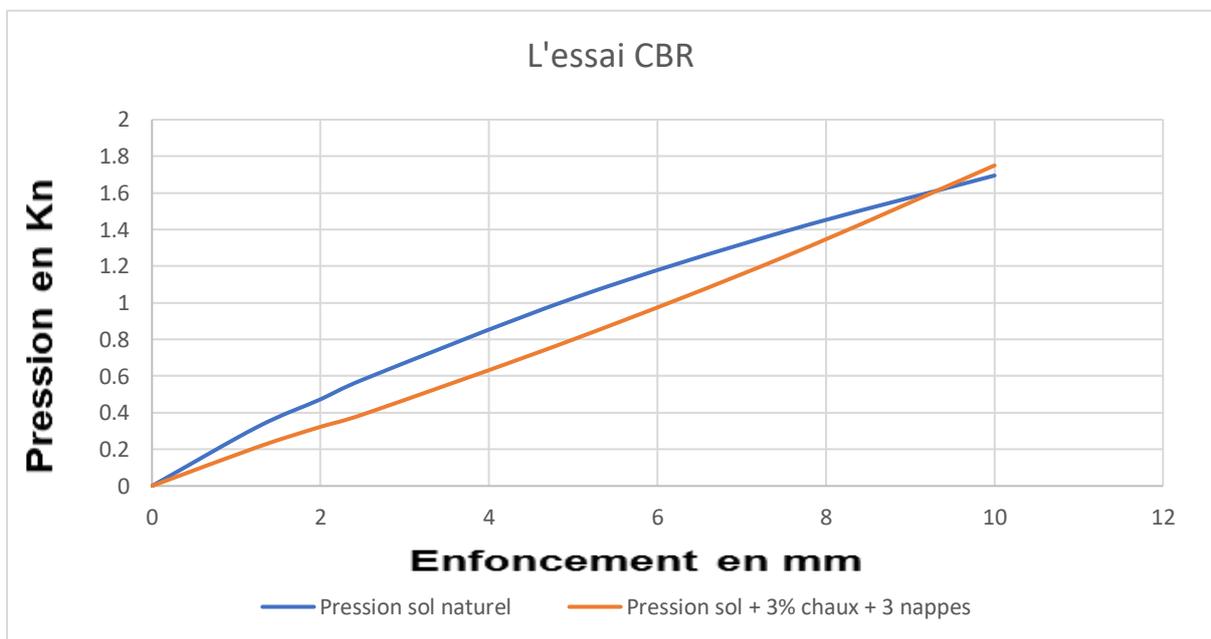


Figure 3.20 courbe essai CBR du sol amélioré et renforcé avec 3 nappes

4.9.2.4 Interprétation : Au démarrage de l'essai on a vu que le sol naturel a donné des valeurs supérieures par rapport au sol renforcé et amélioré, mais ce dernier a dépassé la valeur du sol naturel presque à la fin de l'essai.

4.10 L'essai de compression RC

4.10.1 Manipulation

On utilise la même manipulation précédente dans partie 01 et la même mise en place des nappes de géotextile, avec un sol amélioré avec 3% de la chaux dans les 03 éprouvettes.

-on exécute l'essai on trouve les résultats suivantes :

4.10.1.1 Résultats d'essai : sol naturel +3% de la chaux + 1 nappe

Tableau 3.17 Résultats d'essai sol naturel +3% de la chaux + 1 nappe

T(min)	F(KN)	RC(MPA)	Cuu(MPA)
1	0,562	0,72	0,36
1,5	0,871	1,11	0,55
2 (max)	1,290	1,64	0,82

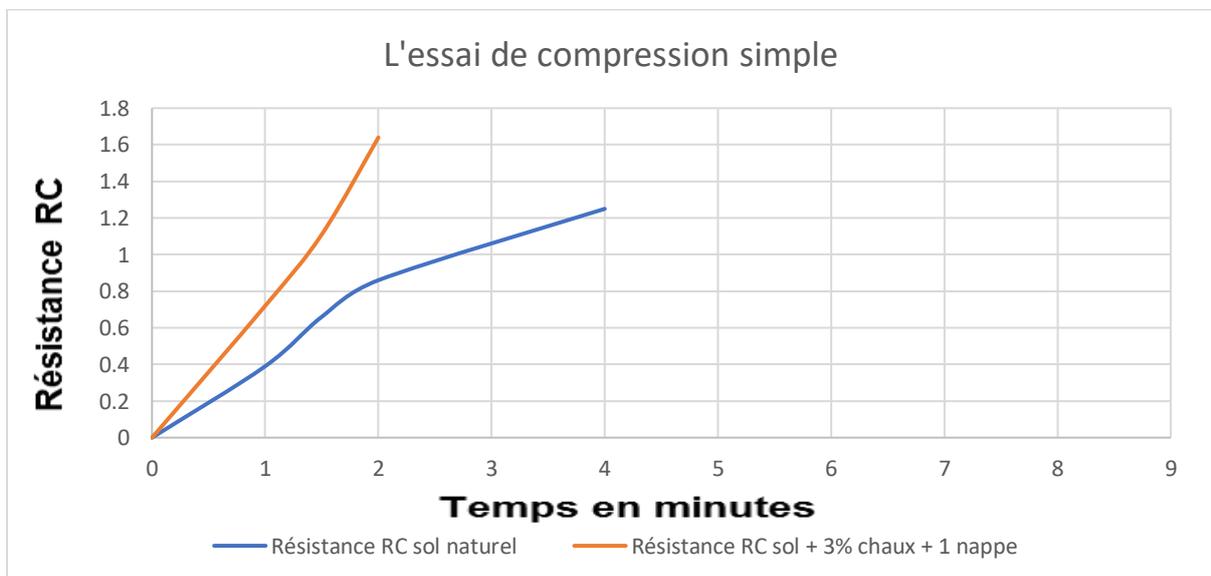


Figure 3.21 courbe de la résistance RC du sol renforcé avec 1 nappe

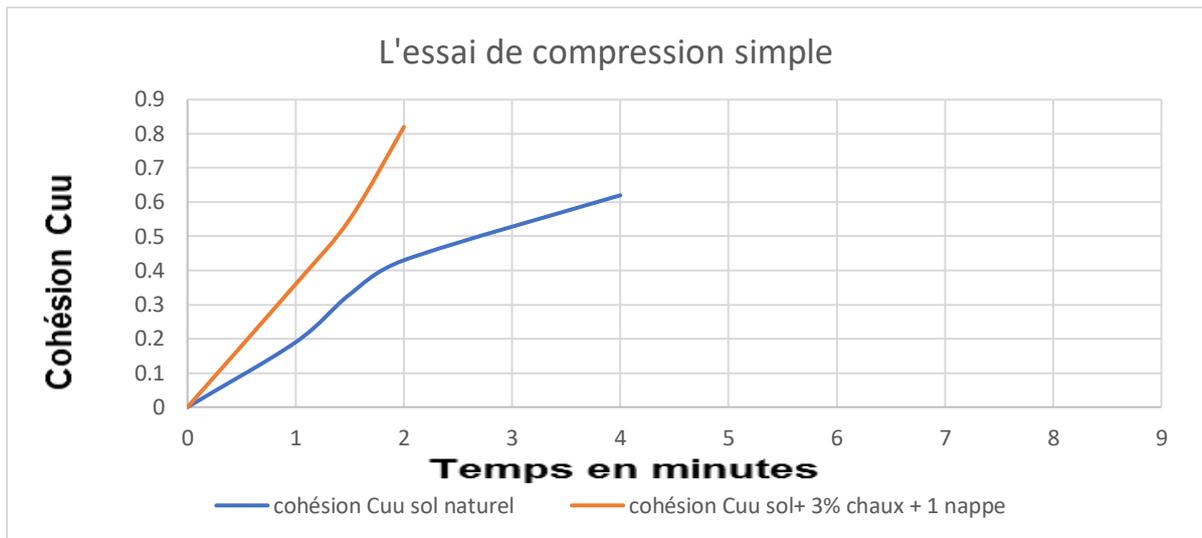


Figure 3.21.1 Courbe de la cohésion C_{uu} du sol renforcé avec 1 nappe

4.10.2 Interprétation : on voit que dans cet essai le sol renforcé et amélioré a dépassé le sol naturel mais ce dernier a duré mieux que l'autre pour la résistance et la cohésion.

4.10.2.1 Résultats d'essai : sol naturel +3% de la chaux + 2 nappes

Tableau 3.18 Résultats d'essai sol naturel +3% de la chaux + 2 nappes

T(min)	F(KN)	RC(MPA)	Cuu(MPA)
1	0,204	0,26	0,13
1,5	0,445	0,56	0,28
2	0,950	1,21	0,60
4	2,257	2,88	1,44
6	2,260	2,89	1,45
Max 7 :20	2,324	2,96	1,48

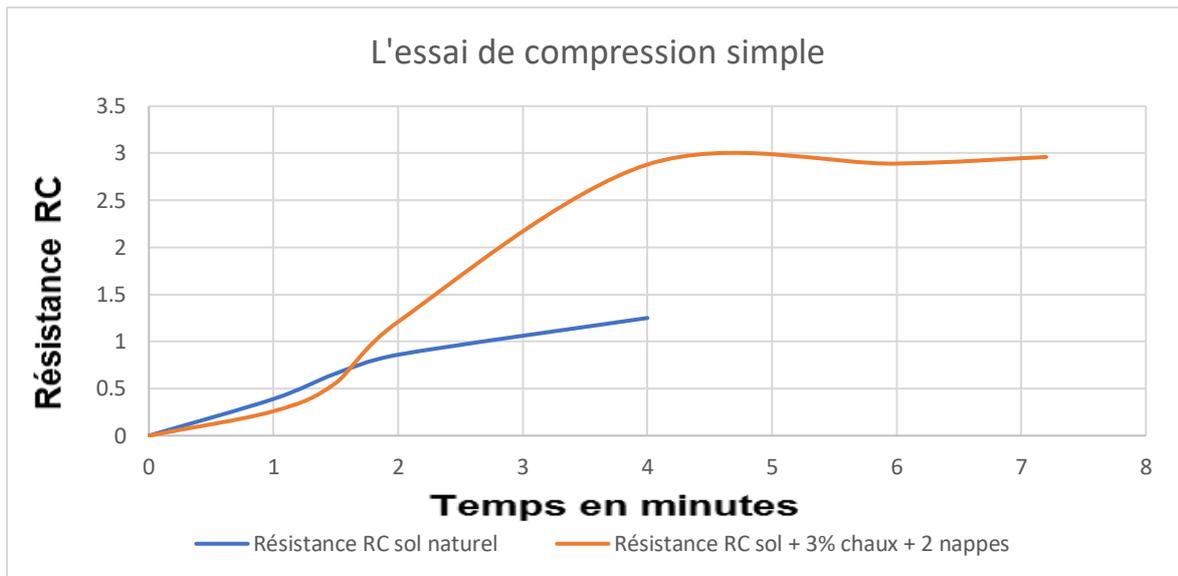


Figure 3.22 courbe de la résistance RC du sol renforcé avec 2 nappes

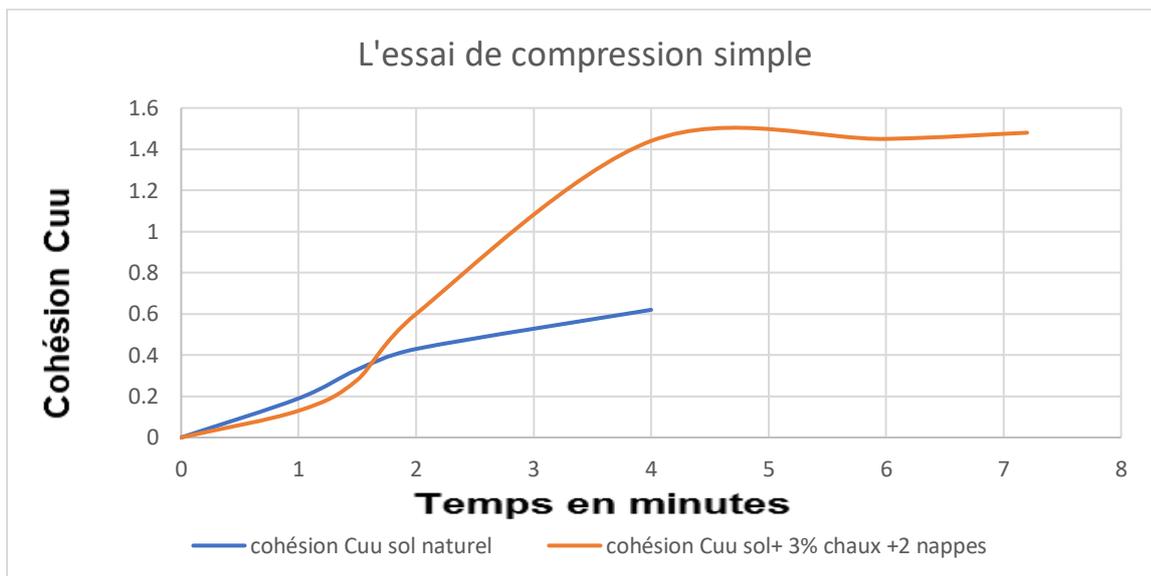


Figure 3.22.1 Courbe de la cohésion Ccu du sol renforcé avec 2 nappes

4.10.2.2 Interprétation : on interprète que dans cet essai le sol naturel dans le démarrage a eu l'avantage mais dans la minute 1,5 le sol renforcé et amélioré a dépassé beaucoup et a duré longtemps par rapport au sol naturel, donc une grande résistance et grande cohésion aussi pour sol renforcé.

4.10.2.3 Résultats d'essai : sol naturel +3% de la chaux + 3 nappes

Tableau 3.19 Résultats d'essai : sol naturel +3% de la chaux + 3 nappes

T(min)	F(KN)	RC(MPA)	Cuu(MPA)
1	0,207	0,26	0,13
1,5	0,320	0,40	0,20
2	0,437	0,56	0,28
4	1,477	1,88	0,94
6	1,635	2,08	1,04

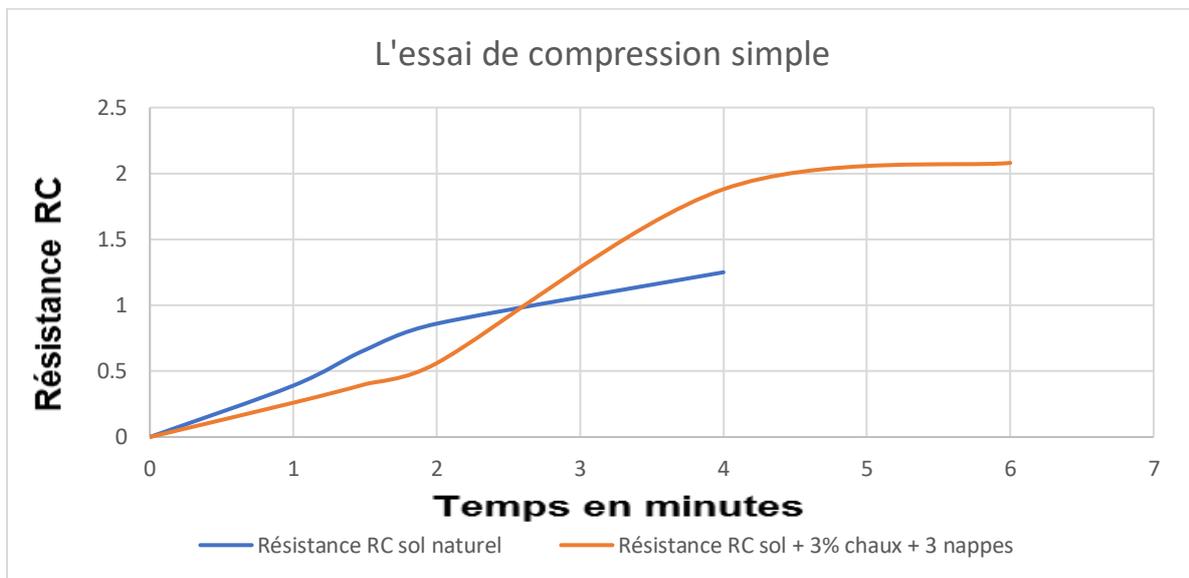


Figure 3.23 courbe de la résistance RC du sol renforcé avec 3 nappes

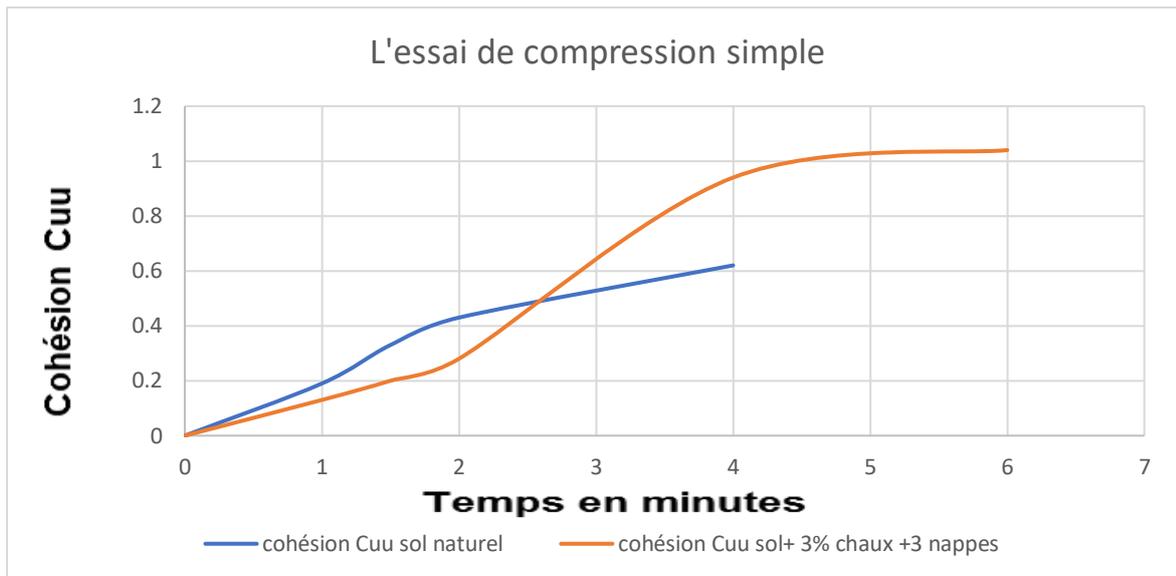


Figure 3.23.1 Courbe de la cohésion Cuu du sol renforcé avec 3 nappes

4.10.2.4 Interprétation : on voit que dans cet essai le sol naturel dans le démarrage a eu l'avantage mais dans la minute 2,5 le sol renforcé et amélioré a dépassé beaucoup et a duré longtemps par rapport au sol naturel, donc une grande résistance et cohésion aussi pour sol renforcé.

4.11 L'essai œdométrique

4.11.1 Manipulation

Avec le même but et principe et manipulation de l'essai cité dans le chapitre 02 on va exécuter l'essai avec une trousse du sol amélioré avec 3% de la chaux et humidifié avec 20% de l'eau, renforcé avec une nappe de géotextile gamme AS 25 et de diamètre 6 cm d'une forme circulaire.

4.11.1.1 Résultat de l'odomètre

Tableau 3.20 Résultat de l'odomètre

Paramètre	Cc(%)	Cg(%)	Pc (bars)
Sols			
Argile limoneuse	15,9	1,3	1,785

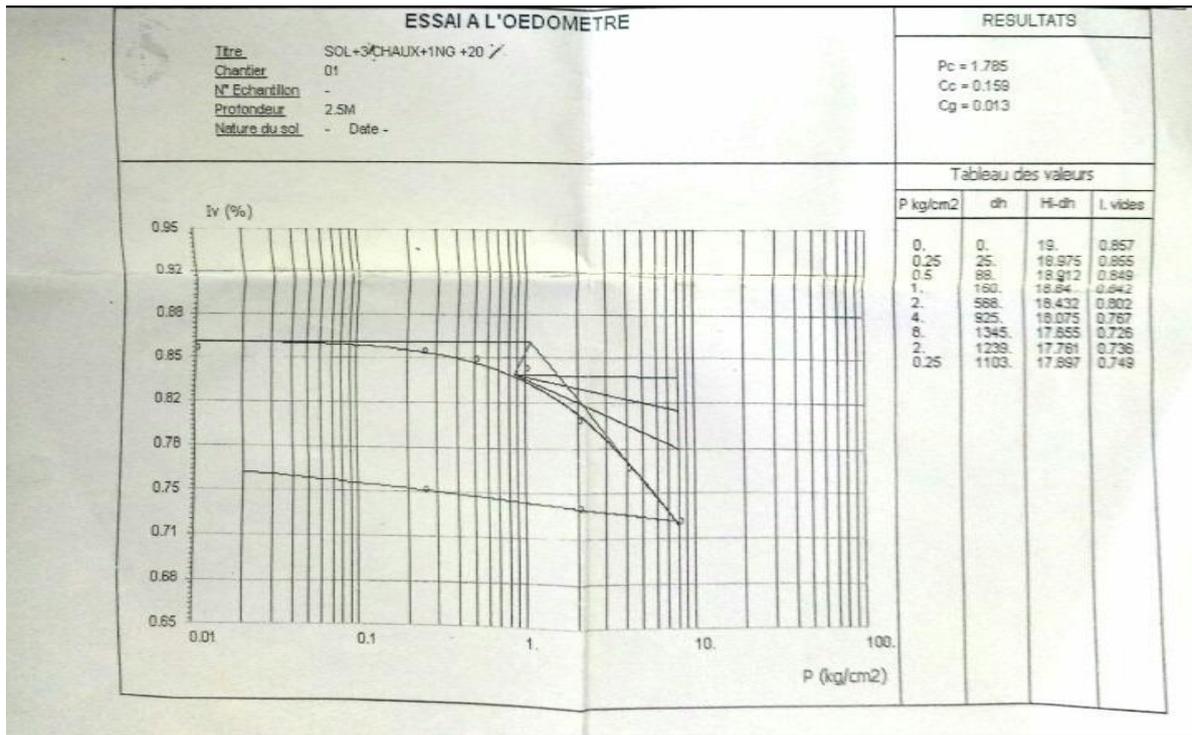


Figure 3.24 courbe essai œdométrique du sol amélioré et renforcé.

4.11.2 Interprétation : D'après l'essai on a trouvé les paramètres suivantes pression de consolidation 1.785 bars, coefficient de compressibilité 15.9 % et gonflement de 1.3%.

4.12 Remarque : On ne peut pas exécuter l'essai de cisaillement rectiligne sur un sol amélioré et renforcé avec géotextile parce que le cisaillement est horizontal alors n'a aucune influence sur le matériau de renforcement.

4.13 Conclusion : Dans ce chapitre on a présenté deux parties des essais mécanique sur le sol naturel renforcé avec différents types de géotextile et sol amélioré avec la chaux renforcé avec le même matériau , on a vu que dans les toutes les essais dans les deux parties le matériau de renforcement à donné des très bons résultats de résistance et cohésion, compressibilité et consolidation et enfoncement, mais l'avantage était pour le sol naturel avec géotextile qui a donné de résultats mieux que sol amélioré et renforcé, donc c'est un bon choix pour augmenter la capacité portante.

Chapitre 04

Interprétations et résultats

5.Introduction

Le chapitre décrit les interprétations des courbes et des résultats de tous les essais mécaniques ainsi les résultats et la comparaison avec d'autres auteurs.

5.1 Partie 01 : interprétation des résultats sur le sol naturel renforcé

5.1.1 L'essai Proctor

5.2 Résultats générales

Tableau 4.1 Résultats générales essai Proctor pour sol naturel

	Sol naturel (optimum)	Sol naturel+ 1 nappe (optimum)	Sol naturel+ 2 nappes (optimum)	Sol naturel+ 3 nappes (optimum)
Densité sèche γ_d	1,73	1,79	1,74	1,74
Teneur en eau W%	16,93	16,93	16,93	16,93

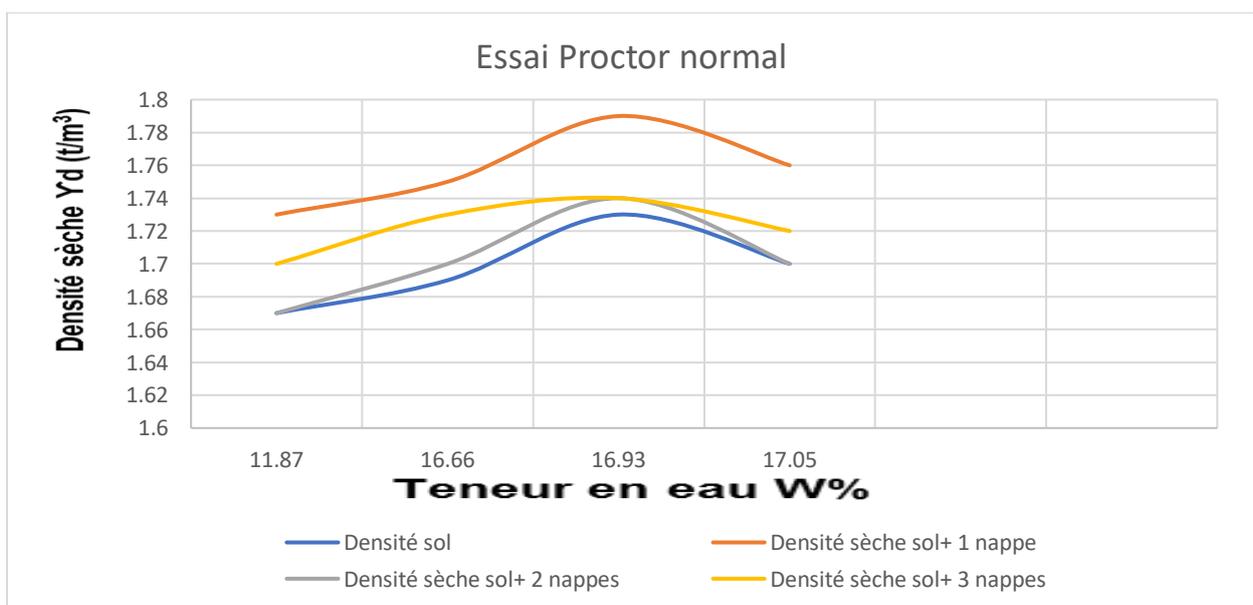


Figure 4.1 les courbes de l'essai Proctor normal du sol renforcé.

5.2.1 Interprétation : On voit que dans toutes les courbes la pic est dans le pourcentage 16,93 donc l'optimum est de 16% dans toutes les cas.

5.3 L'essai CBR

5.3.1 Résultats générales

Tableau 4.2 Résultats générales L'essai CBR pour sol naturel

	Sol naturel		Sol + 1 nappe		Sol + 2 nappes		Sol + 3 nappes	
	F(KN)	P(N/mm ²)	F(KN)	P(N/mm ²)	F(KN)	P(N/mm ²)	F(KN)	P(N/mm ²)
1,25	0,322	1,66	0,340	1,76	0,274	1,42	1,432	7,40
2	0,473	2,44	0,485	2,51	0,413	2,13	1,903	9,83
2,5	0,580	2,99	0,561	2,90	0,510	2,63	2,200	11,37
5	1,025	5,29	0,953	4,92	1,027	5,31	3,421	17,68
7,5	1,388	7,17	1,290	6,67	1,350	6,98	4,531	22,48
10	1,695	8,75	1,455	7,52	1,748	9,03	5,65	29,19

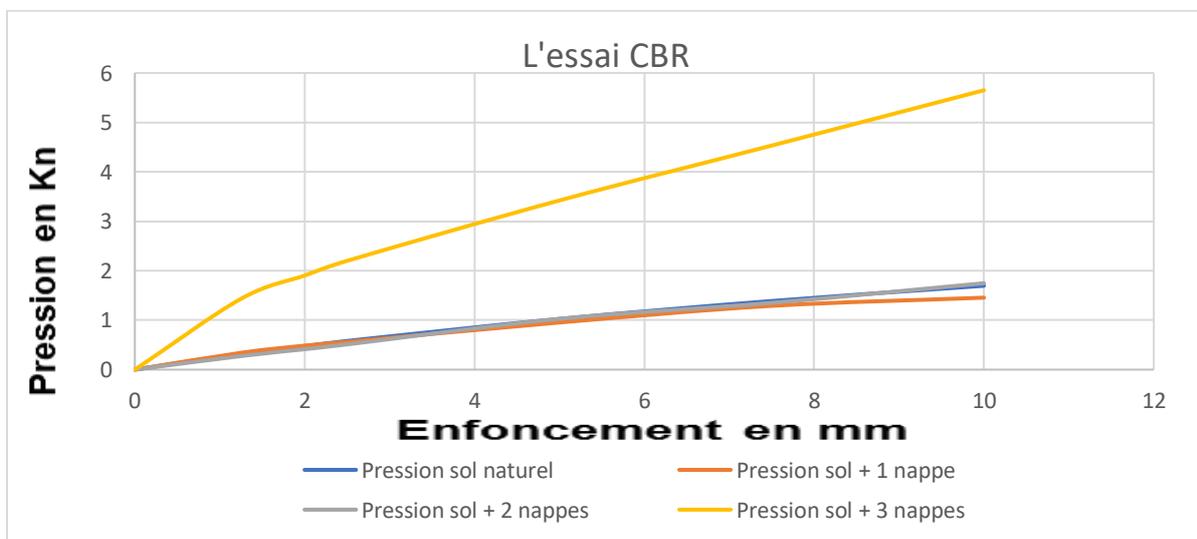


Figure 4.2 les courbes de l'essai CBR du sol renforcé.

5.3.1.1 Interprétation : D'après les courbes on voit que le sol renforcé avec 3 nappes a donné une grande lecture donc une grande résistance par rapport a les restes qu'ils sont presque égaux sauf sol avec 1 nappe qui a donné une valeur inférieure au sol naturel à la fin de l'essai.

5.4 L'essai de compression simple RC

5.4.1 Résultats générales

Tableau 4.3 Résultats générales compression simple pour sol naturel

Matériau T(min)	Sol naturel			Sol + 1 nappe			Sol + 2 nappes			Sol + 3 nappes		
	F(KN)	RC (MPA)	Cuu	F(KN)	RC	Cuu	F(KN)	RC	Cuu	F(KN)	RC	Cuu
1	0,310	0,39	0,19	0,189	0,24	0,12	0,290	0,37	0,18	0,398	0,50	0,25
1,5	0,520	0,66	0,33	0,233	0,29	0,15	0,377	0,48	0,24	0,690	0,88	0,44
2	0,675	0,86	0,43	0,378	0,48	0,24	0,453	0,58	0,29	0,830	1,06	0,53
4	0,982	1,25	0,62	0,664	0,84	0,42	0,638	0,81	0,41	1,162	1,48	0,74
6				0,809	1,03	0,52	0,734	0,94	0,47	1,172	1,49	0,75
8				0,833	1,06	0,53	0,791	1,01	0,50	1,187	1,51	0,77
10							0,853	1,09	0,54	1,233	1,57	0,79
15							1,819	2,32	1,16	2,05	3,85	1,92
18										3,241	4,13	2,06

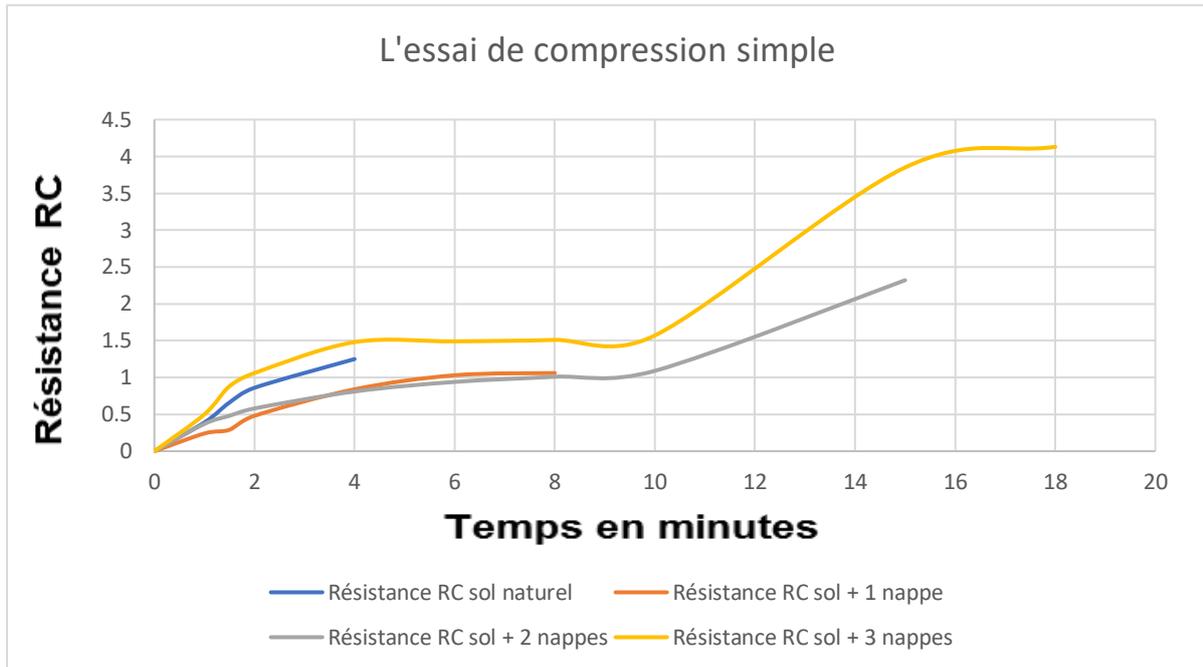


Figure 4.3 Les courbes de résistance RC du sol renforcé.

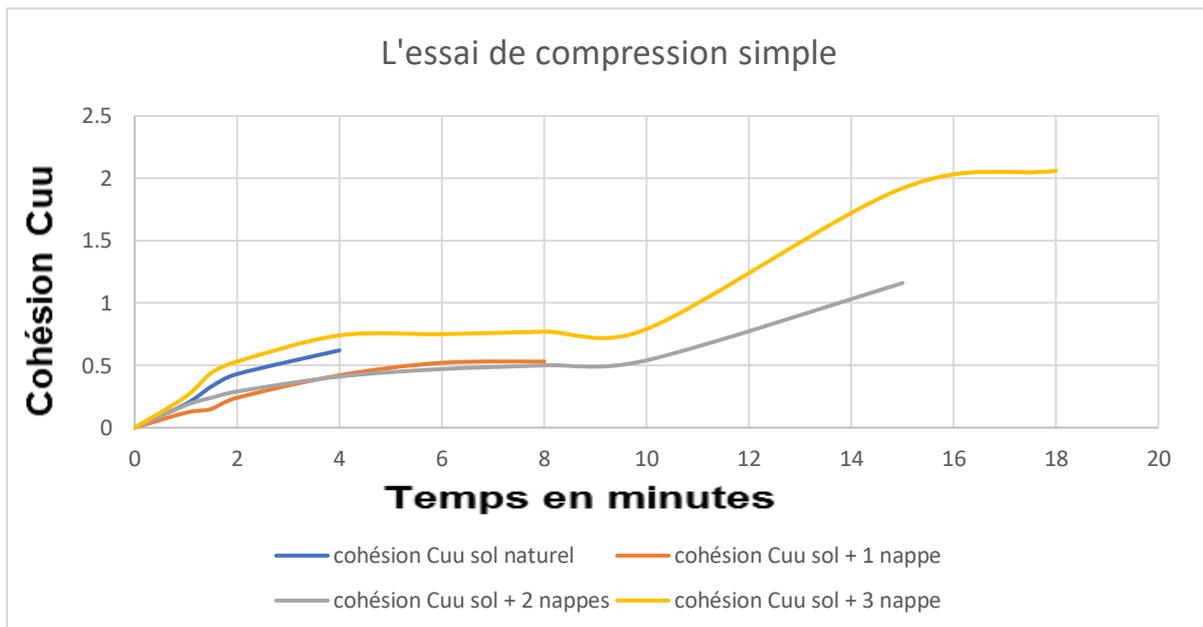


Figure 4.3.1 Les courbes de cohésion Ccu du sol renforcé.

5.4.1.1 Interprétation : D'après les courbes on voit que dans les deux cas l'avantage était pour sol renforcé avec 3 nappes avec une résistance très forte et bonne cohésion, aussi sol renforcé avec 2 nappes a donné de bonnes valeurs, mais le sol avec 1 nappe a donné une résistance inférieure en comparant avec sol naturel mais il a duré mieux que ce dernier.

5.5 Partie 02 : interprétation des résultats sur le sol amélioré et renforcé

5.5.1 L'essai Proctor

5.5.1.1 Résultats générales

Tableau 4.4 Résultats générales essai Proctor pour sol amélioré et renforcé

	Sol naturel + 3% chaux + 1 nappe (optimum)	Sol naturel + 3% chaux + 2 nappes (optimum)	Sol naturel + 3% chaux + 3 nappes (optimum)	Sol + 3% chaux (optimum)
Densité sèche γ_d	1,66	1,63	1,63	1,75
Teneur en eau W%	15,01	15,01	15,01	15,01

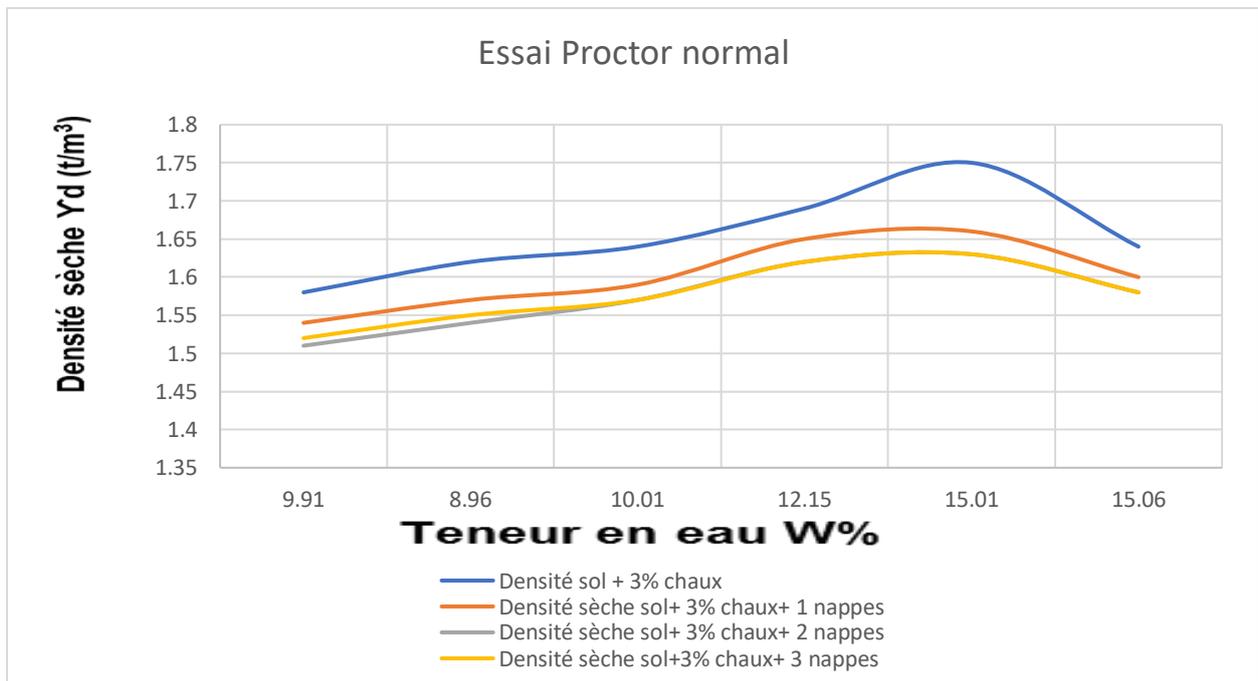


Figure 4.4 les courbes de l'essai Proctor normal du sol amélioré et renforcé.

5.5.1.2 Interprétation : On voit que dans toutes les courbes la pic est dans le pourcentage 15,01 donc l'optimum est de 20% dans toutes les cas.

5.6 L'essai CBR

5.6.1 Résultats générales

Tableau 4.5 Résultats générales essai CBR pour sol amélioré et renforcé

Enfnc(mm) Sol	Sol naturel		Sol+ 3% chaux + 1 nappe		Sol+ 3% + 2 nappes		Sol+ 3% + 3 nappes	
	F(KN)	P(N/mm ²)	F(KN)	P(N/mm ²)	F(KN)	P(N/mm ²)	F(KN)	P(N/mm ²)
1,25	0,322	1,66	0,340	1,76	0,274	1,42	1,432	7,40
2	0,473	2,44	0,485	2,51	0,413	2,13	1,903	9,83
2,5	0,580	2,99	0,561	2,90	0,510	2,63	2,200	11,37
5	1,025	5,29	0,953	4,92	1,027	5,31	3,421	17,68
7,5	1,388	7,17	1,290	6,67	1,350	6,98	4,531	22,48
10	1,695	8,75	1,455	7,52	1,748	9,03	5,65	29,19

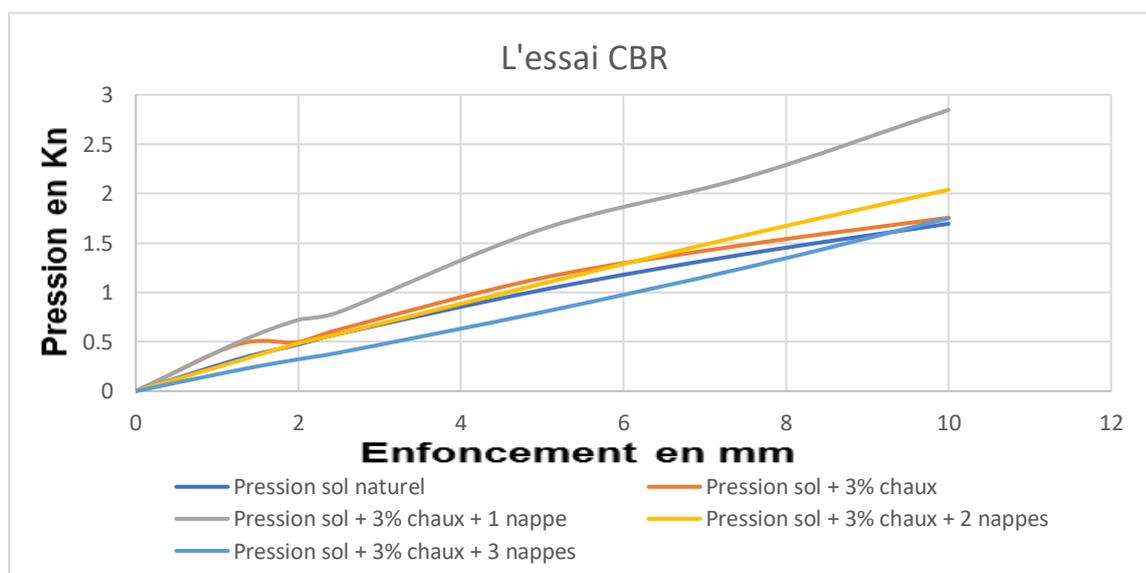


Figure 4.5 les courbes de l'essai CBR du sol amélioré et renforcé.

5.6.1.1 Interprétation : Dans ces cas on voit que la meilleure lecture est pour le sol amélioré

et renforcé avec 1 nappe puis avec 2 nappes qui a donné aussi une valeur peu plus que le sol naturel mais avec 3 nappes il a eu un résultat inférieur que sol naturel au début de l'essai puis il est presque égal au naturel avec une petite augmentation.

5.7 L'essai compression RC

5.7.1 Résultats générales

Tableau 4.6 Résultats générales de compression simple pour sol amélioré et renforcé

Matériau Temps (min)	Sol naturel			Sol + 3% chaux			Sol + 3% chaux + 1 nappe			Sol+ 3% chaux + 2 nappes			Sol+ 3% chaux + 3 nappes		
	F(K N)	RC (MP A)	Cuu	F(K N)	RC	Cu u	F(KN)	RC	Cuu	F(K N)	RC	Cuu	F(K N)	RC	Cuu
1	0,31	0,39	0,19	0,39	0,50	0,25	0,56	0,72	0,36	0,204	0,26	0,13	0,207	0,26	0,13
1,5	0,52	0,66	0,33	0,61	0,78	0,39	0,87	1,11	0,55	0,445	0,56	0,28	0,320	0,40	0,20
2	0,675	0,86	0,43	0,81	1,03	0,51	1,29	1,64	0,82	0,950	1,21	0,60	0,437	0,56	0,28
3	0,982	1,25	0,62	0,90	1,15	0,57				1,25	1,9	0,95	1,10	1,15	0,57
4										2,257	2,88	1,44	1,477	1,88	0,94
6										2,260	2,89	1,45	1,635	2,08	1,04
7,2										2,324	2,96	1,48			

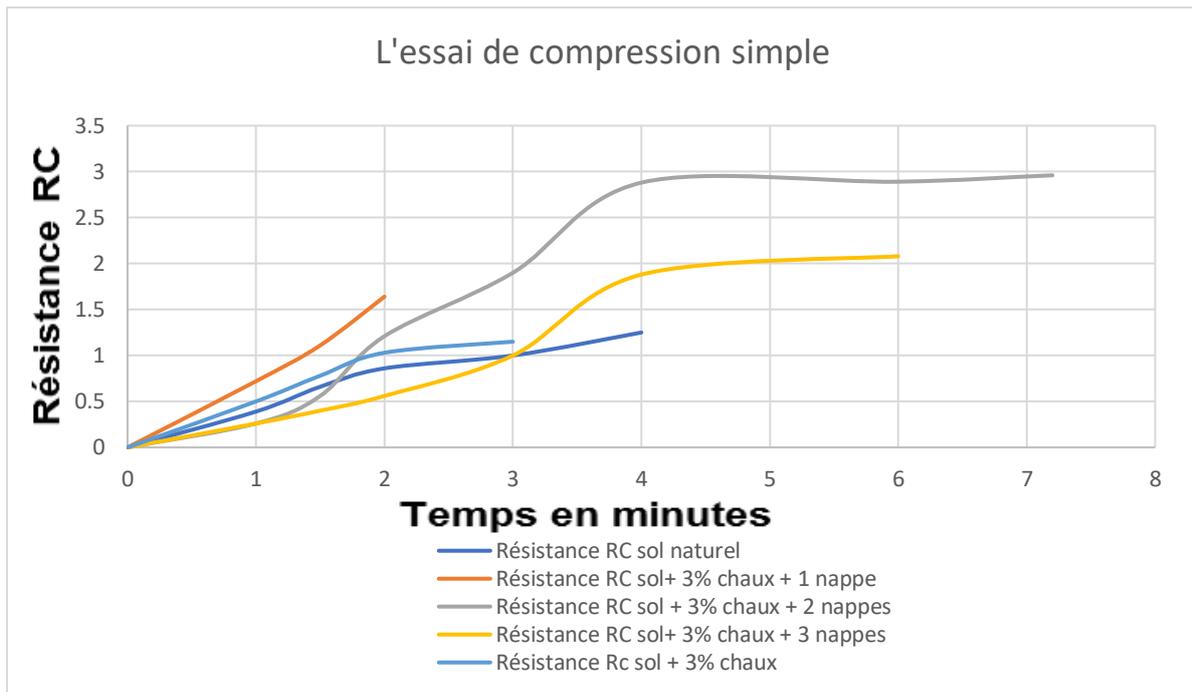


Figure 4.6 Les courbes de résistance RC du sol amélioré et renforcé.

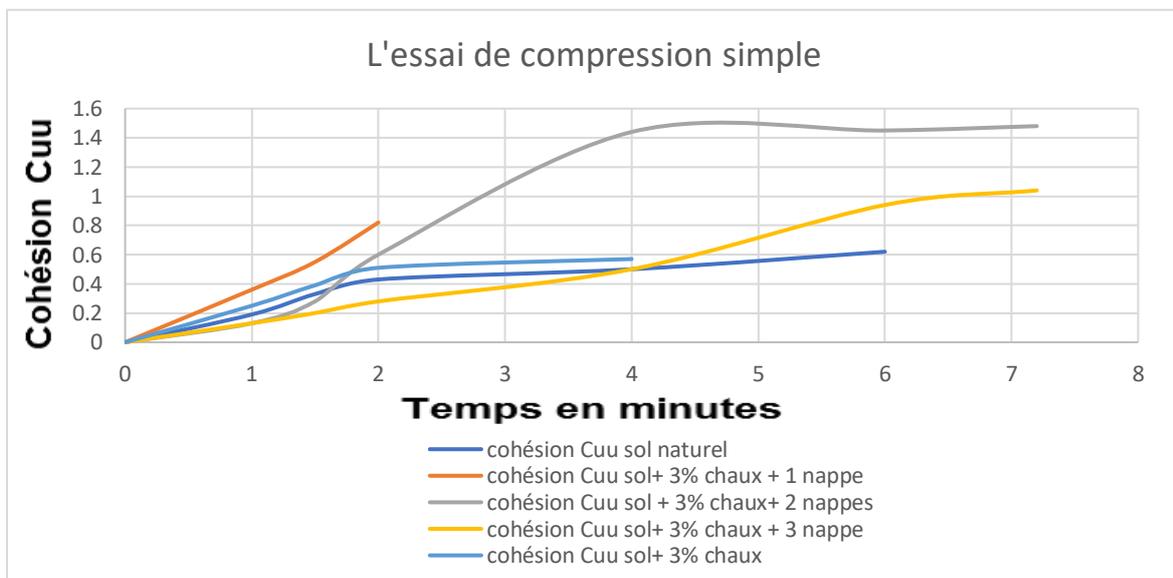


Figure 4.6.1 Les courbes de cohésion Ccu du sol amélioré et renforcé.

5.7.1.1 Interprétation : D'après les courbes on voit que dans les deux cas l'avantage était pour sol amélioré et renforcé avec 2 nappes avec une résistance très forte et bonne cohésion, aussi sol renforcé avec 3 nappes a donné de bonnes valeurs, mais le sol avec 1 nappe a donné une résistance supérieure que les autres dans le démarrage de l'essai mais l'éprouvette est fissuré dans 2 minutes, aussi le sol amélioré seul a donné une résultat peu grande que sol naturel .

5.8 Conclusion

Dans ce chapitre on a interprété toutes les résultats et courbes des essais mécaniques en deux parties, sol renforcé avec géotextile dans lequel on a trouvé que 3 nappes de matériau de renforcement a donné les meilleures résultats par contre la deuxième partie de chapitre, sol amélioré et renforcé on a trouvé que 2 nappes de géotextile qui a donné le mieux.

5.9 Etude comparative

Dans cette partie, certaines des recherches qui ont obtenue certains résultats en utilisant des ajouts spécifiques et qui ont comparées aux résultats des ajouts utilisé dans cette recherche.

Comparaison pour nos résultats et l'obtenus par d'autres chercheurs.

A)- L'essai Proctor, teneur en eau et densité sèche.

Tableau 5.1 Comparaison d'essai Proctor pour nos résultats et l'obtenus par d'autres chercheurs

Sol + ajout	Auteurs	Teneur en eau (%)				Densité sèche (t/m ³)			
		Sol naturel	Sol + 3 nappes	Sol + 3% chaux	Sol + 3% chaux + 2 nappes	Sol naturel	Sol + 3 nappes	Sol + 3% chaux	Sol + 3% chaux + 2 nappes
Sol + géotextile	Chiheb et tellai (2021)	16,93	16,93	15,01	15,01	1,73	1,74	1,75	1,63
Sol +géocell +géotextile	Muhammet VEFA Akpınar et Erhan Burak Pancar (2016)	22,48	23,63	22,95	23,17	1,63	1,72	1,70	1,71
Sol + géotextile	Nitin Tiwari et Neelima Satyam (2020)	14,22	18,15	14,43	17,32	1,68	1,90	1,78	1,84
Sol+ géo membrane+ géotextile	Azra Haris, Mary Dhanya (2020)	12,47	13,50	14,90	14,47	1,75	1,85	1,92	1,88

Histogrammes pour comparaison

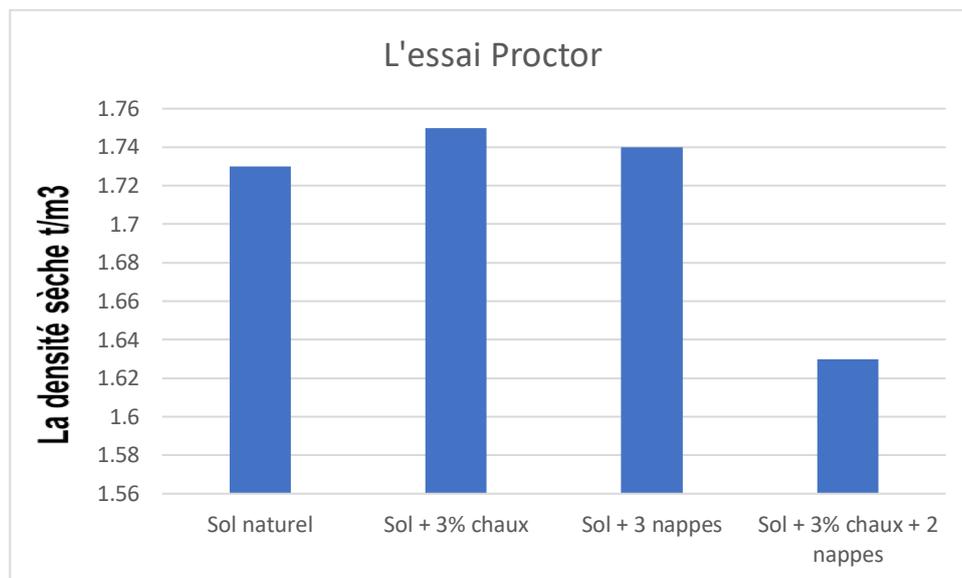


Figure 5.1 Résultat de la densité sèche pour différents ajouts (Chiheb et Tellai 2021)

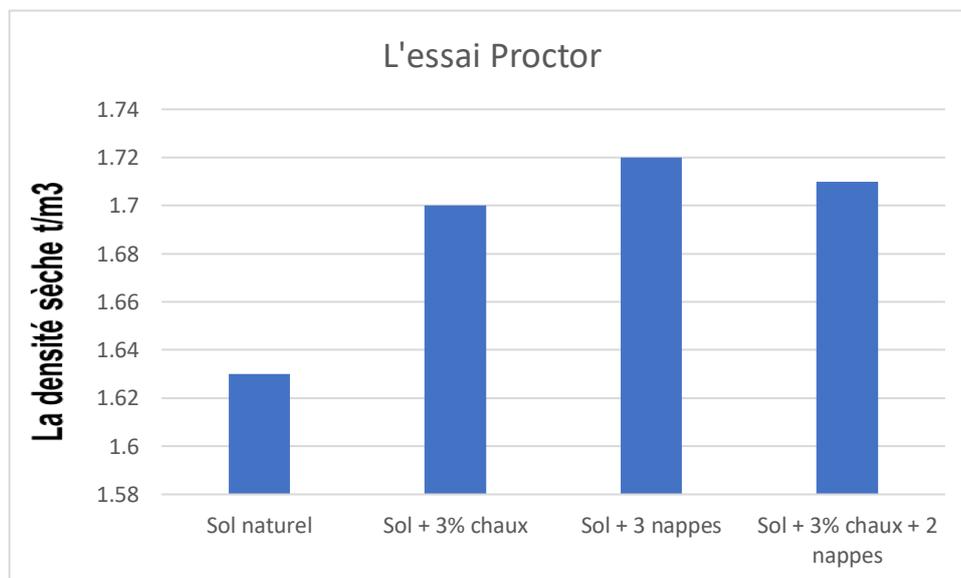


Figure 5.2 Résultat de la densité sèche pour différents ajouts (Muhammet VEFA Akpınar et Erhan Burak Pancar (2016))

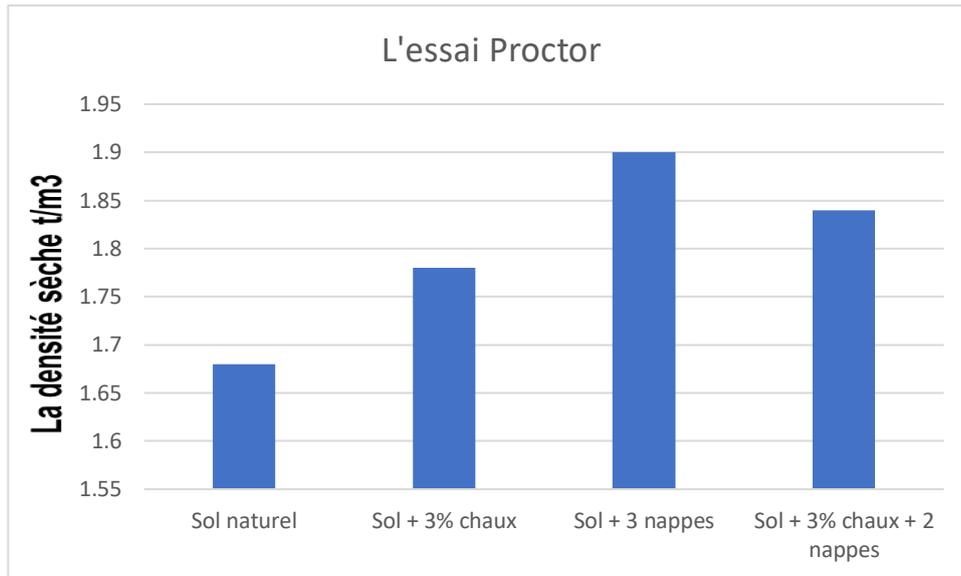


Figure 5.3 Résultat de la densité sèche pour différents ajouts
(Nitin Tiwari et Neelima Satyam(2020))

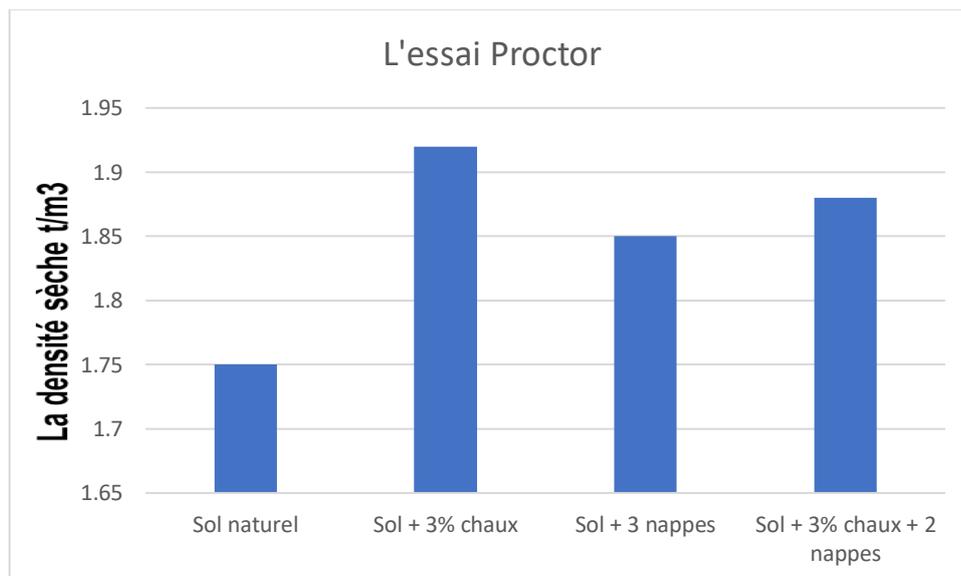


Figure 5.4 Résultat de la densité sèche pour différents ajouts
(Azra Haris, Mary Dhanya (2020))

Remarque :

Il est remarquable que la densité sèche du sol+géotextile est bonne comme l'expérience confirme ça Muhammet VEFA Akpınar et Erhan Burak Pancar (2016), Nitin Tiwari et Neelima Satyam(2020), Azra Haris, Mary Dhanya (2020).

Comparaison :

En comparant avec les différents ajouts, le sol + 3 nappes de géotextile est le meilleur parce qu'il absorbe peu d'eau et il atteint une densité maximale.

B) L'essai CBR, (Indice CBR) 2,5 et 5 mm.

Tableau 5.2 Comparaison d'essai CBR pour nos résultats et l'obtenus par d'autres chercheurs

Sol + ajout	Auteurs	I CBR (2,5 mm)				I CBR (5mm)			
		Sol naturel	Sol + 3 nappes	Sol + 3% chaux	Sol + 3% chaux + 2 nappes	Sol naturel	Sol + 3 nappes	Sol + 3% chaux	Sol + 3% chaux + 2 nappes
Sol +chaux + géotextile	Chiheb et tellai (2021)	4,34	16,48	4,67	4,34	5,14	17,16	5,75	5,46
Sol +chaux +géocell +géotextile	Muhammet VEFA Akpınar et Erhan Burak Pancar (2016)	3,58	13,57	5,80	6,97	4,76	14,33	6,05	8,54
Sol + chaux + géotextile	Nitin Tiwari et Neelima Satyam (2020)	5,21	17,48	5,70	5,35	6,27	18,12	6,30	7,47
Sol+chaux+ géo membrane+ géotextile	Azra Haris, Mary Dhanya (2020)	4,55	10,90	4,78	5,67	5,80	12,08	5,20	6,14

Histogrammes pour la comparaison

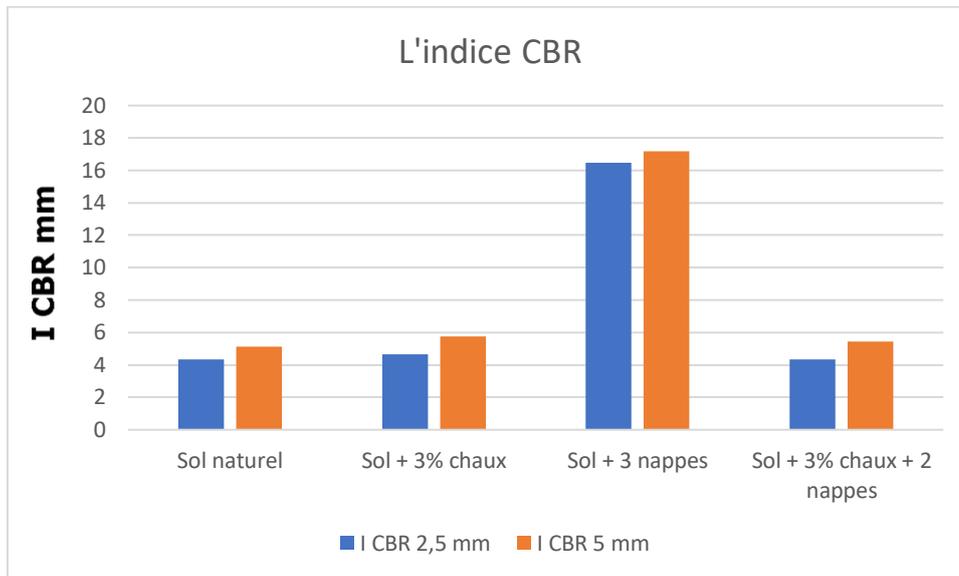


Figure 5.5 Variation d'I.CBR en fonction des différents ajouts, Chiheb et Tellai (2021)

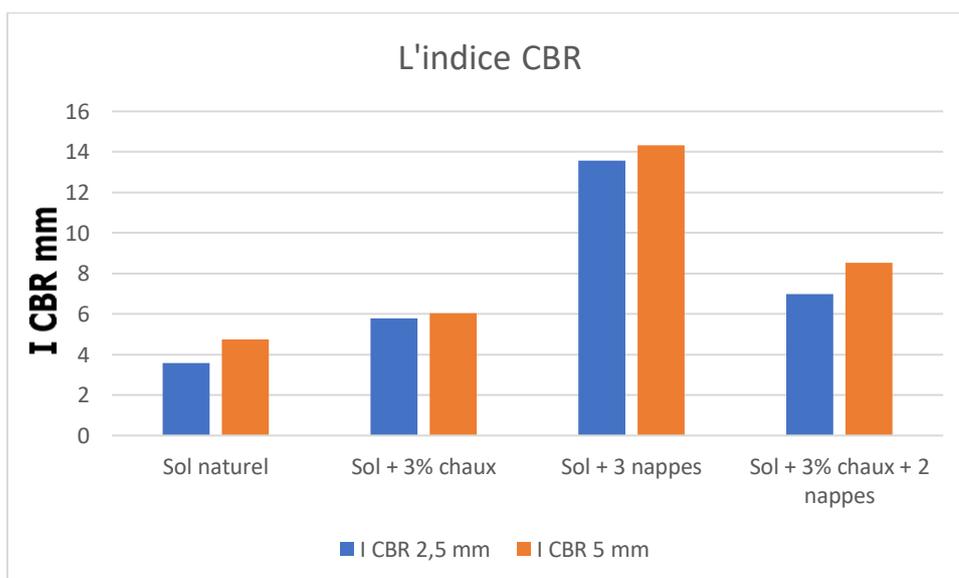


Figure 5.6 Variation de I.CBR en fonction des différentes ajouts Muhammet VEFA Akpınar et Erhan Burak Pancar (2016)

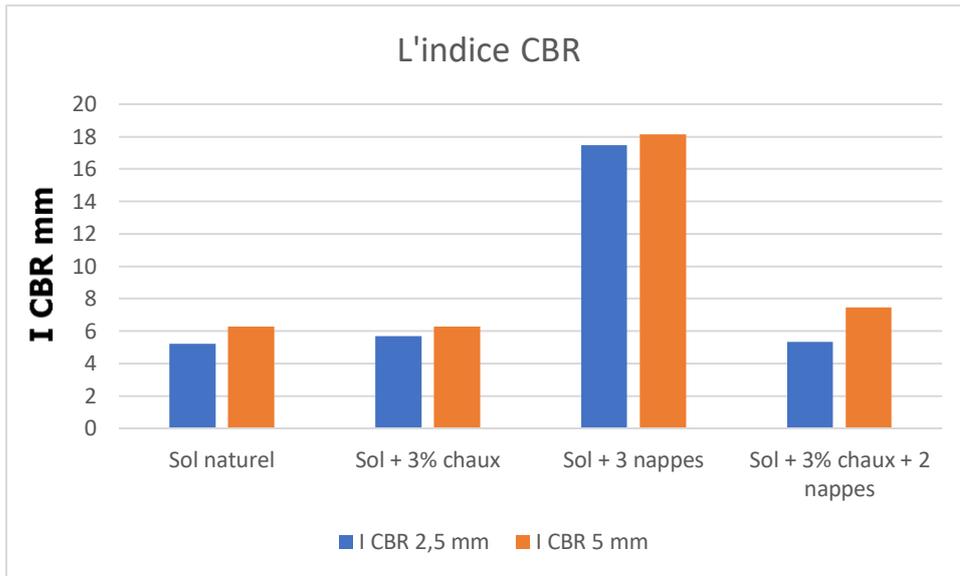


Figure 5.7 Variation de I.CBR en fonction des différents ajouts
Nitin Tiwari et Neelima Satyam (2020)

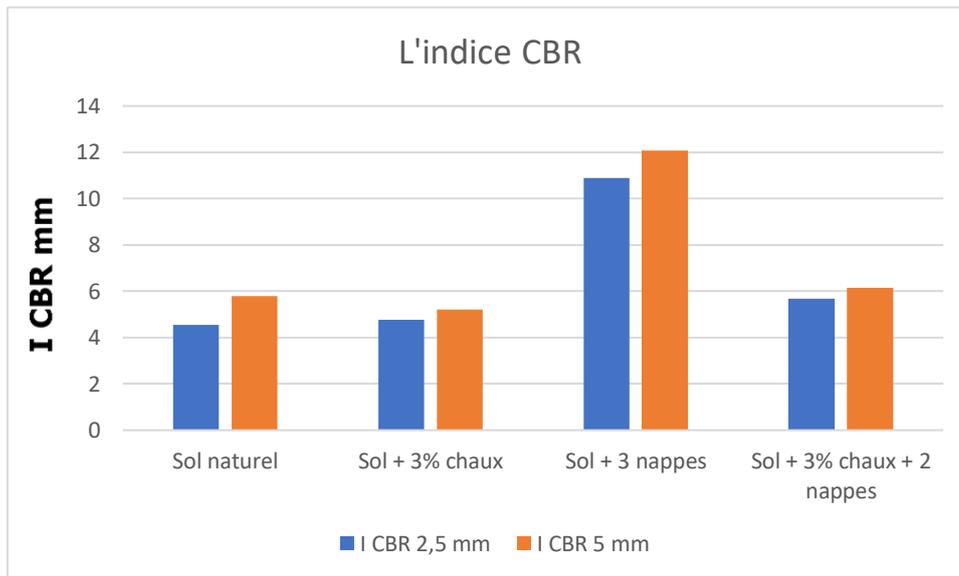


Figure 5.8 Variation de I.CBR en fonction des différents ajouts
Azra Haris, Mary Dhanya (2020)

Comparaison

En comparant avec les différents ajouts, le sol + 3 nappes de géotextile est le meilleur parce qu'il donne la meilleure valeur dans toutes les recherches.

5.10 Etude économique

Etude économique pour amélioration et renforcement d'un tronçon d'autoroute (100 mètres).

1- Sachant que le prix du géotextile est 1000 da pour le mètre carré.

On a 12 mètres de voies donc

$12 \times 2 \times 100 = 2400 \text{ m}^2 \rightarrow 2400 \times 1000 = 2400000 \text{ DA}$. (Pour 1 nappe).

$2400000 \times 2 = 4800000 \text{ DA}$ (pour 2 nappes).

$2400000 \times 3 = 7200000 \text{ DA}$ (Pour 3 nappes).

2- Sachant que le prix du la chaux vive ou éteinte 50 DA /Kg et l'épandage sur le sol est de 6 kg jusqu'à 30Kg/ m².

Dans notre cas l'épandage est 25 Kg/m².

$25 \times 2400 = 60,000 \text{ Kg} \rightarrow 60,000 \times 50 = 3000000 \text{ DA}$.

Dans notre étude on a trouvé comme bons choix :

-Sol naturel renforcé avec 3 nappes de géotextiles, son devis pour un tronçon d'autoroute de 100 mètres est 7200000 DA.

-Sol naturel amélioré avec de la chaux (25 Kg/m²) et renforcé avec 2 nappes de géotextile, son devis pour un tronçon d'autoroute de 100 mètres est $3000000 + 4800000 = 7800000 \text{ DA}$.

$7200000 < 7800000$, donc le bon choix et moins couteux c'est le sol naturel renforcé avec 3 nappes de géotextiles.

Conclusion générale

-Après la consultation des résultats obtenus, la certitude dépend de la maîtrise de matériels utilisée dans l'étude expérimentale en introduisant tous les paramètres trouvés qui peuvent influencer sur les résultats.

-Ces résultats semblent acceptables en les comparant avec les littératures effectuées par des chercheurs dans d'autres essais au laboratoire.

-Donc les résultats obtenus nous assurent que nous pouvons construire sur des sols cohésifs ou de faible portance en utilisant la chaux pour l'amélioration et les nappes de géotextiles qui exercent un rôle de stabilisation et de renforcement.

-Ces nappes doivent être bien placées pour remplir leurs fonctions, le comportement du sol dépend de la position des nappes et du pourcentage de la chaux ajoutée.

-La technique d'insérer des nappes de géotextile dans le sol est très intéressante et efficace vu le gain de la portance.

-Les nappes doivent être distribuées sur toute la profondeur d'influence pour assurer une bonne répartition des contraintes et limiter le maximum des déformations.

-La chaux doit être bien mélangée avec le sol pour qu'il joue son rôle pour la diminution de la teneur en eau et augmente la capacité portante.

-Les géotextiles et la chaux avec ces caractéristiques principales, et par comparaison aux autres matériaux qu'ils servent à remplacer, ils ont :

- une performance généralement meilleure,
- une qualité supérieure,
- un coût généralement plus économique,
- une durabilité plus grande.

-En plus avec les expériences nous pouvons les améliorer pour qu'ils servent à l'amélioration de la portance des sols et nous offrent la solution pour construire sur les sols de faible portance.

Références bibliographiques

- [1] **Frédéric Portet**. Aide-mémoire Mécanique des sols. ENTE Aix en Provence. Octobre 2003
- [2] **Abdelhadi EL hachemi**.Mémoire Master fondamentale Chimie Université Abdelmalek Essaadi 2013
- [3] **Jacques Beauchamp**.pédologie LES ARGILES. Université de Picardie Jules Verne. 15 octobre 2005
- [4] **Chabane hadjer**. Master en AGRONOMIE. Valorisation d'une argile provenant du gisement deM'Zila(Mostaganem). Université Abdelhamid BenBadis-Mostaganem.2016
- [5] **Harrat Mohamed**. Magister en génie chimique Contribution à l'amélioration du procédé de fabrication de la céramique. Université Kasdi Merbah Ouargla. 2007
- [6] **Cahier élaboré par le Comité français des géo synthétiques (CFG)**. Définition, mise en œuvre et dimensionnement des géo synthétiques. Le moniteur des travaux publics et du batiments.10 avril 2015.
- [7] **S. Lambert**. Les géotextiles : fonctions, caractéristiques et dimensionnement. Ingénieries eau-agriculture-territoires, Lavoisier ; IRSTEA ; CEMAGREF, 2000, p hal.15 mars 2010
- [8] **Bendaho Boudejmaa**. Mémoire de magister géotechnique Amélioration de la capacité des sols par les géotextiles. Université Djilali Liabès.2011
- [9] **Natacha SERTIER**.Licence IUP amélioration des sols. Université de la réunion.2005/2006.

Références bibliographiques

- [10] **GENIECIVILPDF**. Les techniques d'amélioration de sol.
- [11] **Fondasol**. Techniques d'amélioration des sols.
- [12] **Planète TP**. Traitement des sols. 20 novembre 2007.
- [13] **Philippe Souchu**. Le traitement des sols en place à la chaux. 23 janvier 2015
- [14] **Marc figoli**. La chaux. Maison nature.
- [15] **Robert Perrin, Jean-Pierre Scharff**, Chimie industrielle, Masson, Paris, 1136 p, 1993.
- [16] **Jean-Marc Henni**. Le renforcement du sol. M-habitat.
- [17] **Terassier.Net**. Techniques de renforcements du sol.
- [18] **Stéphane Lambert**. « Les géotextiles, fonction, caractéristiques et dimensionnement ».
- [Web1] www.infogeos.com
- [Web2] www.mecaroute.fr/geosynthetiques/index2.html
- [Web 3] www.geotextiles-geogrilles.fr

