

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE de JIJEL



Département de Génie Civil et Hydraulique

PROJET DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du Diplôme de

MASTER

Filière : Génie civil

Option : Géotechnique

Thème

**ETUDE DU TRAITEMENT D'UN SOL ARGILEUX
(POUR L'APPLICATION DANS LES COUCHES DE
FORME CHAUSSEES).**

Présenté par :

**CHEBBAH MERIEM
MEGHAICHI NOUR-EL-HOUDA**

Encadré par :

Mr: BOUMEHRAZ.M



Promotion 2019



Remerciement

Nous remercions avant tout **ALLAH** de nous avoir gardés en bonne santé afin de mener à bien ce mémoire. Nous remercions également notre famille pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

Nous tenons aussi à remercier notre promoteur Mr : Boumehrez, M. pour son suivi et ses conseils durant l'évaluation de ce travail.

Ainsi nous remercions Souad hank la responsable au laboratoire MDS qui a été toujours disponible avec nous pour donner toutes les informations et les conseils pour un bon déroulement de travail.

Je tiens à remercier très vivement les membres de jury de soutenance de ce mémoire.

Merci

Je dédie du fond de mon cœur ce modeste travail :

- *Aux personnes les plus chères du monde, ma mère et mon père qui sont la lumière de ma réussite.*
- *A mes frères et mes sœurs*
- *A toute ma famille*
- *A mon fiancé.*
- *A tous mes amies et ma cher chère amie : Asma, Lamia, Safaa, Dalal, Chaima, Iman, Zina, Yousra, Ratiba, Hadjer, Louiza, Ahlam,*
- *A tous mes enseignants. A tous les étudiants de l'université de Bejaïa, particulièrement*
- *Tous mes collègues de la promotion M2 géotechnique.*
- *A tous ceux qui mon donner de l'aide : Ahmed, Abdenour, Saoudi, Mohammed, Salah,*
- *A Tous ceux que je connais et qui me connaissent et tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

Nour -el-houda

Dédicace

"و ما توفيقى إلا بالله عليه توكلت و إليه أنيب"
أحمدك ربي حمدا يليق بجلال وجهك و عظيم سلطانك .
و أزكى صلاة و أطيب سلام عليك يا سيدي يا رسول الله.

Je dédie ce modeste travail à :

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

A toutes personnes qui ma aider à pour suivre mes études.

A mes très chers frères : yaakoub ,souhaib.

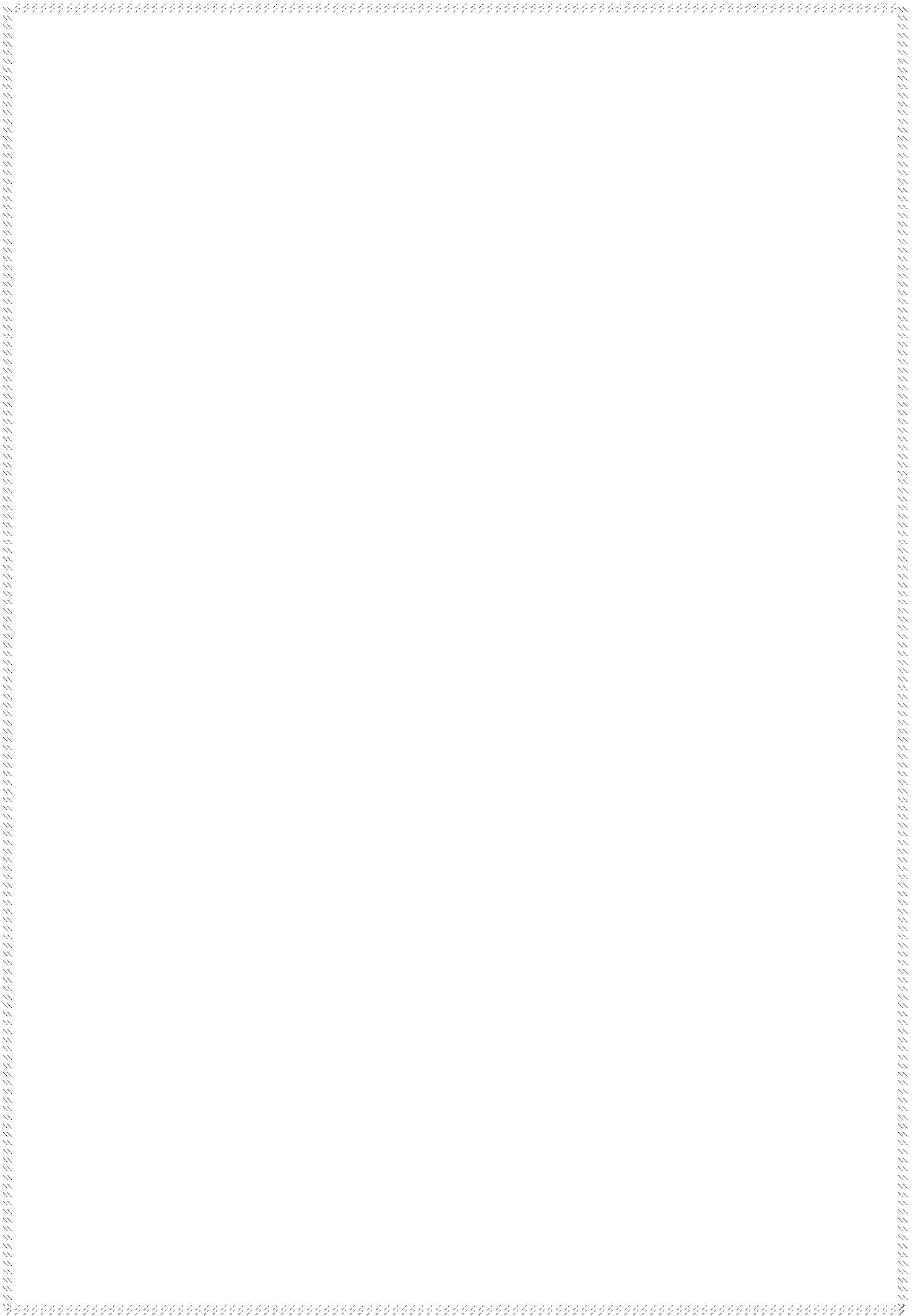
A toute ma grande famille sans exception.

A tous mes amies.

A tout la promotion 2019 du génie civil.

A celui qui ma collaboré dans la réalisation de ce mémoire.

Meriem



Résumé:

Les techniques du traitement des sols qui s'appliquent aux trois couches constituantes de la chaussée: la partie supérieure des terrassements, la couche de forme et les assises (couche de fondation et couche de base). Dans notre étude on utilise de différents pourcentages du ciment et de la chaux, dans le but d'améliorer les propriétés géotechniques faibles d'un sol argileux, et pour l'appliquer dans les couches de forme des chaussées. Ce travail expérimental vise à déterminer l'évolution des propriétés suivantes: les limites d'Atterberg, la résistance au cisaillement, les caractéristiques du compactage (densité et la teneur en eau optimal) et les indices CBR.

Mots clés: ciment, la chaux, schiste, couche de forme, indice CBR.

Abstract :

Soil treatment techniques that apply to the three constituent layers of the pavement: the upper part of the earthworks, the subgrade and the foundations (foundation layer and base layer). In our study, different percentages of cement and lime are used to improve the weak geotechnical properties of a clay soil and to apply it in the pavement layers. This experimental work aims to determine the evolution of the following properties: Atterberg limits, shear strength, compaction characteristics (density and optimal water content) and CBR indices.

Key words: cement, lime, shale, subgrade, CBR index.

ملخص:

تقنيات معالجة التربة التي تنطبق على الطبقات الثلاثة المكونة للرصيف: الجزء العلوي من أعمال الحفر، الطبقة السفلية والأساسات (طبقة الأساس والطبقة الأساسية). في دراستنا، يتم استخدام النسب المئوية المختلفة من الأسمنت والجير لتحسين الخصائص الجيوتقنية الضعيفة للتربة الطينية وتطبيقها في طبقات الأرصفة. يهدف هذا العمل التجريبي إلى تحديد تطور الخصائص التالية: حدود Atterberg وقوة القص وخصائص الضغط (الكثافة والمحتوى المائي الأمثل) ومؤشرات CBR.

الكلمات المفتاحية: الاسمنت، الجير، الصخر الزيتي، الطبقة الفرعية، مؤشر CBR.

Sommaire

Dédicaces

Remerciements

Résumé

Légende

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale 1

Chapitre I: Les sols argileux

I.1. Introduction 3

I.2. Généralités sur les sols:3

I.2.1. Définition:.....3

I.2.2. Différents types des sols:4

I.2.3. Classification des sols:.....6

I.3. Les argiles:.....8

I.3.1. Origine des argiles:8

I.3.2. Définition géotechnique des argiles:9

I.3.3. Minéralogie des argiles:.....9

I.3.3.2. Texture d'une argile:.....11

I.3.4. Structure des argiles:.....12

I.3.5. Principales familles d'argile:13

I.3.5.1. Les Kaolinites:13

I.3.5.2. montmorillonite:14

I.3.5.3. L'illite:15

I.3.6. Propriétés et rôle des minéraux argileux:15

I.3.7.1. Densité de charge spécifique:16

I.3.7.2. Capacité d'échange cationique (CEC):.....17

I.3.7.3. Surface spécifique:.....17

I.4. Problèmes des sols argileux:.....17

I.4.1. Tassement des sols:17

I.4.2. Glissements de terrain:	17
I.4.3. Gonflement des sols argileux:	18
I.4.3.1. Mécanisme du gonflement.....	18
I.5. Conclusion	19

Chapitre II: Technique de traitement des sols

II.1. Introduction	20
II.2. Contexte général de l'étude.....	20
II.2.1. Constituants de la chaussée et rôle des couches.....	20
II.2.2. Paramètres géotechniques des sols et le compactage	21
II.2.2.1. Paramètres de nature	22
II.2.2.2. Paramètres de comportement mécanique	23
II.2.2.3. Paramètres d'état	24
II.3. Compactage des sols	25
II.4. Indice CBR	25
II.5. Module EV2	26
II.6. Dimensionnement de la couche de forme	27
II.7. Technique de traitement des sols.....	27
II.7.1. Produits de traitement.....	27
II.7.2. Traitement des sols à la chaux.....	27
II.7.2.1. Définition	27
II.7.2.2. Différents types de la chaux	28
II.7.2.3. Principe et objectifs du traitement.....	28
II.7.2.4. Applications	28
II.7.3. Traitement des sols au ciment	28
II.7.3.1. Définition	28
II.7.3.2. Composition chimique	29
II.7.3.3. Principe et objectifs du traitement.....	29
II.7.3.4. Différent type de ciment.....	29
II.8. Stabilisation mixte chaux-ciment	30
II.8.1. Principe de traitement.....	30

II.8.2. Avantages de stabilisation mixte	30
II.9. Principes d'action des produits de traitement sur les sols	31
II.9.1. Action de la chaux aérienne	31
II.9.1.1. Actions immédiates	31
II.9.1.2. Actions à long terme.....	34
II.9.2. Action de ciment	34
II.9.2.1. Actions immédiates	34
II.9.2.2. Action à long terme	35
II.10. Classement mécanique de la CDF traitée.....	36
II.11. Effet du traitement chimique sur les propriétés des sols	37
II.11.1. Effet du ciment sur les limites d'Atterberg	37
II.11.2. Effet du ciment sur le compactage	38
II.11.3. Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg.....	38
II.11.4. Effet de la chaux sur le compactage.....	39
II.11.5. Effet de la chaux et ciment sur l'indice de CBR	39
II.11.6. Effet de la chaux et ciment sur les propriétés mécanique (C et ϕ).....	40
II.12. Conclusion.....	41

Chapitre III : Etude expérimentale

III.1. Introduction.....	42
III.2. Matériaux utilisées	42
III.2.1. Sol utilisé	42
III.2.2. Ciment.....	43
III.2.3. Chaux	43
III.3. Essais d'identification du sol utilisé.....	44
III.3.1. Teneur en eau de sol.....	44
III.3.1.1. Définition	44
III.3.1.2. Principe de l'essai	44
III.3.1.3. Appareillage utilisée	45
III.3.1.4. Résultats obtenus	45
III.3.2. Masse volumique absolue	45

III.3.2.1.Masse volumique absolue du sol	45
III.3.2.2.Appareillage utilisé	45
III.3.2.3.Mode opératoire	45
III.3.2.4.Résultats de l'essai	46
III.3.3. Essai au bleu de méthylène	46
III.3.3.1. But de l'essai	46
III.3.3.2. Principe de l'essai	46
III.3.3.3. Appareillage	47
III.3.3.4.Mode opératoire	47
III.3.3.5.Résultats obtenus	47
III.3.4.Limites d'Atterberg.....	48
III.3.4.1. Principe de l'essai	49
III.3.4.2. Matériels utilisés	49
III.3.4.3. Mode opératoire	49
III.3.4.4. Résultats et interprétations	50
III.3.5. Essais d'analyse granulométrique	51
III.3.5.1.Tamisage par voie humide	51
III.3.5.2.Analyse granulométrique par sédimentométrie	53
III.4. Essais mécaniques.....	59
III.4.1. Proctor	59
III.4.1.1. But de l'essai.....	59
III.4.1.2. Principe de l'essai	59
III.4.1.3. Appareillage	61
III.4.1.4. Mode opératoire	61
III.4.2. Essai de CBR	61
III.4.2.1. Introduction.....	61
III.4.2.2. But de l'essai.....	62
III.4.2.3. Principe de l'essai	62
III.4.2.4. Appareillage	62
III.4.2.5. Mode d'opératoire.....	62
III.4.2.6. Résultats de l'essai.....	63
III.4.3. Essai de cisaillement a la boîte	63
III.4.3.1.Introduction.....	63

III.4.3.2. But de l'essai.....	63
III.4.3.3.Matériel utilise	63
III.4.3.4. Principe de l'essai	64
III.5. Conclusion	65

Chapitre IV: Résultats et interprétations

IV.1. Introduction:.....	66
IV.2. Résultats de l'essai des limites d'Atterberg.....	66
IV.2.1. Avant traitement	66
IV.2.2. Après traitement.....	67
IV.3. Les résultats de l'essai Proctor modifié	75
IV.3.1. Avant traitement	75
IV.3.2. Après traitement.....	75
IV.3.3. Récapitulatifs des résultats obtenus	79
IV.4. Résultats de l'essai CBR Immédiat	81
IV.4.1. Avant traitement	81
IV.4.2. Après traitement.....	81
IV.4. Essai de cisaillement a la boite	87
IV.4.1. Avant traitement	87
IV.4.2. Après traitement.....	88
IV.4.3. Récapitulatifs des résultats obtenus	91
IV.5. Conclusion.....	92

Liste des tableaux

N°	Tableaux	Pages
01	Tableau (I, 01): Classification des sols selon leurs propriétés mécaniques.	07
02	Tableau (I, 02): Occurrence des minéraux argileux dans le sol en fonction du climat.	10
03	Tableau (I, 03): surface spécifique et la capacité d'échange cationique (CEC) de quelques minéraux argileux.	16
04	Tableau (II, 01) : Indice portant immédiat minimal à obtenir à la mise en œuvre – GTS-	26
05	Tableau (II, 02) : dimensionnement de la couche de forme.	27
06	Tableau (II, 03) : Modalités de traitement envisageables pour les chantiers de faible importance.	31
07	Tableau (II, 04) : Récapitulatif des actions des liants.	35
08	Tableau (II, 05) : Classe mécanique du matériau traité – GTS.	36
09	Tableau (II, 06) : Classe de PF selon la classe d'AR, la classe du matériau et l'épaisseur de CDF – GTS.	37
10	Tableau (II, 07) : Effet du ciment sur les limites d'Atterberg.	37
11	Tableau (II, 08) : Effet de l'ajout du ciment sur le comptage.	38
12	Tableau (III, 01): normes des essais d'identification sur un sol argileux.	42
13	Tableau (III, 02):analyse chimique du ciment.	43
14	Tableau (III, 03):analyse chimique de la chaux.	44
15	Tableau (III, 04): Résultats de la teneur en eau.	45
16	Tableau (III, 05): le poids volumique de sol étudié.	46

17	Tableau (III, 06): classification des sols d'après l'essai de bleu méthylène.	48
18	Tableau (III, 07): Classification des sols.	50
19	Tableau (III, 08) : Degré de plasticité de sol.	51
20	Tableau (III, 09) : Description de sol en fonction du coefficient d'uniformité.	53
21	Tableau (III, 10) : Granulométrie par voie humide	53
22	Tableau (III, 11): Les résultats de granulométrie.	57
23	Tableau (III, 12): normes des essais mécaniques sur un sol argileux.	59

Liste des figures

N°	Figures	Pages
01	Figure (I, 01): schéma microscopique d'un sol argilo-limoneux.	05
02	Figure (I, 02): relation entre la limite de liquidité et l'indice de plasticité pour des sols caractéristiques.	06
03	Figure (I, 03): Diagramme de plasticité de Casagrande.	08
04	Figure (I, 04): Types de phyllosilicates formés au cours de l'altération.	10
05	Figure (I, 05): texture des sols gonflants.	11
06	Figure (I, 06): Photographies MEB de texture matricielle (a: Argile Verte de Romainville) et texture agrégée (b: Argile de Bavent).	12
07	Figure (I, 07): structure des argiles.	13
08	Figure (I, 08): feuillet de kaolinite.	13
09	Figure (I, 09): particule de kaolinite.	14
10	Figure (I, 10): la liaison entre les particules de montmorillonite.	14
11	Figure (I, 11): la liaison entre les particules de l'illite.	15
12	Figure (II, 01) : Schéma de structure de chaussée (et voie ferrée).	20
13	Figure (II, 02) : Classification des matériaux selon leur nature, GTR (LCPC-SETRA, 1992).	21
14	Figure (II, 03) : Etats de consistance d'un sol – Limites d'Atterberg.	23
15	Figure (II, 04) : Exemple de courbes de compactage suivant la nature du sol.	25
16	Figure (II, 05) : Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de chaux vive.	32

17	Figure (II, 06) : Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage et de résistance au poinçonnement dans le cas d'un sol de classe A2 traité d 2 % de chaux vive.	33
18	Figure (II, 07) : Zone de classe mécanique de CDF.	36
19	Figure (II, 08) : Evolution des caractéristiques de plasticité et de consistance de la marne en fonction de la teneur en chaux.	38
20	Figure (II, 09) : Influence de l'addition de chaux sur les courbes de compactage.	39
21	Figure (II, 10) : Evolution de l'indice CBR après immersion en fonction de la teneur des liants (ciment et chaux).	40
22	Figure (II, 11): Evolution de (a) l'angle de frottement interne, (b) la cohésion en fonction de la teneur des liants (ciment et chaux).	41
23	Figure (III, 01): Appareillage de l'essai au bleu de méthylène	47
24	Figure (III, 02) : Appareil de Casagrande.	49
25	Figure (III, 03) : Etapes de l'essai avec l'appareille de Casagrande.	50
26	Figure (III, 04) : Analyse granulométrie par voie humide.	52
27	Figure (III, 05) : Appareillage de l'essai analyse granulométrique par sédimentométrie.	54
28	Figure (III, 06): Lecture du densimètre.	55
29	Figure (III, 07): Lecture corrigé du densimètre.	56
30	Figure (III, 08) : Courbe granulométrique.	58
31	Figure (III, 09) : Courbe de Proctor.	60
32	Figure (III, 10): Matériel Essai de cisaillement a la boîte.	64
33	Figure (IV ,01) : La courbe de la limite de liquidité.	66
34	Figure (IV ,02) : Courbe de la limite de liquidité (1% de chaux).	67
35	Figure (IV ,03) : Courbe de la limite de liquidité (3% de chaux).	68
36	Figure (IV ,04) : Courbe de la limite de liquidité (7 % de chaux).	68
37	Figure (IV ,05) : Variation de la limite de liquidité en fonction de % de la chaux.	69

38	Figure (IV ,06) : Variation de la limite de plasticité en fonction de % de la chaux.	69
39	Figure (IV ,07) : Variation de l'indice de plasticité en fonction de % de la chaux.	70
40	Figure (IV ,08): Courbe de la limite de liquidité (1% ciment).	71
41	Figure (IV , 09): Courbe de la limite de liquidité (3% ciment).	71
42	Figure (IV ,10) : Courbe de la limite de liquidité (7 % ciment).	72
43	Figure (IV ,11): Courbe de la limite de liquidité en fonction de % ciment.	72
44	Figure (IV ,12): Courbe de limite de plasticité en fonction de % ciment.	73
45	Figure (IV ,13): Courbe de l'indice de plasticité en fonction de % ciment.	73
46	Figure (IV ,14) : Courbe de la limite de liquidité (ajout mixte).	74
47	Figure (IV ,15): Courbe de compactage.	75
48	Figure (IV ,16): Courbe de compactage (1% de chaux).	76
49	Figure (IV ,17): Courbe de compactage (3 % de chaux).	76
50	Figure (IV ,18): Courbe de compactage (7 % de chaux).	77
51	Figure (IV ,19): Courbe de compactage (1% ciment).	77
52	Figure (IV ,20): Courbe de compactage (3 % ciment).	78
53	Figure (IV ,21): Courbe de compactage (7 % ciment).	78
54	Figure (IV ,22): Courbe de compactage (mixte).	79
55	Figure (IV ,23): Evolution de la densité sèche optimale en fonction du pourcentage d'ajout des liants (ciment et chaux).	80
56	Figure (IV ,24): Evolution de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage d'ajout des liants (ciment et chaux).	80
57	Figure (IV ,25): Courbe de la portance IPI	81
58	Figure (IV ,26): Courbe de la portance IPI (1% chaux).	82
59	Figure (IV ,27): Courbe de la portance IPI (3% chaux).	82
60	Figure (IV ,28): Courbe de la portance IPI (7% chaux).	83
61	Figure (IV ,29): Courbe de poinçonnement en fonction de % d'ajout de la chaux.	83
62	Figure (IV ,30): Variation de « IPI » en fonction de % d'ajout de la chaux.	84

63	Figure (IV ,31): Courbe de la portance IPI (1%ciment).	84
64	Figure (IV ,32): Courbe de la portance IPI (3%ciment).	85
65	Figure (IV ,33) : Courbe de la portance IPI (7%ciment).	85
66	Figure (IV ,34): Courbe de poinçonnement en fonction de % d'ajout de ciment.	86
67	Figure (IV, 35): Variation de «IPI» en fonction de % d'ajout de ciment.	86
68	Figure (IV, 36): Courbe de la portance IPI (mixte).	87
69	Figure (IV, 37): Courbe de l'essai de cisaillement avant traitement.	88
50	Figure (IV, 38): Courbe de l'essai de cisaillement (1 % chaux).	88
51	Figure (IV, 39): Courbe de l'essai de cisaillement (3 % chaux).	89
51	Figure (IV, 40): Courbe de l'essai de cisaillement (7 % chaux).	89
53	Figure (IV, 41): Courbe de l'essai de cisaillement (1 % ciment).	90
54	Figure (IV, 42): Courbe de l'essai de cisaillement (3 % ciment).	90
55	Figure (IV, 43): Courbe de l'essai de cisaillement (7 % ciment).	91
56	Figure (IV, 44): Evolution de la cohésion en fonction de la teneur des liants (ciment et chaux).	91
57	Figure (IV, 45): Evolution de l'angle de frottement interne en fonction de la teneur des liants (ciment et chaux).	92

Notations

- **GTR** : Guide technique des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme.
- **LCPC** : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- ρ_{dopt} : masse volumique sèche optimum Proctor.
- W_{opt} : Teneur en eau à l'optimum Proctor.
- **PST** : Partie Supérieure de Terrassement.
- **Ip**: Indice de plasticité.
- **WL** : Limite de liquidité.
- **WP** : Limite de plasticité.
- **VBS**: Valeur du bleu méthylène.
- **IPI** : indice portant immédiat.
- **CBR** : California Bearing Ratio.
- **D** : Dimension maximale pour laquelle le passant est compris entre 80 et 99%.
- D_{max} : Diamètre maximal des grains (mm).
- **CEM I à V** : Classes de ciment (selon NF EN 197-1).
- γ : Poids volumique.
- γ_d : Poids volumique sec.
- γ_h : Poids volumique humide.
- γ_w : Poids volumique de l'eau.
- γ_d : Poids volumique sec.
- γ_h : Poids volumique humide.
- **c** : la cohésion.
- ϕ : angle de frottement.
- **C_u** : coefficient d'uniformité.
- **C_c** : coefficient de courbure.

GLOSSAIRE

- **Floculation** : phénomène physico-chimique au cours duquel les matières en suspension forment des flocons et s'agrègent ce qui provoque leur sédimentation. Remarque : la chaux agit sur les charges électriques des particules fines de la fraction argileuse entraînant leur floculation.
- **Syntaxie** : phénomène qui se produit entre substances de compositions chimiques différentes, ayant des affinités structurales, conduisant à la répétition régulière de motifs structuraux. L'action de syntaxie de la chaux se traduit par un pralinage des grains qui augmente leur résistance par obstruction des pores.
- **Action pouzzolanique** : solubilisation des constituants de la fraction argileuse aboutissant à une cristallisation (édifices cristallins de minéraux argileux). Phénomène de cimentation.
- **l'angle de frottement interne**: caractéristique intrinsèque d'un sol, exprimée en degrés, correspondant à l'inclinaison de la droite de coulomb. Déterminé à partir d'essais en laboratoire, il est utilisé dans les calculs géotechnique (dimensionnement de fondation, stabilité de pente, poussée des terres).

Introduction

Générale

Introduction générale:

Avant la réalisation des projets routière ou des ouvrages d'infrastructure, la réutilisation des matériaux du site pour la construction nécessite un sol de bon caractéristiques (physique et mécanique), cette situation est rarement de trouver. A cet effet, il faut réduire des impacts négatifs sur la nature et le fonds d'investissement du projet. Pour éviter les problèmes de réalisation, on utilise bien souvent des méthodes du traitement des sols pour améliorer les propriétés géotechniques insuffisantes des sols rencontrés sur le site avant de réutilises pour une certaines fonctions dans l'ouvrage.

L'emploi des liants chaux et ciment en technique routière est développé depuis une trentaine d'années. Elle concerne essentiellement les sols fins (marneux, argileux, limoneux...).Le traitement des sols en place évite le transport et valorise les matériaux locaux, ce qui permet de stabiliser des sols à des coûts très intéressants, avant la mise en place des couches superficielles. Ce traitement procure deux avantages:

- L'assèchement des sols;
- L'amélioration des caractéristiques géotechniques de façon;
- L'amélioration des caractéristiques géotechniques de façon durable (résistances mécaniques, insensibilité à l'eau et au gel). [1]

Le traitement de sol est une technique qui s'applique à trois niveaux différents de couches constituant de la chaussée: la partie supérieure des terrassements (PST), la couche de forme (CDF) et les assises (couche de fondation et couche de base). Les techniques du traitement de sol permettent de conférer à des matériaux qui ne seraient même pas utilisables en remblai, des performances largement supérieures à celles des matériaux granulaires naturels traditionnellement réservés à la réalisation des couches de forme. Cette élévation des performances constitue une optimisation du dimensionnement du projet. L'intérêt porte sur la manière dont le traitement de sol va influencer sur le dimensionnement de chaussée, dont il change les paramètres de calcul [2]. La technique de traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques se développe pour trois raisons:

- À l'amélioration de la qualité du traitement des sols fins obtenue par des engins plus efficaces et des procédures de mise en œuvre plus rigoureuses;

- À la raréfaction des matériaux granulaires issus des carrières ainsi que la difficulté d'ouvrir des emprunts hors de l'emprise du chantier, en raison de l'hostilité croissante de l'opinion face aux nuisances. Ces raisons incitent à la réutilisation des sols, même s'il faut remédier à leur qualité médiocre par un dosage plus élevé en liants;
- À des raisons économiques. À titre d'exemple, une plate-forme commerciale ou industrielle construite en Ile-de-France avec des matériaux granulaires, coûte 40% plus cher qu'une plate-forme en sols traités. [3]

Dans cette étude, on utilise le ciment et la chaux pour traiter d'un sol argileux (schiste) de la wilaya de Jijel:

Pour atteindre le but visé, le travail sera divisé en quatre chapitres y compris une introduction générale et une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous présentons tout d'abord les différents types des sols argileux et de leurs caractéristiques tel que: la texture, principales types d'argiles, porosité et distribution de taille de pores, la nature minéralogique des argiles, composition chimique, teneur et potentiel de l'eau, rétention de l'eau dans le sol.

Au deuxième chapitre, nous présentons un rappel sur les constituants de la chaussée et rôle des couches (propriétés et dimensionnement, paramètres géotechniques des sols et le compactage), les techniques de traitement (les produits de traitements, la chaux et les liants hydrauliques, effet des produits de traitement à court et à long terme, formulations et étapes de traitement du sol, teneur en ciment et à la chaux, stabilisation mixte chaux-ciment, classement mécanique de la couche de forme(CDF) traitée)

Les propriétés physiques et mécaniques du sol avant et après traitement seront présentées au troisième chapitre, ainsi ces propriétés sont déterminées par des essais effectués au laboratoire LTPE et au laboratoire de département génie civil dans notre université.

Dans le quatrième et dernier chapitre, on présente les résultats obtenus et les éventuelles interprétations. Et en fin nous terminerons cette étude par une conclusion générale et des recommandations.

Chapitre I:
Les sols argileux

Chapitre I: Les sols argileux

I.1. Introduction:

La géotechnique fait appel aux techniques du génie civil, qu'elle applique à l'étude du sol et de la roche, c'est-à-dire aux matériaux naturels qui constituent l'écorce terrestre. Pour l'ingénieur, le sol se définit comme un agrégat peu compact, composé de minéraux, de matières organiques et de sédiments que l'on retrouve au-dessus du substrat rocheux. Les sols peuvent être fractionnés assez facilement en particules organiques ou minérales, contrairement à la roche, dont les grains minéraux sont retenus par une force cohésive et moléculaire très importante [1]. Dans tous les projets de construction, une campagne de reconnaissance géotechnique est nécessaire. Elle a pour but d'étudier la structure géologique du sol (nature des matériaux du sol, profondeur des couches, niveau de la nappe phréatique...), et de déterminer certains paramètres décrivant le comportement du sol (contrainte du sol, la déformabilité,...); ces paramètres servent à la conception et au calcul des ouvrages géotechniques. [4]

A la base des essais au laboratoire et in situ, une classification du sol étudié est faite en vue de l'identifier en le classant dans une catégorie des sols à propriétés physiques similaires. La classification des sols se fait en général à partir des essais d'identification au laboratoire, tels que l'analyse granulométrique, la limite de plasticité, la limite de liquidité et l'analyse de la teneur en matières organiques. A partir des essais in situ, il existe aussi des systèmes de classification des sols, mais qui sont moins précis que ceux basés sur les essais au laboratoire. [5]

I.2. Généralités sur les sols:

I.2.1. Définition:

Un sol est constitué par un agrégat naturel de grains minéraux pouvant être séparés par des actions mécaniques légères (trituration ou agitation sous l'eau...), bien qu'il soit un matériau meuble, poreux, non homogène situé à proximité de la surface de la terre. De plus, les sols des roches qui peuvent être définies comme des agglomérats de grains minéraux liés par des forces de cohésion fortes et permanentes; le sol constitue un matériau de base utilisé en génie civil, il sert de:

- Support pour les ouvrages: toutes les structures réalisées transmettent leurs charges au sol de fondation par l'intermédiaire de fondations superficielles ou profondes.

- Matériau de construction: exploité en carrière ou dragué en rivière, utilisé pour la fabrication des bétons (granulats), et dans les couches du corps de chaussée, la réalisation des digues et des barrages,...etc. [6]

I.2.2. Différents types des sols:

Le sol est un milieu tri-phasique qui se compose de:

- Grains solides formant le squelette du sol;
- La phase liquide composée de l'eau industrielle, si l'eau occupe tous les vides du sol, on dit qu'il est saturé;
- La phase gazeuse composée de l'air et éventuellement de l'eau évaporée.

Il existe en pratique deux catégories du sol, tel que:

- Sols pulvérulents: regroupent des sables, des graviers, des cailloux et des mélanges de ces matériaux tels que le sable graveleux; couramment ces sols sont caractérisés par une grande perméabilité, et l'absence d'une adhérence entre ses grains.
- Sols purement cohérents: regroupent des sols fins saturés tels que l'argile, la marne et des mélanges de ces matériaux tels que la marne argileuse. Ces sols sont caractérisés par une faible perméabilité et la présence d'une force cohérence entre ses particules.

En pratique, le sol peut contenir une de ces catégories, comme il peut les englober simultanément, sous forme de matériaux ayant des caractéristiques intermédiaires comme, à titre d'exemple, le limon (silt), l'argile sableuse ou le limon argileux. Dans un sol pulvérulent, les forces prédominantes entre les grains sont celles du poids; leur comportement dépend essentiellement de son état de densité. Le minéral constituant principalement ce sol est le quartz (silice). Ce sol est aussi appelé granulaire, car il est constitué des grains relativement gros (plus de 80 μm de dimension). Le contact entre les grains est direct, et le squelette du sol est formé ainsi d'un empilement de grains. Les forces de frottement entre les grains, qui peuvent être mobilisée lors d'un chargement du sol caractérisent la résistance au cisaillement de ce sol. En général, ce sol retient peu l'eau interstitielle libre, celle-ci pouvant circuler librement entre les grains. Les forces d'attraction (ou de tension) capillaire sont négligeables devant les forces de poids de grains, mais pour un sable saturé, les forces capillaires lui confèrent une certaine cohésion entre les grains, dite cohésion capillaire, et permettent à un volume de ce sol de se tenir seul. Ceci peut se constater dans certains talus sableux humides dans des plages, ayant une grande hauteur et un angle de talus presque droit.

Dans un sol purement cohérentes forces d'attraction capillaires entre les grains sont prédominantes à cause de la valeur importante des surfaces de grains. On définit la surface spécifique comme étant la somme des surfaces de grains contenus dans un gramme de sol. Plus un sol est fin plus la surface spécifique est grande. On rappelle que la force de tension capillaire est proportionnelle à la surface du grain. C'est cette attraction capillaire qui explique en partie la propriété de cohésion dont est doué un sol argileux. Certains matériaux de sol comme la montmorillonite ont tendance à absorber de l'eau et par conséquent gonfler. Dans le cas d'une diminution de l'eau, l'argile manifeste un retrait, c'est-à-dire que son volume diminue. La cohésion de l'argile fait qu'un volume donné de ce sol a une forme propre, contrairement au sable sec qui prend la forme du récipient qui le contient. La plasticité de l'argile est constatée en soumettant au matériau argileux un chargement, le volume déformé ne revenant pas à son état initial après déchargement. La trace d'un piéton sur la surface d'un terrain argileux humide est un exemple concret de la plasticité des argiles. Les argiles souvent rencontrées sont la montmorillonite, la calcite, l'illite et la kaolinite. La marne est une argile compacte de couleur grise en général, contenant un pourcentage de calcaire.

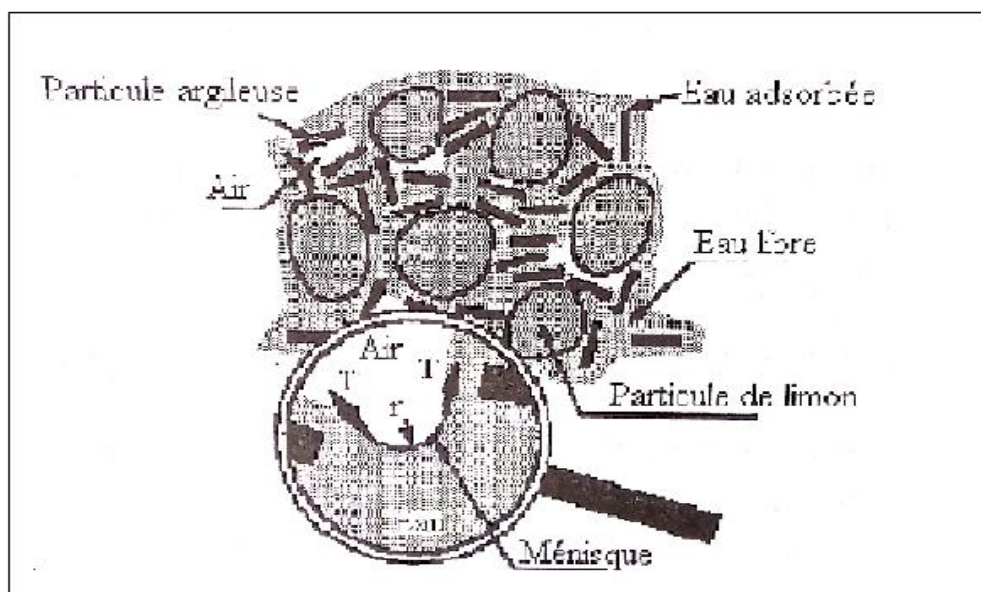


Figure (I, 01): Schéma microscopique d'un sol argilo-limoneux.

L'étude des propriétés des argiles est beaucoup plus complexe que celle des sols pulvérulents, car elles dépendent de la structure chimique du minéral argileux. L'argile est en fait constituée des silicates d'alumine hydratés associés à un ou plusieurs cations, comme le calcium, le sodium, le magnésium et le fer. Le comportement des argiles dépend essentiellement de la présence de ces

cations. Les silicates forment un empilement de feuillets chargés électriquement et tendant à se neutraliser en attirant des ions. La figure (I, 01) montre la formation d'une pellicule d'eau autour du grain argileux, elle dite eau adsorbée qui a un comportement visqueux solide. Cette couche confère au sol argileux un comportement visqueux et peut contribuer au fluage, c'est-à-dire à l'évolution de la déformation à long terme sous des contraintes constantes dans le temps. [5]

I.2.3. Classification des sols:

La classification géotechnique des sols a pour but de ranger les sols par catégories présentant des caractéristiques géotechniques voisines. Il existe plusieurs classifications géotechniques utilisant différents paramètres et caractéristiques distinctes. Deux sols peuvent être les mêmes d'un point de vue géologique mais différents selon leurs caractéristiques géotechniques et aussi selon la classification choisie. La figure (I, 02) présente des sols argileux de différentes origines mais qui n'ont pas la même considération géotechnique: la limite de liquidité et l'indice de plasticité varient considérablement d'une argile à une autre.

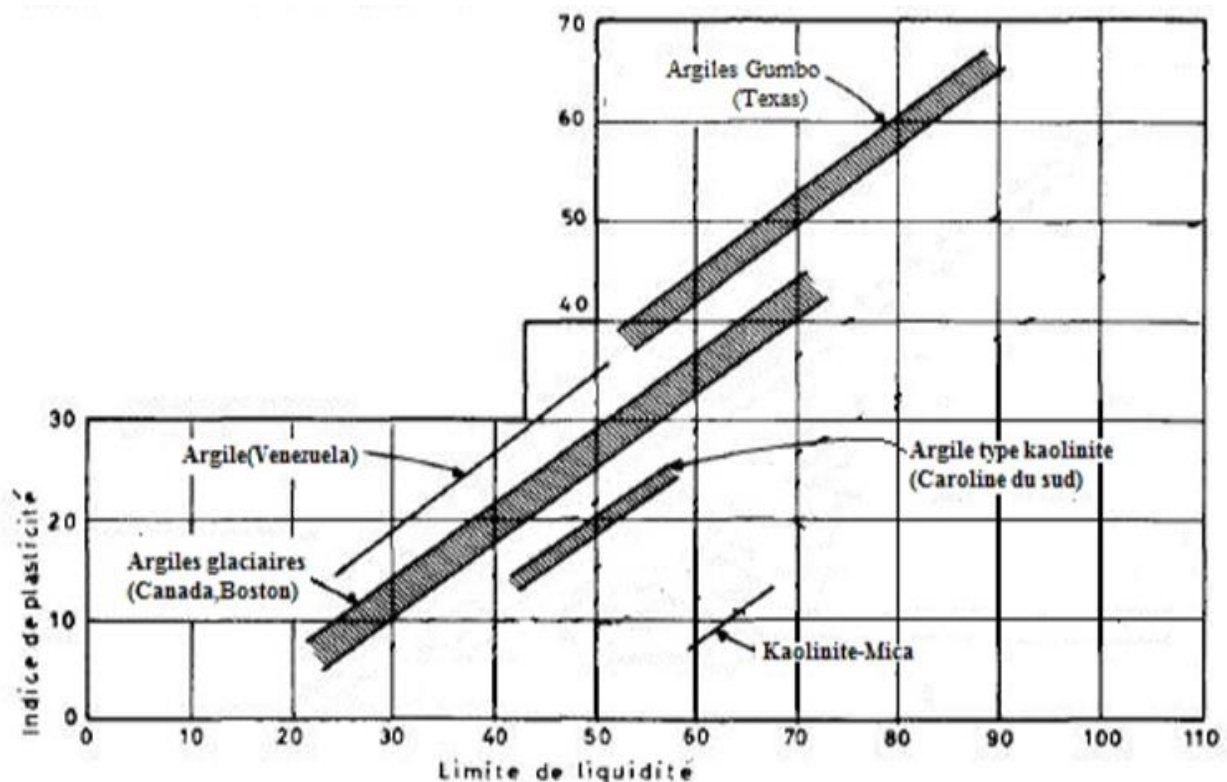


Figure (I, 02): Relation entre la limite de liquidité et l'indice de plasticité pour des sols caractéristiques.

Les résultats d'essai in-situ (Pressiomètre et pénétrömètre) permettent aussi de classer le sol évolutif en fonction de la pression limite et de la résistance à la pointe.

Tableau (I, 01): Classification des sols selon leurs propriétés mécaniques.

Classe de sol	Pressiomètre P_1 (Mpa)	Pénétromètre Q_c (Mpa)
Argiles et limons		
A-Argiles et limons mous	<0,7	<3,0
B-Argiles et limons fermes	1,2 à 2,0	3,0 à 6,0
C-Argiles très fermes à dures	>2,5	>6,0
Sables et graves		
A-Lâches	< 0,5	<5
B-Moyennement compacts	1,0 à 2,0	8 à 15
C-Compacts	>2,5	>20
Marnes		
A-Tendres marno-calcaires	1,5 à 4	-
B-Fragmentées	>4,5	-

Les classifications des sols existant sont le triangle de texture de Taylor, la classification du Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées(L.C.P.C), le Guide de Travaux Routiers (G.T.R).....

La classification L.C.P.C est basée soit sur les résultats classiques d'essais de laboratoire (granulométrie, limites d'Atterberg), ou l'appréciation visuelle et des tests simples sur le chantier. Il faut avoir une grande expérience pour employer correctement la méthode rapide ou méthode de chantier. Pour particulièrement les sols évolutifs (fins) deux étapes indissociables sont à observer au laboratoire:

La première subdivision (analyse granulométrique), ou les sols sont classés selon la proportion massique des grains inférieurs ou supérieurs à 0,08mm.

-Les sols grenus: lorsque plus de 50 % des éléments > 0,08mm.

-Les sols fins: quand plus de 50 % des éléments < 0,08mm.

On peut classer les sols par l'utilisation de la courbe de Casagrande (utilisation des résultats des limites d'Atterberg).

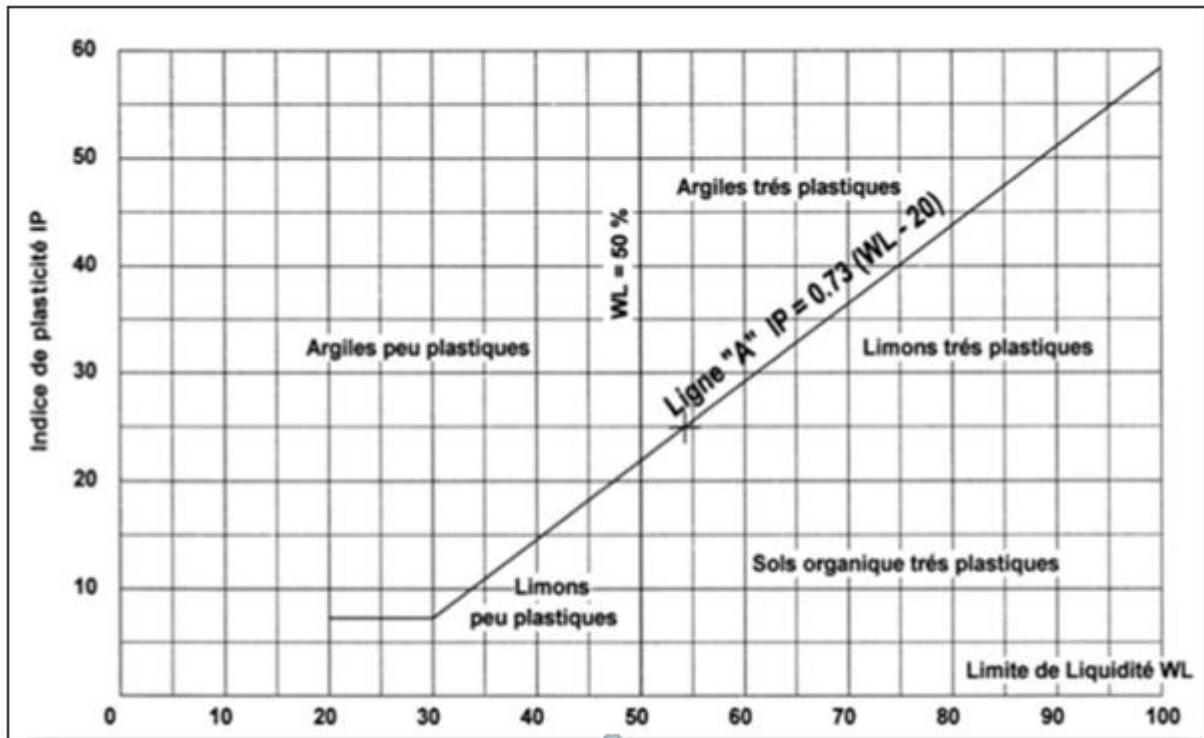


Figure (I, 03): Diagramme de plasticité de Casagrande.

La classification des sols selon le contenu en matière organique (MO) se fait comme suit:

- Pour $MO < 3\%$, la matière organique n'a pas d'influence sur le sol.
- Pour $3 < MO < 10\%$, le sol est faiblement organique.
- Pour $MO > 10\%$, il est considéré comme un sol organique. [7]

I.3. Les argiles:

I.3.1. Origine des argiles:

Les argiles résultent de la désagrégation en surface de roches silicatées très répandues dans la couche terrestre comme le granit, le gneiss ou les schistes. Ils sont transportés par l'eau et déposés. Certains dépôts se transforment par diagenèse (déshydratation et compactage), et forment des roches argileuses compactes et des schistes. Les sédiments argileux ayant subi une métamorphose sont souvent structurés en couches minces en raison de la présence de phyllosilicates. Ces derniers sont des minéraux argileux (les micas par exemple) dont la dimension des feuillets peut atteindre $5\mu\text{m}$, donc une taille supérieure à celle des argiles au sens strict. Ces phyllosilicates confèrent aux roches argileuses la structure litée typique des schistes. La dissolution du calcaire donne également naissance à des dépôts argileux. L'activité végétale produit également des argiles, jusqu'à 30 kg par an et par hectare.

I.3.2. Définition géotechnique des argiles:

Du point de vue du géotechnicien, les argiles désignent la fraction des particules du sol dont la taille est inférieure à 4 μ m. Les particules d'une taille inférieure de 2 μ m ne sont plus visibles avec un microscope optique. Il faut alors recourir à la sédimentométrie pour pouvoir de déterminer la quantité de particules contenues dans un sol et déterminer la nature à l'aide des méthodes basées sur la diffraction des rayons X (DRX). En effet, la nature des argiles ont une grande incidence sur les propriétés mécaniques des sols, en particulier sur leur comportement avec l'eau.

Les argiles constituent la fraction la plus fine des sols. A l'opposé, la fraction la plus grossière des sols est appelée «squelette» qui comprend des pierres et des blocs. Entre ces deux extrêmes, on trouve la fraction des limons ou silts, des sables et des graviers. La définition géotechnique des argiles est liée aux caractéristiques chimiques de ceux-ci. Les argiles sont des minéraux des phyllosilicates, ils se distinguent par une structure en feuillets formés de cristaux en arrangement octaédrique (O) ou tétraédriques (T) capable d'intégrer des cations hydratés (Ca, Na, Fe, Al,...etc.) dans les espaces inter foliaire. Le critère de classement des argiles est basé sur la forme de succession des couches dans les feuillets. Il y'a trois grandes classes: les feuillets TO, TOT et TOTO. Dans la pratique, on utilise très souvent le terme générique de «fines». Il s'agit alors des argiles telles qu'elles sont définies plus haut et des limons. Les normes européennes définissent les fines comme le pourcentage (massique) des passants au tamis de 0,063 mm. [8]

I.3.3. Minéralogie des argiles:

Les minéraux argileux sont de très petites particules très actives sur le plan électrochimique. Lorsque le pourcentage d'argile augmente, l'influence de la portion argileuse sur le comportement global du sol augmente proportionnellement [9]. Selon le climat, l'origine des minéraux est variable:

- Héritage: à partir de la roche-mère;
- Transformation: à partir d'autres minéraux argileux;
- Néof ormation: formés à partir des ions transportés par l'eau du sol.

La nature de la roche-mère joue un rôle:

- L'altération d'une roche acide, comme le granite, donne plutôt de la kaolinite;
- L'altération d'une roche basique, comme le basalte, donne plutôt des smectites.

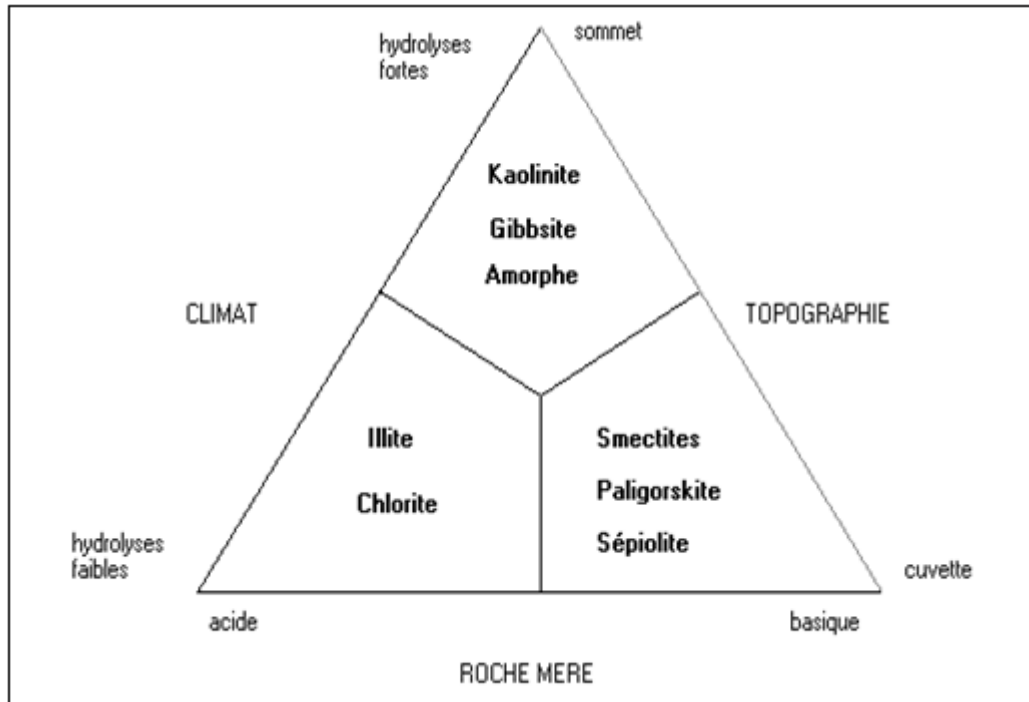


Figure (I, 04): Types de phyllosilicates formés au cours de l'altération.

La topographie, qui commande le drainage, intervient également:

- Sur une pente, où le drainage et le lessivage sont bons, la formation de kaolinite est favorisée;
- Dans une cuvette, milieu confiné où se concentrent les solutions, se forment plutôt des smectites.

Tableau (I, 02): Occurrence des minéraux argileux dans le sol en fonction du climat. [10]

Climat	Végétation et sol	Origine des argiles	Minéraux fréquents
Glaciaire	Toundra	héritage	Illite ; chlorite
Boréal tempère	Tagia et foret podzol et sols bruns	Transformation héritage	Vermiculite, interstratifiés illite, chlorite, Smectites
Méditerranéen subtropical	Steppes, savane FerSiAlitique	Transformation néoformation héritage	Smectites
désertique	néant	héritage	illite, chlorite
équatorial	Foret ferralitique	néoformation	Gibbsite, kaolinite

I.3.3.2. Texture d'une argile:

Tout comme la structure cristalline des argiles, la texture est un paramètre important car il conditionne les propriétés physiques du minéral. La texture concerne l'assemblage des minéraux (argileux ou pas) sous forme d'agrégats ainsi que l'arrangement ou la distribution spatiale de ces agrégats. Aubouin et al définissent la texture comme «la forme, la dimension et la disposition d'un certain nombre de minéraux naturellement groupés en une population au sein de la roche».

Cette organisation peut faire l'objet de différentes classifications. Ces classifications sont valables pour les sols argileux. Gens et Alonso ont été établis une classification pour les sols gonflants, à partir des travaux de Collins et McGown. Cette classification se base sur l'organisation des particules élémentaires argileuses:

- Texture «matricielle» figure (I, 05), texture dont la base est une pâte homogène avec les particules élémentaires disséminées dans cette pâte. Cette texture est une caractéristique des sols naturels ou des sols compactés du côté humide de l'optimum Proctor.
- Texture «agrégée» ou «compactée» figure (I, 06), texture compactée avec les particules élémentaires assemblées sous forme de mottes ou d'agrégats. Cette texture est une caractéristique des sols compactés, du côté sec de l'optimum Proctor.

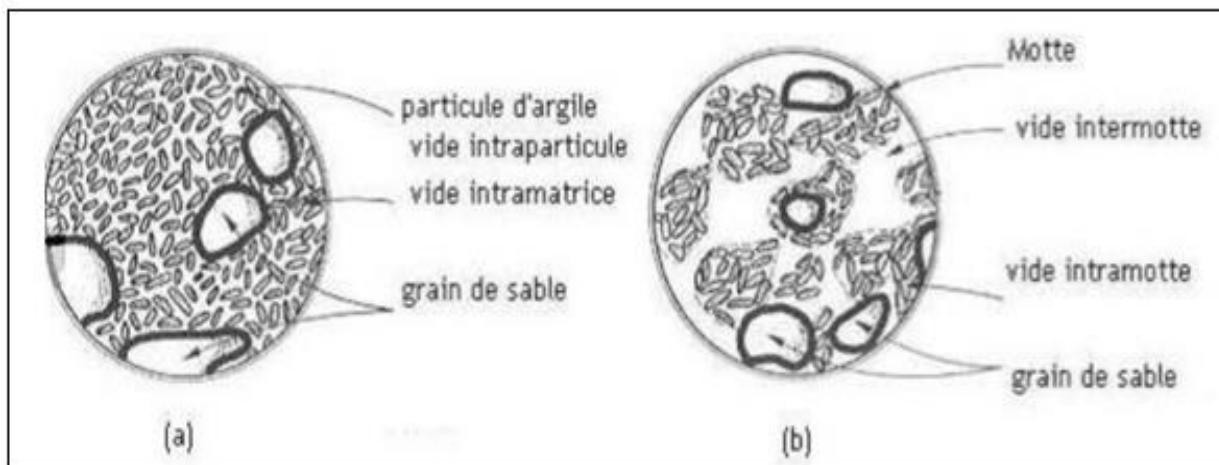


Figure (I, 05): Texture des sols gonflants.

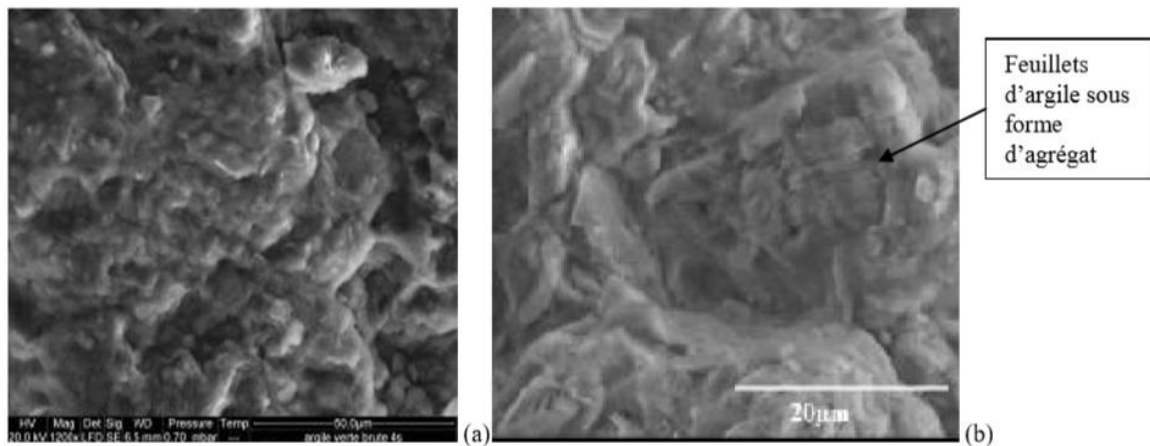


Figure (I, 06): Photographies MEB de texture matricielle (a: Argile Verte de Romainville) et texture agrégée (b: Argile de Bavent).

Il est rare de rencontrer des sols argileux composés uniquement d'argile, et au sein même de la fraction argileuse, plusieurs types d'argiles peuvent coexister. La texture des sols argileux peut varier fortement en fonction du type de minéraux argileux, du mode de sédimentation et de l'état de consolidation. Une roche argileuse qui présente une organisation serrée et orientée des particules d'argiles n'a pas le même gonflement qu'un sol argileux dont la sédimentation a été rapide et récente et pour lequel la distance entre les plaquettes est maximale. Cette organisation des minéraux argileux est la principale cause du gonflement anisotrope. La texture des matériaux argileux se superpose donc aux organisations des autres minéraux non argileux. Cette hétérogénéité rend la structure et la texture extrêmement complexes, surtout lorsque les minéraux argileux sont cimentés par d'autres minéraux carbonatés. [11]

I.3.4. Structure des argiles:

Les argiles s'organisent par des structures en feuillets:

- Empilement de minéraux d'oxyde de silicium (cristaux tétraédriques ou octaédriques) en feuillets entrecoupés par des espaces. Souvent, l'atome de silicium est remplacé par Al (tétraédrique) ou Al, Fe, Mg, Li (octaédriques).
- Charges négatives à la surface (généralement en raison de l'incorporation d'hydroxyles OH^-).
- Les charges négatives sont compensées par l'incorporation de cations dans les espaces entre les couches.

L'illustration ci-après montre la structure d'une montmorillonite (droite et gauche), avec l'alternance des couches T et O, ici une séquence TOT avec l'adsorption d'eau dans l'espace interfoliaire (en vert). La macroscopie du milieu représente un empilement de kaolinite qui est

beaucoup moins réactive avec l'eau, c'est pourquoi elle est utilisée pour fabriquer la porcelaine. La montmorillonite, qui peut absorber énormément d'eau, serait inapte à la fabrication de poterie ou de porcelaine en raison du retrait lors de la cuisson.

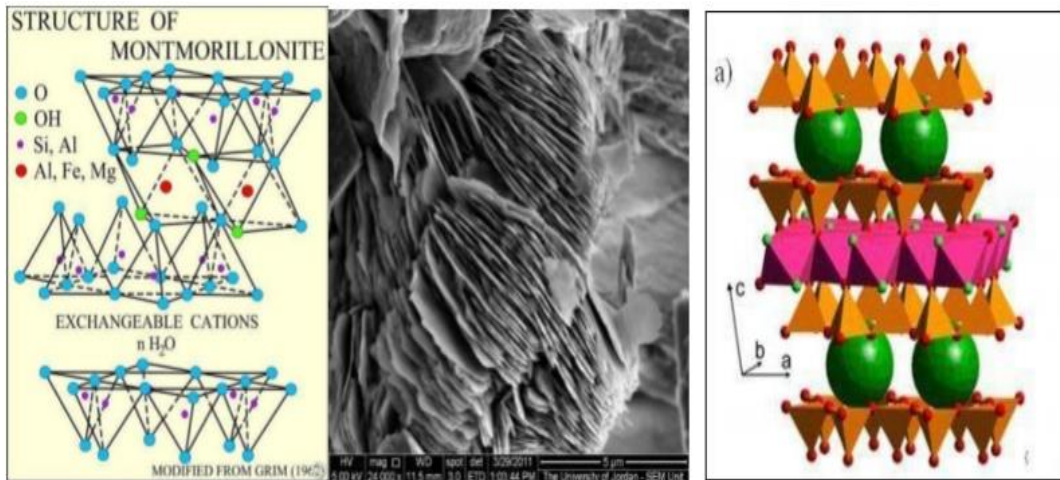


Figure (I, 07): Structure des argiles. [8]

I.3.5. Principales familles d'argile:

Les types d'argiles fréquents sont: la kaolinite, lamontmorillonite et l'illite.

I.3.5.1. Les Kaolinites:

Le feuillet de kaolinite résulte de la liaison d'un feuillet tétraédrique avec un feuillet octaédrique, la liaison se faisant par les atomes d'oxygène.

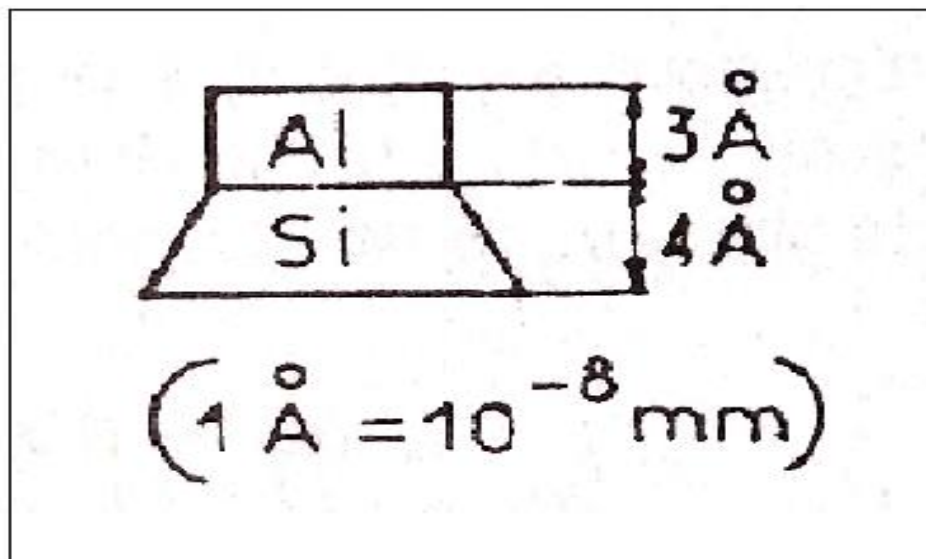


Figure (I, 08): Feuillet de kaolinite.

La particule de kaolinite est formée d'un empilement de ces feuillets, les liaisons entre ces

feuilletés étant du type «liaison hydrogène», donc des liaisons faibles. Aux extrémités, la particule est chargée électriquement, car les feuilletés ne sont pas tous identiques.

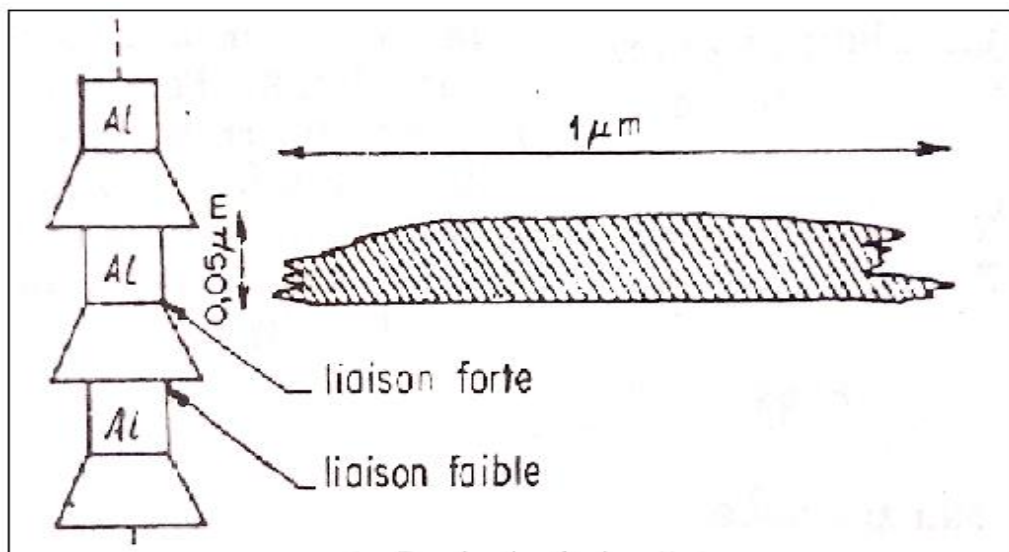


Figure (I, 09): Particule de kaolinite.

I.3.5.2. Montmorillonite:

La particule de montmorillonite résulte de l'empilement des feuilletés élémentaires suivants:

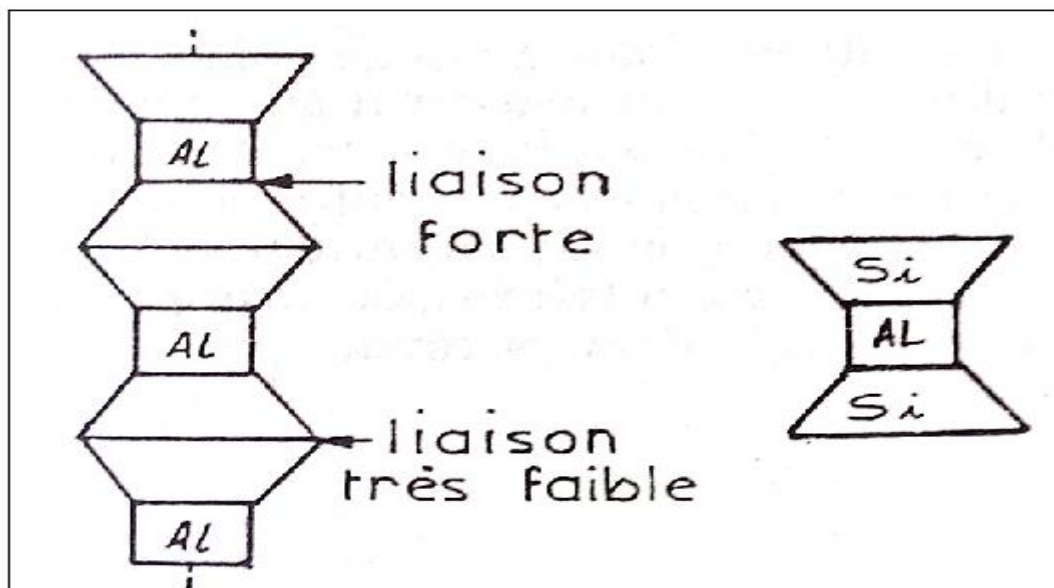


Figure (I, 10): La liaison entre les particules de montmorillonite.

La liaison entre deux feuilletés est une liaison de type hydrogène, maîtres faibles de telle sorte que des molécules d'eau peuvent s'installer entre les feuilletés. Il peut y avoir jusqu'à cinq à six couches de molécules d'eau. Ainsi, les sols dont la teneur en montmorillonite est élevée sont

susceptibles de gonflement ou de retrait importants suivant les variations de la teneur en eau. Par suite de la faiblesse de la liaison, les particules de montmorillonite ont des dimensions très faibles:

- Diamètre: 0,05 μm ;
- Epaisseur: 1/400 du diamètre.

Ces particules sont également chargées électriquement à leurs extrémités.

I.3.5.3. L'illite:

Cette argile a une structure analogue à la montmorillonite mais des ions potassium sont intercalés entre les feuillets tétraédriques. Grâce à ces ions la liaison est relativement forte et les molécules d'eau ne peuvent pratiquement plus s'intercaler. L'atome d'aluminium du feuillet octaédrique qui se trouve sous forme d'un Al^{+3} peut être remplacé par d'autres ions comme Mg^{+2} principalement dans la montmorillonite et dans l'illite. Il en résulte un déséquilibre électrique qui est compensé par l'adsorption à la surface de cations Ca^{+2} , Li^{+} , Fe^{+2} . Aux extrémités de la particule d'argiles, y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations. Ces cations dits «échangeables» jouent un rôle important dans le comportement des argiles.

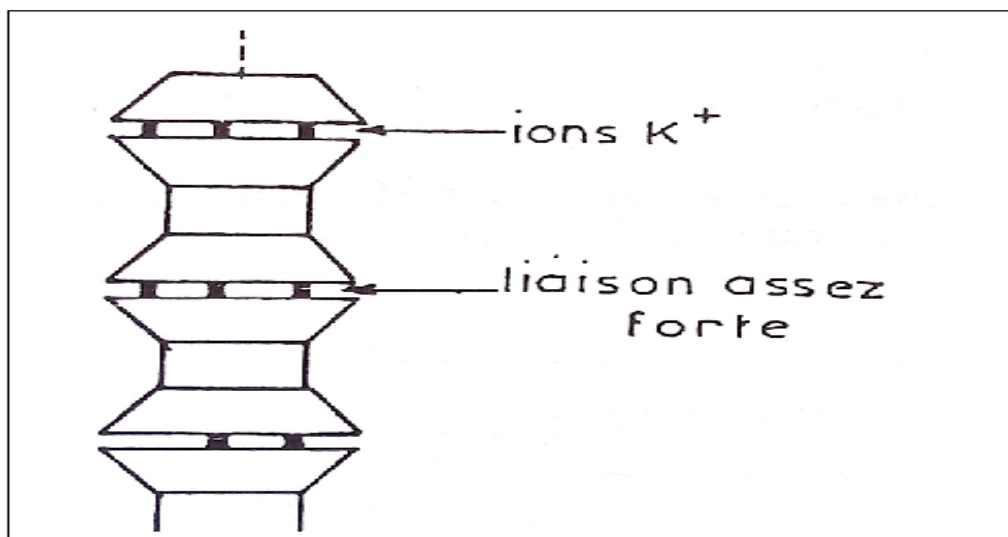


Figure (I, 11): La liaison entre les particules de l'illite. [14]

I.3.6. Propriétés et rôle des minéraux argileux:

Les propriétés bien particulières des minéraux argileux sont dues à la petite taille, la structure en feuillets et la charge négative des particules. Elles forment avec l'eau des solutions colloïdales qui flocculent lorsque les charges de surface des particules sont neutralisées par des ions. Ce phénomène est réversible: les particules retrouvent l'état dispersé lorsque les ions sont éliminés par rinçage. Les argiles fixent l'eau par adsorption à leur surface et augmentent de volume par

gonflement. Elles constituent ainsi une réserve d'eau. L'argile sèche développe une tension de succion importante pour l'eau qui peut s'opposer à celle des racines des plantes. Avec adjonction croissante d'eau, la tension de succion diminue, l'ensemble eau-argile devient plastique, puis visqueux et finalement les particules d'argile se dispersent dans l'eau en formant une solution colloïdale. L'argile imprégnée d'eau qui se dessèche se rétracte et se casse par des fentes de retrait.

Les argiles confèrent au sol sa structure et ses propriétés mécaniques. Elles sont associées aux autres composants et constituent les complexes argilo-humiques (ou organominéral); leur teneur peut atteindre 50%. Elles sont généralement à l'état floclé, généralement par l'action des ions Ca^{+2} et H^+ , ce qui donne au sol ses qualités agronomiques: bonne aération entre les agrégats, retrait modéré à la dessiccation, bonne perméabilité à l'air et l'eau. En revanche, les sols dont les argiles sont dispersées, et non floclées, présentent des caractères défavorables à la culture: mauvais état structural, mauvaise circulation de l'air et de l'eau, retrait important à la dessiccation, forte adhérence aux outils travaillant le sol. Les mêmes inconvénients se retrouvent dans les sols saturés par l'ion sodium, comme dans les polders; leur mise en culture exige au préalable un lessivage du sol par les eaux douces, de façon à éliminer le Na^+ qui est remplacé par l'ion Ca^{+2} fourni sous forme de sulfate (gypse).

Tableau (I. 03): Surface spécifique et la capacité d'échange cationique (CEC) de quelques minéraux argileux. [10]

Minéral	Surface interne (m ² /g)	Surface externe (m ² /g)	Surface totale (m ² /g)	C.E.C (millié- -quivalent /100)
Kaolinite	0	10-30	10-30	5-15
Illite	20-55	80-120	100-175	10-40
Smectites	600-700	80	700-80	80-150
Vermiculite	700	40-70	760	100-150
Chlorite	-	100	100-175	10-40

Les principales caractéristiques des minéraux argileux qui influencent le gonflement sont les suivantes:

I.3.7.1. Densité de charge spécifique:

Deux types de charge existent dans les milieux argileux:

- Une charge permanente ou structurelle liée aux substitutions ioniques (dans la couche tétraédrique ou octaédrique);
- Une charge de surface variable selon le pH du milieu liée aux réactions chimiques, qui se produisent à la surface des minéraux.

La densité de charge spécifique renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux. L'augmentation de la densité de charge spécifique réduit le gonflement ou la pression de gonflement des matériaux argileux. Cette augmentation entraîne l'attraction des ions, ce qui va provoquer une condensation de la double couche, donc une diminution de son épaisseur. Plus cette concentration est élevée, plus la couche est mince ou comprimée, donc induit une diminution de gonflement.

I.3.7.2. Capacité d'échange cationique (CEC):

La capacité d'échange cationique est exprimée en milliéquivalent par 100 grammes d'argiles, et varie dans le même sens que la densité de charge surfacique. Donc, pour les argiles ayant une valeur élevée de CEC, elles ont tendance à peu gonfler, et cela à surfaces spécifiques égales.

I.3.7.3. Surface spécifique:

L'argile est composée de la surface externe comprise entre les particules, et la surface interne correspondant à l'espace interfoliaire. L'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir de gonflement plus important, et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé. [15]

I.4. Problèmes des sols argileux:

En Algérie le gonflement, le glissement et le tassement sont des risques multipliés selon la sismicité de la zone, et aussi de l'activité anthropique.

I.4.1. Tassement des sols:

Il s'agit de la diminution de volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes, argiles) sous l'effet de charges appliquées, et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation.

I.4.2. Glissements de terrain:

Ces mouvements, au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins continu

d'un versant instable de montagne ou de colline. Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites. La masse de matériaux meubles ou rocheux fracturés se détache suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement, qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes visibles ou non, et de formes diverses. [7]

I.4.3. Gonflement des sols argileux:

Ce phénomène est lié au changement d'humidité de certains sols très argileux (Montmorillonites, saponites et autres natronites), ou tourbeux qui sont capables de fixer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse. Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes, et varient en fonction de leur teneur en eau); la variation de volume d'un terrain est consécutive à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle), et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'élément jointifs).

I.4.3.1. Mécanisme du gonflement:

Le gonflement représente l'extension des doubles couches entourant les particules argileuses. Les principaux facteurs régissant le gonflement des argiles peuvent être classés en deux catégories: les facteurs mécaniques et les facteurs physico-chimiques.

a) Facteurs mécaniques du gonflement:

Dans la masse du sol gonflant, sous l'action d'un chargement, certaines particules se trouvent déformées selon deux chemins de déformations: la compression volumétrique des particules solides, souvent négligeables ; la courbure des particules a un effet sur le changement de volume souvent appréciable. L'approche mécanique du gonflement est analogue à l'extension mécanique, et est reliée à l'énergie emmagasinée dans la structure solide dans cette approche l'imbibition par l'eau est attribuée à un gradient hydrostatique induisant un écoulement de l'eau à travers l'échantillon, ce qui provoque une diminution de la succion matricielle et par conséquent un déchargement de la masse du sol.

b) Facteurs physico-chimiques du gonflement:

L'approche physico-chimique est basée sur la théorie de la double couche de Gouy Chapman, cette approche tient compte des forces inter particulaire qui sont fonction de:

- Forces électriques;
- La texture de la surface des particules;
- La composition du fluide interstitiel.

Les effets physico-chimiques sont fonctions des propriétés d'hydratation et de l'absorption des cations. En effet, les particules d'argiles ont une texture de surface qui permet une forte liaison à l'eau. Cette affinité à l'eau est responsable du gonflement du sol. De plus, la surface des particules argileuses possède une charge négative non compensée afin d'assurer une neutralité électrique des charges, les cations sont attirés vers la surface de ces particules, ce qui va conduire à une concentration en cation dans la couche adsorbée (au voisinage des particules), qui est supérieure à celle de l'eau libre du sol. Cette différence dans la concentration ionique conduit à l'apparition d'une succion osmotique, engendrant un écoulement de l'eau de la zone de faible concentration vers la zone à forte concentration. Les cations et les molécules d'eau prennent place entre les particules d'argiles et provoquent l'expansion de la masse du sol. [9]

I.5. Conclusion:

A partir de cette étude bibliographique, nous avons conclu ce qui suit:

- Les argiles sont des phyllosilicates hydrates formés par l'association de feuillets élémentaires, qui s'accolent entre eux pour former des éléments dénommés empilements par certains auteurs, ou cristallites par d'autres l'espace entre deux feuillets est appelé espace interfoliaire.
- Les minéraux argileux sont des substances cristallines qui tirent essentiellement, leurs origines de l'altération chimique de certains minéraux composant les matériaux parents. La famille des minéraux argileux regroupe tous les silicates hydratés appartenant au groupe des phyllosilicates.
- Les minéraux argileux se caractérisent par quatre propriétés principales: formes et surfaces spécifiques, la densité de charge spécifique, la capacité d'échange cationique (CEC), la densité de charge spécifique.

Chapitre II:
Technique de traitement des
sols

Chapitre II: Technique de traitement des sols

II.1. Introduction:

Les techniques du traitement de sol permettent de conférer à des matériaux qui ne seraient même pas utilisables en remblai, des performances largement supérieures à celles des matériaux granulaires naturels traditionnellement réservés à la réalisation des couches de forme. Cette élévation des performances constitue une optimisation du dimensionnement du projet.

II.2. Contexte général de l'étude:

II.2.1. Constituants de la chaussée et rôle des couches:

La chaussée est une structure multicouche mise en œuvre sur une trémie support de sol terrasse. Elle supporte plusieurs types de sollicitations: répartition de la contrainte des charges verticales (référence: essieu standard de 130KN), sollicitations tangentielles dues au passage des véhicules (mouvement entraînant des efforts horizontaux), sollicitations climatiques (eaux infiltrées, gel). La partie supérieure des terrassements (PST) désigne la zone supérieure des terrains en place, ou rapportés et fait environ 1m d'épaisseur. La plate-forme de la PST est l'arase de terrassement. La couche de forme (CDF) ne fait pas une partie intégrante de la chaussée mais bien de son sol support. Son rôle à court terme est d'assurer la traficabilité et à long terme de garantir un certain niveau de portance. Elle constitue la plateforme support de chaussée.

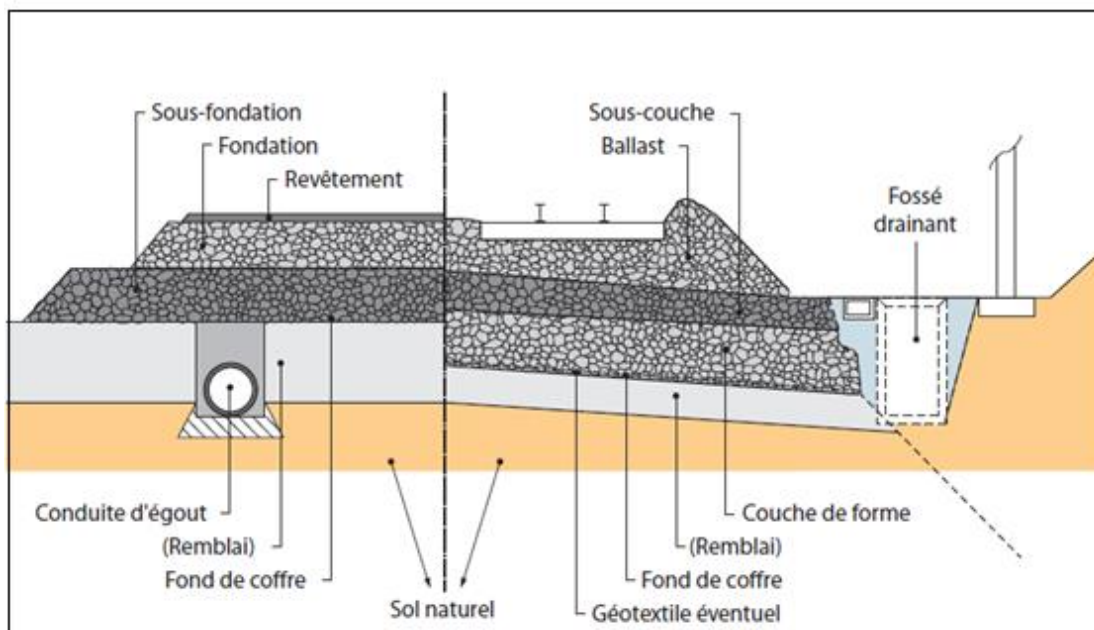


Figure (II, 01) : Schéma de structure de chaussée (et voie ferrée).

Les couches d'assises sont la couche de fondation et la couche de base. Elles apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic. Elles

repartissent les pressions sur le support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles.

La couche de surface est constituée d'une couche de roulement sur laquelle s'exercent directement les agressions du trafic et du climat, et d'une couche de liaison permettant l'accrochage aux couches d'assise. La couche de surface doit garantir le confort et la sécurité des usagers grâce à l'uni, l'adhérence et l'évacuation des eaux de ruissellement. Elle maintient l'intégrité de la structure et protégé les autres couches des infiltrations d'eau par son étanchéité. [2]

II.2.2. Paramètres géotechniques des sols et le compactage:

Le guide GTR classe les matériaux susceptibles d'être utilisés pour la réalisation de remblais ou de couches de forme. Lors de travaux de terrassements, les matériaux naturels sont rencontrés essentiellement sous deux formes : une forme rocheuse, massive, nécessitant une forte énergie pour les désagréger, et une forme meuble, facile à extraire. Cette étude s'intéresse en particulier aux sols meubles pour lesquels la classification GTR a été élaborée.

Cette classification vise en premier lieu à déterminer la nature du sol en fonction de certains paramètres de nature: la granulométrie et l'argilosité figure (II, 02). Pour les sables, les sables argileux et les marnes, l'argilosité est déterminée par la valeur de bleu du sol (NF P 94-068). Pour les sols fins, leur argilosité est mesurée par l'indice de plasticité (NF P 94-051). Dans un deuxième temps, les sols sont ensuite classés selon leur état hydrique, de l'état très sec à l'état très humide. Une fois les sols classés suivant leur nature et leur état hydrique, le GTR fournit les recommandations pour l'utilisation de ces sols en remblais et en couche de forme, suivant les conditions météorologiques rencontrées. Une fois ces recommandations faites et selon la classe de la partie supérieure de terrassement, le GTR préconise notamment une épaisseur de couche de forme, et l'énergie de compactage à apporter suivant les types d'engins envisagés sur le chantier.

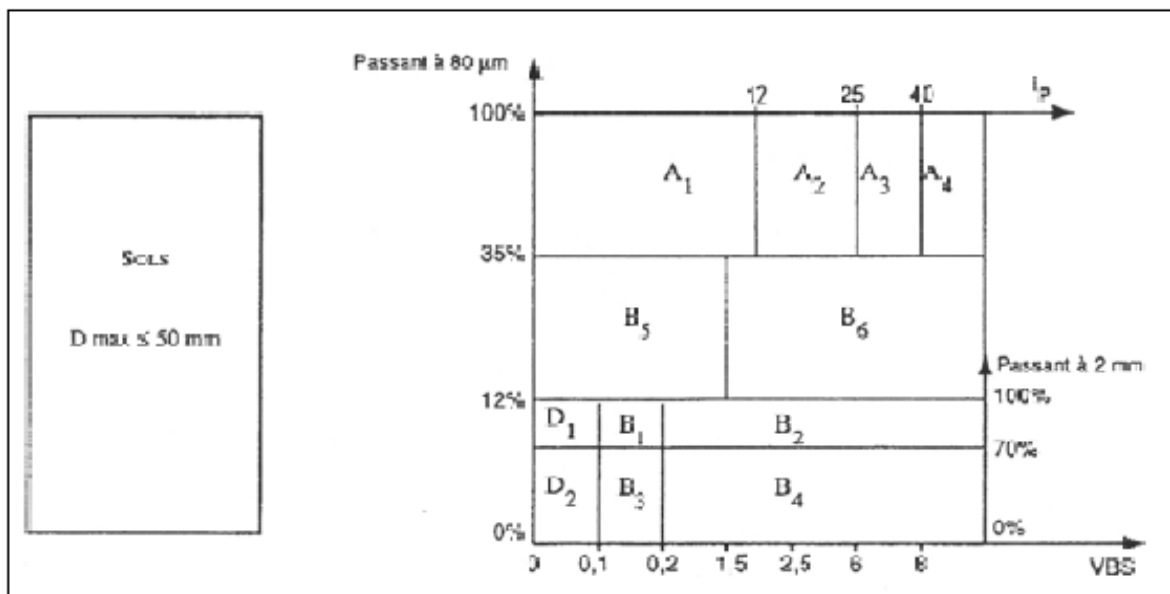


Figure (II, 02) : Classification des matériaux selon leur nature.

Les caractéristiques permettant la classification sont regroupées selon trois catégories: les paramètres de nature, les paramètres de comportement mécanique, et les paramètres d'état. [26]

II.2.2.1. Paramètres de nature:

Ces sont des caractéristiques intrinsèques, et ils ne varient pas ou peu dans le temps.

- **La granulométrie:** La granularité est un paramètre qui permet de distinguer les sols grâce à la dimension de leurs grains. Une première analyse consiste à mesurer la répartition des quantités selon la dimension des grains. Les deux méthodes complémentaires sont le tamisage pour les sols grossiers (ou grenus) selon la Norme NF P 94-056 et la sédimentométrie pour les sols fins selon la Norme NF P 94-057. Il s'agit de mesurer le pourcentage des grains de sol passant au travers d'un tamis donné (passant ou tamisât). L'expression classique de cette analyse est la courbe granulométrique caractérisée par les indices suivants (d_{60} est le diamètre correspondant à un passant de 60 %):
 - Le coefficient d'uniformité (de Hazen): $C_U = d_{60}/d_{10}$ ($C_U < 2$ uniforme, $C_U > 2$ étalée).
 - Le coefficient de courbure: $C_C = d_{30}^2 / d_{60} d_{10}$ (bien gradué si C_C entre 1 et 3).

- **Dmax:** Dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol. Il détermine l'atelier de terrassement (c'est-à-dire le matériel employé), l'épaisseur des couches et les conditions de malaxage. Le seuil retenu est **50mm**, car cela permet de distinguer les sols fins, sableux ou graveleux du sol blocailleux. C'est aussi la valeur limite courante pour le malaxage des sols avec un liant pour une CDF de qualité.

- **Tamisât 80µm:** Pourcentage en fines du sol. Les fines sont sensibles à l'eau, selon leur proportion, elles vont donc influencer le comportement du sol. Seuils retenus (par le GTR):
 - > 35 %: Comportement du sol totalement régi par la fraction fine;
 - < 12 %: Seuil conventionnel pour dire si un sol est pauvre ou riche en fines.

- **Tamisât 2 mm:** Distinction entre sols sableux et sols graveleux, seuil retenu selon GTR:
 - > 70 %: Sol tendance sableuse;
 - < 70 %: Sol tendance graveleuse.

- **L'argilosité:** Couramment, les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol (<400µm), car ce sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance du sol. L'essai consiste donc à faire varier la teneur en eau de cette fraction de sol, et à en observer la consistance. Selon la teneur en eau, le sol se comportera comme un solide, un matériau plastique (capable de se déformer beaucoup sans casser) ou un liquide.

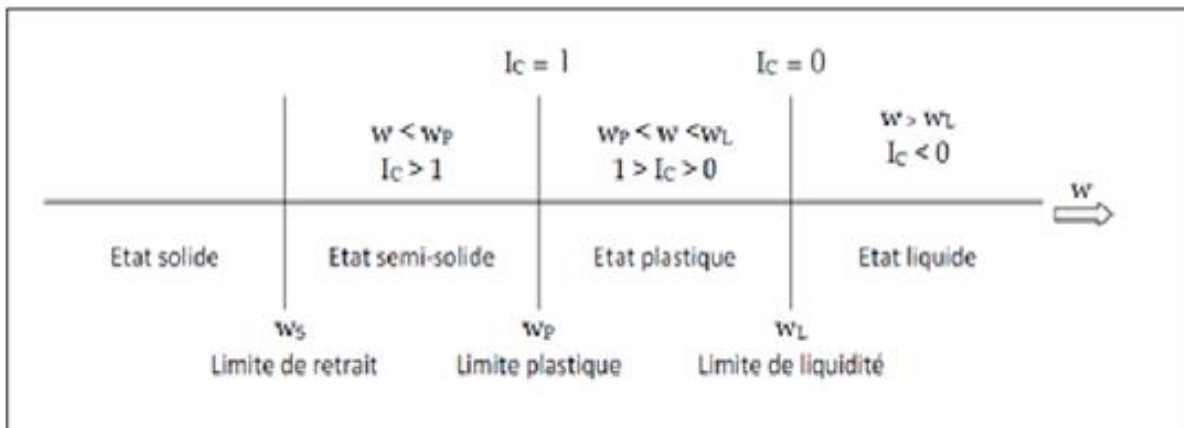


Figure (II, 03): Etats de consistance d'un sol (limites d'Atterberg).

- **L'indice de plasticité IP:** Elle caractérise la largeur de la zone où le sol étudié a un comportement plastique ($I_p = W_L - W_p$).

W_p : La teneur en eau à limite de plasticité du sol (%).

W_L : La teneur eau à limite de liquidité du sol (%), seuil retenus selon GTR:

- 12 %: Limite supérieure des sols faiblement argileux;
- 25 %: Limite supérieure des sols moyennement argileux;
- 40 %: Limite supérieure entre sols argileux et très argileux.

- **La valeur au bleu de méthylène VBS:** Ce paramètre représente l'absorption de la surface spécifique du sol. La VBS s'exprime en g de bleu absorbé pour 100 g du sol. La surface spécifique du sol est déterminée par la surface des particules de la fraction argileuse, une évaluation indirecte de la quantité et de la nature de l'argile contenue dans le sol, seuil retenus selon GTR:

- 0,1: Sol insensible à l'eau;
- 0,2: Apparition d'une légère sensibilité à l'eau (sols sableux);
- 1,5: Distinction sols sablo-limoneux et sols sablo-argileux;
- 2,5: Distinction sols limoneux peu plastique à plasticité moyenne;
- 6: Distinction sols limoneux et sols argileux;
- 8: Distinction sols argileux et sols très argileux.[2]

II.2.2.2. Paramètres de comportement mécanique:

Ces paramètres ne sont pris en considération que pour juger de l'utilisation possible des sols en couche de forme. Ils distinguent les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic et qui de ce fait peuvent être utilisés tels quels dans la construction des couches de forme, de ceux qui risquent de se fragmenter pour se transformer en un sol constitué en majorité d'éléments fins, inutilisable dans son état naturel sans dispositions particulières (traitement...).

Les paramètres de comportement considérés dans la classification sont: les coefficients de Los Angeles (LA) (norme P 18-573) et micro-Deval en présence d'eau (MDE) (norme P 18-572), mesurés sur la fraction granulaire 10/14 et le coefficient de friabilité des sables (FS) mesuré sur la fraction 0/1 ou 0/2 mm (norme P 18-576); seuils retenus:

- 45 pour les valeurs LA et MDE;
- 60 pour les valeurs FS. [18]

II.2.2.3. Paramètres d'état:

L'état hydrique est particulièrement important pour les sols meubles sensibles à l'eau. On distingue cinq états hydriques différents: humide, humidité moyenne, très humide, sec et très sec. Généralement, l'état hydrique d'un matériau permet de définir son classement de PST, car la portance du sol est fortement liée cet état. La présente classification a retenu pour caractériser l'état hydrique d'un sol, l'un ou l'autre des trois paramètres suivants:

- La position de la teneur en eau naturelle (W_n) de la fraction (0/20) mm du matériaux par rapport à l'optimum Proctor normal (W_{opt}). Ce rapport est le paramètre d'état le plus fiable pour caractériser les états sec et très sec, car les difficultés d'obtention de la compacité requise en dépendent directement. Sa signification est en revanche moins claire pour distinguer les états humide et très humide (norme P 94-093).
- La position de la teneur en eau naturelle (W_n) par rapport aux limites d'Atterberg qui s'exprime par l'indice de consistance (I_c) (norme P 94-051). Cette indice permet de caractériser correctement les cinq états précédentes, mais seulement dans le cas des sols fins moyennement et très argileux comportant au moins 80 % à 90 % d'éléments $\leq 400\mu\text{m}$.
- L'indice portant immédiat (IPI), qui exprime la valeur de l'indice CBR immédiat mesuré sans surcharge, ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor normal et à sa teneur en eau naturelle (norme NF P 94-078). [18]

II.3. Compactage des sols:

Le compactage des sols est une technique utilisée en génie civil visant à améliorer la qualité des sols pour la construction. Le compactage d'un sol consiste à faire diminuer son volume par l'application d'un procédé mécanique (force, vibration, combinaison des deux, chocs,...etc). Cette diminution du volume ne se produit que par l'élimination des vides remplis d'air qui existent dans le sol à son état initial. La teneur en eau du sol n'est donc pas modifiée. La diminution du volume implique l'augmentation du poids volumique du sol. Cela permet d'améliorer la résistance, de diminuer de la déformabilité et de réduire de la perméabilité. Il peut ainsi réduire ou éliminer le risque de tassement, également augmenter la stabilité des talus, mais aussi améliorer la capacité portante. Le compactage permet aussi de limiter les variations des volumes indésirables causés, par exemple, par l'action du gel, par le gonflement et par le retrait du sol, ou bien de prévenir la liquéfaction des sols.

L'efficacité du compactage est contrôlée par la densité obtenue qui dépend de la teneur en eau du sol. En effet, la masse volumique sèche du sol augmente avec la teneur en eau jusqu'à un optimum, puis décroît avec l'augmentation de la teneur en eau. Cette valeur optimale est très importante, sur chantier, pour obtenir des sols suffisamment denses. C'est pour cette raison, que dans les années 1930, les principes fondamentaux du compactage des sols ont été donnés par R.Proctor. Il construisait alors des barrages pour l'ancien Bureau de l'Aqueduc de Los Angeles. À partir de ce moment-là, l'essai de compactage s'appelle l'essai Proctor. Le compactage est en fonction de quatre paramètres: la masse volumique du sol sec (ρ_d), la teneur en eau (w), le compactage (énergie et mode), et le type de sol dont l'influence est illustrée par la figure (II, 04). L'effet direct du traitement des sols à la chaux et/ou au liant hydraulique sur l'essai de compactage est de modifier l'optimum Proctor du sol. [24]

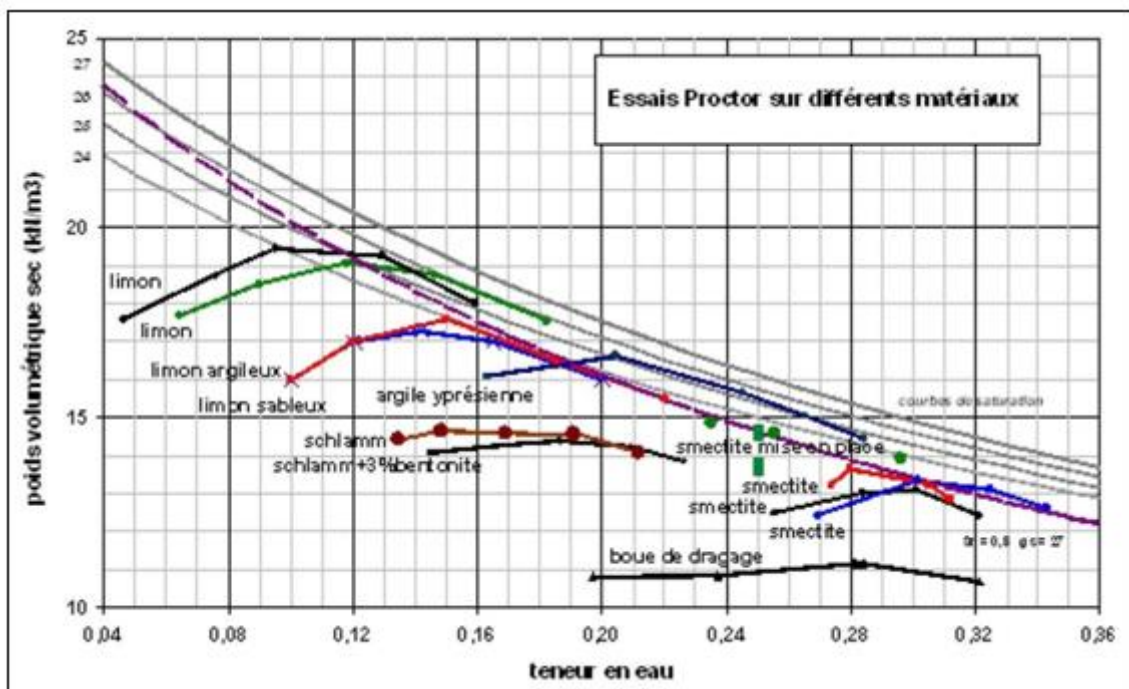


Figure (II, 04) : Exemple de courbe de compactage suivant la nature du sol.

II.4. Indice CBR:

La portance du sol est sa résistance à la rupture déterminée par l'essai CBR ou Californien Bearing Ratio (norme NF P 94-078). Cet essai donne une mesure de la portance relative des sols par rapport à un sol type de référence. Il permet d'observer le comportement du matériau vis-à-vis sa densification ainsi qu'une idée de sa résistance à l'eau. L'indice de portance CBR immergé (ICBR après 4 jours d'immersion), ou l'indice portant immédiat IPI, elle est calculée par le rapport entre la pression d'enfoncement du sol et celle d'un matériau type référencé (en %):

Pression à 2,5 mm d'enfoncement

13.35

Pression à 5 mm d'enfoncement

19.93

C'est la plus grande des deux valeurs qui est retenue, le pouvoir portant du sol est d'autant meilleur que le CBR est grand. L'essai est empirique et ne peut en aucun cas traduire la résistance intrinsèque du sol, mais il est un moyen d'apprécier sa rigidité (résistance au cisaillement). Le CBR immergé se distingue de l'IPI par l'immersion du moule pendant quatre jours. En général, on réalise la mesure de l'IPI avant celle du CBR immergé à cause de l'imbibition du moule. Le rapport $CBR/IPI > 1$ permet de constater que le matériau expérimenté est dit insensible à l'eau, et qu'il y a même une amélioration de ces caractéristiques mécaniques par l'effet d'apport d'eau. Le traitement de sol de la CDF améliore les niveaux de portance (IPI et CBR).

Tableau (II, 01): Indice portant immédiat minimal à obtenir à la mise en œuvre – GTS-

Classe des matériaux	IPI minimal
A ₃ - C ₁ A ₃	10
A ₂ - C ₁ A ₂ - B ₆ - C ₁ B ₆	15
A ₁ - B ₅ - C ₁ A ₁ - C ₁ B ₅	20
Autres classes	À fixer d'après expérience ou étude spécifique

Une valeur de module de Young directement utilisable dans un schéma rationnel de dimensionnement peut être déduite de la valeur retenue du CBR. Plusieurs approches ont été proposées:

- Formule de GEOFFROY et BACHELEZ: $E = 6,5 \text{ CBR}$
- Formule proposé par SHELL: $E = 10 \text{ CBR}$
- Formule retenue par LCPC: $E = 5 \text{ CBR}$

II.5. Module EV₂:

La mesure à la plaque du module EV₂ donne la portance du support, et indique si le compactage est correct. Cela permet de vérifier si les objectifs de performance mécanique prévus sont atteints. L'essai de plaque consiste à mesurer l'enfoncement d'une plaque circulaire de diamètre 60 cm sous l'action d'une charge croissante. Le module de déformation du sol (Bousines; en MPa) est déduit en interprétant la valeur du déplacement vertical (Z en mm), mesuré en fonction de la charge appliquée (en KN). Les charges définies conventionnellement par le LCPC sont de 20 KN pour le premier chargement de plaque et 25 KN pour le deuxième chargement.

EV₂ est le module de déformation du sol à la plaque au second cycle de chargement, EV₁ est le module de déformation du sol au premier chargement.

$$EV_2 = 90 / ZK = EV_2 / EV_1 \leq 2$$

La portance de la couche de forme est déterminée par son module de déformation réversible mesuré avec l'essai de plaque (norme NF P 94-117-1), module EV₂. L'essai de plaque permet d'apprécier directement le module d'un sol par une mesure sur le terrain.

K est le rapport des modules à la plaque de deux chargements successifs pour déterminer si le compactage est suffisant. Le compactage est d'autant meilleur que le rapport EV2/EV1 est faible; en général la spécification conventionnelle admet une valeur du rapport $K < 2$. [2]

II.6. Dimensionnement de la couche de forme:

Le tableau suivant présente le dimensionnement de la couche de forme. [25]

Tableau (II, 02): Dimensionnement de la couche de forme.

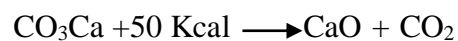
Classe de l'arase	AR1			AR2		
Classe mécanique de la couche de forme traitée	Epaisseur de la couche de forme					
	3		30 cm	40 cm	25 cm	30 cm
	4	30 cm	35 cm	45 cm	30 cm	35 cm
	5	35 cm	50 cm	55 cm	35 cm	45 cm
Classe de plate-forme obtenue	PF 2 $d < 0.8$ mm	PF 3 $d < 0.6$ mm	PF 4 $d < 0.5$ mm		PF 3	PF 4

II.7. Technique de traitement des sols:

II.7.1. Produits de traitement:

Ce sont les chaux aériennes principalement calciques et les liants hydrauliques.

- **La chaux aérienne:** Elle est obtenue par décarbonatation du calcaire ($\text{CO}_3 \text{Ca}$) à une température d'environ 900°C suivant la réaction :



La chaux aérienne peut exister sous trois formes: chaux vive, chaux éteinte, lait de chaux chacune d'entre elles présentant avec les sols des interactions spécifiques.

- **Les liants hydrauliques:** Sont des produits qui, en présence d'eau, s'hydratent en donnant naissance à des espèces cristallines insolubles et résistantes qui agglomèrent les éléments granulaires du sol. Ce phénomène, dénommé couramment «prise hydraulique».

II.7.2. Traitement des sols à la chaux:

II.7.2.1. Définition:

La chaux est un produit naturel et biologique, qui respecte l'environnement, la chaux est une matière, généralement, poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elle est utilisée depuis l'antiquité, notamment dans la construction. Elle trouve une place privilégiée dans le secteur du traitement des sols, et sa qualité a une

influence directe sur l'efficacité du traitement des sols. Certaines propriétés de la chaux présentent des avantages particuliers pour les traitements de sols.

II.7.2.2. Différents types de la chaux:

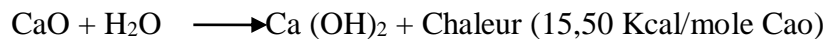
La chaux est obtenue par calcination d'un calcaire (celui-ci représente 20% de la couche terrestre), selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs type de chaux:

- Chaux aérienne provenant d'un calcaire pur: chaux vive, chaux éteinte;
- Chaux magnésienne provenant d'un mélange de calcaire et de carbonate de magnésium;
- Chaux hydraulique provenant d'un calcaire argileux.

Les chaux utilisées en technique routière sont essentiellement les chaux aérienne, elles se présentent sous deux formes:

- Chaux vive: elle est principalement constituée d'oxyde de calcium CaO.
- Chaux éteinte (ou hydraté): elle est principalement constituée d'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂. elle est fabriquée par hydratation (extinction) de la chaux vive. La réaction d'hydratation est une réaction fortement exothermique. [17]

L'extinction de la chaux vive par l'eau entraîne une pulvérisation très fine du produit:



II.7.2.3. Principe et objectifs du traitement:

Elles permettent de mettre en oeuvre et de compacter les sols mouillés qui, normalement, ne pourraient pas être compactés correctement. L'incorporation de la chaux génère immédiatement la formation d'une masse granuleuse, et a pour effet de réduire le taux d'humidité. Ce procédé convient par exemple pour la réalisation de remblais, de talus ou de voies de circulation au chantier.

II.7.2.4. Applications:

La stabilisation du sol à la chaux trouve son application dans la construction de routes et chemins de toutes natures. Elle est effectuée dans la zone supérieure de la couche de base ou de la sous-couche, cette consolidation à la chaux peut être utilisée comme technique de construction pour protéger les routes contre les actions du gel ou du dégel. [21]

II.7.3. Traitement des sols au ciment:

II.7.3.1. Définition:

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite de réaction et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Le ciment agglomère fortement les matériaux inertes incorporés le mélange. [17]

II.7.3.2. Composition chimique:

Le ciment est obtenu par le mélange homogène dans certaines proportions des constituants principaux, et des constituants secondaires avec du sulfate de calcium. La norme européenne NBN EN 197-1 relative au ciment définit les constituants suivants:

- **Constituants principaux** (> 95 % de la somme des constituants principaux et secondaires):
 - Clinker Portland (K);
 - Laitier granulé de haut-fourneau (S);
 - Matériaux pouzzolanique: Pouzzolane naturelle (P), Pouzzolane naturelle calcinée (Q);
 - Cendres volantes: Cendre volante siliceuse (V), Cendre volante calcique (W);
 - Schiste calciné (T);
 - Calcaire (L - LL);
 - Fumée de silice (D);
- **Constituants secondaires** (< 5 % de la somme des constituants principaux et secondaires);
- **Additifs** (< 1 % de la somme des constituants principaux et secondaires);
- **Sulfate de calcium** (l'addition de cette matière a pour objet de réguler le temps de prise du ciment dans certaines limites).

II.7.3.3. Principe et objectifs du traitement:

Le ciment incorporé au sol va se dissoudre et s'hydrater. L'hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres est suivis par une phase de prise. En s'hydratant, les constituants du liant hydraulique enrobent et relient les grains entre eux: c'est la prise hydraulique. Celle-ci conduit assez rapidement et durablement au durcissement du mélange et à sa stabilité à l'eau et au gel. Ce traitement assure l'augmentation de la portance.

II.7.3.4. Différent type de ciment:

Les ciments selon la norme NBN EN 197-1 doivent au moins être désignés par leur type, complété du nombre 32.5, 42.5 ou 52.5 qui désigne la classe de résistance. La classe de résistance à jeune âge est fixée par l'ajout de la lettre N ou R. On distingue cinq types de ciments courants:

- CEM I: Ciment Portland;
- CEM II: Ciment Portland Composé;
- CEM III: Ciment de haut-fourneau;
- CEM IV: Ciment pouzzolanique;
- CEM V: Ciment composé. [22, 23]

II.8. Stabilisation mixte chaux-ciment:

II.8.1. Principe de traitement:

Le traitement mixte consiste en utilisation de deux agents de traitement complémentaires:

- Un traitement préalable à la chaux qui floccule les argiles et assèche les matériaux humides, ce qui facilite l'incorporation du liant hydraulique dans des conditions idéales garantissant une bonne homogénéité du mélange;
- Un traitement au liant hydraulique qui apporte une rigidification rapide.

Les caractéristiques des sols stabilisés par un traitement mixte dépendent de:

- La nature du sol;
- La teneur en eau du sol;
- La présence de certaines substances (détermination de la teneur en matières organiques et autres constituants chimiques particuliers);
- Quantités de la chaux et de liant hydraulique utilisées.

Le délai entre traitement à la chaux et traitement au ciment dépend de l'organisation du chantier. Entout état de cause, la réactivité et la finesse de la chaux vive routière normalisée sont telles qu'on peut enchaîner deux traitements dans la même journée (en respectant une finition intermédiaire). Le traitement mixte d'une sous-fondation (prétraitement à la chaux suivi d'un traitement au ciment). Le sol traité à présent des capacités portantes beaucoup plus élevées que les exigences requises, ainsi qu'une résistance à l'eau et au gel très satisfaisante.

II.8.2. Avantages de stabilisation mixte:

Le prétraitement à la chaux permet de:

- Faciliter la manutention du sol;
- Améliorer les conditions de circulation des engins de chantier (notamment pour l'épandage homogène des liants hydrauliques);
- Réduire la plasticité du sol, ce qui permet de favoriser le malaxage avec le liant hydraulique et d'atteindre la finesse de mouture satisfaisante pour assurer l'homogénéité du mélange final;
- Préserver l'efficacité du liant hydraulique;
- Maîtriser l'humidité du sol.

Avantages du traitement avec des liants hydrauliques routiers (contenant de la chaux vive comme constituant principal):

- Un seul produit sur le chantier;
- Facilités de logistique et de stockage;
- Réduction du nombre d'opérations à effectuer (épandage, malaxage) et pas de période d'attente (entre le traitement à la chaux et le traitement au liant hydraulique);
- Performances proches de celles obtenues avec un traitement séparé chaux-ciment ou chaux-liant hydraulique routier (sans chaux vive comme constituant principal);
- Très adapté aux chantiers de petite et moyenne taille. [17]

Tableau (II, 03): Modalités de traitement envisageables pour les chantiers de faible importance.

Classe des sols	Modalité de traitement
A ₁ , B ₅ C ₁ A ₁ , C ₁ B ₅ C ₂ A ₁ , C ₂ B ₅	1 % CaO + 7 % C _{32,5}
A ₂ , B ₆ C ₁ A ₂ , C ₁ B ₆ C ₂ A ₂ , C ₂ B ₆	1,5 % CaO + 7 % C _{32,5}
A ₃ , C ₁ A ₃ , C ₂ A ₃	2 % CaO + 7 % C _{32,5} ou 6 % CaO
B ₁ , B ₂ , D ₁ C ₁ B ₁ , C ₁ B ₂	6 % C _{32,5} + correcteur éventuel
B ₃ , B ₄ , D ₂ , D ₃ C ₁ B ₃ , C ₁ B ₄ C ₂ B ₃ , C ₂ B ₄	5 % C _{32,5}
Autres matériaux	À définir sur la base d'une étude au premier niveau en minimum

Les modalités proposées dans le tableau (II, 03), prennent en compte un coefficient de sécurité sur les dosages du fait de l'absence d'étude spécifique, sont établies pour des liants normalisés: chaux vive, et ciment de la classe CPJ CEM II/A 32,5 ou CPJ CEM II/B 32,5 (ce ciment est noté C_{32,5} dans le tableau précédente). Les dosages proposés s'entendent rapportés au matériau O/D_{max}, sauf dans le cas du traitement à la chaux seule pour lequel, ce dosage est rapporté à la fraction 0/400) µm. [19]

II.9. Principes d'action des produits de traitement sur les sols:

II.9.1. Action de la chaux aérienne:

II.9.1.1. Actions immédiates:

- a) **Modification de l'état hydrique:** Ces modifications dépendent de la forme (vive, éteinte, lait) sous laquelle la chaux se trouve et de la quantité introduite.
- ✓ La chaux vive: provoque un abaissement de la teneur en eau du sol par l'action combinée des deux phénomènes suivants (hydratation de la chaux vive et apport de matière sèche).
 - ✓ La chaux éteinte: agit également sur la teneur en eau, mais cette fois uniquement par le phénomène d'apport de matière sèche, c'est-à-dire que l'abaissement total n'est plus que de l'ordre de 0, 3 % de teneur en eau par pour-cent de chaux éteinte introduite.

b) Modifications des caractéristiques de la fraction argileuse du sol: Dès son incorporation dans un sol argileux humide, la chaux agit sur les charges électriques des particules fines et modifie les champs électriques inter-particulaires, ce qui entraîne leur floculation. Cette floculation se traduit géo-techniquement par:

- Une élévation importante de la limite de plasticité du sol sans modification concomitante significative de sa limite de liquidité: il y a donc réduction de l'indice de plasticité. Ainsi comme indiqué sur la figure (II, 05), si une certaine quantité de chaux vive est introduite dans un sol argileux dont la teneur en eau naturelle (W_{nat}) se situe dans le domaine plastique, la réduction de l'indice de plasticité qui se produit en concomitance avec celle de la teneur en eau modifie radicalement le comportement du sol. Celui-ci passe brutalement de l'état plastique, c'est-à-dire déformable, collant, à l'état solide, c'est-à-dire rigide, frottant et fragile. Dans cet état, il devient alors facile à travailler (extraire, charger, décharger, circuler, régaler, compacter, ...etc.).
- Une augmentation de la résistance au cisaillement du sol: elle s'opère en même temps que le changement d'état décrit précédemment et se traduit par une élévation de l'IPI dont l'ampleur dépend, toutes choses égales par ailleurs, de l'état hydrique du sol avant traitement. Dans le cas du traitement à la chaux vive limité à la réutilisation de sols trop humides, on constate généralement que l'efficacité du traitement est maximale lorsque l'état hydrique du sol se situe aux alentours de 1,1 à 1,3 W_{OPN} (ou, dans le cas de sols fins, lorsque la W_{nat} est voisine de la W_p). En effet, dans ces conditions d'état, on peut en général réutiliser le sol avec des dosages n'excédant pas 1 %. Si l'humidité dépasse sensiblement ces valeurs, les dosages nécessaires croissent alors rapidement car il faut tout d'abord hydrater une quantité de chaux vive importante pour assécher le sol jusqu'à revenir à l'état hydrique évoqué précédemment. Si, au contraire, l'état hydrique du sol est «moyen» et a fortiori «sec»,

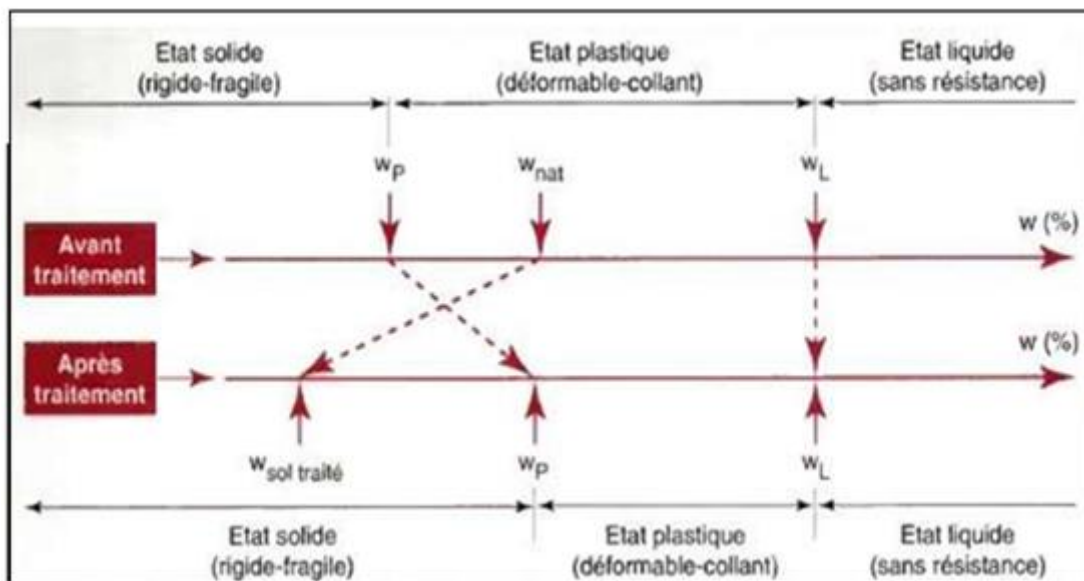


Figure (II, 05): Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de chaux vive.

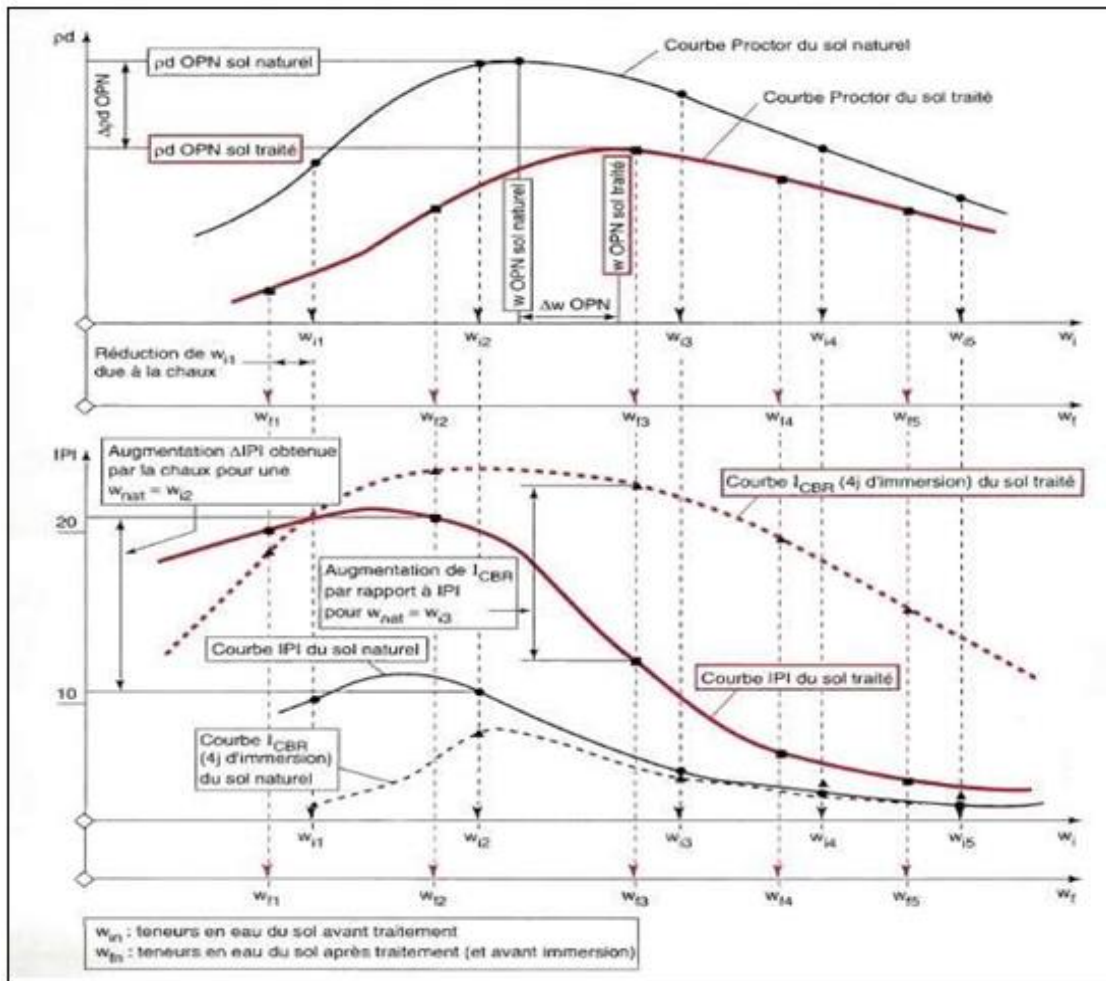


Figure (II, 06): Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage et de résistance au poinçonnement dans le cas d'un sol de classe A2 traité d'2 % de chaux vive.

Situation qui peut se présenter principalement dans le cas du traitement mixte de sols pour utilisation en couche de forme, l'incorporation de chaux vive (mais aussi éteinte) va conduire également à une forte augmentation de l'IPI, comme le montre la figure (II, 05). Cette augmentation de la rigidité devient alors un handicap car elle rend le sol traité beaucoup plus difficile à compacter, et nécessite de prendre des dispositions particulières telles que: arrosage, sur-compactage, traitement au lait de chaux,....etc.

- Une modification des caractéristiques de compactage du sol: comme le montre la figure (II, 06), la courbe «Proctor» du sol traité s'inscrit en dessous, et à droite de celle du sol naturel. Cette tendance s'observe quelle que soit l'énergie de compactage appliquée et est d'autant plus marquée que le sol est argileux. Autrement dit, le traitement à la chaux réduit la valeur maximale de la masse volumique apparente sèche, pouvant être atteinte pour l'énergie de compactage considérée et augmente la valeur de la teneur en eau permettant de l'obtenir.

II.9.1.2. Actions à long terme:

- a) **Action pouzzolanique:** Cette action se produit entre la chaux et les minéraux argileux présents dans le sol, lorsque leur proportion est significative (I_p mesurable ou VBs > 0,5g). On rappelle que le principe de l'action pouzzolanique repose sur la possibilité, en milieu de pH élevé (supérieur à 12), de mise en solution de la silice, de l'alumine, des oxydes de fer présents dans les minéraux argileux sous des formes cristallisées plus ou moins altérées. Ces éléments en solution réagissent ensuite avec la chaux pour former des ferro-silico-aluminates de chaux insolubles, qui précipitent et cristallisent en présence d'eau créant ainsi des liaisons de même nature que celles produites avec les liants hydrauliques. La manifestation de cette action se traduit sur la figure (II, 06), par l'augmentation de l'ICBR après quatre jours d'immersion par rapport à l'IPI pour la teneur en eau du sol traité considérée; son importance dépend, toutes choses égales par ailleurs, de cette teneur en eau. [19]
- b) **Action de syntaxie:** Cette action se produit avec les craies et les calcaires tendres saturés (ou proches de la saturation); son principe peut être décrit simplement de la manière suivante:
- La chaux vive, mélangée à des granulats de matériaux calcaires poreux humides, s'hydrate en provoquant simultanément un abaissement de la teneur en eau libre des granulats et la formation de chaux éteinte;
 - La chaux éteinte, ayant une surface spécifique très élevée, peut se répartir à la surface de chaque granulat, à la manière d'une sorte de «pralinage»;
 - L'abaissement de teneur en eau produit par l'extinction de la chaux vive et par l'évaporation provoque la précipitation, sous forme de calcite, des carbonates présents en solution saturée dans l'eau libre du granulat. Cette calcite obture les pores des grains augmentant ainsi leur résistance.

L'action de syntaxie explique, en particulier, l'intérêt du traitement à la chaux vive des craies humides en vue de leur utilisation en remblai et en PST. Par ailleurs, comme les actions immédiates, elle ne semble pas être significativement influencée par la température du milieu.

II.9.2. Action de ciment:**II.9.2.1. Actions immédiates:**

- a) **Modifications de l'état hydrique:** Les actions immédiates portent principalement sur l'état hydrique du sol, qui subit un assèchement du fait de l'ajout d'une certaine quantité de matière sèche et, dans une moindre mesure, de la perte d'eau consommée dans l'hydratation de ciment. Cet assèchement qui, selon les dosages appliqués, reste théoriquement de l'ordre de 0,3 à 0,5 % de teneur en eau par pour-cent de ciment, ne prend cependant pas en compte, l'évaporation plus ou moins importante pouvant se produire au cours du malaxage sur le chantier.
- b) **Modifications des caractéristiques de la fraction argileuse du sol:** Avec certains ciments spéciaux, il faut également inclure dans les modifications immédiates la

floculation des minéraux argileux, comme cela a été décrit pour la chaux (mais sans être ni aussi rapide, ni aussi intense).

II.9.2.2. Action à long terme:

Elles résultent de la prise hydraulique qui confère aux matériaux traités une résistance en traction qui devient alors prédominante dans leur comportement. La valeur de cette résistance peut être choisie dans un domaine extrêmement large en fonction principalement du liant hydraulique et du dosage retenus. On peut considérer, en simplifiant, que la prise hydraulique se développe en trois étapes, la durée de chacune d’elles dépend de la nature du liant et de la température du mélange.

- La première étape: elle correspond au temps nécessaire à la mise en solution et à la précipitation sous forme de gel des silico-ferro-aluminates de calcium dans l’eau libre du sol. Ce temps qui correspond au «délai de maniabilité» peut varier entre 2 et 24 heures. Ce délai est très important dans les opérations de traitement de sols, car il fixe la durée possible des opérations de mise en œuvre.
- La deuxième étape: correspond au développement de la cristallisation du gel, et donc de la rigidification du mélange provoquant la prise hydraulique proprement dite. Elle s’étend de quelques jours pour les liants à forte proportion de clinker (ciments de type CEM I, par exemple) à quelques semaines pour les liants à prise lente comme certains liants spéciaux routiers.
- Dernière étape: une fois la prise terminée, c’est-à-dire après formation de la quasi-totalité des ferro-silico-aluminates hydratés, il y a une période dite de durcissement qui correspond à la troisième étape durant laquelle on observe une poursuite de la croissance des résistances mécaniques, sa durée peut s’échelonner, toujours suivant la nature des liants et pour les climats tempérés, entre quelques semaines et plusieurs mois.

En traitement de sol, les durées de prise et de durcissement interviennent pour évaluer, d’une part, le temps au bout duquel il est possible de solliciter mécaniquement le matériau traité (notamment la possibilité d’être circulé par les engins de chantier) et, d’autre part, les délais d’étude nécessaires pour caractériser les résistances pouvant être escomptées à long terme avec la formule du mélange retenue. [20]

Tableau (II, 04) : Récapitulatif des actions des liants.

	Chaux	Liants hydrauliques
Actions immédiate	<ul style="list-style-type: none"> - Abaissement du teneur en eau; - Rigidité par floculation (résistance au cisaillement). 	<ul style="list-style-type: none"> - Assèchement par rapport matière sèche; - Floculation.
Actions à long terme	<ul style="list-style-type: none"> - Prise pouzzolanique (cimentation); - Syntaxie (pralinage). 	<ul style="list-style-type: none"> - Prise hydraulique (résistance à la traction).

II.10. Classement mécanique de la CDF traitée:

Quel que soit le niveau de plate forme envisagée, il est nécessaire de caractériser une CDF traitée par son classement mécanique, ce classement est basé sur le module élastique E (module sécant, pris à 1/3 de la charge de rupture lors de l’essai de traction directe) et la résistance en traction directe (R_t) à 90 jours.

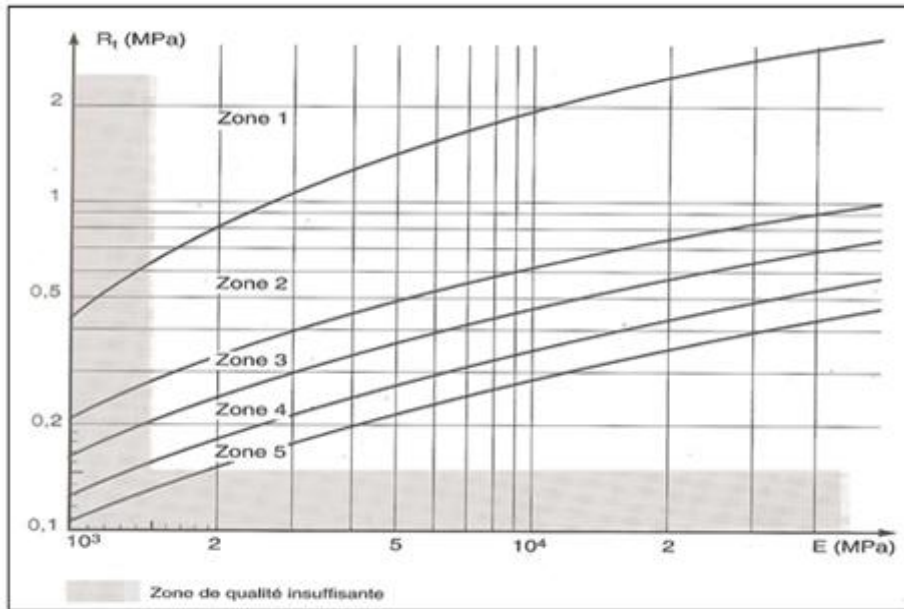


Figure (II, 07): Zone de classe mécanique de CDF.

La caractérisation de la zone sert à distinguer le mode de fabrication du matériau traité, à savoir en centrale ou en place car la qualité obtenue en est différente. [2]

Tableau (II, 05): Classe mécanique du matériau traité – GTS.

Classe mécanique	Traitement en centrale	Traitement en place
1	Zone 1	
2	Zone 2	Zone 1
3	Zone 3	Zone 2
4	Zone 4	Zone 3
5	Zone 5	Zone 4

La classe mécanique et l'épaisseur de CDF permettent de définir une classe de PF à partir de la classe d'AR.

Tableau (II, 06): Classe de PF selon la classe d'AR, la classe du matériau et l'épaisseur de CDF.

Classe mécanique du matériau CDF	Epaisseur de CDF en cm				
	AR1			AR2	
Classe 3	-	30	40	25	30
Classe 4	30	35	45	30	35
Classe 5	35	50	55	35	45
Classe de PF obtenue	PF2	PF3	PF4	PF3	PF4

II.11. Effet du traitement chimique sur les propriétés des sols:

II.11.1. Effet du ciment sur les limites d'Atterberg:

Le ciment est généralement utilisé pour les sols de faible plasticité ayant une teneur en eau est élevée. Tous les auteurs s'accordent à dire que l'addition du ciment cause une réduction dans l'indice de plasticité, ou l'incorporation du ciment réduit la plasticité des sols. Le tableau (II, 07) résume les résultats de l'influence de l'ajout du ciment portland sur les limites d'Atterberg d'un sol étudié par Okagbue et Ochulor en 2007.

Tableau (II, 07): Effet du ciment sur les limites d'Atterberg.

Ciment(%)	Limite de liquidité(%)	Limite de plasticité(%)	Indice de plasticité(%)
0	32	21	11
2	37	22	15
6	38	25	13
10	39	29	10

Une augmentation pour les deux limites de liquidité et de plasticités a été observée avec l'augmentation du dosage du ciment, cependant, l'indice de plasticité diminue. Ces résultats sont désirables pour la stabilisation. Une réaction a eu lieu entre le ciment et le sol. La modification des particules d'argile par le ciment et la dissolution des silicates et aluminates de particule d'argile due à un pH élevé est produite par la réaction de chaux et d'hydratation du ciment. Les matières dissoutes vont associer avec Ca^{2+} pour produire des agents de cimentation, c'est de cette façon les particules d'argile adjacentes seront liées. Okagbue et Ochulor ont été conclu que cette réaction mène à la formation de particules grossières, par conséquent, la réduction des fines particules mène à une réduction dans la surface superficielle et fait réduire la plasticité.

II.11.2. Effet du ciment sur le compactage :

L'addition du ciment dans un sol argileux de haute plasticité augmente la teneur en eau optimale et réduit la densité sèche maximale selon les recherches d'Okagbue et Ochulor en 2007. L'addition du ciment améliore et modifie les caractéristiques du sol, menant à un compactage performant avec une augmentation de la densité sèche. L'agglomération du ciment autour des grains de sol, cause une augmentation de la taille des particules fines, et peut aussi avoir une légère réduction de la teneur en eau optimale. L'addition du ciment affecte la distribution des particules du sol en augmentant la taille des particules fines, et de ce fait une réduction de l'attraction d'eau. [7]

Tableau (II, 08): Effet de l'ajout du ciment sur le comptage.

Ciment (%)	Standard Britannique		Standard.O.A		AASHTO Modifié	
	$\gamma_{dmax}(Mg/m^3)$	$W_{opt}(\%)$	$\gamma_{dmax}(Mg/m^3)$	$W_{opt}(\%)$	$\gamma_{dmax}(Mg/m^3)$	$W_{opt}(\%)$
0	1.30	19.80	1.33	16.30	1.60	15.00
2	1.31	16.70	1.33	15.80	1.44	15.20
6	1.39	19.00	1.41	16.50	1.46	15.00
10	1.41	16.70	1.44	16.20	1.48	12.60

II.11.3. Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg:

L'ajout de chaux provoque rapidement, en quelques minutes, la floculation des sols.

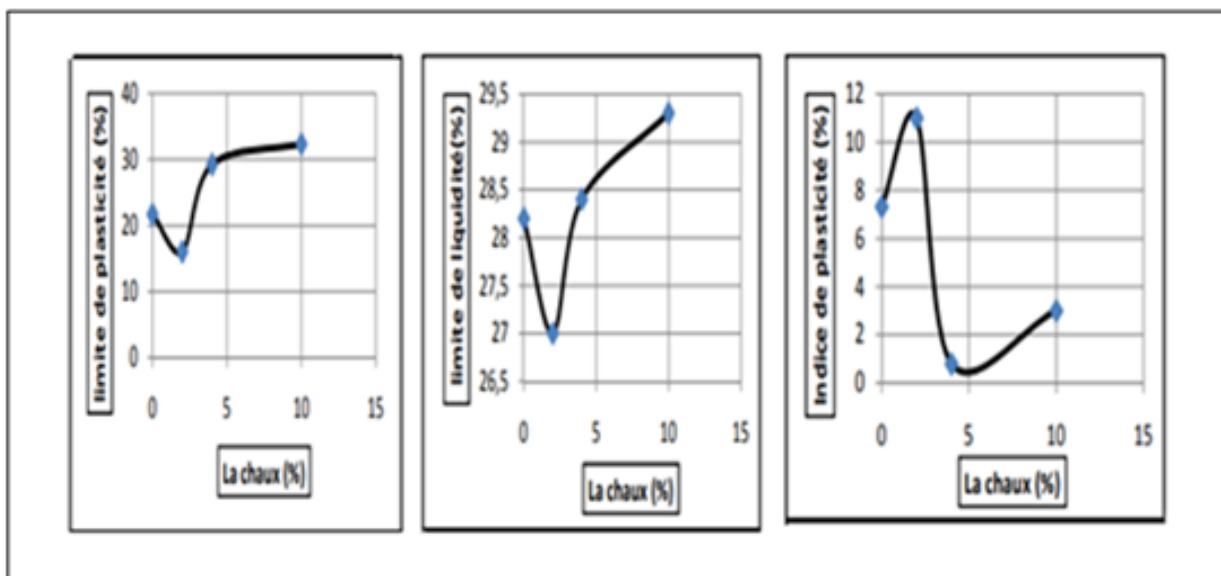


Figure (II, 08): Evolution des caractéristiques de plasticité et de consistance de la marne en fonction de la teneur en chaux.

Cette action entraîne une amélioration de la consistance qui se traduit par une augmentation de la limite de plasticité s'accompagnant ou non d'une augmentation de la limite de liquidité. Cette évolution provoque un déplacement du domaine de plasticité vers des teneurs en eau plus importantes. L'indice de plasticité décroît avec l'ajout de chaux, cette diminution résulte de l'augmentation de la limite de plasticité, augmentant ainsi le domaine plastique du sol selon la figure (II, 08). Le traitement à la chaux augmente la limite de plasticité à partir de 2% d'ajout; le sol peut donc accepter une teneur en eau supérieure en restant solide. [1]

II.11.4. Effet de la chaux sur le compactage:

D'après la figure (II, 09), on a constaté que la courbe Proctor de la marne traitée par la chaux, elle est déplacée vers la gauche et vers le bas par rapport à la courbe de la marne non traitée (naturel), c'est-à-dire; le traitement à la chaux réduit la valeur maximale de la masse volumique sèche, et la diminution de la teneur en eau est due à la diminution de la surface spécifique des particules argileuses des mélanges traités par les grains fins de la chaux. [27]

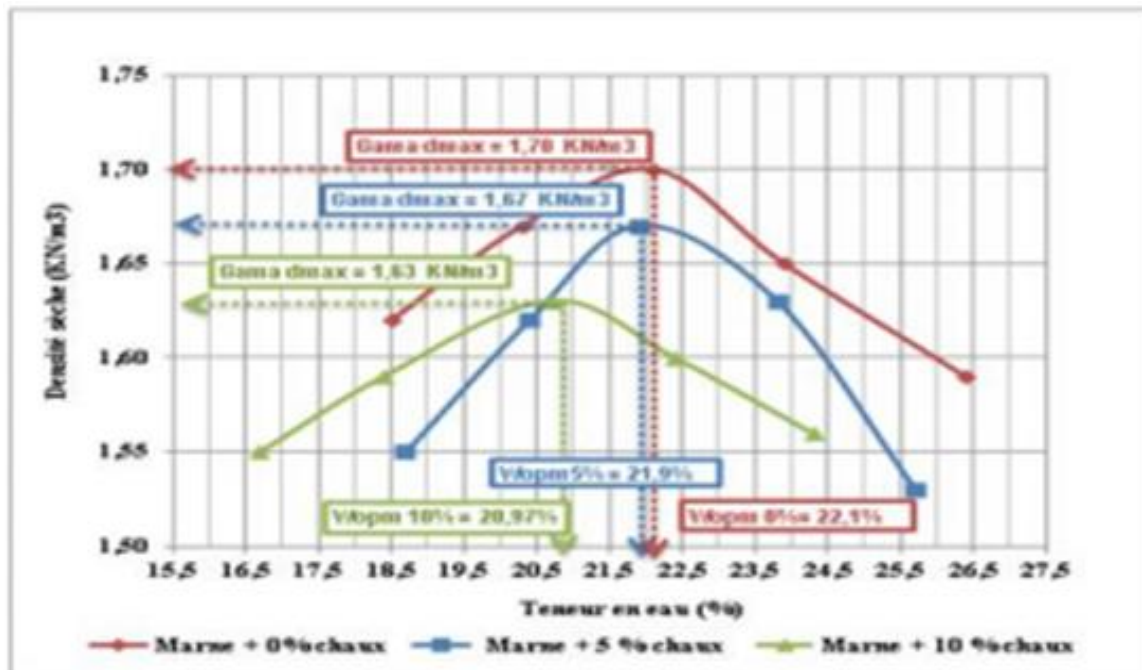


Figure (II, 09): Influence de l'addition de chaux sur les courbes de compactage.

II.11.5. Effet de la chaux et ciment sur l'indice de CBR:

Les courbes d'évolution de l'indice CBR après immersion en fonction de la teneur en eau, pour le sol marneux traité avec des pourcentages variables de chaux ou de ciment, montrent l'augmentation très rapide de cet indice en fonction du traitement. L'amélioration de la portance de la marne traitée (augmentation de CBR) est justifiée par la diminution du volume des vides dans le sol, qui est due à la bonne distribution des particules du sol avec les particules fines de chaux et de ciment.

L'indice CBR augmente jusqu'à 3% d'ajout de chaux puis décroît lentement jusqu'à atteindre un indice CBR de 33 à 10% de chaux selon la figure (II, 10). Lorsque la chaux est

mise en contact avec une matière contenant des silicates et des aluminates, elle forme des aluminates et des silicates de calcium hydratés, qui en cristallisant, entraînent une véritable “prise” des matières en contact. Cette réaction, se traduit par une augmentation de l’indice CBR et de la stabilité au gel. D’après les résultats obtenus, le gonflement de la marne devient quasiment inexistant après un traitement à la chaux à de faibles pourcentages (1%, 2% ; 3%).

L’indice CBR augmente avec l’augmentation de pourcentage du ciment d’après la figure (II, 10). Le traitement au ciment du sol marneux donne de bons résultats. Il est constaté par ailleurs que, les valeurs de CBR sont fortement améliorées après un traitement au ciment; elles dépassent ainsi largement le CBR minimum requis pour une couche de plate-forme d’autoroute ($I_{CBR} > 10$). Le traitement de la marne avec le ciment donne une meilleure amélioration par rapport à la chaux concernant la portance. La portance des sols marneux est améliorée après le traitement. Ainsi l’indice CBR obtenu est de 4 à 10 fois plus élevé que celle du sol non traité. En outre, compte tenu de la rapidité de prise du ciment comparativement à la chaux, un mélange approprié de cette dernière par un ciment résistant aux sulfates permet d’accélérer la stabilisation du sol. Par contre, le traitement superficiel du sol marneux à la chaux réduit le potentiel de gonflement, mais ne constitue pas une imperméabilisation.[1]

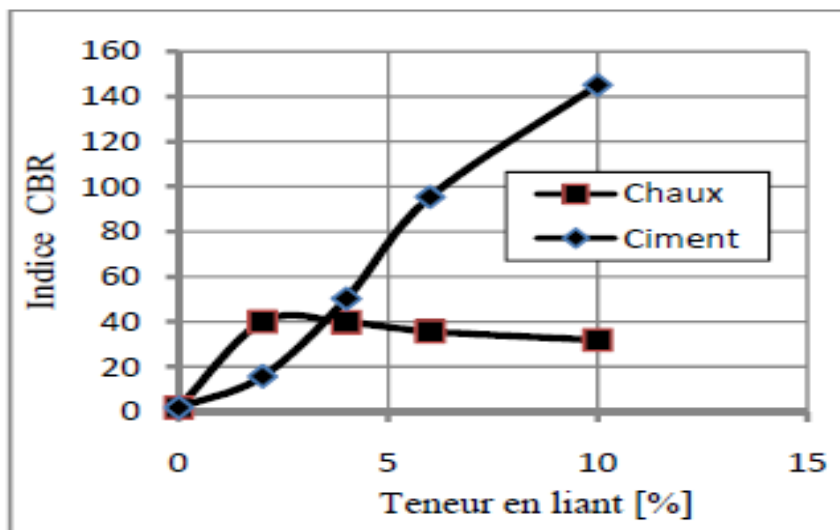


Figure (II, 10): Evolution de l’indice CBR après immersion en fonction de la teneur des liants (ciment et chaux).

II.11.6. Effet de la chaux et ciment sur les propriétés mécanique (C et ϕ):

Cet essai a permis de mieux comprendre l’action des liants sur les caractéristiques mécaniques des sols marneux stabilisés. En effet, le traitement entraîne une évolution microstructurale et physico chimique du sol. Les principaux résultats sont regroupés dans la figure (II, 11).

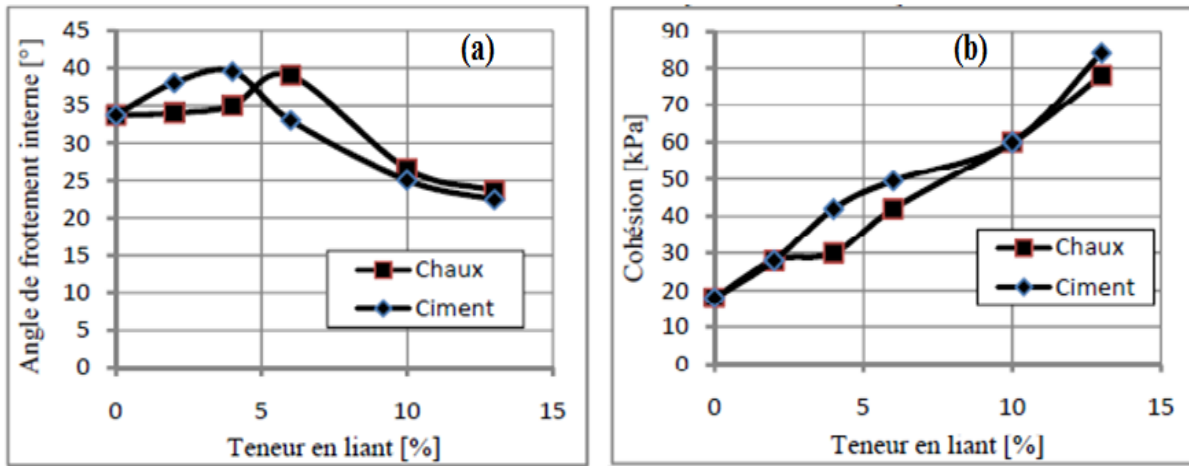


Figure (II, 11): Evolution de (a) l'angle de frottement interne, (b) la cohésion en fonction de la teneur des liants (ciment et chaux).

La cohésion évolue de façon continue et cela quelle que soit le liant ajouté et quel que soit son pourcentage d'ajout figure (II, 11). Par contre, l'angle de frottement présente un pic à 4% d'ajout de ciment et à 6% d'ajout de chaux figure (II, 11). La chaux est le liant le plus stabilisant que le ciment. [1]

II.12. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présentés les méthodes du traitement des sols médiocre par des différents ajouts (ciment et la chaux), les caractéristiques des ajouts du traitement et leurs effets sur les sols à court et à long terme, et des études déjà réalisées sur l'évolution des propriétés des sols traités par différents pourcentages du ciment et de la chaux. Les différents résultats trouvés concernant le traitement chimique des sols sont les suivantes:

- Le traitement à la chaux n'est pas appliqué pour des sols à une très faible épaisseur.
- Le traitement au ciment est utilisé sur un sol peu ou pas argileux;
- Les chaux s'utilisent dans des sols ayant une teneur en argile non négligeable.
- La chaux vive s'utilise plus particulièrement pour les sols argileux, qui contenant beaucoup trop d'eau;
- La chaux doit être réactive.

C'est pourquoi nous avons décidé d'étudier l'influence du traitement par la chaux et le ciment sur notre sol.

Chapitre III:
Etude expérimentale

Chapitre III: Etude expérimentale

III.1. Introduction:

Généralement, dans les travaux routiers on cherche des bonnes propriétés des matériaux de construction, pour permettre la réalisation d'une route présentant de bonnes caractères, tel que:

- Granulométrie convenable;
- Résistance suffisante sous efforts élevées;
- Bonne stabilité mécanique;
- Bonne compatibilité ...etc.

Malheureusement, il est difficile de trouver un gisement répondant à toutes ces exigences.

Ce chapitre traite des essais sur le sol argileux utilisé, a pour objet de déterminer les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques selon les normes préconisées. Ces essais ont été effectués au laboratoire du département génie civil de l'université de Jijel, et au laboratoire des travaux publics Est (LTPE).

III.2. Matériaux utilisées:

III.2.1. Sol utilisé:

Le sol utilisé dans cette étude est le schiste de classe granulaire (0/5) mm dans la zone dite El Aouana - Jijel. Pour déterminer les différentes caractéristiques du sol précédemment cité, les essais sont réalisés au LTPE et au laboratoire dans notre département, et selon les normes européennes présentées au tableau (III, 01):

Tableau (III, 01): Normes des essais d'identification sur un sol argileux.

NF P 94-050	La teneur en eau de sol
NF P 94-064	Masse volumique humide
NF P 94-068	Essai au bleu de méthylène
NF P 94-051	La limite d'Atterberg
XP P 94-041	Tamisage par voie humide

III.2.2. Ciment:

Le ciment utilisé est le ciment de type ciment portland artificiel CPA-CEM I 42,50 N provenant de l'usine de Lafarge de M'sila, dont les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques sont présentées au tableau (III, 02).

Tableau (III, 02): Analyse chimique du ciment.

Composition chimique (%)		Constituants des minéraux du clinker		
SiO ₂	22,70	Silicate tricalcique C ₃ S(%)	53,14	
Al ₂ O ₃	4,90	Silicate bi calcique C ₂ S (%)	22,51	
Fe ₂ O ₃	4,01	Aluminate tricalciques C ₃ A(%)	6,79	
CaO	63,85	Aluminoferrite tetracalcique C ₄ AF(%)	12,13	
MgO	1,34	Gypse(%)	5	
K ₂ O	0,69	Résistance à la compression à 28 jours (Mpa)	48,05	
Na ₂ O	0,47	Retrait à 28 jours en (µm/m)	830,28	
SO ₃	1,29	Expansion (chaud) en (mm)	0,75	
CaO libre	0,47	Temps de prise à 20°C	Début de prise (min)	145
			Fin de prise (min)	276

III.2.3. Chaux:

La chaux (Hydroxyde de calcium Ca(OH)₂) est une matière, généralement, poudreuse et de couleur blanche, obtenu par décomposition thermique du calcaire. Le tableau (III, 03) présente les caractéristiques physiques et chimiques de la chaux utilisée, selon la fiche technique de l'unité de production de Tbessa – Algérie.

Tableau (III, 03): Analyse chimique de la chaux.

Composition chimique (%)			
SiO ₂	1,35	MgO	1,83
Al ₂ O ₃	10,63	K ₂ O	0,151
Fe ₂ O ₃	3,27	Na ₂ O	0,064
CaO	82,77	SO ₃	0,11

III.3. Essais d'identification du sol utilisé:

III.3.1. Teneur en eau de sol:

III.3.1.1. Définition:

La teneur en eau d'un sol est le paramètre d'état fondamental de son comportement. Elle est définie par le rapport du poids de l'eau au poids des particules solides d'un volume donné de sol. Cette grandeur est noté (w) et elle est exprimée en pourcentage. On distingue:

- La teneur en eau pondérale est définie par:

$$Wp = \frac{Mw}{M} * 100$$

Mw: masse de l'eau dans l'échantillon;

M: masse totale de l'échantillon.

- La teneur en eau gravimétrique est définie par:

$$W = \frac{Mw}{Ms} * 100$$

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

- La teneur en eau volumique qui intègre les variations de volume de l'échantillon, et elle définit par:

$$\theta = \frac{Vw}{V} * 100$$

Vw: volume de l'eau dans l'échantillon.

V: volume total de l'échantillon.

Wn: teneur en eau naturel.

III.3.1.2. Principe de l'essai:

Cet essai a pour objet de déterminer la teneur en eau d'un sol au laboratoire, pour prévoir son comportement. Elle est déterminée lorsque les conditions de prélèvement sur site, de transport et de conservation de l'échantillon n'ont entraîné aucune modification de celle-ci.

III.3.1.3. Appareillage utilisée:

- Une balance électrique de précision;
- Une étuve électrique;
- Des tares.

III.3.1.4. Résultats obtenus:

Le tableau (III, 04) résume les résultats de la teneur en eau naturelle:

Tableau (III, 04): Résultats de la teneur en eau.

Échantillon	$M_{tare}(g)$	$M_h(g)$	$M_d(g)$	W (%)
01	18	59	53	11,32
02	18	49	44	11,36
03	18	51	45	13,33
04	18	67	58	15,51

D'après le tableau (III, 04), la teneur en eau moyenne du sol est égal à 12.88 %. Donc, le sol est peu humide.

III.3.2. Masse volumique absolue:**III.3.2.1. Masse volumique absolue du sol:**

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

III.3.2.2. Appareillage utilisé:

- Un échantillon;
- Éprouvette graduée rempli d'eau;
- Une balance électronique;
- Une étuve électrique.

III.3.2.3. Mode opératoire:

La méthode d'éprouvette graduée est une méthode très simple et rapide, cet essai a été effectué au laboratoire LTPE par suivre ces étapes:

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume $V_1=500\text{ml}$ d'eau;
- Peser un échantillon $M=300\text{g}$ de sol et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air;
- Le liquide monte dans l'éprouvette; et lire le nouveau volume V_2 ;
- La masse volumique est calculé par:

$$\rho_s = \frac{Ms}{V_2 - V_1}$$

III.3.2.4. Résultats de l'essai:

Le tableau (III, 05) présente les résultats de l'essai de la masse volumique absolue :

Tableau (III, 05): Le poids volumique de sol étudié.

Échantillon	Volume de l'eau (ml)	Volume totale (ml)	Poids volumique (KN/m^3)	Poids volumique moyen (KN/m^3)
01	500	600.2	29.8	29.9
02	500	600.5	29.9	

D'après les résultats obtenus, le sol est un sol très dense.

III.3.3. Essai au bleu de méthylène:

La valeur au bleu désigné par VBS est le nombre de grammes de bleu nécessaire pour saturer 100 g de fines inférieure à 0.08 mm. Cet essai est réalisé sur la fraction 0/2 mm ou 0/5 mm, et ramené par une règle de proportionnalité à la fraction 0/50.

III.3.3.1. But de l'essai:

Cet essai est utilisé pour déterminer l'argilosité d'un sol. Il consiste à déterminer la quantité de particules argileuses présentes dans l'échantillon. Pour cela on utilise le bleu de méthylène, substance adsorbée de préférence par les argiles.

III.3.3.2. Principe de l'essai:

L'essai au bleu de méthylène permet la détermination de l'activité, et de la quantité de la fraction argileuse d'un échantillon. Le dosage s'effectue en ajoutant successivement des quantités de solution de «bleu» et en contrôlant l'adsorption au fur et à mesure. Une goutte de suspension est prélevée et est déposée sur un filtre. L'essai consiste à déterminer l'adsorption maximale obtenue lorsque la tâche est entourée d'une auréole bleu-clair persistante.

III.3.3.3. Appareillage:

- Balance;
- Chronomètre ou équivalente indiquant la seconde;
- Agitateur mécanique à ailettes ayant une vitesse de rotation couvrant au moins la plage de 400 tr/min à 700 tr/min;
- Un récipient cylindrique d'une capacité minimale de 3 000 cm³ ;
- Un tamis, Papier filtre blanc;
- Eau distillée + pissette;
- Bleu de méthylène;
- D_{\max} du matériau est égal à 5mm.



Figure (III, 01): Appareillage de l'essai au bleu de méthylène.

III.3.3.4. Mode opératoire:

On prépare 100 g de fraction 0/5 mm sèche, que l'on met à tremper dans 500 ml d'eau déminéralisé. Le tout est maintenu en agitation permanente au moyen de l'agitateur à ailettes.

III.3.3.5. Résultats obtenus:

Les résultats de l'essai au bleu méthylène sont calculés comme suit:

$$VBS = \frac{B}{M} * 100$$

Avec :

Masse de bleu introduite (solution à 10 g/l): $B = V \times 0.01$

B: masse de bleu introduite dans le bêcher (en gr)

M: masse sèche de la prise d'essai (en gr)

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

Tableau (III, 06): Classification des sols d'après l'essai de bleu méthylène.

$VBS < 0,1$	Sol insensible à l'eau
$0.2 \leq VBS < 1.5$	Peu sensible à l'eau
$1.5 \leq VBS < 2.5$	Sols limoneux peu plastiques
$2.5 \leq VBS < 6$	Sols limoneux de plasticité moyenne
$6 \leq VBS < 8$	Sols argileux
$8 \leq VBS$	Sols très argileux

Dans notre sol: $VBS = 3,16$, donc le sol est un sol limoneux de plasticité moyenne.

III.3.4.Limites d'Atterberg:

L'essai des limites d'Atterberg permet de délimiter les trois états physiques : solide, liquide et plastique par des teneurs en eau limites (limite de liquidité W_L et limite de plasticité W_p).

- **La limite de liquidité (W_L):**est une valeur de teneur en eau qui indique le passage du sol à l'état liquide, elle est obtenue théoriquement par une fermeture correspondant à $N=25$ chocs.
- **La limite de plasticité (W_p):**est la teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide - le sol est durcit et se fissure.
- **Indice de plasticité(I_p):**est la différence entre W_L et W_p .



Figure (III, 02) : Appareil de Casagrande.

III.3.4.1. Principe de l'essai:

L'essai s'effectue en deux phases:

- Mesurer la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande;
- Mesurer la limite de plasticité par formation de rouleaux de 3mm de diamètre.

III.3.4.2. Matériels utilisés:

- Appareille de Casagrande, outil a rainuré;
- Coupelle, verres de montres tarés;
- Pissette, spatule;
- Bascule électronique;
- Four électrique.

III.3.4.3. Mode opératoire:

Après l'échantillonnage du sol une masse de matériau m est mise à imbiber dans un récipient d'eau à la température ambiante, pendant au moins 24h.

• Pour déterminer limite de liquidité W_L :

- Remplir la coupelle de Casagrande d'une certaine manière avec l'échantillon;
- Réaliser la rainure au milieu de la couple;
- Soumettre la couple a une série de choc régulier;
- Note le nombre de coups pour la rainure se referme sur 1cm environ;
- Prélever à l'aide de la spatule un échantillon au voisinage de l'endroit au la rainure s'est refermée;
- Mesurer la teneur en eau de cet échantillon.

- **Pour déterminer limite de liquidité W_P :**
 - Sécher le sol malaxant sur le marbre et en l'étalant;
 - Former une boulette avec une partie de l'échantillon, puis rouler à la main sur le marbre de façon à former un rouleau de 3mm de diamètre et un largeur de 10/15 cm environ.
 - Si aucune fissure n'apparaît, le rouleau est réintégré à la boulette. la pate est de nouveau malaxée tout en la séchant un peu;
 - La limite de plasticité est obtenue quand le rouleau de 3mm sur 15cm et qu'il se fissure lorsqu'on le soulève de 1cm en son centre;
 - Effectuer une mesure en eau de rouleau.



Figure (III, 03): Etapes de l'essai avec l'appareille de Casagrande.

III.3.4.4. Résultats et interprétations:

Le tableau (III, 07) présente les différentes classifications de sol selon l'indice de plasticité I_p .

Tableau (III, 07): Classification des sols.

Type du sol	Limite de liquidité W_L (%)	Indice de plasticité I_p (%)
Sable	$W_L < 35$	$I_p < 15$
Limon	$20 < W_L < 60$	$5 < I_p < 25$
Argile	$W_L > 30$	$I_p > 15$

Le tableau (III, 08) présente les différents degrés de plasticité du sol selon l'indice de plasticité I_p .

Tableau (III, 08): Degré de plasticité de sol.

Indice de plasticité I_p (%)	Degré de plasticité
12	Non plastique
12-25	Peu plastique
25-40	Plastique
40	Très plastique

D'après les deux tableaux précédents, nous remarquons que le sol étudié est de type Argile peu plastique.

III.3.5. Essais d'analyse granulométrique:

La granularité est un paramètre permettant de classer les sols naturels d'après la dimension des éléments qu'ils contiennent et déterminer la répartition des grains de sol suivant leur dimension dans un échantillon [9]. Les deux méthodes qui existent pour effectuer une analyse granulométrique:

- Analyse granulométrique par tamisât : Pour les graviers et les sables;
- Analyse granulométrique par Sédimentation : Pour les sols à grains fins.

III.3.5.1. Tamisage par voie humide:

a) Définition:

L'analyse granulométrique se propose de définir la répartition des grains constitutifs d'un sol selon leurs dimensions. On étudie la granulométrie en tamisant le matériau sur une série normalisée de tamis à mailles carrées, les grains sont ainsi séparés selon leur taille.

b) Principes du l'essai:

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

c) Appareillage:

- Un dispositif de lavage avec arroseur et, éventuellement, de trempage et de malaxage;
- Un jeu de tamis emboîtables à mailles d'ouvertures carrées;



Figure (III, 04): Analyse granulométrie par voie humide.

- Couvercles et fonds de tamis de diamètre compatible avec celui des tamis;
- Récipients en matériau non altérable, brosse, pinceau,...etc.;
- Balances;
- Une enceinte thermique ou une étuve.

d) Mode opératoire:

- Déverser, en une ou plusieurs fois, la totalité du matériau à analyser sur une colonne constituée de tamis d'ouverture de maille croissant de bas en haut et surmontée d'un dispositif arroseur avec:
 - Un tamis d'ouverture adapté à la dimension des plus gros éléments de la prise d'essai;
 - Un tamis inférieur d'ouverture de maille de 80 μm ;
 - Le nombre des tamis intermédiaires et l'ouverture des mailles sont choisis de telle sorte qu'il n'y ait pas surcharge sur les tamis.
- Séparer, par brassage manuel combiné à un arrosage, les éléments retenus sur le tamis d'ouverture de maille la plus grande. Lorsque le refus sur le tamis est propre, le tamis est retiré. L'opération est poursuivie sur le tamis inférieur jusqu'à ce que l'eau s'écoulant sous le dernier tamis soit pratiquement claire;
- Lorsque malgré le brassage et le brossage, des particules fines adhèrent aux grains, un trempage est nécessaire. Dans cette éventualité, verser la totalité du matériau dans un récipient et brasser avec une quantité d'eau;
- Peser le récipient contenant le refus sur le tamis d'ouverture la plus grande;
- Peser les refus cumulés successifs R;
- Enfin, placer les récipients contenant le refus obtenu sur chaque tamis dans une étuve.

- Calcul des facteurs de courbure et d'uniformité:

La forme générale et la pente de la courbe peuvent être décrites en fonction du coefficient d'uniformité «Cu» dit aussi coefficient de Hazen, ou bien le coefficient de courbure «Cc». Le facteur de courbure est calculé par la relation suivante:

$$Cc = \frac{(d_{30})^2}{d_{10}d_{60}}$$

Granulométrie uniforme: grains à peu près de mêmes dimensions;

Granulométrie discontinue: pas de grains dans certains intervalles de dimension.

Le facteur d'uniformité est calculé à partir de:

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

- D60: Diamètre correspondant à 60 % (tamisât);
- D10: Diamètre correspondant à 10% (tamisât), il est appelé aussi «diamètre efficace».

Tableau (III, 09): Description de sol en fonction du coefficient d'uniformité.

Coefficient d'uniformité (Cu)	Description de courbe
$Cu \leq 2$	Granulométrie très serrée
$2 < Cu \leq 5$	Granulométrie serrée
$5 < Cu \leq 20$	Granulométrie semi- étalée
$20 < Cu \leq 200$	Granulométrie étalée
$Cu < 200$	Granulométrie très étalée

e) Résultats obtenues:

Le tableau (III, 10) contient le pourcentage massique de passés, en fonction de la série de tamis utilisés.

Tableau (III, 10): Granulométrie par voie humide.

Tamis (mm)	5	2	1	0,4	0,2	0,1	0,08
Tamisât (%)	97	90	82	71	68	66	65

III.3.5.2. Analyse granulométrique par sédimentométrie:

a) But de l'essai:

L'analyse granulométrique par sédimentométrie permet de déterminer la distribution en poids des particules fines (de diamètre inférieur à 80µm) d'un sol en fonction de leurs dimensions, donc elle complète l'analyse par tamisage. La séparation par décantation consiste à déterminer les diamètres équivalents des particules sphériques en fonction de leur vitesse de

chute dans un environnement visqueux, afin d'obtenir le tracé d'une courbe granulométrique pour des particules inférieure à 0,08mm.

b) Principe de l'essai:

Dans un liquide au repos, des grains de diamètres différents sédimentent à des vitesses différentes. La sédimentométrie se base sur la loi de Stokes exprimant la relation entre la vitesse-limite de sédimentation (V) et le diamètre (D) d'une particule solide sphérique. En l'appliquant à des grains de forme quelconque, on n'obtiendra que des diamètres équivalents.

c) Appareillage:

- Balance, étuve;
- Agitateur mécanique, bac;
- Un tamis de 80 μm ;
- Eau distillée ou déminéralisée et défloculant, deux éprouvettes;
- Un densimètre gradué de 0.995 à 1.035 g/cm^3 de forme torpille avec des graduations tous les 0.005 g/cm^3 ;
- Thermomètre, chronomètre, thermomètre de la salle d'essai;
- Des éprouvettes de 2L de contenance.



Figure (III, 05) : Appareillage de l'essai analyse granulométrique par sédimentométrie.

d) Mode opératoire:

Les opérations décrites ci-dessous sont successivement à réaliser dans une salle d'essai dont la température doit être contrôlée. Le tamisât, au tamis de 80 μm , de l'échantillon de sol, préparé selon la norme NF P 94-056, est recueilli avec son eau de lavage dans un bac, le tout est mis à décanter. Une fois redevenue claire, l'eau du bac est siphonnée sans entrainer d'éléments fins. Le bac est son contenu sont ensuite placés dans une étuve. Conventionnellement, l'évaporation de l'eau est considérée comme achevée si la masse du matériau contenu dans le bac ne varie pas de plus de 2/1000 entre deux pesées successives effectuées immédiatement

après la sortie de l'étuve. Sur le tamisât séché, désagrégé avec le pilon dans le mortier puis homogénéisé, prélever une prise d'essai de 80g (plus ou moins 10g).

Introduire la prise d'essai dans le récipient utilisé avec l'agitateur mécanique, ajouter 500 cm³ du mélange spéciale et garder à la température ambiante. Laisser imbiber pendant au moins 15 h à la température ambiante. La prise d'essai est dispersée dans la solution d'eau est de défloculant au moyen de l'agitateur mécanique qui doit fonctionner pendant 3min minimum à 10000 tr/min.

Verser la suspension dispersée dans une éprouvette d'essai immédiatement après la fin de l'agitation, compléter par de l'eau distillée jusqu'à 2000 cm³. Verser 2000 cm³ de la même eau distillée dans une seconde éprouvette témoin et y plonger le thermomètre et le densimètre parfaitement propre.

Plonger le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre; faire les lectures depuis le début de l'essai aussi longtemps que nécessaire, aux temps suivants: 0.5; 1; 2; 5; 10; 20; 40; 80; 240; 1440 minute. Faire les lectures du densimètre au sommet du ménisque. À partir de 5mn plonger le densimètre avec précaution dans la solution au minimum 30 S avant la mesure selon la figure (III, 06).

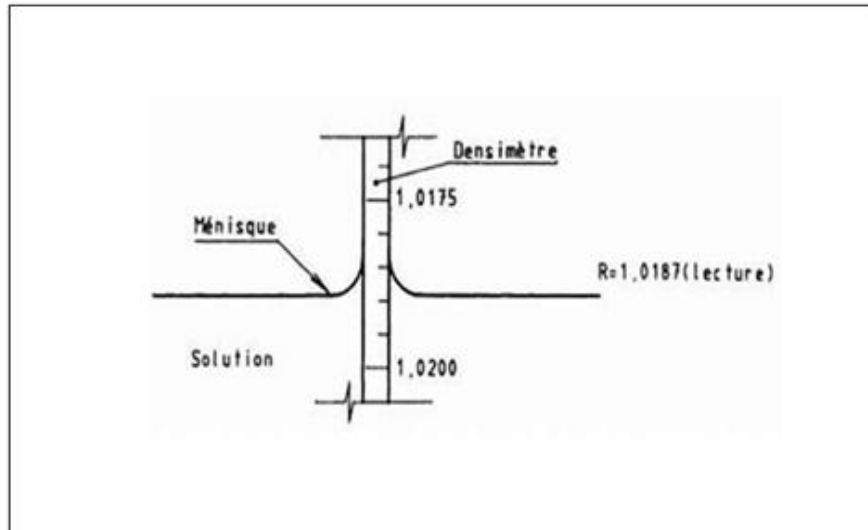


Figure (III, 06): Lecture du densimètre.

e) Expression des résultats:

Le pourcentage d'éléments inférieur ou égaux à D:

$$\rho = \frac{Vs}{m} + \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_e} + \rho_e \left[\frac{\rho t}{\rho_e} - 1 \right]$$

Vs: est le volume de la suspension;

M: est la masse de sol sec prélevée;

ρ_t : est la masse volumique de la suspension au temps «t»;

$$\rho_t = RC \times \rho_e = (R + C_m + C_t + C_d) \rho_e$$

Rc: lecture corrigée du densimètre à l'instant «t»;

R: lecture du densimètre (sommet de ménisque) à l'instant « t »;

Cm: correction due au ménisque $C_m = n^{-1} \sum_{i=1}^{i=i} (R - R')_i$

Ct: correction due aux variations de température en cours d'essai $C_t = 1 - R'$

Cd: correction due aux défloculant $C_d = R_1$;

R2 (avec R1 lecture de ménisque à l'éprouvette de l'eau et R2 = R au même temps);

N: nombre des mesures effectuées;

D: Diamètre d'éléments.

De la formule de Stokes, le plus large diamètre des particules solides en suspension dans l'eau à un temps «t» est déduit:

$$D = \frac{\sqrt{18\eta}}{(\sqrt{\gamma s} - \gamma e)} \frac{\sqrt{Ht}}{t}$$

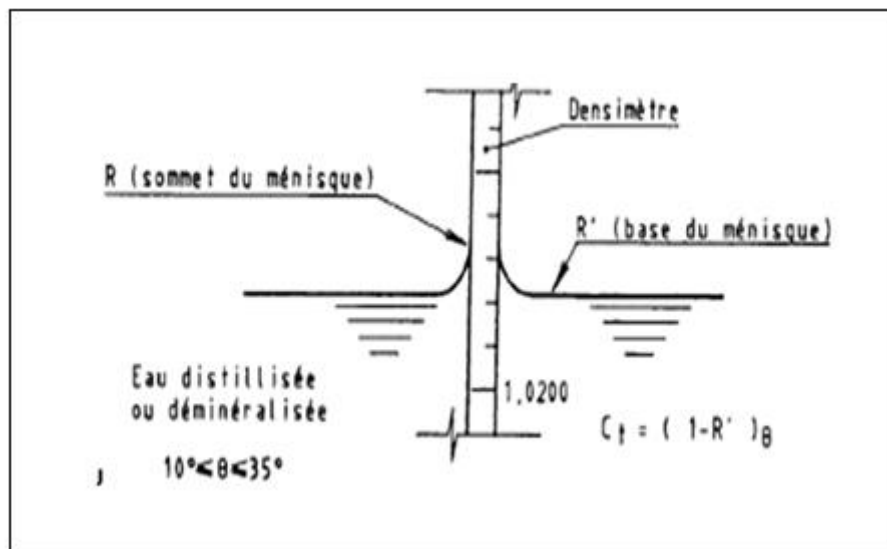


Figure (III, 07): Lecture corrigé du densimètre.

La viscosité dynamique de la solution à l'instant «t»:

$$\eta = \frac{0.00179}{1 + 0.03368 t + 0.00022 t^2}$$

Ht: Profondeur effective du centre de poussée du densimètre à l'instant «t»;

$$H_t = H - [100 H_1 (R + C_m - 1)] - H_c$$

Hc: le déplacement du niveau de la solution lié à l'introduction du densimètre dans l'éprouvette d'essai (pour calculer H, h et h1 voir la figure (III, 07));

$$Hc = 0.5 \frac{Vd}{A}$$

Vd: volume de densimètre et «A» la section droite de l'éprouvette d'essai;

t: temps.

Le tableau (III, 11) contient le pourcentage massique de passent, en fonction de la série de tamis utilisés.

Tableau (III, 11): Les résultats de granulométrie.

Dimension tamis (mm)	Tamisât (%)
5	96,73
2	89,63
1	82,43
0,4	71,18
0,2	67,65
0,1	65,82
0,08	65,125
0,021	19,5
0, 015	19,5
0,01	20,25
0,006	18
0,004	17,25
0,003	15,75
0,002	15
0,002	13,5
0,001	10,5
0, 001	9
0,004	4,5

La distribution de la taille des particules doit être présentée sous forme graphique sur un papier semi-logarithmique sur lequel la taille des particules en millimètres sera portée en abscisse (échelle logarithmique) et leur pourcentage pondéral en ordonnée (figure III, 11).

f) Résultats obtenus:

La figure (III, 08) suivante présente la courbe granulométrique.

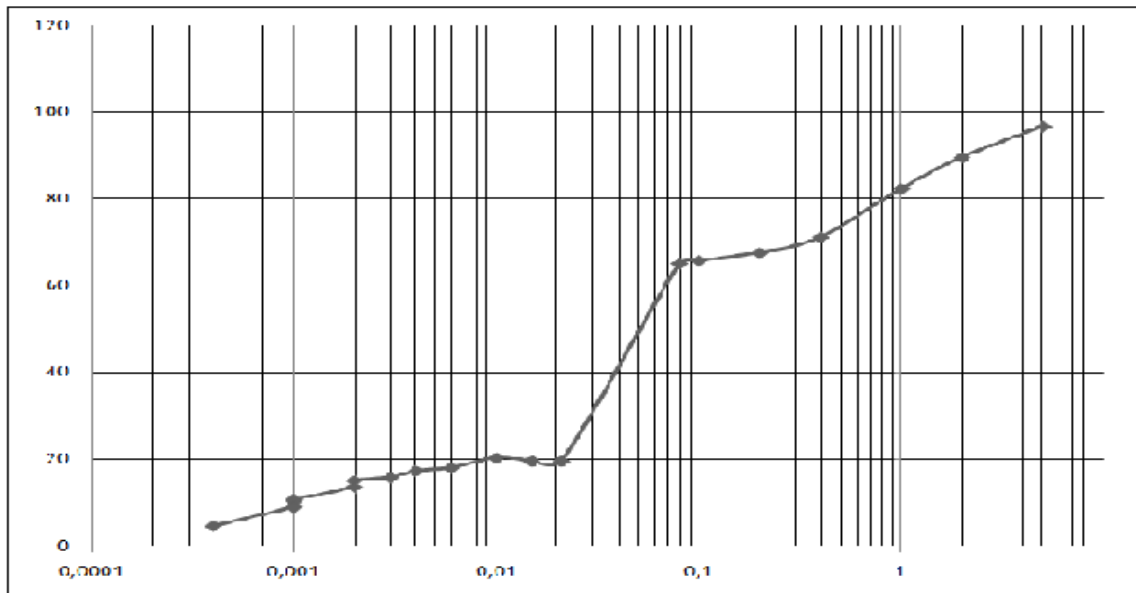


Figure (III, 08): Courbe granulométrique.

Les diamètres effectifs de la courbe granulométrique sont:

- $D_{10} = 0,001$ mm;
- $D_{30} = 0,03$ mm;
- $D_{60} = 0,07$ mm.

Les coefficients de la courbe granulométrique sont:

- $C_u = 70$ Courbe étalée
- $C_c = 30$ Courbe mal graduée

Selon le GTR avec l'utilisation de pourcentage des passantes 5 mm, valeur de VBS et l'indice de plasticité IP le sol est classifié par B6. (voir annexe)

III.4. Essais mécaniques:

Le tableau ci-dessous résume les normes des essais mécaniques réalisés dans cette étude.

Tableau (III, 12): Normes des essais mécaniques sur un sol argileux.

NF P 94-093	Proctor normal
NF P 94-078	Essai CBR (Californian-Bearing-Ratio)
NF P 94-071-1	Essai de cisaillement a la boite

II.4.1. Proctor:

L'essai Proctor, mis au point par l'ingénieur R.Proctor (1933), est un essai géotechnique qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol granulaire (ou non) par compactage à une énergie fixée. Les caractéristiques de compactage Proctor sont des paramètres très utilisés pour identifier les matériaux, et pour définir les spécifications de compactage qui leur sont applicables lorsqu'ils sont utilisés dans la construction des remblais, des couches de forme et des assises de chaussées.

III.4.1.1. But de l'essai:

Son but c'est la détermination de la teneur en eau optimale et la densité sèche optimale, pour un compactage bien défini.

III.4.1.2. Principe de l'essai:

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, selon un processus bien défini, l'échantillon de sol à étudier et à mesurer 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. Et aussi on définit plusieurs points d'une courbe (γ_d , ω); on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale et l'ordonnée de la densité sèche optimale.

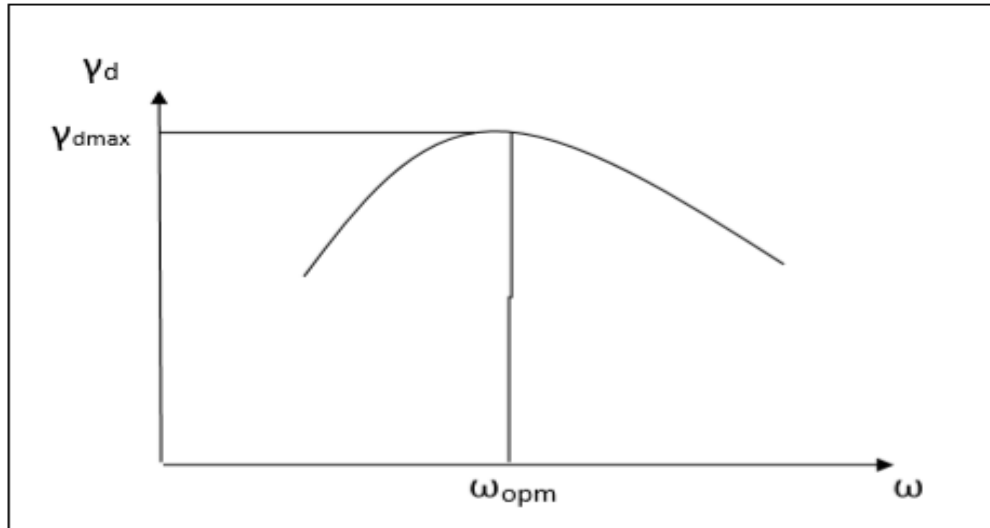


Figure (III, 09): Courbe de Proctor.

Le choix de l'intensité de compactage est fait en fonction de la surcharge que va subir l'ouvrage au cours de sa durée de vie:

- Essai Proctor normal: résistance souhaitée relativement faible, du type remblai non ou peu chargé;
- Essai Proctor modifié: forte résistance souhaitée, du type chaussée autoroutière.

a) Essai Proctor Normal:

Le compactage n'est que moyennement poussé. Il est généralement utilisé pour les études de remblais en terre (barrages et digues). Il s'effectue en trois couches avec «la dame Proctor normal», l'énergie de compactage est de:

- 55 coups de dame par couche dans le moule C.B.R;
- 25 coups par couche dans le moule Proctor normal.

b) Essai Proctor modifié:

Le compactage est beaucoup plus intense; il correspond en principe au compactage maximum que l'on peut obtenir sur chantier avec les rouleaux à pieds de mouton ou les rouleaux à pneus lourds modernes. Le compactage dans ce cas-là s'effectue en cinq couches successives avec «la dame Proctor modifié» l'énergie de compactage est de:

- 55 coups de dame par couche dans le moule C.B.R;
- 25 coups par couche dans le moule Proctor.

III.4.1.3. Appareillage:

- Moule CBR (éventuellement Proctor);
- Dame Proctor normal, Règle à araser, disque d'espacement;
- Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau;
- Tamis 5 et 20 mm (contrôle et écrêtage le cas échéant de l'échantillon);
- Truelle, spatule, pinceau,....etc.
- Éprouvette graduée 150 ml environ;
- Petits récipients (mesures des teneurs en eau), balance, étuve.

III.4.1.4. Mode opératoire:

- Le matériau à étudier est tamisé «granulométrie < 5mm»;
- Prendre environ 2,5Kg de matériau;
- Ajouter pour chacun une quantité d'eau;
- Placer la hausse sur le moule et donner 25coups pour chaque couche;
- Compacter le sol en trois 03 couches d'argile à avoir la dernière débordant légèrement le haut de moule;
- Enlever la hausse et araser soigneusement le haut du moule;
- Peser le moule avec le sol;
- On prend de chaque cotés (au-dessus et au-dessous) de ce moule une quantité pour la détermination de la teneur en eau;
- Répéter l'essai pour des teneurs en eau croissante;
- Mettre les tares dans l'étuve pendant 24heures.

Les résultats dans cet essai seront présentés au chapitre IV.

III.4.2. Essai de CBR:**III.4.2.1. Introduction:**

L'essai CBR (Californian-Bearing-Ratio) est un essai de portance (aptitude des matériaux à supporter les charges) des remblais et des couches de formes compactées des ouvrages routiers. Il s'agit de déterminer l'Indice Portant Immédiat, Indice CBR (Californian-Bearing-Ratio) après immersion d'un sol ou d'un matériau granulaire utilisé dans la construction des ouvrages en terre ou des assises de chaussées. C'est un essai de poinçonnement à l'aide d'une presse standard (presse CBR) à vitesse constante (1,27 tr/mn) et le diamètre du piston 19,6 cm.

III.4.2.2. But de l'essai:

L'objectif principal de cet essai est de déterminer les caractéristiques mécaniques des sols naturels et de sols compactés dans des remblais et des couches de forme, de fondations et de sous-fondations de routes et aéroports. Donc cette essai a pour but de:

- Établir une classification des sols (GTR) «Guide des Terrassements Routières»;
- Évaluer la traficabilité des engins de terrassement (IPI) «Indice de Portance Immédiat»;
- Déterminer l'épaisseur des chaussées CBR (ICBR augmente \Rightarrow épaisseur diminue).

III.4.2.3. Principe de l'essai:

Il mesure la résistance à l'effort tranchant d'un sol et le gonflement du sol lorsqu'il est immergé dans l'eau pendant 4 jours. Il nous a permis de calculer la portance du sol, en estimant sa résistance au poinçonnement. Il est applicable aux sols fins, ainsi qu'aux sols grenus dont la teneur en éléments de plus de 20mm de dimension maximale ne dépasse pas 25%.

III.4.2.4. Appareillage:

- Moule CBR;
- Dames ou machines de compactage Proctor normal;
- L'ensemble des accessoires (plaque de base, rehausse, disque d'espacement, règle à araser,...);
- Le matériel d'usage courant (balances, étuve, bacs,...);
- Presse équipé de poinçon cylindrique et de plusieurs dispositifs de mesuré.

III.4.2.5. Mode d'opérateur:

L'essai C.B.R sur un matériau doit être toujours précédé d'un essai Proctor modifié, qui permette d'obtenir la teneur en eau optimum (W_{opt}) utilisés comme teneur en eau de compactage dans l'essai C.B.R.

La préparation et le compactage des éprouvettes de l'essai C.B.R se fait de la même manière que dans l'essai Proctor modifié. Dans ce qui suit, nous allons utiliser l'éprouvette de l'essai Proctor modifié qui à la teneur en eau la plus proche de celle de l'optimum. Placer l'ensemble embase, moule, éprouvette sur la presse, en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et procéder au poinçonnement de la manière suivante:

- Mettre en contact la surface supérieure de l'éprouvette avec le piston;
- Initialiser les dispositifs de mesure des forces et des enfoncements;

- Exécuter le poinçonnement en maintenant la vitesse de pénétration à 1,27 mm/min \pm 0,1 mm/min;
- Etablir la courbe effort-déformation correspondant, au moins, aux enfoncements de 1,25 mm; 2 mm; 2,5 mm; 5 mm; 7,5 mm et 10 mm;
- Déterminer la teneur en eau de l'éprouvette selon une des méthodes normalisées.

III.4.2.6. Résultats de l'essai:

On calcul les valeurs suivantes ; le maximum entre ces derniers valeurs est l'indice portant immédiat «IPI»:

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

$$\frac{\text{effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement(en KN)}}{19.93} \times 100$$

Les résultats de l'essai CBR seront présentés au chapitre IV.

III.4.3. Essai de cisaillement a la boite:

III.4.3.1. Introduction:

Dans tous les problèmes de stabilité des sols (étude de fondation, ouvrage de soutènement, remblais, talus...), il est nécessaire de connaître la résistance du sol. Mais cette résistance est souvent difficile à déterminer, spécialement lorsqu'il s'agit d'un sol cohérent. La résistance d'un sol peut être définie par nombreux essais, parmi eux: l'essai de cisaillement rectiligne dit (à la boit).

III.4.3.2. But de l'essai:

Cette essai a pour but de déterminer les deux paramètres "C" et " φ " graphiquement à partir de la courbe intrinsèque du sol: $\tau = C + \sigma \tan \varphi$

- $\tan \varphi$: représente la pente de la courbe;
- C: représente τ à la contrainte σ égale à 0.

III.4.3.3. Matériel utilise:

- La boite de Casagrande;
- Le bâti de consolidation sur lequel on dépose la boite surmontée d'un étrier recevant les poids qui vont fournir la charge N;
- Un échantillon de sol d'environ 250 ml;
- Le dispositif de cisaillement qui permet de cisailer le sol à vitesse constante, il est constitué:
- D'un anneau dynamométrique;

- D'un chariot sur lequel, on vient placer la boîte de Casagrande, le chariot est animé par un moteur d'un mouvement de translation à vitesse constante réglable.



Figure (III, 10): Matériel Essai de cisaillement a la boite.

III.4.3.4. Principe de l'essai:

a) Mise en place de l'échantillon dans la boîte:

Les deux demi-boîtes étant verrouillées, on place successivement:

- Le fond de boîte, une pierre poreuse;
- Une plaque striée, les stries étant perpendiculaires au sens de cisaillement (les plaques perforées permettent les essais drainés, les plaques pleines sont utilisées pour les essais non drainés);
- L'échantillon de sol;
- Une plaque striée identique à la première;
- Une pierre poreuse, le piston.

b) Mise en place de la boîte sur la machine:

- Placement de l'étrier de charge sur le piston de la boîte;
- Placement du comparateur vertical et mise à zéro de celui-ci;
- Montage de l'anneau dynamométrique sur la machine;
- Reliage à la boîte et bien compenser les jeux en mettant l'anneau légèrement en traction et en ramenant lentement le comparateur de l'anneau au zéro;
- Nous appliquons sur l'éprouvette la charge désirée, en principe: 1, 2, 3 bars;

- Désolidarisation des deux demi-boîtes en enlevant les goupilles;
- Mise en route à la vitesse désirée (1mm/min);
- Nous arrêtons la manipulation à 6 mm de déplacement.

Les résultats de l'essai de cisaillement à la boîte seront présentés au chapitre IV.

III.5. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents essais nécessaires pour la partie d'identification de notre sol, ces essais après avoir les exécuter il faut qu'ils respectent les normes. Selon les résultats des essais d'identification, nous concluons que le schiste utilisé dans cette étude est un sol très dense, dont la masse volumique absolue de $29,9 \text{ KN/m}^3$, de type argile peu plastique selon les résultats des limites d'Atterberg et de classe B6 selon GTR. Plus encore, on a étudié les propriétés physiques et mécaniques des ajouts de la chaux et de ciment, a pour objet de proposer les différents pourcentages du traitement par ces ajouts, et étudier le comportement mécanique du sol schisteux après traitement.

Chapitre IV:
Résultats et interprétations

Chapitre IV: Résultats et interprétations

IV.1. Introduction:

L'utilisation d'un traitement à la chaux et au ciment aboutit à l'amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques du matériau traité. Les résultats obtenus au laboratoire sont présentés sous forme des courbes en tenant compte des différents ajouts de la chaux et de ciment dont les proportions sont (0%, 1%, 3%, 7%), et faire une comparaison entre les deux types du traitement. Quatre types d'essais sont effectués pour voir le comportement physique et mécaniques: les essais de limite d'Atterberg, essais Proctor, les essais de California Bearing Ratio « CBR » et l'essai de cisaillement.

IV.2. Résultats de l'essai des limites d'Atterberg:

IV.2.1. Avant traitement:

La figure (IV, 01) montre la variation de la limite de liquidité en fonction de nombre de coups:

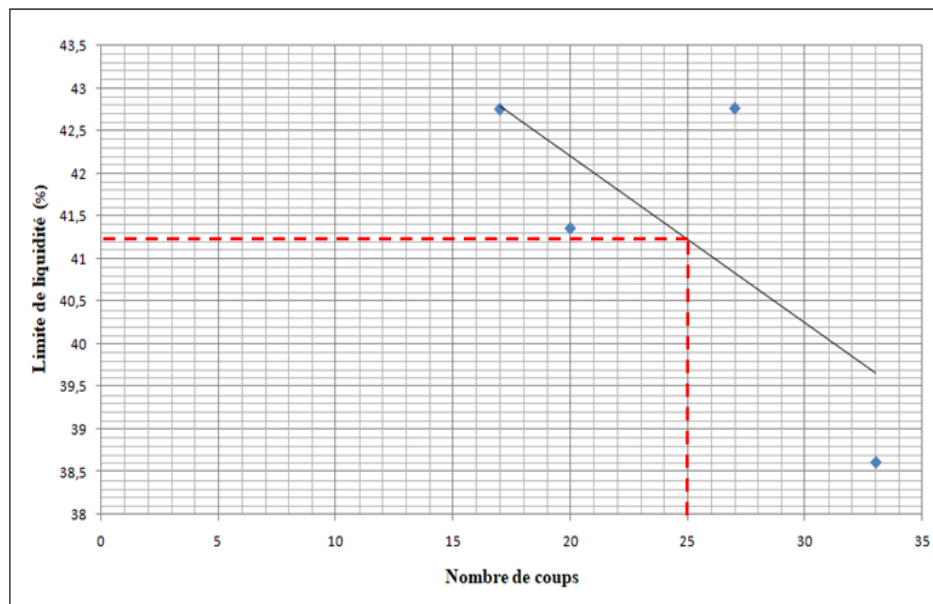


Figure (IV, 01): Courbe de la limite de liquidité.

D'après la figure (IV, 01); la limite de liquidité égal 41.2 %, et d'après l'essai de plasticité la limite de plasticité égal 21.39 %. Donc, l'indice de plasticité égal 19.81%.

IV.2.2. Après traitement:

L'ajout d'un liant au sein du sol provoque une modification de sa teneur en eau, et de leur sensibilité à l'eau. Pour cela, nous allons étudier l'influence des différents pourcentages de la chaux et de ciment sur les limites d'Atterberg de notre sol étudié.

a) Traitement à la chaux:

- L'ajout de 1% de chaux:

La figure (IV ,02) montre la variation de la limite de liquidité en fonction de nombre de coups:

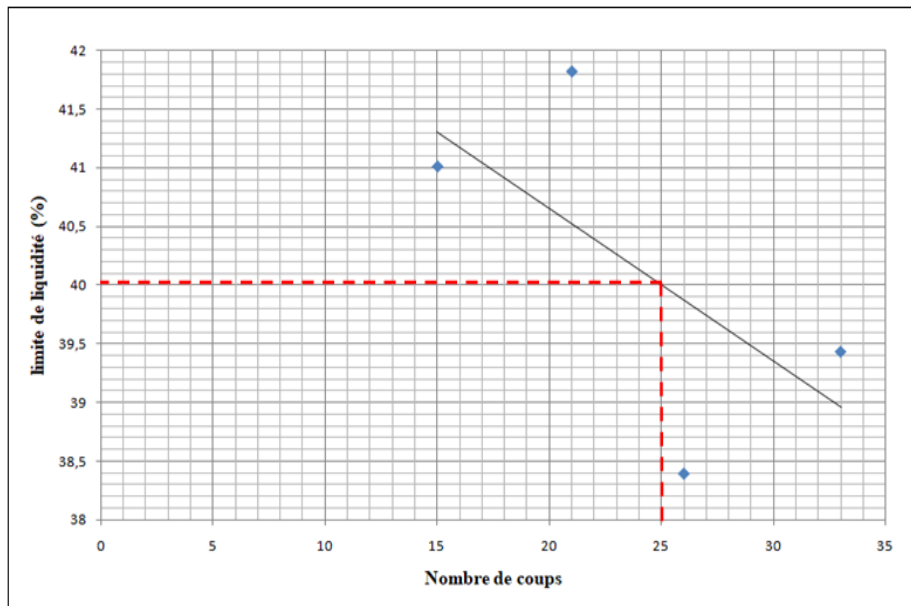


Figure (IV, 02): Courbe de la limite de liquidité (1% de chaux).

Selon la figure (IV, 02) W_L égal 40 %. L'essai de la limite de plasticité qui donne une valeur de 30,28 % de W_p , donc l'indice de plasticité égal 9,72 %.

- L'ajout de 3 % de chaux:

La figure (IV ,03) montre la variation de la limite de liquidité en fonction de nombre de coups:

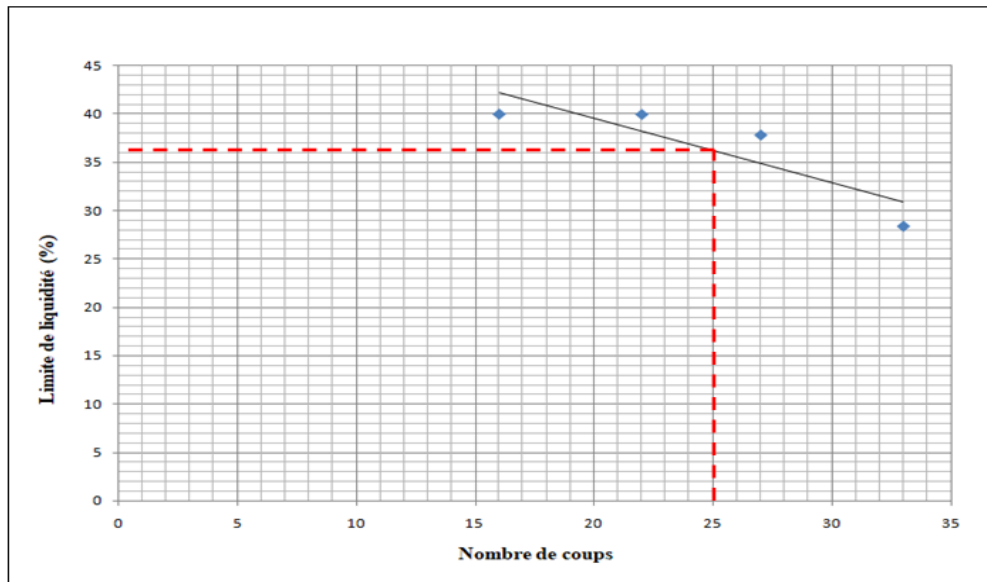


Figure (IV ,03) : Courbe de la limite de liquidité (3% de chaux).

D'après la courbe de la figure précédente, nous remarquons que WL égal 36 %. L'essai de la limite de plasticité donne Wp égal 31,34%, donc l'indice de plasticité égal 4,66%.

- **L'ajout de 7 % de chaux:**

La figure (IV ,04) montre l'évolution de la limite de liquidité en fonction de nombre de coups:

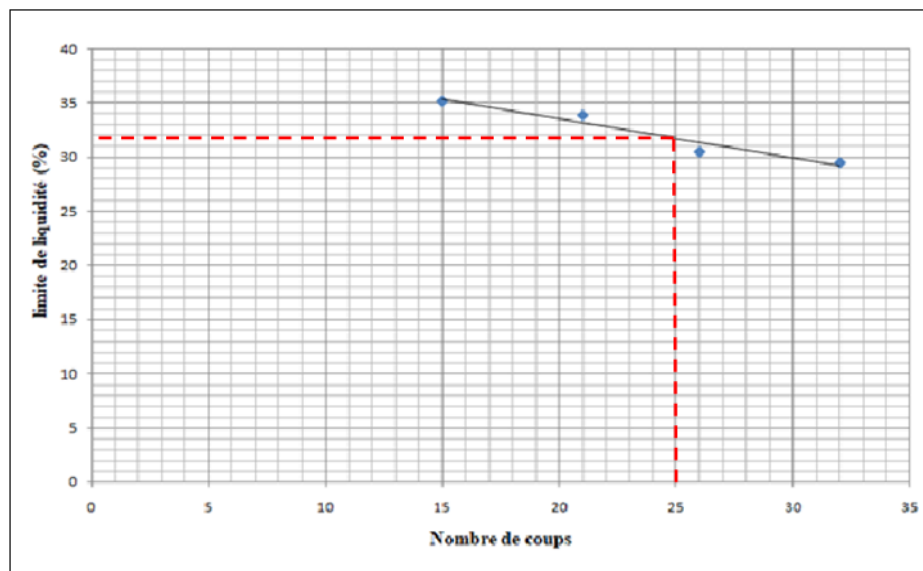


Figure (IV, 04): Courbe de la limite de liquidité (7 % de chaux).

D'après la courbe de la figure précédente, nous constatons que WL égal 31,5%. L'essai de la limite de plasticité qui donne une valeur de 29,21% de Wp, donc l'indice de plasticité égal 2,29 %.

- **Récapitulatifs des résultats obtenus:**

La figure (IV ,05) montre la variation de la limite de liquidité en fonction des différents pourcentages de la chaux (1%, 3% et 7%).

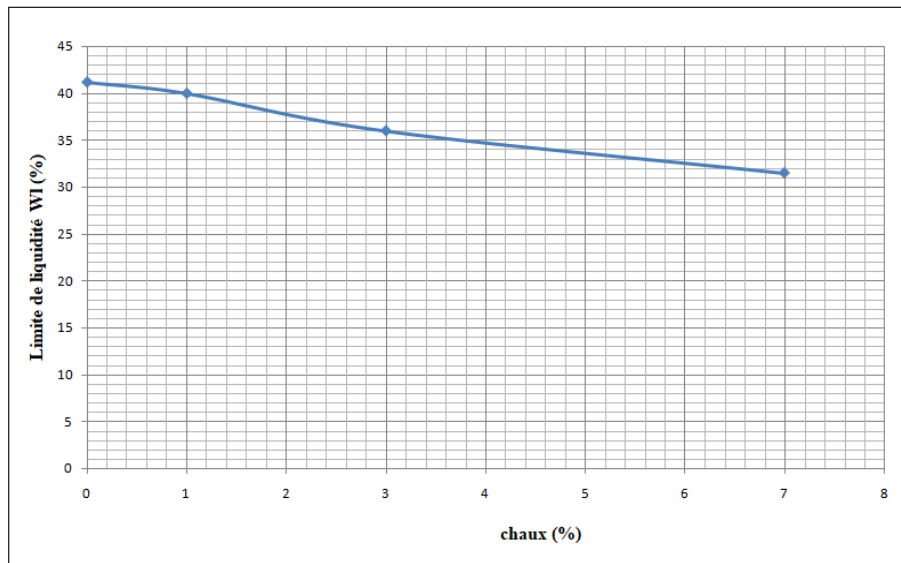


Figure (IV, 05): Variation de la limite de liquidité en fonction de % de la chaux.

Nous constatons d'après la figure (IV ,05), que l'augmentation de la teneur en chaux provoque une diminution de la limite de liquidité.

La figure (IV ,06) montre l'évolution de la limite de plasticité en fonction des différents pourcentages de la chaux (1%, 3% et 7%).

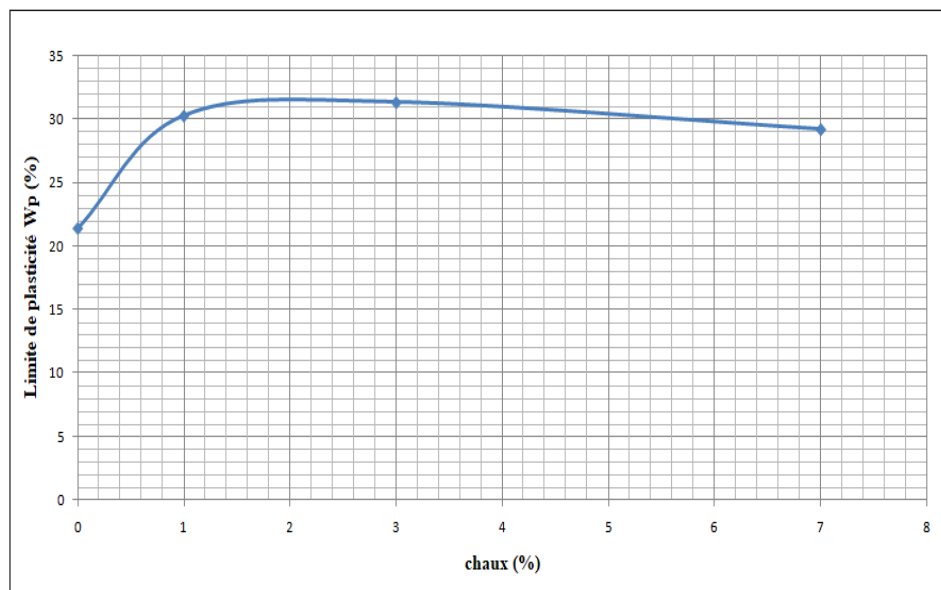


Figure (IV, 06): Evolution de la limite de plasticité en fonction de % de la chaux.

D'après les résultats de la figure (IV, 06), nous remarquons que la limite de plasticité augmente jusqu'à la teneur 3 % de la chaux et elle atteint sa valeur maximale de 31,34 %, mais à partir de 3 % la valeur de W_p est décroissante linéairement jusqu'à 7 % de la chaux.

La figure (IV ,07) montre l'évolution de l'indice de plasticité de plasticité en fonction des différents pourcentages de chaux (1%, 3% et 7%).

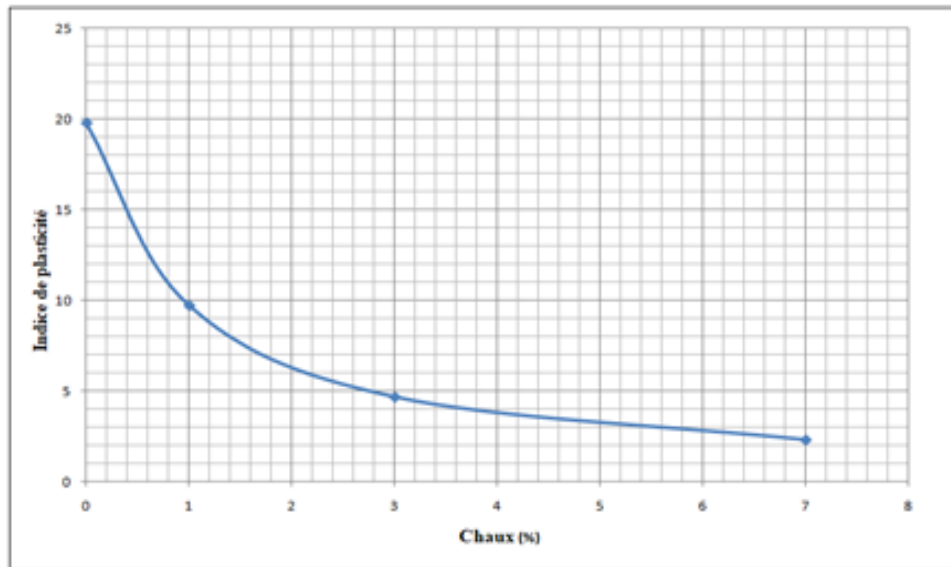


Figure (IV, 07): Evolution de l'indice de plasticité en fonction de % de la chaux.

D'après la figure (IV ,07), nous remarquons que l'indice de plasticité diminue en fonction de l'augmentation de pourcentages de la chaux.

D'après les résultats présentés aux figures précédentes, on peut dire que l'addition de la chaux à notre type de sol avec les pourcentages 1, 3 et 7% provoque une réduction de la limite de liquidité, et une augmentation de la limite de plasticité, donc une diminution de la sensibilité à l'eau. L'indice de plasticité décroît avec l'ajout de la chaux, cette diminution résulte de l'augmentation de la limite de plasticité, donc cette évolution provoque un déplacement du domaine de plasticité vers l'état sec.

b) Traitement au ciment:

- **L'ajout de 1% ciment:**

La figure (IV, 08) montre la variation de la limite de liquidité en fonction de nombre de coups:

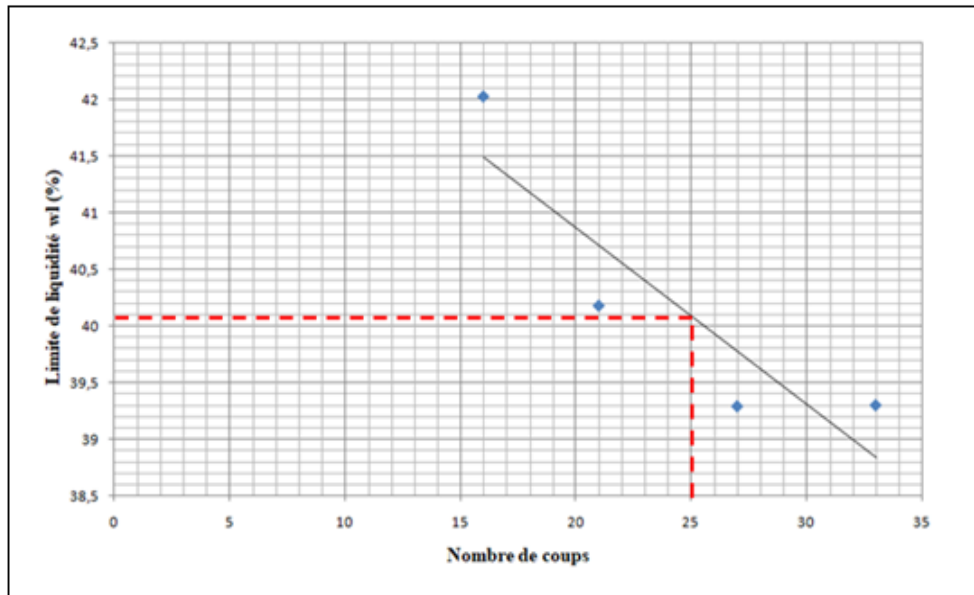


Figure (IV, 08): Courbe de la limite de liquidité (1% ciment).

D'après la figure ci-dessus, nous remarquons que WL égal 40,1 %. L'essai de la limite de plasticité donne Wp égal 27,66%, donc l'indice de plasticité égal 12,44 %.

- **L'ajout de 3% ciment:**

La figure (IV, 09) montre l'évolution de la limite de liquidité en fonction de nombre de coups:

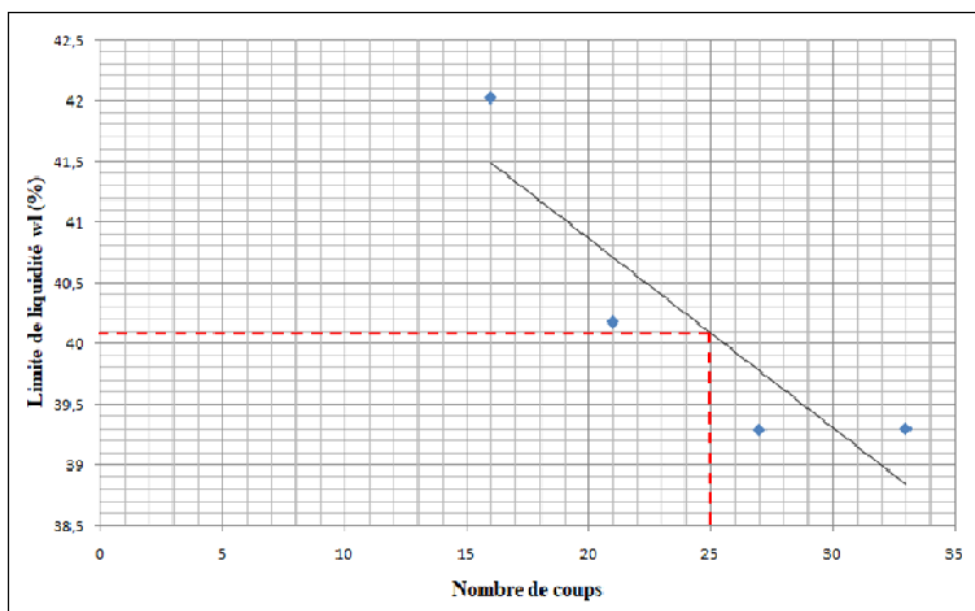


Figure (IV, 09): Courbe de la limite de liquidité (3% ciment).

Selon la figure précédente, WL égal 39,72 %, l'essai de la limite de plasticité qui donne une valeur de 27,50 % de Wp, donc l'indice de plasticité égal 12,22 %.

- **L'ajout de 7% ciment:**

La figure (IV, 10) montre la variation de la limite de liquidité en fonction de nombre de coups:

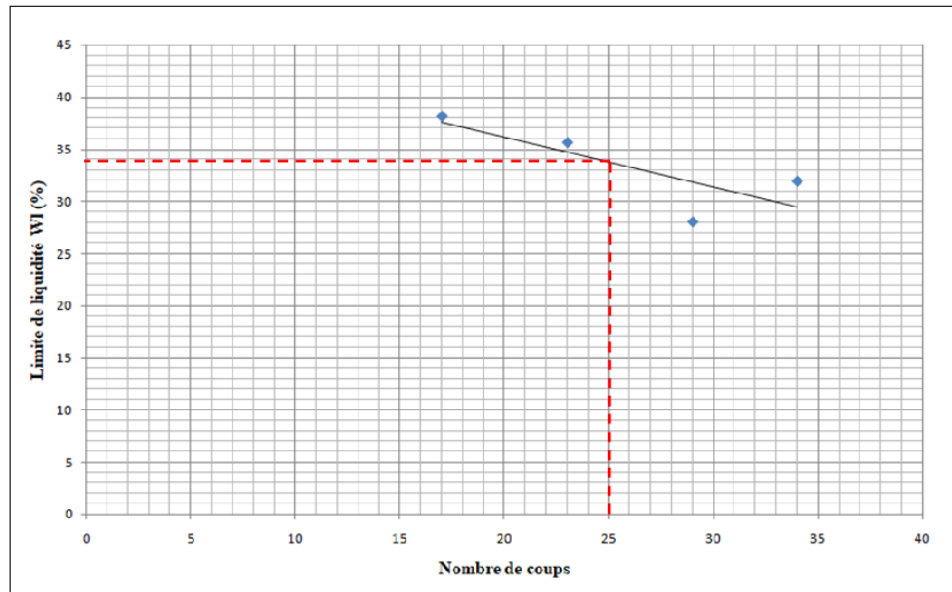


Figure (IV, 10): Courbe de la limite de liquidité (7 % ciment).

D'après la figure (IV, 10), WL égal 33,66 %, Wp égal 27,47 % selon l'essai de la limite de plasticité, donc l'indice de plasticité égal 6,19 %.

- **Récapitulatifs des résultats obtenus:**

La figure (IV, 11) montre la variation de la limite de liquidité en fonction des différents pourcentages de ciment (1%, 3% et 7%).

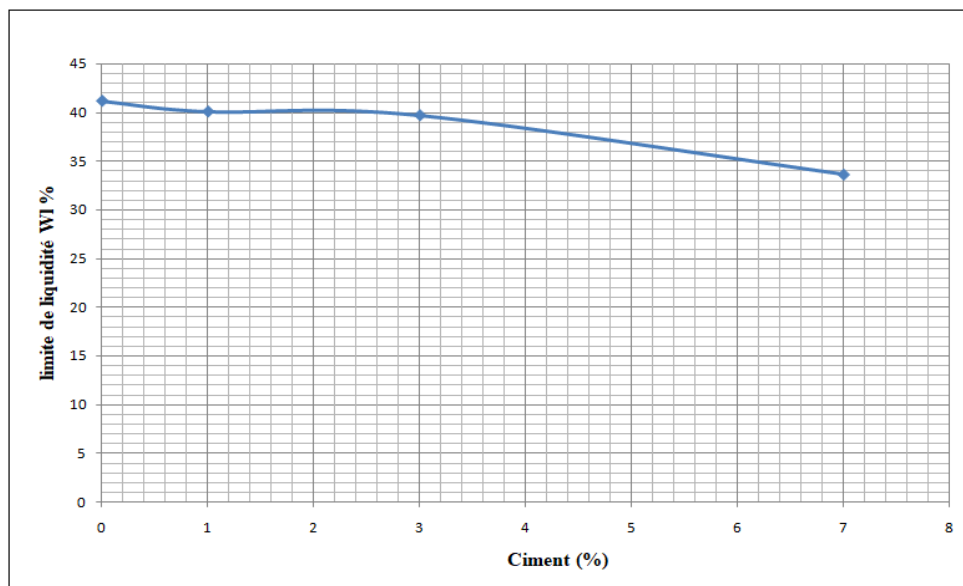


Figure (IV, 11): Courbe de la limite de liquidité en fonction de % ciment.

Selon la figure (IV, 11), la limite de liquidité diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage du ciment à cause d'hydratation de ciment.

La figure (IV, 12) montre l'évolution de la limite de plasticité en fonction des différents pourcentages de ciment (1%, 3% et 7%).

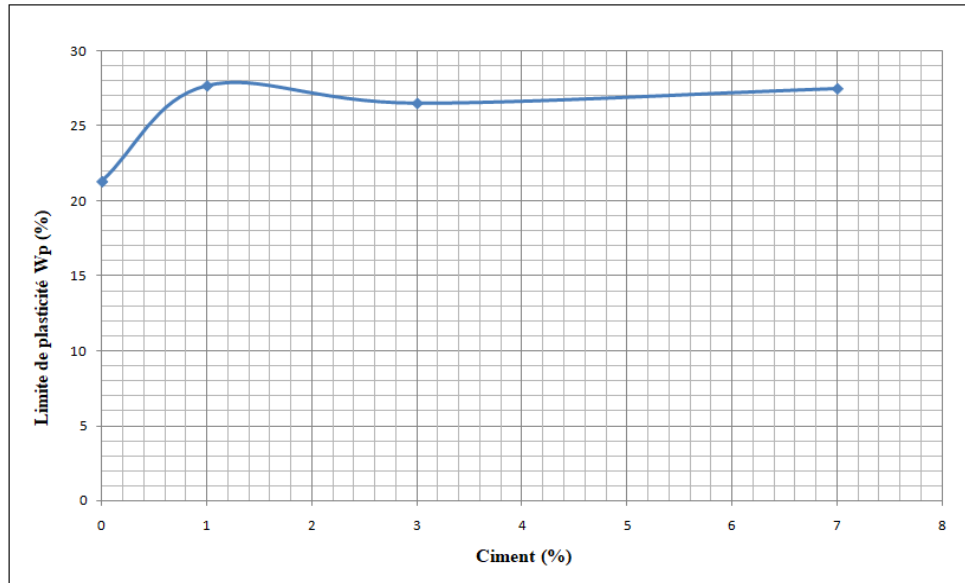


Figure (IV, 12): Courbe de limite de plasticité en fonction de % ciment.

Selon la figure (IV, 12), la limite de plasticité augmente jusqu'à le pourcentage 1 % de ciment, puis nous remarquons une légère diminution à 3 % de ciment, enfin cette limite augmente jusqu'à 7 % de l'ajout de ciment.

La figure (IV, 13) montre la courbe de l'indice de plasticité en fonction des différents pourcentages de ciment (1%, 3% et 7%).

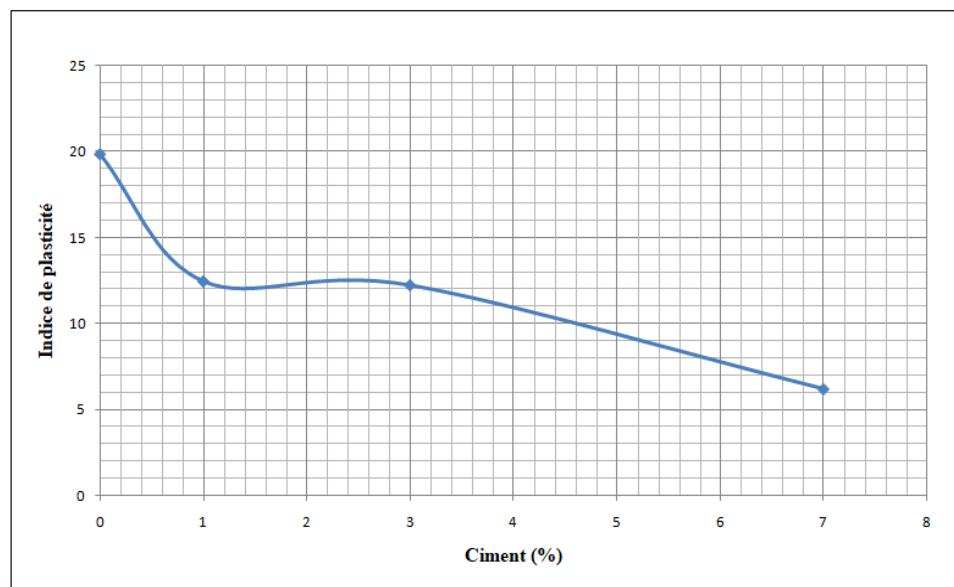


Figure (IV, 13): Courbe de l'indice de plasticité en fonction de % ciment.

Selon la figure (IV, 13), l'indice de plasticité varie inversement avec l'augmentation de pourcentages de ciment.

D'après les résultats présentés aux figures précédentes, on peut dire que l'addition du ciment à notre type de sol avec des pourcentages de 1, 3 et 7 % provoque une diminution de la limite de plasticité à cause de la floculation des particules d'argile. L'ajout du ciment a engendré une diminution de l'indice de plasticité. Cette diminution indique une amélioration de la maniabilité du sol. On constate une augmentation de l'indice de consistance, ceci montre une amélioration dans le comportement plastique du matériau. La réaction chimique du ciment avec le sol est la cause principale de cette modification d'état.

c) Traitement mixte (7 % ciment + 1,5 % chaux):

La figure (IV, 14) montre la variation de la limite de liquidité en fonction de nombre de coups:

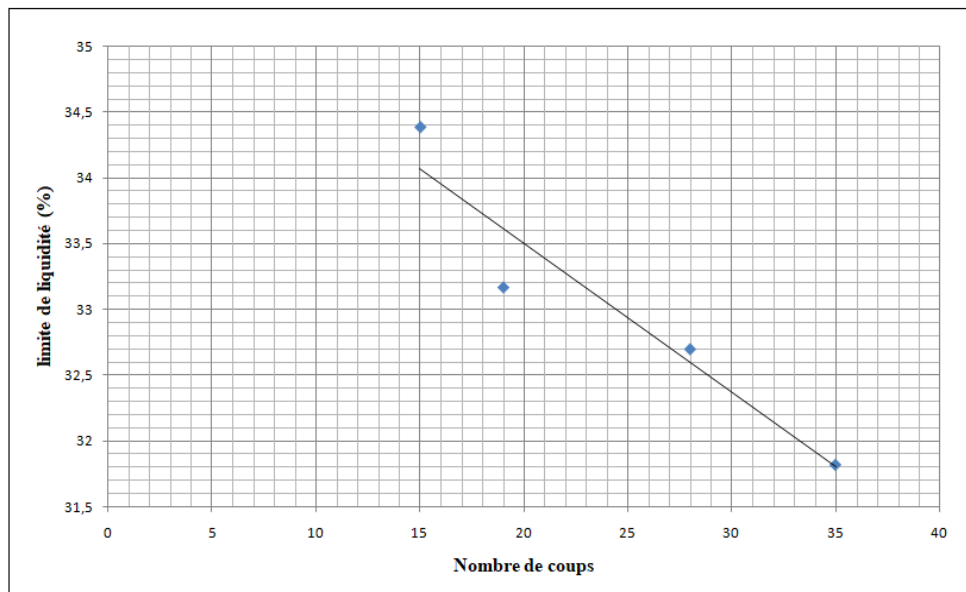


Figure (IV, 14): Courbe de la limite de liquidité (ajout mixte).

D'après la figure précédente, WL égal 32.92 %. L'essai de la limite de plasticité donne Wp égal 26, 2%, donc l'indice de plasticité égal 6.72 %. Plus encore, nous remarquons que les valeurs des limites de liquidité et de plasticité dans notre sol après traitement mixte, sont inférieures à celles des valeurs des limites du sol avant traitement, cette diminution des limites provoque une diminution de l'indice de plasticité, donc l'ajout mixte (ciment et la chaux) ont engendrés une diminution de l'indice de plasticité, cette diminution indique une amélioration de la maniabilité du sol, ceci montre l'effet du ciment après traitement.

IV.3. Les résultats de l'essai Proctor modifié:

IV.3.1. Avant traitement:

D'après la courbe de compactage de la figure (IV, 15), les valeurs optimum sont: W_{opt} égal 14,80%, et ρ_{dopt} égal 1.8 t/m^3 .

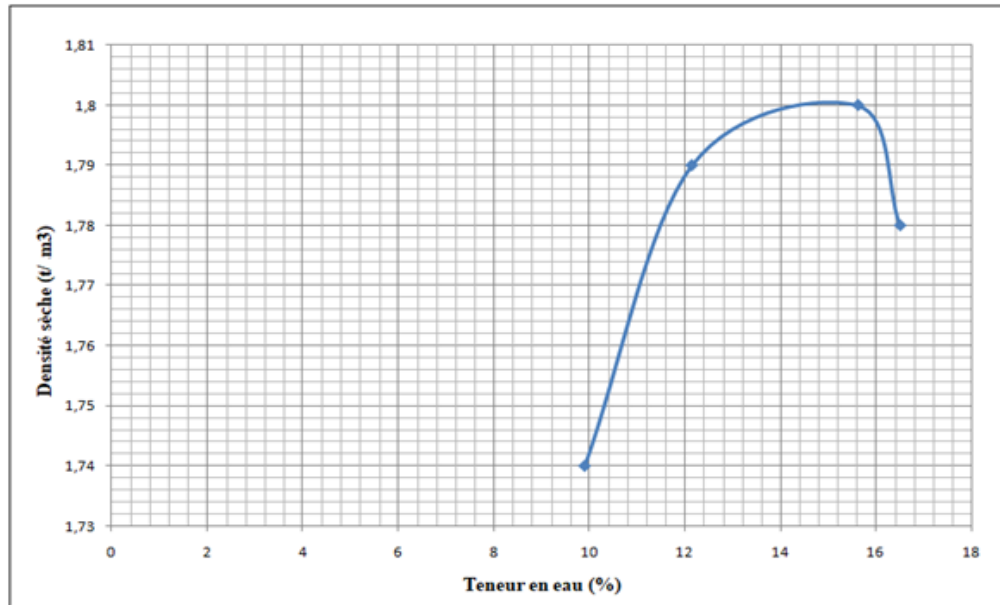


Figure (IV, 15): Courbe de compactage.

IV.3.2. Après traitement:

a) Traitement à la chaux:

- L'ajout de 1% de chaux:

La figure (IV, 16) présente la courbe de compactage, et les valeurs optimums sont: W_{opt} égal 14,50% et ρ_{dopt} égal 1.8 t/m^3 .

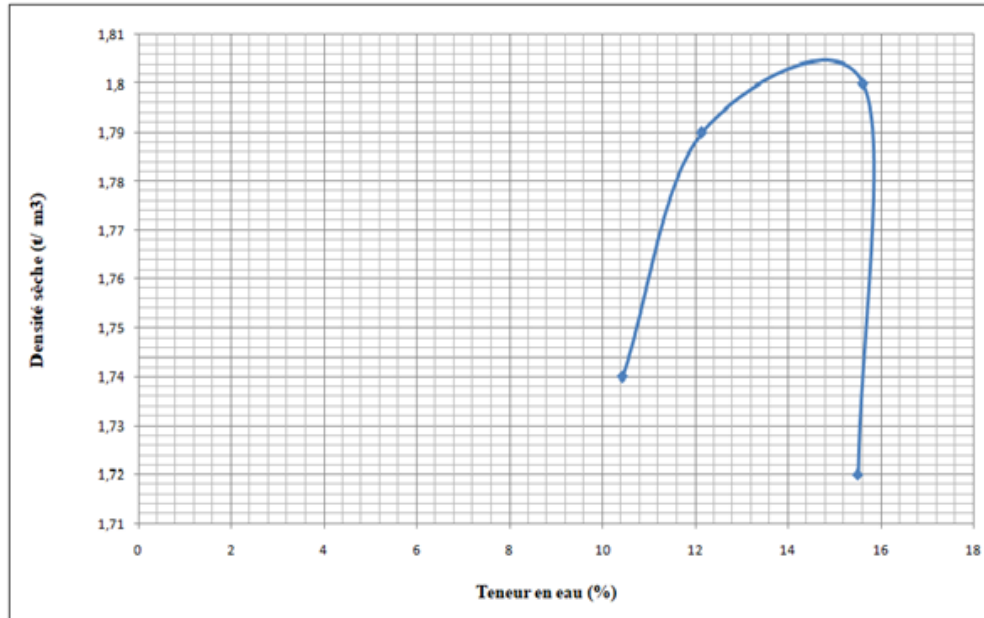


Figure (IV, 16): Courbe de compactage (1% de chaux).

- **L'ajout de 3 % de chaux:**

La figure (IV, 17) présente la courbe de compactage et donne les valeurs optimum suivante: W_{opt} égal 13,20% et ρ_{dopt} égal 1.79 t/m³

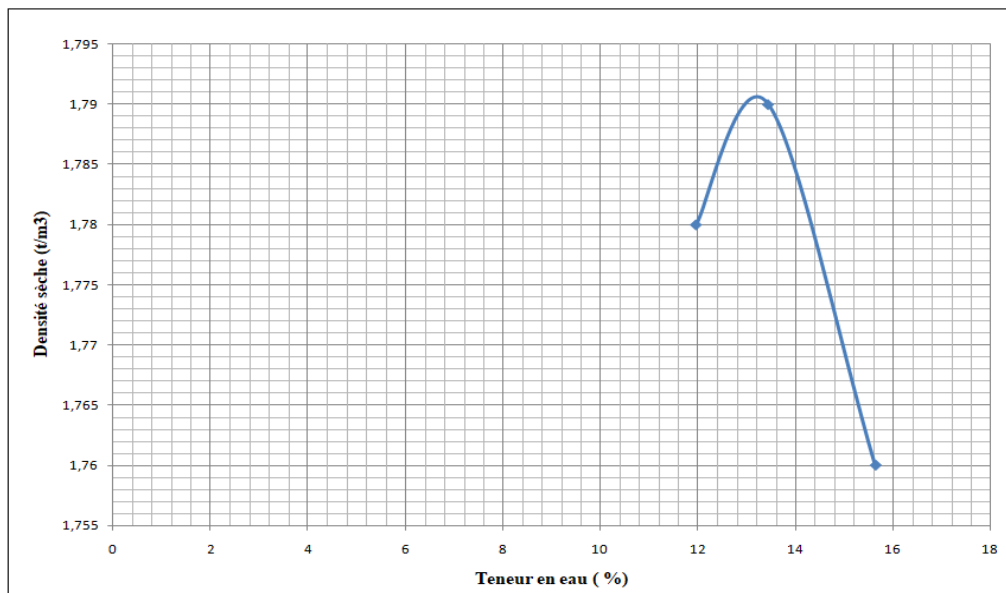


Figure (IV, 17): Courbe de compactage (3 % de chaux).

- **L'ajout de 7 % de chaux:**

La figure (IV, 18) présente la courbe de compactage et donne les valeurs optimum suivante: W_{opt} égal 12,80% et ρ_{dopt} égal 1.84 t/m³.

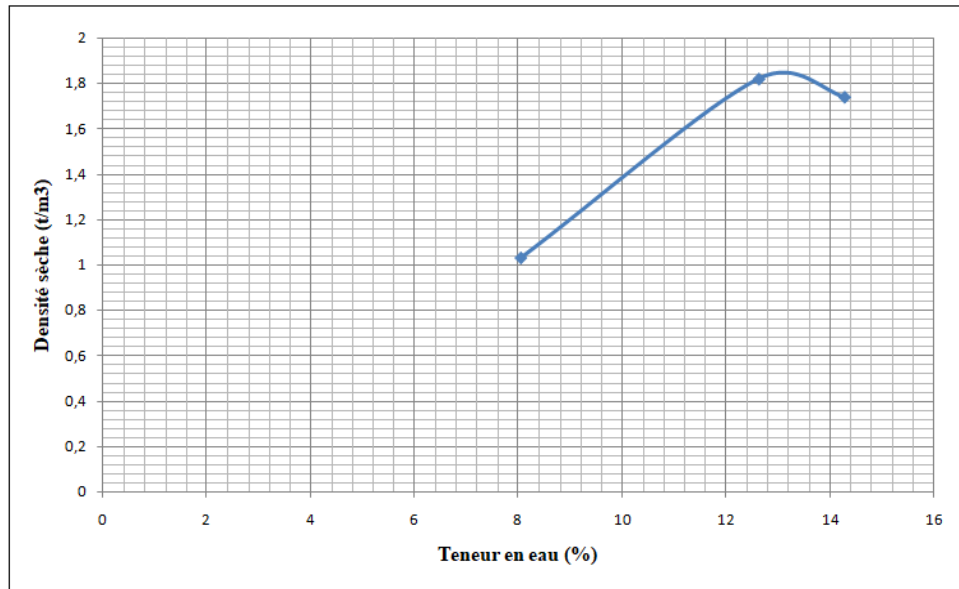


Figure (IV, 18): Courbe de compactage (7 % de chaux).

D'après les résultats obtenus, on peut dire que l'addition de la chaux à notre type de sol avec les pourcentages 1, 3 et 7 % implique une réduction de la teneur en eau et la densité sèche optimale du sol.

b) Traitement de ciment:

• **L'ajout de 1% de ciment:**

La figure (IV, 19) présente la courbe de compactage et donne les valeurs optimum suivante: W_{opt} égal 14,60% et ρ_{dopt} égal 1.81 t/m³.

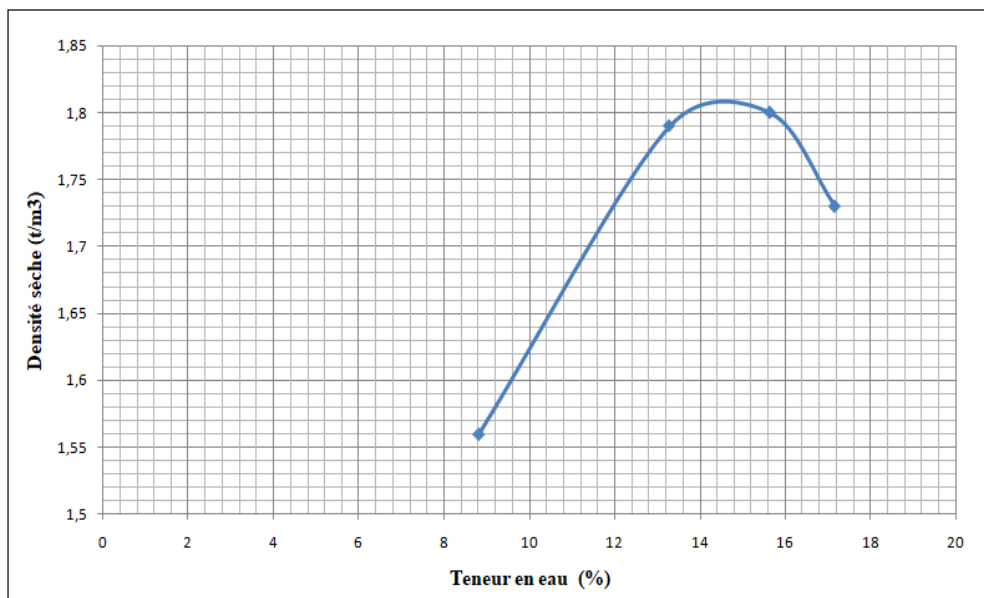


Figure (IV, 19): Courbe de compactage (1% ciment).

- **L'ajout de 3% de ciment:**

La figure (IV, 20) présente la courbe de compactage, et les valeurs optimums sont: W_{opt} égal 14,50% et ρ_{dopt} égal 1.8 t/m³.

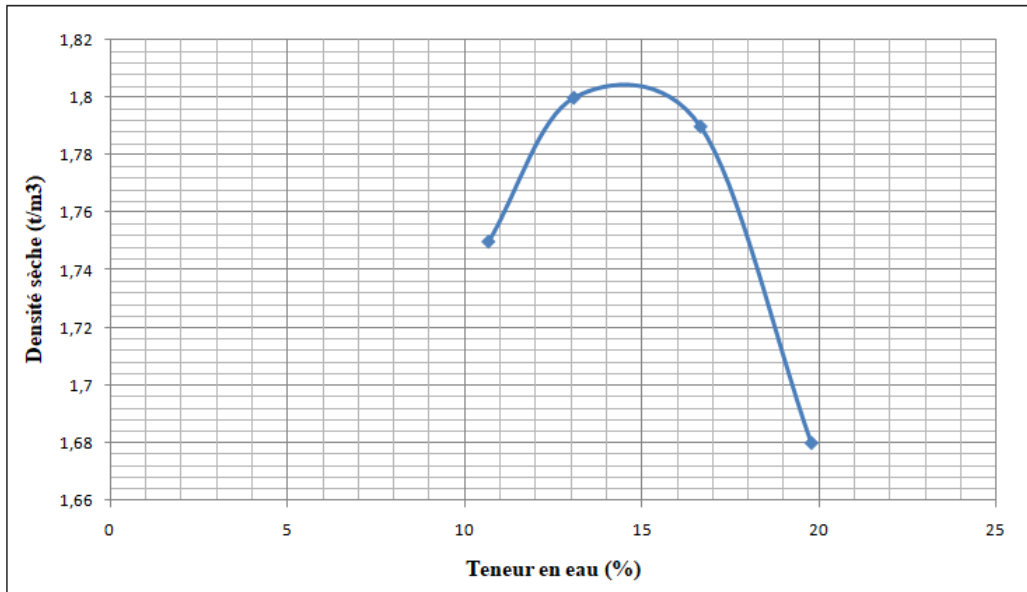


Figure (IV, 20): Courbe de compactage (3 % ciment).

- **L'ajout de 7 % de ciment:**

La figure (IV, 21) présente la courbe de compactage et donne les valeurs optimum suivante: W_{opt} égal 13,10% et ρ_{dopt} égal 1.82 t/m³.

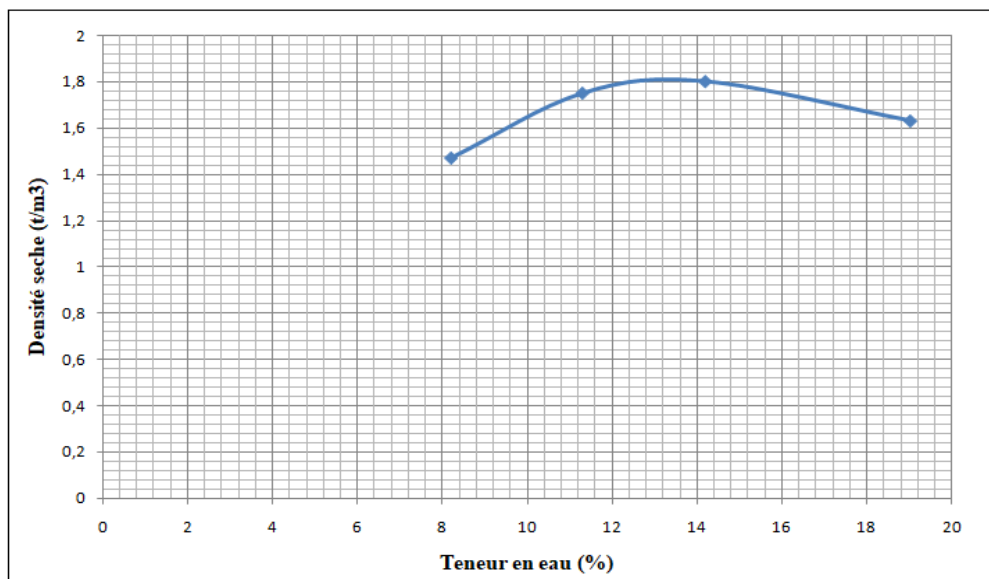


Figure (IV, 21): Courbe de compactage (7 % ciment).

D'après les résultats obtenus, on peut dire que l'addition du ciment à notre type de sol avec les pourcentages 1, 3 et 7 % implique une réduction de la teneur en eau et une augmentation de la densité sèche optimale du sol.

c) Traitement mixte (7 % ciment + 1,5 % chaux):

La figure (IV, 22) présente la courbe de compactage, et donne les valeurs optimum suivante: W_{opt} égal 11,2 % et ρ_{dopt} égal 2,09 t/m³.

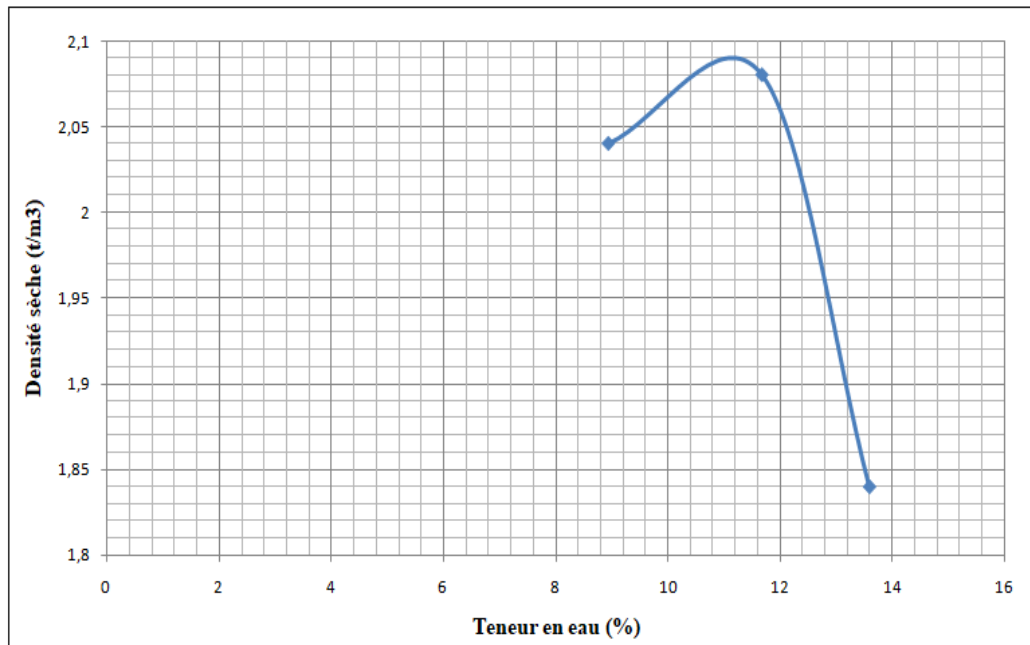


Figure (IV, 22): Courbe de compactage (mixte).

Selon la figure (IV, 22), nous enregistrons une diminution de la densité sèche optimale et une augmentation de la teneur en eau du sol après traitement mixte que celle du sol naturel.

IV.3.3. Récapitulatifs des résultats obtenus:

La figure (IV, 23) présente la courbe de la densité sèche optimale en fonction du pourcentage d'ajout des liants:

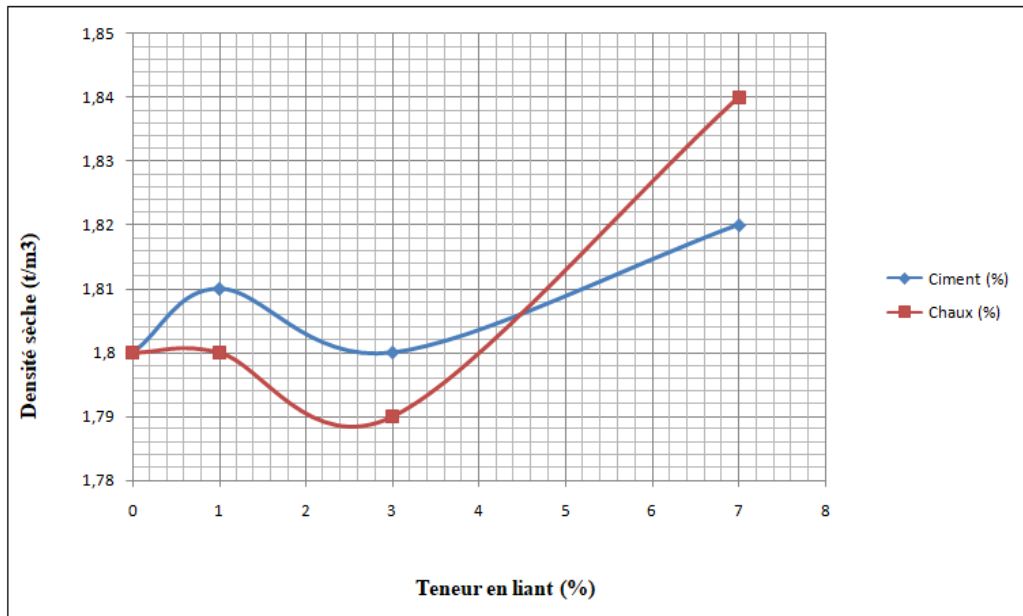


Figure (IV, 23): Evolution de la densité sèche optimale en fonction du pourcentage d'ajout des liants (ciment et chaux).

D'après la figure (IV, 23), on peut dire que l'addition du ciment et de la chaux à notre type de sol avec les pourcentages 1, 3 et 7 %, on distingue que la densité sèche optimale la plus élevée est obtenue à 7 % d'ajout de chaux, et ciment correspond à la teneur en eau optimale la plus basse (sauf pour 3% d'ajout).

La figure (IV, 24) présente la courbe de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage d'ajout des liants (ciment ou chaux).

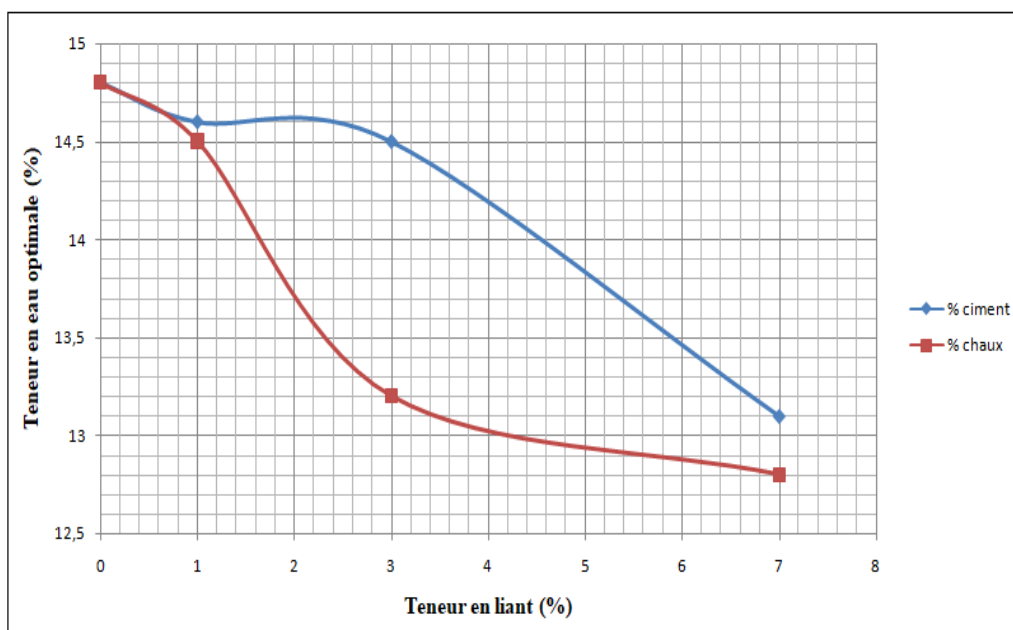


Figure (IV, 24): Evolution de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage d'ajout des liants (ciment et chaux).

D'après les résultats obtenus, on peut dire que l'addition du ciment et chaux à notre type de sol avec les pourcentages 1, 3 et 7 %, on distingue que la teneur en eau optimale diminue avec l'augmentation de pourcentages des teneurs en liant.

IV.4. Résultats de l'essai CBR Immédiat:

Les courbes d'évolution de l'indice CBR en fonction de la teneur en eau, pour le sol argileux traité avec des pourcentages variables de la chaux et de ciment. Les tests de CBR ont été exécutés avec les pourcentages de 1, 3 et 7%.

IV.4.1. Avant traitement:

La figure (IV, 25) présente l'évolution de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement, on trouve que l'indice de portance immédiat égal 13,03 %.

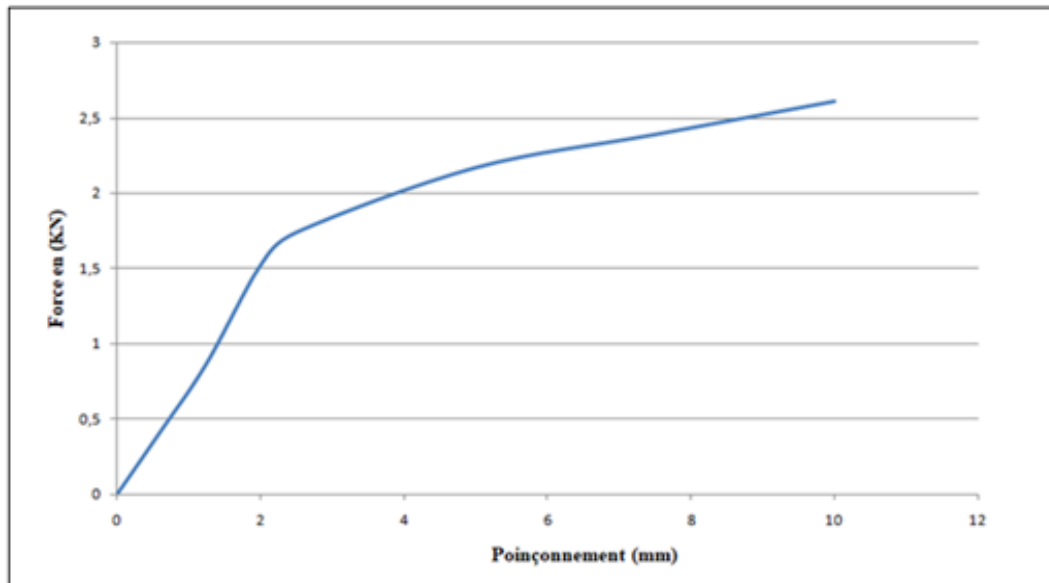


Figure (IV, 25): Courbe de la portance IPI.

IV.4.2. Après traitement:

a) Traitement de la chaux:

- L'ajout de 1% chaux:

La figure (IV, 26) présente la variation de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement, on trouve que l'indice de portance immédiat «IPI» égal 42,32 %.

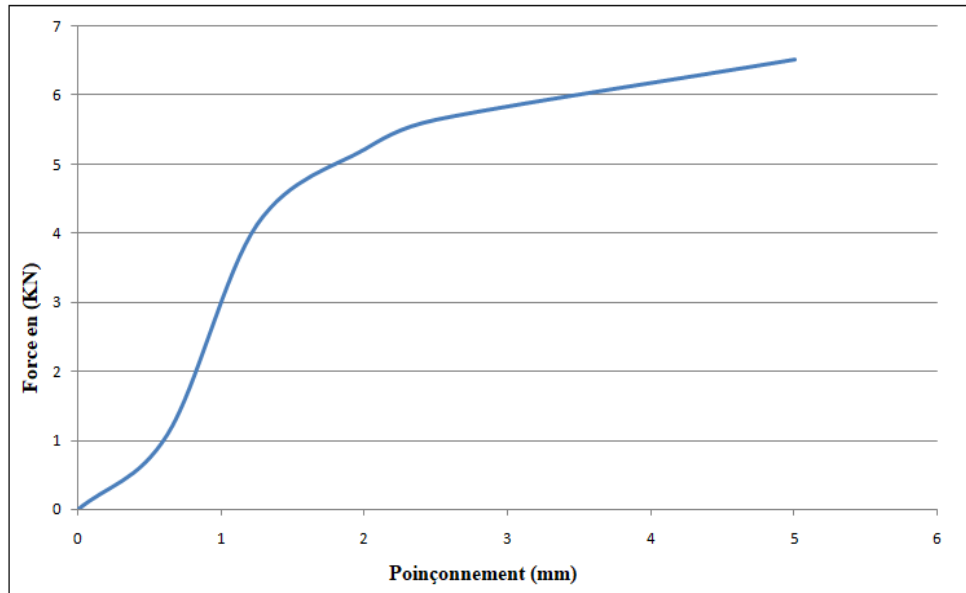


Figure (IV, 26): Courbe de la portance IPI (1% chaux).

- **L'ajout de 3% chaux:**

La figure (IV, 27) présente l'évolution de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement, on trouve que l'indice de portance immédiat égal 55,35 %.

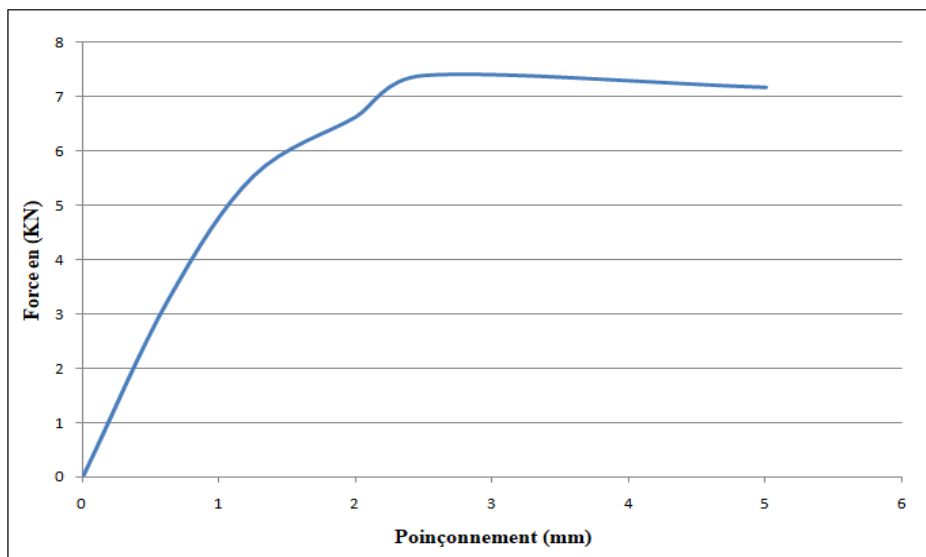


Figure (IV, 27): Courbe de la portance IPI (3% chaux).

- **L'ajout de 7% chaux:**

La figure (IV, 28) présente la variation de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement, on trouve que l'indice de portance immédiat « IPI » égal 60,22 %.

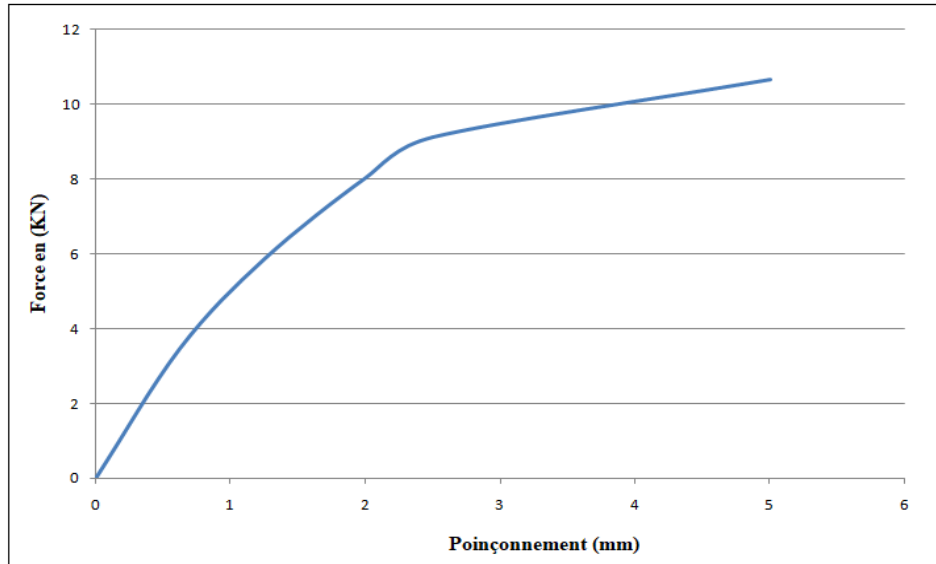


Figure (IV, 28): Courbe de la portance IPI (7% chaux).

- **Récapitulatifs des résultats obtenus:**

La figure (IV, 29) présente la variation des forces de poinçonnements en fonction de la lecture de poinçonnements relatives pour les différents pourcentages d'ajout de la chaux (1%, 3% et 7%).

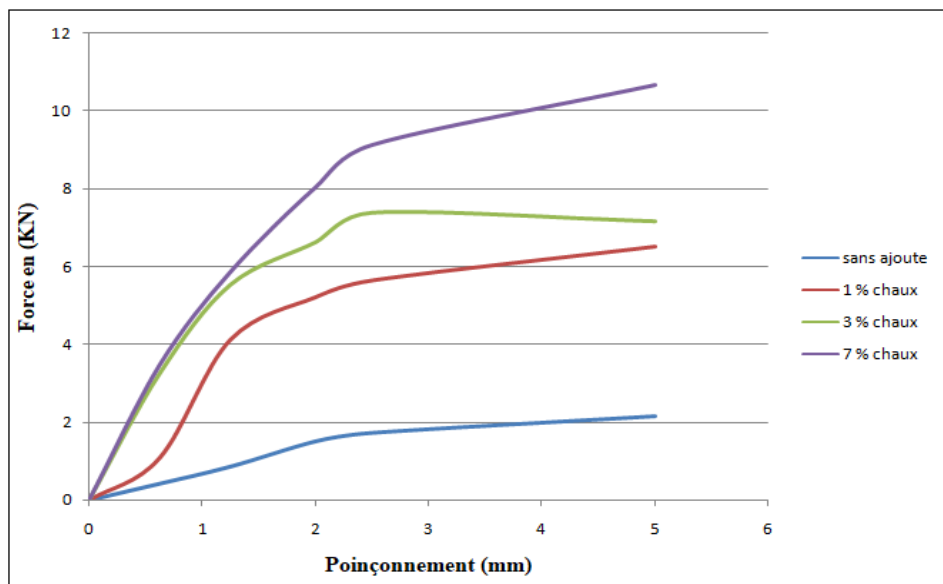


Figure (IV, 29): Courbe de poinçonnement en fonction de % d'ajout de la chaux.

Selon la figure (IV, 29), nous enregistrons que la force de poinçonnement varie avec l'augmentation des différents pourcentages d'ajout de la chaux, et la force de poinçonnement de 7% d'ajout est plus élevée par rapport aux autres pourcentages.

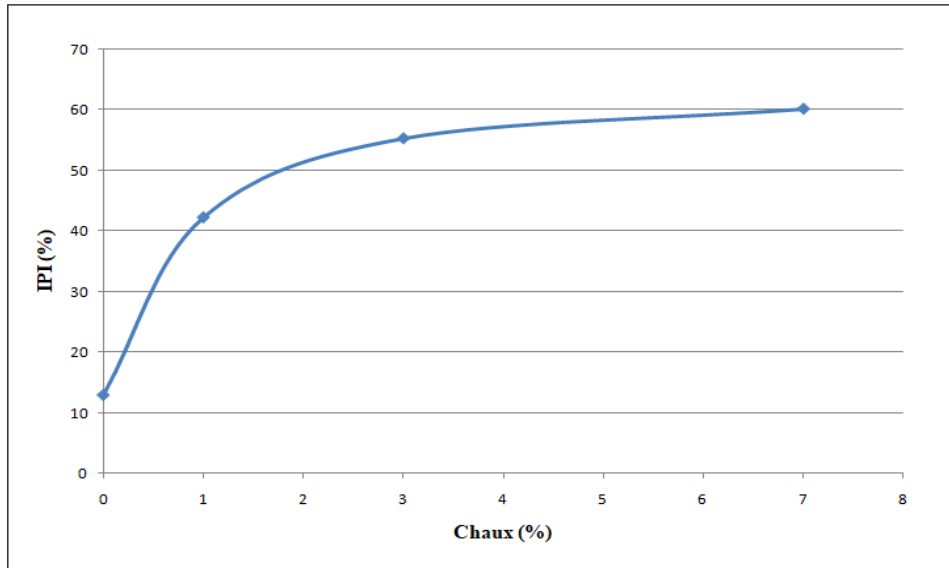


Figure (IV, 30): Variation de «IPI» en fonction de % d'ajout de la chaux.

Selon la figure (IV, 30), l'addition de la chaux à notre type de sol avec les pourcentages 1, 3 et 7 % provoque une augmentation des valeurs de l'IPI. Donc, l'amélioration de la portance de l'argile traitée justifiée par la diminution du volume des vides dans le sol qui est due à la bonne distribution des particules du sol avec les particules fines de la chaux.

b) Traitement de ciment:

- L'ajout de 1% de ciment:

La figure (IV, 31) présente la variation de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement, on trouve que l'indice de portance immédiat «IPI» égal 14,68%.

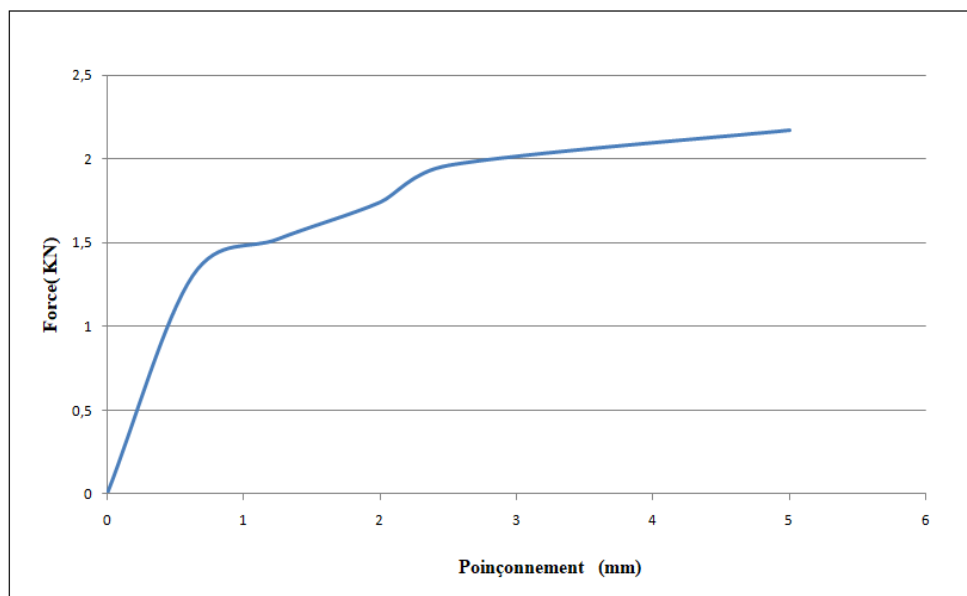


Figure (IV, 31): courbe de la portance IPI (1% ciment).

- **L'ajout de 3% de ciment:**

La figure (IV, 32) présente l'évolution de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement, on trouve que l'indice de portance immédiat égal 35,83%.

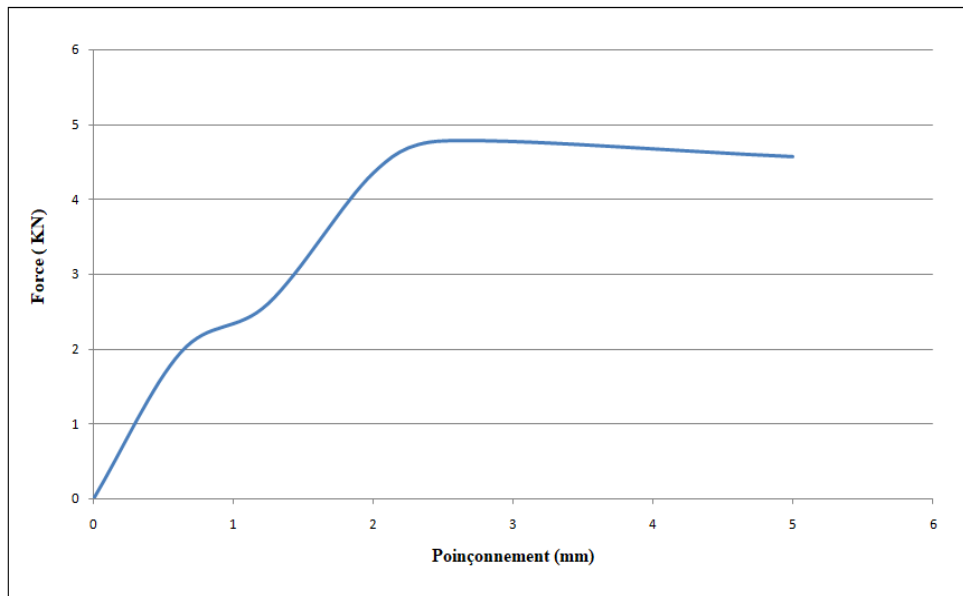


Figure (IV, 32): Courbe de la portance IPI (3% ciment).

- **L'ajout de 7 % de ciment:**

La figure (IV, 33) présente la variation de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement, on trouve que l'indice de portance immédiat «IPI» égal 48,83%.

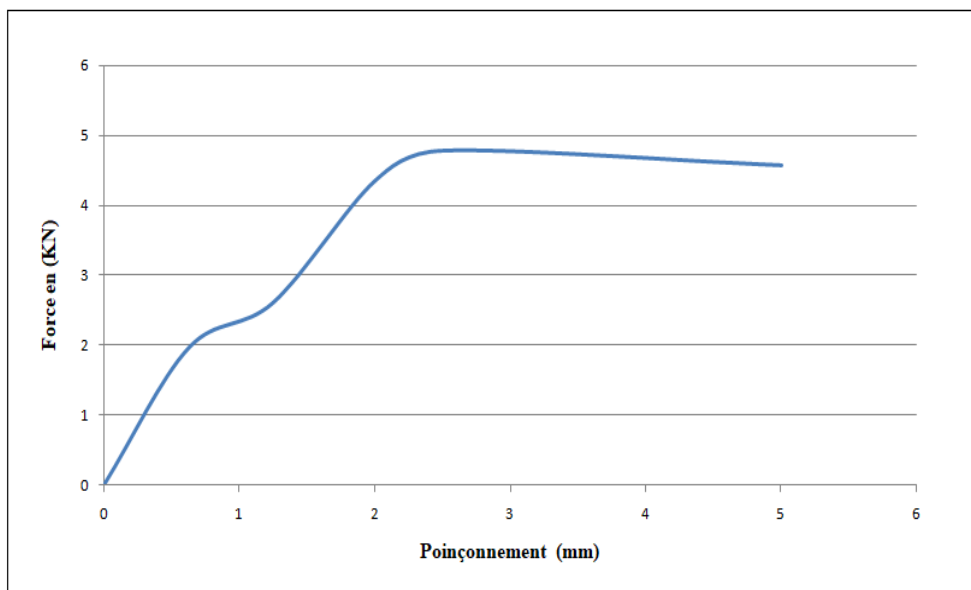


Figure (IV, 33): Courbe de la portance IPI (7% ciment).

- **Récapitulatifs des résultats obtenus:**

La figure (IV, 34) montre l'évolution des forces de poinçonnements en fonction de la lecture de poinçonnements relatives pour les différents pourcentages d'ajout de la chaux (1 %, 3% et 7%).

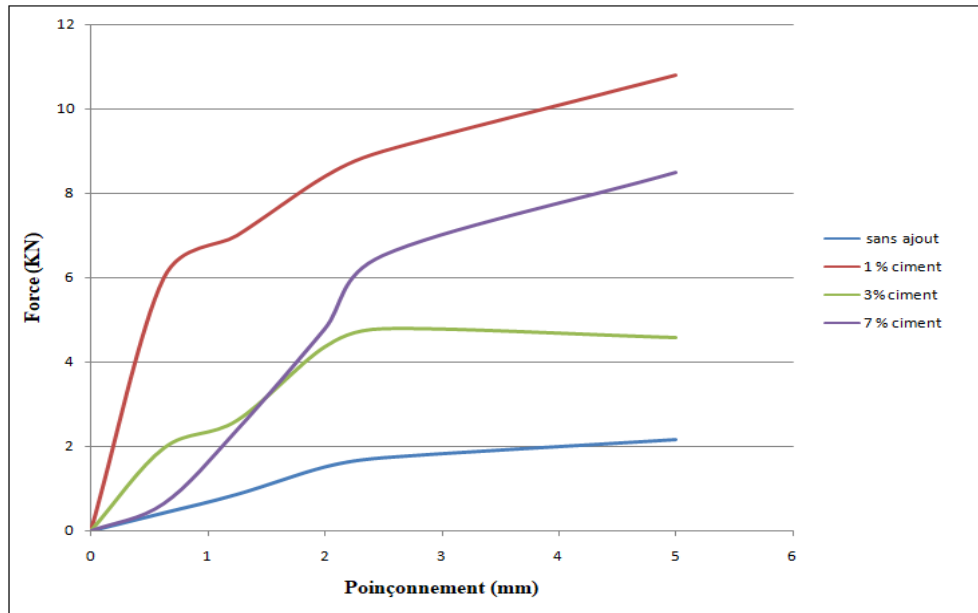


Figure (IV, 34): Courbe de poinçonnement en fonction de % d'ajout de ciment.

Selon la figure (IV, 34), nous remarquons que la force de poinçonnement varie avec l'augmentation des différents pourcentages d'ajout du ciment, et la force de poinçonnement de 7% d'ajout est plus élevée par rapport aux autres pourcentages.

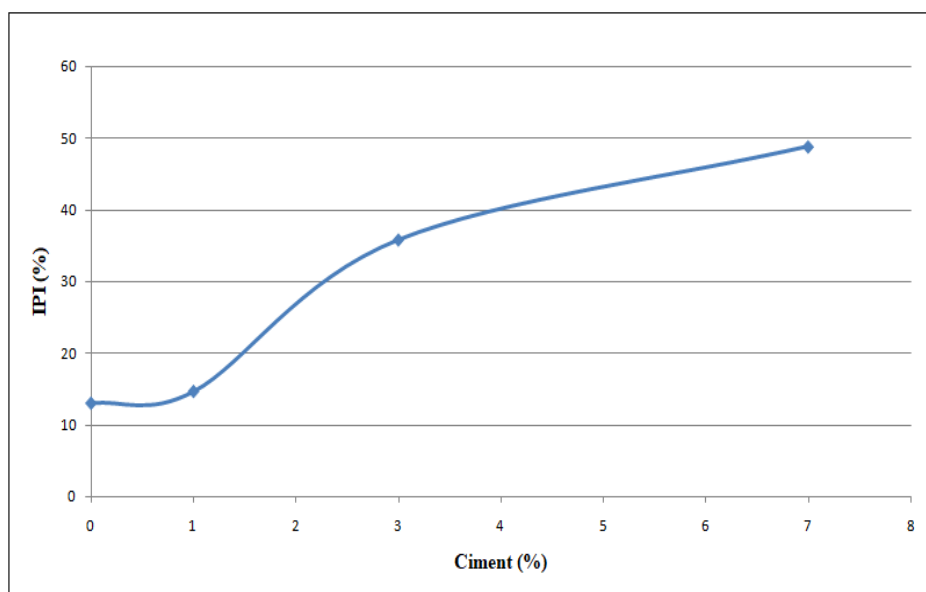


Figure (IV, 35): Variation de «IPI» en fonction de % d'ajout de ciment.

Selon la figure (IV,35), l'addition de ciment à notre type de sol avec les pourcentages 1, 3 et 7 % provoque une augmentation des valeurs de l'IPI, on peut dire que l'amélioration de la

portance de l'argile traitée justifiée par la diminution du volume des vides dans le sol qui est due à la bonne distribution des particules du sol avec les particules fines de ciment.

c) Traitement mixte (7 % ciment + 1,5 % chaux):

La figure (IV, 36) présente la variation de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement, on trouve que l'indice de portance immédiat «IPI» égal 14,68%.

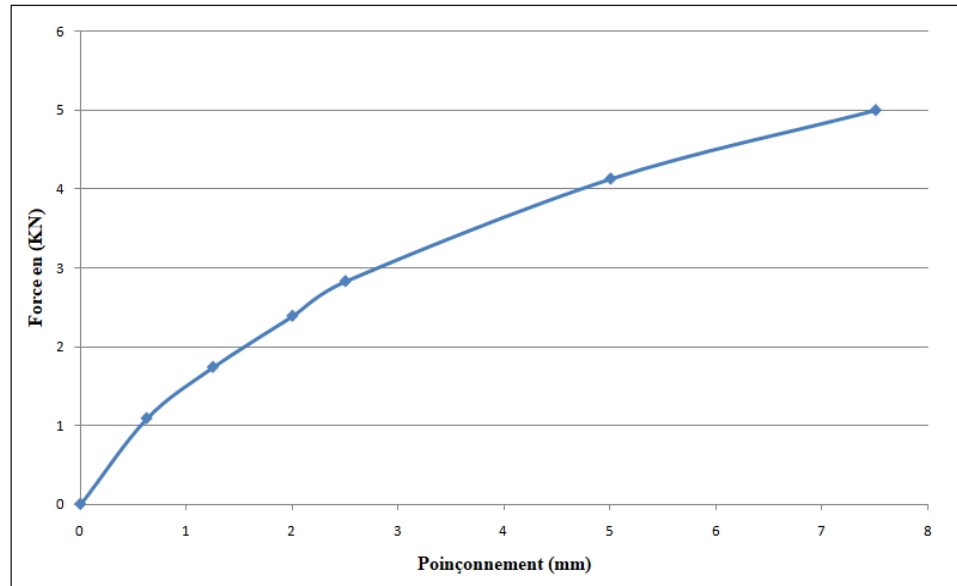


Figure (IV, 36): Courbe de la portance IPI (mixte).

Selon la figure (IV, 36), l'indice de portance immédiat du sol après traitement mixte est plus élevé que celle du sol naturel. On peut justifier cette augmentation par la diminution du volume des vides dans le sol après traitement par des ajouts.

IV.4. Essai de cisaillement a la boîte:

Dans cette étude, l'essai de cisaillement à la boîte a été réalisé afin de déterminer l'évolution au cours du temps l'angle de frottement, et de la cohésion du sol avant et après le traitement.

IV.4.1. Avant traitement:

La figure (IV, 37) présente la courbe intrinsèque ($\tau = C + \sigma \operatorname{tg}\phi$).

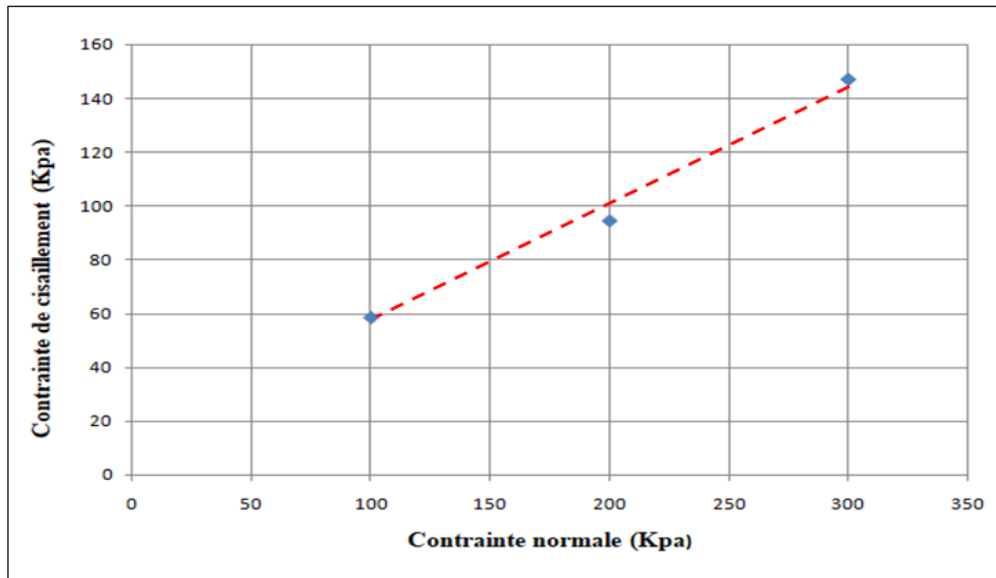


Figure (IV, 37): Courbe de l'essai de cisaillement avant traitement.

D'après la courbe de l'essai de cisaillement: C égal 16 KPa et φ égal $23,96^\circ$.

IV.4.2. Après traitement:

a) Traitement à la chaux:

- L'ajout de 1 % de chaux:

La figure (IV, 38) présente la courbe intrinsèque du schiste traité par 1 % de la chaux, après les calculs on a obtenu que C égal 17 KPa et φ égal $55,93^\circ$.

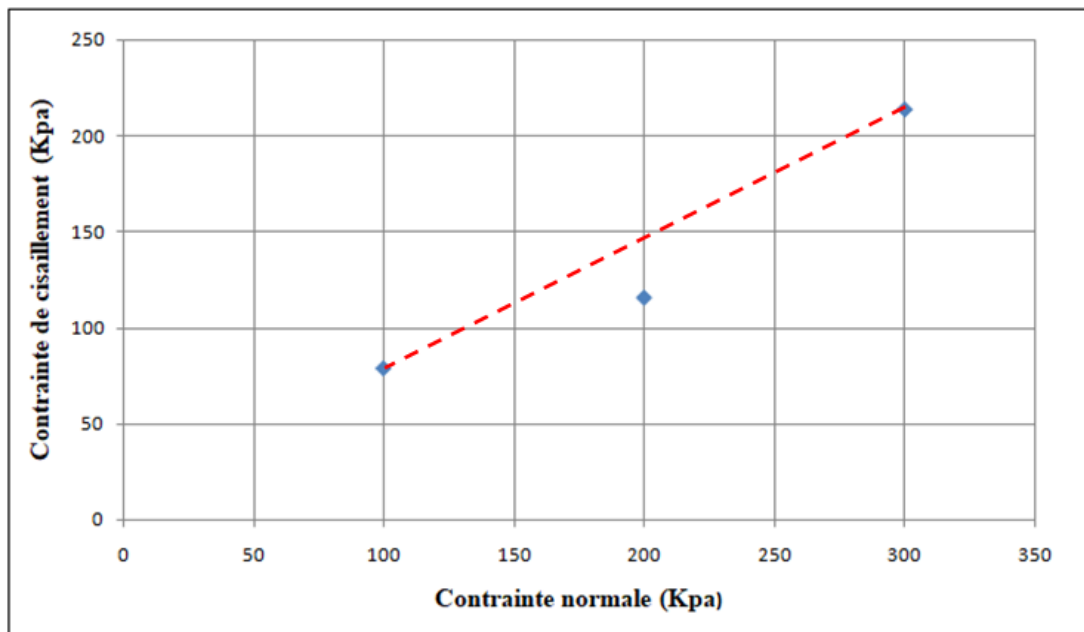


Figure (IV, 38): Courbe de l'essai de cisaillement (1 % chaux).

- **L'ajout de 3 % de chaux:**

La figure (IV, 39) présente la courbe intrinsèque du schiste traité par 3 % de la chaux, après les calculs on a obtenu que C égal 32 KPa et ϕ égal $66,91^\circ$.

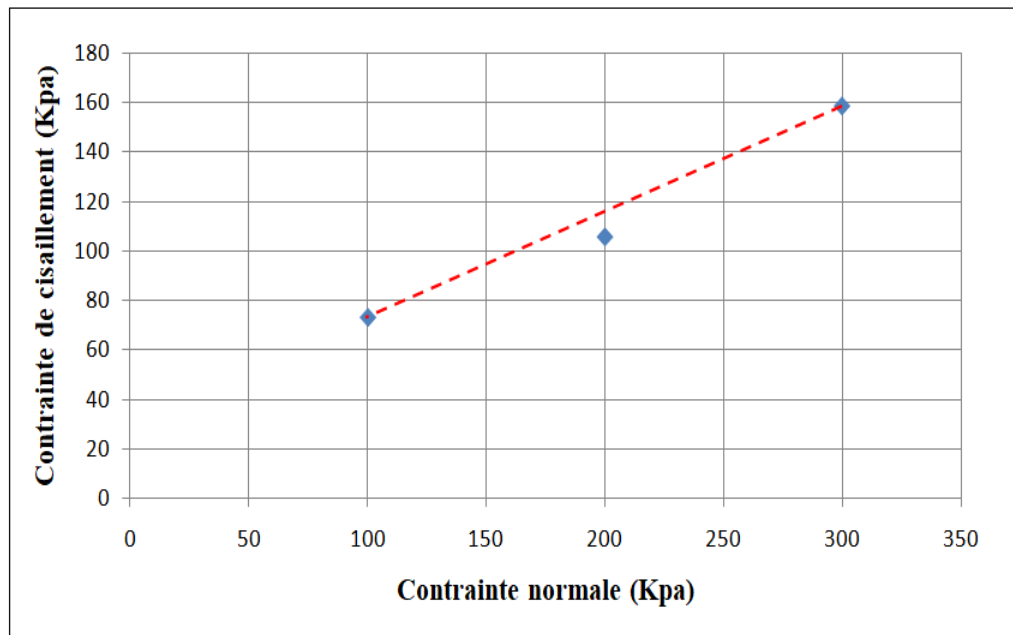


Figure (IV, 39): Courbe de l'essai de cisaillement (3 % chaux).

- **L'ajout de 7 % de chaux:**

La figure (IV, 40) présente la courbe intrinsèque du schiste traité par 7 % de la chaux, après les calculs on a obtenu que C égal 38 KPa et ϕ égal $72,37^\circ$.

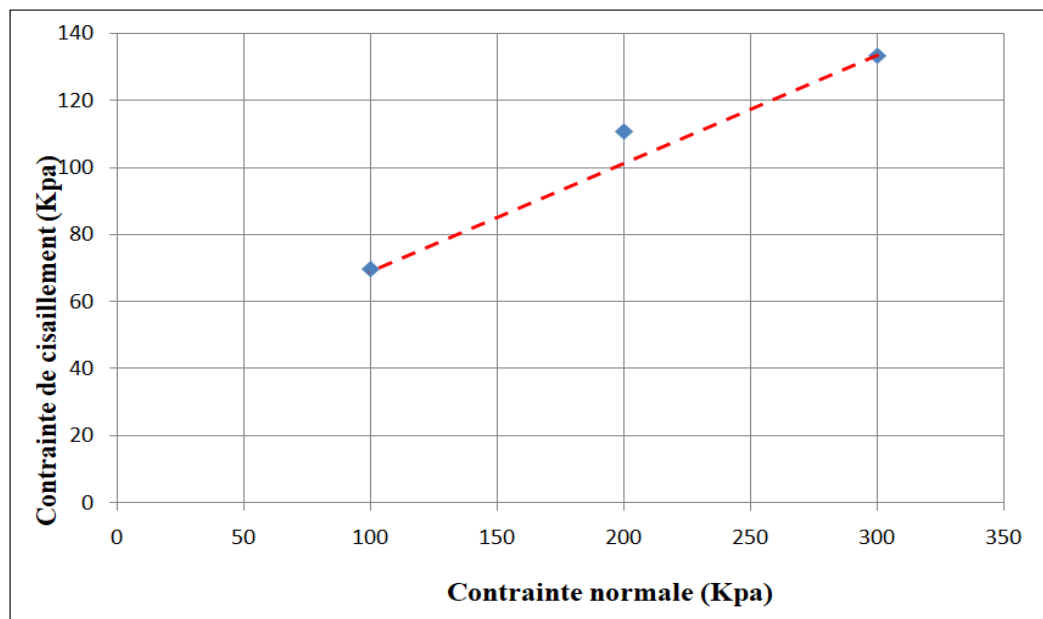


Figure (IV, 40): Courbe de l'essai de cisaillement (7 % chaux).

b) Traitement de ciment:

• **L'ajout de 1% ciment:**

La figure (IV, 41) présente la courbe intrinsèque du schiste traité par 1 % de ciment, après les calculs on a obtenu que C égal 18 KPa et ϕ égal $66,61^\circ$.

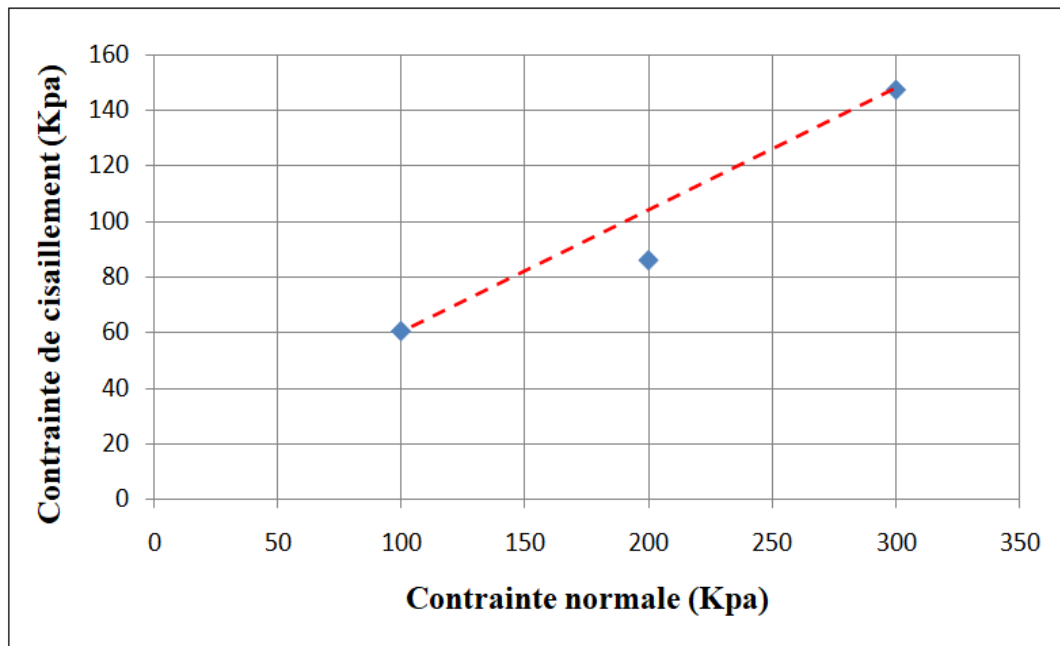


Figure (IV, 41): Courbe de l'essai de cisaillement (1 % ciment).

• **L'ajout de 3% ciment:**

La figure (IV, 42) présente la courbe intrinsèque du schiste traité par 3 % de ciment, après les calculs on a obtenu que C égal 26 KPa et ϕ égal $66,75^\circ$.

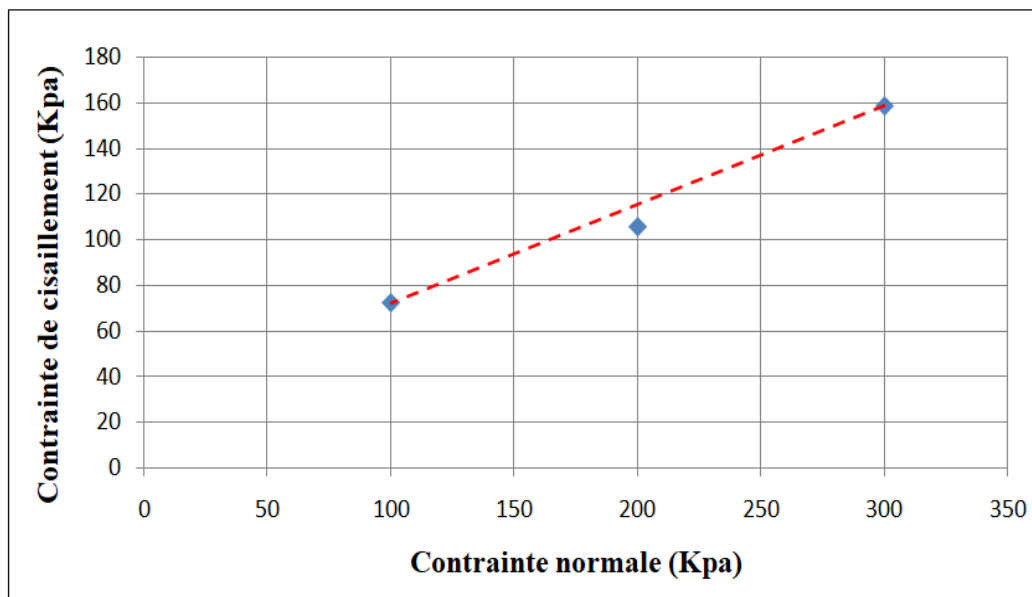


Figure (IV, 42): Courbe de l'essai de cisaillement (3 % ciment).

- L'ajout de 7 % ciment:

La figure (IV, 43) présente la courbe intrinsèque du schiste traité par 7 % de ciment, après les calculs on a obtenu que C égal 32 KPa et ϕ égal $68,21^\circ$.

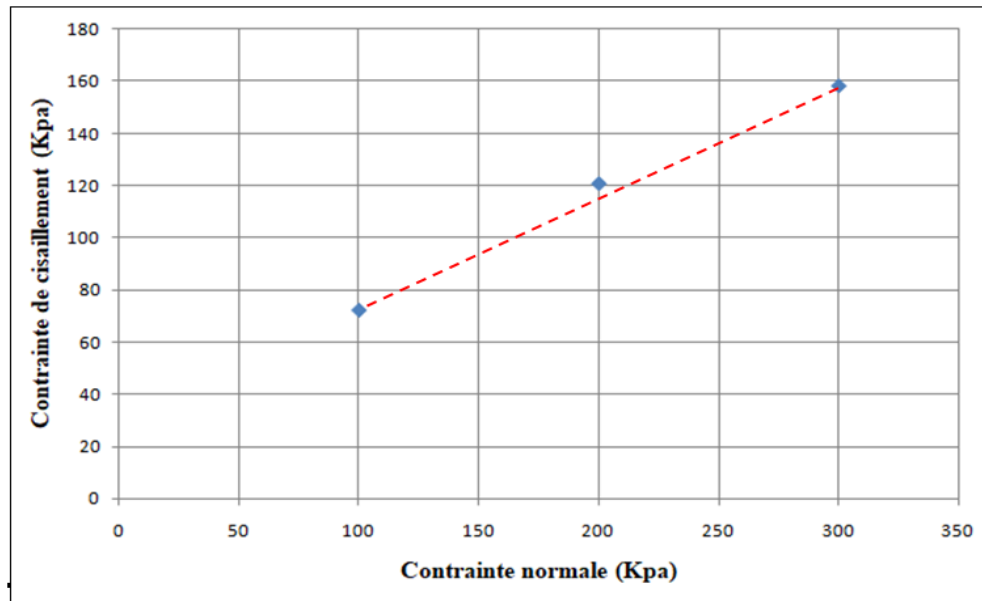


Figure (IV, 43): Courbe de l'essai de cisaillement (7 % ciment).

IV.4.3. Récapitulatifs des résultats obtenus:

La figure (IV, 44) présente l'évolution de la cohésion en fonction de la teneur des liants (ciment et chaux).

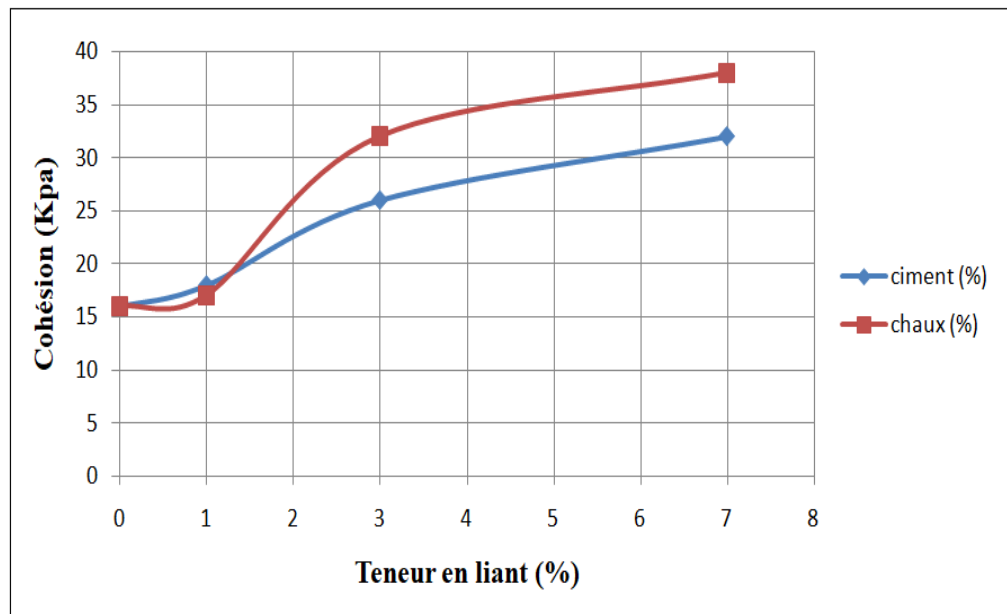


Figure (IV, 44): Evolution de la cohésion en fonction de la teneur des liants (ciment et chaux).

La figure (IV, 45) présente l'évolution de l'angle de frottement interne en fonction de la teneur des liants (ciment et chaux).

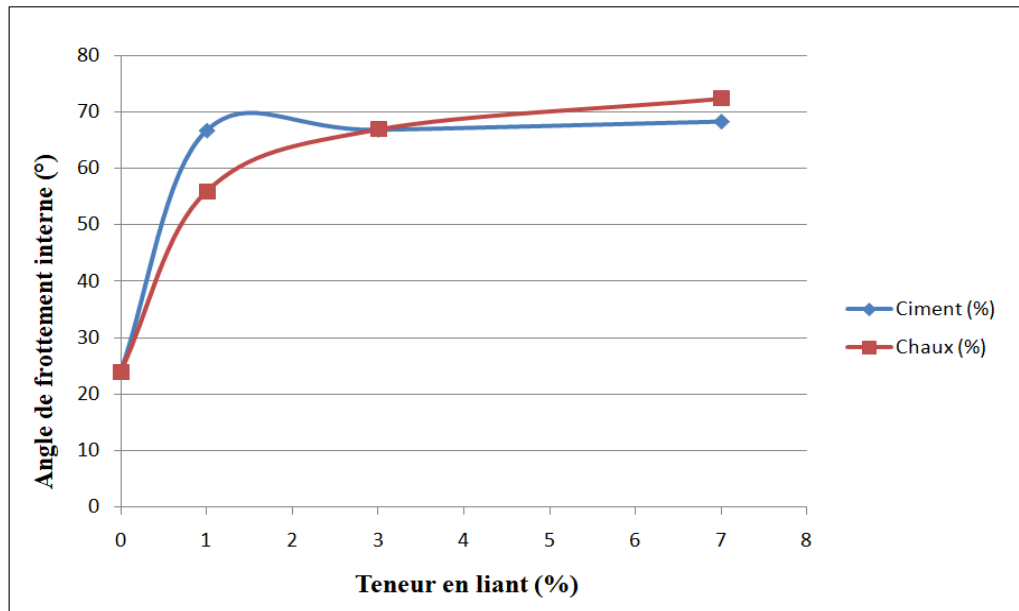


Figure (IV, 45): Evolution de l'angle de frottement interne en fonction de la teneur des liants(ciment et chaux).

D'après les figures (IV, 44) et (IV, 45), nous remarquons que la cohésion et l'angle de frottement du sol traités au liant (ciment ou chaux) augmentent de façon continue et en fonction de pourcentage de liants, ainsi que la chaux est le liant le plus stabilisant que le ciment. Donc, on peut dire que les liants changent significativement les paramètres de cisaillement du sol, notamment pour la cohésion; cette amélioration correspond à un effet du phénomène de floculation et agglomération qui résulte de l'échange cationique.

IV.5. Conclusion:

Nous avons conclu d'après les résultats obtenus dans ce chapitre ce qui suit:

- L'addition d'un liant (ciment ou chaux) au sein du sol provoque une modification de sa teneur en eau on obtient une réduction de la plasticité, cette dernière pourrait être expliquée par la réaction de floculation à cause de la présence de Ca^{+2} et OH^- , cette action entraîne une amélioration de la consistance qui se traduit par une augmentation de la plasticité et ensuite un passage de l'état plastique vers l'état solide.
- Des caractéristiques de compactage au Proctor modifiées ont été déterminées pour le sol naturel et pour les sols traités aux liants (ciment ou chaux), d'après ces résultats il y a une amélioration de ces caractéristiques. Les liants diminuent la densité sèche du sol schisteux sauf pour l'ajout de 7 % de liant, plus la densité sèche augmente, plus la teneur en eau optimale diminue.
- L'addition des liants (ciment ou chaux) provoque une augmentation rapide de l'indice de portance immédiat en fonction du traitement. L'amélioration de cet indice est justifiée par la diminution du volume de vide entre les particules de notre sol.
- L'addition des liants (ciment ou chaux) provoque une augmentation de la cohésion et de l'angle de frottement. L'amélioration de ces paramètres est expliquée par l'effet du phénomène de floculation et agglomération qui résulte de l'échange cationique.

Conclusion
Générale

Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre général de l'étude du comportement physique et mécanique d'un sol argileux traité à la chaux et au ciment par des études expérimentales au laboratoire. Le traitement de sol est une technique d'amélioration des matériaux pour les rendre aptes à l'usage. Traiter un sol c'est le mélanger intimement avec un produit, comme la chaux ou un liant hydraulique, afin de lui conférer des propriétés mécaniques de qualité supérieure. En effet, l'ajout de la chaux et de ciment peut apporter une solution idéale pour les stabiliser et ceci par des modifications intéressantes de leurs propriétés géotechniques. Il a été notamment prouvé que l'addition de la chaux et ciment à l'argile (schiste) apporte une variation des caractéristiques physique qui est présente à la décroît de la limite de liquidité et de plasticité et ensuite une diminution de l'indice de plasticité avec l'ajout de chaux et ciment.

Les liants hydrauliques améliorent les caractéristiques de l'argile tant physiques et mécaniques que les caractéristiques de compactage et de portance. En effet, le schiste présent une sensibilité à l'eau que le traitement à la chaux permet de limiter et l'incorporation du ciment améliore les liaisons mécaniques et donc améliore sa portance. Le traitement à la chaux constitue une augmentation suffisante de la portance pour être utilisé seul pour la couche de forme. Son action principale est de faire chuter la teneur en eau des terrains argileux ou trop humides, elle est aussi peut apporter une amélioration suffisante des performances mécaniques pour la partie supérieure des terrassements.

Référence
bibliographique

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Melbouci.B, « Etude comparative du traitement du sol marneux a la chaux et au ciment dans les couches de forme des chaussées », Laboratoire Géo matériaux, Environnement et Aménagement, Université Mouloud Mammeri, 2017.
- [2] Brabet.I, « Le traitement des sols pour la couche de forme, plateforme de chaussée », mémoire, paris le 21 JUIN 2012.
- [3] Nicolas.C, « Sols traites à la chaux et aux liants hydrauliques », Université Jean Monnet et de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de St-Etienne, 2004.
- [4] Robert.D, williamd.k, Traduit par Jean.L : « Introduction à la géotechnique », 1991
- [5] Bouafia.A, «Mécanique des sols appliquée problèmes résolus», l'office des publications universitaires, Ben Aknoun- Alger, 1996.
- [6] Sadoun.A, Bechkit.O, «Etude géotechnique d'un tronçon autoroutière sur 12 Km de la pénétrante Sétif /Barika», mémoire de master, département d'hydraulique et génie civil, université de Jijel, 2015.
- [7] Marwana.A, Muangongo.I, «Influence de la présence de sulfates sur le traitement du sol argileux par des ajouts minéraux», mémoire de master, département des sciences de la terre, université de Khemis Miliana, 2015.
- [8] Portet, Noël, Nicaise, Portillo, Vermeulen, « La classification des sols », ente-Aix, 2011
- [9] Harrat. M, «Contribution à l'amélioration du procédé de fabrication de la céramique Etude sur site: unité Maghreb céramique de Touggourt», mémoire de magistère, département de génie procédé, université d'Ouargla, 2007.
- [10] <https://www.upicardie.fr/beauchamp/mst/argiles.htm?fbclid=IwAR0V1oVq1V3rotSVHISScPKk8sXUmg74oUQAKCo40N3ZKe1Lo4n37aftYLY>.
- [11] Tatiana. M, « Analyse à l'échelle microscopique des phénomènes d'humectation et de dessiccation des argiles », thèse de doctorat, école centrale paris, France, 2011.
- [12] Aubouin.J, Brousse.R, Lehman.J.P, «Tome I: Pétrologie», Précis De Géologie, Dunaux,1968.
- [13] Collins. K et Mcgown.A, The form and function of microfabric features in a variety of natural soils. Géotechnique, vol 24, PP 223-254, 1974.

- [14] François.S, « Elément de mécanique des sols », école Nationale des ponts et chaussées, 1997.
- [15] Delloum. I, « Caractérisation du fluage d'une argile expansive reconstituée à forte énergie de compactage » Mémoire de master, Département de Génie Civil, Université de M'sila 2016.
- [16] Gaombalet.j, « Le gonflement des argiles et ses effets sur les ouvrages souterrains de stockage » Département de mécanique, Ecole Polytechnique, France 2004.
- [17] Document technique, « Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques », Centre de recherches routières Bruxelles 2009.
- [18] Guide Technique, « Réalisations des remblais et des couches de forme », Fascicule I et Fascicule II – SETRA / LCPC, 1992.
- [19] Guide Technique, « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques » - Application en assises de chaussées – SETRA / LCPC, 2007.
- [20] Guide Technique, « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme ». LCPC – SETRA, Paris, janvier 2000.
- [21] Natacha, Jean.Ch, Alain, Assina, « Amélioration des sols », université de la réunion Montpellier 2005-2006.
- [22] Norme Européenne NF EN 197-1, « Ciments courants différents et de leurs constituants », avril 2012.
- [23] Norme Européenne NF P 98-101, « Assises de chaussées - Chaux aérienne calcique pour sols et routes – Spécifications », juillet 1992.
- [24] Tran.V, « Etude de l'amélioration des sols par traitements à la chaux », université de liège faculté des sciences appliquées 2012-2013.
- [25] Joseph.A, « Traitement des sols en place aux liants hydrauliques », centre d'informations sur les ciments et ses applications.
- [26] Le Borgne.T, « Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols », Sciences de l'ingénieur [physics], Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.

[27] Attima. Z, Dekayir.A, Bennani.M, Elhammouti.K, «Stabilisation des sols argileux par la chaux», Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014 – Beauvais 8-10 juillet 2014.

[28] Norme Européenne NF P94-050, « La teneur en eau de sol », Septembre 1995.

[29] Norme Européenne NF P 94-064, « Masse volumique humide », Novembre 1993.

[30] Norme Européenne NF P 94-068, « Essai au bleu de méthylène», Décembre 1990.

[31] Norme Européenne NF P 94-051, « La limite d'Atterberg », Mars 1993.

[32] Norme Européenne XP P 94-041, « Tamisage par voie humide », Mars 1996.

[33] Norme Européenne NF P 94-093, « Proctor normal », aout 1997.

[34] Norme Européenne NF P 94-078, « Essai CBR (Californian-Bearing-Ratio) », Mai 1997.

[35] Norme Européenne NF P 94-071-1, « Essai de cisaillement a la boite », aout 1994.

Annexes

Classification selon GTR

Classe **A**

Tableau 1 - **Classification des sols fins**

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm > 35%	A Sols fins	VBS ≤ 2,5^(*) ou I_p ≤ 12	A₁ Limons peu plastiques, loess, silt alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	IPI^(*) ≤ 3 ou W_n ≥ 1,25 W_{OPN}	A ₁ th	
				3 < IPI^(*) ≤ 8 ou 1,10 ≤ W_n < 1,25 W_{OPN}	A ₁ h	
				8 < IPI ≤ 25 ou 0,9 W_{OPN} ≤ W_n < 1,1 W_{OPN}	A ₁ m	
				0,7 W_{OPN} ≤ W_n < 0,9 W_{OPN}	A ₁ s	
				W_n < 0,7 W_{OPN}	A ₁ ts	
		12 < I_p ≤ 25^(*) ou 2,5 < VBS ≤ 6	A₂ Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	IPI^(*) ≤ 2 ou I_c^(*) ≤ 0,9 ou W_n ≥ 1,3 W_{OPN}	A ₂ th	
				2 < IPI^(*) ≤ 5 ou 0,9 ≤ I_c^(*) < 1,05 ou 1,1 W_{OPN} ≤ W_n < 1,3 W_{OPN}	A ₂ h	
				5 < IPI ≤ 15 ou 1,05 < I_c ≤ 1,2 ou 0,9 W_{OPN} ≤ W_n < 1,1 W_{OPN}	A ₂ m	
				1,2 < I_c ≤ 1,4 ou 0,7 W_{OPN} ≤ W_n < 0,9 W_{OPN}	A ₂ s	
				I_c > 1,3 ou W_n < 0,7 W_{OPN}	A ₂ ts	
		25 < I_p ≤ 40^(*) ou 6 < VBS ≤ 8	A₃ Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...	IPI^(*) ≤ 1 ou I_c^(*) ≤ 0,8 ou W_n ≥ 1,4 W_{OPN}	A ₃ th	
				1 < IPI^(*) ≤ 3 ou 0,8 ≤ I_c^(*) < 1 ou 1,2 W_{OPN} ≤ W_n < 1,4 W_{OPN}	A ₃ h	
				3 < IPI ≤ 10 ou 1 < I_c ≤ 1,15 ou 0,9 W_{OPN} ≤ W_n < 1,2 W_{OPN}	A ₃ m	
				1,15 < I_c ≤ 1,3 ou 0,7 W_{OPN} ≤ W_n < 0,9 W_{OPN}	A ₃ s	
		I_p > 40^(*) ou VBS > 8	A₄ Argiles et argiles marneuses, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique		A ₄ th
						A ₄ h
				A ₄ m		
				A ₄ s		

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier

Classe **B**

Tableau 2 - **Classification des sols sableux ou graveleux, avec fines**

← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS →							
← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME →							
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	Paramètres de comportement	sous classe fonction du comportement
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 µm ≤ 35%	Sols sableux et graveleux avec fines	tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B₁ Sables siliceux...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		FS ≤ 60	B ₁₁
						FS > 60	B ₁₂
						FS ≤ 60	B ₂₁ th
		tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% VBS > 0,2	B₂ Sables argileux (peu argileux)...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 4 ou w _n ≥ 1,25 w _{OPN}	B ₂ th	FS > 60	B ₂₂ th
						FS ≤ 60	B ₂₁ h
						FS > 60	B ₂₂ h
						FS ≤ 60	B ₂₁ m
						FS > 60	B ₂₂ m
						FS ≤ 60	B ₂₁ s
		0,5 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN}	B ₂ s	FS > 60	B ₂₂ s		
				FS ≤ 60	B ₂₁ ts		
				FS > 60	B ₂₂ ts		
w _n < 0,5 w _{OPN}	B ₂ ts	FS ≤ 60	B ₂₁ ts				
		FS > 60	B ₂₂ ts				
tamisat à 80 µm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B₃ Graves siliceuses...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₃₁		
				LA > 45 et MDE > 45	B ₃₂		

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier

Classe **C**

Tableau 3 - **Classification des sols comportant des fines et des gros éléments**

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique et le comportement																			
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature																				
D _{max} > 50 mm et tamisat à 80 µm > 12% ou si le tamisat à 80 µm ≤ 12% la VBS est > 0,1	C Sols comportant des fines et des gros éléments	Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm > 60 à 80% et matériaux roulés. La fraction 0/50 est un sol de classe A	C₁A₁ Argiles à silex, éboulis, moraines, alluvions grossières...	Le sous-classement, en fonction de l'état hydrique et du comportement des sols de cette classe, s'établit en considérant celui de leur fraction 0/50 mm qui peut être un sol de la classe A ou de la classe B * 1 ^{er} exemple : un sol désigné C ₁ A ₂ h est un sol qui est : ● soit entièrement roulé, ● soit entièrement ou partiellement anguleux; sa fraction 0/50 représente plus de 60 à 80% de la totalité du matériau. Dans les deux cas, sa fraction 0/50 mm appartient à la classe A₂ avec un état hydrique h . * 2 ^{ème} exemple : un sol désigné C ₁ B ₄₂ m est un sol qui est : ● entièrement ou partiellement anguleux; sa fraction 0/50 mm représente moins de 60 à 80% de la totalité du matériau. La fraction 0/50 mm est un sol de la classe B₄₂ se trouvant dans un état hydrique m . Les différents sous-classes composant la classe C sont :																			
		Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm > 60 à 80% et matériaux roulés. La fraction 0/50 est un sol de classe B	C₁B₁ Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières...																				
		Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm ≤ 60 à 80%. La fraction 0/50 est un sol de classe A	C₂A₁ Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...																				
		Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm ≤ 60 à 80%. La fraction 0/50 est un sol de classe B	C₂B₁ Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...																				
				<table border="1"> <tr> <td>C₁A₁</td> <td>C₁A₂</td> <td>C₂A₁</td> <td>C₂A₂</td> <td>Etat th, h, m, s ou ts</td> </tr> <tr> <td>C₁B₁</td> <td>C₁B₂</td> <td>C₂B₁</td> <td>C₂B₂</td> <td rowspan="2">Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique</td> </tr> <tr> <td>C₁B₃</td> <td>C₁B₄</td> <td>C₂B₃</td> <td>C₂B₄</td> </tr> <tr> <td>C₁B₅</td> <td>C₁B₆</td> <td>C₂B₅</td> <td>C₂B₆</td> <td>Etat th, h, m, s ou ts</td> </tr> </table>	C ₁ A ₁	C ₁ A ₂	C ₂ A ₁	C ₂ A ₂	Etat th, h, m, s ou ts	C ₁ B ₁	C ₁ B ₂	C ₂ B ₁	C ₂ B ₂	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique	C ₁ B ₃	C ₁ B ₄	C ₂ B ₃	C ₂ B ₄	C ₁ B ₅	C ₁ B ₆	C ₂ B ₅	C ₂ B ₆	Etat th, h, m, s ou ts
C ₁ A ₁	C ₁ A ₂	C ₂ A ₁	C ₂ A ₂	Etat th, h, m, s ou ts																			
C ₁ B ₁	C ₁ B ₂	C ₂ B ₁	C ₂ B ₂	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique																			
C ₁ B ₃	C ₁ B ₄	C ₂ B ₃	C ₂ B ₄																				
C ₁ B ₅	C ₁ B ₆	C ₂ B ₅	C ₂ B ₆	Etat th, h, m, s ou ts																			

Classe **D**

Tableau 4 - **Classification des sols insensibles à l'eau**

CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS						
CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME						
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Valeurs seuils retenues	Sous classe	
VBS ≤ 0,1 et tamisat à 80 µm ≤ 12%	D Sols insensibles à l'eau	D _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm > 70%	D₁ Sables alluvionnaires propres, sables de dune...	Matériaux insensibles à l'eau; mais leur emploi en couche de forme nécessite la mesure de leur résistance mécanique (Los Angelès - LA - et/ou Micro Deval en présence d'eau - MDE -) ou Friabilité des sables (FS).	FS ≤ 60	D ₁₁
					FS > 60	D ₁₂
		D _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm ≤ 70%	D₂ Graves alluvionnaires propres, sables...		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₂₁
					LA > 45 et MDE > 45	D ₂₂
		D _{max} > 50 mm	D₃ Graves alluvionnaires grossières propres, dépôts glaciaires...		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₃₁
					LA > 45 et MDE > 45	D ₃₂