

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE CIVIL

N°



FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : GEOTECHNIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master
Académique**

Par :

GUASMI Radhia

ZOUBIRI Fatima el zahra

Intitulé

**Effet du fort traitement par différentes classes de
ciment sur les propriétés de compactage du sol de
Chaaba El Hamra (wilaya de M'sila)**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. AMRIOU Abderrachid

MCA, Université de M'Sila

Président

Dr. MEKKI Lakhdar

MCB, Université de M'Sila

Encadreur

Dr. TALLAH Naoui

MCA, Université de M'Sila

Examineur

Année universitaire : 2021 /2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

- * A nos chers parents, pour tous leurs sacrifices, leurs soutiens et leurs prières tout au long de nos VJE,*
- * A toute nos familles pour leurs soutiens tout au long de nos parcours universitaire,*
- * A tous nos meilleurs amis et à toute la promotion 2022.*

A tous ceux qui luttent contre l'injustice et l'ignorance.

Merci d'être toujours là pour nous.

GUASMJ Radhia et ZOUBJRJ Fatima el zakra

Remerciements

Il est primordial de remercier «Allah» de j'avoir donné le courage, la patience et la sante qui nous ont été utiles tout au long de mes années d'études et pour réaliser ce modeste travail.

Je tiens à remercier chaleureusement notre encadreur 'Dr. Mekki Lakhdar' Pour son aide et son encadrement, ses encouragements et surtout sa compréhension durant toute la période de préparation de ce travail.

Je tiens à remercier tous mes Professeurs de notre département.

Je remercie toute personne du corps enseignant ou administratif de Génie civil, ayant contribué de près ou de loin à ma formation.

Ma gratitude aux membres de jury qui me font l'honneur de juger mon travail de fin d'étude.

GUASMI Radhia et ZOUBIRI Fatima El zahra

ملخص

نظرًا للطبيعة الجيولوجية لبلدنا، فإننا غالبًا ما نواجه تربة غير مناسبة شديدة البلاستيك وذات قدرة تحمل منخفضة، لذلك كمهندسين جيوتقنيين كان علينا معالجة هذه التربة وتحسينها لجعلها مناسبة للبناء.

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين خصائص التربة المأخوذة من ولاية الشعبة الحمراء بموقع المسيلة بإضافة نسب مختلفة لنوعين من الأسمت (الشامل والمتين). بالإضافة إلى اختبارات تحديد الهوية، يشتمل البرنامج التجريبي المنفذ على اختبارات ضغط عادية من نوع بروكتور واختبارات نسبة تحمل كاليفورنيا (لحظية وغارقة). النتائج التي تم الحصول عليها تظهر تحسينات كبيرة في الخصائص الجيوتقنية لهذه التربة.

الكلمات المفتاحية: معالجة التربة، تربة طينية، انواع الاسمنت، ضغط، اختبارات نسبة تحمل كاليفورنيا

Résumé

En raison de la nature géologique de notre pays, nous rencontrons souvent des sols inappropriés qui sont très plastiques et ont une faible capacité portante, nous avons donc comme des ingénieurs géotechniciens dû traiter et améliorer ces sols pour les rendre aptes à la construction.

Cette étude vise à améliorer les caractéristiques d'un sol prélevé du site du Chaaba el Hamra wilaya de M'Sila en ajoutant différents pourcentages de deux types de ciment (Chamil et Matine). Outre les essais d'identification, le programme expérimental exécuté comporte des essais de compactage type Proctor normale et des essais CBR immédiat et imbibé. Les résultats obtenus montrent des améliorations significatives des propriétés de géotechnique de ce sol.

Mots clés : traitement du sol, limon-argileux, types des ciments, compactage, CBR

Abstract

Due to the geological nature of our country, we often encounter unsuitable soils which are very plastic and have low bearing capacity, so we as geotechnical engineers had to treat and improve these soils to make them suitable for construction.

This study aims to improve the characteristics of a soil taken from the Chaaba el Hamra wilaya of M'Sila site by adding different percentages of two types of cement (Chamil and Matine). In addition to the identification tests, the experimental program carried out includes normal Proctor-type compaction tests and immediate and soaked CBR tests. The results obtained show significant improvements in the geotechnical properties of this soil.

Key words; soil treatment, clay soil, types of cements, compaction, CBR

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I : Synthèse Bibliographique	3
I.1 Introduction	3
I.2 Traitement des sols	4
I.3 Le but de traitement des sols	4
I.4 Techniques de traitement possibles	5
I.4.1 Traitement mécanique	5
I.4.2 Traitement thermique	7
I.4.3 Traitement chimique	8
I.5 Actions des liants	15
I.6 Traitement des sols par ciment	15
I.6.1 Le Ciment	16
I.6.2 Influences des liants hydrauliques (ciment) sur les propriétés géotechniques et mécaniques	21
I.6.3 Mécanisme de stabilisation par l'ajout de ciment	23
I.6.4 Avantages de la technique	24
Chapitre II : Programme expérimental et procédures d'essais	26
II.1 Localisation générale	26
II.2 Liste des essais	26
II.3 Description des essais	27
II.3.1 Essais d'identification	27

II.3.1.1	Analyse granulométrique	27
II.3.1.2	Les limite d'Atterberg	29
II.3.1.3	L'essai au bleu de méthylène	29
II.3.1.4	Analyse chimique	30
II.3.2	Essais de caractérisation	30
II.3.2.1	L'essai Proctor	30
II.3.2.2	Essai CBR immédiat et imbibé	31
CHAPITRE III : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS D'ESSAIS		34
III.1	Introduction	34
III.2	Résultats Des Essais	34
III.3.1	Les essais d'identification :	34
III.3.2	Les essais mécaniques :	48
III.4	Conclusion	65
CONCLUSION GENERALE		67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Synthèse sur les dosages en stabilisants pratiqués pour le traitement des sols selon les recommandations du Centre de Recherches Routières en Belgique (CRR, 2004).....	11
Tableau I.2 : Les avantages et les inconvénients des différentes techniques de stabilisation.....	14
Tableau III.1 : Granulométrie par tamisage.....	33
Tableau III.2 : Récapitulatif des résultats des essais de l'analyse granulométrique tamisage.....	33
Tableau III.3 : Résultats de l'analyse sédiment métrique.....	34
Tableau III.4 : La moyenne des huit essais de sédimentométrie.....	35
Tableau III.5 : Récapitulatif des résultats des essais de l'analyse granulométrique (Tamisage et sédimentométrie).....	36
Tableau III.6 : Les résultats de limite de liquidité sol naturel.....	38
Tableau III.7 : Limite de plasticité sol naturel.....	39
Tableau III.8 : Résultats de 3 essais limite d'Atterberg sol naturel.....	39
Tableau III.9 : Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg Traité ciment (Chamil).....	40
Tableau III.10 : Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg Traité ciment Matine.....	41
Tableau III.11 : résultats de l'essai au bleu.....	42
Tableau III.12 : présente la récapitulation des résultats des séries d'essais de bleu de méthylène : Ciment (Chamil).....	43
Tableau III.13 : présente la récapitulation des résultats des séries d'essais de bleu de méthylène : Ciment (Matine).....	44
Tableau III.14 : Classification des sols.....	45
Tableau III.15 : L'analyse chimique par XRF.....	45
Tableau III.16 : L'analyse par DRX.....	45
Tableau III.17 : Résultats d'essai de Proctor Normale sol naturel.....	46
Tableau III.18 : Résultats d'essai de Proctor Normal d'un sol traité par cimente Chamil.....	47
Tableau III.19 : Résultats (moyennes) 3 Essais de densité sèche et la teneur en eau en fonction des teneurs ciment (Chamil).....	48

Tableau III.20 : Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par ciment Matine.....	49
Tableau III.21 : Résultats (moyennes) 3 Essais de densité sèche et la teneur en eau en fonction des teneurs ciment (MATINE).....	50
Tableau III.22 : Résultats de l'essai CBR Imbibé du sol naturel.....	52
Tableau III.23 : Effet de ciment Chamil sur l'indice CBR imbibé.....	53
Tableau III.24 : Récapitulatif des résultats des essais C.B.R imbibé (CHAMIL).....	54
Tableau III.25 : Effet de ciment Matine sur l'indice CBR imbibé.....	55
Tableau III.26 : Récapitulatif des résultats des essais C.B.R imbibé.....	56
Tableau III.27 : Résultats de l'essai CBR Immédiat du sol naturel.....	58
Tableau III.28 : Effet de ciment MATINE sur l'indice CBR immédiat.....	59
Tableau III.29 : Récapitulatif des résultats des essais C.B.R immédiat (Matine).....	60
Tableau III.30 : Effet de ciment Chamil sur l'indice CBR immédiat.....	61
Tableau. III.31 : Récapitulatif des résultats des essais C.B.R immédiat. (CHAMIL).....	62

Liste des Figures

Figure I.1 : Compactage dynamique.....	6
Figure I.2 : Technique de drains verticaux.....	7
Figure I.3 : Substitution dynamique.....	7
Figure I.4 : La congélation du sol sur chantier.....	8
Figure I.5 : Critères d'utilisation du traitement chimique (Dept. Of the Army, 1983).....	10
Figure I.6 : Traitement à la chaux.....	12
Figure I.7 : Traitement au ciment.....	13
Figure I.8 : La Composition du Ciment.....	18
Figure I.9 : Fabrication du ciment.....	20
Figure II.1 : Situation géographique du site de Chaaba el Hamra.....	28
Figure II.2 : Analyse granulométrique par tamisage.....	29
Figure II.3 : Analyse granulométrique par sédimentométrie.....	29
Figure II.4 : Appareillage d'essai limite d'Atterberg.....	30
Figure II.5 : Appareillage et Echantillonnages d'essai VBS.....	31
Figure II.6 : Appareillage et Echantillonnages d'essai Proctor.....	32
Figure II.7 : Appareille CBR.....	33
Figure III.1 : Présente les courbes des essais d'analyse granulométrique par tamisage.....	34
Figure III.2 : Courbe d'analyse granulométrique (tamisage et sédimentométrie).....	37
Figure III.3 : La courbe de limite de liquidité du sol nature.....	38
Figure III.4 : Histogramme de Limite Atterberg ciment (Chamil).....	40
Figure III.5 : La courbe de limite Atterberg ciment (Chamil).....	40
Figure III.6 : Histogramme de Limite Atterberg ciment (Matine).....	41
Figure III.7 : La courbe de limite Atterberg ciment (Matine).....	41
Figure III.8 : Diagramme de Casagrande.....	42

Figure III.9 : Histogramme de VBS en fonction des différents teneurs en ciment (Chamil).....	43
Figure III.10 : Histogramme de VBS en fonction des différents teneurs en ciment (Matine).....	44
Figure III.11 : courbe Proctor Normal de sol naturel.....	47
Figure III.12 : courbe Proctor Normal de sol traité par ciment (Chamil).....	48
Figure III.13 : Densité sèche en fonction des différents teneurs en ciment (Chamil).....	48
Figure III.14 : Représenté la teneur en eau en fonction des différents teneurs en ciment Chamil.....	49
Figure III.15 : Courbe Proctor Normal de sol traité par ciment (Matine).....	50
Figure III.16 : Densité sèche en fonction des différents teneurs en ciment (MATINE).....	51
Figure III.17 : Représenté la teneur en eau en fonction des différents teneurs en ciment (MATINE).....	51
Figure III.18 : Effet des ciments sur le comportement du sol au poinçonnement imbibé.....	53
Figure III.19 : Courbes des essais des C.B.R imbibé (Chamil).....	54
Figure III.20 : Effet de ciment combiné sur l'indice CBR imbibé (Chamil).....	55
Figure III.21 : Effet des ciments sur le comportement du sol au poinçonnement imbibé.....	56
Figure III.22 : Courbes des essais des C.B.R imbibé (MATINE).....	57
Figure III.23 : Effet de ciment combiné sur l'indice CBR imbibé (MATINE).....	57
Figure III.24 : Effet des ciments sur le comportement du sol au poinçonnement immédiat.....	59
Figure III.25 : Courbes des essais des C.B.R immédiat. (MATINE).....	60
Figure III.26 : Effet de ciment combiné sur l'indice CBR immédiat (Matine).....	61
Figure III.27 : Effet des ciments sur le comportement du sol au poinçonnement immédiat.....	62
Figure III.28 : Courbes des essais des C.B.R immédiat. (CHAMIL).....	63
Figure III.29 : Effet de ciment combiné sur l'indice CBR immédiat (CHAMIL).....	63

Introduction Générale

Les principales activités d'un ingénieur civil est la stabilisation des sols. Le terme regroupe un ensemble de techniques destinées à augmenter la résistance des sols et/ou à limiter les déformations sous les ouvrages existants. De plus, le renforcement de la fondation ou du remblai comprend l'amélioration de ses propriétés mécaniques. En géotechnique, plusieurs techniques sont utilisées pour stabiliser le sol. Ces techniques reposent parfois sur des méthodes purement mécaniques, des méthodes chimiques par ajout de matériaux cimentaires (ciment, chaux, cendres volantes, laitier, etc.) ou en associant des éléments rigides au sol (sol renforcé).

Cependant, le choix entre ces méthodes dépend du type de sol et de la nature du projet. Le développement des activités industrielles envisagé aujourd'hui s'accompagne de graves problèmes environnementaux, car divers déchets sont générés aux différentes étapes de fabrication des produits. En effet, le recyclage des déchets industriels dans les applications de génie civil est une préoccupation majeure pour les ingénieurs et les chercheurs.

De plus, l'utilisation de divers déchets industriels dans le domaine du génie civil, grand consommateur de ressources naturelles, permet non seulement de réduire les coûts, mais aussi de protéger l'environnement et d'améliorer parfois certaines propriétés techniques des sols ou du béton, comme la résistance, étanchéité, extensibilité, etc. Ces recherches s'inscrivent dans un programme de recherche visant à développer de nouvelles applications en génie civil.

Ce travail porte sur l'étude des effets du fort traitement par différentes classes de ciment (Chamil et Matine) sur les propriétés de compactage d'un sol prélevé du site du Chaaba el Hamra wilaya de M'Sila (15 km Nord-est de la ville de M'Sila). L'étude présente le comportement des sols compactés utilisés en construction routière.

Le protocole expérimental suivi consiste à étudier l'effet de ciment (Chamil – Matine) sur les propriétés géotechniques du sol de Chaaba el Hamra. Le ciment a été ajouté au sol en différents pourcentage : 0% (sol témoin) - 6% - 8% et 10%.

Le mémoire comporte trois chapitres

- Chapitre 1. Synthèse Bibliographique.
- Chapitre 2. Programme expérimental et procédures d'essais.
- Chapitre 3. Présentation et analyse des résultats d'essais.

Chapitre I

Synthèse Bibliographique

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

I.1 Introduction :

Le but du traitement est de changer les propriétés physico-chimiques des matériaux le plus souvent sol naturel, mais parfois un matériau rapports-amélioration rapide comportement mécanique durable. Pour cela, nous ajoutons le matériau Transformer un ou plusieurs produits, fournir Le niveau d'eau change, se stabilise instantanément et améliorer les propriétés mécaniques opportun. De nombreux matériaux peuvent ainsi être recyclés : Limon, sable, gravier argileux, craie, etc.

Les liants utilisés sont de nature hydraulique : Chaux, ciment, liants routiers hydrauliques. Pour certains plus de structures en béton, utilisant du liant augmente l'imperméabilité des matériaux traités.

Le traitement des sols médiocres (sols mous, limons, marnes, tourbes, etc.) ainsi que les sols à problèmes (sols liquéfiables, sols expansifs, sols effondrables) vise à satisfaire les point énumérés ci-après :

- Rendre utilisable un sol qui ne présente initialement pas les caractéristiques requises à son utilisation.
- Optimiser les opérations de réalisation par assèchement des sols qui deviennent praticables aux engins de chantiers.
- Possibilité d'éviter le décapage des sols existants et leur substitution par des sols d'apport.
- L'amélioration des caractéristiques géotechniques de façon durable.
- Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre les particules.
- Possibilités de préserver l'écosystème et de ne plus avoir besoin de parcourir de nouveaux gisements naturels.
- Limiter la sensibilité des sols aux variations hygrométrique saisonnières.

La réalisation de ces objectifs est incontestablement dépendante de la technique de traitement adoptée et des procédures de sa mise en œuvre pour atteindre le niveau de performance recherché.

I.2 Traitement des sols :

Malgré leurs propriétés de résistance, les sols argileux naturels, lorsqu'ils sont simplement compactés, puis mis en œuvre et soumis aux conditions extérieures, sont très sensibles aux variations de température et d'hygrométrie. La stabilisation des sols argileux a pour objet essentiel de rendre ce matériau moins sensible aux variations de teneur en eau et de l'empêcher à la fois de se transformer en boue ou de s'effriter sous l'action de l'humidité. D'après les conséquences des sols expansifs, plusieurs chercheurs ont étudié la stabilisation des sols expansifs.

Le renforcement des sols est un domaine récent et particulier de l'amélioration des sols. On peut distinguer deux grandes catégories de techniques : Celles où la structure du sol est améliorée, notamment au niveau des contacts entre les grains, par un additif, un liant, un coulis, ou modifiée par réduction des vides entre les grains, pour atteindre un état plus dense; ce sont les techniques d'amélioration des sols; Celles où l'on place dans le sol des éléments structuraux pour augmenter principalement la résistance mécanique; ce sont les techniques de renforcement des sols. Le choix entre ces méthodes dépend du type du sol et la destination du projet. Ce chapitre présente un abrégé sur les différentes techniques de renforcements des sols.

I.3 Le but de traitement des sols :

Le traitement des sols vise à satisfaire les points énumérés ci -après :

- Rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir.
- Éviter le décapage et le remplissage par des matériaux d'apport.
- L'assèchement des sols permettent de les rendre praticables aux engins de chantiers.
- L'amélioration des caractéristiques géotechniques de façon durable.
- Limiter la sensibilité des argiles à l'eau.
- Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre particules (résistance mécanique).
- Chez les sols argileux une réduction instantanée de l'angulosité avec la floculation.
- Diminuer les variations de volume dans le cas des sols gonflants.

I.4 Techniques de traitement possibles :

Le traitement des sols expansifs est souvent opéré pour augmenter leur résistance, ainsi que pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau.

Le sol initial, ou à l'état non amélioré, est identifié essentiellement par sa courbe granulométrique qui demeure un facteur essentiel en vue de lui faire subir une technique d'amélioration donnée. En effet, compte tenu des deux grandes classes de sols bien connus, à savoir pulvérulents ou fins, on comprend naturellement qu'il existe une différence entre les techniques d'amélioration appropriées à chacune de ces classes. Par ailleurs, en plus, sachant qu'il existe une bonne majorité de sols appartenant à la catégorie de sols intermédiaires, d'autres dérivées de techniques peuvent être envisagées. Dans la pratique, en fonction du projet en vue d'être exécuté, on peut faire recours à l'exécution de deux techniques différentes d'amélioration des sols.

Le traitement des sols aux liants hydrauliques (chaux, ciment...) est un procédé de plus en plus utilisé par les entreprises du BTP en génie routier. Il améliore les propriétés géotechniques et mécaniques des sols dits « stériles » in situ. Le Guide Technique « Traitement des sols à la chaux et/ou cimentaire » (SETRA-LCPC, 2000 et 2007) décrit les modalités de réalisation des études géotechniques en laboratoire et sur le terrain pour atteindre les propriétés recherchées. Cependant, l'analyse des retours empiriques a révélé une certaine quantité de perturbations de traitement. L'axe de recherche de ce mémoire est : effet du fort traitement par différentes classes de ciment sur les propriétés de compactage du sol de Chaaba El Hamra (wilaya de M'sila).

Il existe de nos jours trois techniques de traitement ou de stabilisation des sols en géotechnique routière :

I.4.1 Traitement mécanique :

I.4.1.1 compactage :

Compacter un sol consiste à faire diminuer son volume par l'application d'un procédé mécanique (force, vibration, combinaison des deux, chocs,...) par ajout d'une quantité d'eau, pour accroître sa densité en place et resserrer sa texture. Cette diminution de volume ne se produit que par

l'élimination des vides remplis d'air qui existent dans le sol à son état initial. La teneur en eau du sol n'est donc pas modifiée (il s'agirait dans ce cas d'une consolidation).



Figure I.1 : Compactage dynamique.

I.4.1.2 Drainage :

C'est la technique la plus classique qui est mise en œuvre. Plusieurs procédés sont utilisés ; comme les tranchées drainant, drains de carton, drains de sables verticaux.

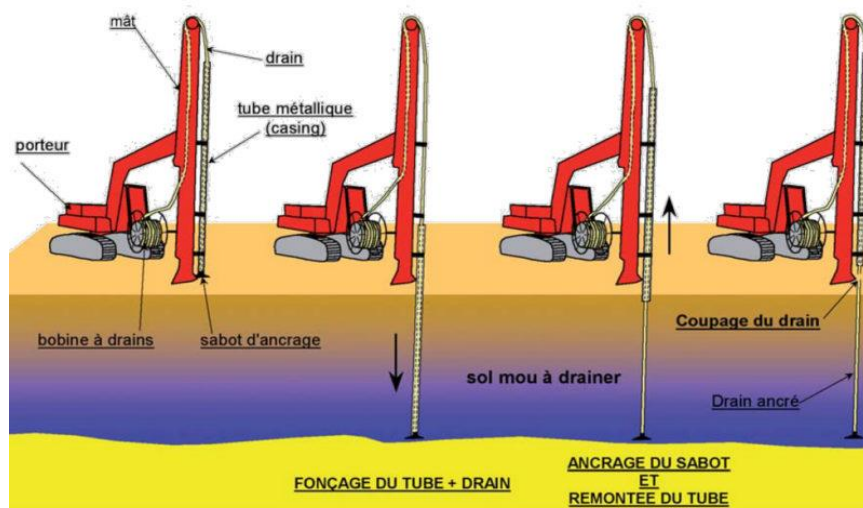


Figure I.2 : Technique de drains verticaux.

I.4.1.3 Substitution :

C'est la suppression de la couche du sol gonflant. C'est la solution la plus évidente. Si la couche a une grande épaisseur, la suppression totale ne peut être envisagée. Elle consiste à excaver jusqu'à une certaine profondeur puis remblayer avec des sable ou autres matériaux graveleux. C'est une solution très coûteuse.

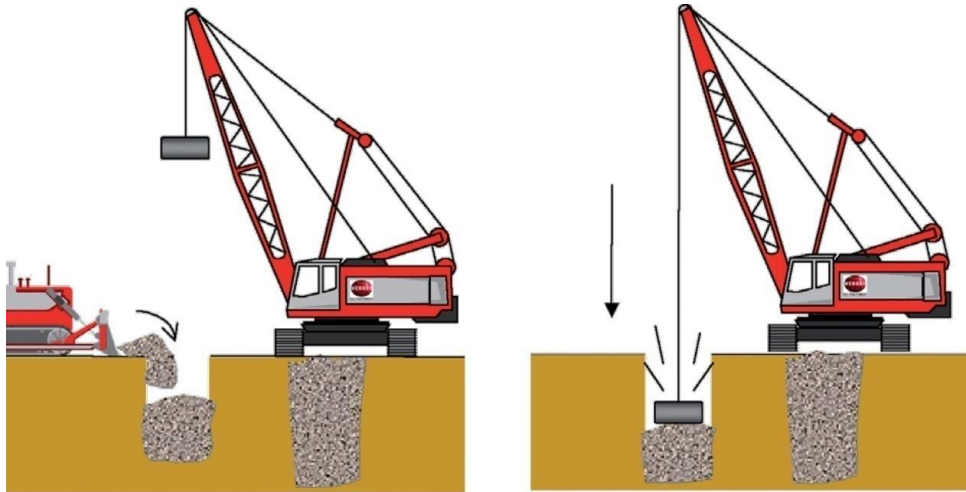


Figure I.3 : Substitution dynamique

I.4.1.4 Pré humidification :

On crée ainsi un gonflement avant construction et si une forte teneur en eau est maintenue. Le volume restera sensiblement constant par la suite. Deux techniques sont utilisées BOJANA DOLINAR, 2006, cité par AZZOUZ, 2006 :

- Simple arrosage par jet.
- Création de bassins au-dessus du sol gonflant, et c'est beaucoup plus utilisé.

I.4.2 Traitement thermique :

Une augmentation de la température peut améliorer la résistance d'une argile en réduisant la répulsion électrique entre les particules, sous l'effet de la chaleur on provoque un écoulement de l'eau interstitielle due au gradient thermique appliqué.



Figure I.4 : La congélation du sol sur chantier.

Les deux premières techniques peuvent être considérées comme coûteuses ; la dernière technique étant donc la mieux privilégiée en raison des avantages techniques, économiques, écologiques et environnementaux qu'elle procure.

La technique dernière (Traitement chimique) liée au sujet proposé dans cette étude est brièvement décrite ci-dessous. On peut simplement noter que le choix de l'une de ces techniques dépend d'un certain nombre de paramètres liés à des considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération de traitement (due à celle de la localisation), la disponibilité des produits. Utilisé ciment et/ou chaux ressources disponibles pour la mise en œuvre et des conditions environnementales plus ou moins favorables.

I.4.3 Traitement chimique :

Le traitement des sols par un liant hydraulique vise à rendre un sol, dont les caractéristiques ne seraient pas adéquates, apte à supporter une chaussée, une plateforme (parking, aire commerciale ou industrielle) ou tout simplement le passage d'engins de travaux. Ce traitement vise également à le rendre résistant aux aléas climatiques auxquels il peut être soumis. L'idée de base, éminemment économique, du traitement de sol est de considérer le sol lui-même comme un matériau. Cette technique,

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

Traitement chimique par additifs est employé surtout pour des sols contenant une certaine quantité d'argile. Ils ont pour effet de réagir avec la fraction argileuse et de modifier leur environnement chimique et sa structure minéralogique.

Le traitement chimique des sols s'effectue à l'aide d'additifs. On en distingue trois types :

- le traitement par ajout de matériaux inertes (sables, graviers), qui réduisent le pourcentage d'éléments actifs ($< 2\text{mm}$), donc l'activité des fines argileuses.
- le traitement aux liants hydrauliques (ciments et chaux) et aux liants spéciaux routiers constitués de coproduits de l'industrie : clinker Portland, laitier granulé de haut fourneau, pouzzolanes naturelles, cendres volantes, schistes calcinés, calcaire).
- le traitement par addition de solutions salines dont l'efficacité serait très influencé par la nature du fluide hydratant (NaCl , KCl , MgCl_2) et de sa concentration.

Mais l'efficacité de ces produits n'est pas encore clairement établie à l'échelle de la pratique. Parmi les produits de traitement qui viennent d'être cités, seuls donc les liants hydrauliques (ciments et chaux) présentent un intérêt particulier dans la suite de cette thèse. Les conditions de leur utilisation sont schématisées dans la figure I.5 :

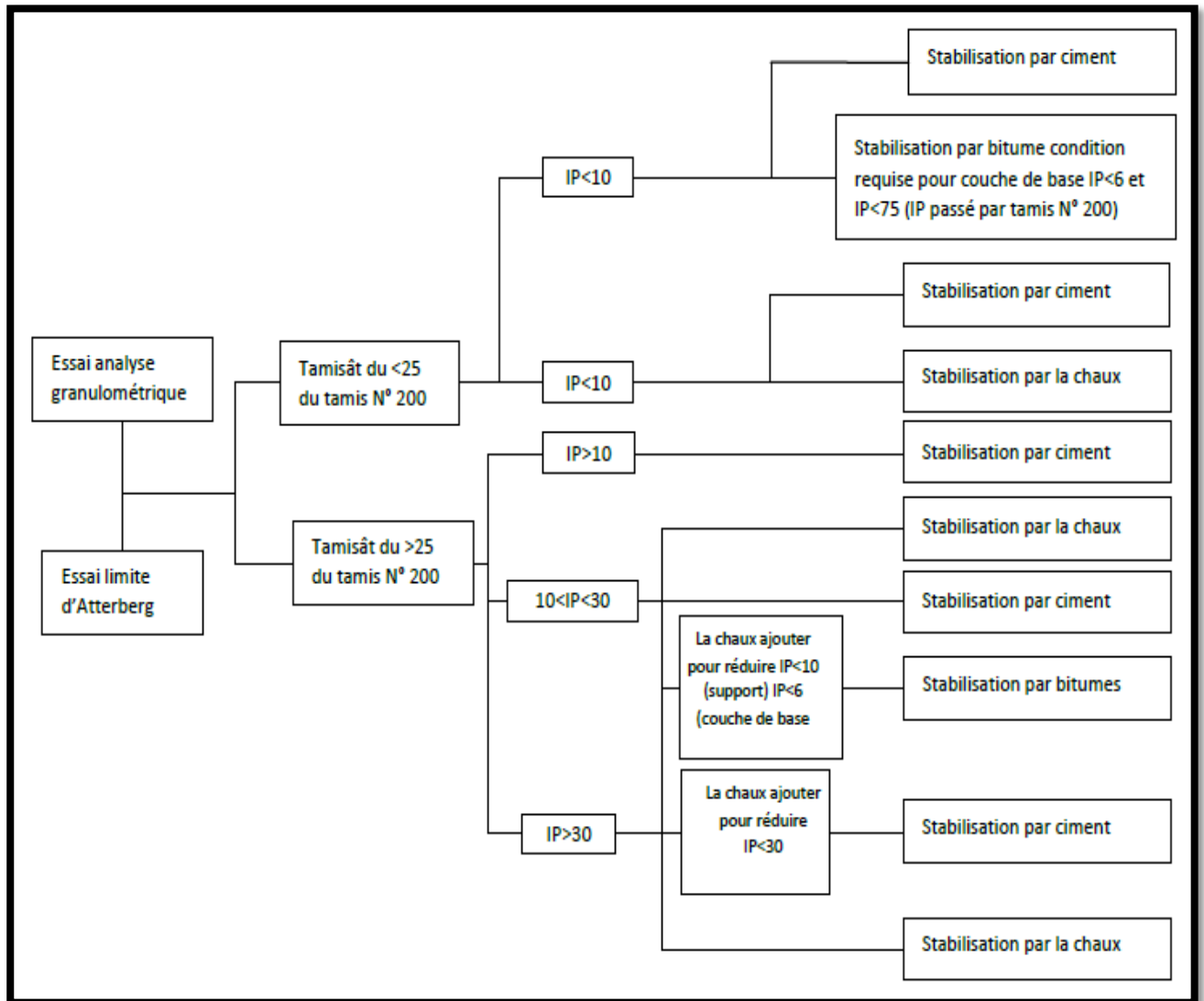


Figure I.5 : Critères d'utilisation du traitement chimique (Dept. Of the Army, 1983).

On notera simplement que le guide technique en vigueur en France pour le traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques (LCPC-SETRA, 2000a) décrit de manière suffisante les produits de traitement en question, l'action de ces produits sur les sols traités et les caractéristiques requises à leur utilisation ; ces dernières étant fixées dans les normes françaises (NF P 15-301) pour les ciments et (NF P 98-101) pour la chaux. Il en va de même pour les recommandations du Centre de Recherches Routières en Belgique (CRR, 2004) qui fixent un code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou au ciment, ainsi que pour les règles du Département des armées de l'US Air Force. Aussi, n'exposera-t-on ci-après que les propriétés significatives que procurent le traitement à la chaux ou au ciment (traitement simple) ou à leur combinaison

(traitement mixte). Le tableau I.1 recommande le choix du liant (chaux, ciment ou leur combinaison) et le dosage convenable en fonction des caractéristiques de plasticité du sol à traiter selon les recommandations du Centre de Recherches Routières en Belgique (CRR, 2004).

Tableau I.1 : Synthèse sur les dosages en stabilisants pratiqués pour le traitement des sols selon les recommandations du Centre de Recherches Routières en Belgique (CRR, 2004).

Stabilisation	Indice de plasticité							Dosage
	0	5	10	15	20	25	30 et +	
	Valeur de bleu du sol (g de bleu/kg de matériau)							
	0	10	15	22	30	40	60 et +	
Chaux								4 à 8%
Ciment								4 à 8%
Mixte (chaux puis ciment)								1 à 2% chaux 4 à 6% ciment
Composé (chaux-ciment)								5 à 8%

I.4.3.1 Traitement à la chaux :

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de la chaux pour stabiliser les argiles a connu beaucoup de succès. En effet, plusieurs études ont démontré que les propriétés mécaniques d'un sol traité à la chaux peuvent être modifiées de façon permanente (Biczysko, 1996 ; Greaves, 1996 ; Kelley, 1988). Littré (1995), rapporte qu'en général, un sol stabilisé à la chaux fournit une performance structurale équivalente à celle d'une fondation en gravier naturel ou en concassé.

Plusieurs réactions sont initiées lors de l'ajout de la chaux à un sol à granulométrie fine : l'échange cationique et la floculation modifient presque instantanément la plasticité, la maniabilité, la résistance et les propriétés de déformation sous charge d'un sol (Moore, 1987).



Figure I.6 : Traitement à la chaux.

I.4.3.2 Traitement au ciment :

L'utilisation du ciment pour la stabilisation de la terre remonte aux années 1915 dans le domaine routier. Depuis lors, la technique a largement évolué et se retrouve autant dans les travaux publics que dans le bâtiment. Mélangé à la terre, le ciment hydraté réagit de deux manières.

La première est une auto - réaction qui donne naissance à un mortier de ciment pur hydraté et à une réaction avec le squelette sableux. La deuxième est une réaction en trois étapes du ciment avec l'argile. Ces phases sont les suivantes : premièrement, des gels de ciment sont formés à la surface des argiles suite à l'hydratation du ciment qui libère de la chaux. Celle - ci est vite consommée par les argiles qui rentrent alors en détérioration. Deuxièmement, on est face à une dissociation des agrégats d'argile suite à l'évolution de l'hydratation. Les gels de ciment formés à l'étape précédente peuvent alors pénétrer à l'intérieur des argiles. La troisième phase est celle de l' « interpénétration intime des gels de ciments et des agglomérats argileux. L'hydratation persiste, mais plus lente » (Guillaud &Houben, 1995 : p. 90).



Figure I.7 : Traitement au ciment.

I.4.3.3 Traitement mixte (chaux –ciment) :

Ce type de traitement s'effectue sur les sols trop humides et plastiques .on utilise d'abord la chaux seule à des faibles teneurs puis le ciment .les deux liants ne sont pas concurrents mais complémentaires .un traitement préalable à la chaux permet l'assèchement du sol trop humide.sa floculation en présence de chaux le rend pulvérulent et faible donc plus apte à être mélangé ensuite au ciment .le ciment dont la cinétique d'hydratation est plus grand que celle de la chaux permet l'obtention des résistances mécaniques dès les premiers jours de traitement .Il n'existe pas à notre connaissance d'étude sur les mécanismes qui régissent ce traitement.

Apparemment, on peut penser que la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libérée par le ciment en solution joue le même rôle stabilisant que celui de la chaux .Les hydrates formés par la chaux libre et par la portlandite du ciment vont se cumuler à ceux provenant du ciment dissous (Geuttala ,2003).

Tableau I.2 : Les avantages et les inconvénients des différentes techniques de stabilisation.

Technique	Procédés	Avantage	inconvénient
Stabilisation mécanique	compactage	-Le compactage est le plus économique. -Réduire le potentiel expansif	Il faut une grande Quantité d'eau. (compacter au-dessus De l'optimum avec une W. élevée).
	substitution		-L'épaisseur de la Couche. -La disponibilité du matériau.
	Pré humidification		-Le temps de l'opération. -La distribution uniforme de W.
	Méthode de contrôle	Minimiser l'humidification ou dessèchement	La sensibilité à la variation de la teneur en eau.
Stabilisation thermique	Augmenter la température	Réduire la répulsion électrique entre les particules	Très couteuse
Stabilisation chimique (par ajout de matériaux)	Les sels	Augmenter la concentration ionique de l'eau libre, -Réduire le phénomène d'échange	Le choix de type de dosage et de la méthode d'addition d'un produit. (Valence et rayon du cation).
	Le ciment	-augmenter la résistance -diminuer la plasticité -réduire le potentiel de variation de volume -Augmenter la limite de retrait	-utilisation d'un dosage important.
	La chaux	-diminuer la plasticité, la densité sèche et la pression du gonflement -Augmenter la résistance et Wopm. -utilisation d'un faible dosage	- Carbonations de la chaux

I.5 Actions des liants :

L'action des liants sur le sol dépend de :

- La nature du sol.
- La nature de la composition du liant et de son dosage.
- La compacité atteinte à la mise en œuvre.
- L'âge du mélange.
- Et des sollicitations extérieures (infiltration d'eau, température, vibrations...).

Ces actions sont largement décrites dans le GTS.

I.5.1. Amélioration :

C'est une opération qui consiste à améliorer par addition d'un liant, les propriétés physiques du sol telles que la teneur en eau naturelle, la plasticité, la sensibilité à l'eau et au gel, l'aptitude au compactage.

L'amélioration d'un matériau est recherchée pour une action à court terme, afin de permettre la traficabilité et la mise en œuvre.

I.5.2 Stabilisation :

C'est une opération consistant à modifier (généralement à moyen ou long terme) les caractéristiques du sol de manière à l'amener dans un état définitif de stabilité, en particulier vis-à-vis de l'action de l'eau et du gel, et à lui donner une résistance durable pouvant, le cas échéant, être mesurée par des essais typiques de matériaux solides.

La stabilisation d'un matériau est recherchée pour une action à long terme et est intégrée dans le dimensionnement de la partie d'ouvrage considérée.

I.6 Traitement des sols par ciment :

Les mauvaises propriétés des sols ont un impact significatif sur les ouvrages géotechniques et leur longévité, ces sols peuvent être traités avec des additifs chimiques (comme les ajouts cimentaires). Ces

additifs peuvent être ajoutés à différents types de sols pour améliorer les propriétés de géo-ingénierie, l'efficacité de ces additifs dépend de la nature du sol traité et la quantité d'additif ajoutée.

Le ciment Portland est un autre produit envisageable pour la stabilisation de certaines catégories de sols utilisés pour les routes. Alors qu'il existe plusieurs similarités entre la chaux et le ciment Portland comme stabilisants, le ciment Portland fournit en plus la chaux et la source de silice.

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. A mesure que les ions de calcium sont libérés, ils deviennent disponibles pour stabiliser l'argile.

I.6.1 Le Ciment :

En fonction de leur composition, les ciments courants sont subdivisés en cinq types : CEM I (Ciments Portland) ; CEM II (Ciment Portland composé) ; CEM III (ciment de haut fourneau); CEM IV (ciment pouzzolanique) ; CEM V (ciment composé).

Depuis le 1er avril 2002, les ciments courants doivent être conformes à la norme NF EN 197-1 et font l'objet d'un double marquage CE et NF sur les sacs ou sur les documents d'accompagnement pour le vrac.

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance (32,5 – 42,5 – 52,5) définies par la Valeur minimale de la résistance du ciment à 28 jours en MPa (selon NF EN 196-1). Pour chacune de ces classes, deux désignations sont établies en fonction de leur résistance à court terme (2 jours et 7 jours) : N pour une prise normale et R pour une prise rapide.

Le ciment est généralement fabriqué en cuisant vers 1450 °C des mélanges de calcaire et d'argile. On obtient alors des nodules durs, appelés clinkers ; c'est en broyant très finement ceux-ci, additionnés d'un peu de gypse, qu'on produit le ciment Portland. D'autres types peuvent être obtenus en mélangeant ce clinker broyé avec des constituants, broyés également, qui présentent des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques : ce sont soit des laitiers de hauts fourneaux granulés, soit des cendres volantes ou encore des pouzzolanes, naturelles ou artificielles. Il existe, en outre, des ciments spéciaux, tels les alumineux ou les sur sulfatés. La principale utilisation du ciment est le béton, dont il est le composant actif, mais il entre aussi dans la composition des mortiers pour maçonneries ou pour enduits.



Figure I.1 : La Composition du Ciment.

Le ciment c'est le matériau du 20^e siècle, il n'a guère plus d'une centaine d'années. L'écossais Aspdin prit un brevet d'invention en 1824, sur la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile qu'il appela "ciment Portland" à cause de l'aspect présenter par ce liant durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de la Presqu'île de Portland. C'est le premier ciment, père d'une longue lignée. Ainsi, le XX^e siècle a ouvert la voie aux ciments artificiels qui prendront progressivement le pas sur les chaux. L'accélération sera plus manifeste à l'issue de la deuxième guerre mondiale lorsque le secteur du bâtiment produit essentiellement des logements neufs bâtis à partir d'éléments préfabriqués et, n'utilisant plus les chaux. C'est l'époque charnière où la chaux est en passe d'abandon, où son ancienneté est une marque d'archaïsme alors que les ciments améliorent les performances des liants.

Le développement n'a pu s'effectuer que grâce à l'apparition de matériels nouveaux : fours rotatifs et broyeurs à boulets en particulier. Les procédés de fabrication n'ont pas cessé de se perfectionner. Pour produire une tonne de clinker, constituant de base du ciment, il fallait en 1870 : 40 heures, actuellement, il faut environ 3 minutes. La production en Algérie s'accroît comme le montre les statistiques suivantes (source : Secrétariat d'état au plan Algérien) :

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

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

I.6.1.1 Les étapes de la fabrication du ciment :

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

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

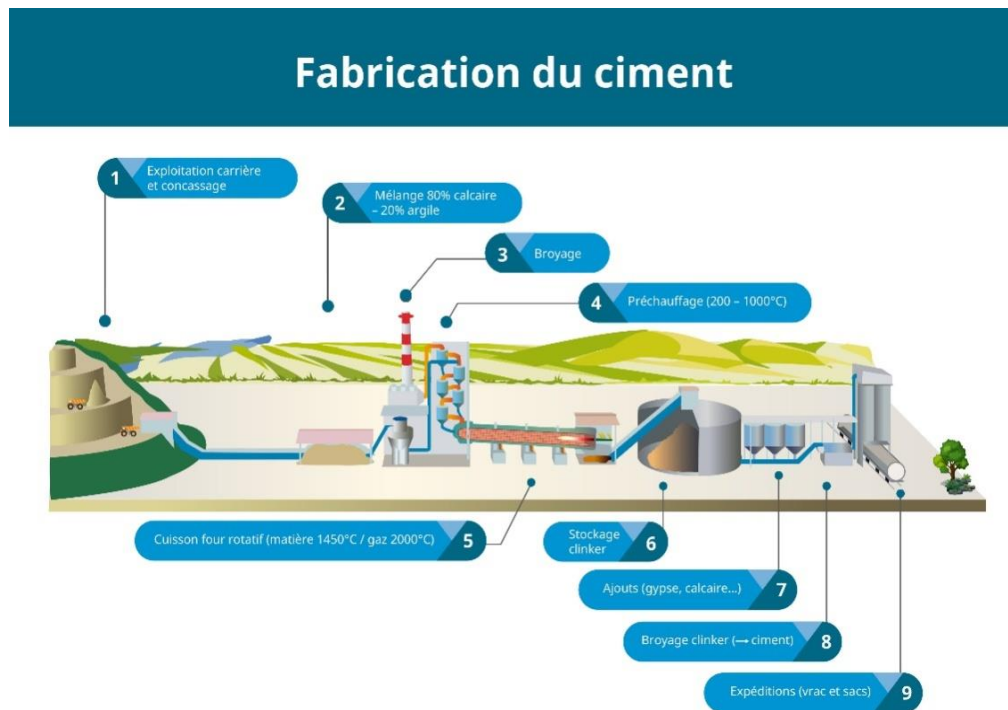


Figure I.2 : Fabrication du ciment

I.6.1.2 Types de ciment :

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

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

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

I.6.1.3 Réactions physico-chimiques du ciment :

Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire un matériau qui, finement moulu et gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réaction et de processus d'hydratation et qui après durcissement conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

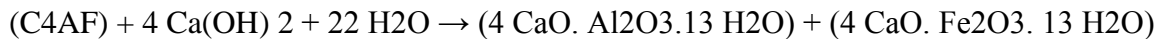
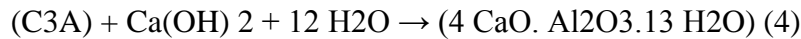
Le ciment Portland est une des nombreuses variétés de ciment.

La composition typique de son clinker est : 67% de CaO, 22% de SiO₂, 5% de Al₂O₃, 3% de Fe₂O₃ et 3% d'autres composés et il contient 4 phases majoritaires qui sont l'alite (3CaO.SiO₂ ou C3S), la bélite (2CaO.SiO₂ ou C2S), la célite qui est le mélange de l'aluminate de calcium (3CaO.Al₂O₃ ou C3A) et du Ferro aluminate de calcium (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ ou C4AF).

Plusieurs autres phases, comme les sulfates d'alcalins ou l'oxyde de calcium s'y retrouvent en très faibles quantités.

I.6.1.4 Réactions chimiques :

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



La réaction (1) est rapide ; elle est à l'origine de l'augmentation des résistances mécaniques à court terme. Le produit $(3 \text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3 \text{H}_2\text{O})$ est un silicate de calcium hydraté : c'est une tobermorite. La réaction (2), quant à elle est lente et est responsable de l'amélioration des propriétés mécaniques à long terme.

L'aluminate tricalcique s'hydrate très vite et nécessite l'addition d'un régulateur de prise de masse, le gypse $(\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O})$ qui permet la formation de fins cristaux d'étrangéité $(3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{CaSO}_4 \cdot 32 \text{H}_2\text{O})$ retardant la prise en masse du ciment.

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



Lorsque l'on mélange un sol à du ciment en présence d'eau, on assiste aux mêmes réactions chimiques comme pour les mélanges sol- ciment.

La portlandite produit lors de l'hydratation du ciment réagit avec le dioxyde de carbone de l'air et les minéraux sols pour donner respectivement de la calcite et du silicate de calcium ou aluminate de calcium hydratés.

L'échange cationique et la floculation- agglomération s'observent aussi dans les mélanges sol - ciment.

La réaction pouzzolanique impliquant les minéraux argileux n'est pas prépondérante compte tenu de la disponibilité de la portlandite.

I.6.1.5 Réactions physiques :

Différentes réactions physiques se produisent pendant la prise du ciment. Il y a d'abord la formation d'une pâte de particules solides.

A cet effet, les espaces inter particules sont interconnectés et remplis d'eau dite eau « capillaire ». Se développe ensuite à la surface des grains de ciment, un revêtement d'ettringite empêchant la prise éclair.

La réaction d'hydratation du ciment continue et après deux heures, il y a formation des cristaux fibreux qui sont des silicates de calcium hydratés (CSH). Ces composés connus sous le label de tobermorite lient les composantes du mélange argile-ciment.

Ces cristaux se développent et contribuent de façon notoire à l'amélioration des propriétés mécaniques de ces mélanges.

I.6.2 Influences des liants hydrauliques (ciment) sur les propriétés géotechniques et mécaniques :

Le ciment étant un des liants hydrauliques contribuent en général à l'amélioration des propriétés géotechniques et mécaniques des poudres minérales.

Le ciment contribue à l'amélioration desdites propriétés par un mécanisme de jonction des particules du sol par les silicates de calcium hydratés produits au cours de l'hydratation du ciment d'une part, et d'autre part, par la réaction pouzzolanique entre l'hydroxyde de calcium produit et les particules argileuses du sol.

L'ampleur des effets des liants dépend surtout de la granulométrie et de la minéralogie de la matière première traitée.

I.6.2.1 Sur les propriétés géotechniques :

La granulométrie :

L'ajout du ciment à un sol argileux ou latéritique crée une agglomération de ses particules, contribuant à une augmentation de leurs tailles pour rejoindre celles des limons et du sable et par conséquent fait diminuer la fraction argileuse. Ce phénomène est dû aux réactions d'échange cationique responsable de la floculation- agglomération des particules argileuses et aussi aux réactions pouzzolaniques impliquant les minéraux argileux. La diminution de la fraction argileuse pour une même quantité de ciment est plus importante pour la chaux par rapport au ciment.

La consistance du sol :

La consistance d'un sol est définie par les limites d'Atterberg et par la valeur au bleu de méthylène. La consistance d'un sol est immédiatement modifiée après l'ajout de ciment. L'effet de la chaux sur les sols argileux ou latéritiques est plus ressenti sur les limites d'Atterberg que ne l'est celui du ciment. Cette modification immédiate est due aux réactions d'échange cationique responsable de la floculation-agglomération des particules argileuses.

L'ajout de ciment à un sol argileux s'accompagne d'une diminution de la limite de liquidité (wL), d'une augmentation de la limite de plasticité (WP) et par conséquent d'une diminution de l'indice de plasticité (IP).

Par contre pour un sol limoneux, on observe les phénomènes contraires pour la limite de liquidité et celle de plasticité.

Il a été observé une augmentation des limites de liquidité et de plasticité dans le cas du traitement à ciment des argiles saturées en calcium. La teneur en eau optimale et la densité sèche maximale

L'ajout de ciment à un sol argileux ou latéritique fait augmenter la teneur en eau optimale et par conséquence la densité sèche maximale diminue.

L'augmentation de la teneur en eau optimale est due à la forte demande en eau après l'ajout de ces liants en vue de dissocier le Ca(OH)_2 pour produire des ions Ca^{2+} nécessaires pour les réactions

d'échange cationique et pouzzolanique. La diminution de la densité sèche maximale d'un sol par l'ajout de ciment s'explique de deux manières :

(i) l'ajout de ciment à un sol provoque l'agglomération des particules du sol qui occupent alors de grands volumes,

(ii) La densité absolue de ciment est généralement inférieure à celle des sols.

L'effet de la chaux sur ces paramètres est plus ressenti par rapport à celui du ciment.

I.6.2.2 Sur les propriétés mécaniques :

L'ajout de ciment à un sol argileux ou latéritique améliore les performances mécaniques dont principalement la portance CBR, les résistances à la compression, à la flexion et à la traction par fendage (Essai Brésilien) de ce sol.

L'amélioration de ces propriétés mécaniques est due aux réactions d'hydratation du ciment produisant des CSH qui lient les particules du sol entre elles d'une part, et, d'autre part, par les réactions pouzzolaniques entre les minéraux argileux et le Ca(OH)_2 . Ces paramètres s'améliorent avec le temps compte tenu de la consolidation du CSH avec le temps.

La portance CBR à trois jours de cure à l'air puis quatre jours d'immersion est en général supérieure à celle après quatre jours d'immersion directe.

I.6.3 Mécanisme de stabilisation par l'ajout de ciment :

Les quatre mécanismes contribuant à la stabilisation au ciment des sols argileux sont résumés et classés selon leur importance comme suit :

- **hydratation par ciment** : les fortes interactions se développent entre les particules de sol. Le plus haut squelette continu des formes matérielles dure et fortes et enferme une matrice de sol inchangé, renforçant le matériel traité et en remplissant des vides.
- **Echange cationique** : l'échange cationique change la charge électrique, réduit la plasticité et a pour résultat la floculation et l'agrégation des particules de sol.

- **Carbonatation** : la chaux libre produite pendant l'hydratation du ciment réagit avec de l'anhydride carbonique en air aux agents de cimentages de forme.
- **Réaction pouzzolanique**: la chaux libre libérée pendant l'hydratation réagit avec la silice ou l'alumine des particules d'argiles en présence de l'humidité pour former les agents de cimentation.

I.6.4 Avantages de la technique :

Le traitement des sols en place par ciment est une technique qui offre trois types d'avantages : techniques, économiques, écologiques et environnementaux :

- **Avantages techniques** : Le traitement des sols en place par ciment permet la réalisation en remblais et en couches de forme, d'une couche traitée homogène, durable et stable, présentant des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'une grave-ciment ou grave hydraulique. En outre, cette technique assure une bonne répartition des charges sur le support, grâce à la rigidité de la nouvelle structure. Cette technique assure un bon comportement par temps chaud sans déformation, niorniérage et un bon comportement vis-à-vis des cycles de gel-dégel, grâce à la rigidité du matériau et à l'effet de dalle induit. Enfin, le traitement des sols en place est une technique possédant une facilité d'adaptation aux contraintes d'exploitation.
- **Avantages économiques** : Le traitement des sols en place par ciment est une technique de traitement à froid, donc utilisant peu d'énergie. La réutilisation des matériaux en place est un facteur d'économie important puisqu'il réduit au minimum les déblais issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût de leur transport. L'absence de transport de granulats ou des déblais en décharge contribue à la préservation du réseau routier situé au voisinage du chantier. Enfin, le traitement des sols en place est une technique très économique, notamment du fait de la durée plus courte des travaux par rapport à une solution avec décaissement.
- **Avantages écologiques** : Le travail à froid réduit sensiblement la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère. En outre, cette technique permet une importante économie d'énergie globale, par la réduction des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge et donc une diminution des impacts indirects, des gênes à l'utilisateur et aux riverains et une réduction de la fatigue du réseau routier adjacent au chantier. La réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières, ballastières), ressources naturelles non renouvelables. Ce qui contribue à préserver l'environnement.

Chapitre II

**Programme expérimental et
procédures d'essais**

Chapitre II : Programme expérimental et procédures d'essais

II.1 Localisation générale :

Le site de Chaaba el Hamra est situé au Nord-est de la commune de M'Sila environ 15 km de la ville de M'Sila.



Figure II.1 : Situation géographique du site de Chaaba el Hamra

II.2 Liste des essais :

La liste des essais d'identification et de caractérisation et les normes en vigueur Correspondantes sont données ci-après.

Le programme expérimental a été réalisé au sein du Laboratoire de LCTP M'sila. Ce programme est réparti en deux parties :

II.2.1 Essais d'identification :

- La granulométrie.
- Les limites de consistance.
- L'essai bleu de méthylène.
- Analyse chimique.

II.2.1.2 Essais de caractérisation

- Proctor normal.
- Essai C.B.R immédiat et imbibé.

II.3 Description des essais :

II.3.1 Essais d'identification :

II.3.1.1 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions de grains de différentes tailles d'un matériau. Elle s'effectue :

- par tamisage (tamis à maille carrée) pour des grains de diamètre supérieur à 80 μm ,
- par sédimentométrie pour les grains les plus fins. Elle 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. (Loi de Stokes). La mesure de la densité de la suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion de grains de chaque diamètre.

Les analyses granulométriques par tamisage et par sédimentométrie ont été réalisées selon respectivement les normes **NF P18-560** et **NF P94-057**.



Figure II.2 : Analyse granulométrique par tamisage.



Figure II.3 : Analyse granulométrique par sédimentométrie.

II.3.1.2 Les limite d'Atterberg :

Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre :

- le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique : limite de liquidité(Wl),
- le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limite de plasticité(WP).

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considérée, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute. La différence $I_p = Wl - WP$ qui définit l'étendue du domaine plastique, est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité. L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon.

La détermination des limites d'Atterberg a été réalisée selon la norme **NF P 94-051**.



Figure II.4 : Appareillage d'essai limite d'Atterberg.

II.3.1.3 L'essai au bleu de méthylène :

Il permet de mesurer la capacité d'adsorption ionique des sols et granulats à l'aide du bleu de méthylène. Il a pour but de déterminer la quantité et l'activité de la fraction argileuse d'un sol d'une façon globale. Le résultat de l'essai dépend directement à la fois de la quantité et de la nature minéralogique de cette fraction. Le principe de l'essai consiste à introduire des quantités croissantes de bleu de méthylène jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées. Il apparaît alors un début d'excès qui marque la fin de l'essai et que l'on détecte par le test dit à la tâche. Ce test consiste à former

avec une goutte de la suspension déposée sur du papier filtre normalisé, une tâche qui est un dépôt de sol coloré en bleu soutenu, entourée d'une zone humide incolore. L'excès de bleu se traduit par l'apparition dans cette dernière zone d'une auréole bleu clair. On dira alors que le test est positif.

L'essai a été réalisé selon la norme **NF P 94-068**.



Figure II.5 : Appareillage et Echantillonnages d'essai VBS.

II.3.1.4 Analyse chimique :

Le but de cet essai est de déterminer la nature chimique des échantillons choisis. Cette étape étant importante dans l'identification des matériaux locaux utilisés en construction surtout routière.

II.3.2 Essais de caractérisation :

II.3.2.1 L'essai Proctor :

L'essai Proctor a pour objectif la détermination de la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale pour un compactage normalisé d'intensité donnée. Il consiste à compacter de façon identique des échantillons d'un même sol avec des teneurs en eau différentes. On constate que la densité sèche γ_d varie et passe par un maximum pour une teneur en eau déterminée dite optimale (w_{opt}).

Il existe deux types d'essais Proctor. Selon l'intensité de compactage utilisé, l'essai sera appelé essai Proctor normal ou essai Proctor modifié.

L'essai choisi pour notre étude est l'essai Proctor modifié car il est recommandé pour la construction routière. L'essai a été réalisé selon la norme **NF P 94-093**.



Figure II.6 : Appareillage et Echantillonnages d'essai Proctor.

II.3.2.2 Essai CBR immédiat et imbibé :

Cet essai est un paramètre incontournable pour le dimensionnement mécanique des chaussées.

L'indice CBR est une grandeur utilisée pour caractériser un sol, en tant que support ou constituant d'une structure de chaussée. Le principe général de l'essai servant à déterminer l'indice de portance CBR, consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique de 19,35 cm² de section pour le faire pénétrer à la vitesse de 1,27 mm/mn dans une éprouvette de sol.

Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué les enfoncements de 2,5 et 5 mm sont alors rapportés, aux valeurs de 13,35 et 20 kN, qui sont respectivement les forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements.

$$CBR_1 = \frac{F_1}{13.35} \times 100$$

$$CBR_2 = \frac{F_2}{19.93} \times 100$$

F1 et F2 correspondent aux forces mesurées pendant l'essai, elles sont exprimées en kN.

L'indice portant CBR est alors défini conventionnellement par la plus grande valeur, des rapports ainsi calculés. L'essai a été réalisé selon la norme **NF P 94-078**.



Figure II.7 : Appareille CBR.

Chapitre III

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

Chapitre III : Présentation et analyse des résultats d'essais

III.1 Introduction :

Outre les essais d'identification, le programme expérimental exécuté a comporté des essais de compactage type Proctor normal et des essais C.B.R pour l'identification des paramètres des sols étudiés. Ce programme expérimental a évolué au fur et à mesure que des indications supplémentaires sur telle ou telle propriété mécanique des sols et son influence sur l'interprétation des résultats d'essais ont été jugé nécessaires non seulement en fonction de la qualité des informations déjà obtenues, mais en fonction aussi de leur qualité. Les procédures expérimentales suivies dans chaque type d'essai ont été conformes autant que possible aux méthodes d'essais en vigueur en Algérie.

III.2 Résultats Des Essais :

III.3.1 Les essais d'identification :

III.3.1.1 Analyse granulométrique :

a) Analyse granulométrique par tamisage :

Huit (8) essais ont été réalisés pour déterminer la distribution granulométrique et sont présentés dans Les tableaux ci-dessous :

Tableau III.1 : Granulométrie par tamisage.

Tamis	Refus partiel	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisât-en
(mm)	(g)	(g)	(%)	(%)
5	4.97	4.97	0.83	99.17
2.5	5.85	10.82	1.80	98.20
1.25	9.83	20.65	3.44	96.56
0.63	14.73	35.38	5.90	94.10
0.315	18.11	53.49	8.92	91.08
0.16	33.15	86.64	14.44	85.56
0.008	57.45	144.09	24.02	75.98

Tableau III.2 : Récapitulatif des résultats des essais de l'analyse granulométrique tamisage.

Tamis (mm)	Tamisât (%)								
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 7	Essai 8	Moye
5	98,83	99,21	98,06	99,25	99,17	98,33	99,22	99,66	98,97
2,5	97,87	98,27	97,11	98,24	98,2	97,21	97,98	98,62	97,94
1,25	96,42	96,76	95,44	96,75	96,56	95,42	96,31	97,27	96,37
0,63	93,85	94,72	93,15	94,76	94,1	94,56	93,5	95,45	94,26
0,315	90,57	91,91	90,17	92,32	91,08	90,35	89,82	92,67	91,11
0,16	85,23	86,55	84,74	87,44	85,56	85,28	85,11	87,35	85,91
0,008	75,85	77,28	75,42	78,17	75,98	75,6	73,06	76,81	76,02

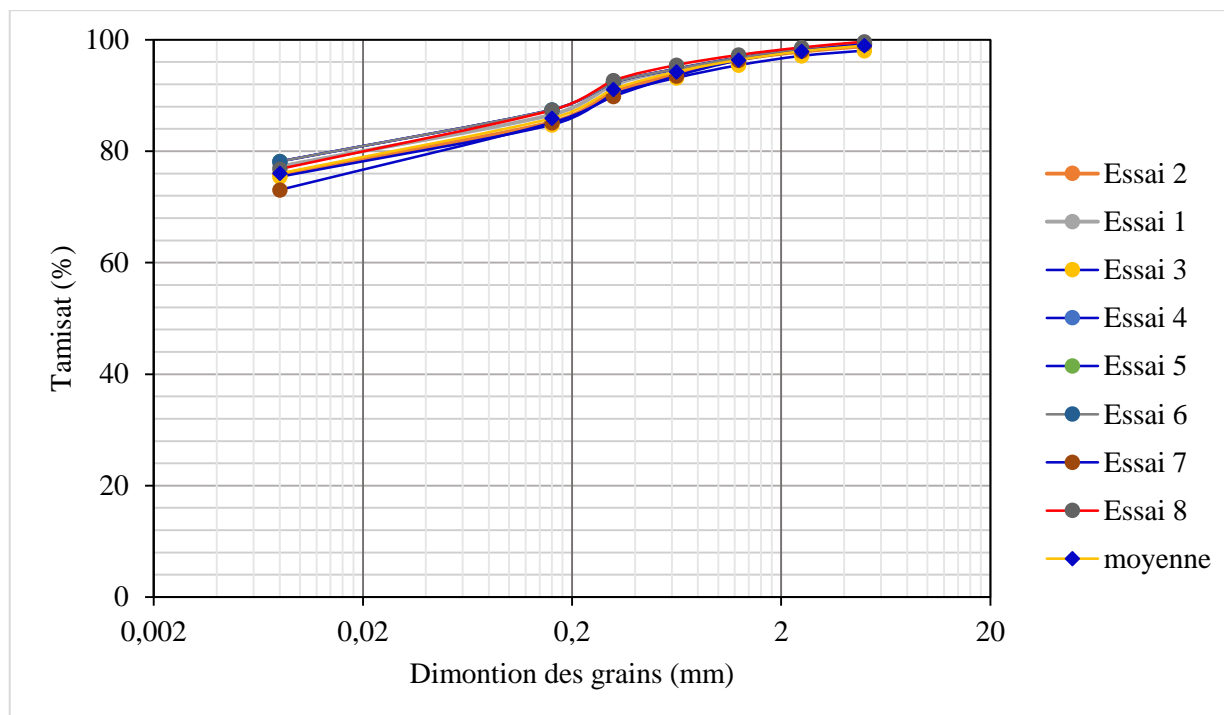


Figure III.1 : Présente les courbes des essais d'analyse granulométrique par tamisage.

b) Analyse granulométrique par sédimentométrie :

Tableau III.3 : Résultats de l'analyse sédiment métrique.

Passant a 80u=75.42						
Temps de lecture (minutes)	Lecture densimètres m- met du ménisque R	Température C°	Correction temps	Lecture corrigé	Diamètre(u)	Tamisât par Rapport à l'échantillon totalP.p.
0.5	25	17	-0.500	24.5	80	75.98
1	25	17	-0.500	24.5	75	75.98
2	22	17	-0.500	21.5	55	66.68
5	21	17	-0.500	20.5	38	63.58
10	19	17	-0.500	18.5	25	57.37
20	18	17	-0.500	17.5	17	54.27
40	16	17	-0.500	15.5	12	48.07
80	14	17	-0.500	13.5	8	41.87
240	6	17.5	-0.425	5.575	5	17.24
1440	1	17.5	-0.425	0.575	2	01.78

Tableau III.4 : La moyenne des huit essais de sédimentométrie.

Tamis		Tamisât (%)								
(mm)	µm	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 7	Essai 8	Moye
0.08	80	75,85	77,28	75,42	78,17	75,98	75,6	73,06	76,81	76.02
0.075	75	71,93	77,28	71,51	74,51	75,98	72,3	70,06	73,29	73.36
0.055	55	68,01	73,38	67,6	70,85	66,68	69	61,06	73,29	68.73
0.038	38	64,18	71,43	63,69	67,19	63,58	69	55,06	68,01	65.27
0.025	25	56,4	71,43	59,84	63,58	57,37	65,74	52,07	66,29	62.72
0.017	17	52,51	65,64	55,94	59,93	54,27	62,45	49,07	62,79	57.32
0.012	12	48,62	57,87	44,37	56,36	48,07	52,69	43,07	54,02	50.63
0.008	8	17,5	46,23	40,49	46,36	41,87	39,59	40,07	17,46	32.45
0.005	5	1,94	19,06	28,84	25,45	17,24	19,95	16,08	6,98	21.94
0.002	2	0	0	1,67	0	1,78	1,95	1,29	1,44	1.062

Tableau III.5 : Récapitulatif des résultats des essais de l'analyse granulométrique (Tamisage et sédimentométrie).

Tamis (mm)	Tamisât (%)								
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 7	Essai 8	Moye
5	98,83	99,21	98,06	99,25	99,17	98,33	99,22	99,66	98,97
2,5	97,87	98,27	97,11	98,24	98,2	97,21	97,98	98,62	97,94
1,25	96,42	96,76	95,44	96,75	96,56	95,42	96,31	97,27	96,37
0,63	93,85	94,72	93,15	94,76	94,1	94,56	93,5	95,45	94,26
0,315	90,57	91,91	90,17	92,32	91,08	90,35	89,82	92,67	91,11
0,16	85,23	86,55	84,74	87,44	85,56	85,28	85,11	87,35	85,91
0,08	75,85	77,28	75,42	78,17	75,98	75,6	73,06	76,81	76,02
0.075	71,93	77,28	71,51	74,51	75,98	72,3	70,06	73,29	73.36
0.055	68,01	73,38	67,6	70,85	66,68	69	61,06	73,29	68.73
0.038	64,18	71,43	63,69	67,19	63,58	69	55,06	68,01	65.27
0.025	56,4	71,43	59,84	63,58	57,37	65,74	52,07	66,29	62.72
0.017	52,51	65,64	55,94	59,93	54,27	62,45	49,07	62,79	57.32
0.012	48,62	57,87	44,37	56,36	48,07	52,69	43,07	54,02	50.63
0.008	17,5	46,23	40,49	46,36	41,87	39,59	40,07	17,46	32.45
0.005	1,94	19,06	28,84	25,45	17,24	19,95	16,08	6,98	21.94
0.002	0	0	1,67	0	1,78	1,95	1,29	1,44	1.062

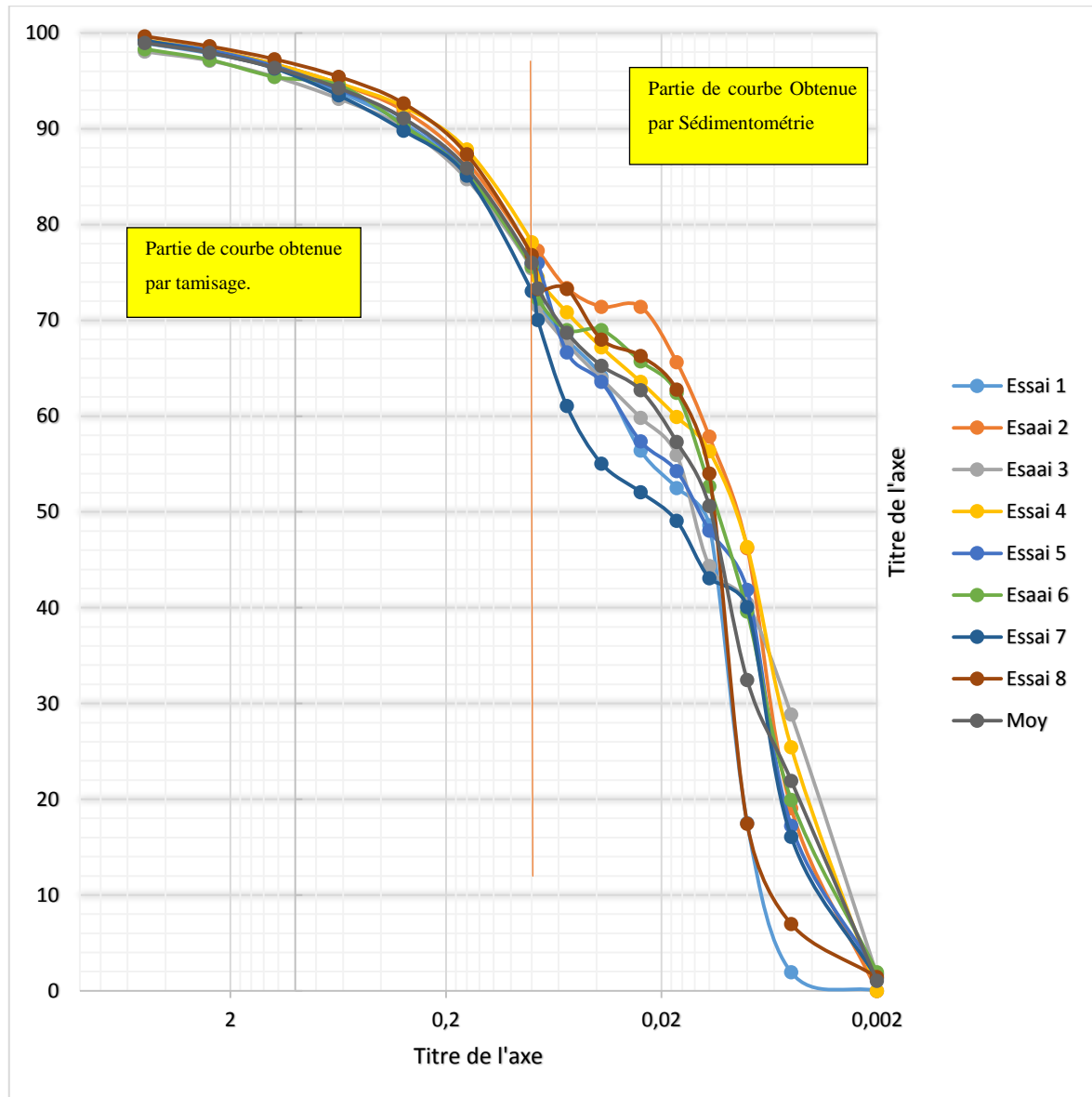


Figure III.2 : Courbe d'analyse granulométrique (tamisage et sédimentométrie).

III.3.1.2 Limites d'Atterberg :

- **Limite liquidité :**

Tableau III.6 : Les résultats de limite de liquidité sol naturel.

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Nombre de coups	17		24		29		34	
Tare N	E	A	T10	35	11	74	9	6
Masse de tare ; Mt(g)	4.83	3.62	3.79	3.49	3.98	3.61	3.74	4.01
Masse (du sol humide + tare) (Mh +Mt)	12.21	11.03	10.53	11.1	12.66	12	9.95	10.17
Masse (du sol sec + tare) (Md +Mt)	10	8.82	8.58	8.9	10.24	9.64	8.33	8.5
Masse d'eau; Mw (g)	2.21	2.21	1.95	2.2	2.42	2.36	1.62	1.67
Masse du sol sec ; Md (g)	5.17	5.2	4.79	5.41	6.26	6.03	4.59	4.49
Teneur en eau ; W(%); Mw/Md	42.75	42.50	40.71	40.67	38.66	39.14	35.29	37.19
M moy(%)	42.62		40.69		38.90		36.24	
WI	41.64							

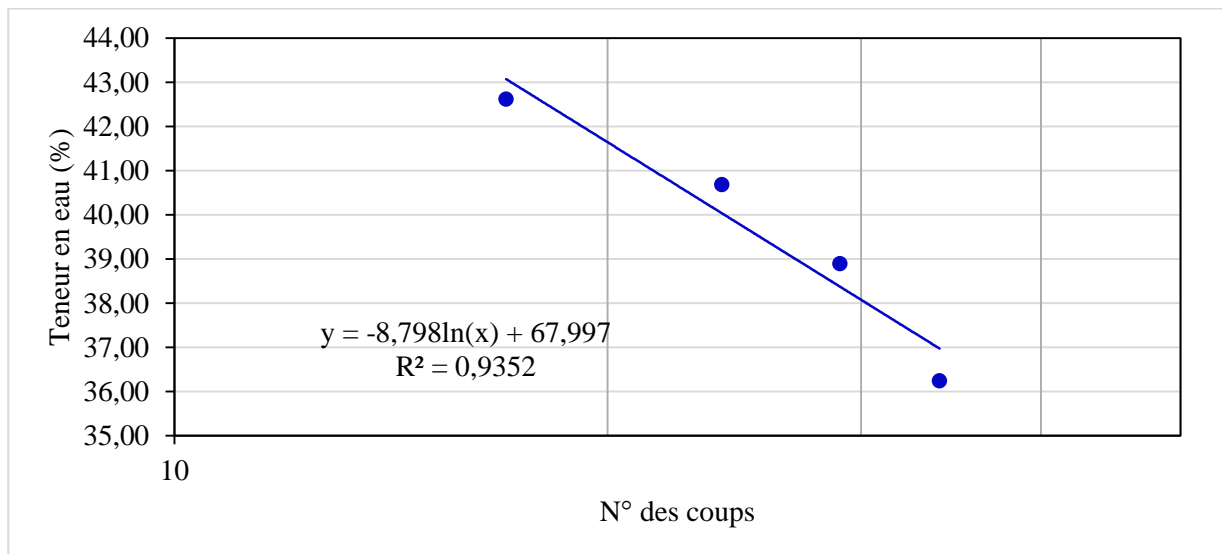


Figure III.3 : La courbe de limite de liquidité du sol naturel.

- **Limite de plasticité :**

Tableau III.7 : Limite de plasticité sol naturel.

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Tare N	17	11	9	26	8	42	M23	79
Masse de tare ; Mt(g)	4	4.01	3.98	3.63	4.15	3.73	3.83	4.08
Masse (du sol humide +tare) (Mh +Mt)	6.88	6.55	5.11	5.07	5.7	5.04	5.68	5.41
Masse (du sol sec +tare) (Md +Mt)	6.35	6.07	4.89	4.82	5.41	4.81	5.35	5.17
Masse d'eau; Mw (g)	0.53	0.48	0.22	0.25	0.29	0.23	0.33	0.24
Masse du sol sec ; Md (g)	2.35	2.06	0.91	1.19	1.26	1.08	1.52	1.09
Teneur en eau; W (%); Mw/Md	22.55	23.30	24.18	21.01	23.02	21.30	21.71	22.02
M moy (%)	22.93		22.59		22.16		21.86	
Wp	22.38							

Indice de plasticité : $IP = WL - WP = 19.26$

Tableau III.8 : Résultats de 3 essais limite d'Atterberg sol naturel.

Essai N°	WL(%)	Wp (%)	IP(%)
1	42.20	21.01	21.19
2	41.85	21.63	20.22
3	41.64	22.38	19.26
4	42.90	24.64	18.26
La Moyenne	42.14	22.41	19.73

III.3.1.2.1 Sol traité :

a. ciment Chamil :

Tableau III.9 : Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg Traité ciment (Chamil).

Dosage en ciment	0%	2%	4%	6%	8%	10%
Limite de liquidités (WL) %	41.64	39.45	38.51	36.66	35.44	34.35
Limite de plasticité (WP) %	22.38	24.60	26.32	27.17	28.08	29.12
Indice de plasticité IP	19.26	14.85	12.20	9.48	7.36	5.23

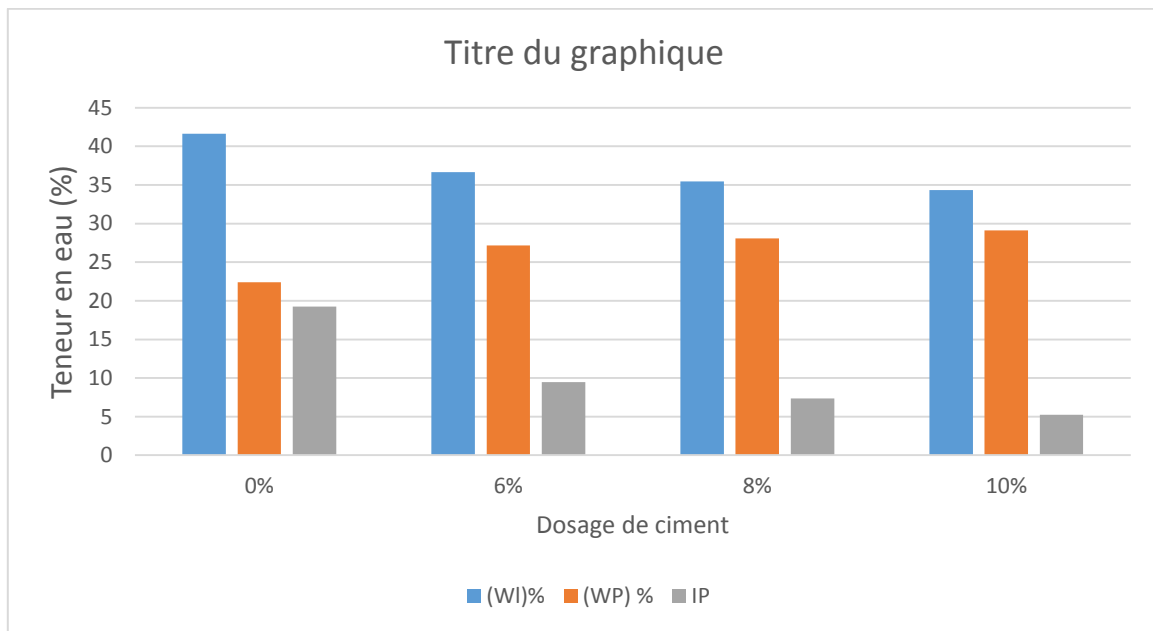


Figure III.4 : Histogramme de Limite Atterberg ciment (Chamil).

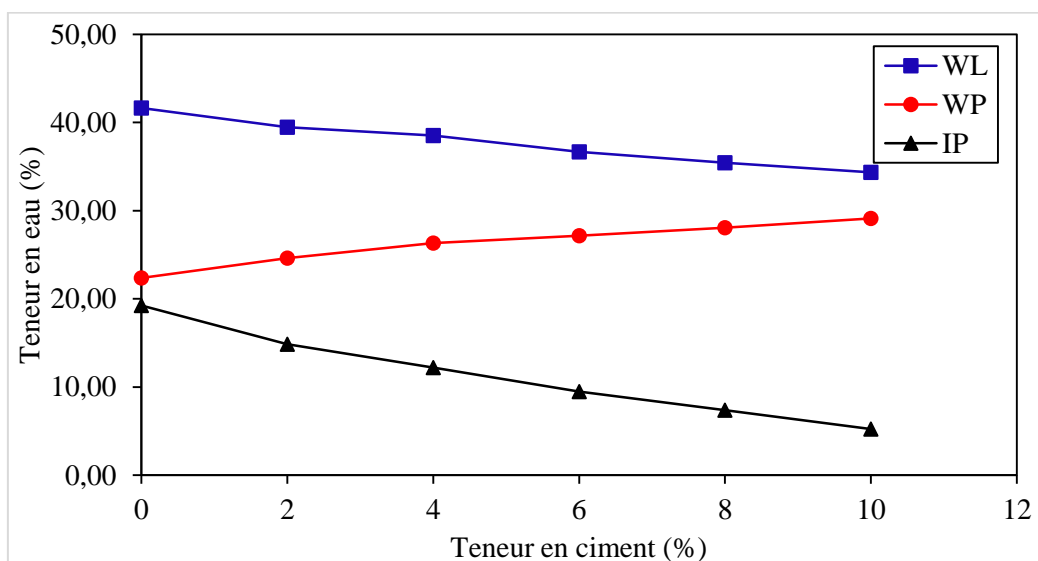


Figure III.5 : La courbe de limite Atterberg ciment (Chamil).

b. ciment Matine :

Tableau III.10 : Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg Traité ciment Matine.

Dosage en ciment	0%	6%	8%	10%
Limite de liquidités (Wl)%	41.64	37.02	33.87	31.82
Limite de plasticité (Wp) %	22.38	25.89	26.06	26.89
Indice de plasticité IP	19.26	11.14	7.81	4.94

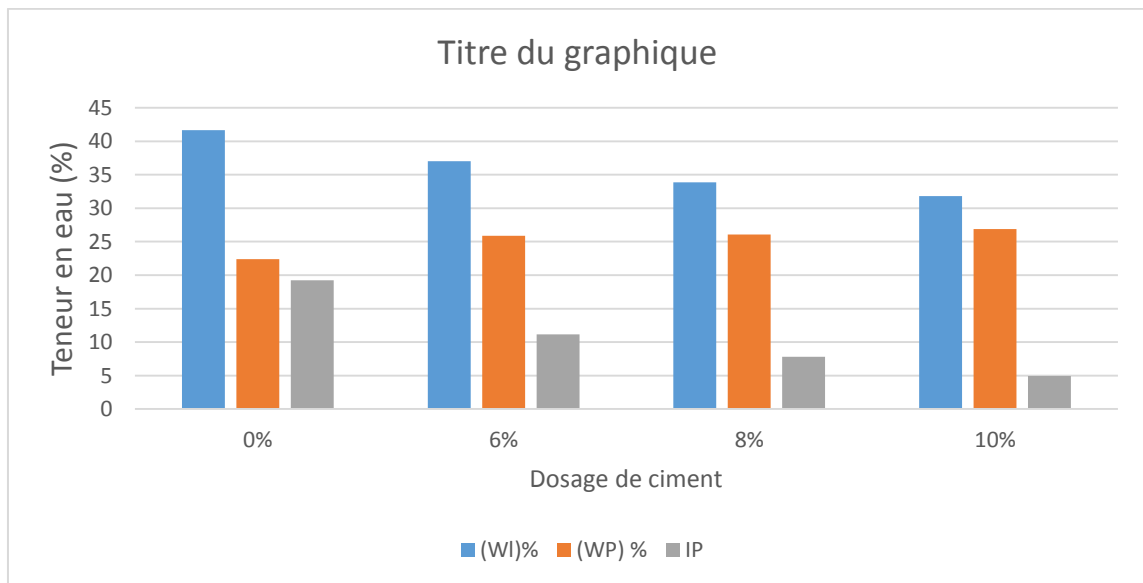


Figure III.6 : Histogramme de Limite Atterberg ciment (Matine).

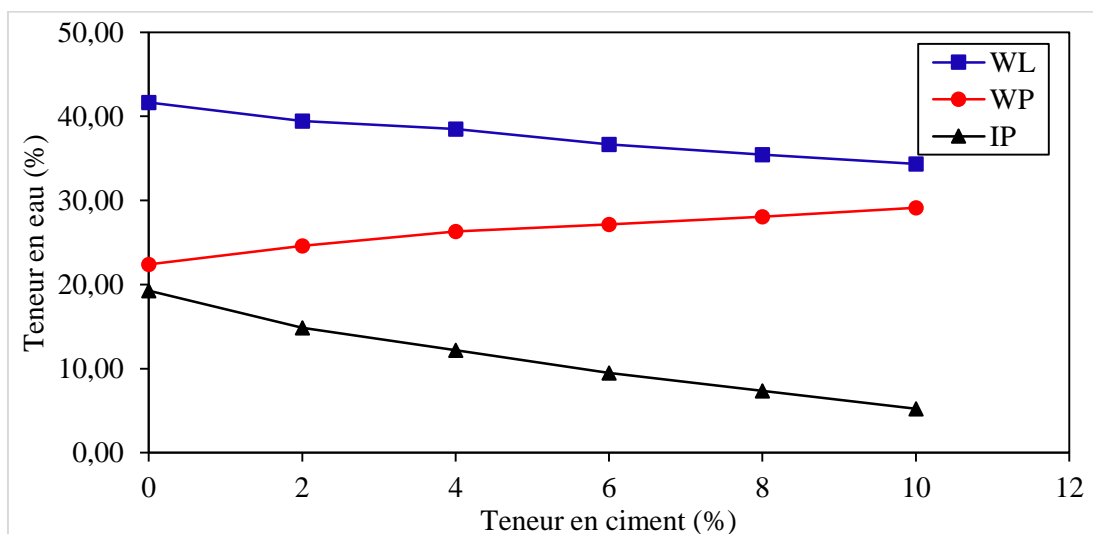


Figure III.7 : La courbe de limite Atterberg ciment (Matine).

III.3.1.2.2 Interprétation des résultats :

On remarque que la limite de liquidité diminue avec l'augmentation des teneurs en ciment, par contre la limite de plasticité augmente avec l'augmentation des teneurs en ciment et cas appliquera dans les autres classes de ciment (Chamil, Matine).

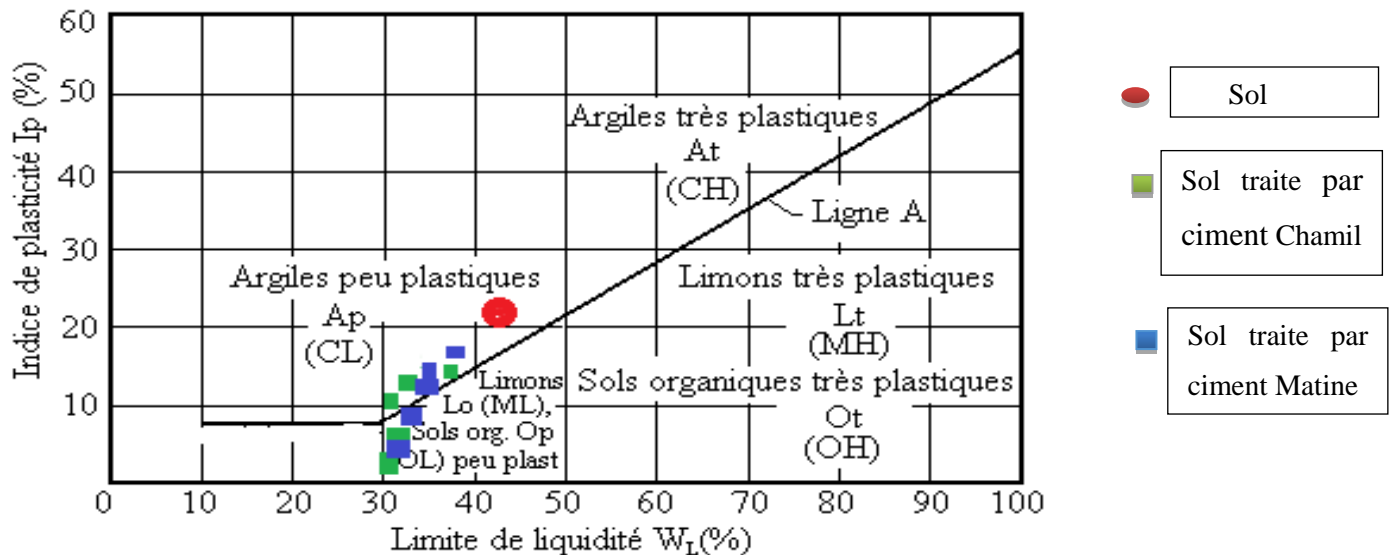


Figure III.8 : Diagramme de Casagrande.

III.3.1.3 Essai au bleu de méthylène:

On a réalisé huit(8) essais au bleu de méthylène, les résultats obtenus sont représentés dans le tableau :

Tableau III.11 : résultats de l'essai au bleu.

	Masse de sol	Volume de la Solution (cm ³)	VBS (cm ³ /g)	Moyenne
Essai 1	30g	115	3.83	3.52
Essai 2	30g	105	3.5	
Essai 3	30g	115	3.83	
Essai 4	30g	105	3.5	
Essai 5	30g	90	3	
Essai 6	30g	115	3.83	
Essai 7	30g	85	2.83	
Essai 8	30g	115	3.83	

III.3.1.3.1 Sol traité :

a. Ciment Chamil :

Tableau III.12 : présente la récapitulation des résultats des séries d'essais de bleu de méthylène : Ciment (Chamil).

VBS	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Moyenne
0%	3.83	3.5	3	3.33	3.42
6%	1.66	1.66	1.5	1.83	1.66
8%	1.16	1.16	1.33	1.5	1.29
10%	1	1	1.16	0.83	1

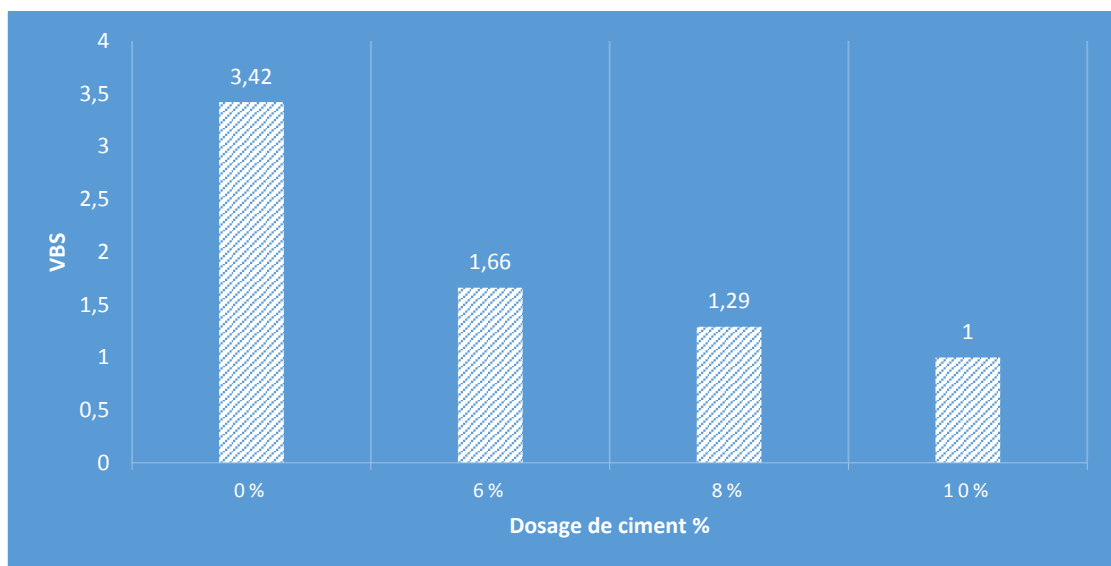


Figure III.9 : Histogramme de VBS en fonction des différents teneurs en ciment (Chamil).

b. Ciment Matine :

Tableau III.13 : présente la récapitulation des résultats des séries d'essais de bleu de méthylène : Ciment (Matine).

VBS	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Moyenne
0%	3.83	3.83	3	3.33	3.42
6%	1.66	1.66	1.5	1.33	1.54
8%	1.16	1.16	1.33	1	1.17
10%	0.66	0.83	1	1.16	0.91

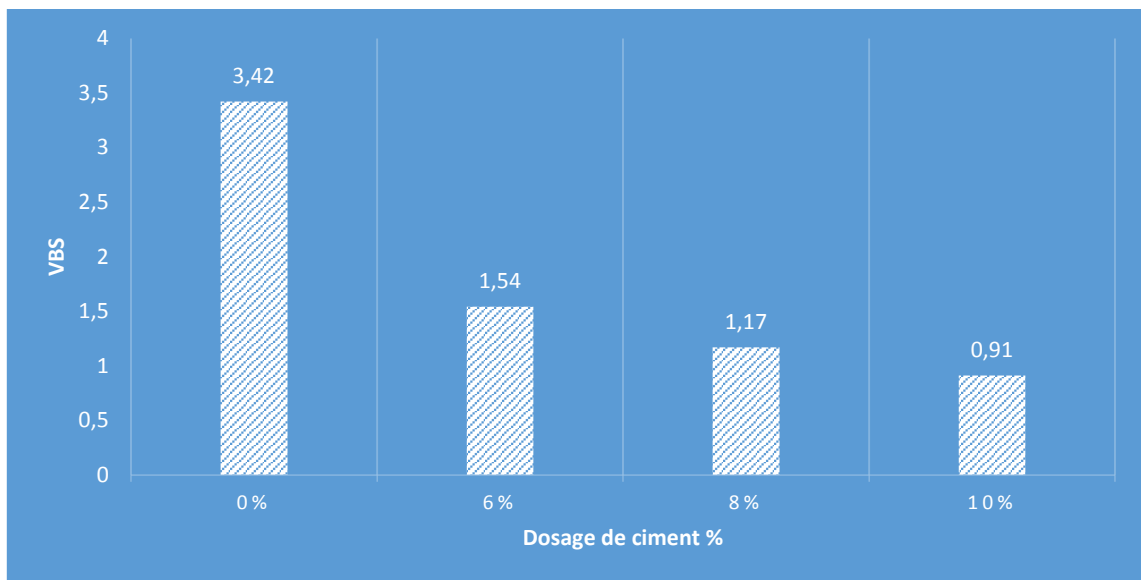


Figure III.10 : Histogramme de VBS en fonction des différents teneurs en ciment (Matine).

III.3.1.3.2 Interprétation des résultats :

La valeur du bleu égale 3.52 ($2,5 < V_B < 6$) Notre sol appartient donc à la classe des

«Sols limoneux argileux»

Tableau III.14 : Classification des sols.

NF P11-300

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

III.3.1.4 Analyse chimique :

Tableau III.15 : L'analyse chimique par XRF.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
26,58	6,24	2,31	32,38	2,60	4,04	1,27	0,03

Tableau III.16 : L'analyse par DRX.

Calcite	Dolomite	Quartz	Illite	Kaolinite	Chlorite	Pyrophyllite	Albite	Microcline	Diaspore	Topaz	Fluorite
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
57,43	1,87	15,91	7,33	3,51	1,82	5,99	0,08	4,94	0,24	0,37	0,5

III.3.2 Les essais mécaniques :

III.3.2.1. Essais Proctor Normal :

Tableau III.17 : Résultats d'essai de Proctor Normale sol naturel.

Sol naturel					
Teneur en eau approximative (%)	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm ³)	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3395,30	3482,30	3633,10	3687,40	3677,20
Masse du sol humide (g)	1685,40	1772,40	1923,20	1977,50	1967,30
Masse volumique humide (g/cm ³)	1,79	1,88	2,04	2,09	2,08
Masse de la tare (g)	145,70	147,40	143,80	147,10	148,10
Masse sol humide + tare(g)	389,70	464,40	526,80	288,38	653,40
Masse sol sec + tare (g)	369,00	432,50	481,50	270,00	579,30
Masse d'eau (g)	20,70	31,90	45,30	18,38	74,10
Masse du sol sec (g)	223,30	285,10	337,70	122,90	431,20
Teneur en eau W(%)	9,27	11,19	13,41	14,95	17,18
Masse volumique sèche (g/cm ³); $\rho_d = \rho_h / (1+W)$	1,62	1,68	1,79	1,8	1,76
W _{opt}	15.37				
γ_{dmax}	1.82				

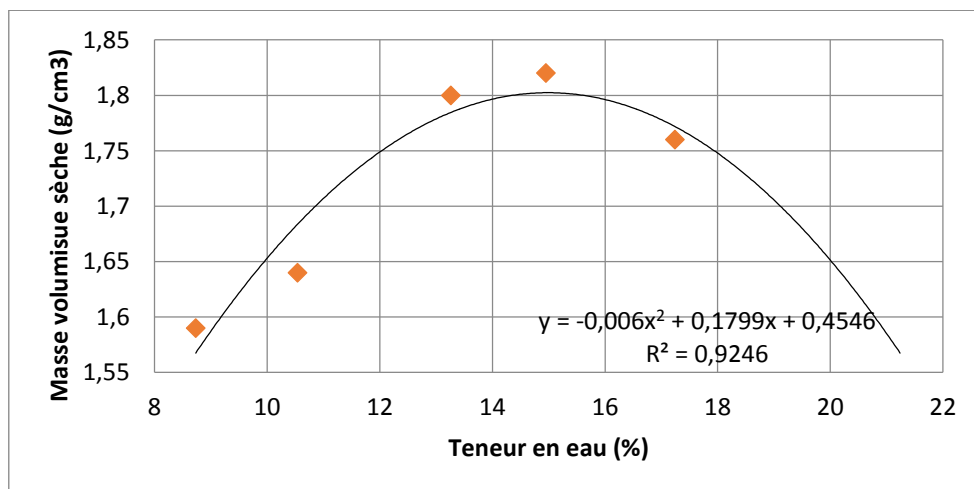


Figure III.11 : courbe Proctor Normal de sol naturel.

III.3.2.1.1 Sol traité :

a. Par ciment Chamil

Tableau III.18 : Résultats d'essai de Proctor Normal d'un sol traité par ciment Chamil.

		10%	12%	14%	16%	18%
6%	Wopt	11.06	12.82	14.20	15.14	18.84
	γ_d	1.66	1.70	1.76	1.82	1.75
8%	Wopt	11.04	12.09	15.31	16.62	21.61
	γ_d	1.68	1.75	1.77	1.80	1.71
10%	Wopt	11.06	12.43	14.66	17.01	21.70
	γ_d	1.68	1.74	1.78	1.79	1.71

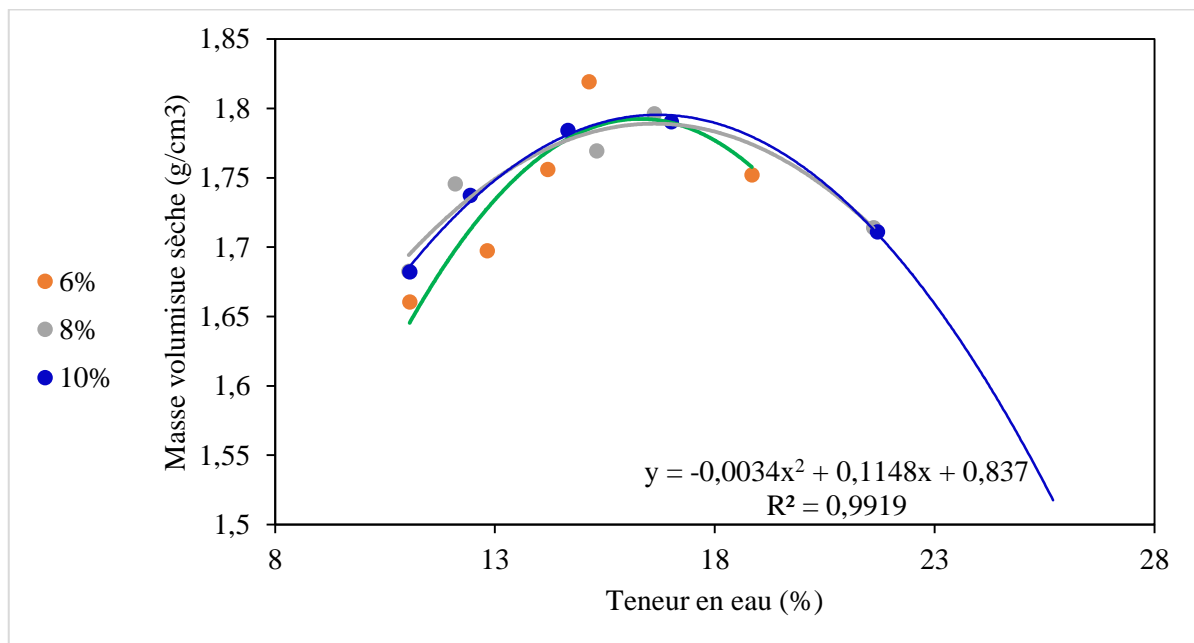


Figure III.12 : courbe Proctor Normal de sol traité par ciment (Chamil).

Tableau III.19 : Résultats (moyennes) 3 Essais de densité sèche et la teneur en eau en fonction des teneurs ciment (Chamil).

	Chamil	
	Wopt	Yd-max
6%	16.37	1.78
8%	16.78	1.79
10%	16.65	1.80

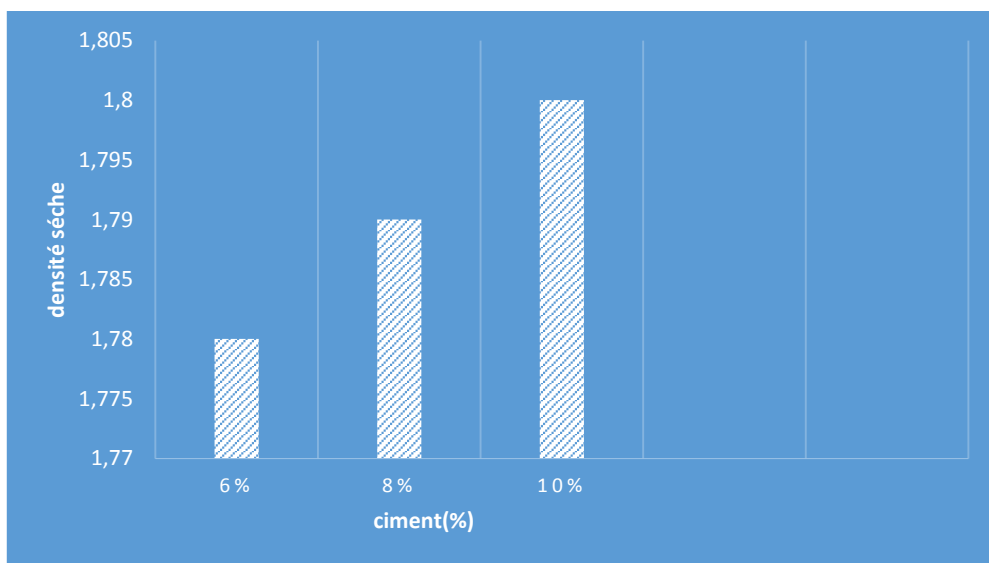


Figure III.13 : Densité sèche en fonction des différents teneurs en ciment (Chamil).

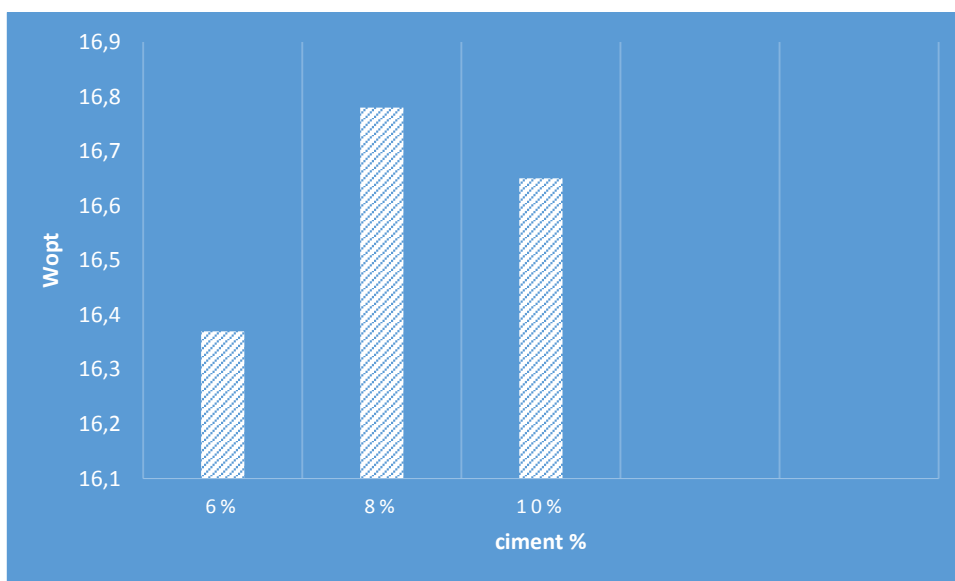


Figure III.14: Représenté la teneur en eau en fonction des différents teneurs en ciment Chamil.

b. par ciment Matine

Tableau III.20 : Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par ciment Matine.

		10%	12%	14%	16%	18%
Sol naturel	Wopt	7.89	9.13	13.79	15.92	17.30
	γ_d	1.55	1.62	1.80	1.82	1.77
6%	11,37	11,37	12,87	15,08	17,08	19,75
	1,64	1,64	1,75	1,79	1,78	1,75
8%	Wopt	11.04	12.09	15.31	16.62	21.64
	γ_d	1.68	1.75	1.76	1.80	1.71
10%	Wopt	11.06	12.39	14.64	17.08	21.69
	γ_d	1.68	1.73	1.78	1.79	1.71

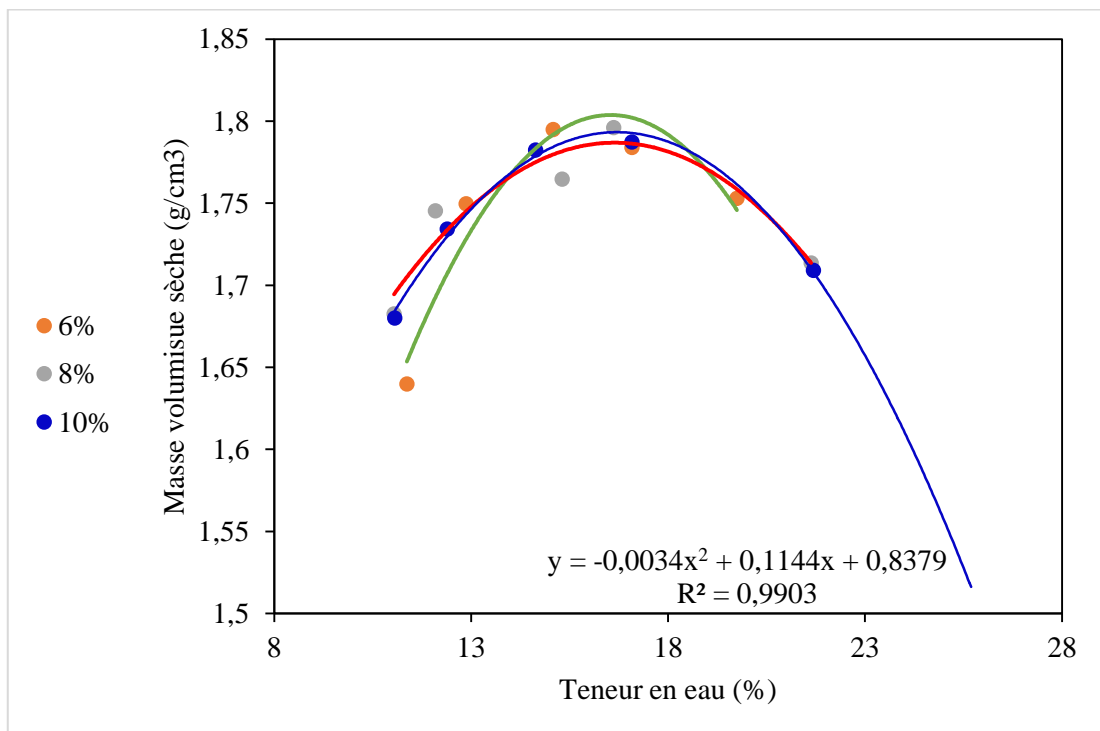


Figure III.15 : Courbe Proctor Normal de sol traité par ciment (Matine).

Tableau III.21 : Résultats (moyennes) 3 Essais de densité sèche et la teneur en eau en fonction des teneurs ciment (MATINE).

	MATINE	
	Wopt	Yd-max
6%	16.60	1.80
8%	16.99	1.80
10%	17.05	1.81

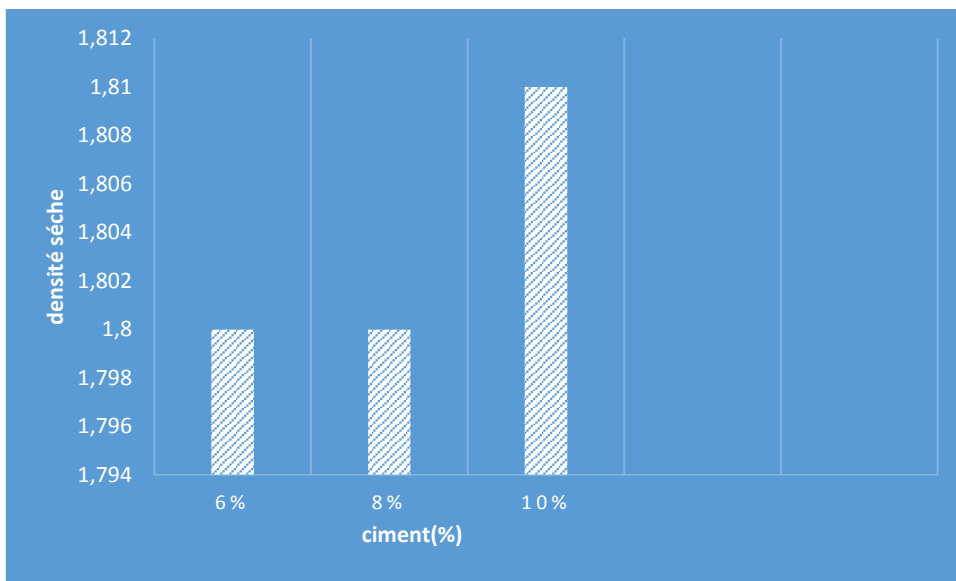


Figure III.16 : Densité sèche en fonction des différents teneurs en ciment (MATINE).

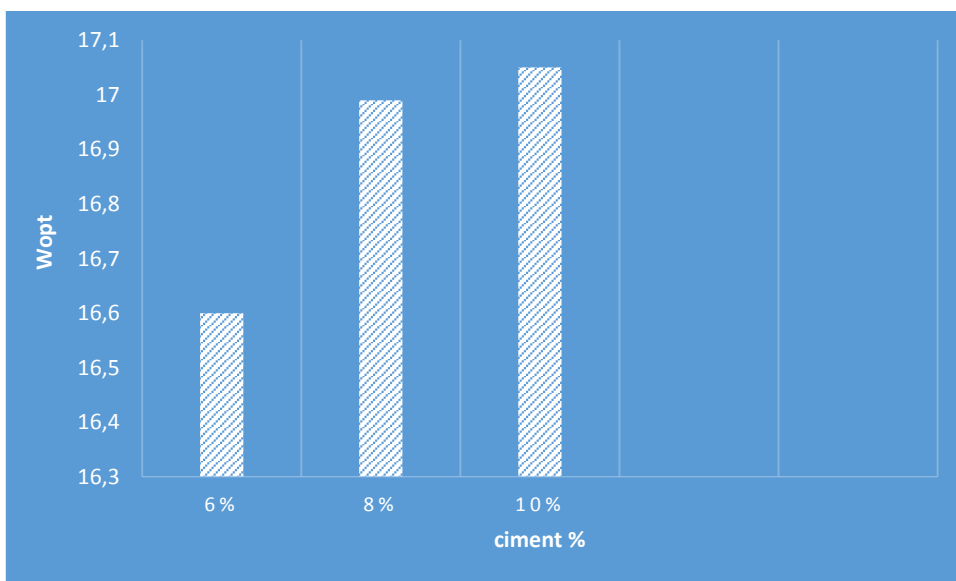


Figure III.17 : Représenté la teneur en eau en fonction des différents teneurs en ciment (MATINE).

III.3.2.1.2 Interprétation des résultats :

Les tableaux (III.23, III.26.) présenté les résultats des essais de compactage Proctor Normal à déférent teneur en ciment et déférent classe, on constate que la densité sèche augmente ainsi que la teneur en eau optimale.

III.3.2.2 Essai CBR Imbibé :**Tableau III.22 :** Résultats de l'essai CBR Imbibé du sol naturel.

	Essai 1							
Enfoncements	0	0,675	1,25	2	2,5	5	7,5	10
Force de poinçonnement (KN)	0	0,27	0,36	0,51	0,60	0,68	0,79	0,91
Indice C, B, R immédiat à 2,5mm(%)	4.49							
Indice C, B, R immédiat à 5mm(%)	3.43							
Indice C, B, R max (%)	4.49							
	Essai 2							
Enfoncements	0	0,675	1,25	2	2,5	5	7,5	10
Force de poinçonnement (KN)	0	0,38	0,48	0,56	0,64	0,79	0,87	0,96
Indice C, B, R immédiat à 2,5mm(%)	5,77							
Indice C, B, R immédiat à 5mm(%)	3,94							
Indice C, B, R max (%)	5,77							
	Essai 3							
Enfoncements	0	0,675	1,25	2	2,5	5	7,5	10
Force de poinçonnement (KN)	0	0,36	0,48	0,52	0,63	0,79	0,88	0,98
Indice C, B, R immédiat à 2,5mm(%)	4,73							
Indice C, B, R immédiat à 5mm(%)	3,97							
Indice C, B, R max (%)	4,73							

III.3.2.2.1 Sol traite :

a. Par ciment Chamil :

Tableau III.23 : Effet de ciment Chamil sur l'indice CBR imbibé.

Ciments %		0	6	8	10
Temps (s)	Enfoncement (mm)				
0	0	0	0	0	0
2	0,675	0,270	4,200	5.234	6.500
4	1,25	0,357	6,850	8.345	11.700
6	2	0,513	8,230	9.345	13.400
8	2,5	0,599	8,700	11.218	14.300
15	5	0,684	9,150	14.326	17.908
23	7,5	0,792	10,035	16.780	19.200
35	10	0,912	10,380	17.036	19.300
I CBR à 2, 5mm(%)		4.49	65.17	84.03	107.12
I CBR à 5mm(%)		3.43	45.91	71.88	89.85
I CBR max (%)		4.49	65.17	84.03	107.12

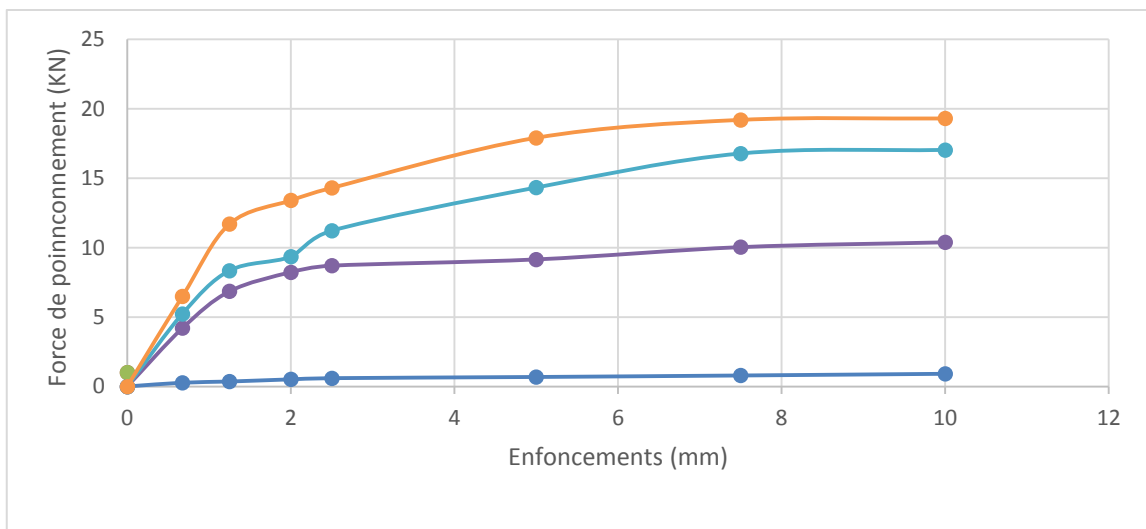
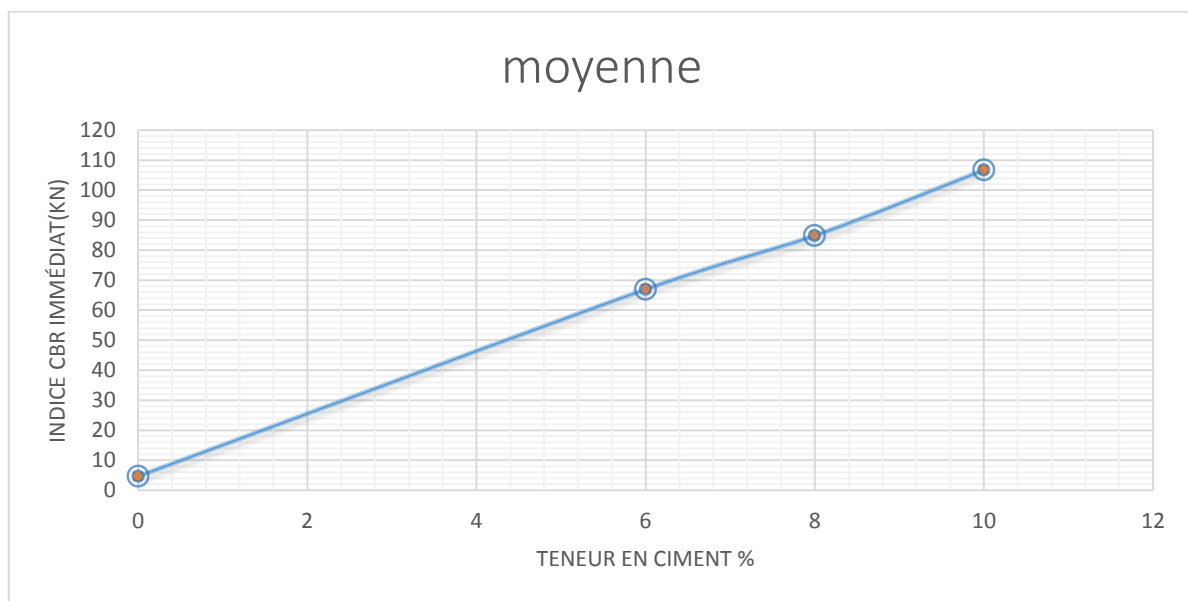


Figure III.18 : Effet des ciments sur le comportement du sol au poinçonnement imbibé.

Tableau III.24 : Récapitulatif des résultats des essais C.B.R imbibé (CHAMIL).

Indice CBR imbibé	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
0%	4.49	4.77	4.73	4.66
6%	65.17	66.64	68.98	66.93
8%	84.03	85.41	85.07	84.84
10%	107.12	105.92	106.96	106.67

**Figure III.19** : Courbes des essais des C.B.R imbibé (Chamil).

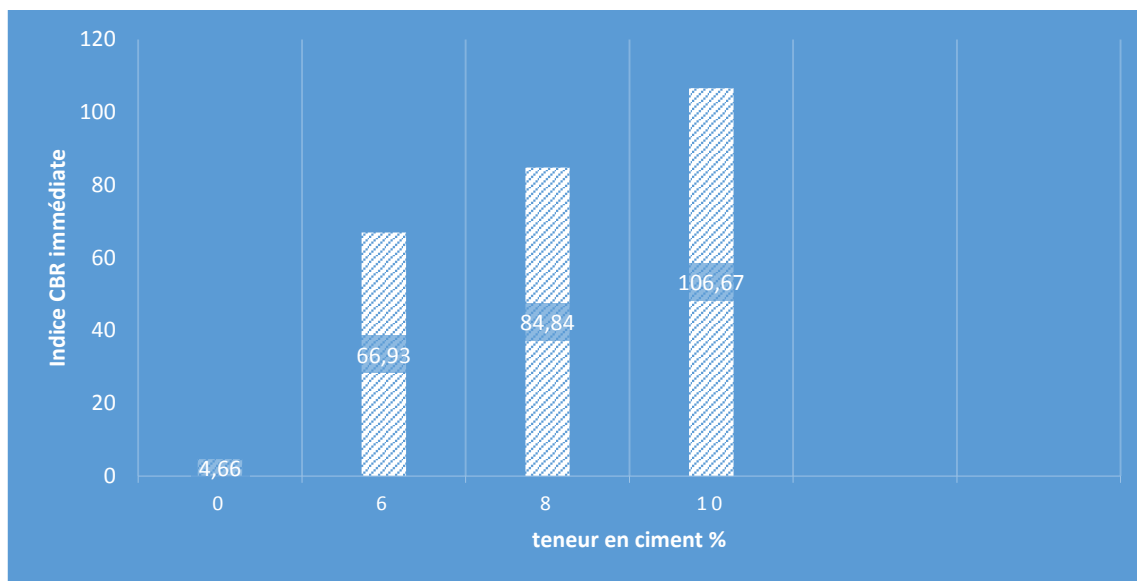


Figure III.20 : Effet de ciment combiné sur l'indice CBR imbibé (Chamil).

b. Par ciment Matine :

Tableau III.25 : Effet de ciment Matine sur l'indice CBR imbibé.

% des ciments		0	6	8	10
Temps (s)	Enfoncement (mm)				
0	0	0	0	0	0
2	0,675	0,287	7,400	8,023	8,920
4	1,25	0,390	9,305	10,105	11,304
6	2	0,514	9,550	13,356	17,125
8	2,5	0,610	9,660	15,064	18,430
15	5	0,697	10,101	19,450	24,306
23	7,5	0,802	10,903	21,101	29,003
35	10	0,917	11,950	22,905	32,083
I CBR à 2, 5 mm(%)		4.57	72.36	112.84	138.05
I CBR à 5 mm(%)		3.50	50.68	97.56	121.96
I CBR max (%)		5.57	72.36	112.84	138.05

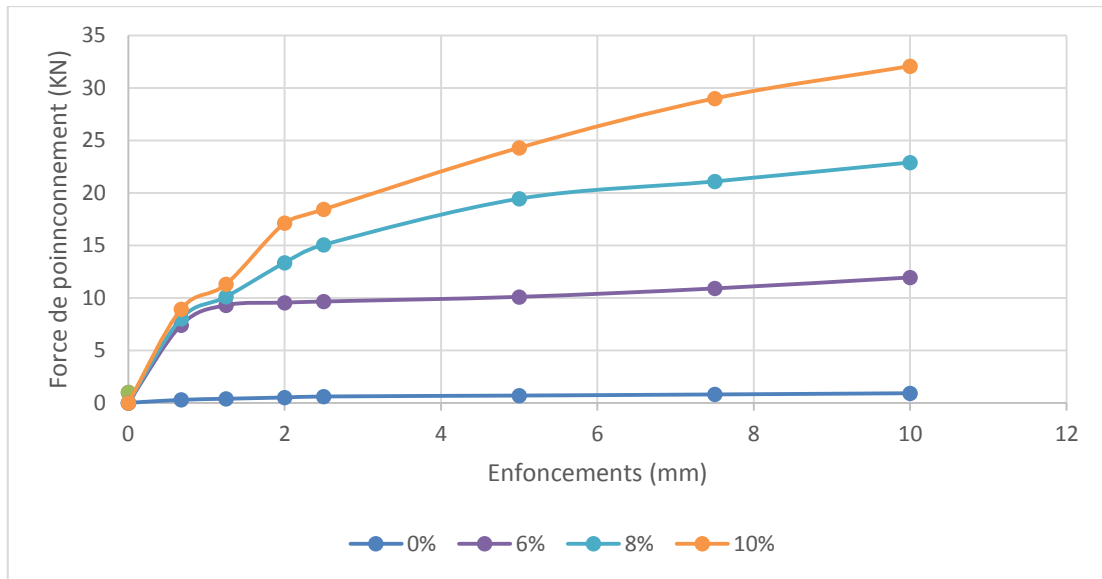


Figure III.21 : Effet des ciments sur le comportement du sol au poinçonnement imbibé.

Tableau III.26 : Récapitulatif des résultats des essais C.B.R imbibé.

Indice CBR imbibé	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
0%	4.57	5.03	4.69	4.76
6%	72.36	71.16	72.45	71.99
8%	112.84	113.12	113.29	113.08
10%	138.05	123.06	135.06	132.05

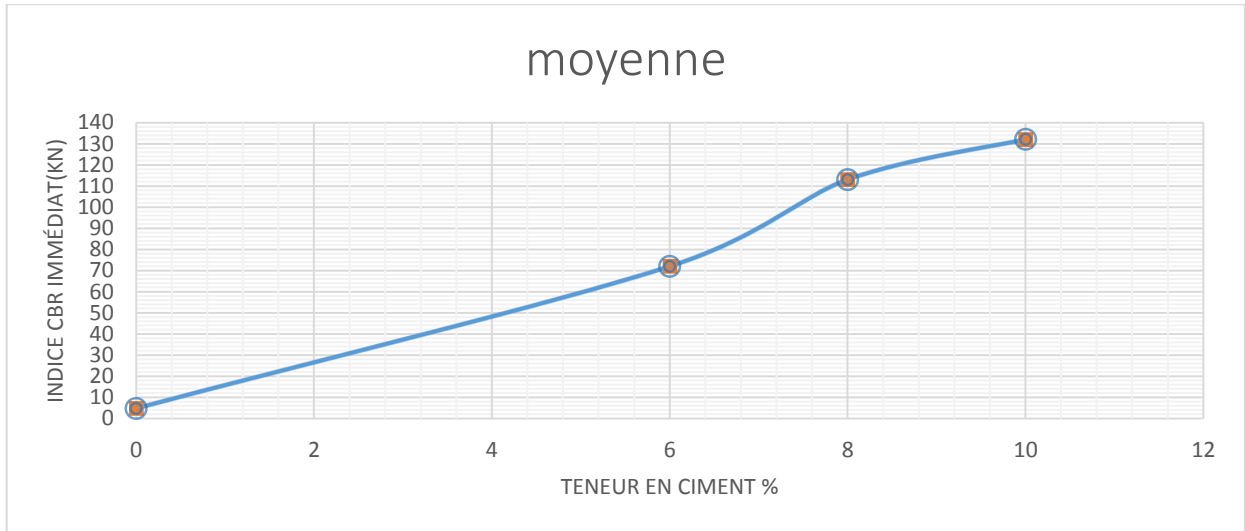


Figure III.22 : Courbes des essais des C.B.R imbibé (MATINE).

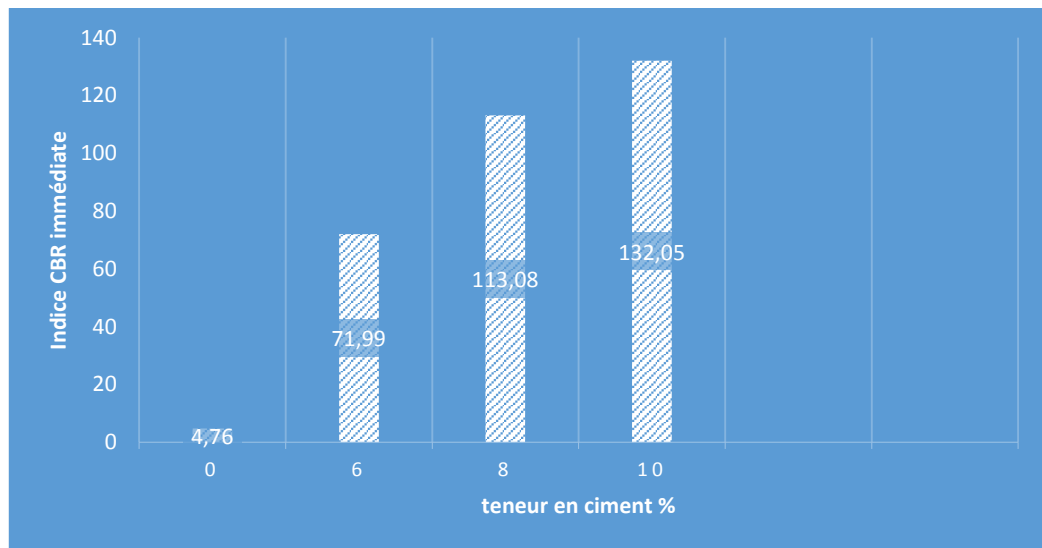


Figure III.23 : Effet de ciment combiné sur l'indice CBR imbibé (MATINE).

III.3.2.3 Essai CBR Immédiat :

Tableau III.27 : Résultats de l'essai CBR Immédiat du sol naturel.

	Essai 1							
Enfoncements	0	0,67 5	1,25	2	2,5	5	7,5	10
Force de poinçonnement (KN)	0	0,37 0	0,486	0,51	0,70	0,98	1,19	1,24
Indice C, B, R immédiat à 2,5mm(%)	5.21							
Indice C, B, R immédiat à 5mm(%)	4.92							
Indice C, B, R max(%)	5.21							
	Essai 2							
Enfoncements	0	0,67 5	1,25	2	2,5	5	7,5	10
Force de poinçonnement (KN)	0	0,34 1	0,475	0,54 2	0,68	0,99	1,18	1,22
Indice C, B, R immédiat à 2,5mm(%)	5.08							
Indice C, B, R immédiat à 5mm(%)	4.95							
Indice C, B, R max(%)	5.08							
	Essai 3							
Enfoncements	0	0.65	1.25	2	2.5	5	7.5	10
Force de poinçonnement (KN)	0	0.29	0.472	0.56	0.64	0.95	1.22 3	1.295
Indice C, B, R immédiat à 2,5mm(%)	5.20							
Indice C, B, R immédiat à 5mm(%)	4.84							
Indice C, B, R max(%)	5.20							

III.3.2.3.1 Sol traité :

a. Par ciment Matine :

Tableau III.28 : Effet de ciment MATINE sur l'indice CBR immédiat.

% des ciments		0	6	8	10
Temps (s)	Enfoncement (mm)				
0	0	0	0	0	0
2	0,675	0.370	0.896	0.997	1.231
4	1,25	0.486	1.166	1.359	1.384
6	2	0.509	1.703	2.268	1.969
8	2,5	0.695	2.275	2.442	2.603
15	5	0.981	2.499	2.611	2.799
23	7,5	1.190	3.905	3.320	3.465
35	10	1.244	4.013	3.916	4.002
I CBR à 2, 5 mm (%)		5.21	17.04	18.29	19.50
I CBR à 5mm (%)		4.92	12.54	13.10	14.04
I CBR max (%)		5.21	17.04	18.29	19.50

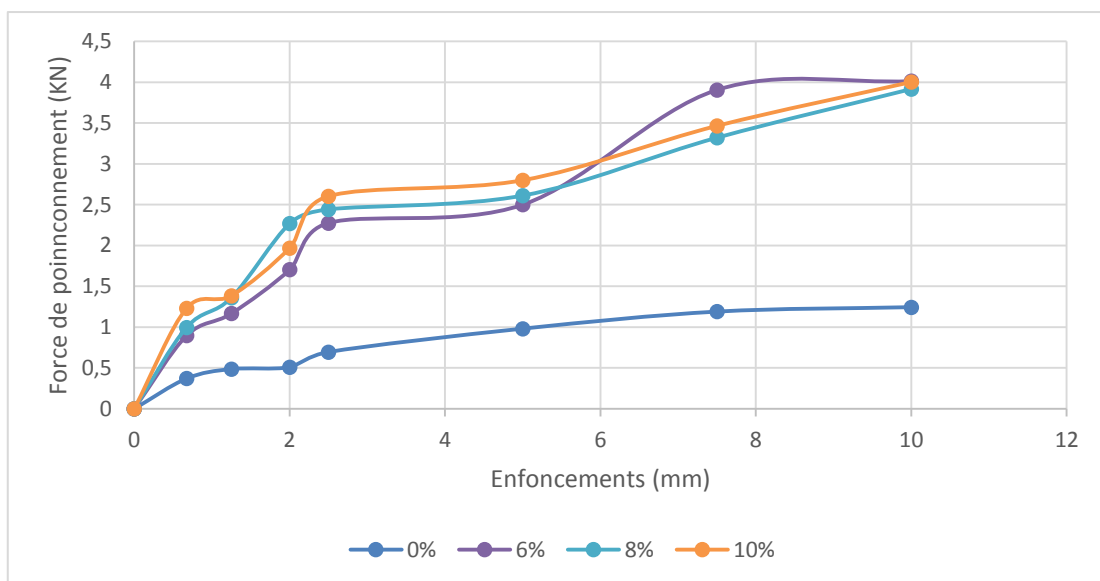
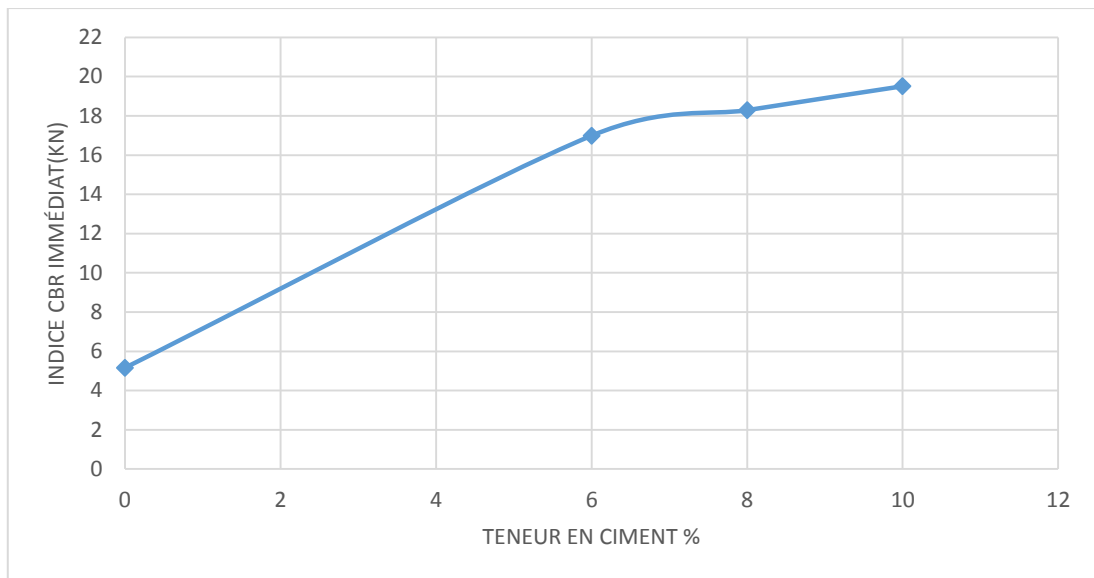


Figure III.24 : Effet des ciments sur le comportement du sol au poinçonnement immédiat.

Tableau III.29 : Récapitulatif des résultats des essais C.B.R immédiat (Matine).

Indice CBR immédiate	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
0%	5.21	5.08	5.20	5.16
6%	17.04	16.97	16.98	16.99
8%	18.29	18.42	18.16	18.29
10%	19.50	19.71	19.32	19.51

**Figure III.25** : Courbes des essais des C.B.R immédiat. (MATINE).

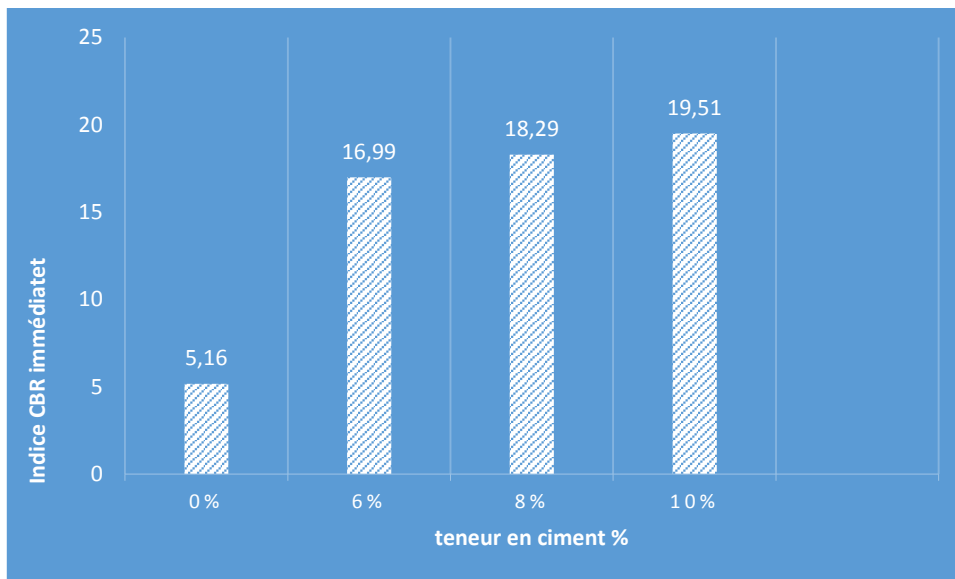


Figure III.26 : Effet de ciment combiné sur l'indice CBR immédiat (Matine).

b. Par ciment Chamil :

Tableau III.30 : Effet de ciment Chamil sur l'indice CBR immédiat.

% des ciments		0	6	8	10
Temps (s)	Enfoncements (mm)				
0	0	0	0	0	0
2	0,675	0.333	0.806	0.936	0.824
4	1,25	0.463	1.006	1.106	1.123
6	2	0.585	1.590	2.230	1.457
8	2,5	0.605	2.101	2.310	2.413
15	5	0.992	2.304	2.469	2.719
23	7,5	1.166	3.790	3.189	3.212
35	10	1.235	3.880	3.806	3.861
I CBR à 2,5 mm (%)		4.53	15,74	16.70	18.07
I CBR à 5 mm (%)		4.98	11.56	12.39	13.64
I CBR max (%)		4.98	15,74	16.70	18.07

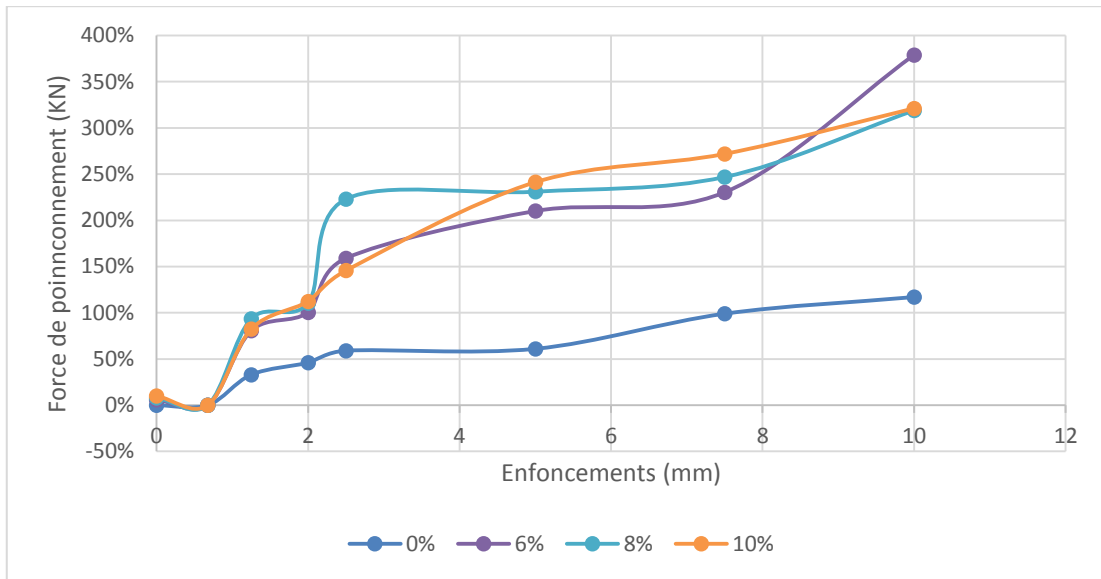


Figure III.27 : Effet des ciments sur le comportement du sol au poinçonnement immédiat.

Tableau. III.31 : Récapitulatif des résultats des essais C.B.R immédiat. (CHAMIL).

Indice CBR immédiate	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
0%	4.98	5.08	4.91	4.99
6%	15.74	16.07	15.81	15.87
8%	17.30	17.03	16.79	17.04
10%	18.07	17.84	18.20	18.03

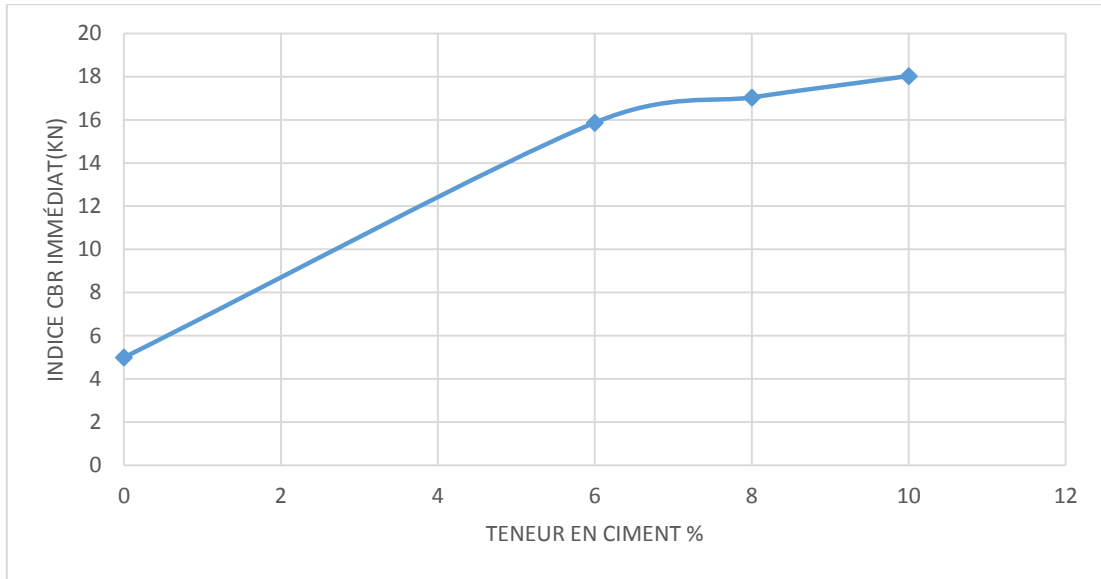


Figure III.28 : Courbes des essais des C.B.R immédiat. (CHAMIL).

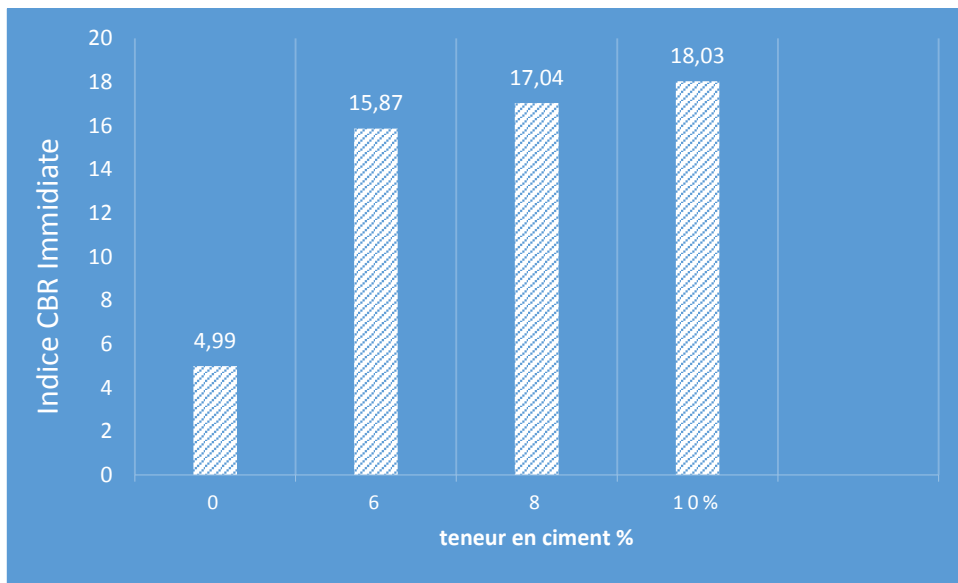


Figure III.29 : Effet de ciment combiné sur l'indice CBR immédiat (CHAMIL).

III.4 Conclusion :

On conclue dans ce chapitre que :

La valeur du bleu égale 3.52 ($2,5 < V_B < 6$) Notre sol appartient donc à la classe des «**Sols limoneux argileux**».

On remarque que la limite de liquidité diminue avec l'augmentation des teneurs en ciment, par contre la limite de plasticité augmente avec l'augmentation des teneurs en ciment et ça appliquera dans les deux classes de ciment (Chamil, Matine).

Les tableaux de l'essai Proctor présenté les résultats des essais de compactage Proctor Normal à déférent teneur en ciment et déférent classe, on constate que la densité sèche augmente ainsi que la teneur en eau optimale.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'interaction d'un liant (chaux ou ciment) avec les particules fines d'un sol induit une suite de phénomènes physico-chimiques complexes à cinétique très variable modifiant les propriétés de sol. Par ailleurs, la méthode de traitement chimique des sols par ajout de la chaux ou du ciment ou d'autres ajouts cimentaires reste la plus utilisée et la moins onéreuse. Cette technique s'est développée très rapidement à travers le monde et qui est encore menée à connaître une importante croissance.

Traiter une terre, c'est la mélanger intimement avec un produit comme la chaux ou un liant hydraulique contenant du ciment pour lui donner d'excellentes propriétés mécaniques. Vous pouvez mettre à niveau de nombreux matériaux initialement inutiles, en évitant de remplacer les terres sur place par des fournitures rares et fines.

De cette étude expérimentale on peut conclure :

- Les valeurs de la limite de liquidité diminuent avec l'augmentation du pourcentage de ciment, la diminution de la limite de liquidité est due à la diminution de la surface spécifique totale car la fraction argileuse devient faible avec l'augmentation du dosage en ciment.
- La valeur du U_c égale 3.52 ($2,5 < U_c < 6$) Notre sol appartient donc à la classe des «**Sols limoneux argileux**».
- les résultats des essais de compactage Proctor Normal à différents teneurs en ciment et différentes classes, on constate que la densité sèche augmente ainsi que la teneur en eau optimale.
- L'augmentation du dosage en ciment agit directement sur l'augmentation de l'indice de portance (indice C.B.R.).

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

AFES (2008). Référentiel pédologique. Association Française pour l'Etude du Sol. Ed. Quæ.

AFNOR (1992) Norme Française : **NF P 94-057** : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie.

AFNOR (1997) Norme Française : **NF P 94-078** Sols : Indice CBR immédiat — Indice Portant Immédiat.

AFNOR (1991) Norme Française : **NF P 94-050** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des sols – Méthode par étuvage.

AFNOR (1991) Norme Française : **NF P 94-053** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire – Méthode du moule.

AFNOR (1993) Norme Française : **NF P 94-051** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.

AFNOR (1993) Norme Française : **NF P 94-068** Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche.

AFNOR (1999) Norme Française : **NF P 94-093** Sols : Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié.

Amélioration et renforcement des sols - **F. Schlosser** - Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), Paris, France.

Attoh-Okine B. Stabilization effect of locally produced lime on selected lateritic soils. Construc Build Mater 1990.

Bahar R, Benazzoug M, Kenai S. Performance of compacted cement-stabilised soil. Cem Concr Compos 2004.

Bell F.G. Lime stabilization of clay soils. Eng. Geol. Env., Springer 1989 ; 39(1) :67-74.

Clément Louis Treussart, Mémoire sur les mortiers hydrauliques et sur les mortiers ordinaires, Carillan-Goeury, 1829.

Delfaut A. Traitement à la chaux vive et au ciment des argiles plastiques du Sparnacienne de la région parisienne. Etude de laboratoire, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées -169, Sept-Oct 1990.

Diamond S, Kinter E B. Mechanism of soil-lime stabilization. Highway Research Record, N°92, 1965.

Grim R.E. (1962) Clay mineralogy in relation to the Engineering properties of clay materials. Mc Craw Hill, pp.204-277.

HOCINE ZIANI : (Étude de l'influence du gradient hydraulique sur l'affaissement de la structure des sols à effondrement brusque en utilisant la méthode double consolidation) Mémoire de Magister en Génie Civil Université Hadj- lakhdar –Batna (2011/1012).

Itsvan C (1990). Comportement des sables argileux ; influence du traitement à la chaux. Thèse de doctorat CGI, ENSMP, INSA Rennes.

Khattab SAA. 2002. Etude multi – échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux. Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans (France).

MAHAMED A., KHEMISSA M. (2013). Etude de l'évolutivité d'une argile expansive traitée aux liants hydrauliques. Communication à la 3ème Conférence Maghrébine en Ingénierie Géotechnique (3ème CMIG'13), Alger, 18-19 Novembre 2013.

Moh ZC. Reactions of soil minerals with cement and chemicals. In Highway Research Record 86, HRB, National Research Council, Washington, D.C., 1965.

Osula DOA. A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. Eng Geol 1996.

Traitement des sols à la chaux et /ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des remblais et des couches de formes. : Guide technique. – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) ; SETRA, 2000. – 246 p.

Walker PJ. Strength, Durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. Cem Concr Comp. 1995.

Zeyneb BELABBACI 2014: STABILISATION DES SOLS GONFLANTS ; thèse de doctorat ; université ABOUBEKER Belkaid Telemcen.

Annexes

Analyse granulométrique:

Tableau A.1

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât- en (%)
5	7,02	7,02	1,17	98,83
2,5	5,77	12,79	2,13	97,87
1,25	8,7	21,48	3,58	96,42
0,63	15,44	36,92	6,15	93,85
0,315	19,63	56,55	9,43	90,57
0,16	32,07	88,62	14,77	85,23
0,08	56,3	144,92	24,15	75,85
0,08				75,85
0,075				71,93
0,055				68,01
0,038				64,18
0,025				56,4
0,017				52,51
0,012				48,62
0,008				17,5
0,005				1,94
0,002				0

Figure A.1

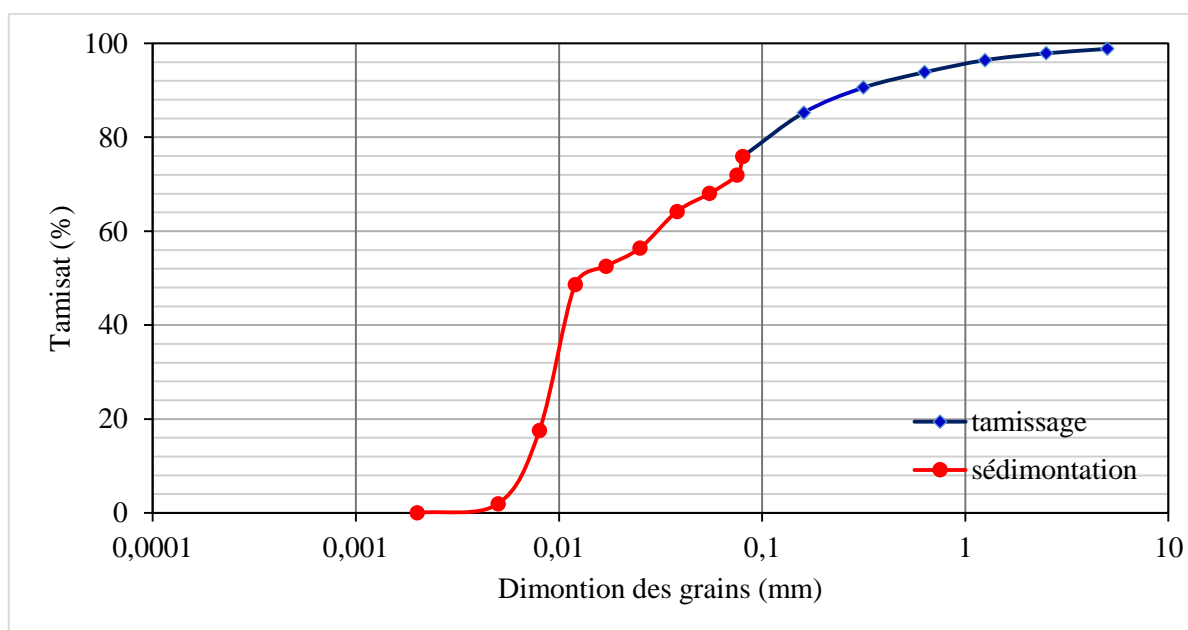


Tableau A.2

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
5	4,75	4,75	0,79	99,21
2,5	5,67	10,42	1,73	98,27
1,25	8,99	19,41	3,24	96,76
0,63	12,28	31,69	5,28	94,72
0,315	16,82	48,51	8,09	91,91
0,16	32,16	80,67	13,45	86,55
0,08	55,63	136,3	22,72	77,28
0,08				77,28
0,075				77,28
0,055				73,38
0,038				71,43
0,025				71,43
0,017				65,64
0,012				57,87
0,008				46,23
0,005				19,06
0,002				0

Figure A.2

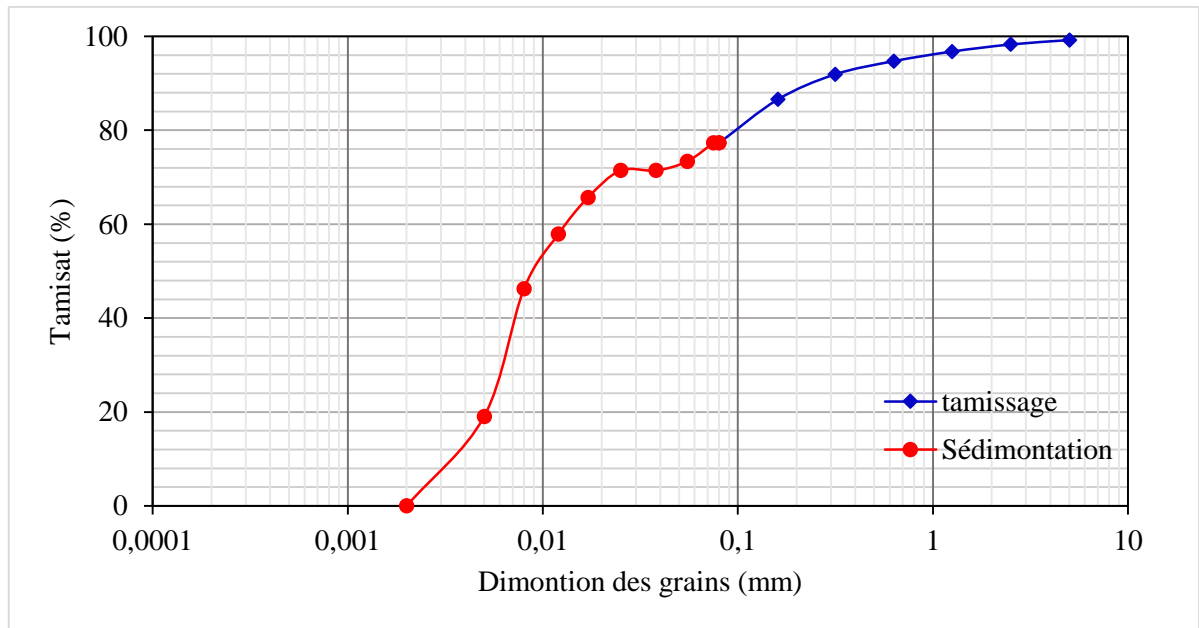


Tableau A.3

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
5	11,64	11,64	1,94	98,06
2,5	5,72	17,36	2,89	97,11
1,25	9,99	27,35	4,56	95,44
0,63	13,72	41,07	6,85	93,15
0,315	17,93	59,01	9,83	90,17
0,16	32,57	91,57	15,26	84,74
0,08	55,93	147,5	24,58	75,42
0,08				75,42
0,075				71,51
0,055				67,6
0,038				63,69
0,025				59,84
0,017				55,94
0,012				44,37
0,008				40,49
0,005				28,84
0,002				1,67

Figure A.3

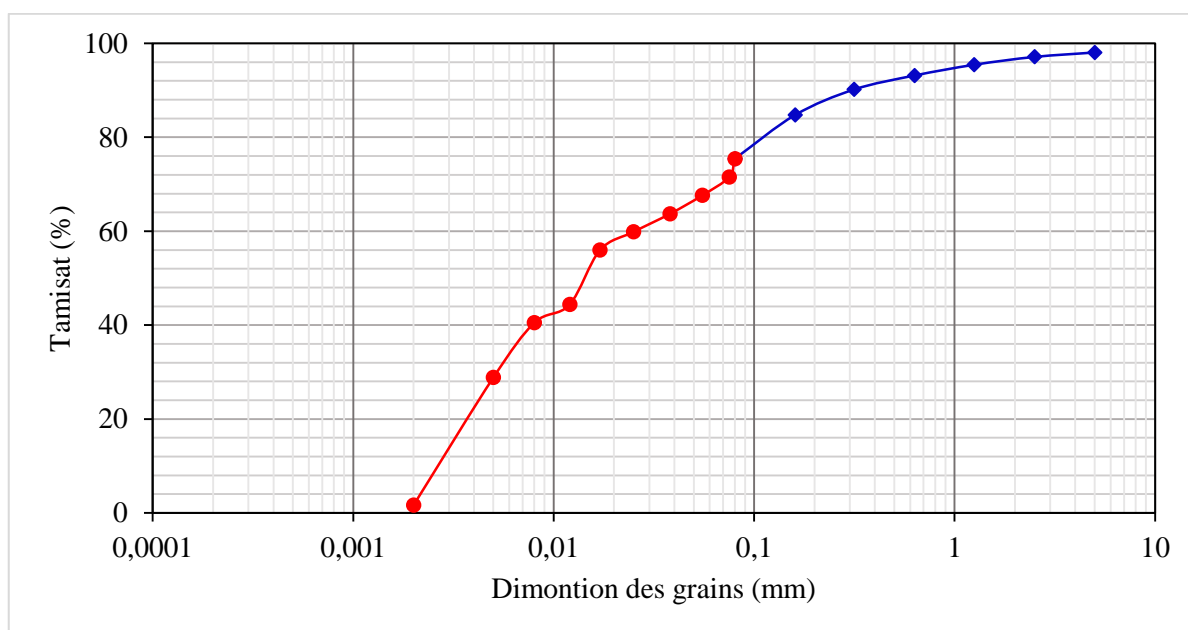


Tableau A.4

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
5	4,52	4,52	0,75	99,25
2,5	6,08	10,6	1,76	98,24
1,25	8,92	19,52	3,25	96,75
0,63	11,9	31,42	5,24	94,76
0,315	14,67	46,09	7,68	92,32
0,16	29,3	75,39	12,56	87,44
0,08	55,61	131	21,83	78,17
0,08				78,17
0,075				74,51
0,055				70,85
0,038				67,19
0,025				63,58
0,017				59,93
0,012				56,36
0,008				46,36
0,005				25,45
0,002				0

Figure A.4

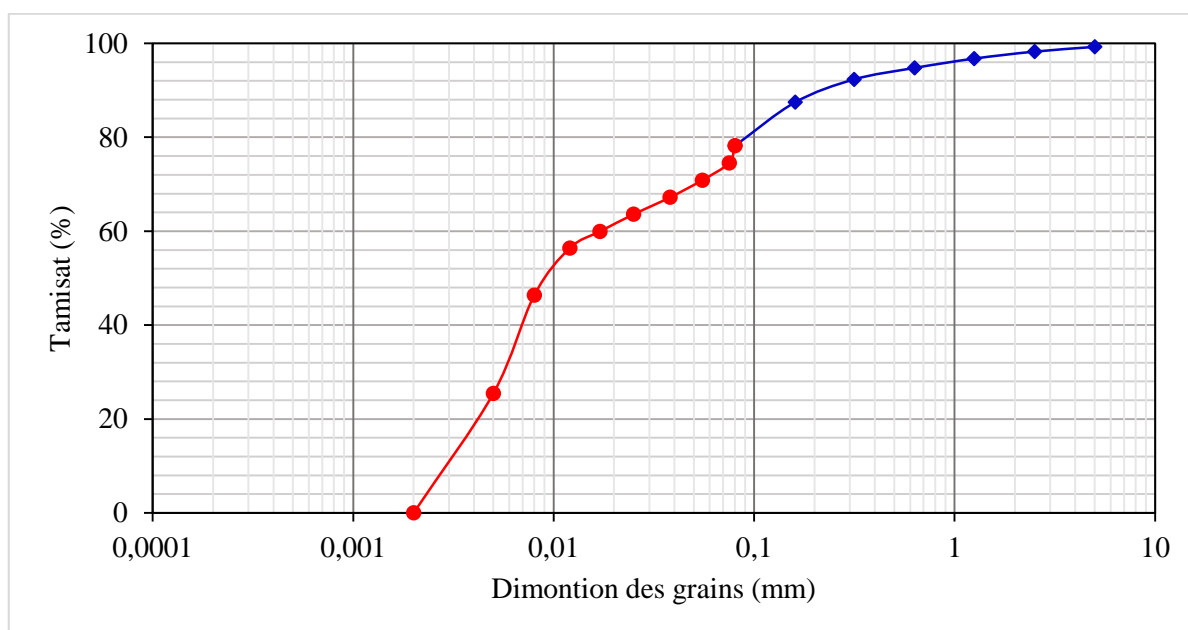


Tableau A.5

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
5	4,97	4,97	0,83	99,17
2,5	5,85	10,82	1,8	98,2
1,25	9,83	20,65	3,44	96,56
0,63	14,73	35,38	5,9	94,1
0,315	18,11	53,49	8,92	91,08
0,16	33,15	86,64	14,44	85,56
0,08	57,45	144,09	24,02	75,98
0,08				75,98
0,075				75,98
0,055				66,68
0,038				63,58
0,025				57,37
0,017				54,27
0,012				48,07
0,008				41,87
0,005				17,24
0,002				1,78

Figure A.5

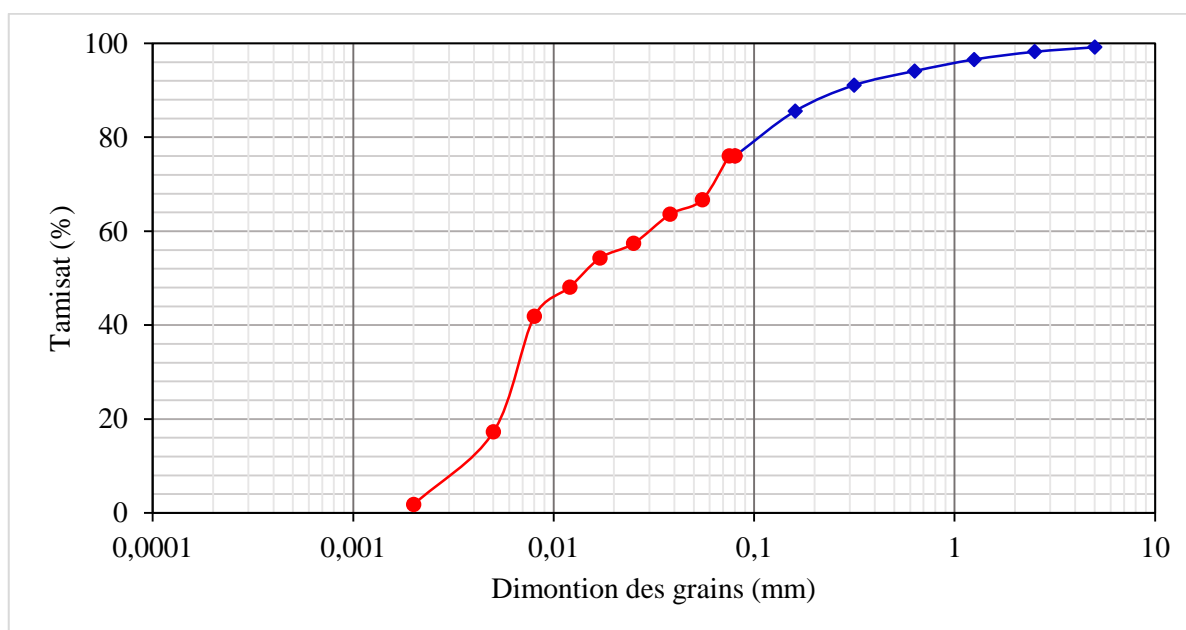


Tableau A.6

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
5	10,03	10,03	1,67	98,33
2,5	6,71	16,74	2,79	97,21
1,25	10,79	27,53	4,58	95,42
0,63	12,14	32,67	5,44	94,56
0,315	18,26	57,93	9,65	90,35
0,16	30,4	88,33	14,72	85,28
0,08	58,8	146,41	24,4	75,6
0,08				75,6
0,075				72,3
0,055				69
0,038				69
0,025				65,74
0,017				62,45
0,012				52,69
0,008				39,59
0,005				19,95
0,002				1,95

Figure A.6

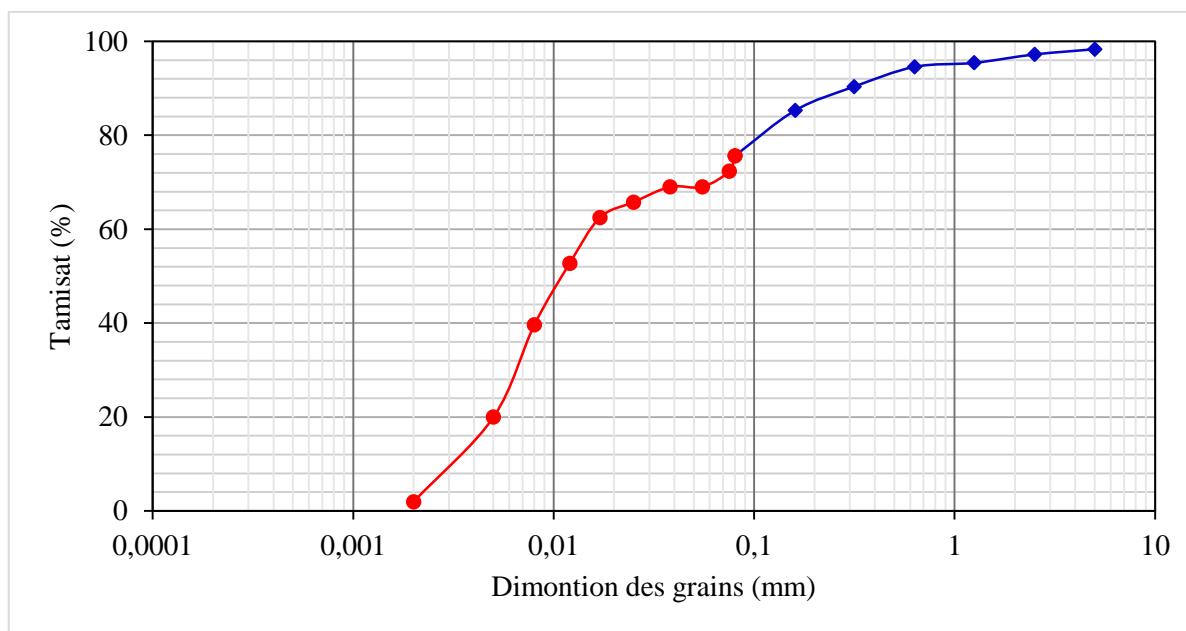


Tableau A.7

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
5	4,68	4,68	0,78	99,22
2,5	7,47	12,15	2,02	97,98
1,25	10,02	22,17	3,69	96,31
0,63	16,83	39	6,5	93,5
0,315	22,13	61,13	10,18	89,82
0,16	28,21	89,35	14,89	85,11
0,08	72,34	161,69	26,94	73,06
0,08				73,06
0,075				70,06
0,055				61,06
0,038				55,06
0,025				52,07
0,017				49,07
0,012				43,07
0,008				40,07
0,005				16,08
0,002				1,29

Figure A.7

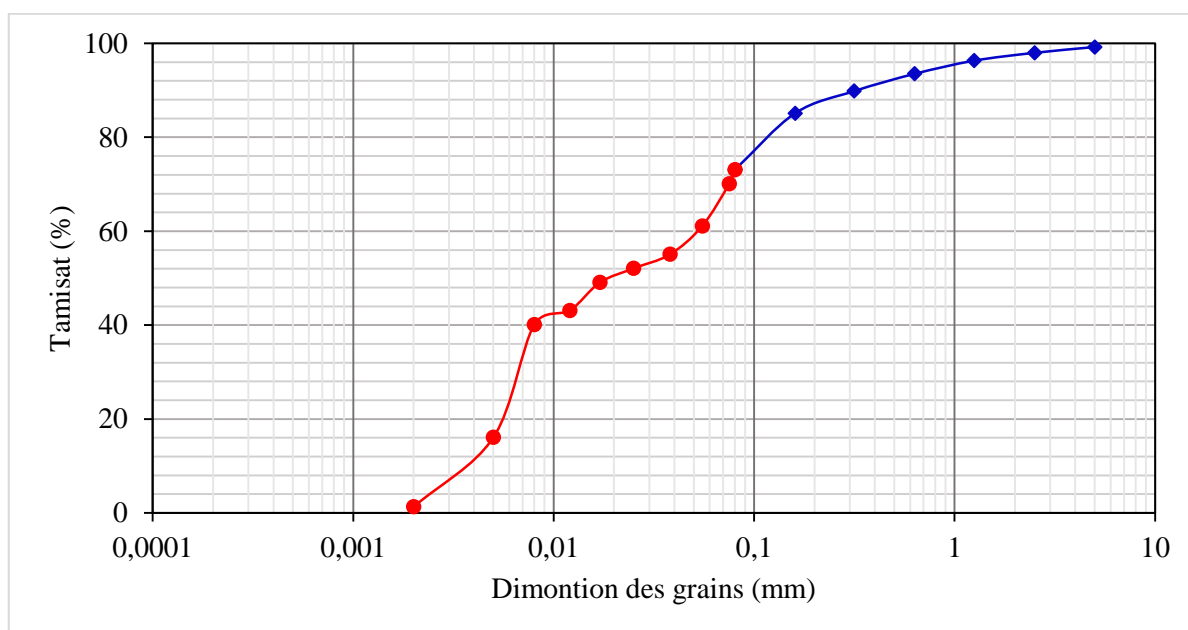
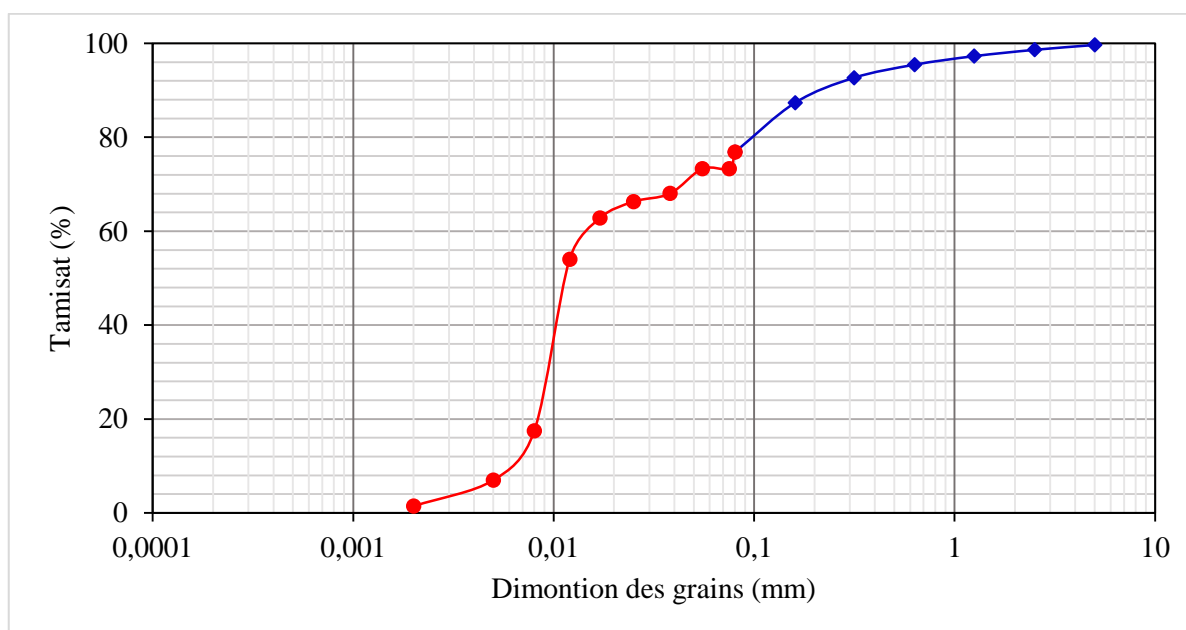


Tableau A.8

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
5	2,04	2,04	0,34	99,66
2,5	6,27	8,31	1,38	98,62
1,25	8,06	16,37	2,73	97,27
0,63	10,97	27,34	4,55	95,45
0,315	16,63	43,97	7,33	92,67
0,16	31,91	75,88	12,65	87,35
0,08	63,25	139,13	23,19	76,81
0,08				76,81
0,075				73,29
0,055				73,29
0,038				68,01
0,025				66,29
0,017				62,79
0,012				54,02
0,008				17,46
0,005				6,98
0,002				1,44

Figure A.8



Limite d'Atterberg :

Tableau A.9

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Masse de la tare	4	3,69	3,93	3,40	3,84	3,69	3,70	3,84
		5	1	7	4		9	4
Masse du sol humide + la tare	9,98	11,5	10,4	9,41	11,1	13,4	9,29	9,25
		12			4			
Masse du sol sec + la tare	8,23	9,23	8,53	7,69	9,05	10,6	7,73	7,76
						8		
Masse d'eau	1,75	2,28	1,87	1,72	2,05	2,76	1,56	1,49
		2						
Masse du sol sec	4,23	5,53	4,59	4,28	5,20	6,99	4,02	3,91
		5	9	3	6		1	6
Teneur en eau	41,3	41,2	40,6	40,1	39,3	39,4	38,7	38,0
	71	29	61	59	78	85	96	49
Moyenne %	41,300		40,410		39,431		38,423	
Moyenne Générale %	39,89							

Tableau A.10

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Masse de la tare	4,24	4,11 9	3,75	3,75	3,81 8	3,60 4	3,84 3	3,49 9
Masse du sol humide + la tare	5,97	5,3	5,42	5,74	5,21	5,29	5,02	5,49
Masse du sol sec + la tare	5,69	5,11	5,15	5,43	4,98	5,01	4,84	5,16
Masse d'eau	0,28	0,19	0,27	0,31	0,23	0,28	0,18	0,33
Masse du sol sec	1,45	0,99	1,40	1,68	1,16	1,41	1,00	1,66
Teneur en eau	19,3 10	19,1 73	19,2 86	18,4 52	19,7 93	19,9 15	18,0 54	19,8 68
Moyenne %	19,241		18,869		19,854		18,961	
Moyenne Générale %	19,23							

Tableau A.11 6% Chamil.

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Masse de la tare	3,46 1	3,97 4	3,97 8	3,57	3,67 4	3,49 8	3,66 7	3,81 5
Masse du sol humide + la tare	9,44 5	9,46 6	10,0 95	11,4 2	11,1 13	12,1 51	10,7 24	11,5 69
Masse du sol sec + la tare	7,82 1	7,95 4	8,45 5	9,30 1	9,15	9,86 4	8,89 4	9,58 3
Masse d'eau	1,62 4	1,51 2	1,64	2,11 9	1,96 3	2,28 7	1,83	1,98 6
Masse du sol sec	4,36	3,98	4,47 7	5,73 1	5,47 6	6,36 6	5,22 7	5,76 8
Teneur en eau	37,2 48	37,9 90	36,6 32	36,9 74	35,8 47	35,9 25	35,0 11	34,4 31
Moyenne %	37,619		36,803		35,886		34,721	
Moyenne Générale %	36,26							

Tableau A.12

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Masse de la tare	3,7	3,97 2	3,87 8	3,51 8	3,84 6	3,88	4,10 7	4,12
Masse du sol humide + la tare	5,11 9	4,92 5	5,19 7	5,03 3	5,20 7	4,86 8	5,41 1	5,13
Masse du sol sec + la tare	4,85	4,74 1	4,95 5	4,74 3	4,94 2	4,67	5,16 1	4,94
Masse d'eau	0,27	0,18	0,24	0,29	0,27	0,20	0,25	0,19
Masse du sol sec	1,15	0,77	1,08	1,23	1,10	0,79	1,05	0,82
Teneur en eau	23,3 91	23,9 27	22,4 70	23,6 73	24,1 79	25,0 63	23,7 19	23,1 71
Moyenne %	23,659		23,072		24,621		23,445	
Moyenne Générale %	23,70							

Tableau A.13 8% Chamil.

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Masse de la tare	3,96 7	3,94 7	3,55 5	3,95 7	3,68 7	3,44 5	3,65 1	3,64 7
Masse du sol humide + la tare	12,6 6	9,99	9,69 8	10,4 96	8,86 1	9,45 4	11,1	9,46 7
Masse du sol sec + la tare	10,4 56	8,44 8	8,14 5	8,84	7,56 9	7,94 2	9,25 2	8,03 3
Masse d'eau	2,20 4	1,54 2	1,55 3	1,65 6	1,29 2	1,51 2	1,84 8	1,43 4
Masse du sol sec	6,48 9	4,50 1	4,59	4,88 3	3,88 2	4,49 7	5,60 1	4,38 6
Teneur en eau	33,9 65	34,2 59	33,8 34	33,9 14	33,2 82	33,6 22	32,9 94	32,6 95
Moyenne %	34,112		33,874		33,452		32,845	
Moyenne Générale %	33,57							

Tableau A.14

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Masse de la tare	4,09 6	4,10 9	3,72 3	3,85 3	3,48 6	3,84 7	3,79 5	3,49
Masse du sol humide + la tare	6,10 4	5,10 9	5,08 8	4,95 9	4,71 8	5,09 9	5,36 8	5,11
Masse du sol sec + la tare	5,71 7	4,91 7	4,81 9	4,74 4	4,48 2	4,85 5	5,06 6	4,79 4
Masse d'eau	0,39	0,19	0,27	0,22	0,24	0,24	0,30	0,32
Masse du sol sec	1,62	0,81	1,10	0,89	1,00	1,01	1,27	1,30
Teneur en eau	23,8 74	23,7 62	24,5 44	24,1 30	23,6 95	24,2 06	23,7 61	24,2 33
Moyenne %	23,818		24,337		23,951		23,997	
Moyenne Générale %	24,03							

Tableau A.15 10% Chamil.

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Masse de la tare	4,13 9	3,97 3	4,05 6	3,61 9	3,49 7	3,60 6	3,82 4	3,82 1
Masse du sol humide + la tare	10,7 35	12,3 75	11,8 08	8,17 1	13,6 47	13,7 63	10,4 08	12,8 76
Masse du sol sec + la tare	9,09 5	10,2 89	9,88 9	7,04 2	11,1 92	11,3 03	8,85 3	10,8 01
Masse d'eau	1,64	2,08 6	1,91 9	1,12 9	2,45 5	2,46	1,55 5	2,07 5
Masse du sol sec	4,95 6	6,31 6	5,83 3	3,42 3	7,69 5	7,69 7	5,02 9	6,98
Teneur en eau	33,0 91	33,0 27	32,8 99	32,9 83	31,9 04	31,9 61	30,9 21	29,7 28
Moyenne %	33,059		32,941		31,932		30,324	
Moyenne Générale %	32,06							

Tableau A.26

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Masse de la tare	3,78 3	3,23 3	3,73 8	3,95 3	3,99 5	3,98 5	3,56 1	4,11 4,11
Masse du sol humide + la tare	5,05 6	4,33 1	5,36 2	4,94 3	5,08	5,45 3	5,08 9	5,47 5,47
Masse du sol sec + la tare	4,81 3	4,12 5	5,05 3	4,74 9	4,87	5,17 3	4,79 3	5,20 6
Masse d'eau	0,24	0,21	0,31	0,19	0,21	0,28	0,30	0,26
Masse du sol sec	1,03	0,89	1,32	0,80	0,88	1,19	1,23	1,10
Teneur en eau	23,5 92	23,0 94	23,4 98	24,3 72	24,0 00	23,5 69	24,0 26	24,0 88
Moyenne %	23,343		23,935		23,785		24,057	
Moyenne Générale %	23,78							

Tableau A.17

Dosage en ciment	0%	2%	4%	6%	8%	10%
Limite de liquidités (Wl)%	42.20	38.28	37.87	36.55	33.77	31.97
Limite de plasticité (WP) %	21.01	24.69	25.87	25.97	26.68	27.57
Indice de plasticité IP	21.19	13.59	12	10.58	7.08	4.4

Tableau A.18

Dosage en ciment	0%	2%	4%	6%	8%	10%
Limite de liquidités (Wl)%	41.85	38.30	37.25	36.33	31.86	31.63
Limite de plasticité(WP) %	21.63	24.88	26.15	27.52	28.03	28.52
Indice de plasticité IP	20.22	13.42	11.10	8.81	3.83	3.11

Tableau A.19

Dosage en ciment	0%	2%	4%	6%	8%	10%
Limite de liquidités (Wl)%	41.64	39.45	38.51	36.66	35.44	34.35
Limite de plasticité (WP) %	22.38	24.60	26.32	27.17	28.08	29.12
Indice de plasticité IP	19.26	14.85	12.20	9.48	7.36	5.23

Tableau A.20

Dosage en ciment	0%	2%	4%	6%	8%	10%
Limite de liquidités (Wl)%	42.92	38.27	38.35	36.54	33.76	31.96
Limite de plasticité (WP) %	24.64	24.69	25.87	25.97	25.80	25.81
Indice de plasticité IP	18.28	13.59	12.48	10.57	7.96	6.15

Tableau A.21 6% Matine.

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Masse de la tare	12,8	12,7	12,3	12,8	12,7	3,73	3,59	3,55
	76	73	1	63	8	5	9	3
Masse du sol humide + la tare	19,4	18,7	19,2	20,6	17,6	9,80	10,2	8,94
	28	02	92	02	04	1	91	1
Masse du sol sec + la tare	17,5	17,0	17,3	18,4	16,2	8,15	8,49	7,49
	81	31	41	41	95	9	9	6
Masse d'eau	1,84	1,67	1,95	2,16	1,30	1,64	1,79	1,44
	7	1	1	1	9	2	2	5
Masse du sol sec	4,70	4,25	5,03	5,57	3,51	4,42	4,9	3,94
	5	8	1	8	5	4		3
Teneur en eau	39,2	39,2	38,7	38,7	37,2	37,1	36,5	36,6
	56	44	80	41	40	16	71	47
Moyenne %	39,250		38,761		37,178		36,609	
Moyenne Générale %	37,95							

Tableau A.22

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Masse de la tare	4,13 9	3,81 7	3,94 9	3,6	3,48 8	4,10 3	3,96 2	3,61 6
Masse du sol humide + la tare	5,52	5,04 2	5,45 8	5,00 1	4,73 7	5,29 5	5,23	5,21 5
Masse du sol sec + la tare	5,24 4	4,79 4	5,15 7	4,72 3	4,49	5,05 5	4,97 8	4,89 9
Masse d'eau	0,28	0,25	0,30	0,28	0,25	0,24	0,25	0,32
Masse du sol sec	1,11	0,98	1,21	1,12	1,00	0,95	1,02	1,28
Teneur en eau	24,9 77	25,3 84	24,9 17	24,7 55	24,6 51	25,2 10	24,8 03	24,6 30
Moyenne %	25,181		24,836		24,930		24,716	
Moyenne Générale %	24,92							

Tableau A.23 8% Matine.

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Masse de la tare	3,71 4	3,96 5	3,92 2	4,10 2	3,99 7	3,79 1	3,37 6	3,69 8
Masse du sol humide + la tare	11,9 64	11,5 16	9,83 2	9,95 7	9,82 4	9,43 3	8,39 5	10,7 95
Masse du sol sec + la tare	9,72 5	9,47 6	8,25 8	8,39 2	8,29 6	7,94 8	7,09 4	8,95 5
Masse d'eau	2,23 9	2,04	1,57 4	1,56 5	1,52 8	1,48 5	1,30 1	1,84
Masse du sol sec	6,01 1	5,51 1	4,33 6	4,29	4,29 9	4,15 7	3,71 8	5,25 7
Teneur en eau	37,2 48	37,0 17	36,3 01	36,4 80	35,5 43	35,7 23	34,9 92	35,0 01
Moyenne %	37,133		36,390		35,633		34,996	
Moyenne Générale %	36,04							

Tableau A.24

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Masse de la tare	3,65	3,55 3	3,74 9	3,93 5	3,82 5	3,84 6	3,81 9	3,64 7
Masse du sol humide + la tare	4,68 4	4,52 1	5,20 1	5,05 4	5,43 7	5,35 1	4,84 8	5,26 6
Masse du sol sec + la tare	4,46 6	4,31 9	4,90 2	4,82 1	5,10 4	5,04 1	4,63 1	4,92 9
Masse d'eau	0,22	0,20	0,30	0,23	0,33	0,31	0,22	0,34
Masse du sol sec	0,82	0,77	1,15	0,89	1,28	1,20	0,81	1,28
Teneur en eau	26,7 16	26,3 71	25,9 32	26,2 98	26,0 36	25,9 41	26,7 24	26,2 87
Moyenne %	26,543		26,115		25,989		26,506	
Moyenne Générale %	26,29							

Tableau A.25 10% Matine.

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Masse de la tare	12,8 63	12,8 21	12,7 72	12,8 1	12,7 93	3,48 1	3,85 1	4,82 2
Masse du sol humide + la tare	18,4 08	18,2 39	20,1 04	18,3 14	20,4 09	8,64	9,25 9	10,0 19
Masse du sol sec + la tare	16,9 04	16,7 94	18,1 83	16,8 78	18,4 65	7,32 1	7,89 7	8,71 8
Masse d'eau	1,50 4	1,44 5	1,92 1	1,43 6	1,94 4	1,31 9	1,36 2	1,30 1
Masse du sol sec	4,04 1	3,97 3	5,41 1	4,06 8	5,67 2	3,84	4,04 6	3,89 6
Teneur en eau	37,2 19	36,3 71	35,5 02	35,3 00	34,2 74	34,3 49	33,6 63	33,3 93
Moyenne %	36,795		35,401		34,311		33,528	
Moyenne Générale %	35,01							

Tableau A.26

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Masse de la tare	3,72	3,62	3,98	3,60	3,45	3,23	3,84	4,05
	2	5	2	1	1		1	3
Masse du sol humide + la tare	5,07	5,25	5,89	5,34	4,77	4,83	5,42	5,25
	4	1	1		5	9	9	2
Masse du sol sec + la tare	4,78	4,89	5,48	4,96	4,49	4,49	5,08	4,98
		6		3	5	4	6	4
Masse d'eau	0,29	0,36	0,41	0,38	0,28	0,35	0,34	0,27
Masse du sol sec	1,06	1,27	1,50	1,36	1,04	1,26	1,25	0,93
Teneur en eau	27,7	27,9	27,4	27,6	26,8	27,2	27,5	28,7
	88	31	37	80	20	94	50	86
Moyenne %	27,860		27,558		27,057		28,168	
Moyenne Générale %	27,66							

Tableau A.27

Dosage en ciment	0%	2%	4%	6%	8%	10%
Limite de liquidités (Wl)%	42.20	38.44	38.15	37.62	33.76	31.63
Limite de plasticité (WP) %	21.01	23.37	23.74	24.13	24.61	25.54
Indice de plasticité IP	21.19	15.07	14.40	13.50	9.15	6.09

Tableau A.28

Dosage en ciment	0%	2%	4%	6%	8%	10%
Limite de liquidités (Wl)%	41.85	39.51	38.11	37.95	36.04	35.01
Limite de plasticité (WP) %	21.63	23.12	23.31	24.92	26.29	27.66
Indice de plasticité IP	20.22	16.39	14.80	13.03	9.75	7.35

Tableau A.29

Dosage en ciment	0%	2%	4%	6%	8%	10%
Limite de liquidités (Wl)%	41.64	39.97	38.09	37.03	33.87	31.83
Limite de plasticité(WP) %	21.38	24.07	25.26	25.89	26.06	26.89
Indice de plasticité IP	19.26	15.90	12.84	11.14	7.81	4.94

Tableau A.30

Dosage en ciment	0%	2%	4%	6%	8%	10%
Limite de liquidités (Wl)%	42.92	38.44	38.15	37.63	32.11	32.71
Limite de plasticité (WP) %	20.10	23.37	23.74	23.59	23.61	24.61
Indice de plasticité IP	18.28	15.07	14.40	14.04	8.50	8.10

Essai Proctor

Tableau A.31

Teneur en eau approximative (%)	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm ³)	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3395,30	3482,30	3633,10	3687,40	3677,20
Masse du sol humide (g)	1685,40	1772,40	1923,20	1977,50	1967,30
Masse volumique humide (g/cm ³)	1,79	1,88	2,04	2,09	2,08
Masse de la tare (g)	145,70	147,40	143,80	147,10	148,10
Masse sol humide + tare (g)	389,70	464,40	526,80	288,38	653,40
Masse sol sec + tare (g)	369,00	432,50	481,50	270,00	579,30
Masse d'eau (g)	20,70	31,90	45,30	18,38	74,10
Masse du sol sec (g)	223,30	285,10	337,70	122,90	431,20
Teneur en eau W (%)	9,27	11,19	13,41	14,95	17,18
Masse volumique sèche (g/cm ³) ; $\rho_d = \rho_h / (1+W)$	1,64	1,69	1,80	1,83	1,78

Tableau A.32

Teneur en eau approximative (%)	1 0 %	12 %	14 %	16 %	18 %
Masse du moule (g)	1709, 09	1709 ,09	1709, 09	1709 ,09	1709, 09
Volume du moule (cm ³)	9 42	9 42	9 42	9 42	9 42
Masse du sol humide avec moule (g)	3351, 80	3397 ,50	3640, 30	3696 ,90	3660, 50
Masse du sol humide (g)	1642, 71	1688 ,41	1931, 21	1987 ,81	1951, 41
Masse volumique humide (g/cm ³)	1,7 4	1 ,79	2, 05	2, 11	2, 07
Masse de la tare (g)	143, 70	147, 20	145, 30	144, 60	140, 60
Masse sol humide + tare (g)	238, 00	315, 80	411, 00	325, 20	403, 60
Masse sol sec + tare (g)	231, 10	301, 70	378, 80	300, 40	364, 80
Masse d'eau (g)	6 ,9	1 4,10	32 ,20	24 ,80	38 ,80
Masse du sol sec (g)	87,4 0	154, 50	233, 50	155, 80	224, 20
Teneur en eau W (%)	7,8 9	9 ,13	13 ,79	15 ,92	17 ,30
Masse volumique sèche (g/cm ³) ; $\rho_d = \rho_h / (1+W)$	1,5 5	1 ,62	1, 80	1, 82	1, 77

Tableau A.33

Teneur en eau approximative (%)	1 0 %	12 %	14 %	16 %	18 %
Masse du moule (g)	1709, 09	1709 ,09	1709, 09	1709 ,09	1709, 09
Volume du moule (cm ³)	9 42	9 42	9 42	9 42	9 42
Masse du sol humide avec moule (g)	3362, 60	3396 ,40	3642, 10	3682 ,30	3672, 10
Masse du sol humide (g)	1653, 51	1687 ,31	1933, 01	1973 ,21	1963, 01
Masse volumique humide (g/cm ³)	1,7 5	1 ,79	2, 05	2, 09	2, 08
Masse de la tare (g)	147, 40	145, 30	144, 60	147, 10	144, 10
Masse sol humide + tare (g)	392, 40	392, 60	536, 40	290, 50	563, 30
Masse sol sec + tare (g)	372, 10	367, 50	492, 60	272, 90	501, 60
Masse d'eau (g)	20,3 0	2 5,10	43 ,80	22 ,60	61 ,70
Masse du sol sec (g)	224, 70	222, 20	348, 00	125, 80	357, 50
Teneur en eau W (%)	9,0 3	1 1,30	12 ,59	13 ,99	17 ,25
Masse volumique sèche (g/cm ³) ; $\rho_d = \rho_h / (1+W)$	1,5 9	1 ,60	1 ,8	1, 81	1, 77

Tableau A.34 Chamil.

		10%	12%	14%	16%	18%
sol naturel	Wopt	7.89	9.13	13.79	15.92	17.30
	γ_d	1.55	1.62	1.80	1.82	1.77
6%	Wopt	11.06	12.82	14.20	15.14	18.84
	γ_d	1.66	1.70	1.76	1.82	1.75
8%	Wopt	11.04	12.09	15.31	16.62	21.61
	γ_d	1.68	1.75	1.77	1.80	1.71
10%	Wopt	11.06	12.43	14.66	17.01	21.70
	γ_d	1.68	1.74	1.78	1.79	1.71

Figure A.9

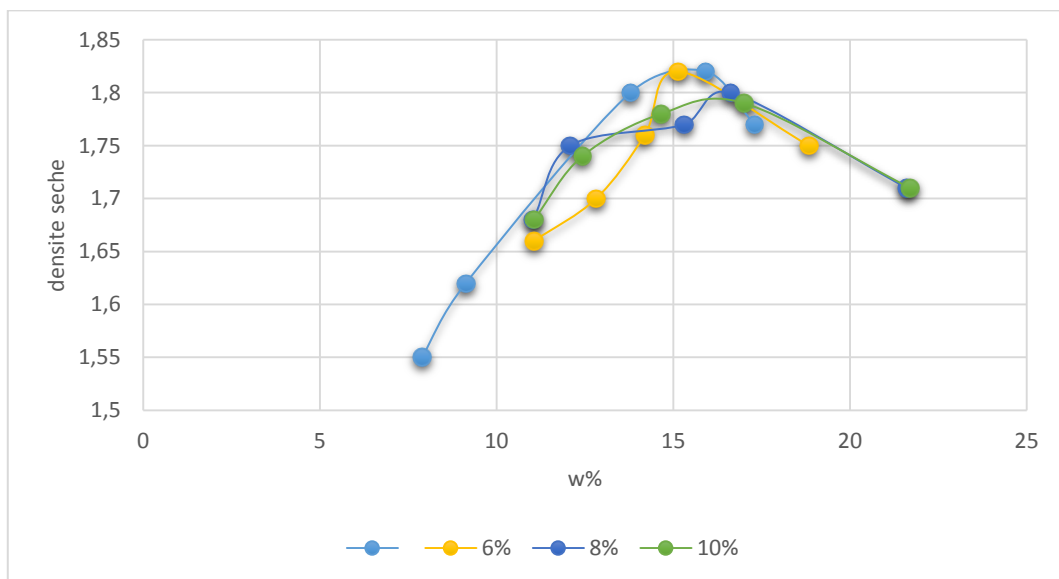
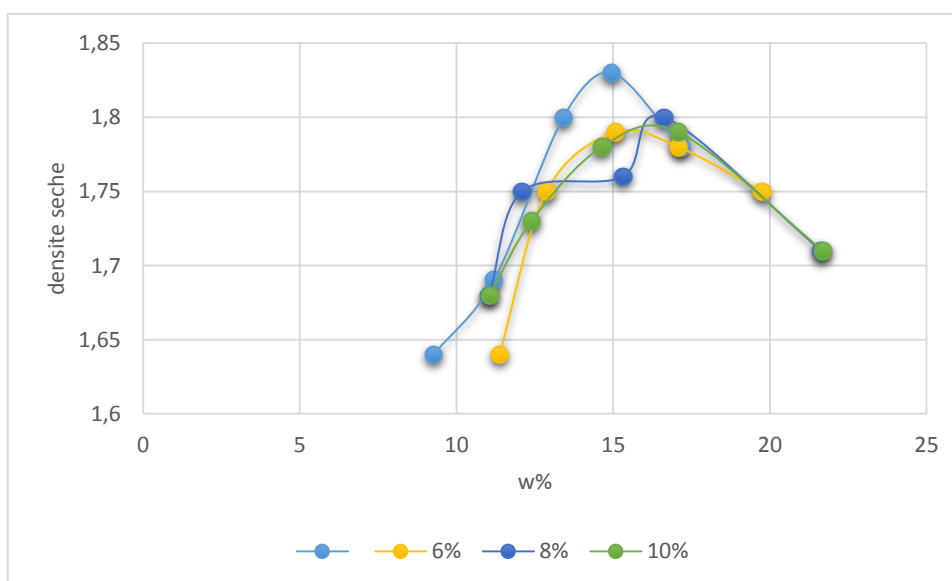


Tableau A.35 Matine.

		10%	12%	14%	16%	18%
sol naturel	Wopt	9,27	11,19	13,41	14,95	17,18
	γ_d	1,64	1,69	1,80	1,83	1,78
6%	Wopt	11,37	12,87	15,08	17,08	19,75
	γ_d	1,64	1,75	1,79	1,78	1,75
8%	Wopt	11,04	12,09	15,31	16,62	21,64
	γ_d	1,68	1,75	1,76	1,80	1,71
10%	Wopt	11,06	12,39	14,64	17,08	21,69
	γ_d	1,68	1,73	1,78	1,79	1,71

Figure A.10



Essai C.B.R immédiat

Tableau A.36

Enfoncements	0	0, 675	1 ,25	2	2 ,5	5	7 ,5	1 0
Force de poinçonnement(KN)	0	0 .33	0 .46	0 .59	0 .61	0 .99	1 .17	1 .24
Indice C, B, R immédiat à 2,5mm(%)	4.53							
Indice C, B, R immédiat à 5mm(%)	4.98							
Indice C, B, R max (%)	4.98							

Tableau A.37

Enfoncements	0	0, 675	1 ,25	2	2 ,5	5	7 ,5	1 0
Force de poinçonnement(KN)	0	0 .39	0 .50	0 .60	0 .63	1 .01	1 .21	1 .29
Indice C, B, R immédiat à 2,5mm(%)	4.68							
Indice C, B, R immédiat à 5mm(%)	5.08							
Indice C, B, R max (%)	5.08							

Tableau A.38

Enfoncemenets	0	0.62 5	1. 25	2	2. 5	5	7. 5	10
Force de poinçonnement(KN)	0	0.31	0. 50	0. 55	0. 60	0. 98	1. 11	1.2 8
Indice C, B, R immédiat à 2,5mm(%)	4.48							
Indice C, B, R immédiat à 5mm(%)	4.91							
Indice C, B, R max (%)	4.91							

Tableau A.39 Chamil.

% des ciment		0	6	8	10
Temps (s)	Enfoncement (mm)				
0	0	0	0	0	0
2	0,675	0,394	0,899	1,030	1,102
4	1,25	0,503	1,056	1,245	1,244
6	2	0,597	1,766	2,195	1,942
8	2,5	0,625	2,146	2,274	2,381
15	5	1,012	2,524	2,596	2,827
23	7,5	1,206	3,867	3,422	3,246
35	10	1,294	4,010	3,735	3,662
ICBR à 2, 5 mm (%)		4 .68	1 6.07	1 7.03	1 7.84
ICBR à 5 mm (%)		5 .08	1 2.66	1 3.03	1 4.18
ICBR max (%)		5 .08	1 6.07	1 7.03	1 7.84

Figure A.11

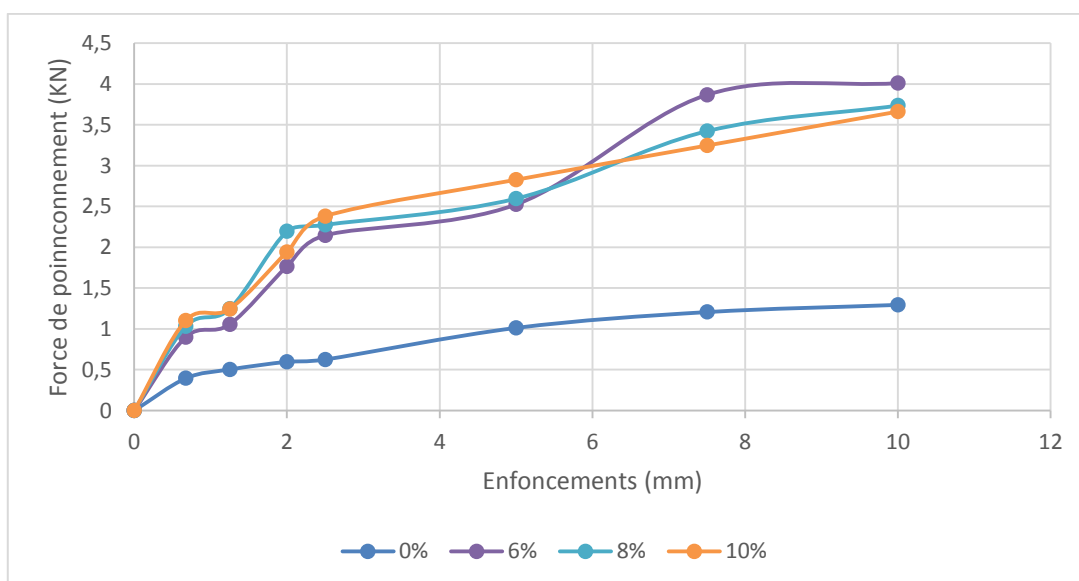
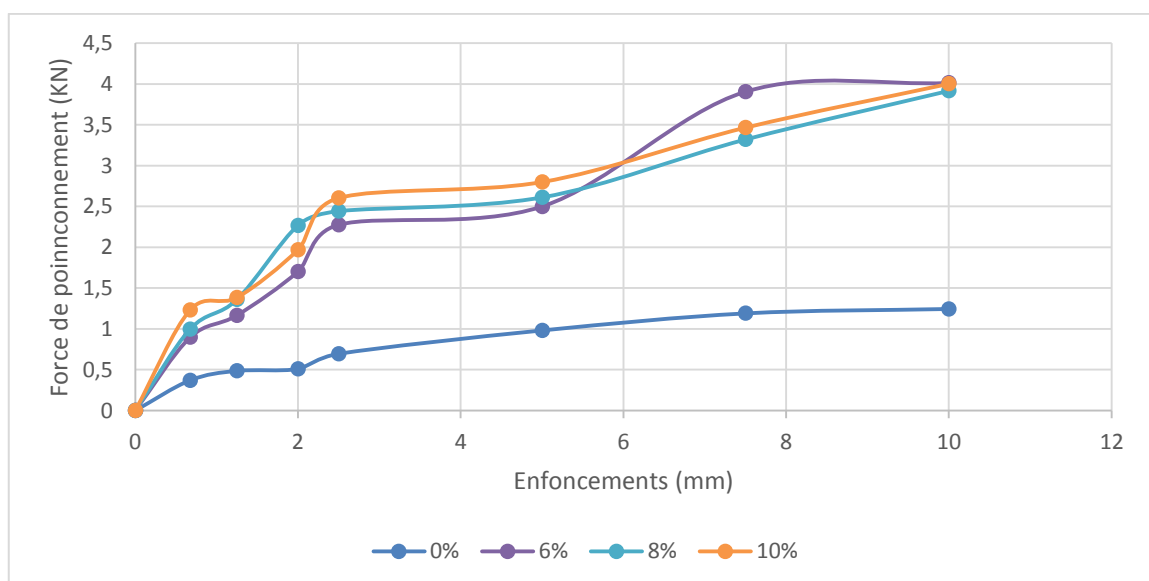


Tableau A.40 Matine.

% des ciments		0	6	8	10
Temps (s)	Enfoncement (mm)				
0	0	0	0	0	0
2	0,675	0,370	0,896	0,997	1,231
4	1,25	0,486	1,166	1,359	1,384
6	2	0,509	1,703	2,268	1,969
8	2,5	0,695	2,275	2,442	2,603
15	5	0,981	2,499	2,611	2,799
23	7,5	1,190	3,905	3,320	3,465
35	10	1,244	4,013	3,916	4,002
ICBR à 2, 5 mm (%)		5 .21	1 7.04	1 8.29	1 9.50
ICBR à 5 mm (%)		4 .92	1 2.54	1 3.10	1 4.04
ICBR max (%)		5 .21	1 7.04	1 8.29	1 9.50

Figure A.12



Essai C.B.R imbibé

Tableau A.41

Enfoncements	0	0, 675	1 ,25	2	2 ,5	5	7 ,5	1 0
Force de poinçonnement(KN)	0	0 .27	0 .36	0 .51	0 .60	0 .68	0 .79	0 .91
Indice C, B, R immédiat à 2,5mm(%)	4.49							
Indice C, B, R immédiat à 5mm(%)	3.43							
Indice C, B, R max (%)	4.49							

Tableau A.42

Enfoncements	0	0, 675	1 ,2 5	2	2 ,5	5	7 ,5	1 0
Force de poinçonnement(KN)	0	0 .38	0 .4 8	0 .5 6	0 .6 4	0 .7 9	0 .8 7	0 .9 6
Indice C, B, R immédiat à 2,5mm(%)	5.77							
Indice C, B, R immédiat à 5mm(%)	3.94							
Indice C, B, R max (%)	5.77							

Tableau A.43

Enfoncemenets	0	0.62 5	1. 25	2	2. 5	5	7. 5	10
Force de poinçonnement(KN)	0	0.36	0. 48	0. 52	0. 63	0. 79	0. 88	0.9 8
Indice C, B, R immédiat à 2,5mm(%)	4.73							
Indice C, B, R immédiat à 5mm(%)	3.97							
Indice C, B, R max (%)	4.73							

Tableau A.44 Chamil.

% des ciments		0	6	8	10
Temps (s)	Enfoncement (mm)				
0	0	0	0	0	0
2	0,675	0,270	4,200	5,234	6,500
4	1,25	0,357	6,850	8,345	11,700
6	2	0,513	8,230	9,345	13,400
8	2,5	0,599	8,700	11,218	14,300
15	5	0,684	9,150	14,326	17,908
23	7,5	0,792	10,035	16,780	19,200
35	10	0,912	10,380	17,036	19,300
ICBR à 2, 5 mm (%)		4 .49	6 5.17	84 .03	1 07.1 2
ICBR à 5 mm (%)		3 .43	4 5.91	71 .88	8 9.85
ICBR max (%)		4 .49	6 5.17	84 .03	1 07.1 2

Figure A.13

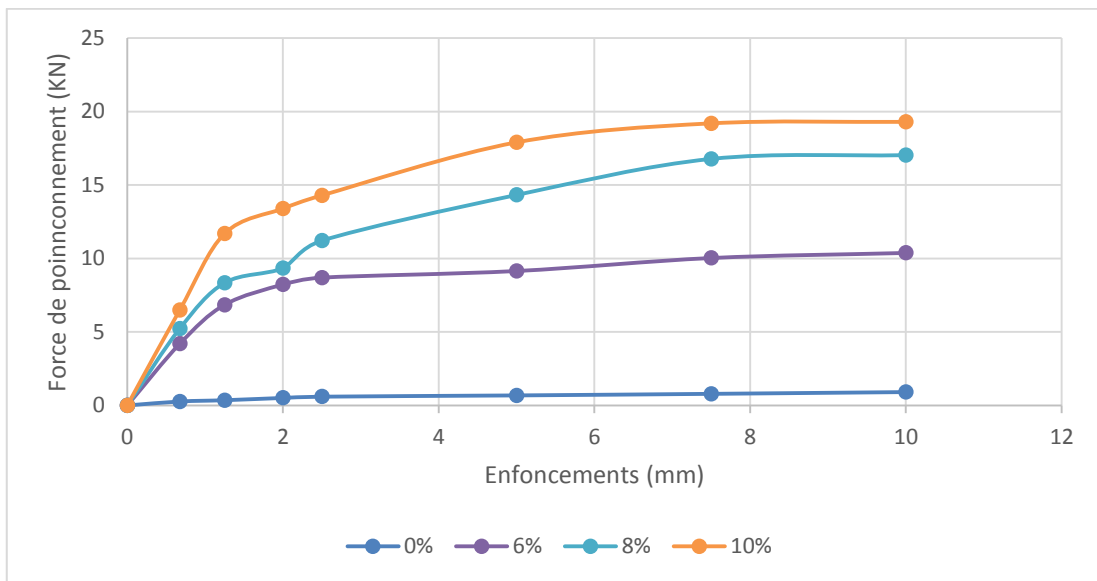


Tableau A.45 Matine.

% des ciments		0	6	8	10
Temps (s)	Enfoncement (mm)				
0	0	0	0	0	0
2	0,675	0,287	7,400	8,023	8,920
4	1,25	0,390	9,305	10,105	11,304
6	2	0,514	9,550	13,356	17,125
8	2,5	0,610	9,660	15,064	18,430
15	5	0,697	10,101	19,450	24,306
23	7,5	0,802	10,903	21,101	29,003
35	10	0,917	11,950	22,905	32,083
ICBR à 2,5 mm (%)		4 .57	7 2.36	11 2.84	1 38.0 5
ICBR à 5 mm (%)		3 .50	5 0.68	9 .56	1 21.9 6
ICBR max (%)		5 .57	7 2.36	11 2.84	1 38.0 5

Figure A.14

