REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Thème : Etude du traitement d'un sol support de chaussée traitée par le ciment

---

Présenté par

THELDJOUNE Fatima

TEMAMRA Khadidja

FOURAR LAIDI Samia

Proposé et Dirigé par

Mme AMRI .S

Mr Serraye .M^{d}

Promotion Juin 2019

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous tenons à remercier notre DIEU miséricordieux qui nous a donné la volonté, la force et la patience à achever ce travail.

Nos remerciements à nos parents, pour leurs soutiens et leurs encouragements pendant toute la vie et qui continueront à nous aider dans tous les projets de l'avenir. Ainsi que mon marie et tous les membres de nos familles qui ont participé de prés ou de loin à nous encourager et nous aider dans notre projet.

Nous remercions très sincèrement notre promotrice ***M me AMRI****, pour son dévouement, ses conseils et ses critiques tout au long de l'élaboration de ce mémoire.*

Nous remercions sincèrement Mr ***BELDJOUHAR Mohamed*** *pour les nombreuses explications qu'ils nous ont patiemment données.*

Nous remercions sincèrement tous les enseignants de l'université de MEDEA du département de génie de la matière en particulier génie civil qui a participés à notre formation.

Nous adressons les plus chaleureux remerciements et tout gratitude à tous nos amis chacun de son nom.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je tiens à dédier ce mémoire :

A mon très belle petits famille – ma fille ***Lyna*** *et mon fils* ***ABDELHAK****-mon marie* ***Mohamed*** *- qui j'aime ainsi que ma très chère* ***Mères*** *et à mon cher* ***Pères****, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.*

A mes Très chères sœurs : Naima, Fatma zohra , Zinab , Karima , Ikram et Souad .

A mes Très chères Frère : Mohamed, Kamel, Sofiane, Ben aissa , Brahim et Abdelkrim .

A la famille : Theldjoune, Beldjouhar, ben rebia et Aidi sans exception.

Je remercie A ma chère amie et binôme Khadidja et Samia qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.

A mes amies intimes – krima ben baha , oukrif zahia- sans exception.

A tout mes amies et surtout de option génie civil.

Fatima

Dédicace :

je dédie ce modeste travail aux être qui me sont les plus chers , je cite :

Les parents les plus chers au monde ,papa et maman que dieu les garde et les protège

Mes frères djamel ,mohamed et abedmalek , ma sœur noura

Mes oncles et tantes ainsi que leurs épouses ,époux et ces enfants

Mes chers cousins et cousines spécialement : hada ,zhaira,hamida,hamza,houria ,malak ,Retadj ,abedkader

Toutes mes amies :samia,fatima ,hayet , djamila,hoda,hafida,samia

Et tout les groupe de LCTP de blida

Mon cher fiancé mohamed et toute sa famille

Toutes la promotion 2019 de génie civile en particulier géotechnique

T,khadidja

الملخص

يتطلب استخدام التربة الطينية في بناء الطرق عناية واحتياطات خاصة لأن هذه التربة تسبب مشاكل عسيرة أثناء الانجاز بالخصوص على المدى الطويل من عمر المشأة .بالإضافة إلى ذلك ،ان لديها دائما قدرة تحمل ضعيفة.

يمكن أن تكون معالجة التربة بالإسمنت حلاً لمختلفة مشكلات مثل الحاجة إلى المرور في التربة الرطبة بشكل مفرط ، والحاجة إلى تحسين خصائصها الجيوتقنية (قدرة التحمل ، مقدار الماء ، مقاومة تجمد و ذوبان الجليد ، إلخ).

في هذا العمل ، نقدم نتائج دراسة تجريبية أجريت على معالجة التربة الطينية من منطقة المدي ة .تمت معالجة هذه التربة من نوع ، بنسب مئوية مختلفة من الأسمنت حتى تتمكن من تلبية توصيات دليل أعمال الطرق GTR.

.أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن معالجة التربة الطينية بالاسمنت يحسن خصائصها الفيزيائية والميكانيكية

الكلمات المفتاحية

الطين ، الاسمنت ، المعالجة ، الليونة ، التحمل ، المسلك.

Résume :

L'utilisation des sols argileux en construction routière requière une attention et des précautions particulières vu que ces sols posent des problèmes délicats au moment de la mise en œuvre mais surtout à long terme pendant la vie de l'ouvrage. Par ailleurs, ils présentent presque toujours une faible portance.

Le traitement des sols par le ciment peut être une réponse à divers problèmes tels que la nécessité de passer dans les sols excessivement humides, le besoin d'améliorer les caractéristiques géotechniques (portance, tenue à l'eau, résistance au gel-dégel, etc.).

Dans ce travail, nous présentons les résultats d'une étude expérimentale menée sur le traitement d'un sol argileux provenant de la région de Médéa. Ce sol, de type argileux, inapproprié pour une utilisation tel quel en technique routière, a été traité par différents pourcentages de ciment afin qu'il puisse répondre aux recommandations du guide des terrassements routiers GTR.

Les résultats obtenus montrent que le traitement des sols argileux par le ciment permet d'améliorer leurs caractéristiques physiques et mécaniques

Mots clés :

Argile, ciment, traitement, plasticité, portance, chaussée.

Resume:

The land use argillaceous in road construction requires a detailed attention and precautions considering these grounds pose delicate problems at the time of the setting in oeuvre but especially in the long run during the life of the work. In addition, they almost always present a weak bearing pressure.

The soil stabilization by cement can be a response to various problems such as the need for passing in the excessively wet grounds, the need to improve the characteristics geotechnics (bearing pressure, behaviour with water, resistance to freezing-thawing, etc).

In this work, we have the results of an experimental study undertaken on the treatment of a clay soil coming from the area of Médéa. This ground, of type argillaceous, inappropriate for a use just as it is in road engineering, was treated by various percentages of cement so that it can answer the recommendations of the guide of road earthworks GTR.

The results obtained show that the argillaceous soil stabilization by cement makes it possible to improve their characteristics physics and mechanics

Key words:

Clay, cement, treatment, plasticity, bearing pressure, roadway.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Structure de couches de tétraèdres……4

Figure I.2 : Structure de couche d'octaèdre…….……4

Figure I.3: Assemblage d'une couche octaédrique et d'une couche tétraédrique pour une argile TO (1:1) .....……..……5

Figure I.4. Assemblage d'une couche octaédrique et deux couches tétraédriques pour une argile TOT (2:1)……..……..……5

Figure I.5. Cristaux des particules de kaolinite vus au microscope électronique à balayage…….…….6

Figure I.6 : Structure de la montmorillonite …….…….7

Figure I.7 : Structure d'illite …….....…….8

Figure I.8 : Courbe du gonflement en fonction du temps ……..…….……13

Figure I.9: cas pathologique dans la ville de Saida.....15

Figure I.10: Apparition des premières fissures sur les accotements. 15

Figure I.11: Apparition des premières déformations et infiltration d'eau à travers le fissures.....16

Figure I.12: Chute de portance des zones saturées apparition des fissures longitudinales..... 16

Figure I.13 : Exemple d'un glissement de terrain sur RN 11, Damous, Algérie. ……..... 16

Figure II .1 : Préparation du sol …….....29

Figure II.2 : Épandage …….……29

Figure II.3: Malaxage ……..……30

Figure II.4: Compactage ……..……...…30

Figure III .1 : Localisation du site étudie……..……..….32

Figure III.2 : Prélèvement D'échantillon…….33

Figure III.3: Préparation de l'échantillon. ……..…….33

Figure III.4 : Analyse granulométrique…….35

Figure III.5 : la courbe granulométrique de sol étudié …….…. 35

Figure III.6 : Détermination de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande.36

Figure III.7 : Détermination de la limite de plasticité (bâtonnet de sol)……..36

Figure III.8: Limite de liquidité de Sol naturel……..……...37

Figure III.9: Classification des sols selon CASAGRANDE……38
Figure III-10 : Appareillage d'Essai bleu de méthylène ……39
Figure III.11:essai proctor modifie ……40
Figure III.12: La courbe Proctor de sol naturel……..41
Figure III-13 : Essai de l'indice CBR…….43
Figure III.14: La courbe CBR de sol naturel……..43
Figure IV.1: Préparions d'échantillon……..45
Figure IV.2 Variation de valeur de bleu méthylène en fonction de la teneur en ciment…..46
Figure IV.3: La variation la surface spécifique en fonction du pourcentage du ciment …..47
Figure IV.4: variations des limites liquidités en fonction du dosage en ciment……..49
Figure IV.5 : variations des limites plasticités en fonction du dosage en ciment……....49
Figure IV.6 : les variations des indices plasticités en fonction du dosage en ciment……..50
Figure IV.7 : variations des indices consistance en fonction du dosage en ciment…….50
Figure IV.8 : variation de la teneur en eau Optimale…….52
Figure IV.9 : courbe Proctor modifie…….52
Figure IV-10:L'évolution de la densité sèche optimale en fonction des dosages en ciment…….52
Figure IV.11 Évolution de l'indice CBR imbibé en fonction du dosage en ciment…….....53
Figure V.1 : la couche de forme……..55
Figure IV.1 :la couche de forme……56
Figure IV.2 : Les couches principales de chaussée……...……57
Figure IV.3: Chaussée souple……..57
Figure IV.4 : Les chaussées bitumineuses épaisses……....58
Figure IV.5 : Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques……..59
Figure V.7 : Structure de chaussée……59
Figure V.8: Structure de chaussée……59

Liste des tableaux

Tableau III.1: Résultat des limites d'Atterberg……38

Tableau III.2 : Résultat de la valeur du bleu de méthylène……39

Tableau IV.1:L'influence du ciment……46

Tableaux IV.2 : Limite d'Atterberg du matériau argileux en fonction du pourcentage en ciment……48

Tableaux IV.3 : Variation de la densité sèche maximale et la teneur en eau en fonction des différents dosages en ciment…….……51

Tableaux IV.4 : Variation de l'indice CBR imbibé en fonction du dosage en du ciment (%)……..53

Tableaux V.1: Les coefficients d'équivalence pour chaque matériau ……...……..65

Tableau V.2 : La classe du trafic poids lourd. ……..67

Tableau V.3: Classement des sols selon C.B.R……..……74

Tableaux V.4:L'épissure de la couche de fondation…….……67

Tableaux V.5 :L'épissure de la couche de fondation……..……..68

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTIONGENERALE.....1

Chapitre 01 : Généralité sur les argiles

I.1.Introduction……...……2

I.2.Définition ……..……2

I.3.Composition chimique ……...……3

I.3.1. Minéraux 1/1……..5

I.3.2. minéraux 2/1 ……5

I.4. Principales familles des argiles ……6

I.4.1.kaolinite ……6

I.4.2. Smectites ……..6

I.4.3. Illites ……....8

I.5. Principales caractéristiques des minéraux argileux **……..8**

I.5.1. Densité De Charge Spécifique ……8

I.5.2 Capacité D'échange Cationique (CEC)…….9

I.5.3 Surface Spécifique ……9

I.5.4. Capacité D'adsorption D'eau……9

I.6 .Interaction eau - argile ……...…10

I.6.1 La forme de l'eau……..10

I.7.Comportement des argiles……10

I.7.1.Gonflement ……..11

I.7.1.1 Mécanisme du gonflement……11

I.7.1.2. Composantes mécaniques du gonflement ……11

I.7.1.3.Composantes physico-chimiques du gonflement ……...12

I.7.1.4.Paramètres de gonflement ……12

I.7.1.5.Cinétique de gonflement ……13

I.7.1.6.Manifestations dus au gonflement des argiles……..14

I.7.2 .Tassement ……..16

I.7.3. Glissements ……...17

I.7.4.Retrait ……..17
I.8.Conclusion……18

Chapitre II : Technique du traitement des sols support de chaussée

II.1.Introduction ……19
II.2.Traitement chimique ……..19
II.2.1 Liants organiques ……20
II.2. 2. Les liants hydrauliques ……20
II.2.2.1.La chaux……21
II.2.2.2. Différents types de chaux ……..21
II.2.3. mécanisme de stabilisation à la chaux……22
II.3.Traitement au ciment ……..24
II.3.1.Propriétés du ciment……24
II.3 .2.Choix du ciment pour le traitement ……25
II.3.3.Processus de stabilisation par le ciment……..……..25
II.3.4.Influence du ciment sur les sols dispersifs ……..27
II.3.5.Action de la stabilisation par le ciment sur le sol ……....27
II.4. Exécution des travaux du traitement au ciment……..28
II.4.1.Préparation du sol ……..…….28
II.4.2.Épandage de liant……29
II.4.3.Malaxage en place……..30
II.4.4. Compactage ……..…30
II.5.Conclusion **……31**

Chapitre III : Analyse du matériau d'étude

III .1.Introduction ……32
III.2.Prélèvement des échantillons ……32
III .3.Préparation de l'échantillon……..33
III. 4.Analyse du matériau argileux ……..34
III.5. Propriétés physiques…….34
III.5.1.Teneur en eau…….34
III.5.2.Analyse granulométrique……..34
III.5.3.Limites d'Atterberg…….36

III.5.4.Essai bleu de méthylène……...38
III.6.Propriétés mécaniques du sol…….40
III.6.1.essai Proctor modifié……40
III.6.2.Essai CBR ……..41
III.7.Conclusion …….44.

Chapitre IV: Effet du Ciment Sur le Comportement d'une Argile

IV.1.introduction …….45
IV.2.Traitement au ciment……45
IV.3.Préparation de mélange……45
IV.4.Essais réalisés……46
IV.5.paramètre chimique……47
IV .5.1..Évolution de valeur au bleu de méthylène en fonction de la teneur en ciment……..47
IV.6. paramètres physiques ……48
IV.6.1.Évolution des limites d'Atterberg en fonction de la teneur en ciment…..48
IV.7. paramètre mécanique…….49
IV.7.1.Évolution des caractéristiques Proctor modifié en fonction de la teneur en ciment…….52
IV.7.2.Évolution de l'indice CBR imbibé en fonction de la teneur en ciment…….55
IV.8.Conclusions ……..56

Chapitre IV : Effet de l'ajout du ciment sur le dimensionnement d'une chaussée souple

V.1.Introduction……55
V.2. Définition de la chaussée ……55
V.3. Les couches principales de chaussée……55
V.3.1. La couche de forme…….55
V.3.2. La couche d'assise……..……56
V.3.3.couche de surface ……..56
V.4. Les différents types de structure de chaussée……..……57

V.4.1. Les chaussées souples…….57
V.4.2. Les chaussées bitumineuses épaisses……..58
V.4.3. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques…….59
V.4.4 Les chaussées en béton de ciment…….....59
V.4.5. Chaussées rigides……..60
.5.Quelque méthode de dimensionnement……..……...61
V.51. Méthode C.B.R «California -Bearing - Ratio»:……61
V.5.2.Méthode A.A.S.H.O (American Association of State Highway Officiail……..62
V.5.3.Méthode du catalogue des structures «SETRA»……62
V.5.4.La Méthode L.C.P.C «Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.....65
V.6. Application pratique d'un dimensionnement en utilisant comme sol support le matériau argileux ……75
Conclusion Générale…….....……69

Tableaux des *symboles*

I_p……..Indice de plasticité

W_L……..……. Limite de liquidité

W_P …….. Limite de plasticité

Ic……...…….. Indice de consistance

V_{bs} ……..… Valeur ce bleu méthylène

W_{opt} ……...…….Teneur en eau optimale

γ_d max ……..…La densité maximale

CBR …….California-bearing-ratio

INTRODUCTION GENERALE

Les sols argileux sont constitués de minéraux varient dont l'affinité à l'eau dépend de plusieurs paramètres, entre autre la structure minéralogique. Certains sols comportent une proportion de particules argileuses telles que les Illites et les Smectites.

Leurs propriétés physicomécanique peuvent être améliorées par le processus de stabilisation en utilisant différents types de stabilisateurs (ciment, chaux, cendre volante …).

Le traitement des sols à la chaux , au ciment est une technique facile à mettre en œuvre, économique et efficace. Elle permet de réutiliser les déblais issus des travaux de terrassement destinés à être rejetés, d'éviter de faire appel à des matériaux d'emprunt de qualité issus de carrières

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement d'une argile traitée par le ciment à différents teneurs (3%, 6%, 9%) pour la réemployer dans la réalisation d'une couche de forme.

Ce mémoire est organisé en deux grandes parties :

La **première partie** consiste en une revue bibliographique qui repartir on deux chapitres le premier ses porte sur les argiles, seconds chapitre concerne la présentation des différents technique du traitement des sols supports de chaussée.

La **deuxième partie** est consacrée à l'étude expérimentale qui s'est déroulée au Laboratoire. Elle est composée de trois chapitres suivants :

- Un premier chapitre porte sur l'identification et la classification des matériaux (argile et ciment). Nous présenterons les résultats d'un certain nombre d'essais fondamentaux (analyse chimique, granulométrie, limite d'Atterberg, valeur au bleu, compactage, indice de CBR)
- Le deuxième chapitre porte sur la caractérisation du comportement des mélanges (argile +ciment) afin d'étude l'effet de ciment sur les paramètres physique et mécaniques (limite Atterberg compactage, portance) du sol.
- Le dernier chapitre s'attache à dimensionner le corps de chaussée à partir des résultats de portance trouvés par la méthode de dimensionnement de CBR Notre travail s'achève par une conclusion générale.

I.1.Introduction

Les argiles sont utilisées depuis plusieurs années dans différents domaines tels que la construction, la santé, la fabrication des ciments ou encore l'agriculture. Les spécialistes des diverses techniques utilisant les matériaux argileux ont tenté de les caractériser par leur comportement au feu, leurs propriétés absorbantes, leur surface spécifique et enfin par la grande plasticité de leurs particules constitutives.

Les argiles sont un mélange de minéraux, formant avec l'eau une pâte plastique, résistante après la cuisson. Elles sont composées de feuillets chargés négativement et, selon la position et le nombre de feuilles, il existe plusieurs familles différentes selon les caractères.

Les particules argileuses ont une faible portance au contact de l'eau, en raison de la surface des minéraux argileux qui sont chargées négativement, de l'ion en solution dans l'eau chargée positivement et accompagnés composant un sol gonflant.

La présence de tels minéraux produit une argile fortement sensible aux ions en solution dans l'eau et de faible portance. C'est la variation de la teneur en eau qui est le facteur provoquant des variations de volume Cette réaction se traduit par le gonflement. Il s'agit d'un phénomène très important en géotechnique qui, dans certains cas, peut être à l'origine de nombreux dégâts coulisseaux sur différents types d'ouvrages, particulièrement les bâtiments des ouvrages routiers et toutes les constructions soumises à des variations de sa teneur en eau.

Nous avons présenté dans ce chapitre l'ensemble des caractéristiques de ce sol et leur phénomène correspondant au contact de l'eau**.**

I.2.Définition

Le terme argile vient du mot origine grec « argilos », dont la racine argos signifie blanc, ce sont des aluminosilicates dont la structure est formée d'un empilement de feuillets (Harrat, 2007).

Les argiles sont des roches sédimentaires à grains fins, de taille inférieure à 5µm, composées pour une large part de minéraux spécifiques, silicates en général, d'aluminium plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée qui explique leur plasticité, ou bien une structure fibreuse qui explique leurs qualités d'absorption. Elles absorbent l'eau et forment une pâte imperméable (perméabilité inférieure à 0,2 mm/h), Les argiles peuvent être gonflantes, notamment celles de la famille des Montmorillonites lorsqu'elles absorbent de l'eau et, au contraire, diminuer de volume sous l'effet de la sécheresse (Magnana et al, 1988).

On peut distinguer deux catégories des argiles :

- Argiles plastiques : elles sont très déformables et tendres ;
- Argiles raides : elles sont indurées et présentent un comportement plus fragile que ductile au-delà de la limite d'élasticité et cela à cause de la présence des carbonates et des quartzs (Belabbaci ,2014).

I.3.Composition chimique

Les argiles en tant que famille minérale appartenant aux phyllosilicatesil est donc préférable de parler de "minéraux argileux", ou phyllites. Les minéraux argileux sont provenant de la décomposition des feldspaths et des micas, leur formule chimique est de la forme :

$$(SiO_2)\ M\ (Al_2\ O_3)\ N\ (H_2O)p$$

Ils sont composés de particules de forme aplatie et de dimensions très petites (inférieures à 2µm), ceci leur confère une très grande surface spécifique.

a)Unité Tétraédrique

Elle est formée d'un tétraèdre au sommet duquel quatre ions d'oxygènes (O^{-2}) enserrent union de silicium Si^{+4}(figure I.1).

b) Unité Octaédrique

Elle est formée d'un octaèdre au centre duquel un ion d'aluminium (Al^{+3}) ou de magnésium (Mg^{+2}) est équidistant aux six hydroxyles (OH-) des sommets (figure I.2).

Ces octaèdres se combinent pour former des couches planes dites couches octaédriques, et la liaison avec la couche tétraédrique se fait au niveau des oxygènes de silicium (Si^{+4}), équidistant à chacun d'eux. Ces tétraèdres se combinent entre eux pour former une couche tétraédrique (Chapman et Velde, 1992).

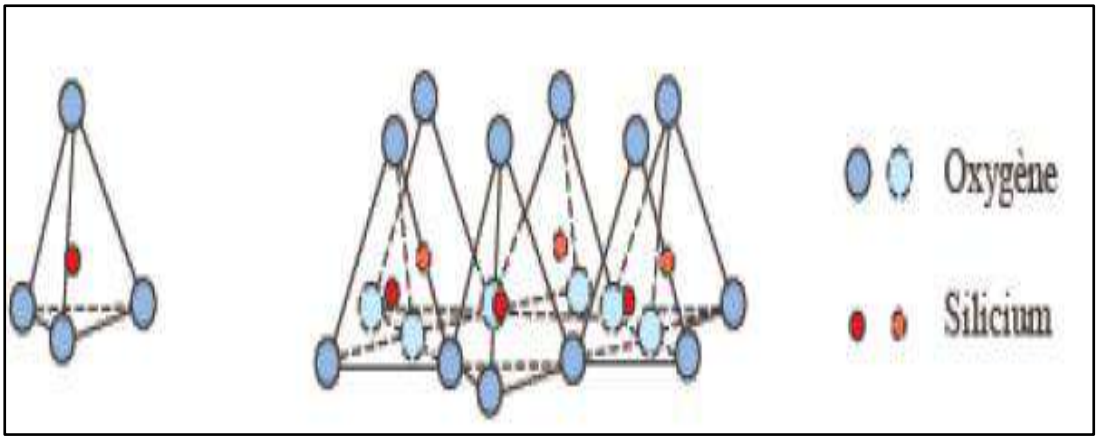


Figure I.1 : Structure de couches de tétraèdres (Cuisinier, 2002).

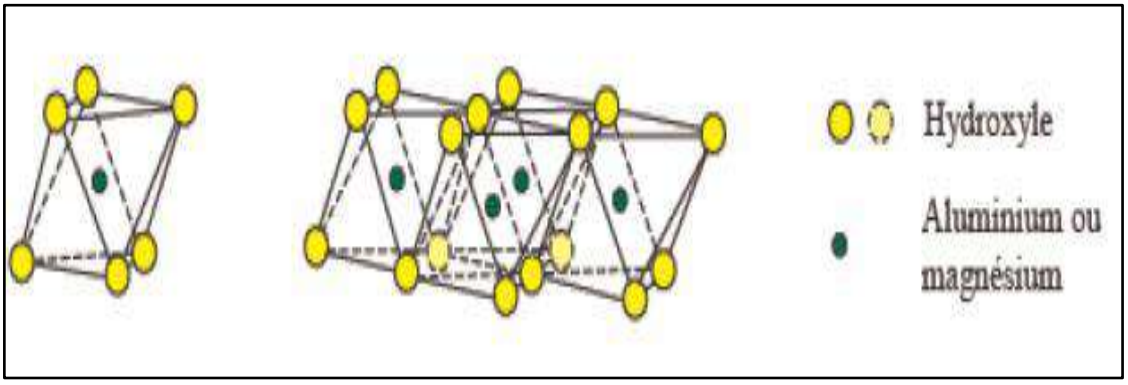


Figure I.2 : Structure de couche d'octaèdres (Cuisinier, 2002).

Suivant le mode d'agencement des tétraèdres et des octaèdres, on distingue deux (2) grandes familles de minéraux :

a) Les minéraux fibreux qui sont des espèces à pseudo feuillets, par exemple attapulgite et les sépiolites (Charradi, 2010).

b) Les minéraux phylliteux à structures lamellaires. Ces derniers sont les plus répandus et les plus étudiés. Leur classification est basée sur le mode d'association des couches structurales et le degré d'occupation des sites de la couche octaédrique (di ou tri octaédrique). Selon la séquence d'empilement des couches tétraédriques et octaédriques, on distingue des minéraux de type :

1/1 (T-O), 2/1 (T-O-T) et 2/1/1(T-O-T-O) **(**Medjnoun ,2014).

I.3.1. Minéraux 1/1

Ces minéraux sont constitués par l'empilement suivant la normale des feuillets formés par l'association d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Les tétraèdres son liés par trois sommets et le quatrième sommet du tétraèdre sert de lien avec la couche octaédrique (figure I.3). La distance basale est de l'ordre de 7 Å. L'ensemble des charges est reparti de telle sorte que le feuillet est électriquement neutre.

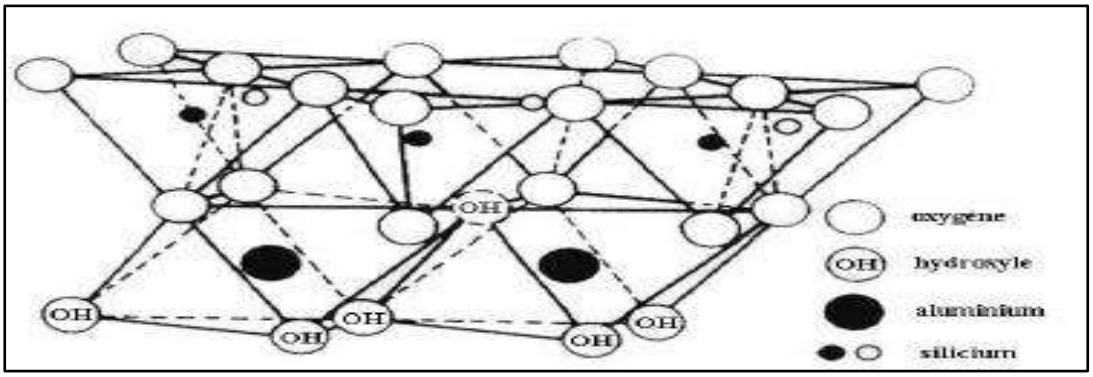


Figure I.3. Assemblage d'une couche octaédrique et d'une couche tétraédrique pour une argile TO (1:1)

I.3.2. minéraux 2/1

Ces phyllosilicates comptent plus de 200 variétés de minéraux différents, parmi lesquelles on trouve les groupes des micas et des smectites (Charradi, 2010). Ces argiles sont composées d'agglomérats, ces agglomérats sont composés de particules, chacune des particules est composée d'un empilement de feuillets ayant une grande extension dans le plan. Un feuillet est composé d'une couche planaire formée par un cation en coordinance octaédrique encadrée de deux couches planaires de silicium en coordinance tétraédrique (le feuillet est dit TOT).

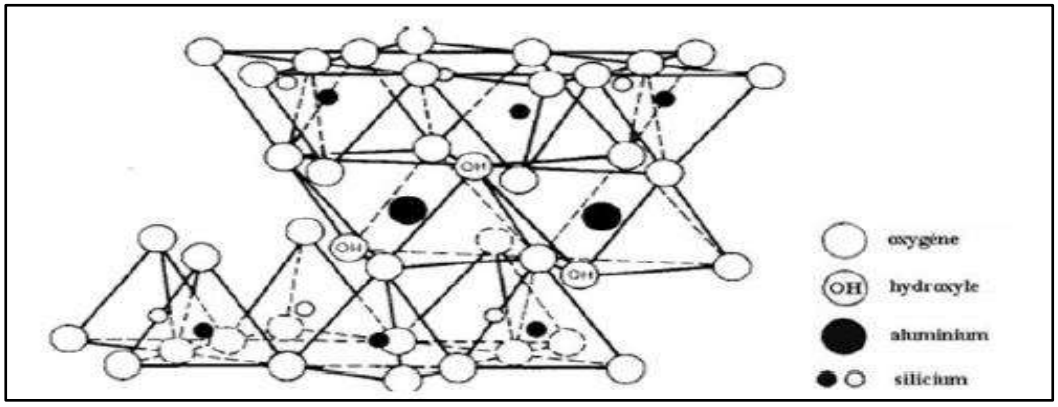


Figure I.4. Assemblage d'une couche octaédrique et deux couches tétraédriques pour une argile TOT (2:1).

I.4. Principales familles des argiles

L‘analyse du comportement gonflant des argiles consiste à préciser la nature des liaisons pour chacune des trois familles d‘argiles considérées

I.4.1.Kaolinite

Dans la kaolinite, les couches d’octaèdres et les couches de tétraèdres sont parallèles (figure I-5), et s’intercalent de telle façon que les atomes supérieurs et inférieurs de chacune des couches appartiennent à un même plan **(**Imelhaine, 2012).
L’espacement de base entre les ions d’oxygène dans l’unité tétraédrique et les ions hydroxyles dans l’unité octaédrique est presque identique. De ce fait, les couches tétraédriques et octaédriques peuvent s’associer et former ainsi le feuillet de kaolinite avec pour formule générale

$$N\ (Al_2\ SiO_2O_5\ (OH)_{4)}$$

L’épaisseur du feuillet élémentaire est d’environ 7Å mais les dimensions dans les deux autres directions sont infinies. La structure de la Kaolinite est donnée dans la (figure I.5)(Chamely, 1989).

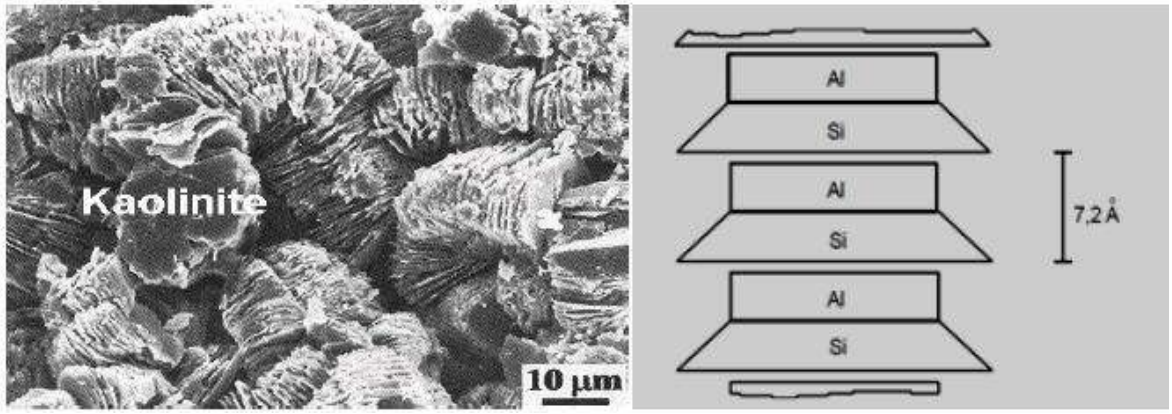


Figure I.5. Cristaux des particules de kaolinite vus au microscope électronique à balayage (Medjnoun ,2014).

I.4.2. Smectites

Ce sont des argiles du même type que le mica (une couche octaédrique entre deux couches tétraédriques), mais les liaisons ente feuillets sont plus faibles. Les substitutions iso-morphiques sont principalement localisées en couches octaédriques.

Les smectites possèdent ainsi des propriétés de gonflement qui se produisent surtout en présence d'eau et peuvent provoquer la dissociation complète des feuillets (figure I.6). par exemple la montmorillonite se caractérisent par l'existence entre deux feuillets d'un certain nombre de couches d'eau contenant des cations échangeables (libres) généralement des cations sodiques et calciques, ce qui entraîne un écartement des feuillets variables suivant les conditions du milieu. Dans la montmorillonite, il y a un remplacement partiel de l'aluminium des octaèdres par du magnésium (presque un sur six), le déficit de charge est composé par des cations généralement Na^{+} ou Ca^{+2} situés entre les feuillets et qui sont échangeables (ou compensateurs), ainsi la montmorillonite peut se présenter par la formule

$$(Si_4\ Al_2\ O_{10}\ (OH)_{\ 2})_2$$

Les feuillets sont empilés l'un sur l'autre comme les feuilles d'un livre (Wakim ,2005).Les montmorillonites sont des minéraux ou les liaisons entre les feuillets ont affaiblies, si bien que de l'eau se glisse entre ces feuillets en quantité variable. C'est ce qui explique que les montmorillonites sont sujettes au gonflement. Un sol contenant un pourcentage élevé de montmorillonite est susceptible de gonfler provoquant ainsi l'endommagement des fondations superficielles et des structures (sudhakar et Recanasi, 2000)

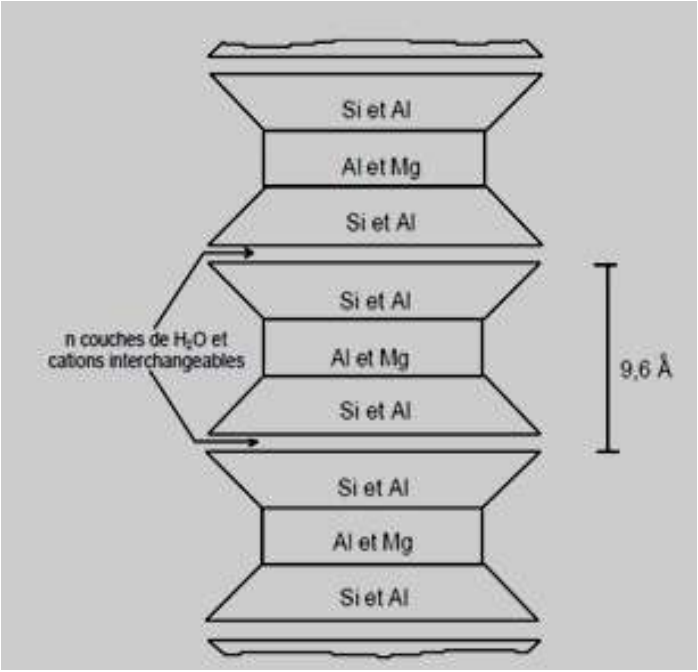


Figure I.6 : Structure de la montmorillonite.

I.4.3. Illites

L'illite est un des minéraux argileux du groupe des micas le plus répandu dans la nature. La structure de l'illite ressemble à celle de la montmorillonite. La différence provient de ce que l'aluminium remplace à 20 % le silicium dans les tétraèdres et que des atomes de potassium, venant rétablir l'équilibre des charges rompu par le remplacement, assurent la liaison des couches tétraédriques et octaédriques. Cette liaison est suffisante pour empêcher l'eau de s'insérer à l'inter- couche et l'illite n'est pas donc une argile très gonflante (figure I.7) (Khelfia ,1994).

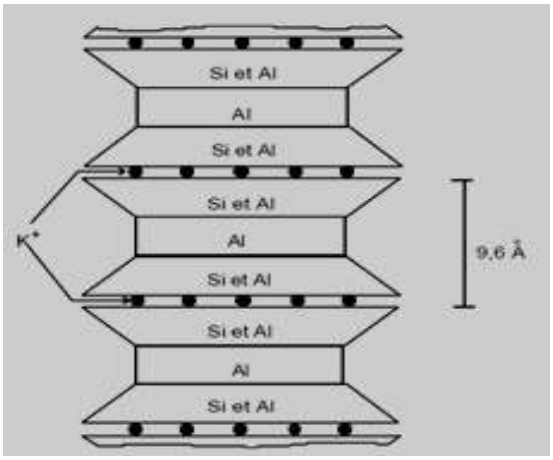


Figure I.7: Structure d'illite.

I.5. Principales caractéristiques des minéraux argileux

I.5.1. Densité De Charge Spécifique

La densité de charge spécifique est égale au rapport entre la capacité d'échange cationique CEC et la surface spécifique S de la particule argileuse.

$$\sigma m_{eq} / m = \frac{CEC}{S}$$

Deux types de charge existent dans les milieux argileux : une charge permanente ou structurelle liée aux substitutions ioniques (Al^{+3}pour Si^{+4}dans la couche tétraédrique ; Mg^{+2} ou Fe^{+2} pour Al^{+3} dans la couche 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 (Lefevre et Lajadie, 1999).

I.5.2 Capacité D'échange Cationique (CEC)

Elle 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 (Belabbaci, 2014).

I.5.3 Surface Spécifique

Les argiles sont composées de la surface externe comprise entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace interfolier. L'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir de gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé. La surface spécifique d'un sol est le rapport entre l'air total des particules et sa masse sèche (Bouassida ,2009).

I.5.4. Capacité D'adsorption D'eau

Le caractère dipolaire de l'eau lui confère la propriété d'être attirer par l'intermédiaire de ces extrémités positives à la surface négative des matériaux argileux .Toutefois, selon la force des liens unissant les feuillets d'argile, ceux-ci autorisent ou non l'arrivée de l'eau dans l'espace interfolaire. Chez certaines argiles l'eau ne peut s'engager entre les feuillets comme c'est le cas de la kaolinite et de l'illite, par contre la montmorillonite se distingue par sa forte capacité à adsorber les molécules d'eau (Mazouz, 2012).

La capacité des argiles à adsorber les molécules d'eau dépend aussi:

- Du déficit de charge positive causé par les substitutions isomorphiques des cations Si^{+4} et Al^{+3} par certains cations de faible valence.

- De la nature du cation échangeable : le cation exerce une attraction sur les molécules d'eau qui s'organisent d'une façon plus au moins régulière autour de lui. Les cations polyvalents ont uneaction plus intense que les monovalents, aussi il faut prendre en considération la taille de ces cations, qui leur permet ou non de se loger dans la molécule d'eau **(**Mellal ,2009).

I.6 .Interaction Eau - Argile

L'argile dans son milieu cherche à atteindre un certain équilibre chimique et physique vis-à-vis aux différentes réactions avec l'eau.

I.6.1 La forme de l'eau

L'eau est l'élément déterminant dans les propriétés des argiles, elle peut se présenter sous différentes formes dans la structure argileuse grâce à son caractère dipolaire, la molécule d'eau possède la propriété d'être attirée par l'intermédiaire de ses extrémités positives à la surface négative des minéraux argileux. Cette attraction modifie les propriétés hydrodynamiques de l'eau et cela dépend de la distance entre les molécules d'eau et la surface argileuse (Medjnoun, 2014).

Deux types d'eau, existant dans la matrice argileuse, peuvent être distingués:

a) Eau liée : Elle est attachée à la surface des grains par le jeu de forces d'attraction moléculaire. Ces forces décroissent avec la distance entre les molécules d'eau et le grain.

b) Eau libre : Au delà de 0,5 μm (Marsily, 1981), l'eau n'est retenue dans l'argile que par les forces capillaires et elle est capable de se déplacer sous l'effet de la gravité ou d'un gradient hydraulique suffisant. C'est l'eau libre, appelée aussi eau interstitielle

I.7.Comportement des argiles

Désordres occasionnées par l'utilisation des sols argileux dans les constructions de génie civil. Dans de nombreux pays du monde. En Algérie l'urbanisation de certains quartiers des villes et la construction des routes se heurtent aux problèmes que posent les phénomènes de gonflement, tassement, et de glissement.

I.7.1.Gonflement

Le gonflement est généralement accompagné d'un changement des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques du sol, ce qui peut avoir une influence sur la durée de vie de l'ouvrage. Les conséquences du gonflement sont nombreuses et dépendent principalement du type d'ouvrage, technique de construction et potentiel de gonflement

Le phénomène de gonflement tandis que sa diminution induit le phénomène de retrait. La variation du volume des argiles est fortement influencée par les facteurs microscopiques et macroscopiques.

A l'échelle microscopique, ces facteurs sont complexes et dépendent principalement des propriétés minéralogiques des matériaux argileux et des propriétés chimiques du fluide hydratant. A l'échelle macroscopique, ils dépendent des liaisonnes électriques entre les particules

I.7.1.1 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

I.7.1.2. Composantes 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 (Terzaghi, 1941), 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 (Harrat ,2007).

I.7.1.3.Composantes physico-chimiques du gonflement

L'approche physico-chimique est basée sur la théorie de la double couche de Gouy-Chapman, 1910, cette approche tient compte des forces inter particulaires qui sont fonction :

- Des forces électriques
- De la texture de la surface des particules.
- De 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'argile set provoquent l'expansion de la masse du sol (Harrat ,2007).

I.7.1.4.Paramètres de gonflement

a) Pression de gonflement (σg)

D'un élément de sol ou de roche, dont l'état physique initial est connu, peut être définie comme l'état de contrainte à exercer pour maintenir son volume constant pendant l'imbibition sans distorsion jusqu'à sa saturation complète. Cette définition de la pression de gonflement est la plus citée mais elle n'est pas la seule. (Nowamooz, 2008).

b) Indice de gonflement (Cg)

Traduit l'importance de la déformation de gonflement induit par un déchargement par rapport à un état de contraintes donné. La déformation par gonflement est obtenue au bout d'un temps d'équilibre. En principe, ces trois phénomènes sont mesurés sur des éprouvettes en compression isotrope ou œdométrique. Contrairement à la pression de gonflement et au potentiel de gonflement obtenus à la saturation du sol, l'indice de gonflement est issus d'un déchargement mécanique (Nowamooz, 2008).

C) Potentiel de gonflement (εg)

D'un élément de sol ou de roche, dont l'état physique initial est connu, est la déformation maximale (Δh/h) que provoque l'imbibition de cet élément soumis à un état de contrainte nulle ou quasi-nulle jusqu'à sa saturation complète**.**

Les désordres provoques par le gonflement affectent généralement les constructions apportant de faible contrainte sur le sol support. La pathologie dépend du type d'ouvrage.

Les phénomènes de retrait et de gonflement de certains sols argileux ont été observés depuis longtemps dans les pays à climat aride et semi-aride où ils sont à l'origine de nombreux dégâts causés tant aux bâtiments qu'aux réseaux et voiries(Nowamooz,2008).

I.7.1.5.Cinétique de gonflement

Comme le gonflement des argiles est très lent à cause de la faible perméabilité et dépend de la nature et de l'état du sol, il est donc essentiel de comprendre la partie mécanique qui est caractérisée par la relation déplacement-temps c.à.d. (ξe0-logt), elle dépend de plusieurs facteurs : La perméabilité du sol

- La succion ou gradient hydraulique
- La structure du sol
- La nature du sol et le niveau de chargement.

Le processus de gonflement des sols argileux est contrôlé par plusieurs mécanismes superposés à différentes échelles et s'exprime de manière différée à l'échelle macroscopique (Draouet et Nebati,2016)

Lors d'un essai de gonflement libre ou lors d'un palier de déchargement, il est possible de distinguer deux phases de déformations (figure I.8).

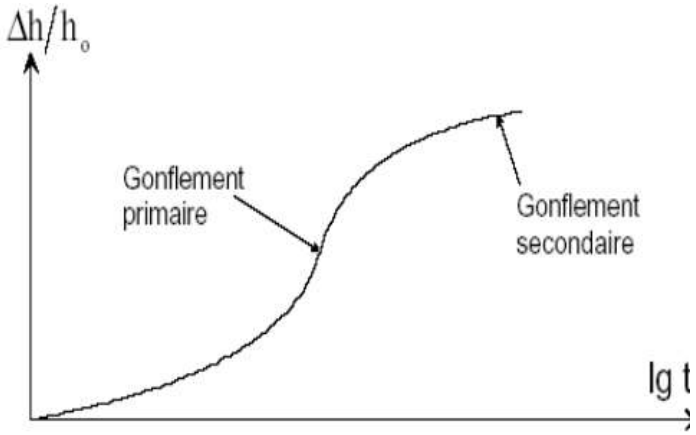


Figure I.8: Courbe du gonflement en fonction du temps **(**Selon Chen, 1988).

a)Gonflement primaire

Le premier intervalle est lié au processus de diffusion ou de migration de l'eau, il est dû à la dissipation de succion dans les macrospores du sol et est proportionnellement rapide en comparaison avec le deuxième. Il dépend de plusieurs caractères :

- Le contrôle est assuré par le gradient de charge hydraulique et la perméabilité du sol ;
- Il dépend de la nature du matériau, son état de saturation et l'état de contrainte ;
- La procédure d'imbibition (une seul face ou les deux) ;
- La cinétique est plus ou moins lente et dure de quelques heures à quelques jours (Draouet Nebati,2016).

b) Gonflement secondaire

Ce cycle correspond à un processus de cinétique qui est lent et attaché à l'hydratation progressive des minéraux argileux (Draouet et Nebati,2016).

I.7.1.6.Manifestations dus au gonflement des argiles

L'examen des travaux publiés dans la littérature mondiale montre que l'on rencontre des problèmes de construction sur les sols gonflants dans les pays suivants : Afrique du sud, Algérie, Arabie Saoudite, Argentine, Australie, Azerbaïdjan, Botswana, Birmanie, Canada, Chine, Cuba, Égypte, Espagne, Éthiopie, France, Ghana, Grèce, Hongrie, Inde, Israël, Iran, Italie, Kazakhstan, Maroc ,Mexique ,Nigéria ,Pakistan, Pologne, Portugal, Roumanie ,Royaume ,Uni Russie, Suisse ,Syrie, Turquie, Ukraine ,USA, Vénézuéla, Zimbabwe.

Les désordres touchant les structures et attribués aux mouvements des sols gonflants sont moins spectaculaires, ne mettent que très rarement en danger les vies humaines mais ne représentent pas moins l'un des plus coûteux sinistres que connaissent de nombreux payé

a- Cas des structures

Pour les structures de génie civil on peut observer les désordres suivants :

- fissuration des structures
- distorsion des ouvertures
- rupture des canalisations
- décollement des bâtiments

Dans la Wilaya de Saïda (Sud- Ouest) d'Algérie, de nombreux projets fondés sur des motifs argileux qui ont des problèmes a montré des signes de dégradations telles que fissures dans les structures. Ces dégradations ont entraîné la destruction totale des bâtiments figure au-dessous.



Figure I.9: cas pathologique dans la ville de Saida (Houmadi.1999).

b- Cas Des Chaussées

Dans le cas des ouvrages routiers, les désordres subit par la chaussée se résument généralement en des fissures apparaissent a la fin de la saison sèche sur les accotements de la chaussée. En saison de pluie, ces fissures permettent à l'eau de s'infiltrer plus facilement entraînant la saturation de ces zones et par conséquent leur gonflement, engendrant ainsi l'apparition de déformation à la surface de la chaussée (figure I.10 et I.11), puis l'apparition de fissures longitudinales qui peuvent être assimilées à la chute de la portance dans les zones latérales de la chaussée entraînant l'affaissement des bords.

Ces phénomènes sont accélères par le flux routier. Ces désordres s'amplifient avec le début de la saison sèche (figure I.12) (Rapport de synthèse ,1988).

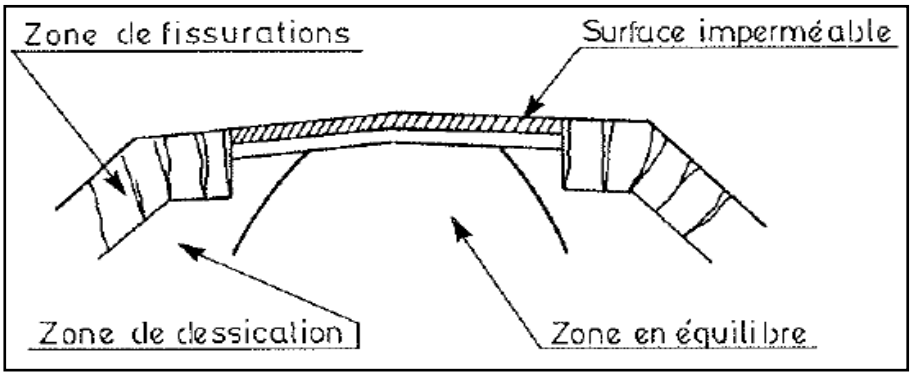


Figure I.10: Apparition des premières fissures sur les accotements (fin de saison sèche)

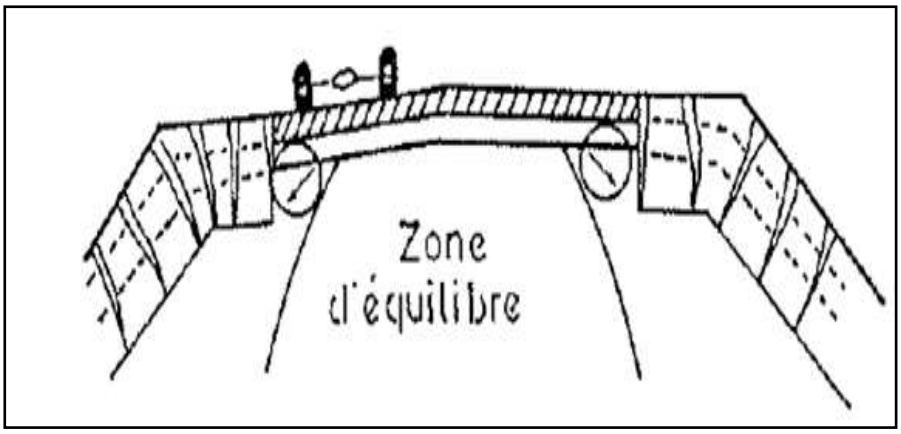


Figure I.11: Apparition des premières déformations et infiltration d'eau à travers les fissures (début de la saison des pluies) (Rapport de synthèse ,1988).

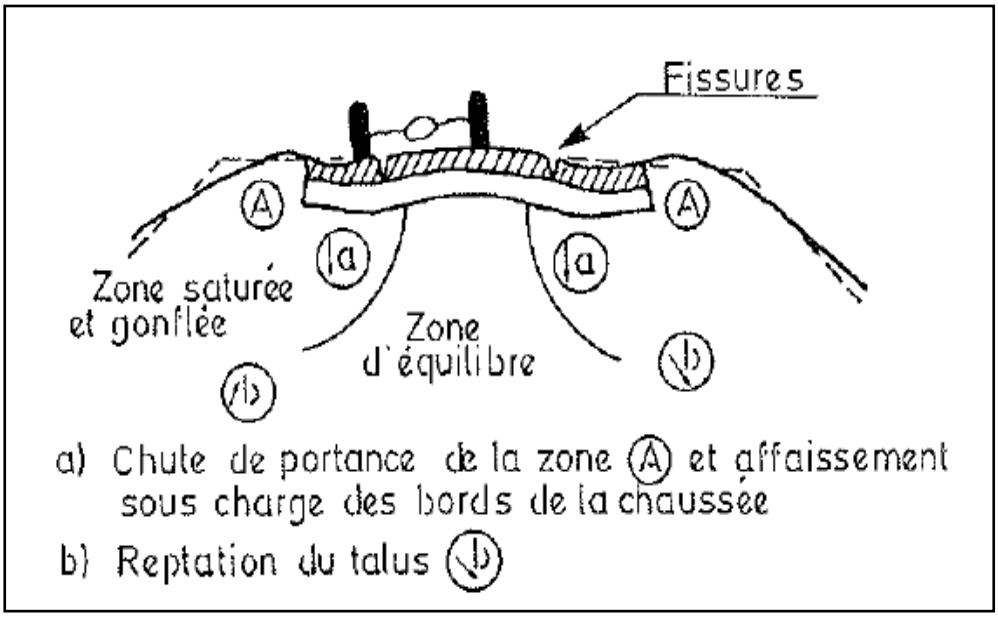


Figure I.12: Chute de portance des zones saturées apparition des fissures longitudinales (fin de saison des pluies) (Rapport de synthèse ,1988).

I.7.2 .Tassement

Le tassement du sol est sa déformation verticale due à l'application des contraintes extérieures telles que les remblais, les fondations ou son propre poids.

Les tassements peuvent être uniformes ou différents d'un point à l'autre selon la nature de sol en place. Dans les sols non saturés les tassements sont presque instantanés mais dans les sols saturés, ils peuvent s'étendre sur quelques secondes dans les sols sableux-graveleux, jusqu'à plusieurs dizaines d'années dans les argiles peu perméables.

Pour vérifier la conformité des structures vis-à-vis des conditions de sécurité et de service on doit faire un calcul de tassement (kelanemer et hamodou, 2016).

I.7.3. Glissements

C'est un glissement de terrain sur lequel la surface de rupture est incurvée vers le haut (en forme de cuillère) et le mouvement de glissement est plus ou moins en rotation autour d'un axe qui est parallèle au contour de la pente.

La masse peut, dans certaines circonstances, se déplacer comme un massif relativement cohérent le long de la surface de rupture avec peu de déformation interne.

Une grande partie de la matière peut se déplacer presque verticalement vers le bas, et la surface supérieure de la matière déplacée peut s'incliner vers l'arrière, vers l'escarpement. (Figure I-13).



Figure I.13 : Exemple d'un glissement de terrain sur RN 11, Damous, Algérie.

I.7.4.Retrait

Le phénomène de retrait gonflement des argiles est un mouvement de terrain lent et continu du à la production, par des variations de la quantité d'eau dans certains terrains argileux, de gonflements (période humide) et de tassements (périodes sèches).

Ces variations de volume se traduisent par des mouvements différentiels de terrain et se manifestent par des désordres affectant principalement le bâti individuel de **(**kelanemer et Hamodou**,** 2016).

I.8.Conclusion

Les matériaux argileux, sont très fréquents et couvrent une partie considérable du globe terrestre. Les dommages provoqués par le gonflement des sols argileux présentent un coût supérieur à celui de toutes les catastrophes naturelles.

On dispose de différentes solutions parmi lesquelles on peut relever :

- Le changement de site.

- Le remplacement des sols gonflants par un matériau non gonflant.

- La protection du sol gonflant vis à vis des accès d'eau.

- La prévention du gonflement par un chargement approprié, et ainsi le calcul des structures de manière à ce qu'elles puissent supporter les pressions de gonflement susceptibles de se développer.

- La possibilité de variation de volume sous des conditions de chargement déterminé, les structures étant conçues alors, pour suivre les déplacements sans dommages.

- La mise en place de fondation profonde, développant leur capacité portante au delà de la zone active.

- et enfin la stabilisation du sol gonflant par un traitement approprié, C'est le but de notre travail de recherche.

II.1.Introduction

Lorsque les sols posent des problèmes (le tassement, glissement, gonflement, retrait) de portance ou de liquéfaction pour un ouvrage, les améliorations et renforcements de sol sont général la première option étudiée car ils peuvent permettre de préserver le mode de fondation le plus économiques et plus simple à mettre en œuvre, à savoir les fondations superficielles.

Les techniques d'amélioration qui permet changement de mauvaise comportement (caractéristique physique et mécanique) pour obtienne bon comportement à court terme. Il existe plusieurs techniques servant de valoriser les sols des mauvaises caractéristiques géotechnique à partir les facteurs la nature de sol, ouvrage et les économique on peut choix technique qui relise sur terrain. Ces différentes techniques d'amélioration permettent d'augmenter la densité du sol, de diminuer ou augmenter la perméabilité, de réduire la compressibilité, de minimiser la sensibilité à l'eau, de modifier la fraction argileuse, ou de changement les comportements du sol par traitement il s'agit de la stabilisation .

En technique routière, Les techniques de stabilisation les plus utilisées (qu'elles soient chimiques ou autres) dans le domaine routier sont :

- Traitement par ajout de matériaux inertes.
- Traitement chimique, les ciments, la chaux, cendre volante et les laitiers développés par les cimentiers pour répondre aux attentes spécifiques des entreprises de construction routière.

Dans ce chapitre on s'intéresse les méthodes de stabilisation les plus utilisées. La présentation porte essentiellement sur la stabilisation chimique conventionnelle.

II.2.Traitement chimique

Elle se base sur l'utilisation de produits chimiques ou de liants afin d'augmenter la concentration ionique de l'eau libre et de réduire les phénomènes d'échange indésirables.
Les liants sont de deux types :

- Organiques (goudrons, bitume, résine naturelle, polymère, …)
- Hydrauliques (ciment, chaux, cendres volantes, pouzzolane).

II.2.1 Liants organiques

Les liants organiques sont des produits collants. Lors du malaxage, ils enrobent les particules argileuses et donnent aux sols gonflants des propriétés d'hydrophobes. Ceci entraîne une diminution de l'affinité du sol à l'eau et une modification de sa structure microscopique.

- **L'asphalte**

L'asphalte est un matériau viscoélastique qui couvre et lie les particules entre elles plus qu'il n'induit de réactions chimiques ou crée des nouveaux composants. Il peut augmenter la résistance et la rigidité et réduire la sensibilité à l'eau des matériaux.

- **Les produits organiques**

Certains produits organiques sont proposés pour la stabilisation des sols fins. Il s'agit de dérivés aminés tensioactifs, de résines associées à des agents durcisseurs ou d'extraits de végétaux du type lignosulfonates ou lignosulfites.

Ces produits améliorent les caractéristiques des sols fins en diminuant leur affinité à l'eau, en enrobant leurs particules d'un film tensioactif. Ces additifs sont fournis sous forme de liquide ou de pâte diluable ou de poudre dispensable.

Ils ont une action d'imperméabilisation qui réduit l'imbibition par capillarité et par succion mais qui ne renforce pas les qualités des sols intrinsèquement faibles. La pérennité de leur effet (à long terme) n'est pas assurée. Pour que les dosages ne soient pas excessifs, il faut que le pourcentage d'argile contenu dans les sols traités ne dépasse pas 15%. Les sols qui se prêtent le mieux à cestraitements sont les limons argileux. Les meilleurs produits sont les amines aliphatiques que l'on peut employer pour la protection temporaire des plates formes (Gueridi, 2009).

II.2. 2. Les liants hydrauliques

Les liants hydrauliques les plus utilisés pour stabiliser les sols ou renforcer les matériaux sont la chaux et le ciment. Leur action résulte essentiellement de l'effet de prise et de la cristallisation de leurs constituants par hydratation. L'emploi de ces techniques s'est développé principalement en technique routière. Les scories des hauts fourneaux et les cendres volantes sont aussi très utilisées. Ces liants ont des réactions quelque peu différentes et exigent des conditions différentes pour se réaliser, cependant les effets de leur réaction sont fortement similaires

II.2.2.1.La chaux

La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elle est utilisée depuis des siècles. Il existe plusieurs types de chaux utilisée dans des différents domaines notamment dans les traitements de sols argileux.

Chimiquement, c'est un oxyde de calcium avec plus ou moins d'oxyde de magnésium. Réunion d'ingénieur, matériaux de constriction, Edition Eyrolles (1979).

II.2.2.2. Différents types de chaux

Il existe trois principaux groups de chaux **:**

- La chaux aérienne,
- La chaux hydraulique.
- La chaux magnésienne.

a. Chaux aérienne

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

- **Chaux vive**

La chaux vive est obtenue par calcination du carbonate de calcium ($CaCO_3$), à une température supérieure à 900°C. Celui-ci est dissocié à cette température en oxyde de calcium, ou chaux vive, et en gaz carbonique:

$CaCO_3 + 50\ kcal \rightarrow CaO + (CO_2)$

La chaux vive réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de chaleur puis se transforme en chaux éteinte. La chaux éteinte est employée dans de nombreux domaines tels que le bâtiment, la sidérurgie et la dépollution (Tangi , 2010).

La chaux vive est caractérisée par son degré de calcination et la taille de ses particules. Le degré de calcination indique combien le dioxyde de carbone est extrait du calcaire.

- **Chaux éteinte**

Appelée aussi chaux hydratée, 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 :

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + \text{chaleur (15,5 Kcal)}$$

b. Lait de chaux

Le lait de chaux est obtenu par mise en suspension de chaux éteinte dans de l'eau. La concentration varie entre 300 et 400 g de chaux éteinte par litre de lait. Le lait de chaux peut également être préparé à partir de chaux vive, mais des précautions particulières sont à prendre en raison de l'exothermicité de la réaction d'hydratation de l'oxyde de calcium. Son emploi en traitement de sol, présente l'avantage de supprimer la poussière et d'humidifier les sols secs (alors que la chaux vive achève au contraire de les dessécher). En pratique, le lait de chaux ne fait pas l'objet d'une norme car ses caractéristiques, c'est-à-dire essentiellement sa concentration, sont déterminées par les besoins réels des matériaux au moment des travaux. On mesurera donc:

- sa concentration (exprimée en extrait sec ES);
- éventuellement la teneur en chaux libre (Guide technique, 2004).

C). chaux hydrauliques

Sont constituées de silicate de calcium, d'aluminate de calcium et d'hydroxyde de calcium (Bousalem ,2010)

Elles font prises en deux phases :

- une prise hydraulique : 70% à 80% en fonction du taux d'argile ;
- une prise aérienne par carbonatation : 20% à 30%.

II.2.3.Mécanisme de stabilisation à la chaux

Les réactions qui se produisent en présence de chaux (sol-chaux) se résument comme suit : (Choquette et al1987).

- échange cationique: remplacement des principaux cations échangeables des min6raux argileux par l'ion calcium provenant de la chaux;
- floculation et agglomération des particules d'argile;
- carbonatation de la chaux: réaction entre la chaux et le dioxyde de carbone de l'air pourformer du carbonate de calcium;
- réaction pouzzolanique: réaction entre la chaux, la silice et l'alumine provenant desminéraux argileux, produisant des agents cimentaires (C-S-H, C-A-H etn C-A-SH);

La première réaction est celle qui initie la stabilisation. Elle se fait sentir

instantanément lorsde l'ajout de chaux. Un excès d'ion Ca^{2+} survient alors dans la solution interstitielle. Les ionsCa^{2+} sont en partie adsorbés à la surface des particules argileuses en remplacement des cations monovalents comme Na' et K^+. La quantité de Ca^{2+}adsorbée dépend de la capacité d'échange cationique du sol traite. Plus la capacité d'échange est élevée, plus le sol adsorbe de Ca^{2+} En fait tous les cations adsorbés ne sont plus disponibles pour les réactions pouzzolaniques.

La deuxième réaction, la floculation, intervient aussi très rapidement et cause une modification importante de la plasticité du sol. La dissociation de la chaux en Ca^{2+} et OH entraine une augmentation du pH de la solution a une valeur supérieure 12.4. Un pH aussi alcalin provoque l'attaque de certains minéraux, principalement les silicates et les aluminates minéraux argileux, quartz, feldspath)Le pH élevé provoque donc l'attaque des argiles, ce qui permet la dissociation de l'hydrogène des groupes S_iOH présents en bordure des couches tétraédrique et AlOH présents en surface des couches octaédriques selon les réactions suivantes (Mathew et Narasimha Rao,1997) :

$$S_iOH = S_iO^- + H^+$$

$$AlOH = AlO^- + H^+$$

L'excès de charge négative rend l'attraction entre les particules plus intense et crée ainsi la floculation des particules.

La troisième réaction est indésirable puisqu'elle ne fait que consommer de la chaux en la transformant en carbonate de calcium au contact du CO_2 de l'air, et forme ainsi des liens de cimentation très fragiles. Cette chaux ayant réagi devient inutilisable pour les réactions pouzzolaniques

La dernière réaction est la plus importante car c'est elle qui crée des liens de cimentation entre les particules en produisant de nouveaux minéraux qui augmentent la résistance des sols.

Cette réaction est plus ou moins lente, et est fonction de divers facteurs comme la minéralogie et la granulométrie du sol traité ainsi que le temps et la température de mûrissement. Cette réaction fait intervenir la silice et l'alumine dissociées des particules attaquées par la chaux en formant de nouveaux minéraux comme des C-S-H (silicates de calcium hydrates), des C-A-H (aluminates de calcium hydratés) et des C-A-S-H (aluminosilicates de calcium- hydratés) (Tremblay ,1998).

II.3.Traitement au ciment

Le traitement au ciment est la méthode habituelle pour la construction des couches de forme performantes. Il convient plus particulièrement aux sols dispersifs et aux sols peu plastiques, qui sont apriori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argiles, Ce traitement apporte une stabilité et cohésion ainsi permet d'avoir une évolution rapide et durable des résistances mécaniques par liaison des grains de sol. Depuis l'antiquité, la stabilisation au ciment est considérée comme un élément important des constructions.

Ce procédé est appliqué également en Suisse depuis deux ans et tend à se développer rapidement. L'action de stabilisation est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau des conditions de température (Johnson, 1960).

L'objet du traitement des sols au ciment est sensiblement identique à celui du traitement à la chaux car il permet d'améliorer les caractéristiques initiales des matériaux. En effet, il peut s'appliquer à certains sols peu ou pas plastiques dont les teneurs en eau naturelles trop élevées ne permettent pas de réaliser des remblais dans de bonnes conditions et avec des garanties suffisantes de qualité.

II.3.1.Propriétés du ciment

A. Le ciment Portland contient quatre principaux constituants :

- le silicate bicalcique (Bélite) :2CaO, SiO2 ou par abréviation C2S
- le silicate tricalcique (Alite) :3CaO SiO2 ou par abréviation C3S
- l'aluminate tricalcique (Célite) :3CaO,Al2O3 ou par abréviation C3
- L'alumino-ferrite tetracalcique (Célite) :4CaO,Al2O3 ,Fe2O3 par abréviation C4AF

B. Les différentes catégories de ciment :

- Le CEM I ou ciment Portland, contient au moins 95 % de clinker et au plus 5% de constituants secondaires. Les CEM I conviennent pour le béton armé ou le béton précontraint où une résistance élevée est recherchée.
- Le CEM II A ou B ou Ciment Portland composé, contient au moins 65% de clinker et au plus35 % d'autres constituants : laitier de haut-fourneau, fumée de silice (limitée à 10%), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires… Les CEM II sont bien adaptés pour les travaux massifs
- Le CEM III A ou B ou ciment de haut-fourneau, contient entre 36 et 80% de laitier de

hautfourneau et 20 à 64% de clinker.

- Le CEM III C ou ciment de haut-fourneau contient au moins 81% de laitier et 5 à 19% de clinker
- Le CEM IV A ou B est un ciment de type pouzzolanique. Avant l'introduction de la NF EN197-1, il était connu sous l'appellation CPZ. Ce type de ciment n'est pas fabriqué en France.
- Le CEM V A ou B ou ciment composé (anciennement ciment au laitier et aux cendres)contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50% de cendres volantes et de 18 à 50% de laitier de haut-fourneau.
- Les CEM III et CEM V qui comportent du laitier de haut-fourneau sont bien adaptés aux travaux hydrauliques souterrains, aux fondations et aux travaux en milieu agressif. Leur utilisation permet de réduire considérablement les émissions de CO2 grâce à la substitution du clinker par d'autres constituants. Entre 2000 et 2008, la part de production de ce type de ciment est ainsi passée de 5 à 11%
- C. le ciment Portland Artificiel (CPA) : Résulte du broyage du clinker et du sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) pour régulariser la prise, et éventuellement de fillers en faible quantité. (F.Ghoumari)

III.3 .2.Choix du ciment pour le traitement

Dans la gamme étendue disponible, le choix du type de ciment se fera sur différents critères :

- temps de prise assez long, pour la mise en œuvre.
- bonne résistance à moyen et long terme.
- compatibilité avec le sol à traiter.
- bon rapport qualité/prix.

II.3.3.Processus de stabilisation par le ciment

Le ciment Portland est un matériau fin formé à partir d'un mélange de clinker et de gypse. Le clinker est composé principalement de quatre phases d'oxydes ; silicate tricalcique (C3S).Silicate bicalcique (C2S), aluminate tricalcique (C3S) et fernaluminate tétracalcique (C4AF). Sachant que :

$$C = CaO \quad S = SiO2 \quad A = Al2O3 \quad F = Fe2O3$$

Les deux phases de silice calcique sont les plus importantes dans le processus de stabilisation. Lors de l'hydratation, ces deux phases produisent l'hydroxyde de calcium Ca(OH) 2 et l'hydrate de silice calcique (C3- s2- H3). L'hydroxyde de calcium fournit l'apport en calcium nécessaire à l'échange cationique, à la floculation de l'argile et à son agglomération. L'hydrate de silice calcique, quant à lui, apporte la résistance au sol traité. Lorsque le Ciment Portland est mélangé à l'eau, l'initiation de l'hydratation occasionne une augmentation rapide de la concentration de calcium dans le sol.

La solution devient donc saturée en hydroxyde de calcium. À mesure que les ions de calcium (Ca2+) sont libérés, ils deviennent disponibles pour stabiliser l'argile. Après un certain temps (environ 12 heures). Une quantité importante de calcium et d'eau est consommée formant ainsi le C-S-H (C = C3, S = S2, H = H3) et le Ca (OH) 2

. $2(C3S) + 6\ H2O \rightarrow C\text{-}S\text{-}H + 3Ca(OH)2$

$2(C2S) + 4\ H2O \rightarrow C\text{-}S\text{-}H + Ca(OH)2$

Incorporé au sol, le ciment va se dissoudre et s'hydrater. L'hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres est suivis par une phase de cristallisation. En cristallisant, les constituants hydratés du ciment 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.

La vitesse et le taux d'hydratation dépendent principalement

Des constituants du ciment et de leur finesse.

- De la présence de certaines substances (inhibition par les matières organiques).
- De la teneur en eau.
- De la température (toutefois, la prise hydraulique est nettement moins sensible à la température que les réactions pouzzolaniques dans la mesure où celle-ci reste supérieure à (0°C).

L'ajout du ciment Portland à l'argile engendre quatre étapes distinctes :

- L'échange cationique
- La floculation et l'agglomération de l'argile ;
- L'hydratation par cimentation
- Les réactions pouzzolaniques.

Le Ciment Portland possède des propriétés lui permettant d'initier une étape de plus que la chaux, soit celle de l'hydratation par cimentation.

Lorsque le Ciment Portland est hydraté, en plus du C-S-H, il forme également l'hydrate d'alumine-calcique (C-A-H) et le Ca (OH) 2 Le CS-H et le C-A-H forment un réseau servant de « colle » donnant une structure et de la résistance au mélange (pierre Luc bégin, 2007).

II.3.4.Influence du ciment sur les sols dispersifs

Le ciment portland comporte des silicates, aluminium et sulfates de calcium. Lors de l'hydratation, le ciment forme de la chaleur éteinte appelée portlandite. Les réactions entre le sol, le ciment et l'eau commencent par un échange de cations puis la production d'agents de cimentation.

II.3.5.Action de la stabilisation par le ciment sur le sol

a.Actions immédiates

- **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 du liant. Cet assèchement qui, selon les dosages appliqués, reste théoriquement de l'ordre de 0,3 à 0,5% de teneur en eau par pourcent de liant.

- **Modifications des caractéristiques de la fraction argileuse du sol**

Avec certains liants spéciaux routiers comportant une forte proportion de chaux (vive ou éteinte), 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) (Younoussa ,2008)

L'abaissement de teneur en eau résulte uniquement de l'apport de matière sèche. Il est donc très limité.

Le traitement au ciment seul ne convient pas pour des sols très humides. Une solution est de les prétraiter à la chaux.

b. Action a long terme

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 est celle du démarrage de la prise (également dénommée : phase dormante). 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, voire 48 h après fabrication du

mélange. 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 à quelques semaines pour les liants à prise lente comme certains liants spéciaux routiers.

Enfin, 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.

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 (Younoussa, 2008).

II.4. Exécution des travaux du traitement au ciment

II.4.1.Préparation du sol

- **Décohésion du sol en place**

Si nécessaire, cette opération foisonne le sol, favorisant soit son séchage par évaporation, soit son humidification par arrosage. Elle facilite le travail des malaxeurs, augmentant ainsi leur rendement. Le cas échéant, elle contribue à l'élimination des blocs gênants. Elle s'effectue à la défonceuse à dents, montée sur bouteur ou niveleuse **,(**Guide technique (Traitement des sols aux liants hydrauliques , 2009).

- **Élimination des éléments trop gros**

L'élimination de la fraction grossière s'effectue surtout par criblage, parfois par ramassage mécanisé.

- **Homogénéisation des matériaux**

Elle s'effectue au cours de l'extraction et du chargement, avec parfois mise en dépôt provisoire et reprise.

- **Amélioration de l'état hydrique :**

Si le sol en place est trop humide et les conditions météorologiques favorables, on le laisse quelque peu sécher après scarification. Si, au contraire, il est trop sec, on l'arrose une fois scarifié. L'arrosage avec enfouissement est efficace (garantie d'homogénéité de la teneur en eau) et respectueux de l'environnement (préservation des ressources en eau). Les volumes d'eau nécessaires peuvent être très importants pour certains sols argileux ou silteux secs.



Figure II .1 : Préparation du sol.

II.4.2.Épandage de liant

L'épandeur choisi doit être capable d'épandre le dosage surfacique de liant prévu en une seule passe. L'exécution de l'épandage doit être très soignée, en opérant par bandes adjacentes jointives **(**figure **II**.2)**,** (Guide technique (Traitement des sols aux liants hydrauliques, 2009).



Figure II.2. : Épandage.

II.4.3.Malaxage en place

Le malaxage doit s'effectuer au pulvimalaxeur par bandes parallèles avec un léger recouvrement. L'obtention de la profondeur de malaxage visée et sa régularité sont des facteurs essentiels de réussite. La configuration des pulvimalaxeurs actuels, avec la chambre de malaxage située au centre de l'engin, entre les essieux, permet de les maîtriser. Un léger compactage entre deux passes de malaxage aide à obtenir et réguler la profondeur de travail.
La finesse de mouture est un autre paramètre important, dont dépendent l'homogénéité et l'efficacité du mélange **(**figure II.3).



Figure II.3:Malaxage.

II.4.4. Compactage

L'obtention de compacités élevées est une nécessité pour mobiliser pleinement les performances mécaniques du matériau. En particulier, dès lors que le sol traité présente une certaine rigidité, le fond de couche travaille en fatigue par flexion. Or, la résistance à la fatigue augmente nettement avec la compacité. La densification atteinte en fond de couche est donc un critère fondamental (figure II.4**) ,(**Guide technique (Traitement des sols aux liants hydrauliques ,2009).



Figure II.4:Compactage.

II.5.Conclusion

De nombreux chercheurs ont étudié différentes méthodes avec différents ajouts en vue de stabiliser ces formations évolutives. Les différents résultats trouvés concernant la stabilisation à la chaux et par ciment peuvent classer cette dernière comme le meilleur et l'idéal dans le domaine de stabilisation.

Pour l'utilisation de l'une ou de l'autre méthode de stabilisation il faut penser à des techniques pratiques de mise en œuvre sur le site et celles dont le prix revient sont les moins élevés, afin d'assurer la continuité entre les recherches faites aux laboratoires et leurs réalisations in situ.

III .1.Introduction :

Dans cette partie expérimentale, nous allons présenter les résultats des principaux essais que nous avons effectués au laboratoire centrale des travaux public (LCTP agence de BLIDA), hall de technologie université de Médéa et laboratoire géotechnique contrôle des matériaux –MEZAAD ROAD dans l'objet d'étudier l'influence de l'incorporation du ciment dans un matériau argileux. Nous commençons par présenter les matériaux d'étude.

Les martiaux utilisés dans cette étude sont respectivement un matériau argileux provenant de la région Ouezra Wilaya de Médéa, un ciment portland composé CPJ-CEM II/A fabriqué à M'Sila, Chlef …etc.

III.2.Prélèvement des échantillons

Les prélèvements d'échantillons effectués par le biais d'une pelle à une profondeur comprise entre 5m et 10 m d'un chantier de construction La route qui liée le projet 1200 logement ADLL fraction Boudha commune Ouezra (figure **III**-1) ont fait l'objet d'une sélection au niveau de la région d'Médéa et ce dans le but d'obtenir une éventuelle homogénéité des sols à étudier à fin de traiter avec le ciment .



Figure III.1 : Localisation du site étudie (Google Maps)

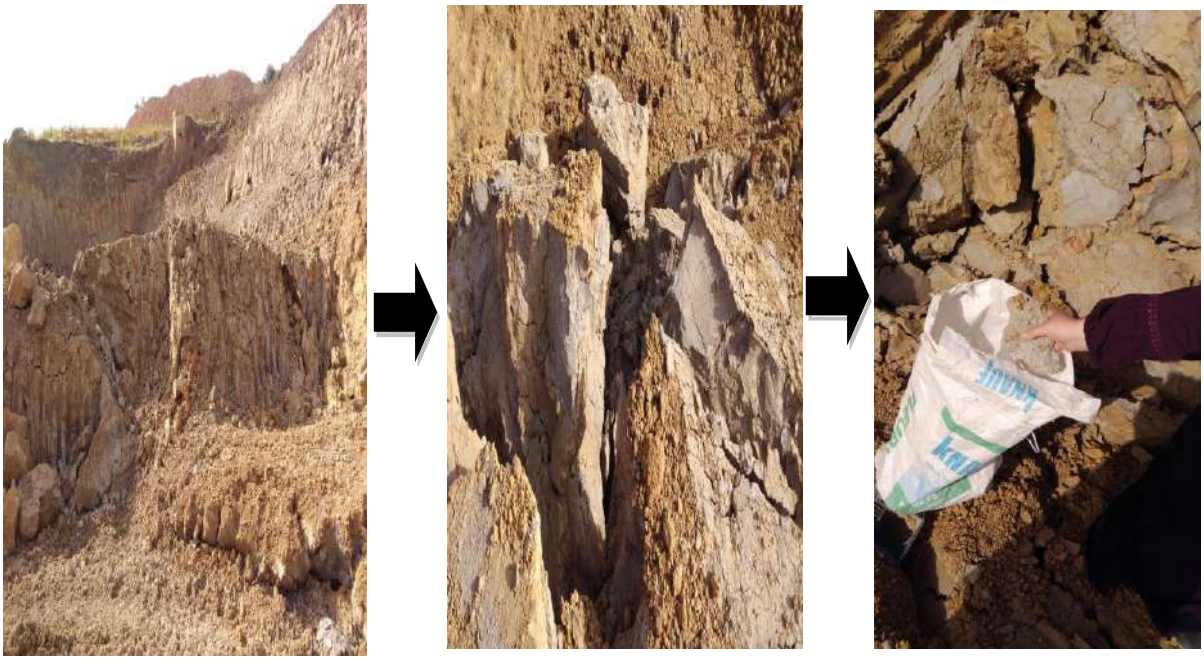


Figure III.2 : Prélèvement D'échantillon

III .3.Préparation de l'échantillon:

On prend chaque fois une quantité d'argile lieu le est séché à l'étuve à105ºC pendant 24 heures, ensuite broyé, et tamisé au tamis de 20 mm. La deuxième consiste stocker l'argile dans des sacs en plastiques.

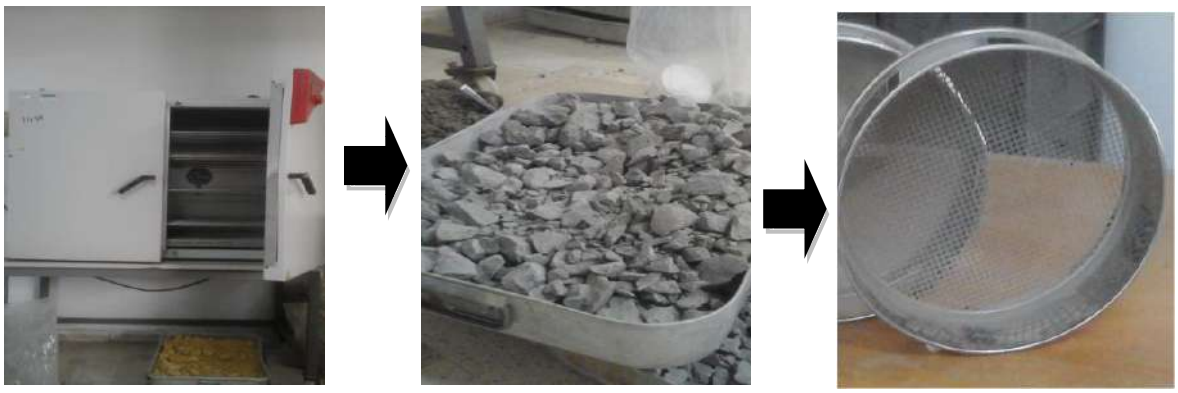


Figure III.3: Préparation de l'échantillon.

III. 4.Analyse du matériau argileux

Pour caractériser ce matériau, nous avons effectué les essais suivants :

- Analyse granulométrique (par tamisage et par sédimentométrie)
- Mesure des limites d'Atterberg
- Mesure de la valeur du Bleu de méthylène
- Proctor modifié
- Mesure des indices "Californian Bearing ratio immédiat et imbibé

III.5. Propriétés physiques

III.5.1.Teneur en eau (NFP 94-050)

La teneur en eau d'un sol est le rapport du poids de l'eau libre présente dans un certain volume de sol au poids des éléments solides compris dans ce volume.

Selon la norme NFP 94-050 la teneur en eau d'un sol se déterminée en mesurant la perte d'eau d'un échantillon représentatif après séchage au four jusqu'à masse constante à une température de 110 ± 5.On compare ensuite cette masse d'eau perdue (évaporée) à la masse des solides obtenus après séchage.

La teneur en eau de l'argile étudié est de 11%

III.5.2.Analyse granulométrique (NF P94 – 056, NF P94-057)

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions des grains de différentes tailles d'un matériau. Elle s'effectue par tamisage [NF P94 – 056] par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments sont supérieurs à 80µm (figureIII.4) suivie d'une analyse par sédimentométrie [NF P94-057]pour les éléments inférieurs ou égaux a 80µm. La sédimentométrie consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est lente.



a- tamisage **b- sédimentaire**

Figure III.4 : Analyse granulométrique

La courbe d'analyse granulométrique de l'échantillon est représentée sur la figure.III.5. La courbe granulométrique du sol naturel représentée sur la figure (III -5) montre qu'il est constitué que plus de 98,48 % de grains sont inférieures à 80 µm et plus de 0.38% des grains de ce sol sont situent à 2µm. Ce qui nous permet dire que cet échantillon représente un sol limon.

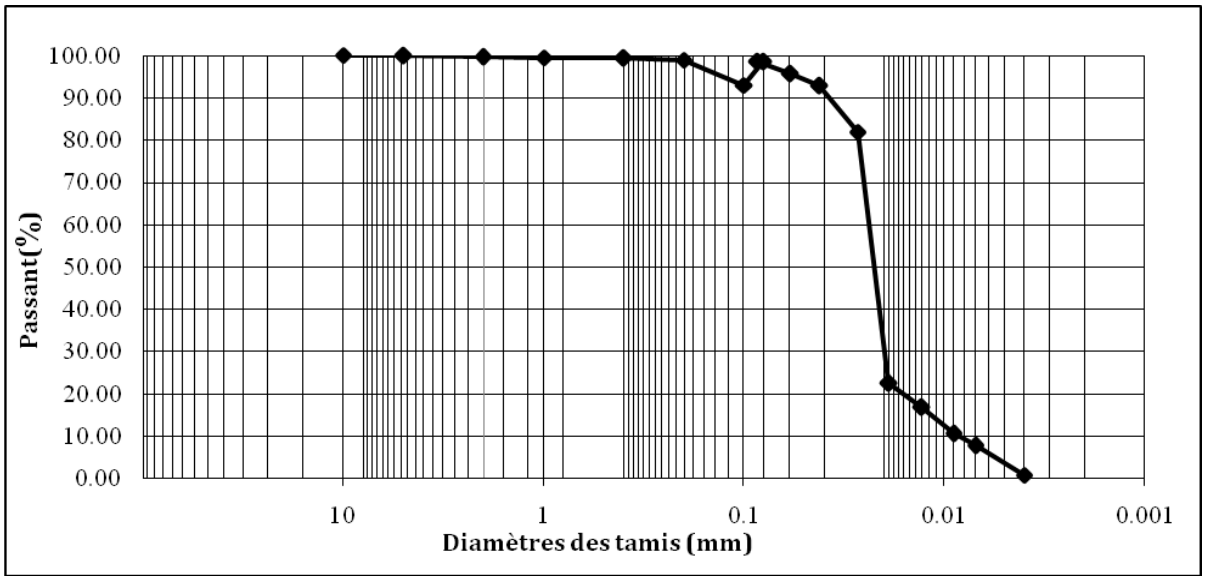


Figure III.5: la courbe granulométrique de sol étudié

III.5.3.Limites d'Atterberg (NF P 94-051)

La détermination des limites d'Atterberg est fondamentale dans le cas des sols argileux car elles permettent d'évaluer la plasticité qui est une propriété très importante pour les sols argileux.

On définit les paramètres suivants :

- Limite de liquidité (WL)

Correspond à la teneur en eau permettant un éloignement des particules suffisant pour annuler pratiquement les forces interarticulaires ce qui leur permet un libre déplacement relatif;



Figure III.6.Détermination de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande.

- **Limite de plasticité** (WP)

Correspond à la teneur en eau suffisante pour permettre une certaine liberté de déplacement relatif des particules mais trop faible pour les 1oigner au point de réduire fortement les forces de liaisons entre elles.



Figure III.7.Détermination de la limite de plasticité

- **Indice de plasticité (IP)**

$$IP = W_L - W_P$$

Celui-ci correspond à l'amplitude du domaine plastique dans lequel le matériau peut subir des déformations irréversibles à volume constant sous contraintes.

- **Indice de consistance IC**

Cet indice prend en considération la teneur en eau naturelle w d'un sol et les limite d'Atterberg permettent de se faire une idée de l'état d'une argile qu'on peut caractériser par son indice de consistance

$$I_c = \frac{WL - w}{IP}$$

La limite de liquidité (WL) est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales (N, W). WL est obtenue pour une valeur de N égale à 25 coups exprimée en pourcentage (%) **(**Figure III.8).

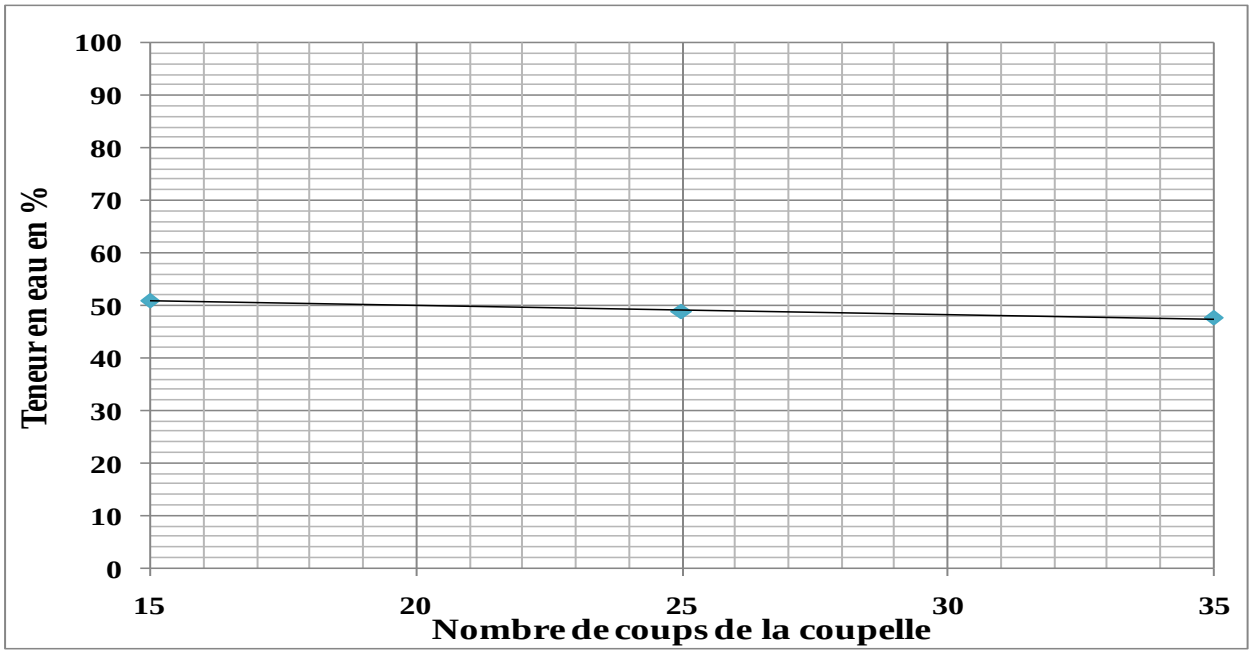


Figure III.8: Limite de liquidité de Sol naturel

Le tableau III.1.ci-dessous résume les limites trouvées pour notre matériau d'étude.

Tableau III.1: Résultat des limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg	Limite de liquidité	Limite de plasticité	Indice de plasticité	Indice de consistance
Résultats (%)	48.65	25.18	23.67	0.04

D'après L'abaque de **CASAGRANDE** (figure III-9) et les résultats des limites d'Atterberg, on en déduit que le sol étudié est une **argile très plastique.**

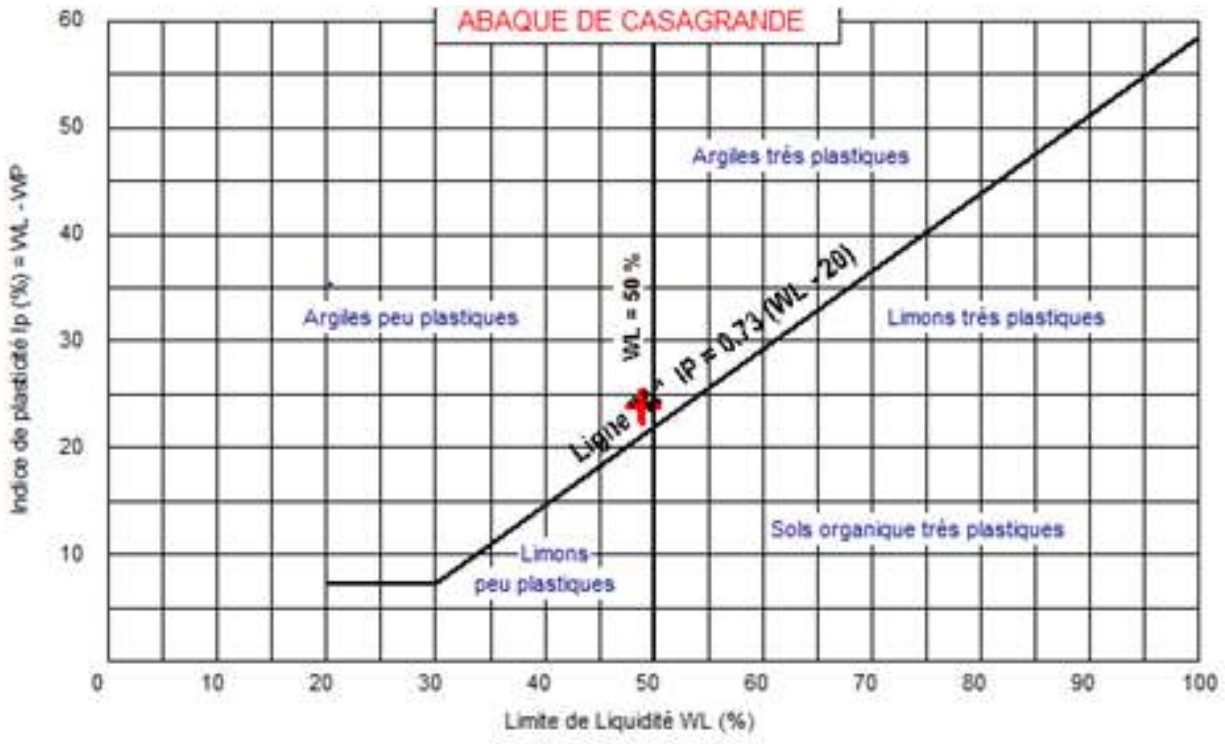


Figure III.9. Classification des sols selon CASAGRANDE

III.5.4.Essai bleu de méthylène NF P 94-068

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à adsorber du bleu de méthylène. Le principe de l'essai On injecte successivement des doses élémentaires d´une solution de bleu de méthylène dans le bain aqueux contenant la prise d´essai. On contrôle l´adsorption du bleu après chaque ajout, en effectuant une tache sur un papier filtre

D'après la norme EN 933-9 et NF P 94-068 l'essai a été effectué sur un échantillon de fraction inférieure à 5mm et de masse de 30g trempé dans 500ml d'eau déminéralisée et dispersé à l'aide d'un agitateur à ailettes tournant à 700 tr/min pendant au moins 5 minutes Pour la suite de l'essai, la vitesse de rotation est maintenue à 500 tr/min. Le dosage consiste à injecter successivement des quantités précises de bleu de méthylène dans la suspension jusqu'à atteindre la saturation des particules d'argile. Le test à la tache permet de repérer l'instant de cette saturation. On prélève pour cela une goutte dans la solution que l'on dépose sur un papier filtre. (Figure III-10)



Figure III-10 : Appareillage d'Essai bleu de méthylène

Le résultat de l'essai dépend directement à la fois de la quantité et de la nature minéralogique de cette fraction. On peut en déduire la surface spécifique totale du sol, (Sst) donnée par la formule théorique de suivante : Sst [m²/g] ≈ 21*VB

Le résultat obtenu est résumé dans le tableau suivant :

Tableau III.2: Résultat de la valeur du bleu de méthylène

Èchantillon	**volume absorber (ml)**	**VB [ml/g]**	**Sst [m^2/g]**
Matériaux argileux	440	8.09	169.89

D'après les résultats suivants et selon les normes **NF P 11-300** le matériau étudie est un sol argileux donc ce matériau est susceptible de variation de volume.

III.6.Propriétés mécaniques du sol

III.6.1.essai Proctor modifié

C'est l'un des essais les plus utilisés en géotechnique routière. Il a pour but de déterminer au laboratoire les conditions de compactage d'un sol donné en fonction de la teneur en eau et l'énergie de compactage. A une énergie de compactage donnée, il s'agit de déterminer la teneur en eau optimale (Wopt) et la densité maximale (γdmax) Proctor correspondantes.

Cet essai s'effectue sur un matériau ne comportant pas des éléments supérieurs à 20mm Dans un échantillon de matériau en provenance d'un emprunt ou du chantier, le passer à l'étuve à 105°c, le laisser sécher pendant 24h, le passer au tamis de 20mm, faire le quartage ou mieux par échantillonnage.

Enfin à l'aide de la pellette de remplissage, on procède au compactage, de la 1ere à la 5^{eme} couche, damée de 56 coups chaque pour un point dans moule CBR. Nous réaliserons 3 à 5 points pour obtenir une courbe. Démouler à chaque point, faire une prise de teneur en eau dans des tares, et les placer dans une étuve à 60°c jusqu'à dessiccation totale. Après avoir séjourné 24h à l'étuve, et on pèse enfin, on calcule.





Figure III.11:essai proctor modifie

Les caractéristiques à l'optimum Proctor déterminées sur le sol non traité qui sont montrées dans la figure ci après :

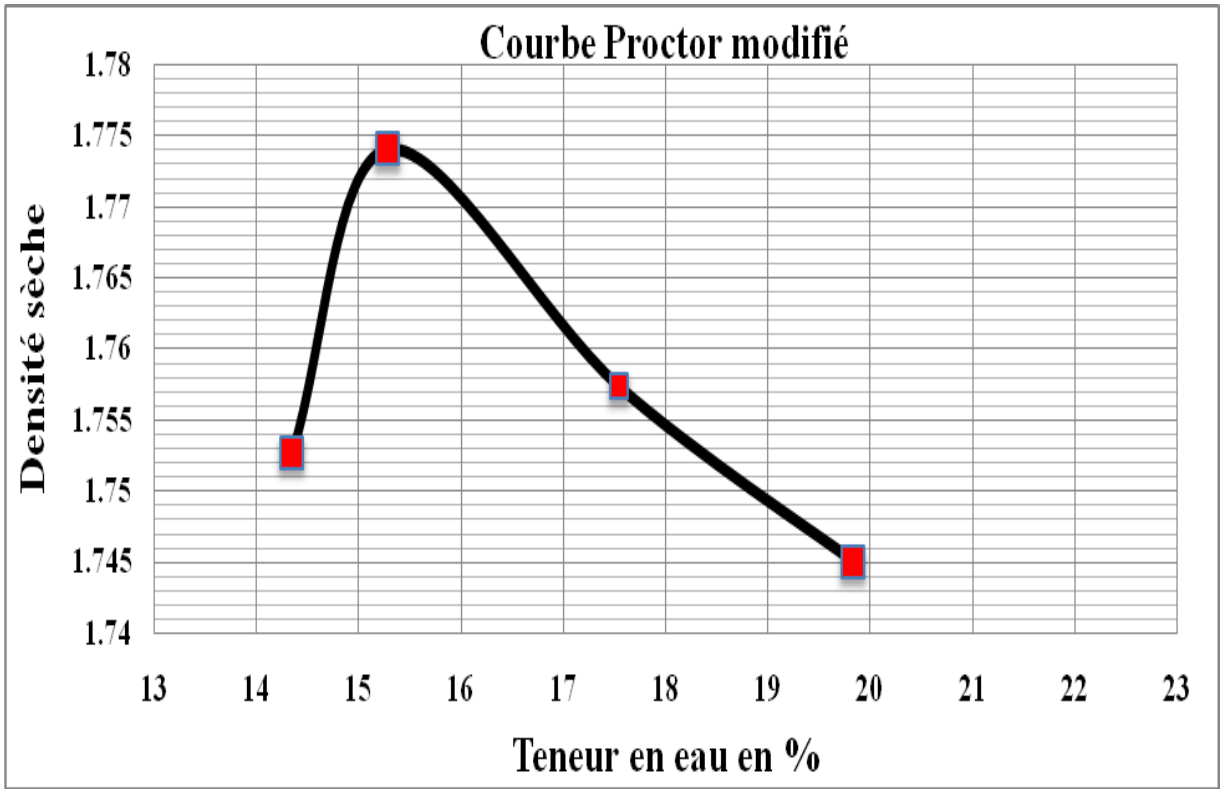


Figure III.12: La courbe Proctor de sol naturel

L'optimum Proctor pour la teneur en eau du sol naturel est égale à *15.29*% avec une densité sèche de 1.77(t/m³)

III.6.2.Essai CBR:

La portance d'un sol est la caractéristique qui définit sa capacité à supporter les charges qui lui sont appliquées.

La portance dépend de la nature du sol, du pourcentage d'eau et du degré de compactage, quel que soit le sol, sa résistance mécanique augmente avec sa densité en faisant passer plusieurs fois des engins lourds qui assurent le compactage.

La portance du sol et sa teneur en eau optimum sont déterminés par l'essai Proctor.

L 'indice C.B.R peut être:

- Immédiat ou après immersion (généralement pendant 4 jours, cet essai est indispensable pour un dimensionnement du corps de chaussée).
- L'indice portant immédiat **IPI** permet d'évaluer 1'aptitude d'un sol à supporter la circulation des engins de chantier.

L'essai consiste essentiellement à placer le sol à étudier dans un moule normalisé, à le compacter jusqu'à lui donner la densité sèche Proctor modifié, puis à placer dans 1'eau pendant un temps déterminé (4 jours), de manière qu'il s'imbibe aussi profondément que possible. Une fois 1'imbibition supposée terminée, on effectue sur le matériau un poinçonnement à l'aide d'un piston cylindrique de 19,3cm^2 de section, enfoncé à une vitesse constante de 1,27mm/min.

Les valeurs particulières des deux forces ayant provoquées des enfoncements de 2,5 et 5 mm sont rapportés aux valeurs 13,35 et 19.93 KN qui sont des forces observées dans les mêmes conditions sur un matériau de référence.

La valeur de 1 **'ICBR** est telle que:

$$ICBR = \max\left(\frac{P(2{,}5)}{0{,}5}; \frac{P(5)}{1{,}05}\right)$$

Avec

P (2,5): c'est la pression enregistrée (multiplier par le coefficient de l'anneau pour un enfoncement de 2, 5mm du matériel soumit à l'essai).

P (5) : est la pression en (kg/cm^2) pour un enfoncement de 5 mm. 0,7 et 1,05 représentent les pressions enregistrées pour un enfoncement de 2,5 et 5 respectivement sur un matériau de référence.

Quant au calcul du gonflement pour 1' ICBR immersion, il se fait par rapport à / 'épaisseur d'origine de l'échantillon qui est donné par la formule suivante:

$$G = \frac{\Delta h}{h}$$

G: C'est le gonflement linéaire relatif

Δh : C'est gonflement linéaire absolu mesuré

h : C 'est l'hauteur initiale de l'échantillon



Figure III-13 : Essai **CBR**

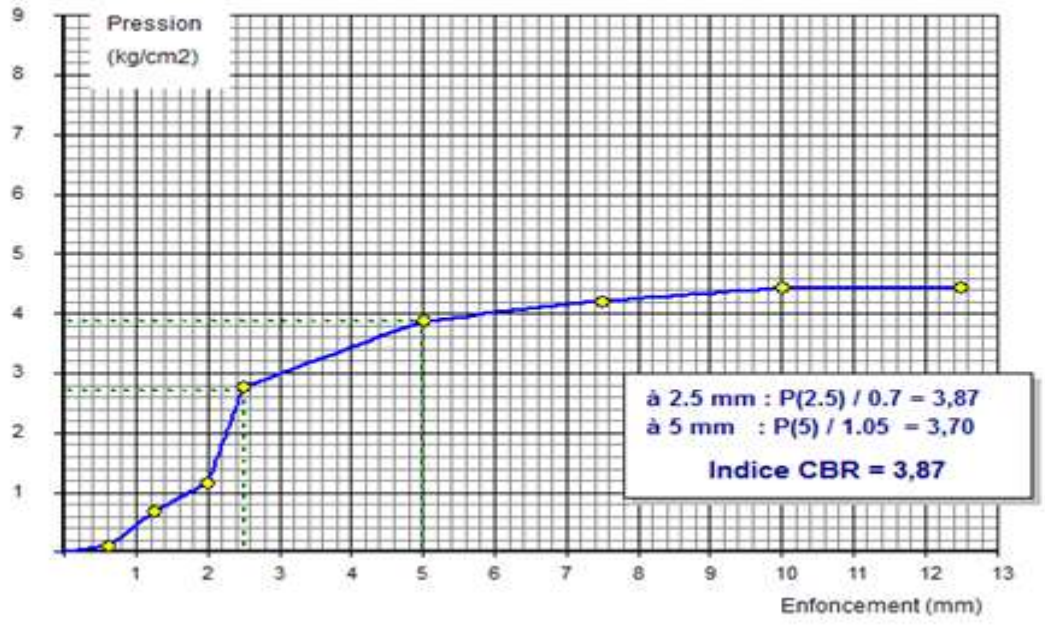


Figure III.14: La courbe CBR de sol naturel

Puis déterminez Ceci nous permet d'obtenir : CBR

- Effort de pénétration a 2.5mm d'enfoncement (KN) /13.35*100=3.87
- Effort de pénétrationa5mm d'enfoncement (KN) /19.93*100=3.70
- L'indice recherché est la plus grande valeur : 3.87

III.7.Conclusion

L'analyse de l'ensemble des informations recueillies à partir des différents résultats ; il y a lieu de conclure que le réemploi des matériaux évolutifs en couche forme risque de poser des problèmes délicats au moment de la mise en œuvre, mais surtout à long terme pendant la vie de l'ouvrage. Donc leur réemploi dans une couche de forme est valorisé par un traitement au ciment

Le chapitre suivant est consacrée à l'étude du comportement mécanique, au laboratoire, des mélanges (Argile +ciment).

IV.1.introduction :

Étant donné que cette argile présente un indice de plasticité important et une portance médiocre, son utilisation en technique routière, aéroportuaire ou ferroviaire en tant que sol support ou en tant que matériau de remblai est délicate voir impossible sans protections particulières. Voyons si l'adjonction de différents pourcentages de ciment va nous permettre d'améliorer ses caractéristiques Pour cela et en nous inspirant de la littérature, nous optons pour une modification de notre matériau argileux par des teneurs de 3, 5 7 et 9% de ciment.

IV.2.Préparation de mélange :

En premier lieu le matériau doit être séché à l'étuve à105ºC pendant 24 heures, ensuite broyé, et tamisé.

La deuxième étape consiste à ajouter des quantités de ciment au sol selon le pourcentage voulu (3%, 6% ,9%) est en mélanger. Ensuite on ajoute la quantité d'eau nécessaire est ensuite mis dans un bac pour effectuer le malaxage manuellement. au mélange graduellement.

Le mélange obtenu est conservé dans des sacs en plastique hermétiques et bien fermé pour permettre une bonne diffusion de l'eau dans tout le matériau



Figure IV.1: Préparions d'échantillon

IV. 3.Essais réalisés

Pour étudier l'influence de l'ajout du ciment sur les paramètres physiques et mécaniques sur notre sol support, nous avons réalisé les essais suivants :

a. **Paramètres chimique**

- ✓ Bleu de méthylène

b. Paramètres physiques

- ✓ Mesure de limites d'Atterberg.

C. **Paramètres mécaniques**

- ✓ Essai CBR imbibé
- ✓ Procter modifies.

IV.4.paramètre chimique

IV .4.1. Évolution de valeur au bleu de méthylène en fonction de la teneur en ciment

Afin de voir l'effet de l'ajout de ciment sur l'argilosité de notre argile une série des essais de bleu méthylène effectuent sur les mélanges (argile +ciment)

L'ajout du ciment au matériau argileux a amené une modification à la valeur de bleu comme il est indiqué dans le tableau IV.1 :

Tableaux IV.1:L'influence du ciment sur VBS et la surface spécifique d'argile

Ciment (%)	**0**	**3**	**6**	**9**
VBS	8.09	7.5	6.99	6.25
SST	169.89	157.5	146.79	131.25

La courbe de variation du **VBS** en fonction du dosage en ciment est donnée sur la figure IV.2

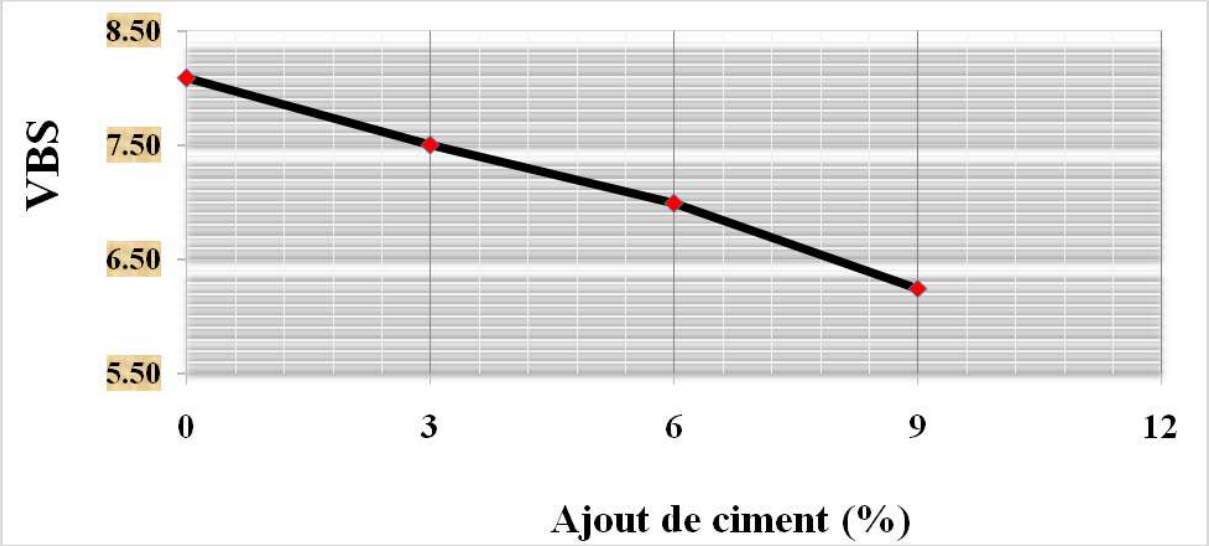


Figure IV.2: Variation de valeur de bleu méthylène en fonction de la teneur en ciment

La courbe de variation du surface spécifique en fonction du dosage en ciment est donnée sur la figure IV-3)

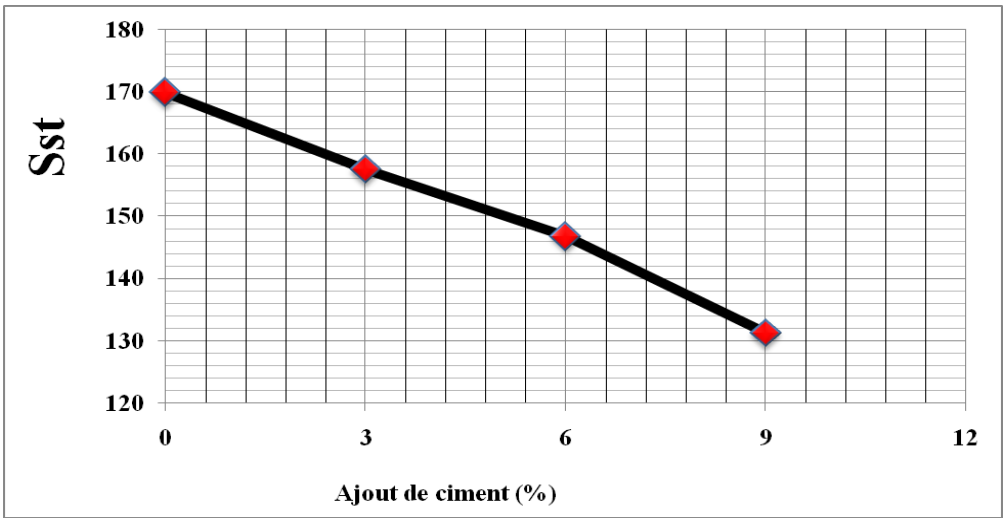


Figure IV.3: La variation la surface spécifique en fonction du pourcentage du ciment

D'après les résultats de valeur bleue méthylène, on remarque une diminution de la valeur du bleu méthylène en fonction du dosage en ciment, pour un dosage de 9% la diminution de VB est de 22,74%.

Ce phénomène s'appelle la floculation, ce résulte de la réaction immédiate entre le ciment et les particules d'argile. Le ciment abaisse la valeur du bleu méthylène de l'argile et rend le matériau rigide.

D'après les résultats de obtenus, on remarque une diminution de la surface spécifique en fonction du dosage en ciment, pour un dosage de 9% la diminution de la surface spécifique est de 22,16%.

L'ajout de ciment au matériau argileux diminue leur l'activité ainsi que sa surface spécifique et rend les argiles peu actives

D'après des résultats obtenus par KELANEMER. A et HAMADOU. M la diminution de la valeur du bleu méthylène en fonction du dosage en ciment pour un dosage de 10% est de 54.57%. Nos résultats obtenus sont en bon accord avec les résultats rapportés par le travail de KELANEMER. A et HAMADOU. M

L'ajout de ciment au matériau argileux diminue leur l'activité ainsi que sa surface spécifique et rend les argiles peu actives

IV.5. Paramètres physiques

IV.5 .1.Évolution des limites d'Atterberg en fonction de la teneur en ciment :

Le tableau au-dessous représentant les variations des limites d 'Atterberg en fonction du dosage en ciment

Tableaux IV.2 : Limite d'Atterberg du matériau argileux en fonction du pourcentage en ciment.

Ciment (%)	0	3	6	9
WL	48.85	46.77	45.97	44.44
IP	23.67	19.54	16.7	14.05
WP	25.18	27.23	29.27	30.39
IC	0.04	0.05	0.06	0.07

Les courbes IV. 4, 5,6 et 7 représentent l'évolution des limite de liquidité , limite de plasticité , indice de plasticité et indice de consistance en fonction du dosage en ciment

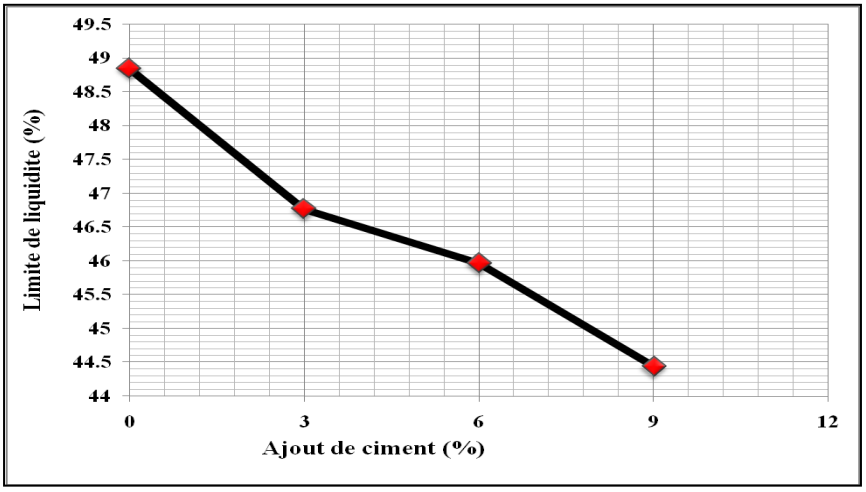


Figure IV.4 : variations des limites liquidités en fonction du dosage en ciment

Après de résultat obtenus on a remarque une diminution de la limite de liquidité on fonction d'un dosage de ciment Pour un ajout de 6% de ciment au sol argileux la diminution est d'environ 5.89% de la limite de liquidité initial.

L'ensemble de ces résultats s'explique en grande partie par la réaction d'échange cationique entre l'échantillon brut et les cations Ca^{+2} libérés durant l'hydratation du ciment et agglomération des particules d'argile qui deviennent plus grosses et offrent donc une surface spécifique moindre et prennent une plus faible couche d'eau d'où la diminution des limites de liquidité

Le courbe représente les variations des limites plasticités en fonction du dosage en ciment (figure VI.5)

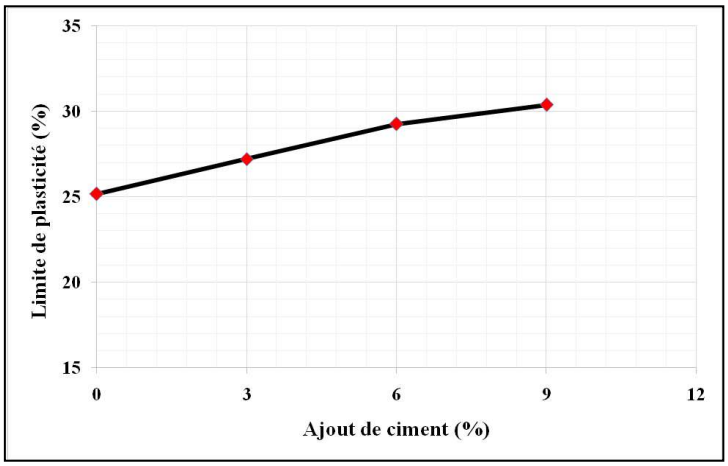


Figure IV.5 : variations des limites plasticités en fonction du dosage en ciment

Sur la base de résultats obtenus on constante une augmentation de la limites plasticités on fonction d'un dosage de ciment donc Pour un ajout de 6% de ciment au sol argileux la augmentation est d'environ 13.97% de la limite de plasticités initial.

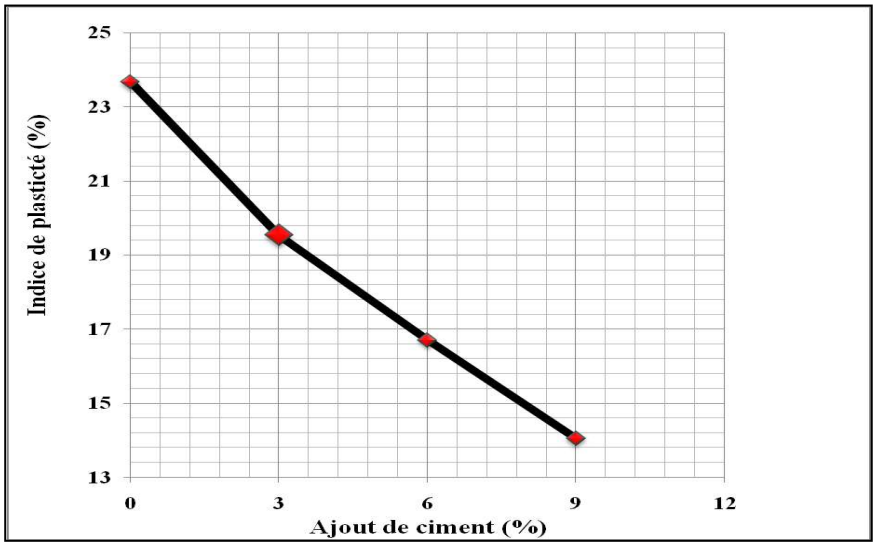


Figure IV.6 : les variations des indices plasticités en fonction du dosage en ciment

A la lumière des résultats on constate une réduction de l'indice plasticités en fonction de l'ajout de ciment. Pour un ajout de 6% de ciment au sol argileux la diminution est d'environ 29.44% de l'indice de plasticité initial.

Ces observations sont en bon accord avec les résultats rapportés par (KELANEMER. A et HAMADOU. M) sur un sol argileux peu plastique traités à différents pourcentages du ciment

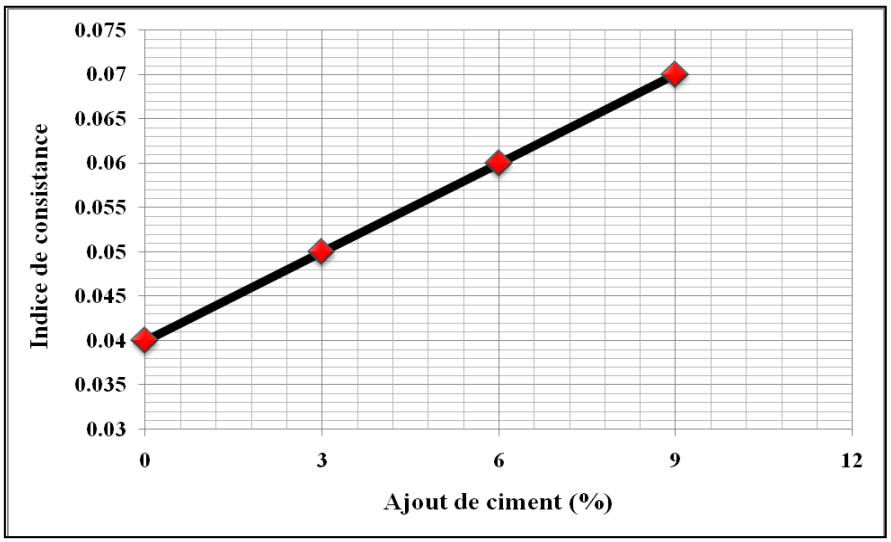


Figure IV.7 : variations des indices consistance en fonction du dosage en ciment

D' Après de résultat obtenus on a remarque une augmentation de l'indices consistance en fonction de dosage de ciment Pour un ajout de 6% de ciment au sol argileux l'augmentation est d'environ 28.57% de l'indice de plasticité initial.

IV.6. Paramètre mécanique

IV.6.1.Évolution des caractéristiques Proctor modifié en fonction de la teneur en ciment

Les résultats obtenus de l'essai Proctor en fonction du dosage en ciment sont inscrits au tableau IV.3 et les courbes ainsi obtenues sont données par les figures suivantes.

A partir des courbes Proctor, nous pouvons dresser le tableau suivant qui résument les caractéristiques Proctor du matériau après ajout du ciment

Tableaux IV.3 : Variation de la densité sèche maximale et la teneur en eau en fonction des différents dosages en ciment

Ciment (%)	0%	3%	6%	9%
Densité sèche maximal (t/m²)	1.77	1.76	1.75	1.74
Tenure en eau optimal (%)	15.29	17.99	18.52	19.27

Courbe représente de variation de la teneur en eau Optimale en fonction des différents dosages en ciment (figure IV.8)

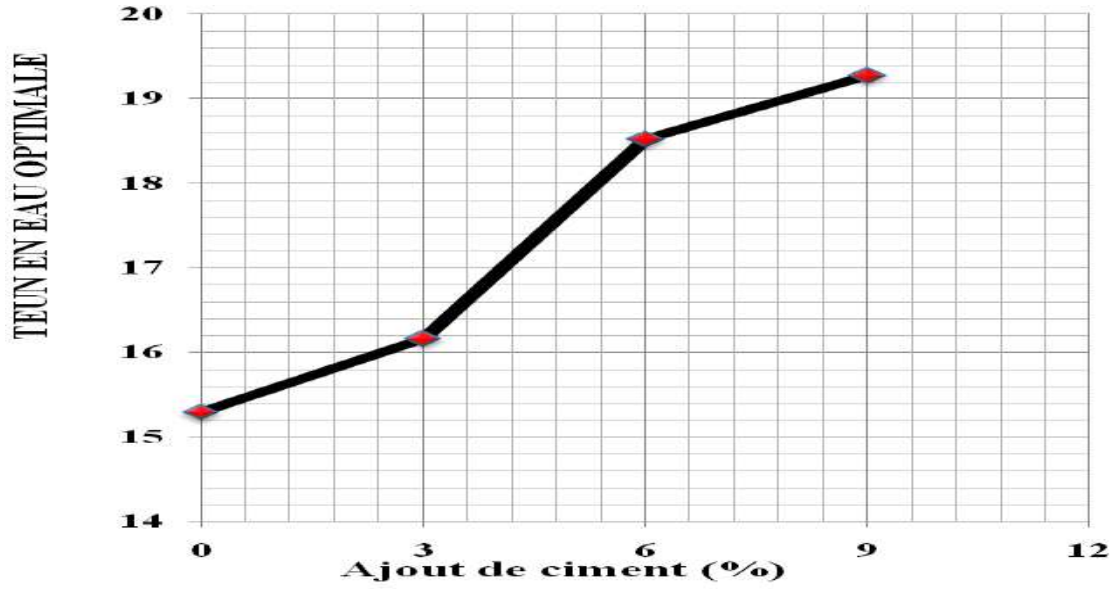


Figure IV.8 : variation de la teneur en eau Optimale

D'après de résultat Proctor modifie on a remarque augmentation teneure En eau optimale on fonction de dosage de ciment. Pour un ajout de 6% de ciment au sol argileux l'augmentation est d'environ 17.44% de teneure on eau optimale initial.

Toutes les courbes Proctor modifié à plusieurs pourcentages de ciment sont regroupées dans la figure IV.9

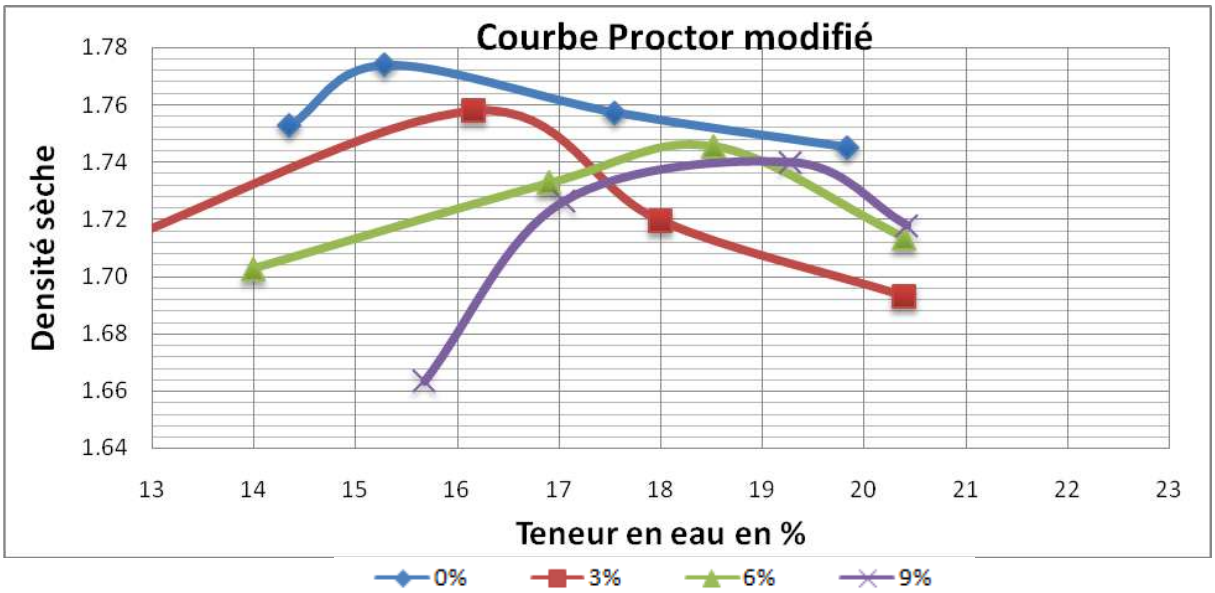


Figure IV.9 : courbe Proctor modifie

L'évolution de la teneur en eau optimale et la densité séché maximale en fonction de l'ajout de ciment sont présentées dans les figures IV-10

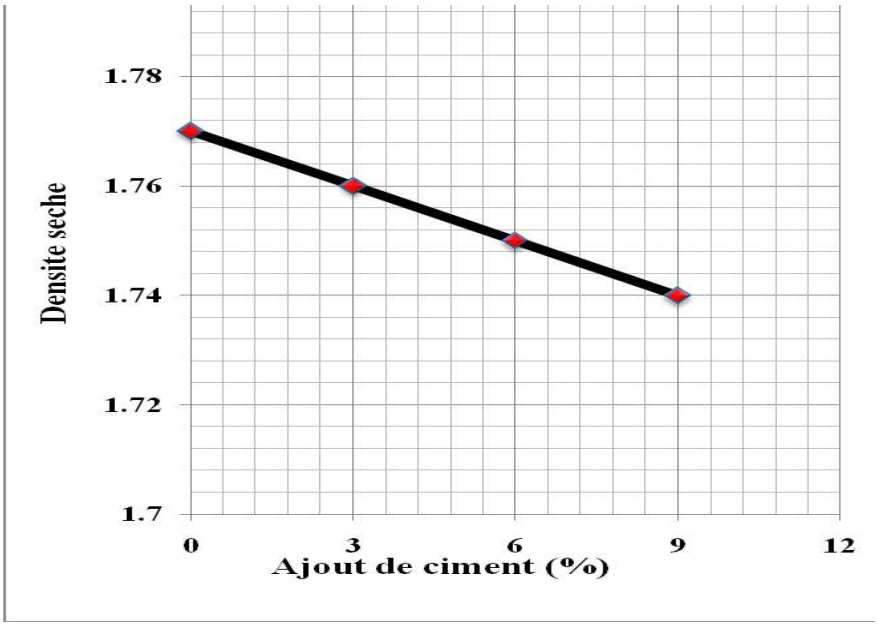


Figure IV-10 : L'évolution de la densité sèche optimale en fonction des dosages en ciment

On remarque aussi que densité sèche maximale diminué en fonction de l'ajout de ciment. Pour un ajout de 6% de ciment au sol argileux diminution est d'environ 1.12% de densité sèche initial

L'augmentation de la teneur en eau optimale est due à la forte affinité du ciment vis-à-vis de l'eau. L'augmentation de la quantité de ciment requiert plus d'eau pour dissocier la portant dite (Ca (OH) 2) et pour produire des cations Ca2+ nécessaires aux réactions d'échange cationique. La réduction de la densité sèche maximale est due au fait que l'ajout du ciment crée l'agrégation des particules et de ce fait génère un plus grand volume. Cela entraîne une modification de la distribution de la taille des particules.

IV.6.2.Évolution de l'indice CBR imbibé en fonction de la teneur en ciment

L'évolution de l'indice CBR imbibé en fonction du dosage en ciment est représentée dans le tableau IV.4

Tableaux IV.4 : Variation de l'indice CBR imbibé en fonction du dosage en du ciment (%)

%CIMENT	0	3	6	9
indice CBR	3.87	5.16	6.88	8.43

La courbe représentant l'évolution de l'indice CBR imbibé en fonction du dosage en ciment est représenté sur la figure **IV.11**

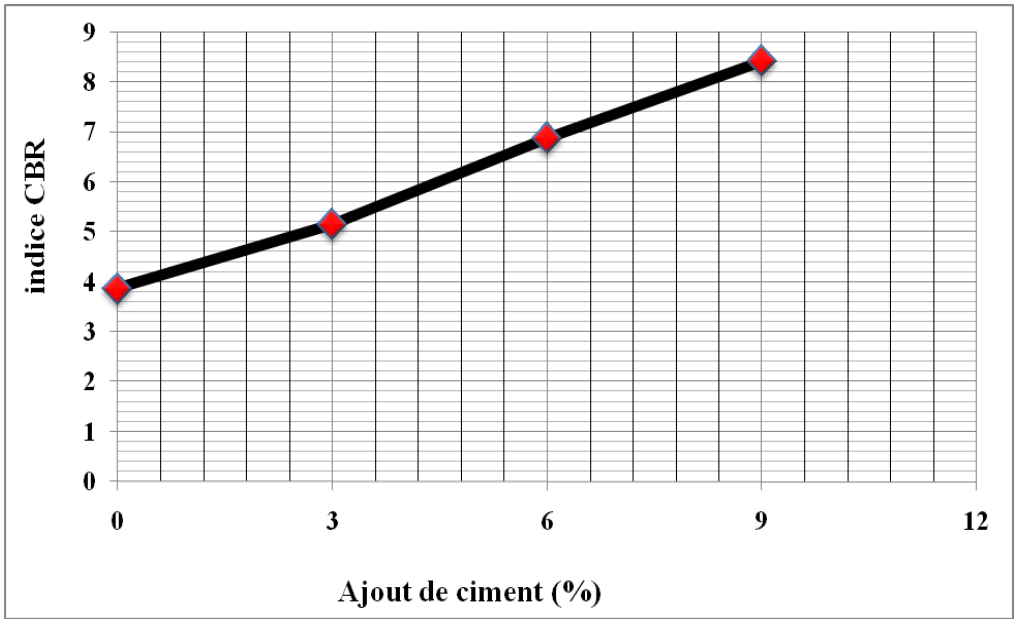


Figure IV.11 Évolution de l'indice CBR imbibé en fonction du dosage en ciment

D'après les résultats obtenus dans la figure IV.10 on remarque que l'indice CBR imbibé augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment. Dont on passe d'un CBR imbibé 3.87 à un pourcentage en ciment de 0% à 8.43 environ pour un pourcentage en ciment de 9 %. Donc L'ajout de ciment influence directement sur la portance de matériaux argileux pour un ajout de 6% de ciment au sol argileux augmente est d'environ 77,77 % de indice CBR presque les même résultats trouver dans le travail de KELANEMER. A et HAMADOU. M pour un dosage de 10% une augmentation de indice CBR 63.31%.

IV.7.Conclusions

Nous constatons que l l'ajout du ciment à notre matériau argileux permet d'améliorer ses caractéristiques mécaniques, sa plasticité et son argilositè. On remarque notamment une :

- Diminution de l'indice de plasticité de 23.67% à 14.05% pour ajout de 9% de ciment
- Diminution de VB de 8.09 à 6.25 pour 9% de ciment
- Diminution de densité sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimales, du ciment
- Augmentation de l'indice CBR imbibé de 3.87à 8.43pour 9% de ciment

V.1.Introduction :

Une chaussée peut être définie comme une structure plane, conçue et dimensionnée pour garantir l'écoulement du trafic dans de bonnes conditions de sécurité et de confort et d'assurer le bon fonctionnement pour une période de service.

Dimensionner une chaussée c'est optimiser le choix et les épaisseurs des couches de matériaux en tenant compte de toutes les contraintes **(**Khireddine et Khasnadji ,.2016).

V.2.Définition de la chaussée :

Au sens géométrique, la chaussée est une surface spécialement aménagée sur le sol, réservée aux véhicules afin de permettre leur circulation en toute saison, dans des conditions suffisantes et durables de confort et de sécurité.

Au sens structurel, la chaussée est l'ensemble des couches de matériaux superposées qui permettent la reprise des charges apportées par les véhicules.(Arouci Mohamed , et al,2015)

La chaussée doit avoir une épaisseur telle que la pression verticale transmise au sol soit suffisamment faible afin que celui-ci puisse la supporter sans dégradation. Souvent, en effet, les sols supports, constitués de matériaux fins et plastiques, sont déformables, et cette déformabilité augmente sous l'action de l'eau. Les chaussées se présentent comme des structures multicouches

V.3. Les couches principales de chaussée

V.3.1. La couche de forme:

Cette couche de transition entre le sol support et le corps de chaussée peut être de la même nature que le sol support à la différence qu'elle sera compactée sur les 30 premiers centimètres. Dans ce cas on parle de couche de forme en déblai. Dans le cas où on la ramène d'un autre site, on parle de couche en remblai. Elle à une double fonction:

- pendant la phase des travaux, elle protège le sol support, elle établit une qualité de nivellement et permet la circulation des engins pour l'approvisionnement des matériaux et la construction des couches de chaussée,

- vis-à-vis du fonctionnement mécanique de la chaussée, elle permet de rendre plus homogène et éventuellement d'améliorer les caractéristiques dispersées des matériaux de remblai ou du terrain en place.



Figure V.1 : la couche de forme

V.3.2. La couche d'assise:

L'assise de la chaussée se compose en deux sous couches : la couche de fondation et la couche de base. Ces couches apportent à la chaussée la résistance mécanique nécessaire pour reprendre les charges verticales induites par le trafic.

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

V.3.3.couche de surface

La couche de surface est constituée de :

- La couche de roulement**,** qui est la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat, d'une couche de liaison**,** entre les couches d'assise et la couche de roulement

Elle est plutôt tributaire de la pérennité de la chaussée et doit satisfaire à quatre objectifs principaux :

- La sécurité et le confort usagers, qui dépendent directement des caractéristiques de surface.
- Le maintien de l'intégrité de la structure, par la protection des couches d'assises vis-à-vis des infiltrations des eaux pluviales et des sels déverglace et des divers polluants susceptibles d'être répandus en surface.
- L'impact sur l'environnement, qui consiste essentiellement en la réduction des bruits de roulement.

- Les possibilités de régénération des caractéristiques de surface.
- La couche de roulement, qui est la couche supérieure :
- Devant résister aux actions directes du trafic climat.
- Assure les fonctions d'adhérence, de lisibilité, d'étanchéité et contribue à l'uni (kelanemer. et hamadou . 2016).

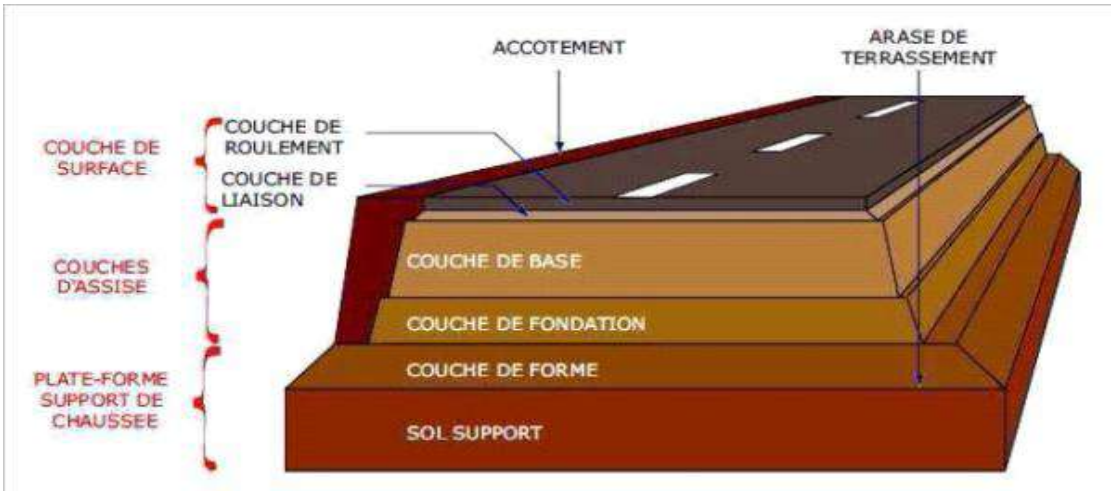


Figure V.2 : Les couches principales de chaussée (kelanemer. et hamadou . 2016).

V.4. Les différents types de structure de chaussée

L'une des caractéristiques du réseau routier au monde est l'existence d'une grande diversité de structures de chaussée, que l'on classe dans les familles ci-dessous

V.4.1. Les chaussées souples:

Ces structures comportent une couverture bitumineuse relativement mince (inférieureà 15 cm), parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faible trafic, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traité. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 cm et 60 cm Guide technique LCPC -SETRA (1994)

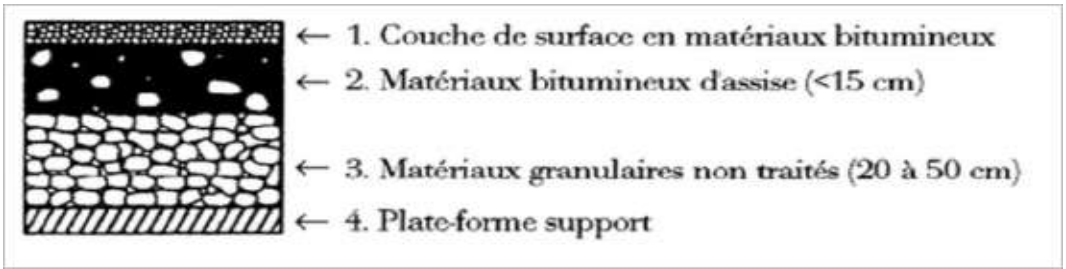


Figure V.3 : Chaussée souple (Guide technique LCPC -SETRA (1994)

Leur fonctionnement peut être schématisé comme indique la figure 3.Les matériaux granulaires constituant l'assise de la chaussée ont un module de rigidité
Relativement faible. Comme la couverture bitumineuse est mince, les efforts verticaux sont transmis au support avec une faible diffusion. Les contraintes verticales élevées engendrent par leur répartition des déformations plastiques qui se répercutent en déformation permanentes à la surface de la chaussée.

La couverture bitumineuse subite à la base des efforts répète de traction-flexion.
L'évolution la plus fréquente des chaussées souples se manifeste d'abord par l'apparition de déformations de type orniérage et affaissements qui détériorent les qualités des profils en travers et en long (Guide technique LCPC -SETRA (1994)

V.4.2. Les chaussées bitumineuses épaisses:

Ces structures se composent d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, fait d'une ou deux couches (base et fondation). L'épaisseur des couches d'assise est le plus souvent comprise entre 15 et 40 cm

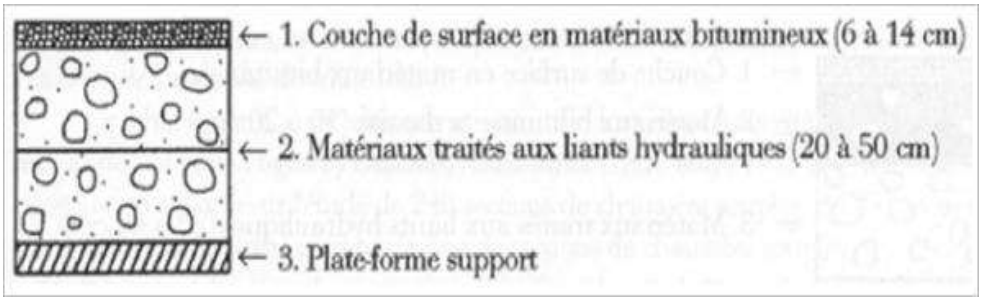


Figure V.4 : Les chaussées bitumineuses épaisses (Guide technique LCPC -SETRA (1994)

La rigidité et la résistance en traction des couches d'assise en matériaux bitumineux permettent de diffuser en les atténuant fortement les contraintes verticales transmises au sol.

La qualité des interfaces a une grande importance pour ce type de chaussée en effet : si les couches bitumineuses sont liées, les allongements maximaux se produises à la base de la couche liée la plus profonde par contre, lorsqu'elles sont décollées, chaque couche se retrouve sollicitée en traction, provocant la ruine prématuré de la structure (Guide technique LCPC – SETRA (1994)

V.4.3. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques:

Ces structures sont qualifiées couramment de "semi-rigides". Elles comportent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une ou deux couches (base et fondation) dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50 cm(Guide technique LCPC -SETRA (1994)

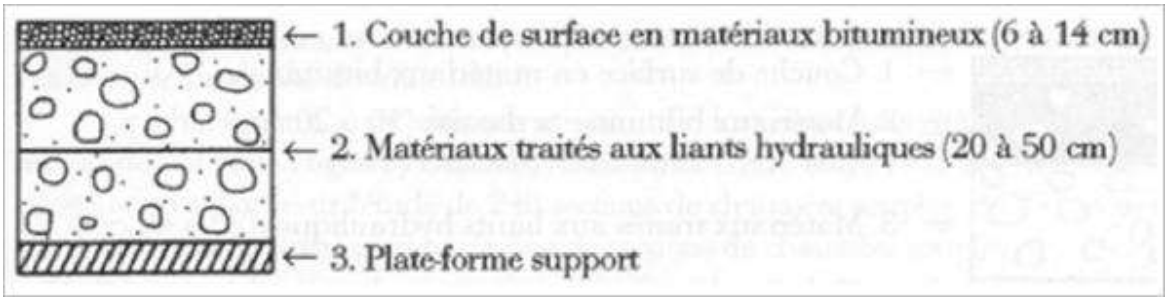


Figure V.5 : Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques (Guide technique LCPC - SETRA (1994)

Compte tenu de la très grande rigidité des matériaux traités aux liants hydrauliques, les contraintes verticales transmises au sol support sont très faibles. En revanche l'assise traitée subit des contraintes de traction-flexion. σt qui s'avère déterminantes pour dimensionnement.

L'interface couche de surface-couche de base est aussi une zone sensible car elle est souvent soumise à de fortes contraintes normales et de cisaillement horizontal et les centimètres supérieurs de l'assise traitée sont souvent de faible résistance. Guide technique LCPC -SETRA (1994)

V.4.4 Les chaussées en béton de ciment:

Ces structures comportant une couche de béton de ciment de 15 à 40 cm d'épaisseur qui sert de couche de roulement éventuellement recouvert d'une couche mince en matériaux bitumineux. La couche de béton repose soit sur une couche de fondation (en matériaux traités aux liants hydrauliques ou en béton de ciment)

Soit sur une couche drainante en grave non traitée, soit sur une couche d'enrobé reposant elle-même sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques.

La dalle de béton peut être coutume avec un renforcement longitudinal ("béton armé continu"), ou discontinue avec ou sans élément de liaison aux joints. Ci-dessous nous présentons les structures de chaussée en béton de ciment (Guide technique LCPC -SETRA (1994)

La structure du béton de ciment mince collé (BCMC) est comme France depuis 1996, Elle consiste à réaliser des dalles minces (de 10 à 15 cm d'épaisseur) ou très minces (de 5 à 10 cm d'épaisseur) en béton sur un matériau bitumineux.

Toutes ces chaussées après dimensionnement sous l'influence du chargement du trafic, sous l'effet de la température ou d'autres raisons (mauvais dimensionnement déshydratation des matériaux...), subissent des dégradations de différents types. Pour le problème de redimensionnement et de réparation des chaussées, il est nécessaire de comprendre l'origine et les types de ces dégradations. (Guide technique LCPC -SETRA (1994)

V.4.5. Chaussées rigides:

Une chaussée rigide est constituée d'un revêtement en béton de ciment pervibré ou fluide. En règle générale, une chaussée en béton comporte, à partir du sol, les couches suivantes : une Couche de forme, couche de fondation, et couche de roulement en béton de ciment. La couche de fondation n'est pas nécessaire. La dalle en Béton de Ciment peut ainsi être réalisée Directement sur l'arase terrassement ou sur la plate-forme support de chaussée. Dans la chaussée rigide, la couche de surface et la couche de base son confondues Guide technique LCPC -SETRA (1994)

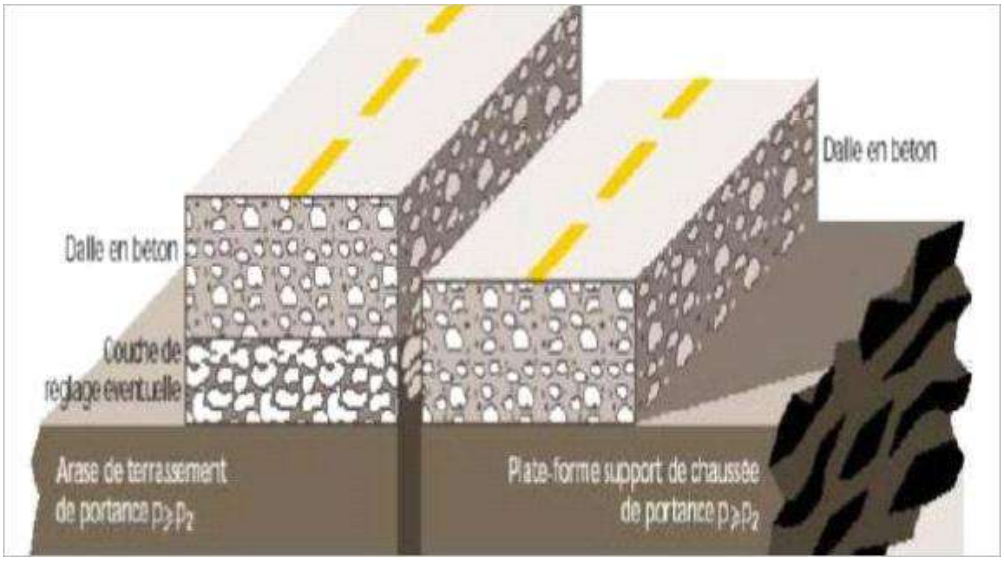


Figure V.6 : Structure type d'une chaussée rigide

V.5.Quelque méthode de dimensionnement :

- Méthode CBR (Californian Bearing Ratio).
- Catalogue American développé de L'essai AASHTO (American Association Of State Highway And Transportation Officials)
- Catalogue Algérien De Dimensionnement Des Chausses Neuves (CTTP 2001).
- Catalogue des Structures Type de Chaussées Neuves (1998 SETRA/LCPC)
- Méthode de l'indice de groupe. (Ig)
- Méthode du «manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic (SETRA-LCPC France)

V.5.1. Méthode C.B.R «California -Bearing - Ratio»:

C'est une méthode semi empirique qui se base sur un essai de poinçonnement sur un échantillon du sol support en compactant les éprouvettes de (90° à 100°) de l'optimum Proctor modifié sur une épaisseur d'eau moins de 15cm.

La détermination de l'épaisseur totale du corps de chaussée à mettre en œuvre s'obtient par l'application de la formule présentée ci- après (Guide technique ,2009)

$$e = \frac{100 + (\sqrt{P})(75 + 50 log\ N\ 10)}{ICBR + 5}$$

Avec:

e: épaisseur équivalente.

I: indice CBR (sol support).

N: désigne le nombre journalier de camion de plus 1500 kg à vide

N = TH. %PL

TH: trafics prévus pour une durée de vie de 20 ans.

$$TH=\frac{T0}{2}(1+\tau)^{m}$$

Avec:

T0 : trafics actuel (v/j). **m** : année de prévision.

P: charge par roue P = 6.5 t (essieu 13 t). **Log**: logarithme décimal.

L'épaisseur équivalente est donnée par la relation suivante:

$$e = c1 \times e1 + c2 \times e2 + c3 \times e3$$

Avec : c1 × e1: couche de roulement.

c2 ×e2 : couche de base.

c3× e3:couche de fondation.

Où: c1, c2, c3 : coefficients d'équivalence.

e1, e2, e3 : épaisseurs réelles des couches

Le tableau ci-dessous indique les coefficients d'équivalence pour chaque matériau :

Tableau V.1.: Les coefficients d'équivalence pour chaque matériau.(Guide technique,2000)

Matériaux utilises	Coefficient d'équivalence
Béton bitumineux ou enrobe dense	2.00
Grave ciment grave laitier	1.50
Grave bitume	1.20 à 1.70
Grave concassée ou gravier	1.00
Grave roulée grave sableuse -T.V.O	0.75
Sable ciment	1.00 à 1.20
Sable	0.50
Tuf	0.80 0.90

V.5.2.Méthode A.A.S.H.O (American Association of State Highway Officials) :

Cette méthode empirique est basée sur des observations du comportement, sous trafic des chaussées réelles ou expérimentales.

Chaque section reçoit l'application d'environ un million des charges roulantes qui permet de préciser les différents facteurs :

- L'état de la chaussée et l'évolution de son comportement dans le temps.
- L'équivalence entre les différentes couches de matériaux.
- L'équivalence entre les différents types de charge par essai
- L'influence des charges et de leur répétition (G, Joeffroy ; R, Sauterey,1991)

De cette expérimentation a été établit une loi d'équivalence entre des charges de poids différents.

$$AP / A13 = (P / 13)^{\alpha}$$

AP : Agressivité d'un essieu de charge p tonnes.

A13 : Agressivité d'un essieu standard de 13t (pris égale à 1).

p : charge d'un essieu de poids p tonnes.

α : coefficient qui dépend du type de chaussée (α=4 à 5pour les chaussée souples).

Une application rapide de cette loi montre clairement que l'agressivité d'un véhicule léger est plusieurs centaines de milliers de fois inferieure à l'agressivité d'un seul essieu de 13 tonnes.

V.5.3.Méthode du catalogue des structures «SETRA» :

C'est le catalogue des structures type neuves et établi par «SETRA».Il distingue les structures de chaussées suivant les matériaux employés (GNT, SL, GC, SB).

Il considère également quatre classes de trafic selon leur importance, allant de 200 à 1500 PL/J/sens. Il tient compte des caractéristiques géotechniques du sol de fondation.

Il se présente sous la forme d'un jeu de fiches classées en deux paramètres de données :

Trafic cumulé de poids lourds à la 15ème année Tj.

Les caractéristiques de sol (Sj).(Guide technique,2009)

a)Détermination de la classe de trafic :

La classe de trafic (TPLi) est déterminée à partir du trafic poids lourd par sens circulant sur la voie la plus chargée à l'année de mise en service.(G, Joeffroy ; R, Sauterey,1991)

Tableau V.2. : La classe du trafic poids lourd.

Classe de trafic	Trafic poids lourds cumulé sur 20 ans
T_0	$<3.5\ 10^5$
T_1	$3.5\ 10^5<T<7.3\ 10^5$
T_2	$7.3\ 10^5<T<2\ 10^5$
T_3	$2\ 10^6<T<7.3\ 10^6$
T_4	$7.3\ 10^6<T<4\ 10^7$
T_5	$T>4\ 10^7$

$$Tc=TPL\ [1+\frac{(1+\tau)^{n+1}-1}{\tau}]\ 365$$

Avec :

TPL : trafic poids lourds à l'année de mise en service.

n : durée de vie (n = 20 ans).

τ : taux d'accroissement pris est égal 4%

b-Détermination de la classe :

Du sol Le classement des sols se fait en fonction de l'indice CBR mesuré sur éprouvette compactée à la teneur en eau optimale de Proctor modifié et à la densité maximale correspondante.(Guide technique,2000)

Après immersion de quatre jours, le classement sera fait en respectant les seuils suivants:

Tableau V.3: Classement des sols selon C.B.R

Classe de sol	Indice C.B.R
S0	>40
S1	25-40
S2	10-25
S3	05-10
S4	<05

V.5.4.La Méthode L.C.P.C «Laboratoire Central des Ponts et Chaussées» :

Cette méthode est dérivée des essais A.A.S.H.O, elle est basée sur la détermination du trafic équivalent donnée par l'expression

$$\mathbf{Teq= [TJMA* a [(1+Z) n -1] * 0.75 * P * 365] / [(1+z)-1]}$$

Avec:

Teq = trafic équivalent par essieu de 13t.

TJMA = trafic à la mise en service de la route.

a = coefficient qui dépend du nombre de voies.

Z = taux d'accroissement annuel. n = durée de vie de la route.

p = pourcentage de poids lourds

Une fois la valeur du trafic équivalent est déterminée, on cherche la valeur de l'épaisseur équivalente e (en fonction de Teq, ICBR) à partir de l'abaque L.C.P.C.L'abaque L.C.P.C est découpé en un certain nombre de zones pour lesquelles, il est recommandé en fonction de la nature et la qualité de la couche de base.(MEKADDEM Ali , GOURARI Abdessamie,2014)

V.6.Application pratique d'un dimensionnement en utilisant comme sol support le matériau argileux :

Nous allons voir l'effet de l'ajout du ciment et de la chaux sur le choix et l'épaisseur du corps de chaussée dans la région d'Alger et plus précisément à Koléa dont le sol support est constitué de notre matériau argileux. Pour cela, nous prenons le cas de la RN 11 entre le Pk 10 et le PK 13. Ce tronçon est caractérisé par les données suivantes :

1. le nombre moyen de camion de plus 1500 kg à vide
2. Pl/j et par sens
3. Un indice CBR imbibé de :
   - 3.87 pour le matériau non traité
   - 6.88 pour ajout de 6 % de ciment

On calcule l'épaisseur de la chaussée en fonction de deux résultats de l'indice CBR et en fonction des données ci-dessous afin d'obtenir le corps de chaussée le plus adéquat.

$$e = \frac{100 + (\sqrt{P})(75 + 50\log\frac{N}{10})}{I_{CBR} + 5}$$

a/ Cas de sol non traité:

Données de l'étude :

- Année de mise en service : 2018 TJMA2018=35096v/j.
- Année horizon 2038 : TJMA2038=76899v/j.
- Pourcentage de poids l'lourd est Z=7%.
- N(PL) =13947 x 0.07 = 5382PL/j.

- N(PL)= 2691PL/j/sens.
- P= 6.5t
- ICBR=3.87

$$e = \frac{100 + (\sqrt{P})(75 + 50\,log 10\,N)}{ICBR + 5}$$

$$E_{eq} = \frac{100 + \sqrt{6.5}(75 + 50 log \frac{2691}{10})}{3.87 + 5} = 68cm$$

Pour le calcul de l'épaisseur réelle de la chaussée.

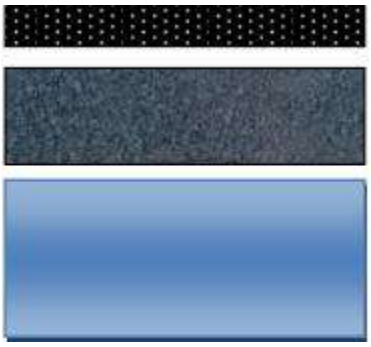
On fixe « e 1 », «e2 »et et on calcule « e 3 », généralement les épaisseurs adoptées sont : Le tableau suivant résume les Structures proposées et les épaisseurs de chaque couche pour chaque section :

BB =5 - 8 cm, GB= 10 - 20 cm, GNT =15 - 25 cm

On suppose Tableaux **V.4** :L'épissure de la couche de fondation

Nom de la couche	Matériaux	Coefficient d'équivalence	L'épaisseur de la couche
Roulement	BB	2	8
Base	GB	1.5	20
Fondation	GNT	1	22

$e_3 = \frac{68 - a1 * e1 + a2 * e2}{a3}$ $e_{3=} \frac{68 - 2*8 + 1.5*20}{1} = 22$ cm ; **$e_{3=}$22cm**



Couche Roulement (bb)=8Cm

Couche Base(GB)=20cm

Couche Fondation(GNT)=22 cm

Figure V.7 : Structure de chaussée

b- cas de sol traité :

Données de l'étude :

- Année de mise en service : 2018 TJMA2018=35096v/j.
- Année horizon 2038 : TJMA2038=76899v/j.
- Pourcentage de poids l'lourd est Z=7%.
- N(PL) =13947 x 0.07 = 5382PL/j.
- N(PL)= 2691PL/j/sens.
- P= 6.5t
- ICBR=5.16

$$E_{eq}=\frac{100+\sqrt{6.5}\left(75+50log\frac{2691}{10}\right)}{6.88+5}=59cm$$

Pour le calcul de l'épaisseur réelle de la chaussée.

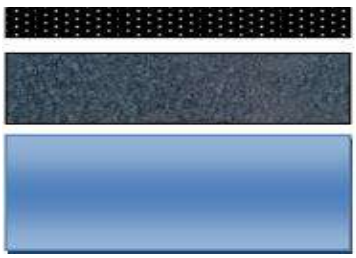
On fixe « e 1 », «e2 »et et on calcule « e 3 », généralement les épaisseurs adoptées sont : Le tableau suivant résume les Structures proposées et les épaisseurs de chaque couche pour chaque section :

BB =5 - 8 cm, GB= 10 - 20 cm, GNT =15 - 25 cm

Tableaux **V.5** :L'épissure de la couche de fondation

Nom de la couche	Matériaux	Coefficient d'équivalence	L'épaisseur de la couche
Roulement	BB	2	8
Base	GB	1.5	20
Fondation	GNT	1	13

$e_3=\frac{59-a1*e1+a2*e2}{a3}$ $e_{3=}\frac{59-2*8+1.5*20}{1}=13_{cm}$; $e_{3=13cm}$



- Couche Roulement (bb)=8Cm
- Couche Base(GB)=20cm
- Couche Fondation(GNT)=13 cm

Figure V.8: Structure de chaussée

REFERENCES BIBLIOGRAPHIE

- **Harrat** .M, 2007, Contribution à l'amélioration du procédé de fabrication de la céramique Etude sur site : unité Maghreb céramique de Touggourt, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- **MAGNAN**, Jean-Pierre et PILOT, Georges ,1988. Amélioration des sols .
- **Zeyneb BELABBACI**, 2014,THESE DE DOCTORA<<STABILISATION DES SOLS GONFLANTS, université abou bekrbelkaid>> université de tlemcen
- **Chapman and olVelde**, 1992 «Introduction to play minerals chapman».p.
- **Olivier Cuisinier**, 2002.comportement hydromécanique des sols gonflants compactés.
- **Nadia Cherradi**, 2010. Étude de l'intéraction de l'hémoglobine avec des argiles et des hydroxydes doubles lamellaires.
- **MEDJNOUN .A.** ,2014.THESE DOCTORA<<Analyse caractérisation prévision et modélisation du comportement des argiles gonflantes>>université Bâb al Zouar.
- **A.Imelhaine** ,2012. « comportement des marnes au traitement à la chaux et au ciment »Mémoire de magister université Saad Dahleb. Blida,
- **Chamely, 1989**.« Chay sedimentology » Springer.
- **J. Wakim**, 2005. « Influence des solution aqueuse sur le comportement mécanique desroches argileux » thèse de doctorat de l'école national supérieure des mines de ParisFrance.
- M**.sudhakaretk. Recanasi** 2000 « Role of matric saction in collapse of compacted play soil » journal of geotechnical and geoenvironmental engineering.
- **T.Khelfia**, 1994. « étude de la stabilisation des sols gonflants par ajout des sables, Thèsede Magister » Université science et de la technologie Houari Boumediene p.
- **Bouassida** ,2009 ,amilorationdes sol en place, Université Tunis El Mana
- **B.Mazouz** ,2012. « modélisation par élément finis d'une semelle filant flexible soumise à l'action des sols argileux gonflant » mémoire de magister en génie civil, université Hadj Lakhdar Batna**.**
- **Mellal Fatima**, 2009. mémoire de magister université Hassiba Ben Bouali Chilef.
- **Nowamooz**, 2008 Retrait/gonflement des sols argileux compactés et naturels.pp.
- **Selon Chen**, 1988..
- **Draou.N Et Nebati**.F ,2016.stabilisation des sols fins,universitéaboubekrbelkaid
- **Rapport de synthèse** ,1988. (Etude sols argileux gonflants) laboratoire des ponts chaussées
- **KELANEMER A et. HAMADOU M,** 2016. Stabilisation du gonflement à la chaux et au ciment appliquée aux couches de formes des chaussées routières, Université M'Hamed BougaraBoumerdes,
- **GUERIDI.F**, 2009.«Stabilisation des sols à la chaux : Détermination du taux optimal». Thèse magister ENTP

- **Réunion d'ingénieur**, 1979matériaux de constriction, Edition Eyrolles .
- **TANGI. B** ,2010. «Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de priselors du traitement des sols» .Thèse docteur institut national polytechnique de lorraine.
- **Guide,2004**.«Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou auciment». Centre de recherches routières.
- **A.Bousalem**, 2010. « Caractérisation et exploitation de l'argile de Benazzouz dans laconstruction routière » Mémoire de Magister faculté de science de l'ingénieur département de génie civil Badji Mokhtar, Annaba.
- **H.Tremblay** « Amélioration mécanique et prédiction de la compressibilité des sols fins » Thèse de Doctorat Québec, Université Laval 1998.p.
- **Dr F.Ghoumari** cours de ciment université Aboubaker Belkaid Telemcen .p
- **Younoussa**, 2008. M« Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matièrespremières argileuse et latéritique du Burkina Faso améliorées aux liants hydrauliques application au génie civil (bâtiment et route) ». Thèse docteur de l'université d'ouagadougou. .
- **Guide technique**, 2009 « Traitement des sols aux liants hydrauliques »
- Google maps.
- **ZKHIREDDINE et KHASNADJI**,2016 Dimensionnement d'une structure De chaussée en utilisant les matériaux locaux.
- **Arouci Mohamed** , et SaoudiHakima 2015,Dimensionnement de corp dechaussée de la région de Médéaapplication pour la méthode CBR

- **KELANEMER A et. HAMADOU** M,2016 Stabilisation du gonflement à la chaux et au ciment appliquée aux couches de formes des chaussées routières, Université M'Hamed BougaraBoumerdes.
- **LCPC**. Conception et dimensionnement des structures de chaussées. Guide technique,LCPC-SETRA, 1994.

- **Guide technique** (2000) «Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques».Laboratoire centrale des ponts et chaussées.
- **G, Joeffroy ; R, Sauterey**, 1991 Dimensionnement des chaussées. Paris : Presses de l'EcoleNationale des Ponts et Chaussées
- **MEKADDEM Ali ,GOURARI Abdessamie**, 2014,REHABILITATION DE LA ROUTE NATIONALEN 97 ENTRESIDIBELABBES ET MASCARA SUR 19 KM

Conclusion général:

La stabilisation des sols argileux au ciment est une solution convenable pour la construction des couches de forme routières et ferroviaires. Cette solution est particulièrement attirante dans les travaux de terrassements des chantiers routiers, ferroviaires et aéroportuaires.

En plus de l'aspect technique, les coûts économiques des travaux qui dépendent de l'équilibre entre la quantité de matériau en remblai et déblai sont réduits. Ces raisons sont suffisantes pour que cette technique soit utilisée systématiquement dans plusieurs pays depuis des décennies et même après la généralisation des géosynthétiques qui rentent plus chers.

Les résultats obtenus dans ce mémoire permettent de voir que l'introduction du ciment dans les sols argileux à un effet considérable sur leur comportement mécanique.

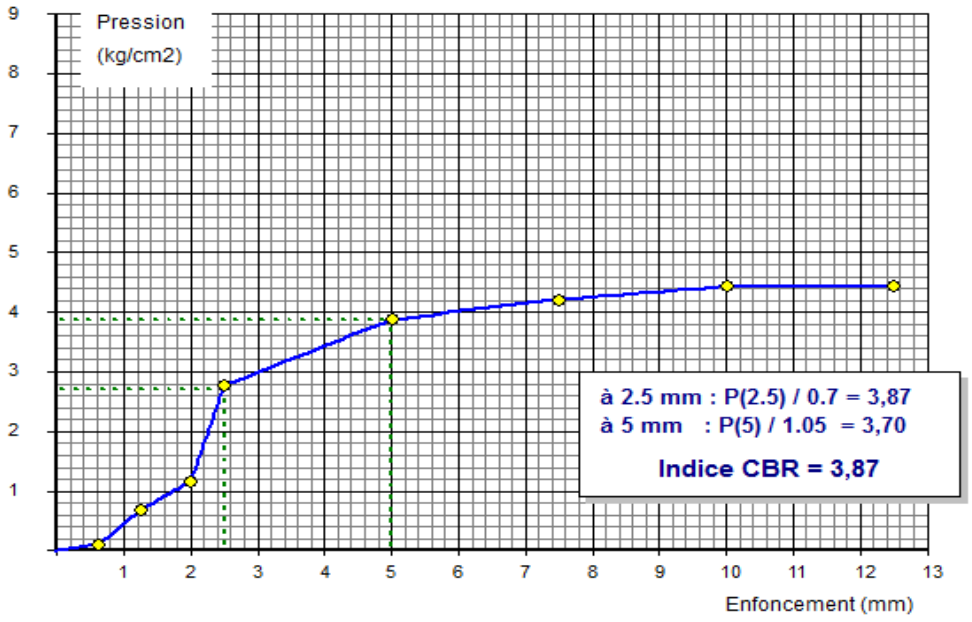
Donc Les résultats trouvés après traitement du sol support à au ciment nous avons sortis les conclusions suivantes :

- Une diminution de l'indice de plasticité
- Une diminution de la valeur au bleu
- Une diminution de densité sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimales,
- Une augmentation de l'indice CBR imbibé

RAPPORT D'ESSAI

ESSAI CBR : Selon NF P 94-078 Type imbibé

Etude : influence de ciment sur l'echantillent N°Dossier : Réf. : 0% Profondeur : Nature : Date essais :	Immersion : 4 Jours Compactage : 10 C/C Weau compactage : 6 % Densité : 1,7 t/m3 Gonflement : 9,31 mm



RESUTATS DES MESURES

Temps	*30 s*	*1 mn*	*1mn 40s*	*2 mn*	*4 mn*	*6 mn*	*8 mn*	*10 mn*
Enf (mm)	*0,63*	*1,25*	*2,00*	*2,50*	*5,00*	*7,50*	*10,00*	*12,50*
Lecture	*0,10*	*0,62*	*1,05*	*2,50*	*3,50*	*3,80*	*4,00*	*4,00*
Pr(kg/cm2)	*0,11*	*0,69*	*1,16*	*2,77*	*3,88*	*4,21*	*4,44*	*4,44*

Coefficient de l'anneau = 21,407
Surface du piston = 19,3 cm2

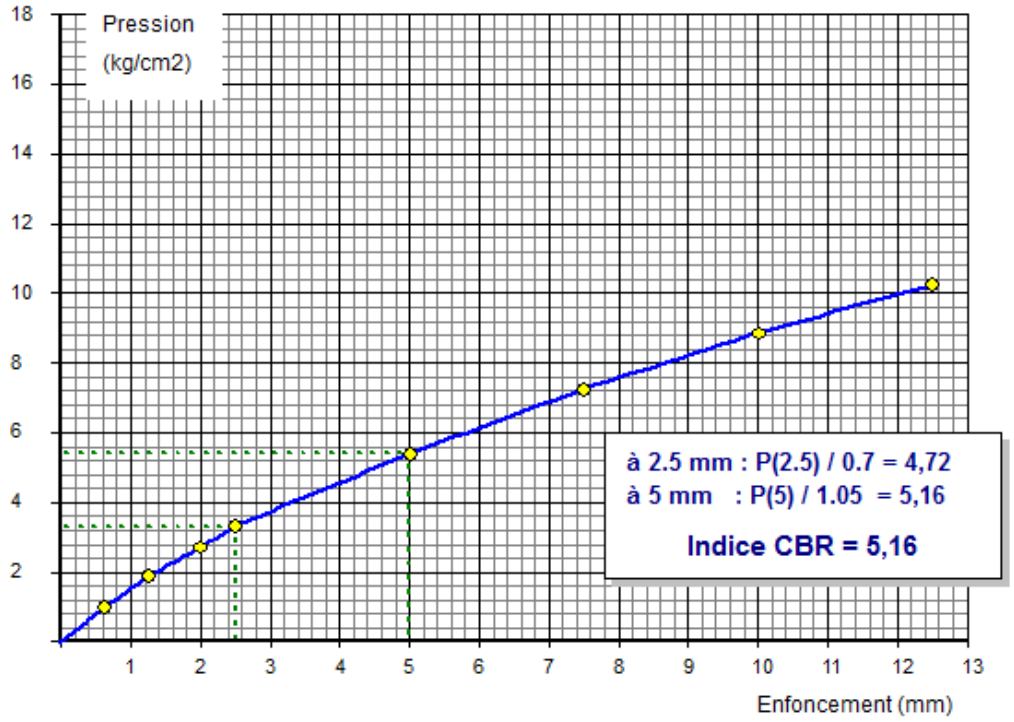
Programme: Soltests 2007 ©

Figure .1. La courbe de l'essai Proctor de l'échantillon

RAPPORT D'ESSAI

ESSAI CBR : Selon NF P 94-078 Type imbibé

Etude : influence de ciment sur l'echantillent N°Dossier : Réf. : 3% Profondeur : Nature : Date essais :	Immersion : 4 Jours Compactage : 25 C/C Weau compactage : 6 % Densité : 1,87 t/m3 Gonflement : 12,65 mm



RESUTATS DES MESURES

Temps	*30 s*	*1 mn*	*1mn 40s*	*2 mn*	*4 mn*	*6 mn*	*8 mn*	*10 mn*
Enf (mm)	*0,63*	*1,25*	*2,00*	*2,50*	*5,00*	*7,50*	*10,00*	*12,50*
Lecture	*0,90*	*1,70*	*2,45*	*3,00*	*4,87*	*6,55*	*7,99*	*9,25*
Pr(kg/cm2)	*1,00*	*1,89*	*2,72*	*3,33*	*5,40*	*7,27*	*8,86*	*10,26*

Coefficient de l'anneau = 21,407
Surface du piston = 19,3 cm2

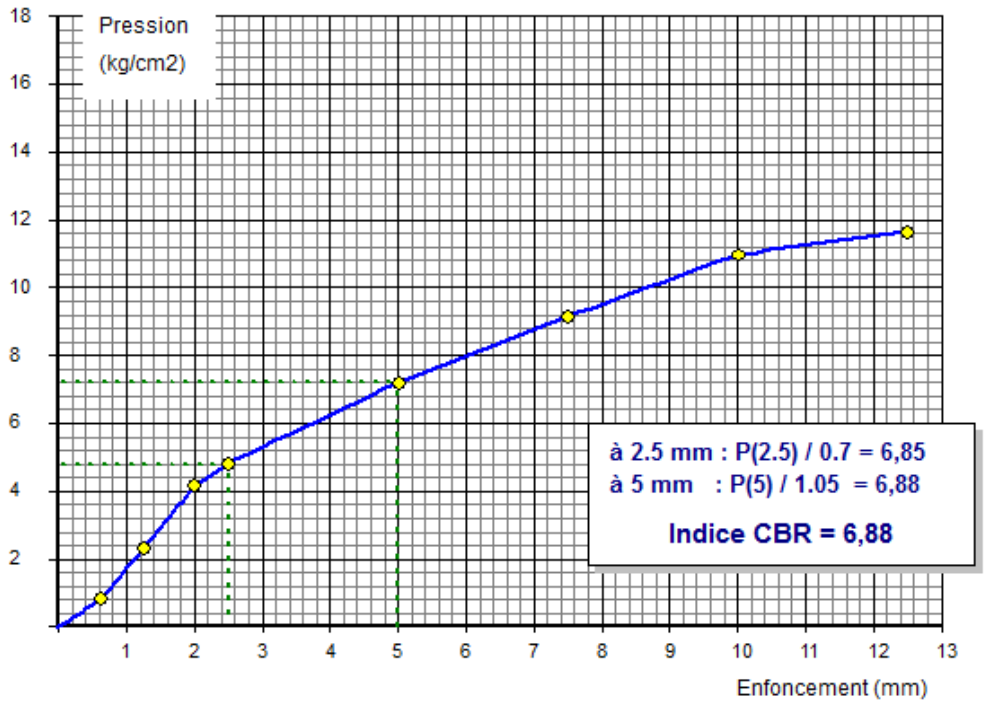
Programme: Soltests 2007 ©

Figure 2. La courbe de l'essai Proctor de l'échantillon mélangé à 3% de Ciment

RAPPORT D'ESSAI

ESSAI CBR : Selon NF P 94-078 Type imbibé

Etude : influence de ciment sur l'echantillent N°Dossier : Réf. : 6% Profondeur : Nature : Date essais :	Immersion : 4 Jours Compactage : 56 C/C Weau compactage : 6 % Densité : 2,01 t/m3 Gonflement : 12,37 mm



RESUTATS DES MESURES

Temps	*30 s*	*1 mn*	*1mn 40s*	*2 mn*	*4 mn*	*6 mn*	*8 mn*	*10 mn*
Enf (mm)	*0,63*	*1,25*	*2,00*	*2,50*	*5,00*	*7,50*	*10,00*	*12,50*
Lecture	*0,75*	*2,09*	*3,75*	*4,35*	*6,50*	*8,25*	*9,90*	*10,50*
Pr(kg/cm2)	*0,83*	*2,32*	*4,16*	*4,82*	*7,21*	*9,15*	*10,98*	*11,65*

Coefficient de l'anneau = 21,407
Surface du piston = 19,3 cm2

Programme: Soltests 2007 ©

Figure 3. La courbe de l'essai Proctor de l'échantillon mélangé à 6% de Ciment

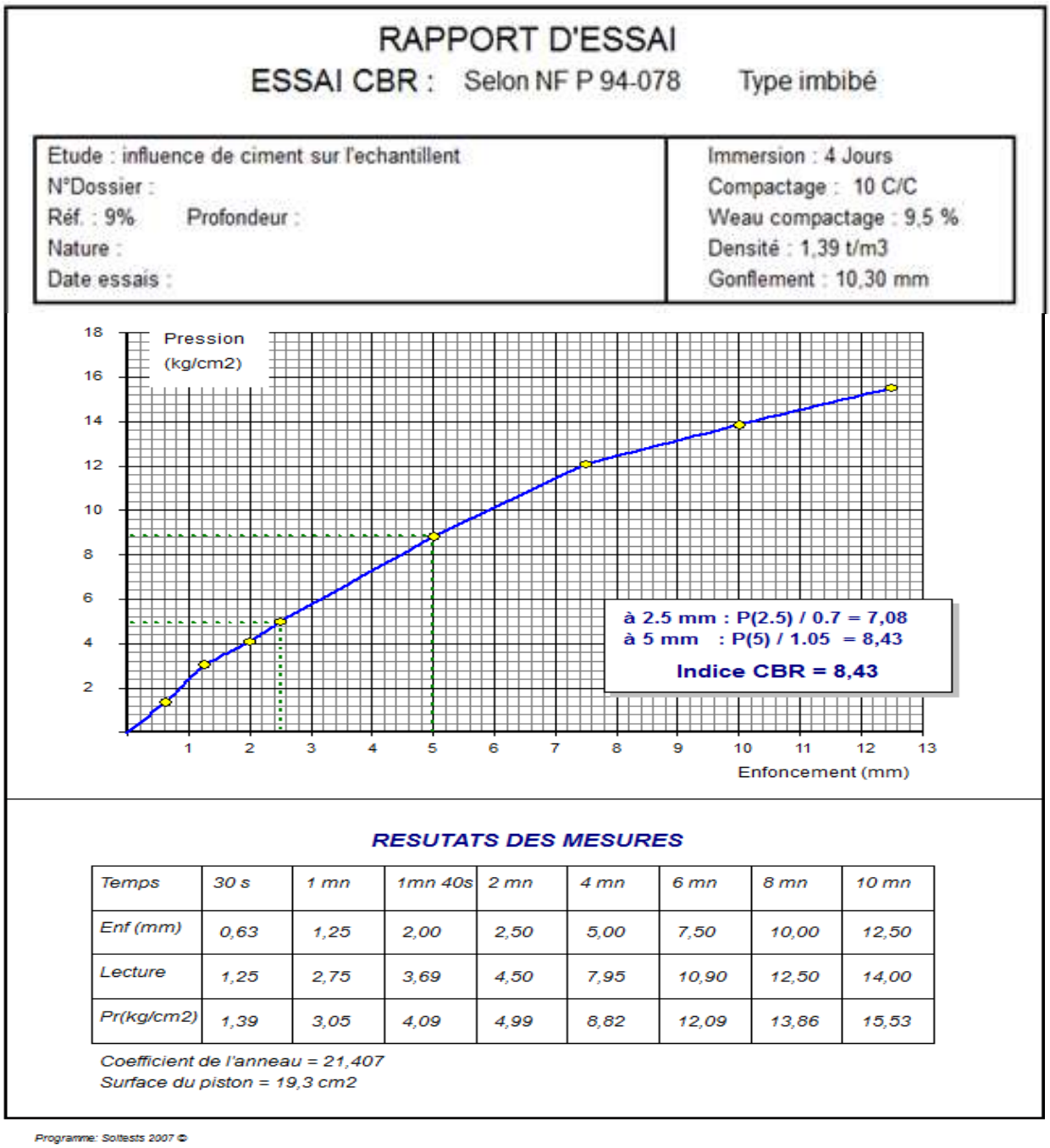


Figure 4. La courbe de l'essai Proctor de l'échantillon mélangé à 9% de Ciment

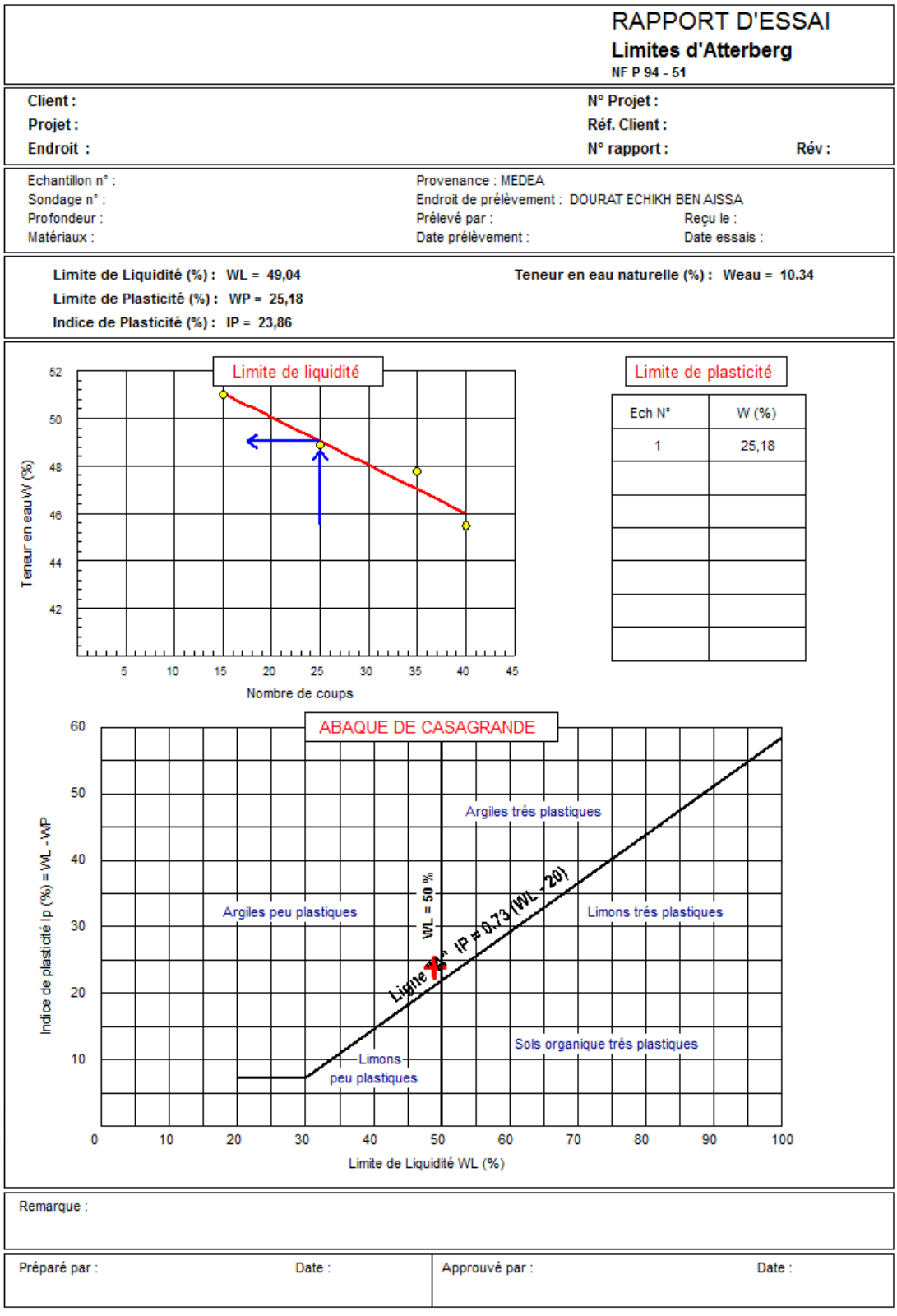


Figure.5. *La courbe limite d'Atterberg de l'échantillon*

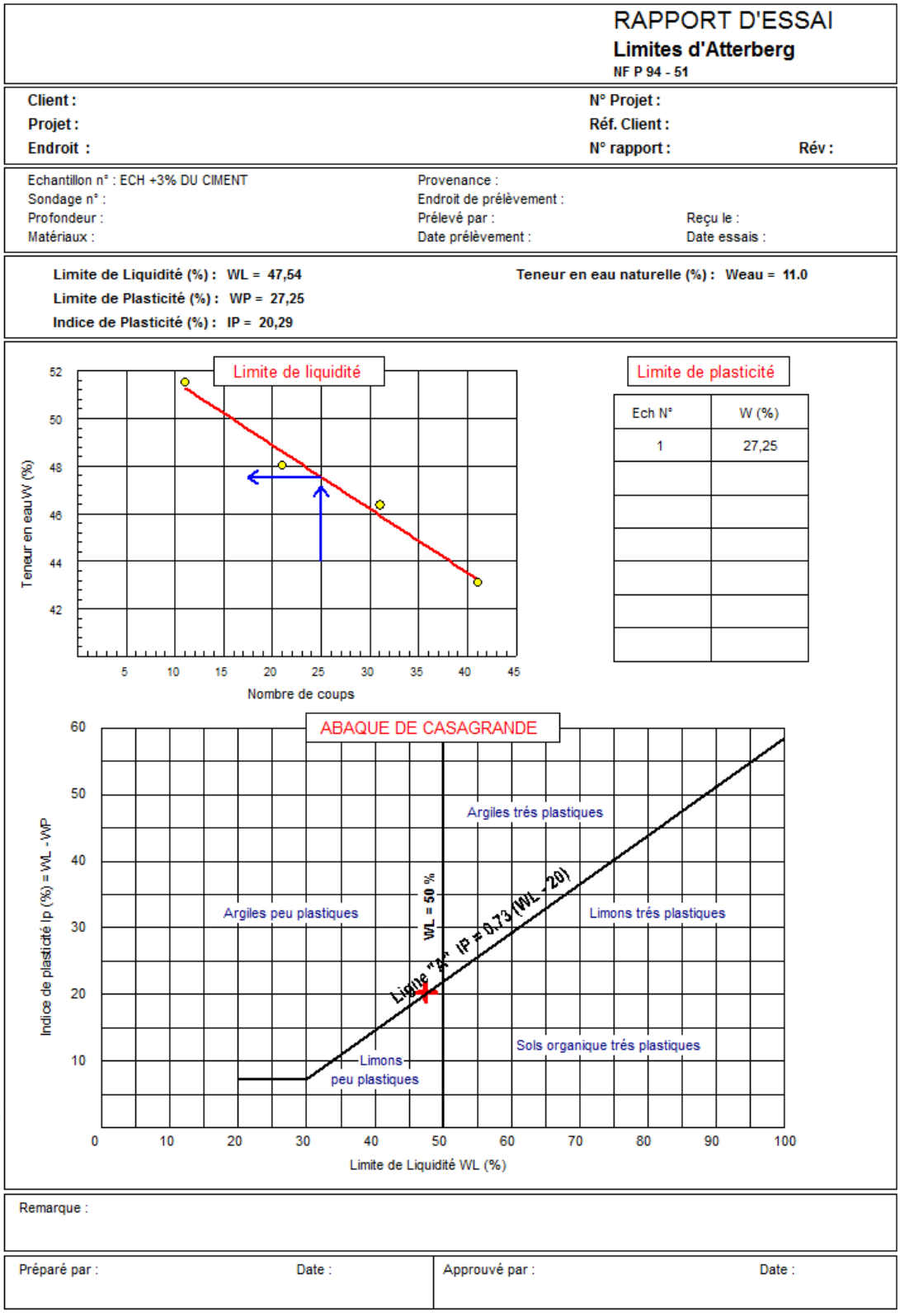


Figure.6. *La courbe limite d'Atterberg de l'échantillon mélangé à* 3% de Ciment

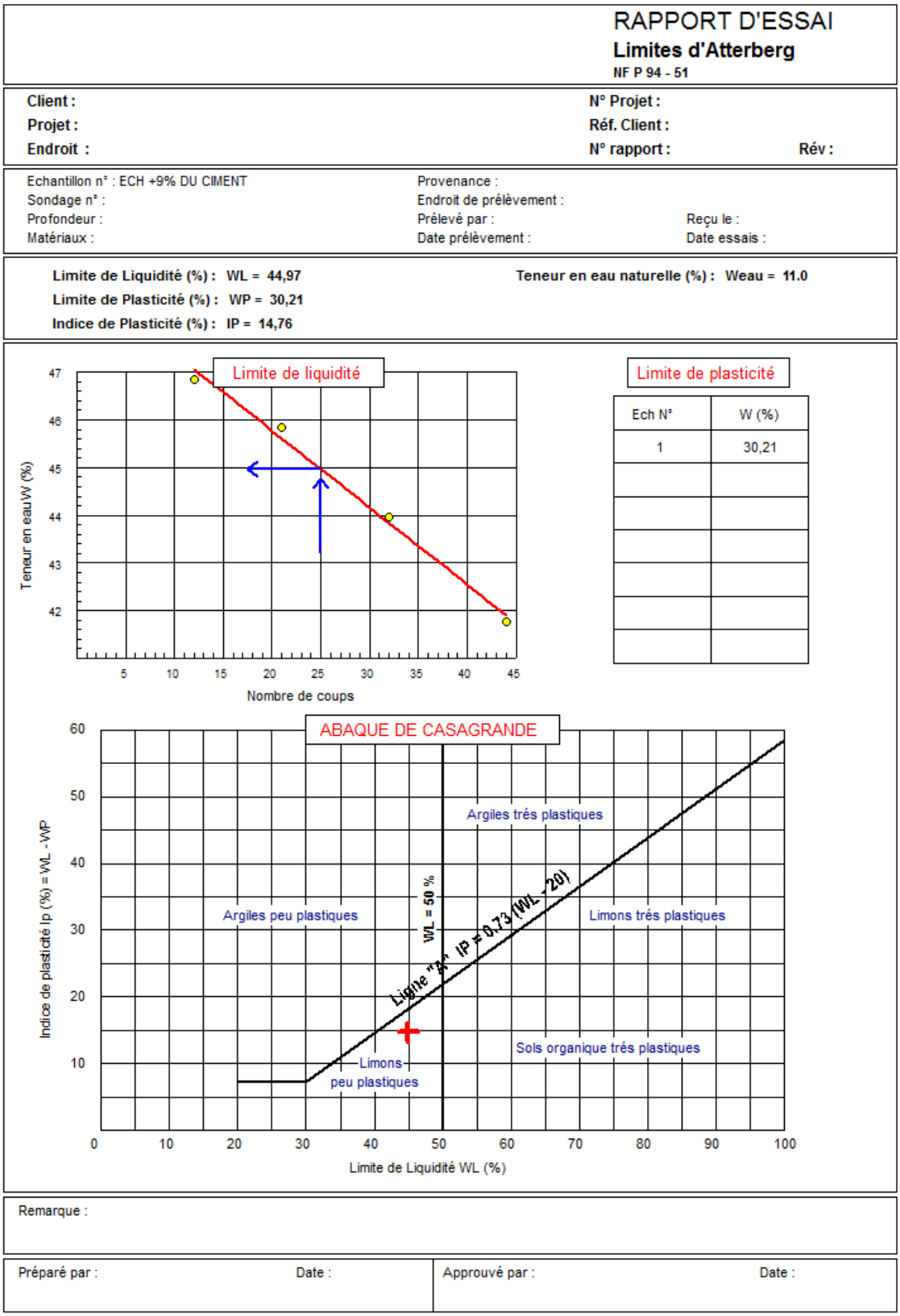


Figure7. *La courbe limite d'Atterberg de l'échantillon mélangé à* 6% de Ciment

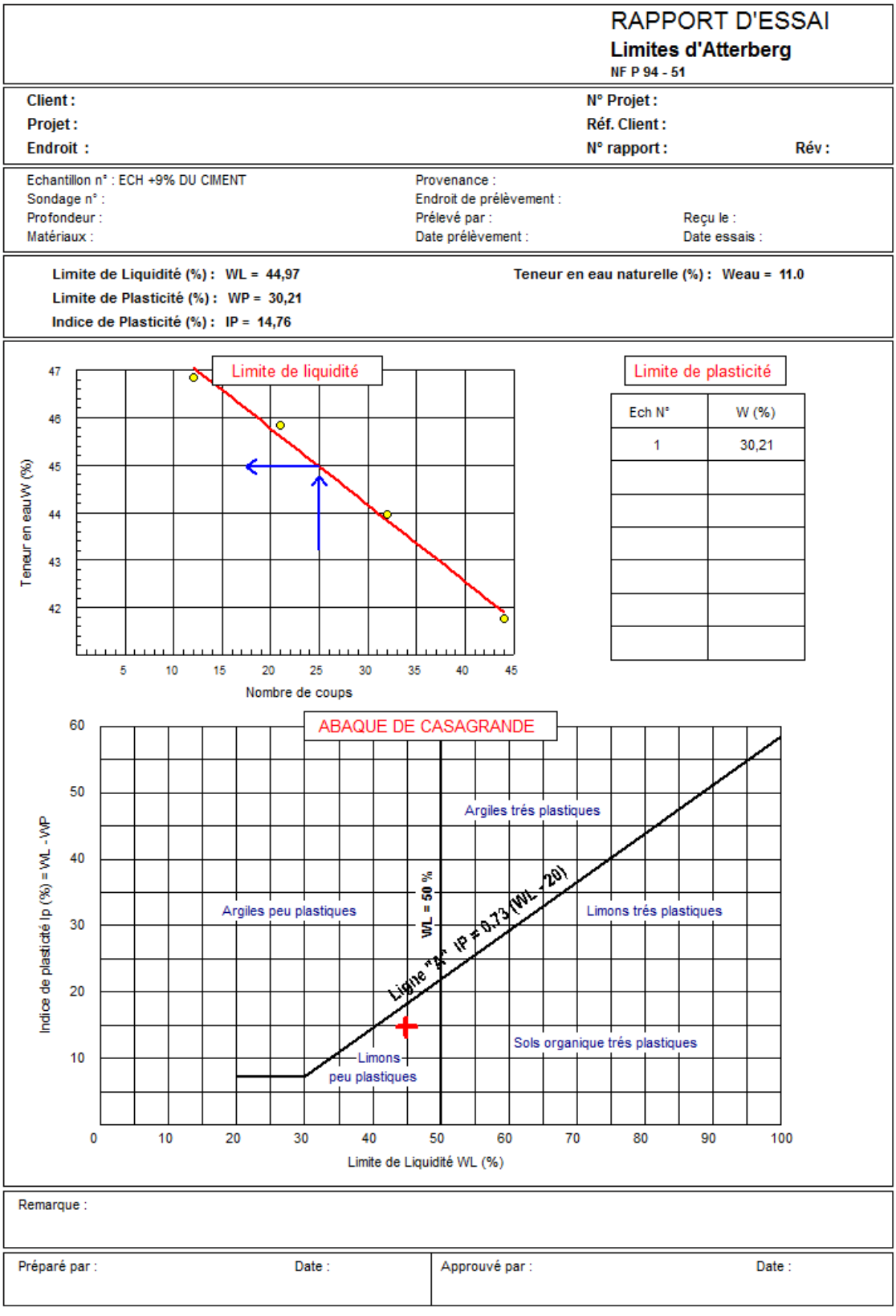


Figure.8. *La courbe limite d'Atterberg de l'échantillon mélangé à* 9% de Ciment