

**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° : .....



**OPTION : GEOTECHNIQUE**

**MEMOIRE**

**Présenté Pour l'obtention Du diplôme de Master Académique**

**Par :**

**SENADLA souad**

**SAGHIOUR zeyneb**

**THEME**

**Étude de l'évolutivité d'une argile expansive  
traitée au ciment Matine et fortement compactée**

**Soutenu devant le jury composer de :**

<b>Dr . RAHMOUNI Zine Elabidine</b>	<b>Prof., Université de m'sila</b>	<b>Président</b>
<b>Dr. TALLAH Naoui</b>	<b>MCB, Université de m'sila</b>	<b>Examineur</b>
<b>Dr. KHEMISSA Mohamed</b>	<b>Prof., Université de m'sila</b>	<b>Encadreur</b>
<b>Dr. MEKKI Lakhdar</b>	<b>MCB, Université de m'sila</b>	<b>Rapporteur</b>

**Année universitaire : 2020 /2021**



## ***Dédicaces***

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ceux qui ont su planter en moi, tout ce qui est de plus beau en ce monde, et  
Qui se sont consacrés à m'inculquer la bonne éducation pour avoir la plus  
Grande des satisfactions et me voir muni des plus grandes distinctions.*

*A mon très cher père qu'il a su se faire sentir dans les moments difficiles ainsi  
Que chaque instant de bonheur qu'il m'a procuré*

*Ma très chère maman pour son amour, son aide ; son soutien et son  
Encouragement, que dieu me la garde en très bonne santé.*

*Mes très chers frères : Abdelatif, abed-elhak*

*Ma très chère sœur : noor houda, sans oublier ces enfants adem, Mohamed,  
aboud*

*A ma chère sœur, Pour ses soutiens moraux et leurs conseils précieux tout au long  
de mes études : Amel*

***UNE SPECIALE DEDICACE A UNE PERSONNE QUI COMPTE DE JA  
ENORMEMENT POUR MOI, ET POUR QUI JE PORTE BCP DE***

***TENDRESSE ET DE RESPECT. A TOI Ma binôme zeyneb et toute sa famille  
À tous les enseignants du département de Génie Civil***

***A tous mes amis et à toute ma promotion du Département de Génie Civil-option  
GEOTECHNIQUE sans exception et à toute personne que j'ai connue et que j'ai  
aimée.***

**SENADLA.SOUAD**



## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*Je dédie ce modeste travail aux personnes qui m'ont consacré de leur temps et de leur force afin de m'aider à réussir, aux personnes qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre.*

*A mon cher père « Fateh », qui m'a toujours encouragé pour que je puisse attendre à mon objectif*

*A ma chère mère « Safia » qui a tout fait sans hésitation, et qui m'encouragé vers la science et vers le succès*

*A mes chers frères: Adnan, Haydar et Hicham*

*A mes nièces Nélia et Sandra, mes sœurs Houda, Rania et ma cousine Hadjer. Chaleureux remerciement vont également à ma binôme **SOUAD** pour sa simplicité, le soutien, les conseils, l'aide, elle m'a toujours encouragé pour réaliser ce travail.*

*A tous mes très chères amies et toute ma famille et a toutes les autres personnes que j'aime et que ma mémoire omet de citer...*

*A la mémoire de ma grande mère: Ladgham chikouche Zouina repose en paix puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit.*

**« SAGHIOUR ZEYNEB »**

## *Remerciements*

Tout Notre gratitude et remerciements vont au bon Dieu le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour effectuer ce travail. Il ne nous aurait été possible, à nous seul, d'achever le présent travail sans l'assistance, Aussi, noter encadreur, Pr KHEMISSA Mohamed et Co-encadreur, Dr MEKKI Lakhdar, qui nous ont soutenus et appuyé pour nos recherches ainsi que pour la réalisation de notre projet de fin d'étude.

Nos sincères remerciements vont au président et aux membres du jury de soutenance qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail.

On tient également à remercier Monsieur benzaoui smail le délégué du géotechnique pour sa disponibilité et laide dès le début de nos essais jusqu'à la fin.

On ne saurait oublier d'exprimer nos remerciements à tous les enseignants du département de Génie Civil qui ont contribué à notre formation, ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont permis, de près ou de loin, de mener à bien ce travail, trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance ous tenons également à remercier chaleureusement des techniciennes du Laboratoire Centrale des Travaux Publics (LCTP, Antenne de M'sila), ainsi que l'ensemble du personnel pour leur aide à certaines étapes de cette étude.

## الملخص

تعرض هذه الرسالة وتحلل نتائج دراسة تم إجراؤها لتحسين طين منتفخ مأخوذ من بلدية سيدي هجرس (ولاية المسيلة)، حيث تظهر الاضطرابات في كثير من الأحيان في البنى التحتية للطرق والشبكات المختلفة والإنشاءات الخفيفة (أجنحة، مباني منخفضة الارتفاع، طرق).

تهدف الدراسة التي تم إجراؤها إلى تحديد المعلمات الفيزيائية والميكانيكية لهذا الطين الطبيعي المعالج بإسمنت بورتلاند مكون من نوع متين (CPJCEM II / B 42.5 R-NA 442) وضغطه تحت ظروف بروكتور الأمثل، ثم لتحليل تأثير العلاج على خواصه الميكانيكية. تسمح نتائج الاختبار التي تم الحصول عليها باستنتاج أن العلاج يؤدي إلى تحسن كبير في الخواص الميكانيكية لهذا الطين المنتفخ.

**الكلمات المفتاحية:** الطين المنتفخ، الدمك، المعالجة، الأسمنت، القابلية للتفتت والتحلل.

## Résumé

Ce mémoire présente et analyse les résultats d'une étude effectuée pour l'amélioration d'une argile expansive prélevée dans la commune de Sidi-Hadjrès (wilaya de M'sila), où d'importants désordres apparaissent fréquemment dans les infrastructures routières, voiries et réseaux divers, les constructions légères (pavillons, bâtiments de faible hauteur, routes).

L'étude effectuée vise à déterminer les paramètres physiques et mécaniques de cette argile naturelle traitée par un ciment Portland composé de type MATINE (CPJCEM II/B 42,5 R-NA 442) et compactée aux conditions de l'optimum Proctor modifié, puis à analyser l'influence du traitement sur ses propriétés mécaniques. Les résultats d'essais obtenus permettent de conclure que le traitement conduit à une amélioration sensible des propriétés mécaniques de cette argile expansive.

Mots-clés: argile expansive, compactage, traitement, ciment, fragmentabilité et dégradabilité.

## **Abstract**

This thesis presents and analyzes the results of a study carried out for the improvement of an expansive clay taken in the commune of Sidi-Hadjrès (wilaya of M'sila), where major disorders frequently appear in road infrastructures, roads and various networks, light constructions (pavilions, low-rise buildings, roads).

The study carried out aims to determine the physical and mechanical parameters of this natural clay treated with a Portland cement composed of MATINE type (CPJCEM II / B 42.5 R-NA 442) and compacted under the conditions of the modified Proctor optimum, then to analyze the influence of the treatment on its mechanical properties. The test results obtained allow concluding that the treatment leads to a significant improvement in the mechanical properties of this expansive clay.

**Keywords:** expansive clay, compaction, treatment, cement, fragmentability and degradability

## SOMMAIRE

### **Dédicaces**

*Remerciements*

ملخص

Résumé

Abstract

Liste des figures

Liste des Tableaux

*Introduction Générale*

Chapitre I

Synthèse bibliographies

**Erreur ! Signet non défini.**

I. 1.1 Introduction : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.1.2 Définition des sols..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.1.3 Terminologie des matériaux ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.1.4 Des argiles:..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.1.5 STRUCTURE DES ARGILES (rappels)..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.1.6 TYPES D'ARGILES ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.1.7 Retrait-Gonflement Argiles en Algérie..... **Erreur ! Signet non défini.**

Partie 2: ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.1 Traitement des sols ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I .2.2 Le ciment:

.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.2. 3 Stabilisation par ciment.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
chapitre III Programme expérimental et procédures d'essais	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.1 Introduction .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II. 2. Localisation .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II. 3. PROGRAMME EXPERIMENTAL EXECUTE.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.Chapitre PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS D'ESSAIS.....	<b>Erreur !</b>
<b>Signet non défini.</b>	
<i>.Introduction</i> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.1.1. Analyse granulométrique: .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.1.2. - <i>Analyse granulométrique par sédimentométrie:</i> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.1.3 <i>Limites d'atterberg:</i> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.1.4 <i>Résultats L'essai de bleu méthylène (VBS):</i> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.2.1. Les essais mécaniques III.2.2.1. Essais Proctor modifié.	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<i>III.2 Résultats ESSAI CBR:</i> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<i>a) Essai C.B.R immédiat:</i> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<i>b) Essai C.B R après imbibition:</i> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.3.Paramètres d'évolutivité.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
a/ Coefficient de fragmentabilité.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
b/ Coefficient de dégradabilité .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<i>Conclusion général d'essais:</i> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
CONCLUSION GENERALE	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Références bibliographiques	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

## Liste des figures

### Chapitre I

Figure I.1 Terminologie d'un sol. .... Erreur ! Signet non défini.

Figure I.2 Schéma de poids et volume des constituants d'un sol..... Erreur ! Signet non défini.

Figure I.3: Classification des sols selon la nomenclature GTR (norme NF P 11 300)  
..... Erreur ! Signet non défini.

Figure I.4-Schéma de généralités sur argiles. .... Erreur ! Signet non défini.

Figure I.5.schemas des particules des sol humide et fin. .... Erreur ! Signet non défini.

Figure 1.6-Abaque de plasticité de Casa grande CLASSIFICATION L.P.C. DES  
SOLS FINS..... Erreur ! Signet non défini.

Figure I.7: Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles  
(Mitchell, 1976). .... Erreur ! Signet non défini.

Figure I.8: Conditions d'utilisation de la stabilisation chimique (Dept. of the Army,  
1983). .... Erreur ! Signet non défini.

Figure I.9 : La composition du ciment. .... Erreur ! Signet non défini.

chapitre II Erreur ! Signet non

défini.

Figure II.1. Le site urbain de Sidi-Hadjrès (wilaya de M'sila, Algérie) .Erreur ! Signet non défini.

Figure II.2. Image satellite prise le 2017, (Source Google Earth)..... Erreur ! Signet non défini.

Figure II.3 : préparation de Echantillon. .... Erreur ! Signet non défini.

Figure II.4 Appareillage d'analyse granulométrique (tamisage). Erreur ! Signet non défini.

Figure II.5: courbes des différents sol d'analyse granulométrique .....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.6: Appareillage d'analyse granulométrique (sédimentométrie)..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.7: Appareillage de limites d'Atterberg.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure III.8: Diagramme de Casa grande (Philipponnat et Hubert.1997)..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.9. Classification Williams et Donald son (1980) ... (2).....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.10 : appareillage de l'essai au bleu de méthylène. ....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.11: Appareil de l'essai Proctor ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.12 : Echantillons après compactage. ....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.13. Appareil de poinçonnement. ....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.14. Imbibition des Essai C. B.R ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.15. Essai dégradabilité (source : SETRA).....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.16. Essai fragemtabilité (source : SETRA) .....**Erreur ! Signet non défini.**

---

Chapitre III .. **Erreur ! Signet non défini.**

*La figure III.1 Présente les courbes des essais d'analyse granulométrique par tamisage* .....**Erreur ! Signet non défini.**

*La figure III.2 courbe Analyse granulométrique par sédimentométrie l'essai 01 ....***Erreur ! Signet non défini.**

*La figure III. 3 courbe Analyse granulométrique par sédimentométrie l'essai 02 ...***Erreur ! Signet non défini.**

*La figure III.4- Courbe d'analyse granulométrique (tamisage et sédimentométrie).* **Erreur ! Signet non défini.**

*La figure III.5 La courbe de limite de liquidité du sol naturel de l'essai N°1* **Erreur ! Signet non défini.**

*La figure III.6 : LA COURBE DE Limite de liquidité en fonction du dosage en ciment.*  
Essai N 01.....**Erreur ! Signet non défini.**

La figure III.6 : COURBE Limite de liquidité en fonction du dosage en ciment. Essai N 01  
..... **Erreur ! Signet non défini.**

La figure III.7 : COURBE DE Limite de liquidité en fonction du dosage en ciment.  
..... **Erreur ! Signet non défini.**

La figure III.8: courbe d'Indice de plasticité en fonction du dosage en ciment.....**Erreur ! Signet non défini.**

La figure III.9 : La courbe des résultats d'essais de limites d'Atterberg ..... **Erreur ! Signet non défini.**

La figure III.10 présente la courbe de variation de la valeur du bleu de méthylène en fonction du dosage en ciment..... **Erreur ! Signet non défini.**

La figure III.12 présente la courbe de variation de surface en fonction du dosage en ciment.  
..... **Erreur ! Signet non défini.**

La figure III.13 : présente la courbe de variation de la valeur du bleu de méthylène en fonction du dosage en ciment..... **Erreur ! Signet non défini.**

La figure III.14 présente la courbe de variation de la surface spécifique en fonction du dosage en ciment. .... **Erreur ! Signet non défini.**

La figure III.15 présente la courbe de variation de la volume de la solution en fonction du dosage en ciment. .... **Erreur ! Signet non défini.**

La figure III.16 : courbe La présente la récapitulation des résultats des séries d'essais de bleu de méthylène..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure III.17.courbe Proctor de sol naturel ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure III.18. courbe Proctor de sol traité par ciment matine.... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure. III.19. Histogramme De densité sèche en fonction des différents teneurs en ciment (matine). .... **Erreur ! Signet non défini.**

## LISTE DES TABLEAUX

### Chapitre I

**Tableau I.1 : les argiles et leur caractéristiques . ..... Erreur ! Signet non défini.**

**Tableau I.2: composants principaux du ciments portland (LAWTON 2004). ... Erreur ! Signet non défini.**

### chapitre II

Le tableau II.1: présente les caractéristiques physiques et chimiques du ciment. .... **Erreur ! Signet non défini.**

Le tableau II.2: pourcentage de CBR et sa classe de portance.... **Erreur ! Signet non défini.**

Le tableau II.3 : Qualité de sol avec l'indice CBR..... **Erreur ! Signet non défini.**

### Chapitre III

Tableau III. 1 : Analyse granulométrique par tamisage de l'essai 1 **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III.2: Analyse granulométrique par tamisage de l'essai 2 **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III .3 : Analyse granulométrique par tamisage de l'essai 3 **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III. 4: Analyse granulométrique par tamisage de l'essai 4 **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III. 5 : Analyse granulométrique par tamisage de l'essai 5 **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III. 6 : Analyse granulométrique par tamisage de l'essai 6 **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III.7: Récapitulation des essais de l'analyse granulométrique **Erreur ! Signet non défini.**

*Tableau III. 8 :Analyse granulométrique par sédimentométrie l'essai 1* **Erreur ! Signet non défini.**

*Tableau III. 9 :Analyse granulométrique par sédimentométrie l'essai 2* **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III.10 : Résultats des essais de limites d'Atterberg-sol naturel **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III.11 : Valeurs des limites de liquidité en fonction de la teneur en ciment suivants :2%/4%/6%/8%/10%/12% ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableaux *III.12* : Détermination de la limite de plasticité sol %2/4/6/8/10/12 DOSAGES ciment. .... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III.13 : Valeurs des limites de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité en fonction du dosage en ciment. .... **Erreur ! Signet non défini.**

Le tableau (III-14) d'essai N°01 : présente les valeurs des limites de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité en fonction du dosage en ciment. **Erreur ! Signet non défini.**

Le tableau (III-15) d'essai N°02 : présente les valeurs des limites de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité en fonction du dosage en ciment.**Erreur ! Signet non défini.**

Le tableau (III-16) d'essai N°03: présente les valeurs des limites de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité en fonction du dosage en ciment.**Erreur ! Signet non défini.**

Le tableau (III-17) d'essai N°04 : présente les valeurs des limites de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité en fonction du dosage en ciment.**Erreur ! Signet non défini.**

Le tableau (III-18) d'essai N°05: présente les valeurs des limites de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité en fonction du dosage en ciment.**Erreur ! Signet non défini.**

Le tableau (III-19) d'essai N°06 : présente les valeurs des limites de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité en fonction du dosage en ciment.**Erreur ! Signet non défini.**

Le tableau (III-20) : présente la récapitulation des résultats des séries d'essais de limites d'Atterberg .....**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III .21 Résultats de bleu méthylène (VBS) essai 1 .....**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III .22 Résultats de bleu méthylène (VBS) essai 2 .....**Erreur ! Signet non défini.**

Le tableau (III-23) : présente la récapitulation des résultats des séries d'essais de bleu de méthylène .....**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau. III.24. Résultats d'essai de compactage le sol naturel..**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau. III.25. Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par ciment matine. ....**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau. III.26. résultats de densité sèche et la teneur en eau en fonction des teneurs ciment (matine). ....**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau. III.27 :Des tableaux et figures présente l'ensemble des résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements, traitées à différents dosages en ciment. %2/4/6/8/10/12 .....**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau. III.28 : Résultats des indices C.B.R. immédiats pour différents dosages en ciment. ....**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau. III. 29 : Résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en ciment. .... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau. III.30 : Résultats des indices C.B.R. imbibés pour différents dosages en ciment. .... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau. III.31 figures présente l'ensemble des résultats des fragemntabilité traitées à différents dosages en ciment. %2/4/6/8/10/12 ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau. III.32. *Influence du traitement simple sur le coefficient de fragmentabilité de l'argile.* ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Des tableaux III.33 présente les valeurs du coefficient de dégradabilité obtenues pour chacun des dosages en ciment considérés. .... **Erreur ! Signet non défini.**

*Tableau III.34 : Influence du traitement simple sur le coefficient de dégradabilité de l'argile.* ..... **Erreur ! Signet non défini.**



## *Introduction Générale*

L'emploi des sols expansifs dans leur état naturel comme matériaux de remblais ou de couches de forme routières ou comme support de fondations des ouvrages géotechniques, est normalement déconseillé. Il devient possible après traitement spécifique à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (ciments et liants spéciaux routiers : clinker Portland, cendres volantes, pouzzolanes naturelles, laitier granulé de hauts fourneaux, schistes calcinés, calcaire) à l'instar des sols médiocres et autres sols problématiques. Cependant, l'utilisation d'autres produits de traitement comme le sable (d'oued ou de dunes), les solutions salées, le bitume, la poussière de pierres, etc... n'a pas encore fait ses preuves à l'échelle de la pratique. Le choix du mode de traitement simple (à la chaux ou au ciment) ou mixte (à la chaux et au ciment) dépend d'un certain nombre de considérations techniques (sols trop humides ou trop secs, destinés à une utilisation en remblais ou en couches de forme routières), économiques, environnementales et écologiques. Mais, les modalités d'exécution du traitement des sols en place sont régies par les normes spécifiques en vigueur. On peut simplement noter que l'aspect particulier des sols évolutifs doit être pris en considération si l'on veut garantir un traitement à la fois efficace et durable.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude expérimentale qui a pour objet, d'une part, de caractériser les propriétés de résistance et de déformabilité d'une argile naturelle expansive prélevée sur le site urbains de Sidi-Hadjrès (wilaya de M'sila), où d'importants désordres apparaissent fréquemment dans les infrastructures routières, voiries et réseaux divers et dans les constructions civiles et industrielles de faible hauteur et, d'autre part, de déterminer les paramètres physiques et mécaniques de cette argile naturelle expansive compactée aux conditions de l'optimum Proctor avant et après leur traitement par un ciment Portland composé de type MATINE (CPJCEM II/B 42,5 R-NA 442).

Ce mémoire comporte trois chapitres:

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique consacrée à l'étude phénoménologique du gonflement et des argiles expansives. Il présente une analyse microscopique d c'est-à-dire de l'interaction entre les particules d'argile et l'eau. Il aborde ensuite la caractérisation macroscopique au moyen d'essais en laboratoire destinés à définir les paramètres de gonflement pour le dimensionnement des ouvrages;

- Le deuxième chapitre présente le programme expérimental exécuté, puis décrit les procédures expérimentales suivies et les appareillages utilisés de la réalisation des essais;
- Le troisième chapitre présente et analyse les résultats d'essais obtenus.

# Chapitre I

Synthèse bibliographies

# Chapitre I

## Synthèse bibliographique

### I.1.1 Introduction :

Dans les études géotechniques les matériaux existant à la surface de l'écorce terrestre sont classés en deux grandes catégories:

- les roches: agglomérats de grains minéraux liés par des forces de cohésion forte et permanentes, même après immersion prolongée dans l'eau+ Mécanique des roches.
- les sols: agrégats de grains minéraux pouvant être séparés sous l'effet d'actions mécaniques relativement faibles+ Mécanique des sols.

Les matériaux de transition entre sols et roches sont nommés SIRT (sols indurés et roches tendres).

On notera que le géologue appelle sols tous les matériaux se trouvant à la surface de l'écorce terrestre.

Les sols sont des matériaux meubles, poreux, hétérogènes et souvent anisotropes. Les matériaux, minéraux ou organiques, sont généralement à l'état de grains ou de particules dont les formes et les dimensions sont essentiellement variables.

La synthèse bibliographique a été répartie en deux grandes parties:

- Une première partie a été menée, pour recueillir des informations qui concernent sols, les argiles
- Une deuxième partie a été menée, pour décrire le traitement des sols et leurs objectifs ...

### I.1.2 Définition des sols

Un sol est un assemblage hétérogène de particules ou de cristaux aux propriétés très variables : dimensions, formes, propriétés physico-chimiques, etc. Un sol contenant de l'argile sera influencé par la teneur en eau, c'est une question centrale en géotechnique.

La réalisation des remblais et des couches de forme nécessite d'étudier, pour des raisons économiques, la possibilité de réutiliser les matériaux de déblais extraits du sol avant de rechercher des matériaux d'emprunts.

### I.1.3 Terminologie des matériaux



Figure I.1 Terminologie d'un sol.

#### Terminologie utilisée en géotechnique routière

##### Sols:

- ✚ Constitues de grains plus ou moins gros facilement dissociables.
- ✚ Comprennent moins de 3% de matière organique.

##### Matériaux rocheux

- ✚ Matériaux naturels compacts.
- ✚ Dégagement avec moyens puissants (explosifs, engins puissants).

##### Sol organiques:

- ✚ Comprennent plus de 3% de matière organique.
- Sous-produits industriels :
- ✚ Produits de l'activité humaines (cendres volantes matériaux de démolition et haut – fourneaux,)
  - ✚ Pour sella, différents moyens d'analyse sont employés.....

#### - Caractéristiques d'un sol:

Un sol est un mélange d'éléments solides constituant les quelle solide, d'eau pouvant circuler ou non entre les particules et d'air ou de gaz

Sol = phase solide+ phase liquide + phase gazeuse

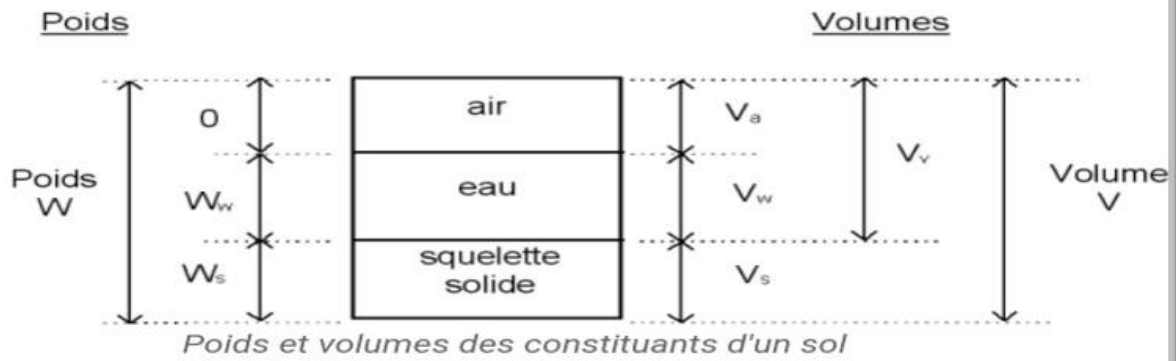


Figure 1.2 Schéma de poids et volume des constituants d'un sol

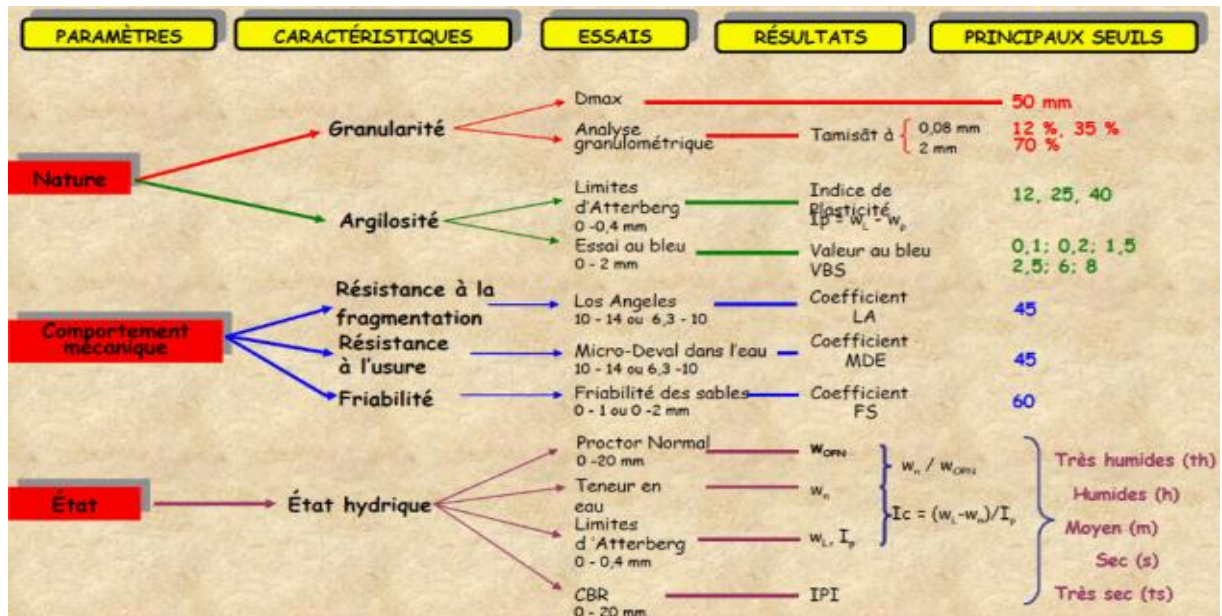
**Classification des particules solides d'un sol:**



L'utilisation du guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme

(GTR) Permet de: Déterminer les caractéristiques des matériaux

Définir leurs conditions de mise en œuvre en tenant compte de la météorologie au moment des travaux Classification des sols selon la nomenclature GTR (norme NF P 11 300)



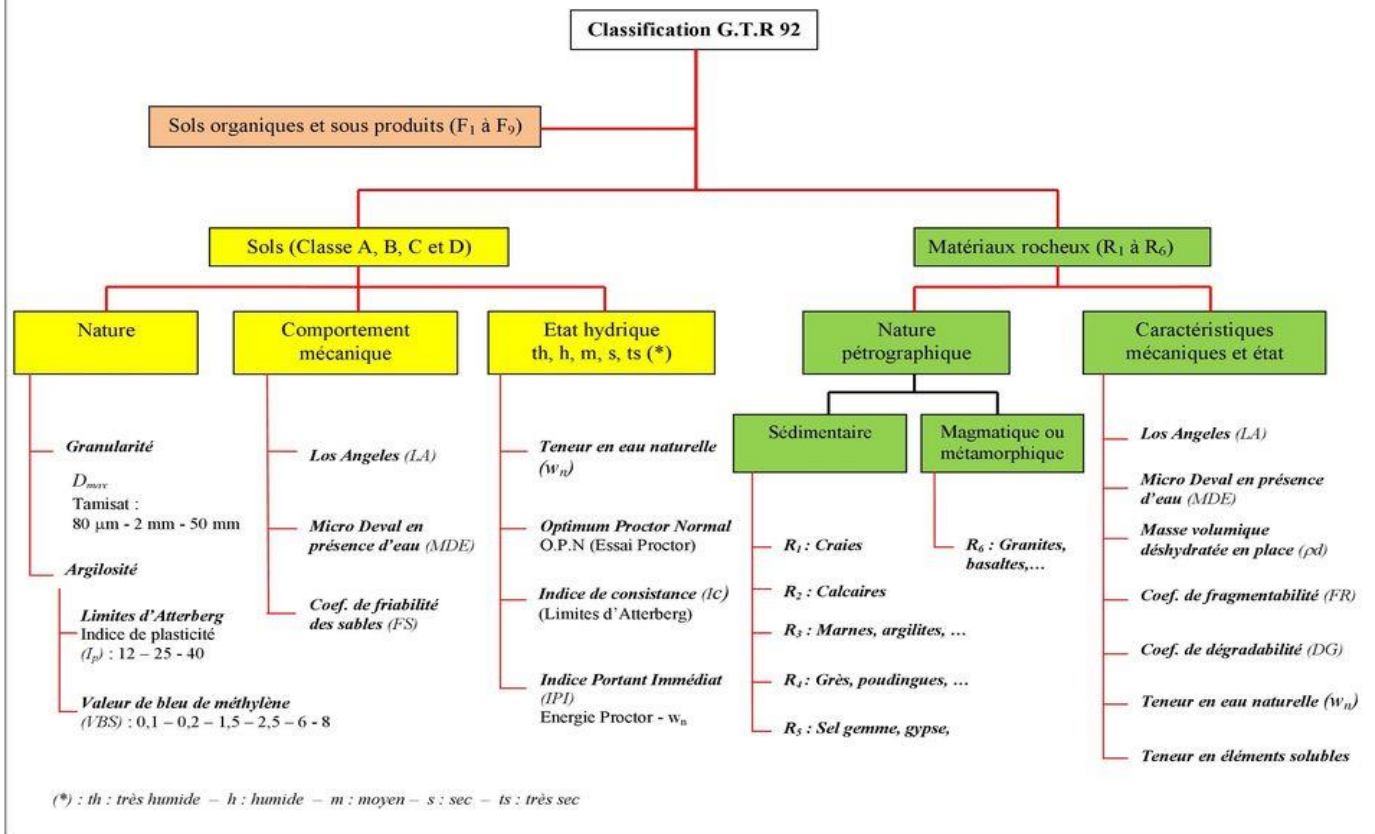


Figure I.3: Classification des sols selon la nomenclature GTR (norme NF P 11 300)

### I.1.4 Des argiles :

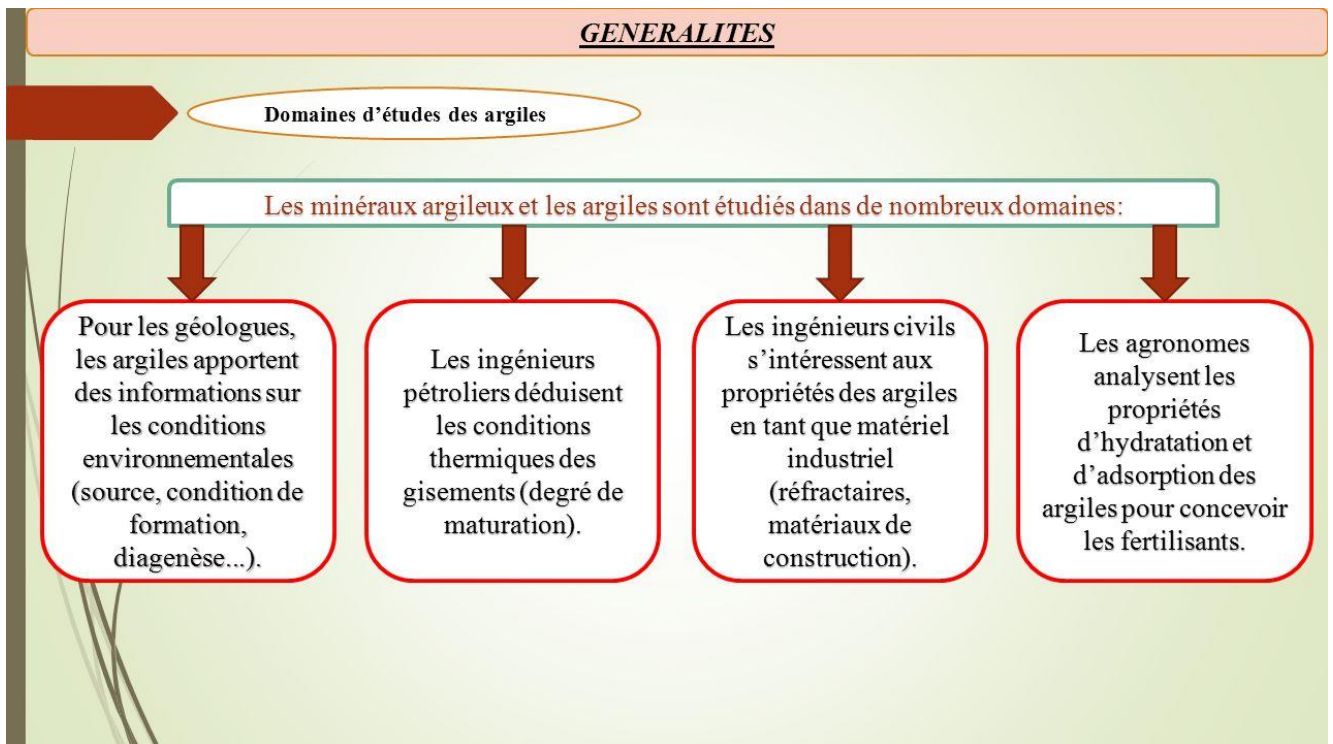


Figure I.4-Schéma de généralités sur argiles.

**Définition:** Les argiles proviennent de l'altération et de la dégradation des roches: altération physique sous l'effet des variations de température, et surtout altération chimique au contact de l'eau qui permet la dégradation en particules très fines. Leur diamètre équivalent varie approximativement de 1 nm à 0,002 mm L'argile est pratiquement imperméable, toutefois sa compressibilité est élevée et, en général, les charges qu'elle peut supporter sont de loin inférieures à celles que supportent le gravier et le sable.

### **I.1.5 STRUCTURE DES ARGILES (rappels)**

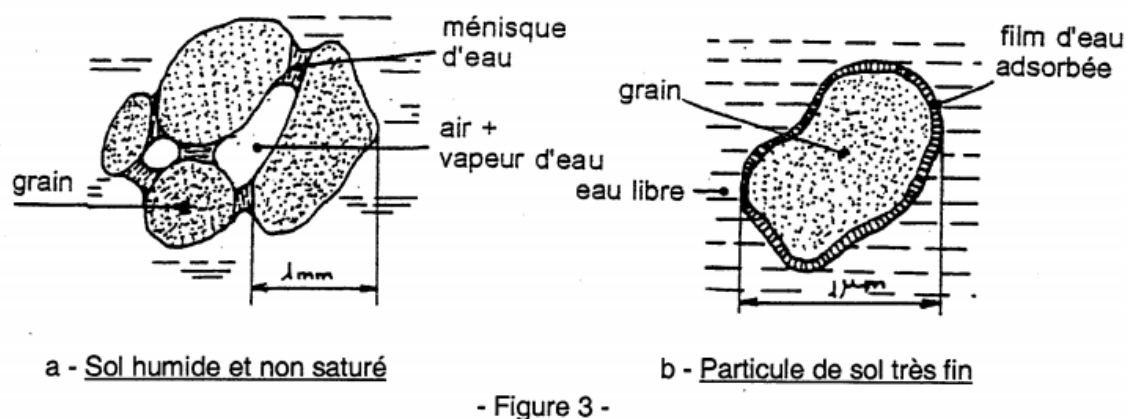
Les particules restent collées les eaux autres. Le sol présente une cohésion: il a l'apparence d'un solide et ne se désagrège pas sous l'effet de la pesanteur ou d'autres forces Appliquées. Les particules sont formées par un empilement de feuillets. Elles sont une forme de plaquettes.

La surface des plaquettes étant chargé en négativement, les particules sont soumises à Des forces d'attraction inter granulaires diverses.: forces électriques', forces de Van der Waalss.Ces forces sont en général faibles et diminuent rapidement lorsque la distance augmente, on admet quelle sont négligeables à partir d'une distance de 0,4pm. Pour qu'elles Puissent avoir une influence sur le comportement du sol il est nécessaire quels grains de ce Sol aient des dimensions très petites.

Il se crée autour des particules de sol une pellicule d'eau adsorbée où eau liée D'épaisseur à peu près constante (= 0,01pm) (fig.3-b). Elle est maintenue à la surface des Grains par des forces d'attraction moléculaires. Les dipôles d'eau sont orientés Perpendiculairement à la surface des grains. Cette eau présente des propriétés très différentes De celles de l'eau libre:

- elle a une très forte densité: 1,5
- elle est liée à la particule (elle ne se déplace pas sous l'effet de la gravité),
- sa viscosité très élevée, qui lui confère des propriétés intermédiaires entre celles d'un Liquide et celles d'un solide, est à l'origine de certains comportements des sols argileux: Fluage, compression secondaire, ...
- elle s'évacue qu'à température élevée (vers 300°C.).

La couche d'eau adsorbée joue un rôle de lubrifiant entre les grains. Son influence est Considérable sur les propriétés mécaniques du sol



**Figure I.5.schemas des particules des sol humide et fin.**

Orientation des particules

On distingue deux types fondamentaux d'orientation :

- I 'orientation floculée (bord contre face), structure en "château de cartes
- l'orientation dispersée (face contre face)(fig.- b).

Les particules des sédiments argileux naturels ont une orientation plus ou moins floculée suivant qu'elles se sont déposées en milieu marin ou en eau douce

Les argiles marines ont en général une structure plus ouverte quelles argiles déposées en eau douce. La consolidation et les efforts de cisaillement tendent à orienter les particules suivant l'arrangement dispersé.

L'orientation des particules joue un rôle important sur les propriétés physiques et mécaniques. Ces notions sur l'orientation des particules argileuses permettent d'expliquer qualitativement des phénomènes complexes liés à la consolidation et à la résistance des argiles Ordres de grandeur des caractéristiques géométriques des principales familles d'argile

Tableau I.1: les argiles et leur caractéristique.

Les argiles rencontrées en pratique sont formées de mélanges de minéraux argileux se Rattachant à ces trois familles La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg.

Elle est précisée dans le diagramme de plasticité ci-après (fig I .5). Selon la position dans le diagramme du point représentatif ayant pour abscisse la limite De liquidité et pour ordonnée I 'indice de plasticité, on définit quatre grandes categories Principales:

principales :

- les limons très plastiques :  $L_t$
- les limons peu plastiques :  $L_p$
- les argiles très plastiques :  $A_t$
- les argiles peu plastiques :  $A_p$

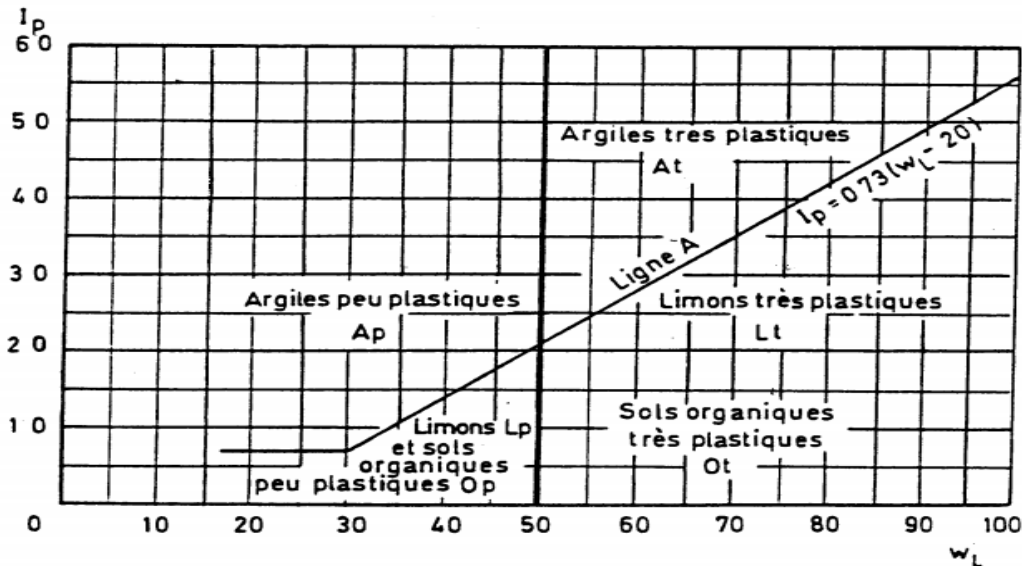


Figure I.6-Abaque de plasticité de Casa grande CLASSIFICATION L.P.C. DES SOLS FINS

**Remarque :** Les mots argile et limon ne représentent plus ici des classes granulométriques, mais sont liés aux valeurs des limites d'Atterberg. il s'agit donc d'une classification basée sur La plasticité c'est-à-dire la nature minéralogique des particules de sol et non de leur dimension On distingue trois grandes familles.

### I.1.6 TYPES D'ARGILES

#### a) La kaolinite

Le feuillet de kaolinite résulte de la liaison d'une couche Tétraédrique (1) avec une couche octaédrique (2), la liaison se faisant par les atomes d'oxygène(fig.1). La particule de kaolinite est formée d'un empilement de ces feuillets, de l'ordre d'une Centaine. Les feuillets sont liés les uns aux autres parades

#### b) Liaisons

Du type hydrogène donc des liaisons relativement fortes; il en Résulte que l'empilement est difficile à dissocier. Le minéral est par Conséquent stable et l'eau ne peut ni circuler entre les feuillets ni Provoquer un gonflement ou un retrait des particules. Ces argiles Sont les moins dangereuses pour l'ingénieur

### c) Les smectites (dont la montmorillonite)

Même type structural que les illites, mais avec très peu de cations  $K^+$  interfoliaires. Il en résulte des liaisons extrêmement lâches entre les feuillets ce qui permet à des molécules d'eau de se glisser entre les feuillets en provoquant des gonflements spectaculaires (Sa 6 couches de molécules d'eau). Les sols dont la teneur en montmorillonite est élevée sont susceptibles de gonflements ou de retraites importants suivant les variations de teneur en eau. Les particules de montmorillonite ont des dimensions très faibles, leur surface spécifique est donc très élevée. D'où une activité superficielle intense. A cette famille appartient la bentonite couramment utilisée comme boue de forage et dans l'exécution de parois moulées.

### d) Les illites

Leur structure est très proche de celle du mica blanc. Une couche octaédrique est prise entre deux couches tétraédriques. Ces dernières sont occupées par des  $Si^{4+}$  dont un peu moins de 1 sur 4 est remplacé par des  $Al^{3+}$ .

\*. La neutralité électrique est rétablie par

l'interposition de cations  $K^+$  entre les couches tétraédriques: il apparaît ainsi des liaisons ioniques faibles entre les feuillets, suffisantes toutefois pour les bloquer.

### e) liaison assez forte

L'atome d'aluminium du feuillet octaédrique peut être remplacé par d'autres ions comme  $Mg^{2+}$ , principalement dans la montmorillonite et dans l'illite. Il en résulte un déséquilibre électrique qui est compensé par l'adsorption en surface de cations  $Ca^{2+}$ ,  $Li^+$ ,  $K^+$ ,  $Fe^{2+}$ . Aux extrémités de la particule d'argile, il y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations. Ces cations dits échangeables jouent un rôle important dans le comportement des argiles.

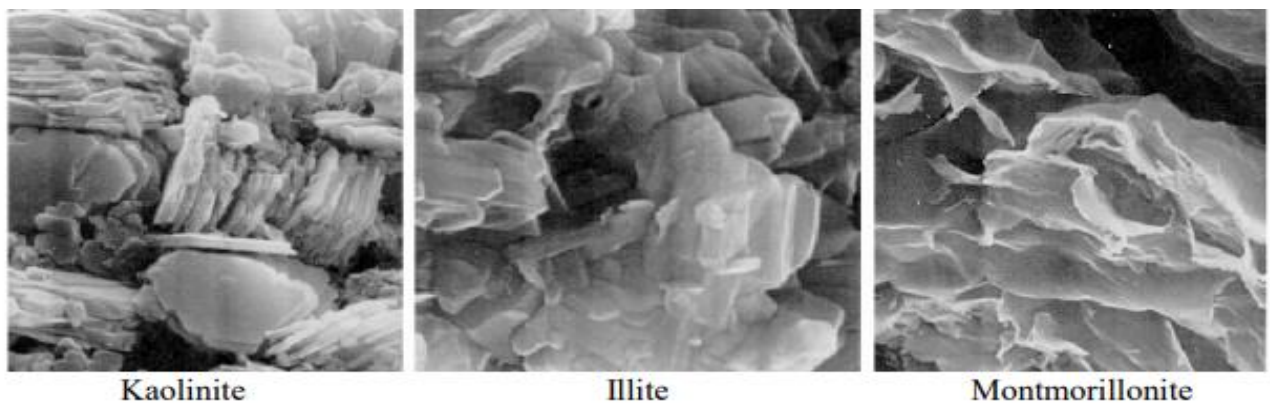


Figure I.7: Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell, 1976).

## I.1.7 Retrait-Gonflement Argiles en Algérie

De nombreuses régions, départements et communes algériennes sont concernés par ces mouvements de terrain, consécutifs à la sécheresse puis à la réhydratation des sols argileux.

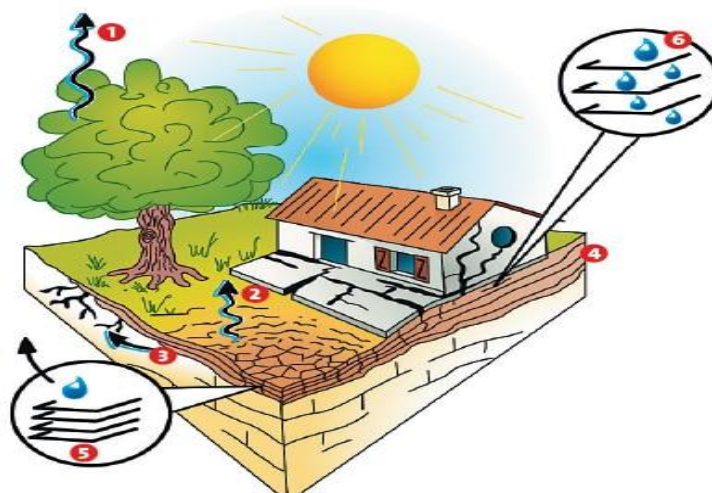
### La définition technique du retrait gonflement des argiles

Le retrait par dessiccation des sols argileux lors d'une sécheresse prononcée et/ou durable produit des déformations de la surface du sol (créant des tassements dits « différentiels »). Il peut être suivi de phénomènes de gonflement, au fur et à mesure du rétablissement des conditions hydrogéologiques initiales, ou plus rarement de phénomènes de fluage avec ramollissement.

Le retrait-gonflement des argiles est lié aux variations de teneur en eau des terrains argileux: ils gonflent avec l'humidité et se rétractent avec la sécheresse. Ces variations de volume induisent des tassements plus ou moins uniformes et dont l'amplitude varie suivant la configuration et l'ampleur du phénomène. Sous une habitation, le sol est protégé de l'évapotranspiration, et sa teneur en eau varie peu dans l'année. De fortes différences de teneur en eau vont donc apparaître dans le sol au droit des façades.

#### MÉCANISME DU RETRAIT-GONFLEMENT

- ❶ Évapotranspiration
  - ❷ Évaporation
  - ❸ Absorption par les racines
  - ❹ Couches argileuses
  - ❺ Feuilletés argileux
  - ❻ Eau interstitielle
- Sources : BRGM – M. Villey



## Partie 2 :

### I.2.1 Traitement des sols

Le traitement des sols est une technique éprouvée et peut être considérée comme classique en construction routière. Ce procédé a pour objet de rendre compactables les sols mous par réduction de leur plasticité et, par conséquent, en améliorer la résistance. Son application au cas des sols problématiques, notamment les sols salés, s'avère une solution techniquement et économiquement intéressante. Outre les avantages classiques répertoriés, dans le cas des sols mous et autres sols médiocres, cette solution offre la possibilité de réduire les potentiels de salinisation des sols argileux et d'améliorer leurs performances, leur procurant, de ce fait, stabilité, durabilité et meilleure résistance. Après énumération des objectifs du traitement des sols médiocres et problématiques, ce chapitre présente les techniques de traitement disponibles, notamment le cas du traitement chimique aux liants hydrauliques et particulièrement le traitement mixte (chaux/ciment).

→ Le traitement des sols pour l'exécution des remblais et des couches de forme, a pour objet de rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir sans préparation, à supporter une assise déchaussée, de parking ou de plate-forme.

**NB: Avant de traiter un sol et de l'utiliser comme matériau de construction, il est indispensable de connaître les principes généraux régissant son comportement.**

#### 1-Granularité (Dmax, Tamisât à 0,08 mm, Cu)

**Le Dmax:** dimension du plus gros élément présent à moins de 1 % dans le sol. Il détermine les possibilités pratiques du traitement. Il se détermine par une inspection visuelle. L'analyse granulométrique complète peut donner des informations supplémentaires

- Le tamisât à 80  $\mu$ m : cette caractéristique, exprime la finesse du matériau et oriente en grande partie le choix du produit du traitement, ainsi qu'il permet d'évaluer la sensibilité en eau du sol

#### 2-Argilosité (IP, VBS)

3. Teneurs en constituants chimiques (matières organiques, les phosphates, les nitrates, les chlorures, les sulfates, les sulfures)

4. L'état hydrique (wn/wopt, IPI, IC)

5. L'état de compacité

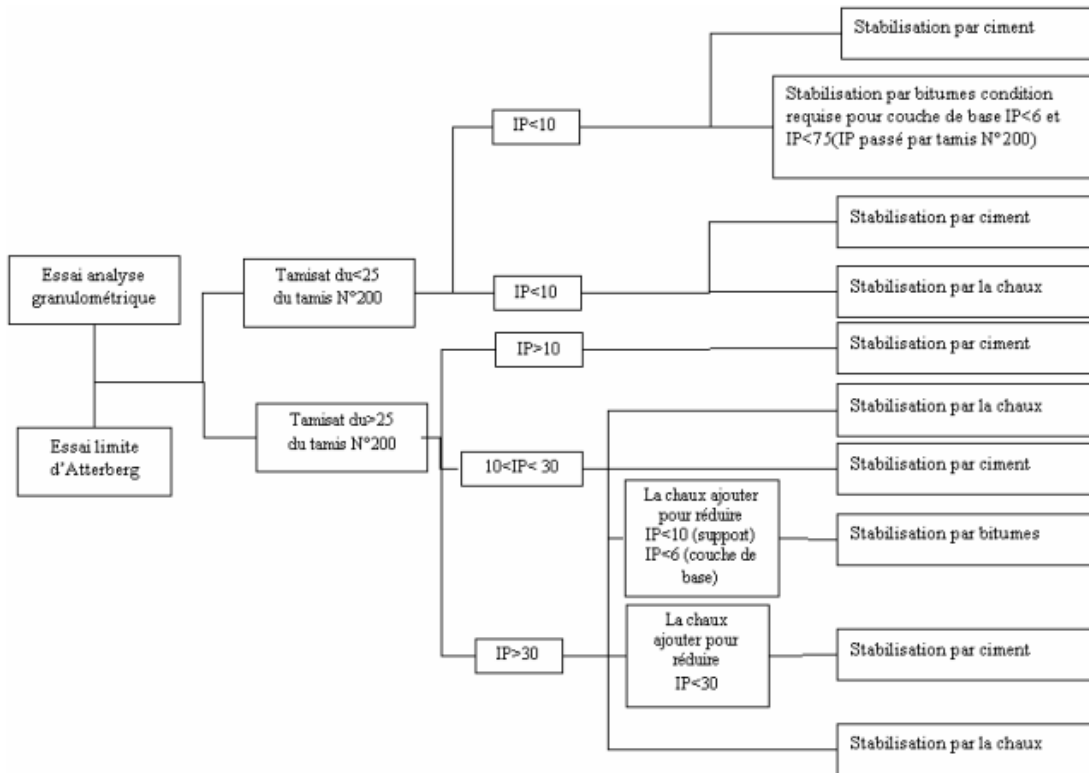


Figure I.8: Conditions d'utilisation de la stabilisation chimique (Dept. of the Army, 1983).

## Objectifs du traitement

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 points 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..  
L'amélioration des caractéristiques géotechniques de façon durable.

- ✓ 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.

## **Techniques de traitement**

Le Traitement des sols consiste à modifier leurs caractéristiques physico-chimiques et mécaniques, il existe de nos jours trois techniques de traitement ou de stabilisation des sols en géotechnique routière :

- Le traitement mécanique (drainage, substitution, compactage dynamique, etc.) ;
- Le traitement thermique (augmentation de la température du sol traité) ;
- Le traitement chimique (par additif).

### **I .2.2 Le ciment :**

Le ciment est l'un des additifs les plus couramment utilisés comme agent stabilisant pour Sols expansifs. Des évaluations approfondies ont été menées sur le ciment Stabilisation des sols expansifs. Cependant, la stabilisation du ciment résulte généralement en haute rigidité, et rend le sol cassant, ce qui est indésirable en dynamique Conditions de chargement telles que les systèmes de chaussée

Le terme « ciment » est issu du latin *coementum* qui signifie mortier, liant des maçonneries. Ce sens étymologique a donc été à peu près conservé; « Portland » nom donné par le détenteur du brevet d'invention du ciment Joseph Aspdin en 1824. Parmi tous les liants minéraux, le ciment portland est le liant qui occupe la première place par sa production et son utilisation.

Le ciment Portland est un autre produit envisageable pour la stabilisation de certaines catégories de sols utilisés pour les routes et les revêtements de pistes d'aéroports. 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. Le ciment Portland est un matériau fin formé à partir d'un mélange de clinker et de gypse. Le clinker est composé principalement de quatre phases d'oxydes ; deux phases de silice calcique et deux phases d'alumine calcique. Les deux phases de silice calcique sont les plus importantes dans le processus de stabilisation. Lors de l'hydratation ces deux phases produisent l'hydroxyde de calcium et l'hydrate de silice calcique.

Le premier composant fournit l'apport en calcium nécessaire à l'échange cationique à la floculation de l'argile et à son agglomération tandis que le deuxième composant quant à lui apporte la résistance ainsi que la structure au sol traité



**Figure I.9: La composition du ciment.**

**Tableau I.2: composants principaux du ciments portland (LAWTON 2004).**

Nom des composants	Formule chimique	Abréviation
Silicate tri calcium	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C3S
Silicate di calcium	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C2S
Aluminate tricalcium	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C3A
Terra-calcium alumino-ferrite	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{FeO}_3$	C4AF

Comme indiqué ci-dessus, le processus de stabilisation initié par l'ajout du ciment Portland à l'argile engendre quatre étapes distinctes à savoir l'échange cationique, la floculation et l'agglomération de l'argile, l'hydratation par cimentation et les réactions pouzzolaniques. Le ciment Portland possède donc des propriétés lui permettant d'initier une étape de plus que la chaux soit celle de l'hydratation par cimentation. Les sols possédant un faible pourcentage d'argile, donc moins de silice et d'alumine ont besoin d'un apport de ciment si les réactions pouzzolaniques sont désirées. Par conséquent, le ciment Portland peut généralement être utilisé dans les mêmes types de sols que la chaux.

## Les constituants des ciments

✚ Le ciment est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute les autres constituants associés au clinker grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques. Les constituants les plus utilisés sont :

Calcaires

Laitier granulé de haut fourneau

Cendres volantes (V ou W)

Schistes calcinés

Fumée de silice

Fillers

**\*caractéristique du ciment:** les caractéristiques principales des ciments:

-la vitesse de prise (temps de la durée)

-la résistance mécanique a la compression

- la masse volumique (absolue et apparente) des ciments:

Masse volumique absolue =0.95 a 3.2kg/dm<sup>3</sup>.

Masse volumique apparente =3.05 a 3.2Kg/dm<sup>3</sup>

## 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

Classification des ciments en fonction de leur composition ils sont classés (normes AFNOR) en fonction de leur compression, de leur résistance.

Les ciments constitués de clinker et de constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse):

\*CEM I: Ciment portland (CPA - dans la notation française),

\*CEM II: Ciment portland composé (CPJ),

\*CEM III: Ciment de haut fourneau (CHF),

\*CEM IV: Ciment pouzzolanique (CPZ),

\*CEM V: Ciment au laitier et aux cendres (CLC)

### **I.2. 3 Stabilisation par ciment**

Une des méthodes courantes de stabilisation chimique consiste à mélanger le sol avec du ciment pour former un produit nommé sol stabilisé ou sol-ciment.

Le sol stabilisé peut être défini comme un mélange de sol, ciment et de l'eau.

Puis ce mélange est compacté à la valeur de densité désirée. Le sol-ciment a été utilisé comme matériau de base dans de nombreux projets, tels que la permettre une action de cimentation à haute résistance. Ils réduisent la plasticité des sols argileux. L'expérience montre que le traitement au ciment change plusieurs propriétés géotechniques:

-Augmente légèrement la densité sèche maximale des sables et des argiles très plastiques, mais diminue la densité sèche maximale du limon. Cependant, le ciment augmente la teneur en eau optimale et diminue la densité sèche maximale des sols sableux;

- Augmente la limite plastique et réduit la limite liquide, ce qui réduit principalement l'indice de plasticité.

-Réduction du retrait gonflement, augmentation de la résistance, du module d'élasticité et de la résistance à l'effet de l'humidité, du gel et du dégel.

-Les sols traités au ciment ont un comportement fragile des sols non traités.

Le ciment peut être appliqué pour stabiliser tout type de sol, sauf les sols dont la teneur en matières organiques est supérieure à 2% ou dont le pH est inférieur à 5,3 (ACI 230.1R-90, 1990). L'utilisation du ciment dans les sols granulaires s'est avérée économique et efficace car de petites quantités de ciment sont nécessaires.

Contrairement à la chaux, l'hydratation dans le ciment se produit à un rythme plus rapide, ce qui permet un gain de résistance immédiat.

En pratique, avec la chaux, le ciment est l'un des deux agents de stabilisation le plus largement utilisé dans le domaine de traitement des sols par la méthode chimique. Comme la chaux, le ciment, après avoir mélangé avec le sol, réduit le gonflement/retrait à l'origine de réduction de la plasticité du sol gênant, améliore l'ouvrabilité, augmente la résistance.

### ***Avantages de la stabilisation du sol***

- Avantage technique
- Avantage économique
- Économies dès la conception
- En raison des fissures thermiques et de retrait, la couche stabilisée peut être une fissure.
- La fissure peut se refléter à travers le revêtement et permettre à l'eau de pénétrer dans chaussée.

**Chapitre II**  
**Programme expérimental et procédures d'essais**

## Chapitre III Programme expérimental et procédures d'essais

### II.1 Introduction

Cette étude a pour but de caractériser le comportement des sols situés dans la commune de Sidi-Hadjrès et de déterminer les paramètres physiques et mécaniques qui jouent un rôle dans la variation de leur volume au moyen d'essais d'identification classiques et d'essais mécaniques (Essais Proctor modifié. CBR. Degradabilité. Fragementabilité).

### II. 2. Localisation

Le terrain se situe au centre-ville de Sidi-Hadjrès, sur la route nationale RN40 à 50 km à l'ouest de la ville de M'sila, exactement dans les bords du nouveau siège de l'Assemblée Populaire Communale (APC) de Sidi-Hadjrès. Il est délimité par (figure II.1.):

- Au nord : par un terrain vague et le cimetière de Sidi Hadjrès.
- A l'est : par un terrain vague
- A l'ouest : par le CFPA et un terrain vague.
- Au Sud : par la route nationale 40.



Figure II.1. Le site urbain de Sidi-Hadjrès (wilaya de M'sila, Algérie)



Figure II.2. Image satellite prise le 2017, (Source Google Earth)

### III. 3. PROGRAMME EXPERIMENTAL EXECUTE

Le programme expérimental a été réalisé dans laboratoire du génie civil de l'université de M'sila. Et LCTP (laboratoire centrale des travaux publics)

Ce programme est réparti en trois parties:

#### **a- Essais d'identifications**

- L'analyse granulométrique (par tamisage).
- Les limites d'Atterberg.
- L'essai au bleu deméthylène.
- Analyse granulométrique par sédimentation.

#### **b- Essais mécaniques**

- Essais Proctor modifier
- ESSAI C.B.R. (Californie Bearing Ratio)

N.B: Les procédures expérimentales suivies dans chaque type d'essai ont été conformes au tant que possible aux méthodes d'essais en vigueur

Essais d'identification pour déterminer les paramètres de comportement mécanique:

**\*essai de dégradabilité**

**\*essai de fragilité**

#### **Préparation d'échantillon**

Les échantillons soumis aux essais ont été confectionnés à partir du mélange de la Quantité de sol finement broyé après étuvage à 105 °C à la teneur en stabilisant désirée. L'ensemble est ensuite malaxé vigoureusement à sec, puis humidifié à la teneur en eau Optimale Wopt (i.e. densité sèche maximale  $\rho_{d-max}$  correspondant à l'optimum Proctor) ; les Caractéristiques de compactage étant préalablement déterminées sur le sol non traité. Tous Les essais ont été conduits à la température ambiante.

Dosages en stabilisants considérés

Les teneurs pondérales en ciment ou en chaux considérés pour le traitement simple

Sont 0 % pour l'échantillon témoin, 2 %, 4 %, 6 %, 8 %, 10 % et 12 % pour les échantillons traités



**Figure II.3 :préparation de Echantillon**

### **\*Propriétés des liants hydrauliques utilisés**

Le traitement est effectué en mélangeant le sol aux liants hydrauliques (dans notre cas le traitement au ciment dans les proportions données ci-après

Le ciment utilisé est de type Portland composé fabriqué localement dans la cimenterie Lafarge de Hammam-Dalaâ (wilaya de M'sila).

**Le tableau II.4: présente les caractéristiques physiques et chimiques du ciment.**

<b>Désignation</b>	Commerciale	MATINE
	Codifiée (norme)	CEM II/B 42,5 R (NA 442)
<b>Propriétés physiques</b>	Consistance normale de la pâte de ciment (%)	25 – 28,5
	Finesse Blaine ( $\mu\text{m/m}$ )	4150 – 5250
	Début de prise	140 – 195 min
	Fin de prise	195 – 290 min
	Retrait à 28 jours d'âge ( $\mu\text{m/m}$ )	< 1000
	Expansion (mm)	0,3 – 2,5
	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	$\geq 42,5$
<b>Propriétés chimiques</b>	Pertes au feu (%)	7,5 – 12
	Résidus solubles (%)	0,7 – 2
	Teneur en sulfates $\text{SO}_3$ (%)	2 – 2,7
	Teneur en Oxyde de Magnésium MgO (%)	1 – 2,2
	Teneur en Chlorures (%)	0,01 – 0,05
	Teneur en Silicates tricalciques C3S (%)	55 – 62
	Teneur en alcalis (%)	0,5 – 0,75

## **II.4 PROCEDURE D'ESSAIS SUIVIE**

### ***a) Essais d'identifications***

#### **Analyse granulométrique tamisage (NF P 94-056)**

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0,08 et 5mm. On appelle: / REFUS sur un tamis: la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis. / TAMISAT (ou passant): la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

Objectif:

Déterminer la quantité (masse) de grains:

- Par diamètre
- jusqu'à  $80\mu\text{m}$

#### **a) Définition:**

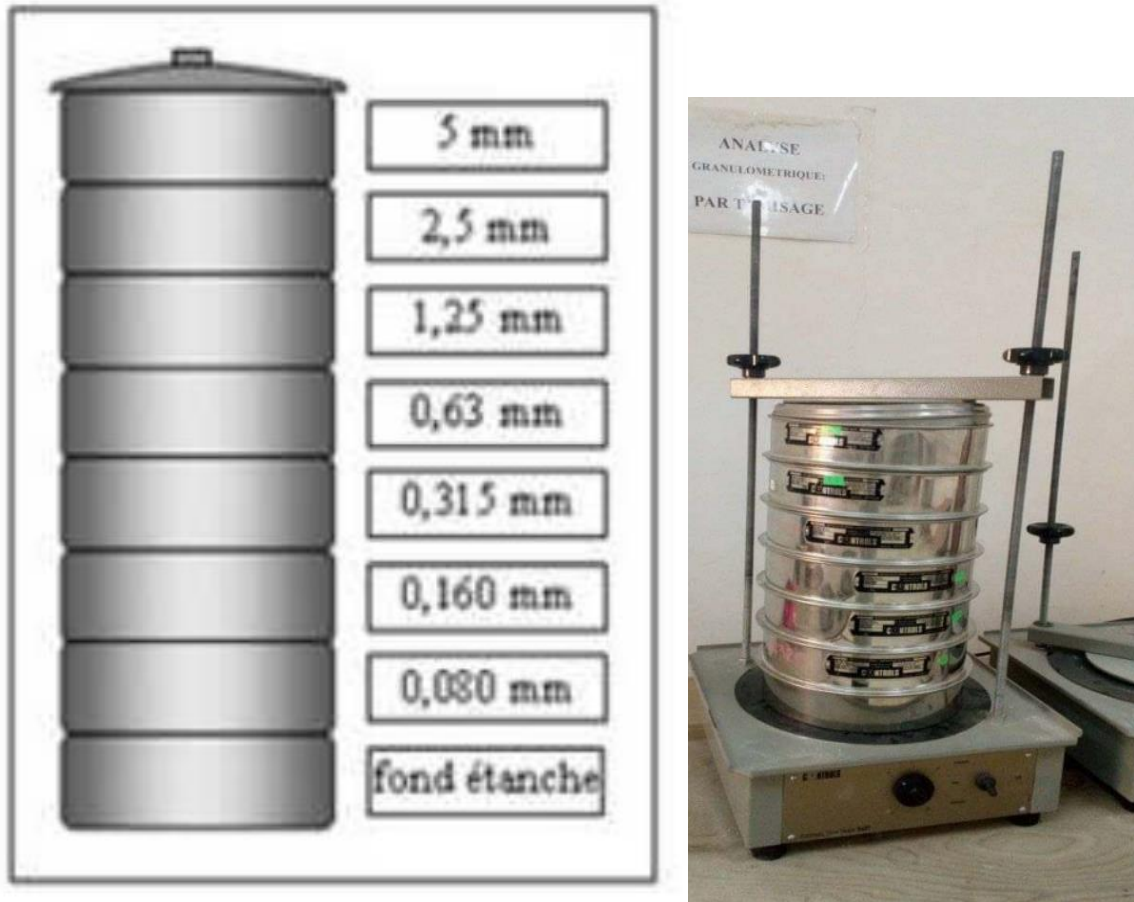
L'analyse granulométrique se propose de définir la répartition des grains constitutifs d'un sol selon leurs dimensions. On étudie la granulométrie en tamisant le /\*matériau sur une série normalisée de tamis à mailles carrées, les grains sont ainsi séparés selon leur taille.

Deux méthodes:

- Tamisage par voie humide (NFP P 94-041)
- Tamisage à sec après lavage (NFNP P 94-056)

**b) Appareillage:**

- Un dispositif de lavage avec arroseur et, éventuellement, de trempage et de malaxage; - Un jeu de tamis emboîtables à mailles d'ouvertures carrées; Couvertres et fonds de tamis de diamètre compatible avec celui des tamis; - Récipients en matériau non altérable, brosse, pinceau, etc.; - Balances; - Une enceinte thermique ou une étuve.



**Figure II.4 Appareillage d'analyse granulométrique (tamisage).**

**C) Mode opératoire:**

- Déverser, en une ou plusieurs fois, la totalité du matériau à analyser sur une colonne constituée de tamis d'ouverture de maille croissant de bas en haut et surmontée d'un dispositif arroseur avec: - Un tamis d'ouverture adapté à la dimension des plus gros éléments de la prise d'essai; - Un tamis inférieur d'ouverture de maille de 80 µm; - Le nombre des tamis intermédiaires et l'ouverture des mailles sont choisis de telle sorte qu'il n'y ait pas surcharge sur les tamis.
- Séparer, par brassage manuel combiné à un arrosage, les éléments retenus sur le tamis d'ouverture de maille la plus grande. Lorsque le refus sur le tamis est propre, le tamis est

retiré. L'opération est poursuivie sur le tamis inférieur jusqu'à ce que l'eau s'écoulant sous le dernier tamis soit pratiquement claire;

- Lorsque malgré le brassage et le brossage, des particules fines adhèrent aux grains, un trempage est nécessaire. Dans cette éventualité, verser la totalité du matériau dans un récipient et brasser avec une quantité d'eau;
- Peser le récipient contenant le refus sur le tamis d'ouverture la plus grande;
- Peser les refus cumulés successifs R;
- Enfin, placer les récipients contenant le refus obtenu sur chaque tamis dans une étuve.
- Calcul des facteurs de courbure et d'uniformité: La forme générale et la pente de la courbe peuvent être décrites en fonction du coefficient d'uniformité « Cu » dit aussi coefficient de Hazen, ou bien le coefficient de courbure « Cc ». Le facteur de courbure est calculé par la relation suivante:  $= (d_{30})^2 / 1060$  Granulométrie uniforme: grains à peu près de mêmes dimensions; Granulométrie discontinue: pas de grains dans certains intervalles de dimension. Le facteur d'uniformité est calculé à partir de:  $= d_{60} / 10 - D_{10}$ : Diamètre correspondant à 60 % (tamisât); - D10: Diamètre correspondant à 10% (tamisât), il est appelé aussi « diamètre efficace ».

Tableau (II, 01): Description de sol en fonction du coefficient d'uniformité.

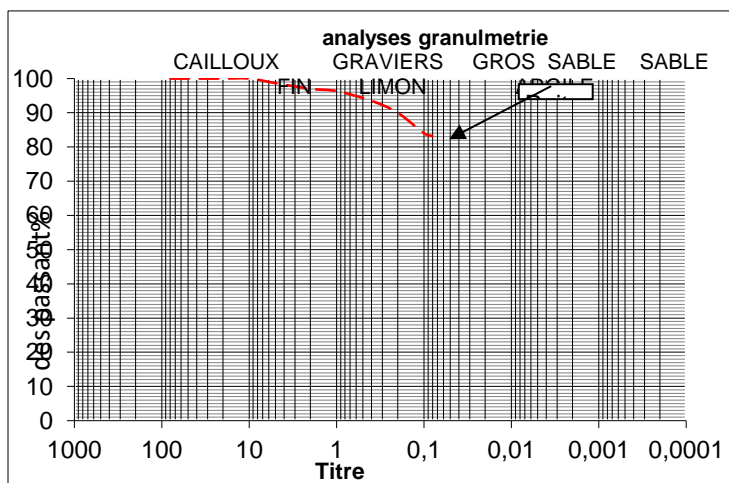


Figure II.5: courbes des différents sol d'analyse granulométrique

Tamis en (mm)	% des passants
	PUITS N° 1
80	100
50	100
31,5	100
20	100
10	100
5	98,67
2	97,00
1	96,33
0,400	93,50
0,200	90,00
0,100	84,00
0,080	83,17

## **Analyse granulométrique sédimentométrie (NF P 94-057):**

Les particules inférieures à 80  $\mu\text{m}$  séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans de l'eau additionnée d'une défloculation. Les particules sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille. Au moyen d'un densimètre est mesurée l'évolution dans le temps de la masse volumique de la Norme NF P 94-056

### **Domaine d'application et but**

L'analyse granulométrique d'un sol par la méthode de sédimentation a pour objet de déterminer la distribution pondérale de la taille des particules d'un sol fin.

Cet essai s'applique sur les particules passant au travers d'un tamis maille carré de 0.080 mm, cependant les particules d'une taille inférieure à 0.001 mm ne peuvent être différenciées.

### **Principe:**

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

### **Méthode:**

Les particules inférieures à 0.080 mm séparées du sol sont mises en suspension dans de l'eau additionnée de défloculant. Les particules sédimentent à différentes vitesses selon leurs tailles. Au moyen d'un densimètre dans le temps est mesurée l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et la profondeur d'immersion de l'appareil. La distribution pondérale est calculée à partir de ces données.

### **Exécution de l'essai:**



**Figure II.6: Appareillage d'analyse granulométrique (sédimentométrie).**

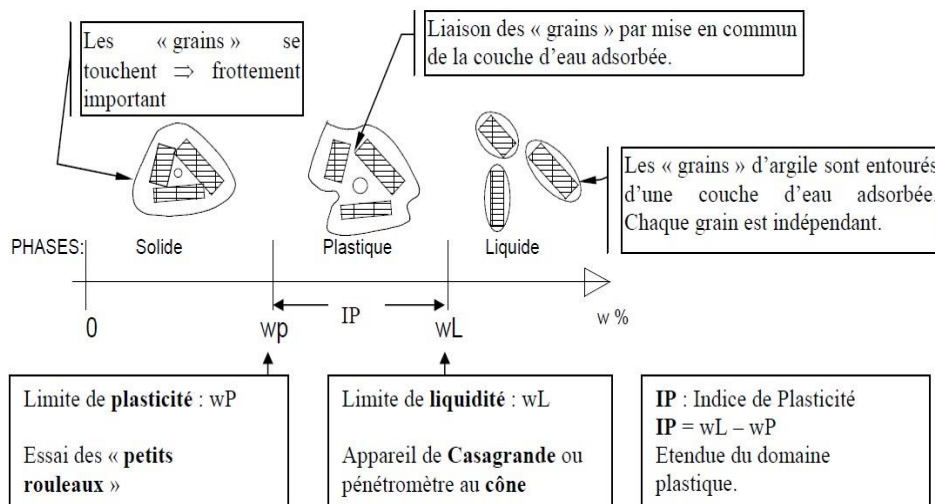
## Limites d'Atterberg NF P 94 051 -

**Objet:** détermination des états de consistance d'un sol. Le classement d'un sol vis à vis de la classification du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (L.P.C.P) se fait à partir de deux essais de laboratoire qui sont l'analyse granulométrique et la détermination des limites d'Atterberg

**Domaine d'application:** classification des sols - étude de compactage.

**Principe de l'essai:** la consistance d'un sol varie de façon continue selon la teneur en eau:

Lorsque celle-ci augmente, le sol passe successivement de l'état solide à l'état plastique puis à l'état liquide. L'essai définit conventionnellement les limites entre ces états



Les limites de consistance, ou limites d'Atterberg (pédologue Suédois) constituent un indice important en géotechnique. Ces limites sont mesurées avec un appareillage normalisé, sur le mortier, c'est-à-dire la fraction de sol qui passe au tamis de 400  $\mu\text{m}$ . Il est défini trois limites: la limite de liquidité  $w_L$ : le passage d'un sol de l'état liquide de l'état plastique; la limite de plasticité  $w_p$ : le passage d'un sol de l'état plastique de l'état solide. Exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute, la différence 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

*preparation de echantillon :*



**Figure II.7: Appareillage de limites d'Atterberg.**

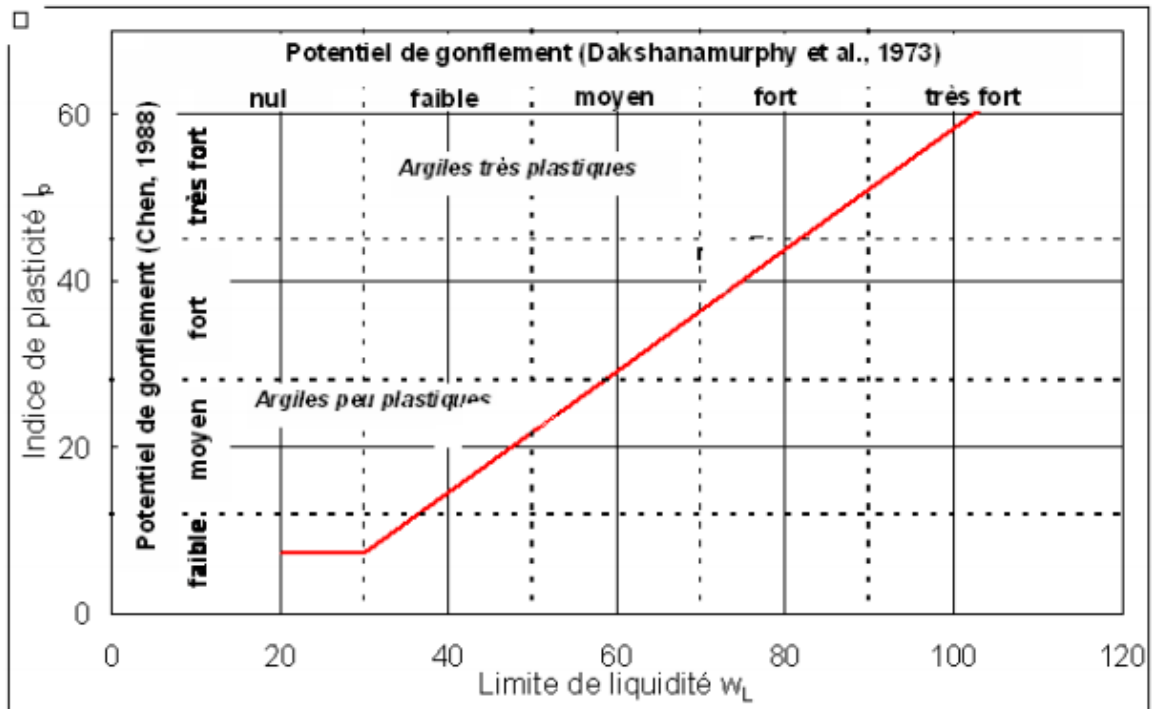


Figure II.8: Diagramme de Casa grande (Philipponnat et Hubert, 1997).

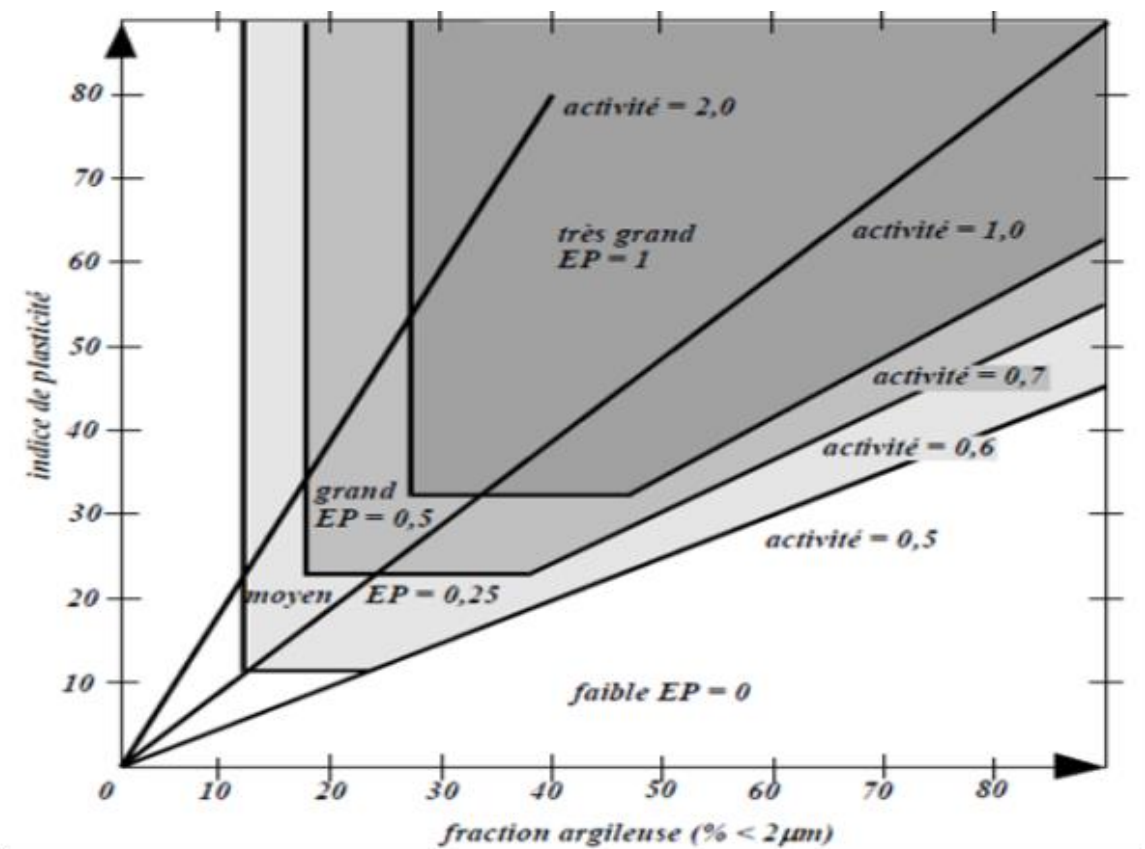


Figure II.9 Classification Williams et Donaldson (1980) ... (2)

## **L'essai de bleu méthylène (VBS) NF P 94 068**

### **Object de l'essai:**

L'essai au bleu méthylène permet d'évaluer la surface spécifique d'échange (ou surface active suivant la fonction de sol utilisée par l'essai) d'un matériau argileux. et réalisé sur la fraction 0/0.08 mm, il consiste à déterminer la quantité de bleu de méthylène nécessaire à la saturation des particules argileuses en suspension dans l'eau et en permanence agitation. La valeur de bleu VBs est la quantité de bleu méthylène absorbé par 30 g de matériau

### **Principe:**

L'essai au bleu de méthylène est pratiqué sur la fraction granulaire 0/2mm des sables courants ou sur les fillers (0 / 0,125 mm) contenus dans un sable fillerisé, un gravillon ou un tout venant. Il a pour but de révéler la présence de fines de nature argileuse et d'en déterminer la concentration.

-Une solution de bleu de méthylène est ajoutée progressivement par doses successives à une suspension de l'échantillon de granulats dans l'eau. L'adsorption de la solution colorée par l'échantillon est vérifiée après chaque ajout de solution en effectuant un test à la tache sur du papier filtre pour déceler la présence de colorant libre.

### **But:**

L'essai au bleu de méthylène, également appelé « essai au bleu », est un essai utilisé en géotechnique pour déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient. Le bleu de méthylène est en effet absorbé préférentiellement par les argiles.

L'essai consiste à mesurer la quantité de colorant (bleu de méthylène) fixée par 100 g de la fraction granulaire analysée

- Une baguette de verre de 7 à 9 mm de diamètre.
- Du papier filtre blanc de masse surfacique de 90 à 100 g/m<sup>2</sup>.

### **1.Appareillage courant:**

- Balance.
- Thermomètre
- Chronomètre ou équivalent indiquant la seconde.
- Enceinte thermique réglable à 90 C.
- Appareil de séchage permettant de déterminer la teneur en eau selon une méthode normalisée.
- Sac ou récipient hermétique permettant de conserver la teneur en eau des échantillons.

### **2.Produits:**

- Solution de bleu de méthylène a 10g/l fabriquée depuis moins d'un mois et conservée dans un flacon bouché à l'abri de la lumière.

- Eau déminéralisée ou distillée.

I.Préparation de l'échantillon:

1.Si le  $D_{max}$  du matériau est inférieur ou égale à (mm on prélève une masse  $m$  du sol telle que  $m > 200 D_{max}$  ( $m$  en grammes,  $D_{max}$  en millimètres).

2.Quarter et homogène la fraction 0/5 mm de manière à préparer trois prises d'essai de masses sensiblement égales et de l'ordre de:

- 30g a 60g dans le cas des sols très argileux.

- $M > 60g$  dans le cas des sols moyennement a peu argileux.

- La première prise d'essai est introduite dans le récipient de 3000 ml, mise en suspension dans 500 cm<sup>3</sup> d'eau déminéralisée et dispersée à l'aide de l'agitateur à ailettes (vitesse entre 600 et 800 tr/min positionné a 5mm environ du récipient), au minimum durant 5 min t dans tous les ces jusqu'à disparition visuelle de tout agglomérat de particules de sol dans la suspension ou de toute accumulation sur les bords de récipient.

- La deuxième prise d'essai, volontairement réduite par rapport aux spécification des normes de teneur en eau, est utilisée pour déterminer la teneur en eau de chacune des prises d'essai;

- La troisième prise d'essai est conservée dans l'éventualité où l'essai doit être renouvelé.

### Photos indicatifs :

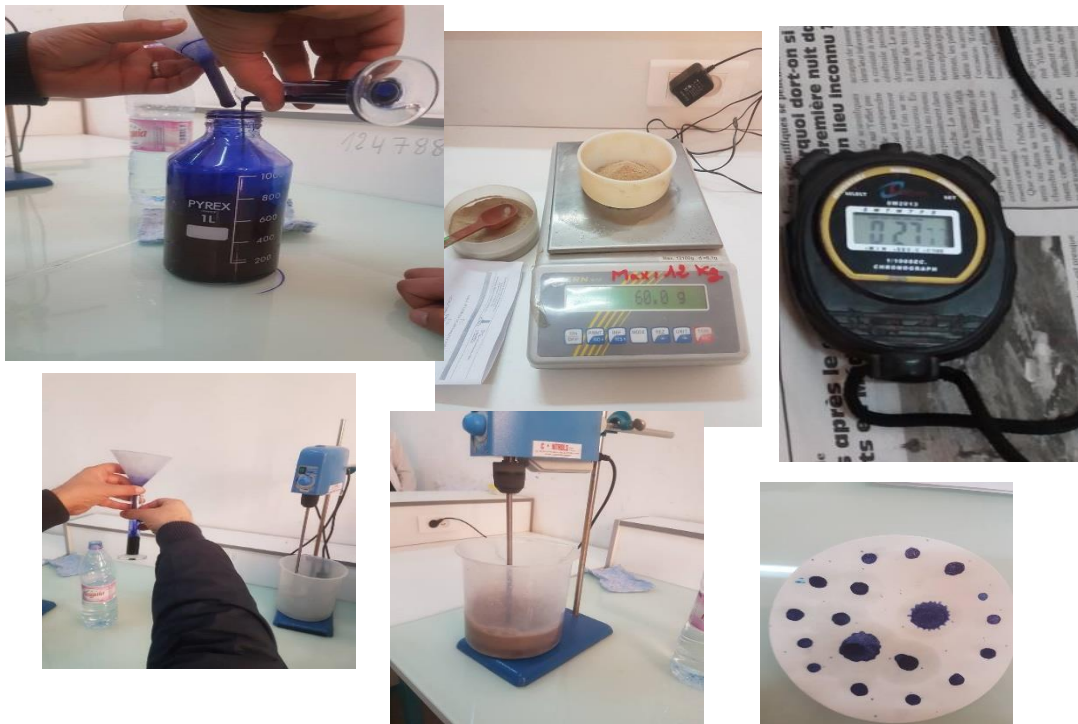


Figure II.10: appareillage de l'essai au bleu de méthylène

De cet essai, on peut tirer les paramètres suivant :

$$\checkmark \text{ La valeur du bleu : } VBS = \frac{\text{Volume en cm}^3 \text{ de solution}}{\text{Poids sec de la prise}}$$

$$\checkmark \text{ La surface spécifique totale : } SST = 20,93 \times V_{cc} \times \frac{1}{P_s}$$

Avec :

- SST : Surface spécifique totale (m<sup>2</sup>/g).
- V<sub>cc</sub> : Volume de la solution utilisée (cm<sup>3</sup>).
- P<sub>s</sub> : Poids du matériau sec (g).
- 20,93 : surface correspondant à 1 cm<sup>3</sup> de bleu de méthylène.

### **Essais de compactage en laboratoire (essais Proctor et CBR)**

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

#### **Principe de l'essai:**

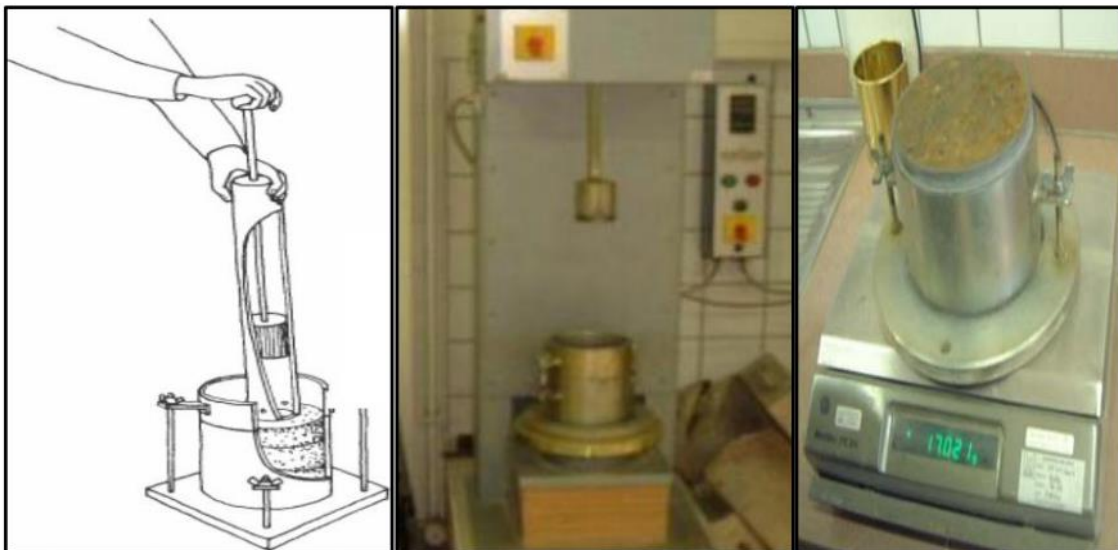
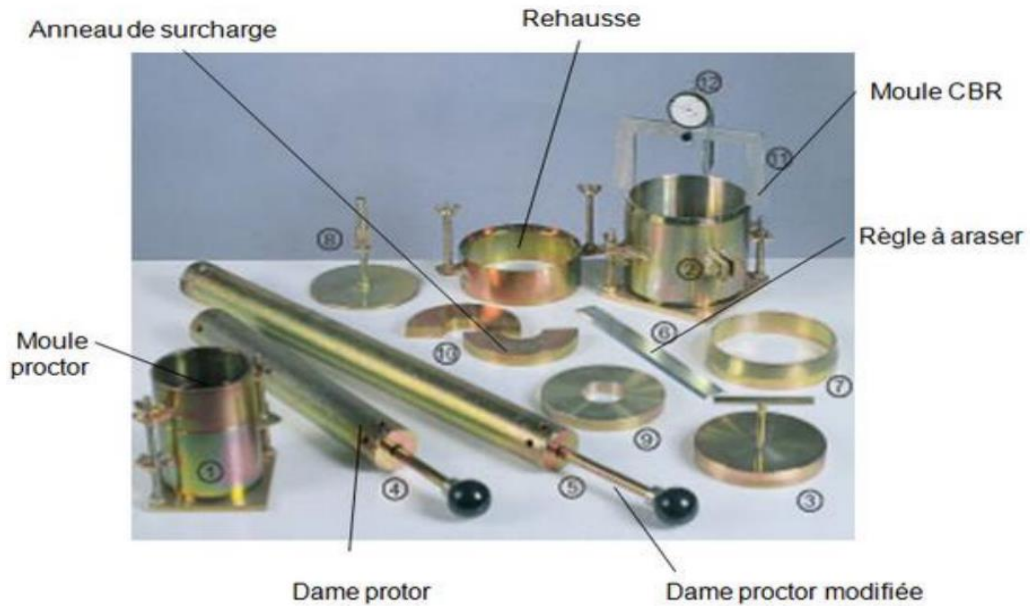
L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, 2.5kg de sol à étudier on lui ajoute 4% d'eau et on mesure sa teneur en eau et son poids spécifique sec après compactage.

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

Matériel utilisé:

- Moule Proctor.
- Dame Proctor normal.
- Règle à araser.
- Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau.
- Tamis 5 et 20mm.
- Eprovette graduée.
- Pinceau, truelle et brosse.
- Petites boîtes (mesures des teneurs en eau).

- Balance et balance de précision.
- Etuve.
- Burette à huile (pour lubrifier le moule).



**Figure II.11: Appareil de l'essai Proctor.**

**Manipulation:**

1. Préparation de l'échantillon.

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

2. Assembler le moule et le peser.

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

appliquant 25 coups.

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

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

6. Peser le moule avec le sol dedans.

7. Démontez le moule et prélever un échantillon de sol qui sera mis à l'étuve pour la détermination de la teneur en eau  $\omega$ .

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

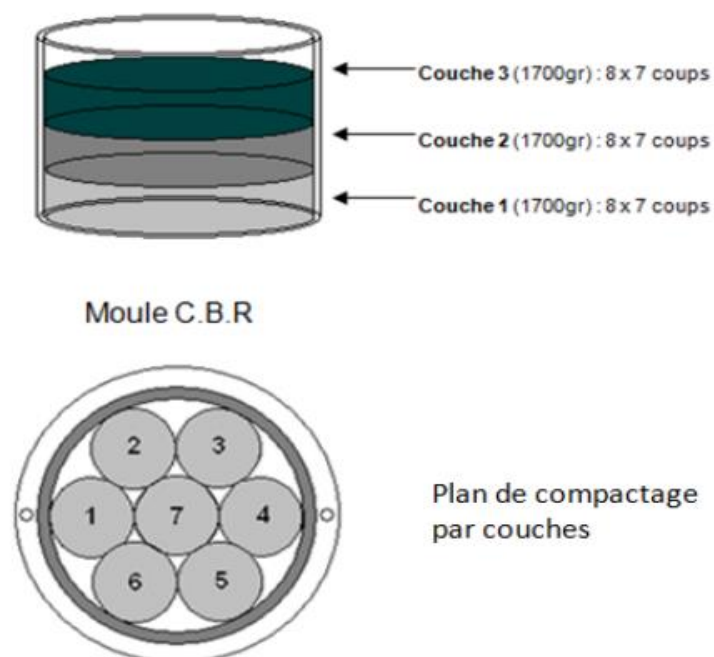


Figure II.12: Echantillons après compactage.

#### Résultats et calculs:

**Masse humide nette = Masse du moule plein - Masse du moule vide**

**Poids volumique d'un sol sec (notation  $Y_d$ ):**

$$Y_d = (W_s + W_a) / (V_s + V_w + V_a) = W_s / V$$

**Poids volumique (ou spécifique) des grains solides (notation  $Y_s$ ):**

$$Y_s = W_s / V_s$$

**Teneur en eau (notation  $W$ ) s'exprime en %:**

$$W = 100 \cdot W_w / W_s$$

## ESSAI CBR (CALIFORNIA BEARING RATION TEST)

**Définition et but:** Les essais CBR permettent, selon le processus utilisé. La détermination De l'indice CBR Pour caractérise l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins De l'indice portant immédiat (IPI)

Pour caractériser l'aptitude du matériau utilisé dans la construction des ouvrages en terre ou des assises de chaussées

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

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

L'essai permet de déterminer la capacité de portance d'un sol compacté, en estimant sa résistance au poinçonnement, en fonction de son état, sa densité et son humidité, ainsi que les charges appliquées.

### Principe:

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

On compare alors ces efforts à ceux qui produisent l'enfoncement dans un matériau de référence: sol de Californie

Enfoncement de tige de poinçonnement	Effort développé dans le matériau testé	Effort développé dans le matériau de référence
2.5 mm	F1	13.35 KN
5 mm	F2	19.93KN

Cela permet de définir 2 indices CBR:

$$CBR1 = 100 * (F1 / Fr1)$$

$$CBR2 = 100 * (F2 / Fr2)$$

La valeur de l'indice CBR du sol sera le plus grand des indices précédents:  $CBR = \text{MAX} (CBR1 \text{ et } CBR2)$

Cet indice quantifie bien la portance du matériau:

Une valeur faible correspond a un faible effort résistant donc a un matériau peu portant dont plutôt mou

Une valeur élevée correspond au contraire a un effort résistant important donc a un matériau très portant dont plutôt dur

Matériel de poinçonnement:

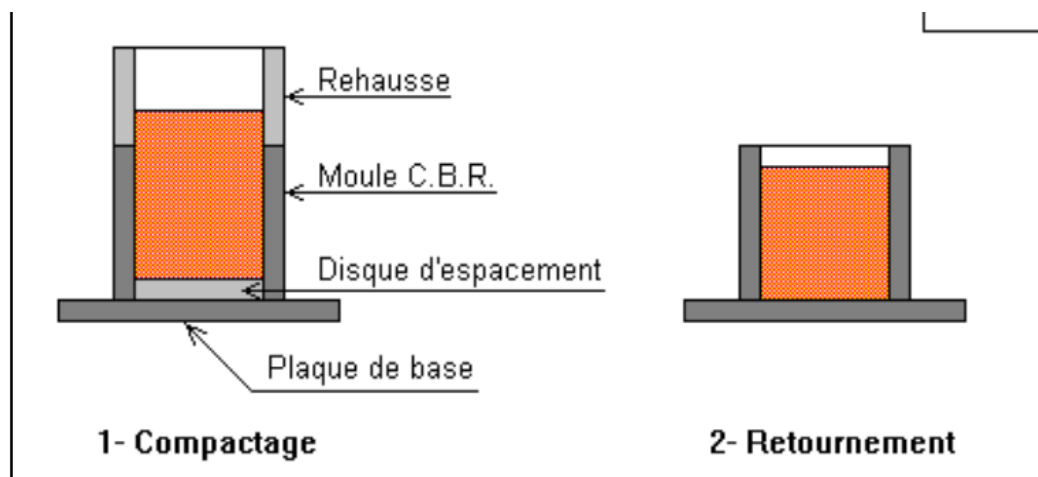
Une presse de compressions de 50 KN minimum et de course d'au moins 10 mm

Cette presse doit être équipée

D'un poinçon cylindrique en acier

D'un dispositif permettant la manœuvre de la partie mobile de la presse

D'un dispositif dynamique permettant de mesurer les efforts de poinçonnement





- Figure II.13. Appareil de poinçonnement.

***Exécution de l'essai:***

**1/Mode opératoire:**

**2/Préparation du moule:**

Solidariser la plaque de base et le moule CBR

Mettre le disque d'espacement

Placer une feuille de papier filtre sur le disque d'espacement

Fixer la rehausse

Confection des éprouvettes:

Préparer échantillons de 5.5 kg du matériau après le tamiser à 20 mm

Humidifier le matériau d'un échantillon a une teneur de 12% (pour l'CBR) et l'autre a une teneur de 11% (pour l'IPI) puis les malaxer afin de rendre les mélanges le plus homogène possible

Diviser la quantité du matériau en 5 parts

Compacter le matériau selon le processus Proctor modifié

Araser soigneusement à partir du centre vers la périphérie

Enlever la plaque de base: retourner le moule: le fixer à nouveau sur la plaque de base

Extraire le disque d'espacement

Placer le moule sur le plateau de presse CBR

***Poinçonnement de l'échantillon:***

Placer l'ensemble sur la presse. En position centrée par rapport au piston

Amener la tige de poinçonnement au contact de l'échantillon

Positionner le comparateur de suivi de l'enfoncement de la tige: le remettre 0

Mettre la presse en marche

Relever les efforts correspondant aux enfoncements de 0.5/1.5/2/2.5/3/3.5/4/4.5/5/6/7/8/9/10 mm de tige poinçonnement

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

**Selon la norme NF P 94 078:** nous indique les coefficients suivants pour l'essai CBR (California-bearing-ratio) ainsi que le pourcentage suivant pour voir déterminé la nature de sol ainsi sa portance.

**Le tableau II.2: pourcentage de CBR et sa classe de portance.**

Classe de portance	Valeur de CBR %
S0 Portance très faible	CBR < 3
S1 portance faible	3 < CBR < 6
S2 portance moyenne	6 < CBR < 12
S3 portance élevée	12 < CBR < 25
S4 portance très élevé	CBR > 25

**Le tableau II.3: Qualité de sol avec l'indice CBR**

Indice CBR : $I_{CBR}$	Portance
$I_{CBR} < 5$	Mauvaise
$5 \leq I_{CBR} \leq 10$	Moyenne
$I_{CBR} < 10$	Bonne

**B) -Essai C. B.R après imbibition:**

Après quatre (4) jours d'immersion ( $\pm 2$  h) on mesure la hauteur de gonflement  $\Delta h$  Indiquée par le comparateur, on extrait l'ensemble hors du bac d'immersion en observant un temps d'égouttage de 15 minutes puis on dépose le trépied, le comparateur, les surcharges et le disque de gonflement. La même procédure que la détermination de l'indice C.B.R immédiat.

La valeur de déformation de l'éprouvette  $g$ , exprimé en pourcentage: On suivra la même procédure que celle de la détermination de l'indice C.B.R immédiat disque de gonflement (figure II-10). La valeur de déformation de l'éprouvette  $g$ , exprimé en pourcentage:  $g \% = [\Delta h/h] \times 100$  On suivra la même procédure que celle la détermination de l'indice de C.B.R immédiat.



**Figure II-10 - Imbibition des essais de C.B.R.**

**Figure II.14. Imbibition des Essai C. B.R**

## **Essais d'évolutivité:**

Le guide des terrassements routiers en usage en France (LCPC-SETRA, 2000b) recommande d'utiliser les coefficients de fragmentabilité et de dégradabilité comme paramètres d'état et de comportement mécanique dans la classification des roches argileuses du point de vue de leur évolutivité.

Le traitement aux liants hydrauliques des roches argileuses peut avoir des conséquences sur leur évolutivité, puisque leur structure se modifie sous l'effet des sollicitations extérieures. Ces sollicitations peuvent être appliquées par les engins au cours des travaux ou au cours de la vie de l'ouvrage sous l'action des contraintes mécaniques et des modifications d'état hydrique

### **a) Le coefficient de dégradabilité NF P94 067**

Est un paramètre représentatif du comportement de certains matériaux rocheux se traduisant par une évolution continue de leurs caractéristiques géotechniques (granularité, argilosité, plasticité,) par rapport à celles observées immédiatement après leur extraction.

Sa détermination permet de préciser le classement des roches argileuses.

#### **Principe:**

L'essai consiste à déterminer la réduction du D10 d'un échantillon de 2 kg d'une fraction de 10/20, soumis

À quatre cycles imbibition- séchages conventionnels [16]. Les durées de séchage et d'immersion sont respectivement 8h et 16h. Après les quatre cycles de 24h, L'échantillon est soumis à une analyse granulométrique

Complète. L'essai se traduit par le coefficient de dégradabilité DG

L'essai consiste à déterminer la réduction de la dimension des grains en-dessous de laquelle se situe 10% de la masse d'un matériau constitué de grains retenus en totalité entre deux tamis de mailles de taille donnée soumis à quatre cycles imbibition-séchage conventionnels.

#### **Méthode:**

Le tamisage est effectué après la fragmentation de l'échantillon. Les tailles de tamis dépendront du type de matériau.

A partir de cela, on procède à la reconstitution et à la réhomogénéisation de la fraction en la répartissant dans un bac métallique que l'on place alternativement quatre fois successivement en immersion dans un grand bac, puis dans l'étuve à 105°C. Le 1er cycle débute par une mise en immersion et le 4ème cycle se termine par un séchage.

Après le 4ème cycle, on procède au tamisage.

## Liste du matériel et Vérification

### Matériel:

Colonne de tamis de mailles: 1, 2, 5, 10, 16 mm Etuve thermo statée réglable à  $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$   
Bac métallique plat de dimensions minimales {H x I x L}: 0,1 m x 0,3 m x 0,5 m. Bac plat de dimensions minimales {H x I x L}: 0,25 m x 0,5 m x 0,75 m. Balance portée 3000g, précision  $\pm 1\text{g}$ .

Fréquence du contrôle des appareils:

Balances, contrôle pesée mensuelle Jeu de tamis contrôle annuel

Essai de dégradabilité: L'essai de dégradabilité a été réalisé conformément à la norme algérienne en vigueur (NA 5281) compatible avec la norme française en vigueur (NF P94-067). Il a pour but de déterminer la probabilité des sols indurés et des matériaux rocheux à se dégrader sous l'effet des actions climatiques ou des agents hydrogéologiques (gelée, cycles séchage/imbibition) et sous l'effet des contraintes mécaniques. Le coefficient de dégradabilité DG est défini par le rapport des diamètres des grains correspondant à 10% de tamisât d'un échantillon d'essai mesurés avant et après l'avoir soumis à des cycles d'immersion-séchage conventionnels. Selon la classification LCPC-SETRA (2000b) des sols fins et des matériaux rocheux évolutifs en usage en France,

Les seuils retenus sont  $DG=5$  et  $DG=20$  de sorte que:

Si  $DG \leq 5$  le matériau est considéré comme peu dégradable

• si  $DG \geq 20$ , le matériau est considéré comme dégradable

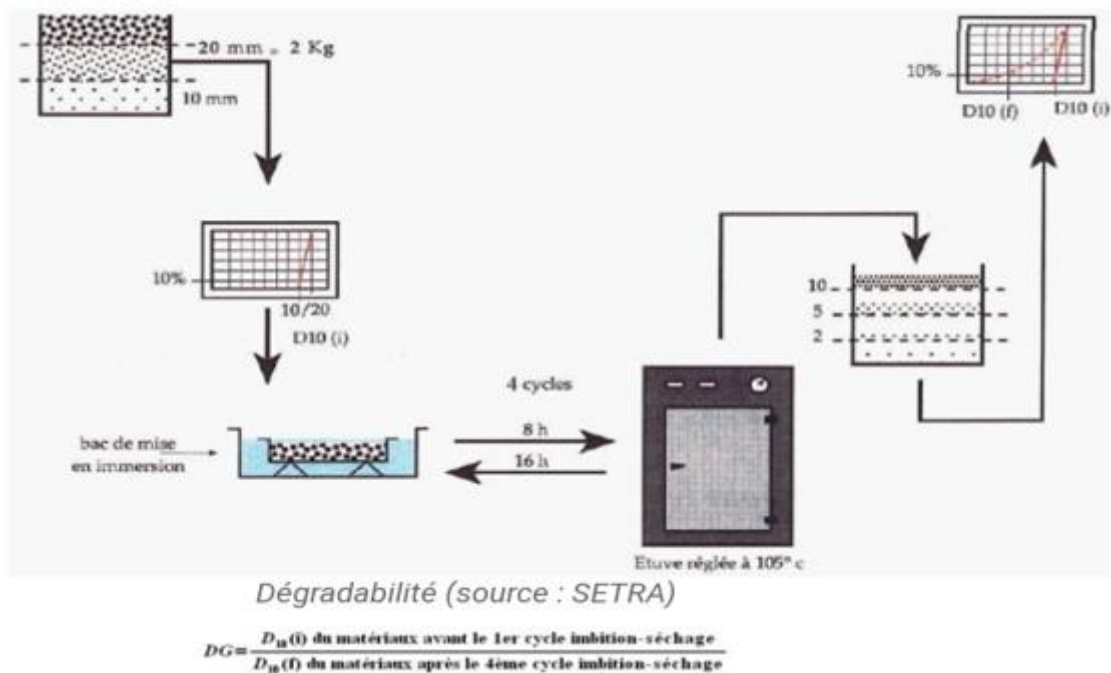


Figure II.15 Essai dégradabilité (source: SETRA)

## b) Le coefficient de fragmentabilité NF P94 066

Constitue un des paramètres représentatifs du comportement de certains matériaux rocheux se traduisant par une évolution de leur granularité.

### Principe:

L'essai consiste à déterminer la réduction de la dimension des grains en-dessous de laquelle se situe 10% de la masse d'un matériau constitué de grains retenus en totalité entre deux tamis de mailles de taille donnée soumis à un pilonnage conventionnel.

### Méthode:

Le tamisage est effectué après la fragmentation de l'échantillon.

Les tailles de tamis dépendront du type de matériau.

A partir de cela, on procède à la reconstitution et à la réhomogénéisation en l'introduisant dans le moule CBR pour le compactage.

Et enfin on effectue un tamisage après le démoulage et la désagrégation de l'échantillon.

Liste du matériel et Vérification

### Matériel:

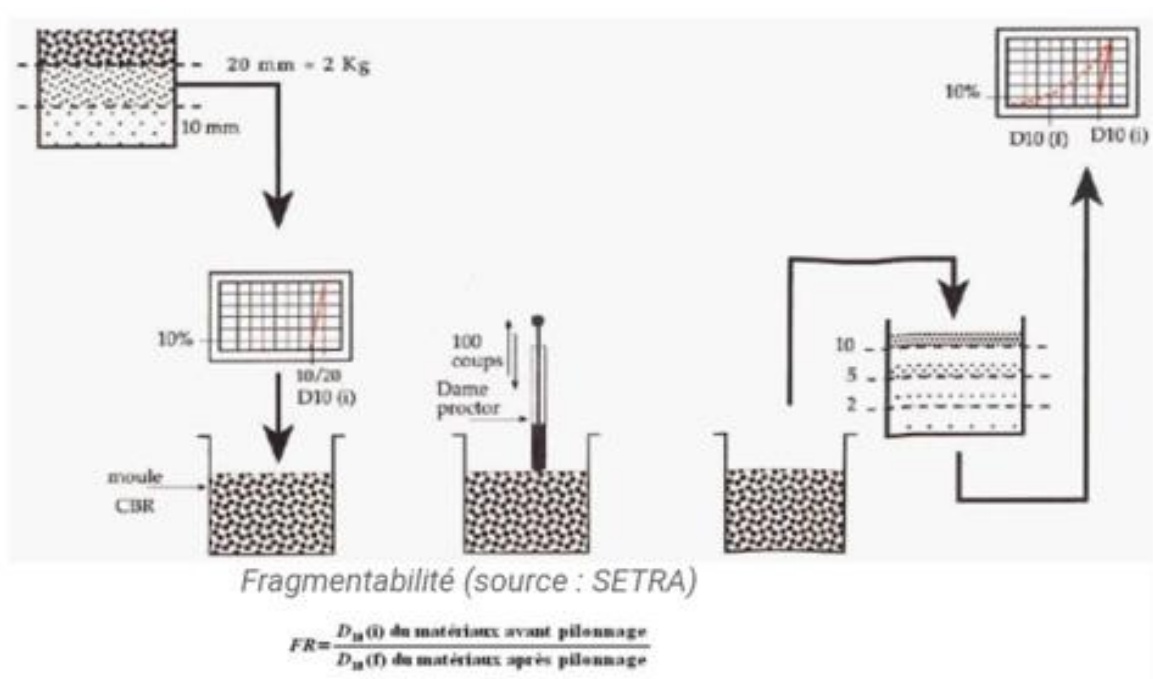
Le moule CBR La Dame Proctor Normal Le massif de réaction Balance électronique précise à 1/1000. Pinceaux. Une colonne de tamis de mailles: 1, 2, 5, 10, 16, 20 mm

Fréquence du contrôle des appareils:

Balances, contrôle pesée mensuelle Jeu de tamis contrôle annuel



L'essai de fragmentabilité selon la norme NF P 94-066 [15] permet d'apprécier et de mesurer La Sensibilité d'un matériau rocheux à se fragmenter sous la sollicitation des engins de terrassements.

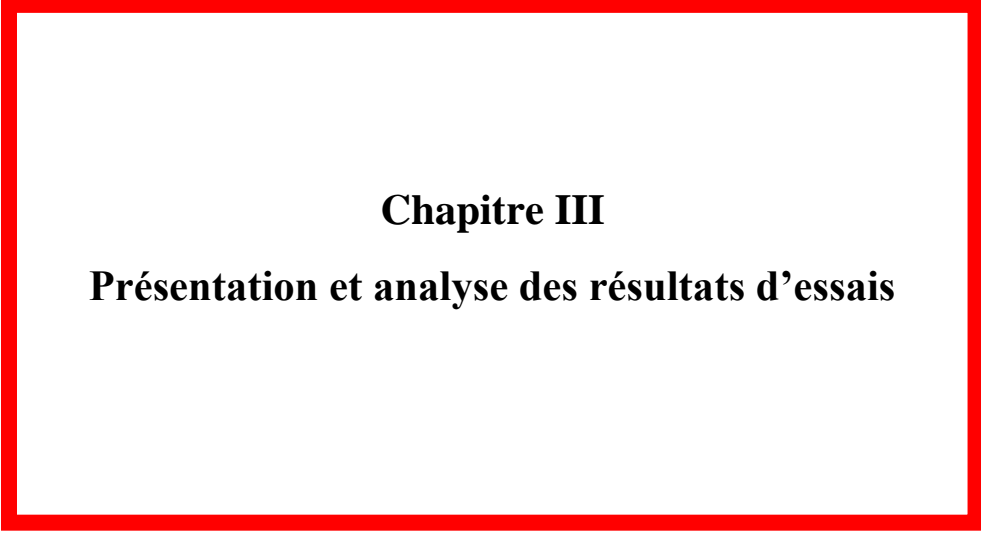


**Figure II.16. Essai fragmentabilité (source: SETRA)**

Seuil retenu  $FR=7$

$FR \leq 7$ : roche peu fragmentable.

$FR \geq 7$ : roche fragmentable.



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

## CHAPITRE III PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS D'ESSAIS

### *.Introduction :*

Ce chapitre regroupe l'ensemble des résultats de l'essai réalisé sur le sol étudié et leur interprétation, il est organisé sous forme de deux parties : Une première partie concernant le sol non traité, qui comporte les essais d'identification (analyse granulométrie et, limites d'Atterberg) l'essai au bleu de méthylène, l'essai mécanique (Proctor modifié,)

Une deuxième partie portant sur le sol traité à différentes teneurs en ciment et différentes classes, qui regroupe des essais physiques et de essais mécaniques (Proctor modifié, Les interprétations des résultats seront décrites à la fin de chaque partie du sol traité.

### **III.1. Les essais d'identification :**

#### **III.1.1. Analyse granulométrique :**

**Tableau III.1: Analyse granulométrique par tamisage de l'essai 1**

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
<b>5</b>	7.12	7.12	27.59	98.57
<b>2.5</b>	10.71	17.83	41.51	97.85
<b>1.25</b>	15.29	33.12	59.26	96.94
<b>0.63</b>	18.96	52.08	73.48	96.20
<b>0.315</b>	21.67	73.75	83.99	95.66
<b>0.16</b>	23.82	97.57	92.32	95.23
<b>0.008</b>	25.60	123.17	99.22	94.88

**Tableau III.2: Analyse granulométrique par tamisage de l'essai n° 02**

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
<b>5</b>	5.70	5.70	28.92	98.86
<b>2.5</b>	9.12	14.82	46.38	98.17
<b>1.25</b>	12.43	27.25	63.22	97.51
<b>0.63</b>	15.20	42.45	77.31	96.96
<b>0.315</b>	17.02	59.47	86.57	96.59
<b>0.16</b>	18.09	77.56	92.01	96.38
<b>0.008</b>	19.42	96.98	98.71	96.11

**Tableau III.3: Analyse granulométrique par tamisage de l'essai n° 03**

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
<b>5</b>	5,88	5,88	25,86	98,82
<b>2.5</b>	9,67	15,55	50.02	97,06
<b>1.25</b>	13,09	28,64	67,71	97,38
<b>0.63</b>	15,45	44,09	97,92	96,91
<b>0.315</b>	16,99	61,08	87,89	96,60
<b>0.16</b>	17,84	78,92	92,29	96,43
<b>0.008</b>	19,88	98,1	99.2	96,13

**Tableau III.4: Analyse granulométrique par tamisage de l'essai 4**

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
<b>5</b>	7,38	5,38	27,48	98,52
<b>2.5</b>	11,59	16,97	43,16	97,68
<b>1.25</b>	16,18	33,15	60,26	96,76
<b>0.63</b>	20,01	53,16	74,52	95,99
<b>0.315</b>	22,80	75,96	84,91	95,44
<b>0.16</b>	25,19	101,15	93,81	94,96
<b>0.008</b>	26,56	127,71	98,91	94,68

**Tableau III.5: Analyse granulométrique par tamisage de l'essai 5**

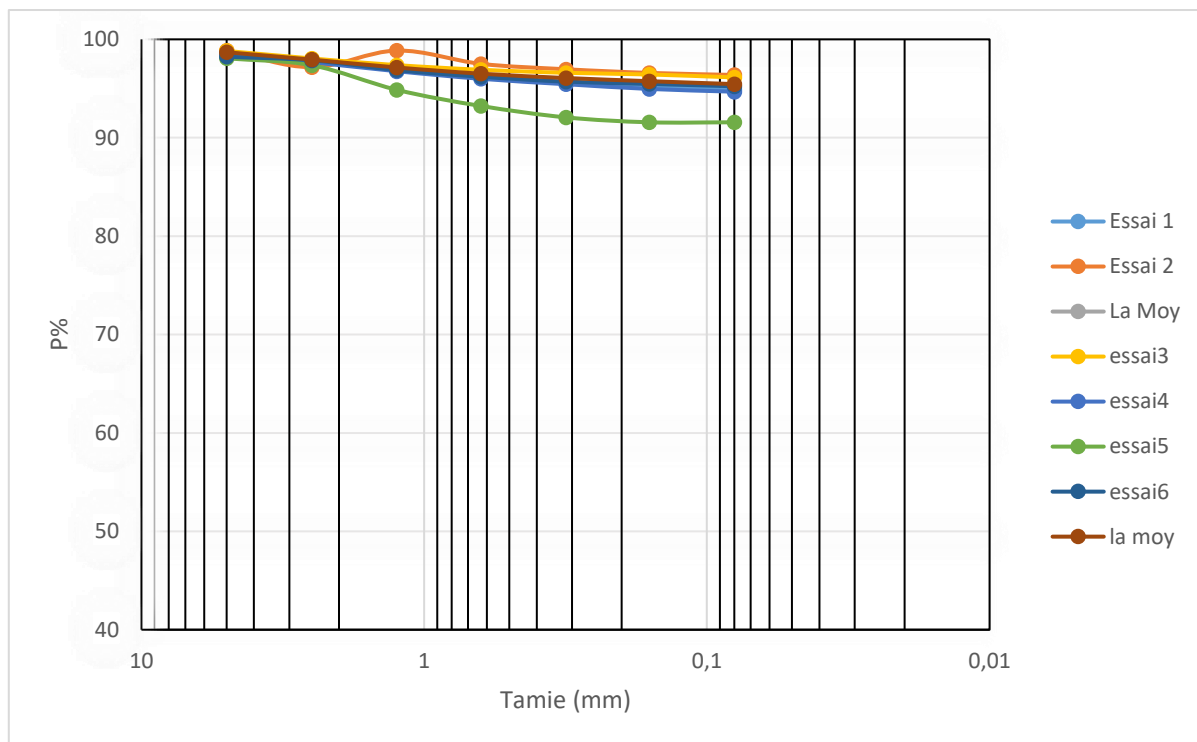
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
<b>5</b>	5,13	5,3	1,77	98,23
<b>2.5</b>	1,1	6,4	2,13	97,87
<b>1.25</b>	3	9,4	3,13	96,87
<b>0.63</b>	2	11,4	3,8	96,2
<b>0.315</b>	1,5	12,9	4,3	95,7
<b>0.16</b>	0,7	13,6	4,53	95,47
<b>0.008</b>	0,7	14,3	4,77	95,23

**Tableau III 6: Analyse granulométrique par tamisage de l'essai 6**

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
<b>5</b>	5,8	5,8	1,93	98,07
<b>2.5</b>	2,1	7,9	2,63	97,37
<b>1.25</b>	7,5	15,4	5,13	94,87
<b>0.63</b>	4,9	20,3	6,77	93,23
<b>0.315</b>	3,5	23,8	7,93	92,07
<b>0.16</b>	1,5	25,3	8,43	91,57
<b>0.008</b>	0	25,3	8,43	91,57

**Tableau III.7: Récapitulation des essais de l'analyse granulométrique**

Tamisât en (%)							
Tamis (mm)	Essai 01	Essai 02	Essai03	Essai 04	Essai 05	Essai 06	<i>MOYEN</i>
<b>5</b>	98.57	98.86	98.82	98.52	98.07	98.23	98.69
<b>2.5</b>	97.85	98.17	98.06	97.68	97.37	97.87	97.94
<b>1.25</b>	96.94	97.51	97.38	96.76	94,87	96.87	97.14
<b>0.63</b>	96.20	96.96	96.91	95.99	93,23	96,2	96.51
<b>0.315</b>	95.66	96.59	96.60	95.44	92,07	95,7	96.07
<b>0.16</b>	95.23	96.38	96.43	94.96	91,57	95,47	95.75
<b>0.008</b>	94.88	96.11	96.13	94.68	91,57	95,23	95.45

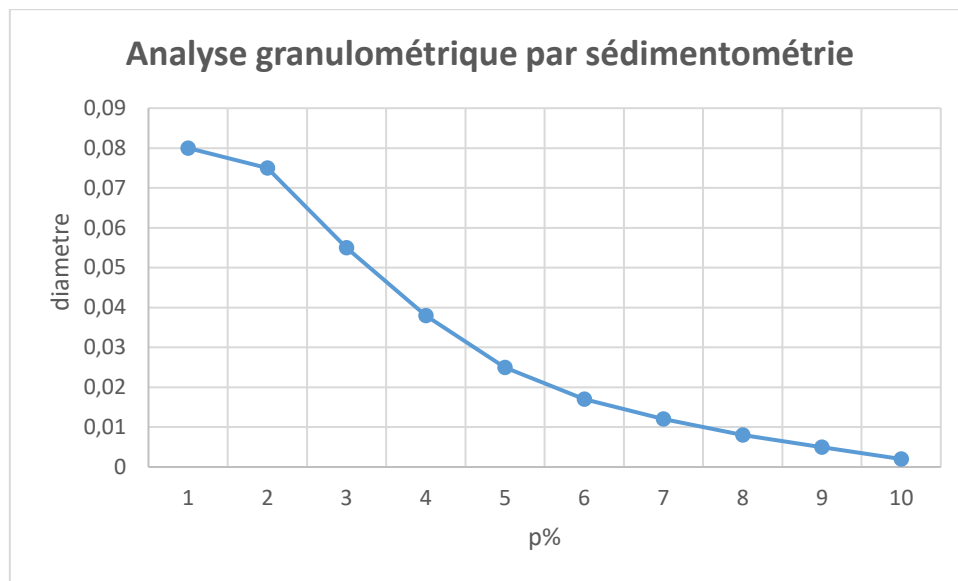


La figure III.1 Présente les courbes des essais d'analyse granulométrique par tamisage

### III.1.2. - Analyse granulométrique par sédimentométrie :

Essai N 01: Tableau III. 8: Analyse granulométrique par sédimentométrie l'essai 1

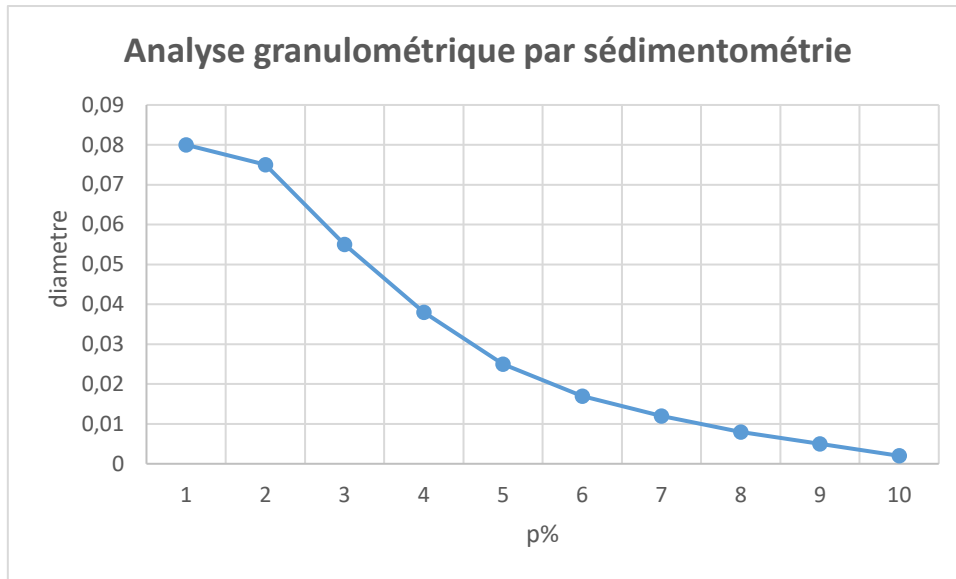
Passant a	80u=94.88					
Temps de lecture (minutes)	Lecture densimètre sommet du ménisque R	Température C°	Correction temps	Lecture corrigé	Diamètre(u)	Tamisât par rapport à l'échantillon total P.p.
0.5	20	22.5	-0.480	20.48	80	94.88
1	20	22.5	-0.480	20.48	75	94.88
2	20	22.5	-0.480	20.48	55	94.88
5	20	23	-0.580	20.58	38	94.88
10	19.5	23	-0.580	20.08	25	92.57
20	19	23	-0.580	19.58	17	90.27
40	18	23	-0.580	18.58	12	85.66
80	16	24	-0.790	16.79	8	76.63
240	15	25	-1.020	16.02	5	72.31
1440	10	25	-1.020	11.02	2	49.74



La figure III.2: courbe Analyse granulométrique par sédimentométrie l'essai 1

Essai N02 Tableau III. 9: Analyse granulométrique par sédimentométrie l'essai 2

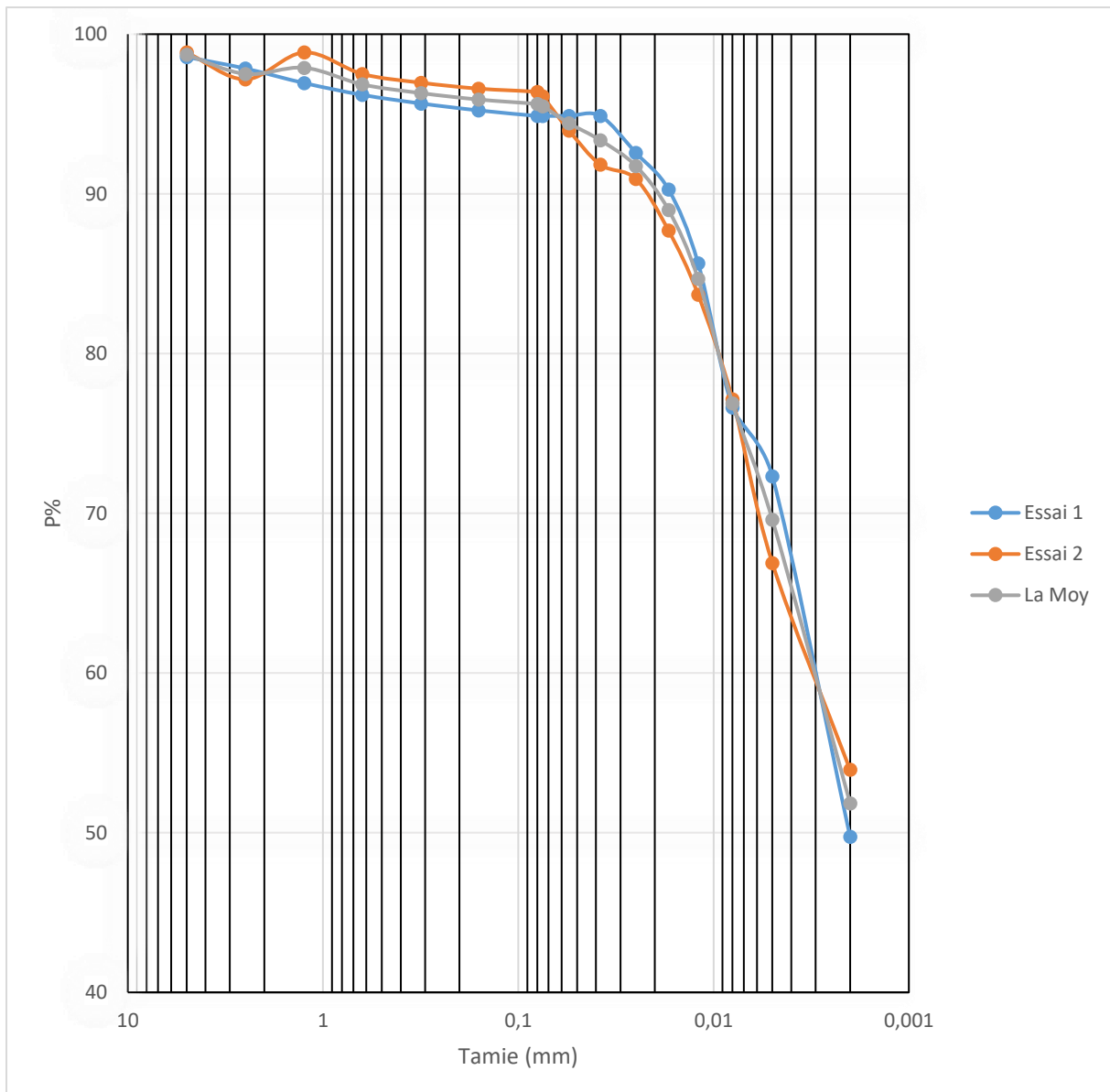
Passant a 80u=96,11						
Temps de lecture (minutes)	Lecture densimètre sommet du ménisque R	Température C°	Correction temps	Lecture corrigé	Diamètre(u)	Tamisât par rapport à l'échantillon total P.p.
0.5	22	22.5	-0.480	20.48	80	96.11
1	21.5	22.5	-0.480	20.48	75	93.97
2	21.5	22.5	-0.480	20.48	55	93.97
5	21	22.5	-0.480	20.58	38	91.83
10	21.5	23	-0.580	20.08	25	93.98
20	20	23	-0.580	19.58	17	87.6
40	19	24	-0.790	18.58	12	83.69
80	17.5	24	-0.790	16.79	8	77.13
240	15	25	-1.020	16.02	5	66.88
1440	12	24	-0.790	11.02	2	53.94



**La figure III.3: courbe Analyse granulométrique par sédimentométrie l'essai N02**

**TABLEAU III 10. d'analyse granulométrique (tamisage et sédimentométrie).**

Tamis (mm)	Essai 1	Essai2	La Moy
	5	98,57	98,86
2,5	97,85	97,17	97,51
1,25	96,94	98,86	97,9
0,63	96,2	97,51	96,855
0,315	95,66	96,96	96,31
0,16	95,23	96,59	95,91
0,08	94,88	96,38	95,63
0,075	94,88	96,11	95,495
0,055	94,88	93,97	94,425
0,038	94,88	91,83	93,355
0,025	92,57	90,93	91,75
0,017	90,27	87,7	88,985
0,012	85,66	83,69	84,675
0,008	76,63	77,13	76,88
0,005	72,31	66,88	69,595
0,002	49,74	53,94	51,84



**La figure III.4- Courbe d'analyse granulométrique (tamisage et sédimentométrie).**

### III.3.1 Discussion Des Résultats D'essais:

Caractéristiques d'identification: Les analyses granulométriques réalisées donnent un pourcentage de passants à 80 µm compris entre 94.88% et 96.11% avec une moyenne de 95.44%. Ces valeurs indiquent que le sol présente une granulométrie très fine. Le pourcentage de passants à 2 µm est en moyenne égal à 49.74%.

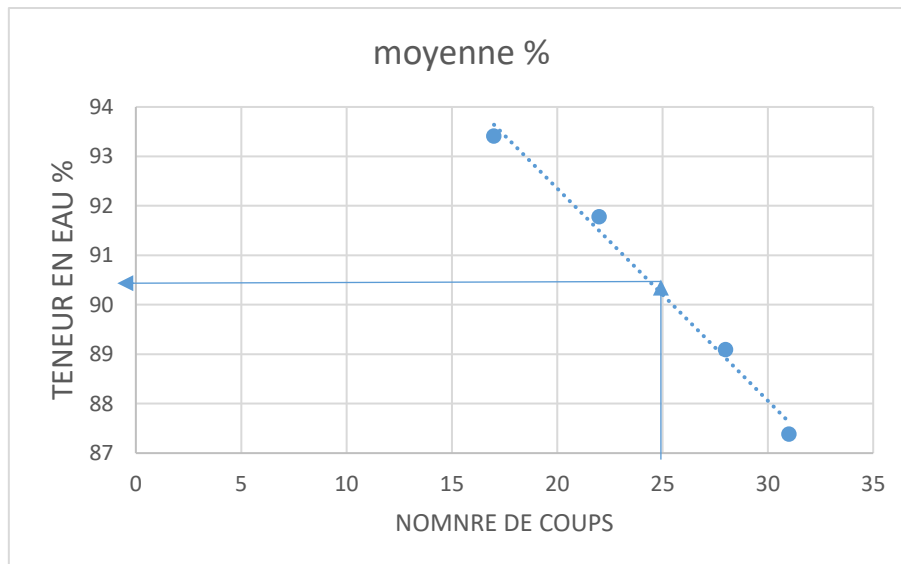
### III.1.3 Limites d'atterberg :

Les résultats de série d'essai 01 obtenus sont donnés dans le tableau suivant:

a) Limite de liquidité

Tableau III.10: Résultats des essais de limites d'Atterberg-sol naturel.

SANS TRAITEMENT	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
Nombre De Coupe	18	18	23	23	26	26	32	32
N° de la tare	1	2	3	4	5	6	7	8
Masse totale humide (g)	20.67	20.66	31.76	19.62	23.47	20.07	31.08	41.69
Masse totale sèche (g)	15.81	15.82	26.76	15.43	17.5	15.65	26.04	36.10
Masse de la tare (g)	10.16	10.13	20.66	10.19	10.20	10.15	19.77	29.12
Masse de l'eau (g)	4.86	4.84	5	4.19	5.97	4.42	5.04	5.59
Masse du sol sec (g)	5.65	5.69	6.1	5.24	7.3	5.5	6.27	6.98
Teneur en eau%	86.01	85.06	81.96	79.96	81.78	80.36	80.38	80.08
Moyenne %	85.53		80.96		81.07		80.23	
Moyenne Générale %	<b>81,94</b>							



**La figure III.5 La courbe de limite de liquidité du sol naturel de l'essai N°1**

**Tableau III.11: Valeurs des limites de liquidité en fonction de la teneur en ciment suivants :2%/4%/6%/8%/10%/12%:**

2%	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
<b>Nombre De Coupe</b>	16	16	21	21	28	28	33	33
<b>N° de la tare</b>	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Masse totale humide (g)</b>	21.71	33.37	33.99	24.58	36.67	35.63	36.15	26.23
<b>Masse totale sèche (g)</b>	18.04	29.07	29.36	19.57	30.91	30.54	30.59	20.55
<b>Masse de la tare (g)</b>	13.58	23.84	23.75	13.58	23.79	24.18	23.72	13.60
<b>Masse de l'eau (g)</b>	3.67	4.3	4.63	5.01	5.76	5.09	5.56	5.68
<b>Masse du sol sec (g)</b>	4.46	5.23	5.61	5.99	7.12	6.36	6.87	6.95
<b>Teneur en eau%</b>	82.28	82.21	82.53	83.63	80.89	80.03	80.93	81.72
<b>Moyenne %</b>	83.08		82.24		80.46		81.32	
<b>Moyenne Générale %</b>	81,77							

<b>DOSAGE 4%</b>	<b>Essai 1</b>		<b>Essai 2</b>		<b>Essai 3</b>		<b>Essai 4</b>	
<b>Nombre De Coupe</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>26</b>	<b>26</b>	<b>32</b>	<b>32</b>
<b>N° de la tare</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>Masse totale humide (g)</b>	26.22	24.16	25.26	24.86	17.90	25.03	20.75	22.44
<b>Masse totale sèche (g)</b>	20.55	19.40	19.82	19.62	14.40	19.98	17.70	18.65
<b>Masse de la tare (g)</b>	13.75	13.83	13.13	13.17	10.16	13.85	13.76	13.77
<b>Masse de l'eau (g)</b>	5.67	4.76	5.44	5.24	3.5	5.05	3.05	3.79
<b>Masse du sol sec (g)</b>	6.8	5.57	6.69	6.45	4.24	6.13	3.94	4.88
<b>Teneur en eau%</b>	83.38	85.45	81.31	82.54	82.38	77.41	77.66	77.53
<b>Moyenne %</b>	81.24		84.41		81.27		82.46	
<b>Moyenne Générale %</b>	<b>81.41</b>							

<b>6%</b>	<b>Essai 1</b>		<b>Essai 2</b>		<b>Essai 3</b>		<b>Essai 4</b>	
<b>Nombre De Coupe</b>	<b>19</b>	<b>16</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>28</b>	<b>28</b>	<b>32</b>	<b>32</b>
<b>N° de la tare</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>Masse totale humide (g)</b>	33.66	32.97	25.40	34.34	36.77	35.53	26.83	22.07
<b>Masse totale sèche (g)</b>	28.01	27.21	21.55	29.75	31.10	30.35	21.14	16.91
<b>Masse de la tare (g)</b>	20.99	20.08	16.87	24.05	23.85	23.76	13.84	10.20
<b>Masse de l'eau (g)</b>	5.65	5.76	3.85	4.59	5.67	5.18	5.69	5.16
<b>Masse du sol sec (g)</b>	7.02	7.13	4.68	5.7	7.25	6.59	7.3	6.71
<b>Teneur en eau%</b>	80.48	80.78	82.26	80.52	78.20	78.60	77.9	76.90
<b>Moyenne %</b>	80.63		81.39		78.4		77.4	
<b>Moyenne Générale %</b>	<b>79,45</b>							

8%	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
	Essai 1	Essai 1	Essai 2	Essai 2	Essai 3	Essai 3	Essai 4	Essai 4
Nombre De Coupe	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>27</b>	<b>27</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
N° de la tare	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
Masse totale humide (g)	18.55	19.76	19.31	17.36	18.60	16.65	15.12	34.25
Masse totale sèche (g)	14.23	15.02	14.70	13.54	14.33	13.29	12.44	31.23
Masse de la tare (g)	8.80	9.02	8.61	8.57	8.54	8.74	8.92	27.33
Masse de l'eau (g)	4.32	4.74	4.61	3.82	4.27	3.36	2.68	3.02
Masse du sol sec (g)	5.43	6	6.09	4.97	5.79	4.55	3.52	3.9
Teneur en eau%	79.55	<b>79,00</b>	75.69	76.86	73.74	73.84	76.13	77.43
Moyenne %	79.27		76.78		76.27		73.79	
Moyenne Générale %	<b>79,52</b>							

10%	Essai	Essai	<b>Essai</b>	<b>Essai</b>	<b>Essai</b>	<b>Essai</b>	<b>Essai</b>	<b>Essai</b>
	1	1	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>4</b>
Nombre De Coupe	<b>18</b>	<b>18</b>	24	24	27	27	33	33
N° de la tare	<b>1</b>	<b>2</b>	3	4	5	6	7	8
Masse totale humide (g)	<b>30.49</b>	<b>25.52</b>	19.84	42.27	30.21	17.70	14.96	14.14
Masse totale sèche (g)	<b>22.99</b>	<b>18.70</b>	15.59	36.40	26.23	14.59		
Masse de la tare (g)	<b>13.75</b>	<b>10.16</b>	10.20	29.12	20.66	10.19	10.15	10.13
Masse de l'eau (g)	<b>7.5</b>	<b>6.82</b>	4.25	5.87	3.95	3.11	3.26	2.69
Masse du sol sec (g)	<b>9.24</b>	<b>8.54</b>	5.39	7.28	5.57	4.4	4.81	4.01
Teneur en eau%	<b>81.16</b>	<b>79.85</b>	78.84	80.63	71.45	70.68	69.77	69.08
Moyenne %	<b>80.50</b>		79.73		71.06		69.42	
Moy general	<b>74.89</b>							

<b>DOSAGE 12%</b>	<b>Essai 1</b>	<b>Essai 1</b>	<b>Essai 2</b>	<b>Essai 2</b>	<b>Essai 3</b>	<b>Essai 3</b>	<b>Essai 4</b>	<b>Essai 4</b>
<b>Nombre De Coupe</b>	18	18	21	21	28	28	35	35
<b>N° de la tare</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>Masse totale humide (g)</b>	9.26	10.12	10.76	11.02	12.07	13.92	6.82	8.07
<b>Masse totale sèche (g)</b>	5.36	5.85	6.20	6.35	7.11	8.17	4.12	4.83
<b>Masse de la tare (g)</b>	0.32	0.31	0.32	0.30	0.44	0.32	0.30	0.31
<b>Masse de l'eau (g)</b>	3.9	4.27	4.56	4.67	4.96	5.75	2.7	3.24
<b>Masse du sol sec (g)</b>	5.04	5.54	5.88	6.05	6.67	7.85	3.82	4.52
<b>Teneur en eau%</b>	<b>77.38</b>	<b>77,07</b>	<b>77,55</b>	<b>77,19</b>	<b>74,36</b>	<b>73,24</b>	<b>70,68</b>	<b>71,68</b>
<b>Moyenne %</b>	77.37		77.22		73.8		71.18	
<b>Moyenne Générale %</b>	<b>74,89</b>							

**b) Limite de plasticité:**

**Tableaux III.12: Détermination de la limite de plasticité sol %2/4/6/8/10/12 DOSAGES ciment.**

ESSAI	sans DOSAGE %			
<b>TARE+sol humid</b>	6.06	5.11	5.37	17.30
<b>M1</b>	6.13	6.01	6.07	17.17
<b>Tare+sol sec M2</b>	5.65	4.69	4.95	16.87
	5.71	5.68	5.72	16.83
<b>Masse d'eau</b>	0.41	0.42	0.42	0.43
<b>Mw=M1-M2</b>	0.42	0.33	0.35	0.34
<b>TARE M0</b>	4.64	3.61	3.76	15.72
	4.64	4.72	4.66	15.85
<b>Masse sol sec</b>	1.01	1.08	1.19	1.15
<b>Ms=M2+M0</b>	1.07	0.96	1.06	0.98
<b>Teneur en eau</b>	40.59	38.88	35.29	37.39
<b>Mw=(Mw/Ms)100</b>	39.25	34.37	33.01	34.69
<b>moyenne</b>	36.92	36.62	36.04	36.62
<b>Moy general</b>	36.68			

ESSAI	DOSAGE 2 %			
<b>TARE+sol humid</b>	17.07	16.97	17.12	16.71
<b>M1</b>	17	17.57	16.96	20.81
<b>Tare+sol sec M2</b>	16.65	16.5	16.71	16.24
	16.62	17.1	16.48	20.29
<b>Masse d'eau</b>	0.42	0.47	0.41	0.47
<b>Mw=M1-M2</b>	0.38	0.47	0.48	0.52
<b>TARE M0</b>	15.77	15.68	15.77	15.55
	15.61	16.19	15.62	19.31
<b>Masse sol sec</b>	0.88	0.82	0.94	0.69
<b>Ms=M2+M0</b>	1.01	0.91	0.86	0.98
<b>Teneur en eau</b>	47.72	57.31	43.61	68.11
<b>Mw=(Mw/Ms)100</b>	37.62	51.64	55.81	53.06
<b>moyenne</b>	52.58	51.47	49.71	50.67
	51.85			

ESSAI	DOSAGE 4 %			
<b>TARE+sol humid M1</b>	5.66	4.76	5.12	11.39
	5.88	6.04	5.60	20.95
<b>Tare+sol sec M2</b>	5.36	4.34	4.67	10.94
	5.50	5.63	5.27	20.51
<b>Masse d'eau</b>	0.3	0.42	0.45	0.45
<b>Mw=M1-M2</b>	0.38	0.41	0.33	0.44
<b>TARE M0</b>	4.64	3.61	3.76	10.16
	4.64	4.72	4.66	19.77
<b>Masse sol sec</b>	0.72	0.73	0.91	0.78
<b>Ms=M2+M0</b>	0.86	0.71	0.61	0.71
<b>Teneur en eau</b>	41.66	57.53	49.45	57.69
<b>Mw=(Mw/Ms)100</b>	44.18	57.74	54.09	61.97
<b>moyenne</b>	53.83	53.63	53.77	52.92
	53.03			

<b>ESSAI</b>	<b>DOSAGE 6%</b>			
<b>TARE+sol humid M1</b>	5.66	4.76	5.12	11.39
	5.88	6.04	5.60	20.95
<b>Tare+sol sec M2</b>	5.36	4.34	4.67	10.94
	5.50	5.63	5.27	20.51
<b>Masse d'eau</b>	0.3	0.42	0.45	0.45
<b>Mw=M1-M2</b>	0.38	0.41	0.33	0.44
<b>TARE M0</b>	4.64	3.61	3.76	10.16
	4.64	4.72	4.66	19.77
<b>Masse sol sec</b>	0.72	0.73	0.91	0.78
<b>Ms=M2+M0</b>	0.86	0.71	0.61	0.71
<b>Teneur en eau</b>	41.66	57.53	49.45	57.69
<b>Mw=(Mw/Ms)100</b>	44.18	57.74	54.09	61.97
<b>moyenne</b>	53.80	53.17	52.01	53.9
			53.32	

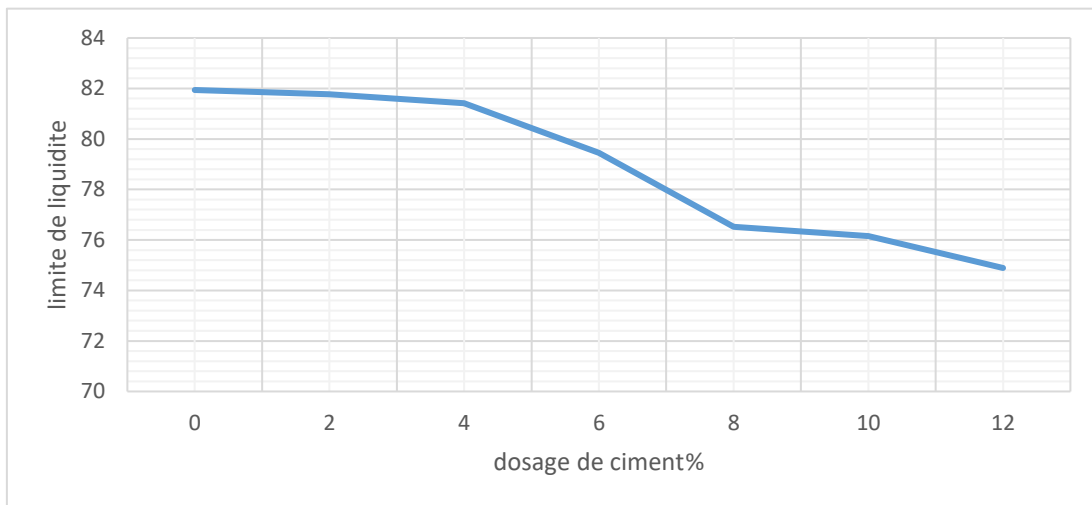
<b>ESSAI</b>	<b>DOSAGE 8%</b>			
<b>TARE+sol humid M1</b>	22.51 22.49	18.51 22.60	22.91 22.66	22.33 22.47
<b>Tare+sol sec M2</b>	22.01 22.01	18.04 22.13	22.39 22.12	21.89 21.98
<b>Masse d'eau</b> <b>Mw=M1-M2</b>	0.5 0.48	0.47 0.47	0.52 0.54	0.44 0.49
<b>TARE M0</b>	21.17 21.24	17.23 21.32	21.47 21.13	21.10 21.07
<b>Masse sol sec</b> <b>Ms=M2+M0</b>	0.84 0.77	0.81 0.81	0.92 0.99	0.79 0.91
<b>Teneur en eau</b> <b>Mw=(Mw/Ms)100</b>	59.52 62.33	58.02 58.02	56.52 54.54	55.69 53.84
<b>moyenne</b>	56.56	57.02	55.53	56.76
	<b>57.30</b>			

ESSAI	DOSAGE10 %			
	<b>TARE+sol humid M1</b>	22.15	21.63	16.53
	22.18	17.77	15.46	18.13
<b>Tare+sol sec M2</b>	21.62	21.26	16.23	21.55
	21.88	17.46	15.17	17.66
<b>Masse d'eau</b>	0.53	0.37	0.3	0.31
<b>Mw=M1-M2</b>	0.3	0.31	0.29	0.47
<b>TARE M0</b>	21.03	20.47	15.75	20.91
	21.18	16.88	14.56	16.77
<b>Masse sol sec</b>	0.59	0.79	0.48	0.64
<b>Ms=M2+M0</b>	0.7	0.58	0.61	0.89
<b>Teneur en eau</b>	89.83	63.79	62.5	48.43
<b>Mw=(Mw/Ms)100</b>	42.85	53.44	47.54	52.80
<b>moyenne</b>	57.22	58.61	55.02	57.61
	<b>57.64</b>			

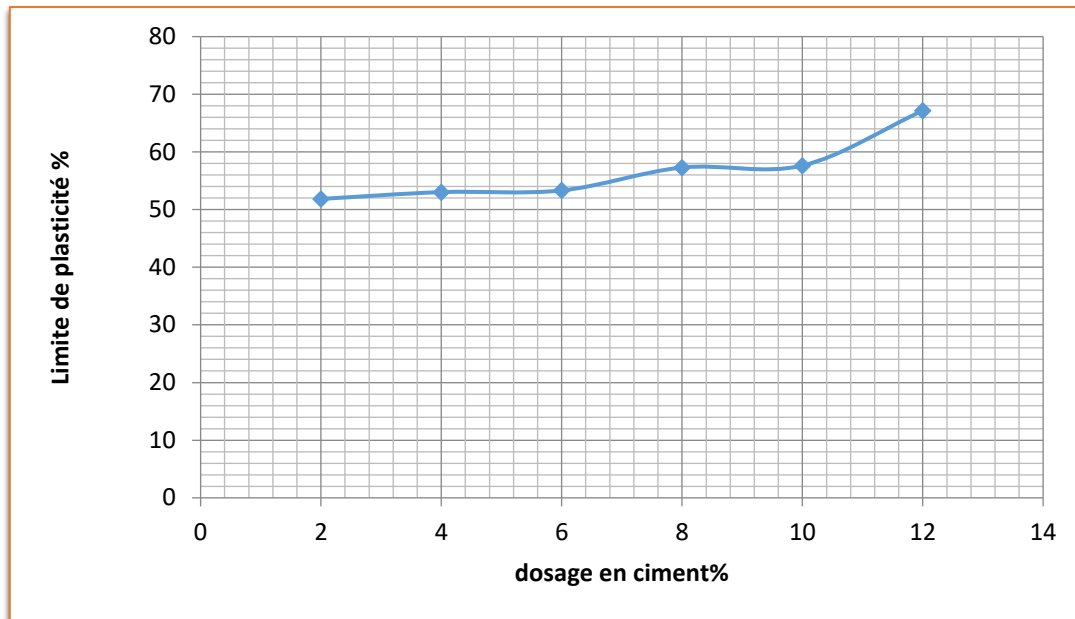
	<b>Dosage de ciment 12%</b>			
<b>TARE+sol humid M<sub>1</sub></b>	16.68 23.15	18.13 1.10	18.57 17.03	22.44 17.50
<b>Tare+sol sec M<sub>2</sub></b>	16.33 22.55	17.75 0.96	18.18 16.58	21.99 16.70
<b>Masse d'eau</b> <b>M<sub>w</sub>=M<sub>1</sub>-M<sub>2</sub></b>	0.35 0.6	0.38 0.14	0.39 0.45	0.45 0.8
<b>TARE M<sub>0</sub> (vide)</b>	15.68 21.42	17.13 0.32	17.52 15.72	21.16 15.72
<b>Masse sol sec</b> <b>M<sub>s</sub>=M<sub>2</sub>+M<sub>0</sub></b>	0.65 1.13	0.62 0.64	0.66 0.86	0.83 0.98
<b>Teneur en eau</b> <b>M<sub>w</sub>=(M<sub>w</sub>/M<sub>s</sub>)100</b>	53.84 53.09	61.29 21.87	59.09 52.32	54.21 81.63
<b>moyenne</b>	67.34	67.58	66.70	67.92
<b>Moy</b>	<b>67.16</b>			

**Tableau III.13 : Valeurs des limites de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité en fonction du dosage en ciment.**

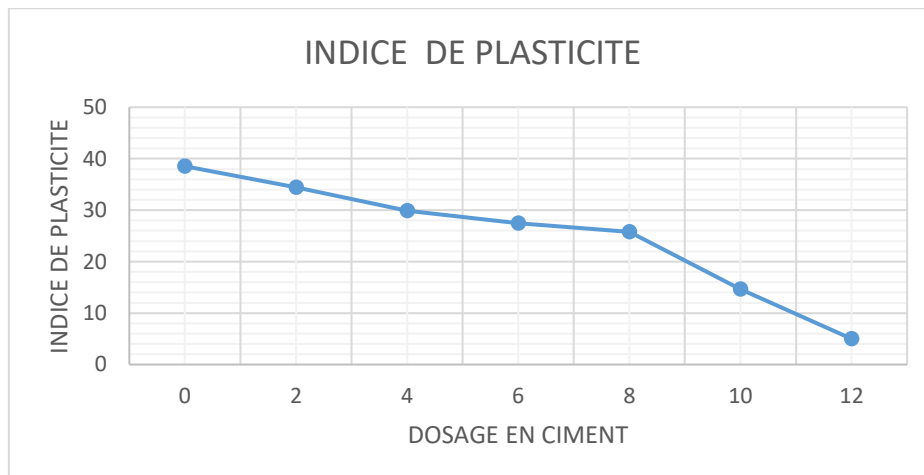
<b>Dosage en ciment</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12</b>
<b>Limite de liquidité %</b>	81.94	81.77	81.41	79.45	76.52	76.16	74.89
<b>Limite de plasticité %</b>	36.68	51.85	53.03	53.32	57.30	57.64	67.16
<b>Indice de plasticité</b>	45.26	29.92	28.38	26.13	19.22	18.52	7.73



**La figure III.6: COURBE Limite de liquidité en fonction du dosage en ciment. Essai N 01**



*La figure III.7: COURBE DE Limite de liquidité en fonction du dosage en ciment.*



*La figure III.8: courbe d'Indice de plasticité en fonction du dosage en ciment.*

**Le tableau (III-14) d'essai N°01: présente les valeurs des limites de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité en fonction du dosage en ciment.**

Dosage en ciment	0 %	2 %	4 %	6 %	8 %	10 %	12 %
Limite de liquidité %	92.67	90.4	88.6	81.895	81.395	80.93	75.98
Limite de plasticité %	33.3075	42.325	43.27	51.68	57.435	61.77	62.29
Indice de plasticité	59.36	48.075	45.33	30.46	23.96	19.16	13.69

**Le tableau (III-15) d'essai N°02: présente les valeurs des limites de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité en fonction du dosage en ciment.**

Dosage en ciment	0 %	2 %	4 %	6 %	8 %	10 %	12 %
Limite de liquidité %	91.71	86.38	85.64	81.715	80.83	78.28	75.89
Limite de plasticité %	37.605	39.5	39.93	42.46	51.52	58.14	67.84
Indice de plasticité	54.105	46.88	45.71	39.255	29.31	20.14	8.05

**Le tableau (III-16) d'essai N°03: présente les valeurs des limites de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité en fonction du dosage en ciment.**

Dosage en ciment	0 %	2 %	4 %	6 %	8 %	10 %	12 %
Limite de liquidité %	81.7	81,69	80	79,39	79,32	76,6	61,98
Limite de plasticité %	30,26	31.1425	38,48	44.95	53,56	61,98	66,89
Indice de plasticité	38 .53	34.44	29.88	27.44	25.76	14.62	5

**Le tableau (III-17) d'essai N°04: présente les valeurs des limites de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité en fonction du dosage en ciment.**

Dosage en ciment	0 %	2 %	4 %	6 %	8 %	10 %	12 %
Limite de liquidité %	81.94	81.77	81.41	79.45	76.52	76.16	74.89
Limite de plasticité %	36.68	51.85	53.03	53.32	57.3	57.64	67.16
Indice de plasticité	45.26	29.92	28.38	26.13	19.22	18.52	7.73

**Le tableau (III-18) d'essai N°05: présente les valeurs des limites de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité en fonction du dosage en ciment.**

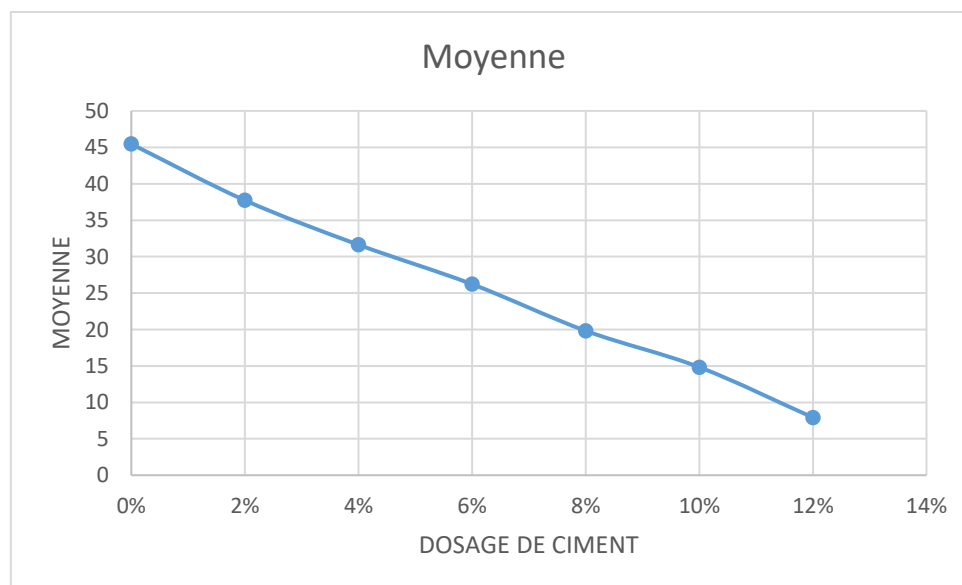
Dosage en ciment	0 %	2 %	4 %	6 %	8 %	10 %	12 %
Limite de liquidité %	76.05	74.36	64.04	71.8	67.3	62.04	64.3
Limite de plasticité %	34.76	40.43	41.8	49.77	54.3	53	57.24
Indice de plasticité	41.29	33.93	22.24	22.03	13	9.04	7.06

**Le tableau (III-19) d'essai N°06: présente les valeurs des limites de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité en fonction du dosage en ciment.**

Dosage en ciment	0 %	2 %	4 %	6 %	8 %	10 %	12 %
Limite de liquidité %	79.1	76.4	69.3	66.1	66.89	63.5	61.2
Limite de plasticité %	40.03	42.78	51.05	54.04	59.2	56	55.2
Indice de plasticité	39.07	33.62	18.25	12.06	7.69	7.5	6

**tableau (III-20): présente la récapitulation des résultats des séries d'essais de limites d'Atterberg**

Dosage en ciment	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Moyenne
0%	38.53	45.26	41.29	39.07	59.36	54.105	45.46
2%	34.44	29.92	33.93	33.62	48.075	46.88	37.73
4%	29.88	28.38	22.24	18.25	45.33	45.71	31.63
6%	27.44	26.13	22.03	12.06	30.46	39.255	26.22
8%	25.76	19.22	13	7.69	23.96	29.31	19.82
10%	14.62	18.52	9.04	7.5	19.16	20.14	14.83
12%	5	7.73	7.06	6	13.69	8.05	7.92



**La figure III. 9: La courbe des résultats d'essais de limites d'Atterberg**

### Commentaire:

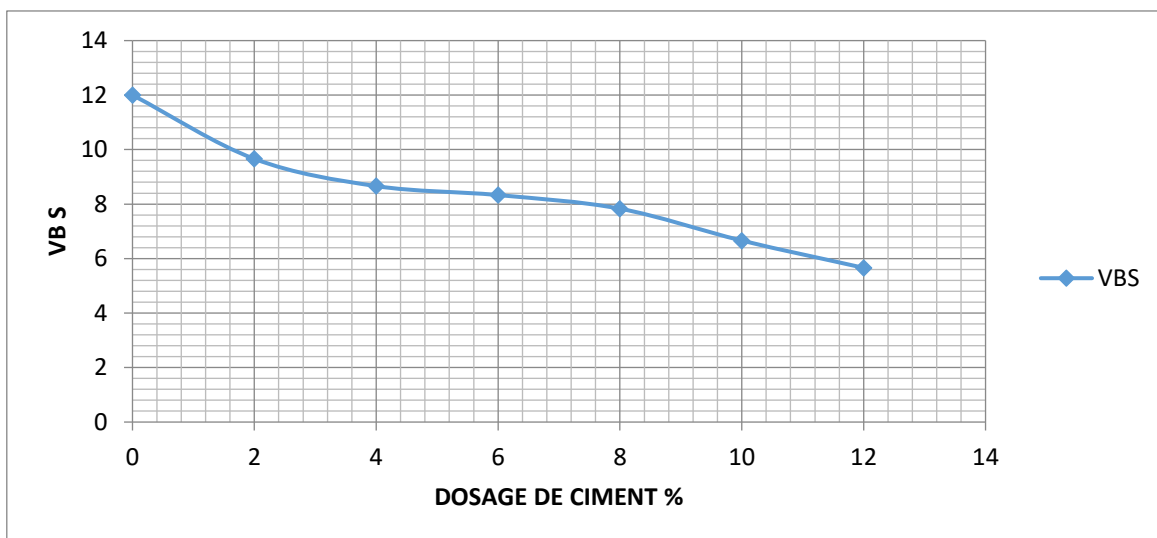
La limite de liquidité varie entre 72,63 et 82,16 avec une moyenne de 78,89 et l'indice de plasticité IP varie entre 37,73 et 39,00 avec une moyenne de 45,46. Ces valeurs sont très peu dispersées sur la profondeur explorée. Ils semblent indiquer que le massif est homogène dans la zone étudiée. Selon la classification LPC en vigueur (Magnan., 1980), il s'agit d'une argile marneuse très plastique (At) avec une activité normale de sa fraction argileuse. Les modifications de la teneur en eau de ce type de sol sont généralement accompagnées d'importants retraits ou gonflements

### III.1.4 Résultats L'essai de bleu méthylène (VBS) :

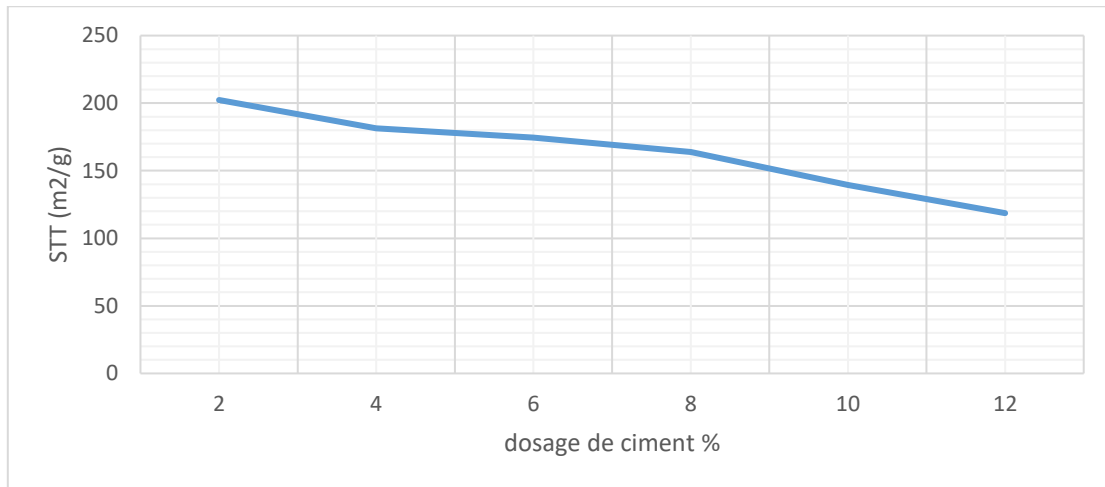
Tableau III .21 Résultats de bleu méthylène (VBS) essai 1

DOSAGE DE CIMENT	Volume de la Solution cm <sup>3</sup>	VBS (cm <sup>3</sup> /g)	surface STT
0	360	12	251,16
2	290	9,66	202,32
4	260	8,66	181,39
6	250	8,33	174,41
8	235	7,83	163,95
10	200	6,66	139,53
12	170	5,66	118,6

VBS > 8  
très argileux



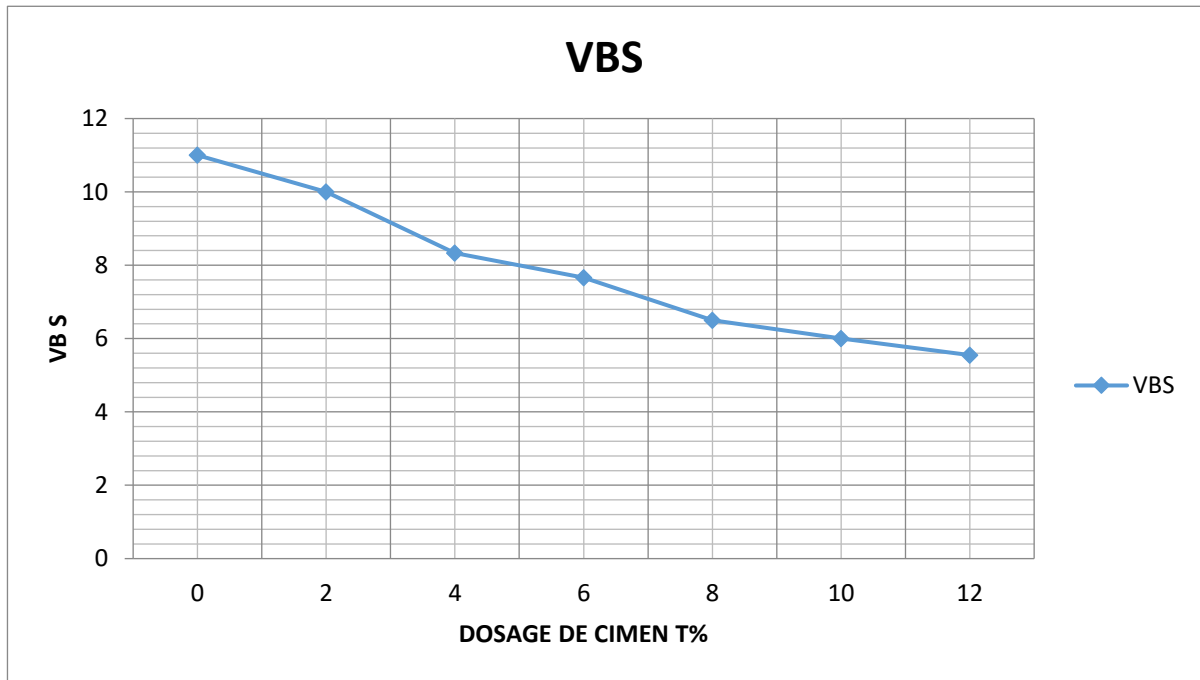
La figure III.10 présente la courbe de variation de la valeur du bleu de méthylène en fonction du dosage en ciment.



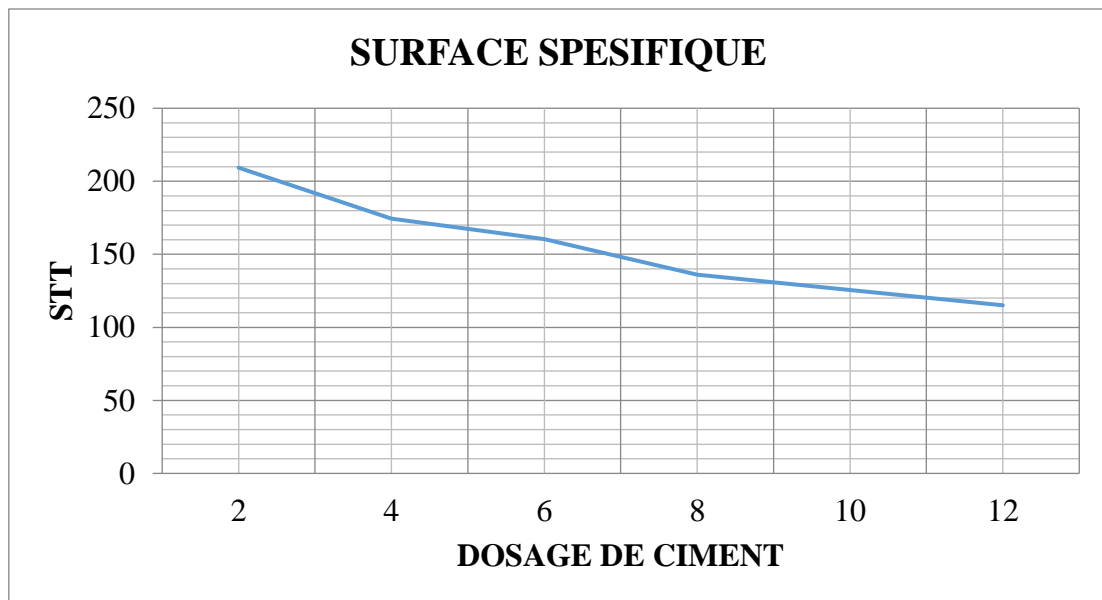
La figure III.12 présente la courbe de variation de surface en fonction du dosage en ciment.

*Essai2: Tableau III .22 Résultats de bleu méthylène (VBS) essai 2*

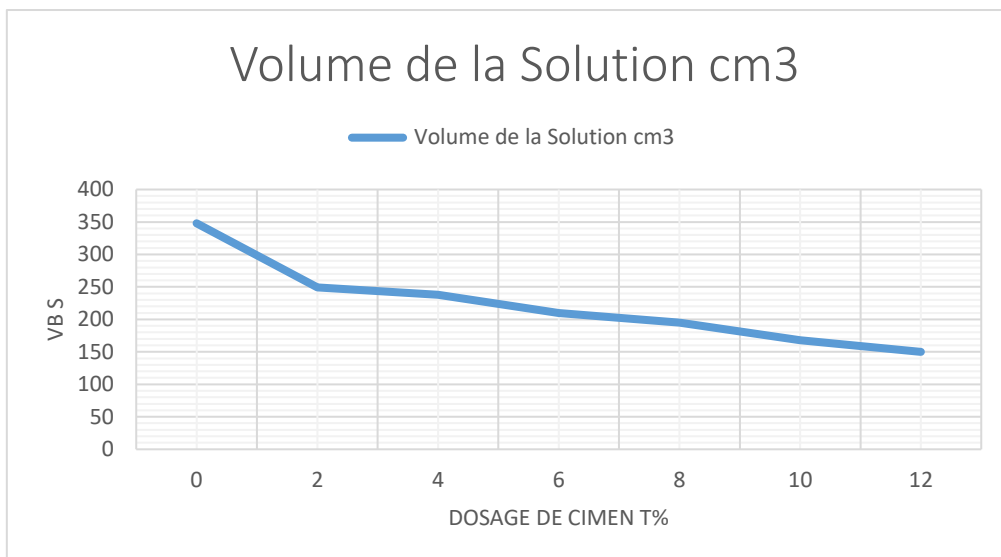
DOSAGE DE ciment	Volume de la Solution (cm <sup>3</sup> )	VBS(cm <sup>3</sup> /g)	surface STT
0	330	11	230.23
2	300	10	209.3
4	250	8.33	174.34
6	230	7.66	160.3
8	195	6.5	136.04
10	180	6	125.58
12	165	5,55	115.11



La figure III.13 : présente la courbe de variation de la valeur du bleu de méthylène en fonction du dosage en ciment.



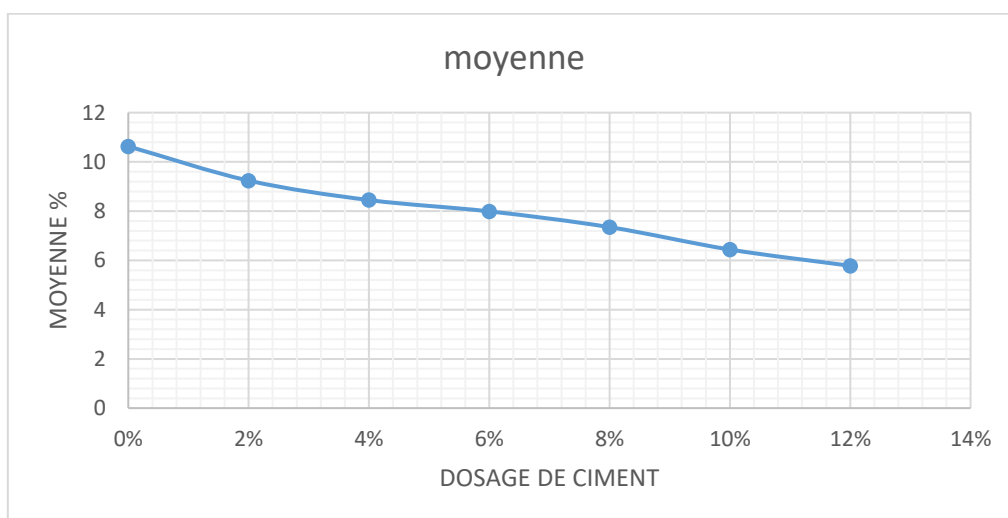
La figure III.14 présente la courbe de variation de la surface spécifique en fonction du dosage en ciment.



La figure III.15 présente la courbe de variation de la volume de la solution en fonction du dosage en ciment.

VBS	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	moyenne
0%	8.16	12	11	11.66	10.33	10.66	10.63
2%	7.5	9.66	10	8.33	10	10	9.24
4%	6.83	8.66	8.33	7.66	9.6	9.66	8.45
6%	6.66	8.33	7.66	7	9.33	9	7.99
8%	6	7.83	6.5	6.5	8.66	8.66	7.35
10%	5.66	6.66	6	5.66	6.66	8	6.44
12%	5.5	5.66	5.55	5	5.66	7.33	5.78

Le tableau (III-23): présente la récapitulation des résultats des séries d'essais de bleu de méthylène:



La figure III.16: courbe La présente la récapitulation des résultats des séries d'essais de bleu de methylene

### ***Commentaire:***

La valeur de bleu VBS est égale à 8,96. D'après la norme française NF P 11-300, il s'agit d'un sol très argileux. La valeur de la surface spécifique totale correspondante est égale à SST = 251.16 m<sup>2</sup>/g. Cette valeur indique la présence de montmorillonite. On constate un bon accord entre ces classifications

Pour l'argile expansive de Sidi-Hadjrès (wilaya de M'sila) caractérisée par 25,7 % de Particules argileuses, les figures III.16 et III.18 présentent les courbes d'évolution de la Valeur de bleu du sol (i.e. la surface spécifique correspondante) déterminée pour les Différents dosages en ciment considérés pour le traitement effectué.

Selon la classification de Bigot et Zerhouni (2000), on peut noter que le potentiel de Gonflement de cette argile diminue avec le dosage en stabilisant considéré pour passer D'élevé (VBS>6) à moyen (2<VBS<6), voire faible (VBS<2),

### III.2.1. Les essais mécaniques

#### III.2.2.1. Essais Proctor modifié

Résultats de essai de compactage le sol naturel dans le tableau suivant: (d'après *MOTASEM, A.T. & HADJADJ, T. (2019)*)

sol naturel										
eau	12%		14%		16%		18%		20%	
N: tare	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
masse de tare (g)	21.02	20.34	8.68	8.43	27.31	20.87	12.28	11.42	26.46	26.5
masse ( sol sec +tare (g)	46.1	44.9	33.14	27.31	48.7	41.77	36.93	38.1351.73	51.73	45.17
masse (sol sec+ tare) (g)	43.01	41.98	29.7	24.83	45.78	38.82	32.88	33.69	47.19	41.92
masse d'eau (g)	3.09	2.92	3.44	2.49	2.93	2.95	4.05	4.44	4.54	2.25
masse fe sol sec(%)	21.99	21.64	21.02	16.4	18.47	17.95	20.6	22.27	20.73	15.4
w (%)	14	13.49	16.37	15.18	15.86	16.44	19.66	19.94	21.9	21.07
moyene(%)	13.773		15.774		16.149		19.799		21.489	
volume de moule (cm)	935.89									
poids de moule(g)	2140.7									
poids total(g)	3872.09		3959.76		3950.19		4001.19		3975.04	
poids de sol	1731.39		1.933		1809.49		1860.49		1834.34	
Yh	1.85		1.944		1.933		1.988		1.96	
Yd	1.626		1.679		1.665		1.659		1.613	

Tableau. III.24. Résultats d'essai de compactage le sol naturel

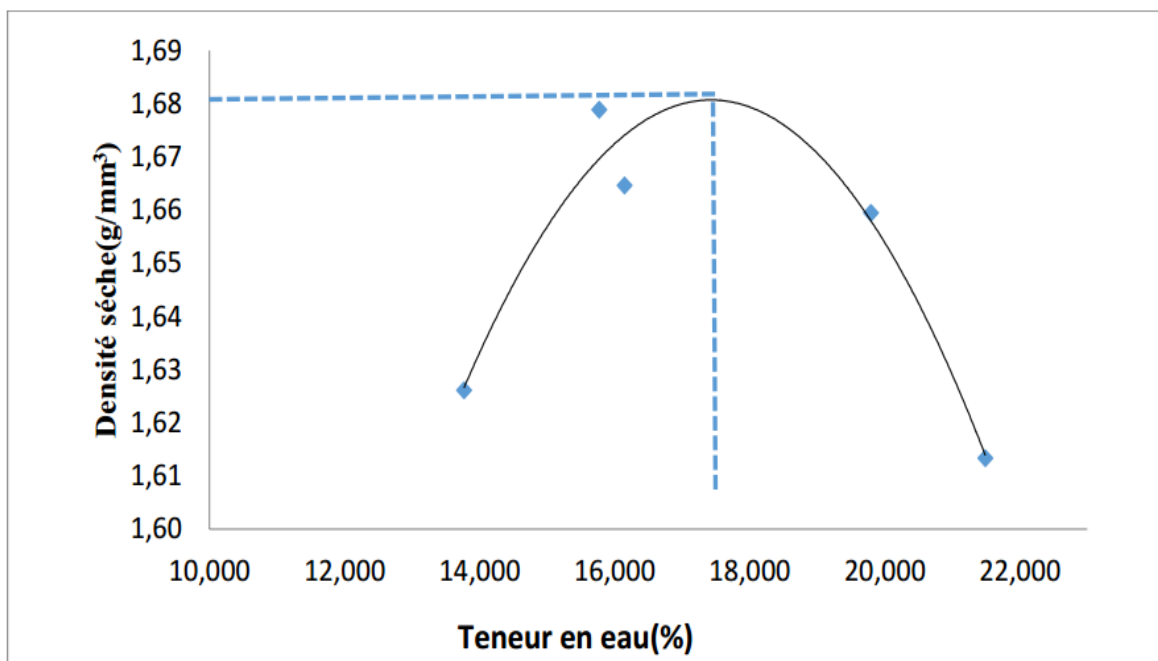


Figure III.17. Courbe Proctor de sol naturel (d'après MOTASEM, A.T. & HADJADJ, T. (2019))

### III .2.2.1.2. Sol traité

Tableau. III.25. Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par ciment matine. (d'après MOTASEM, A.T. & HADJADJ, T. (2019))

		12%	14%	16%	18%	20%
<b>sol naturel</b>	Wopt	13.77	15.77	16.14	19.79	21.48
	$\gamma_d$	1.62	1.67	1.66	1.65	1.61
<b>2%</b>	wopt	16.847	18.847	20.409	22.363	24.288
	$\gamma_d$	1.652	1.683	1.66	1.577	1.537
<b>4%</b>	wopt	16.454	18.851	21.238	24.199	26.568
	$\gamma_d$	1.657	1.699	1.633	1.546	1.493
<b>6%</b>	wopt	15.677	18.896	19.12	21.565	23.018
	$\gamma_d$	1.703	1.709	20.331	1.653	1.61
<b>8%</b>	wopt	14.903	18.952	1.673	20.331	22.611
	$\gamma_d$	1.71	1.715	1.702	1.669	1.629
<b>10%</b>	wopt	17/657	19.406	20.115	21.673	22.01
	$\gamma_d$	1.685	1.721	1.702	22.945	1.65

<b>12%</b>	wopt	16.105	19.662	20.065	22.495	25.056
	$\gamma_d$	1.704	1.722	1.694	1.639	1.599

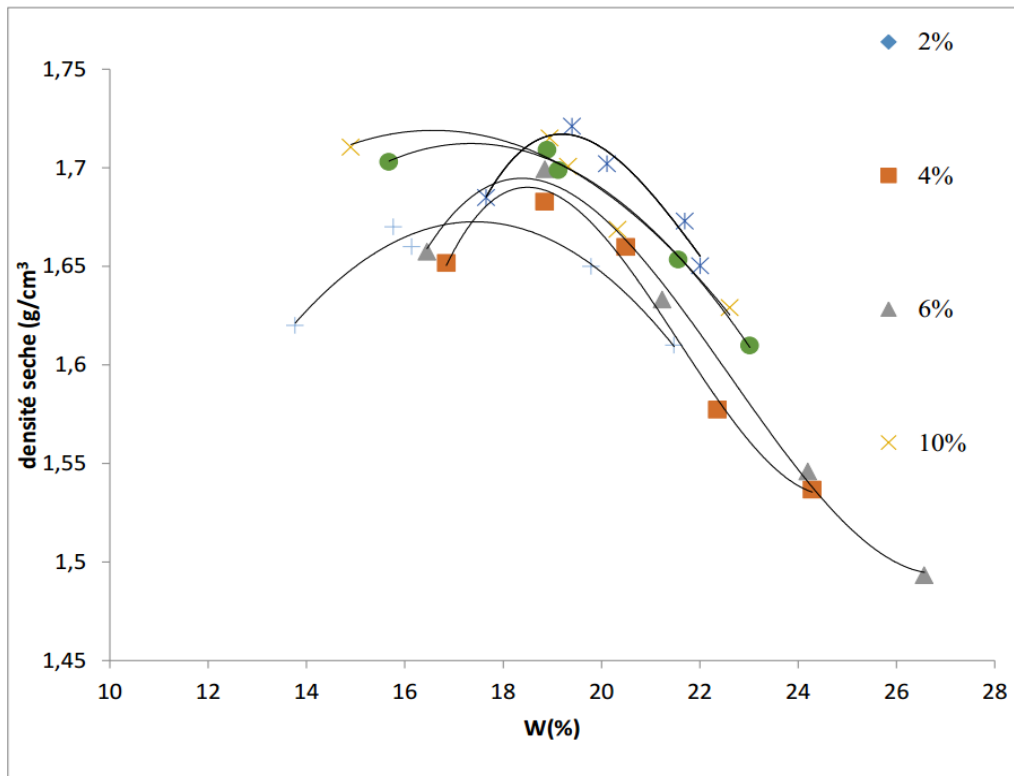


Figure III.18. Courbe Proctor de sol traité par ciment matine (d'après *MOTASEM, A.T. & HADJADJ, T. (2019)*).

Tableau. III.26. résultats de densité sèche et la teneur en eau en fonction des teneurs ciment (Matine) (d'après *MOTASEM, A.T. & HADJADJ, T. (2019)*).

	matine	
	Wopt	$\gamma_d$ max
<b>0%</b>	15.8	1.67
<b>2%</b>	18.84	1.68
<b>4%</b>	18.85	1.69
<b>6%</b>	18.89	1.7
<b>8%</b>	19	1.71
<b>10%</b>	19.4	1.72
<b>12%</b>	19.72	1.72

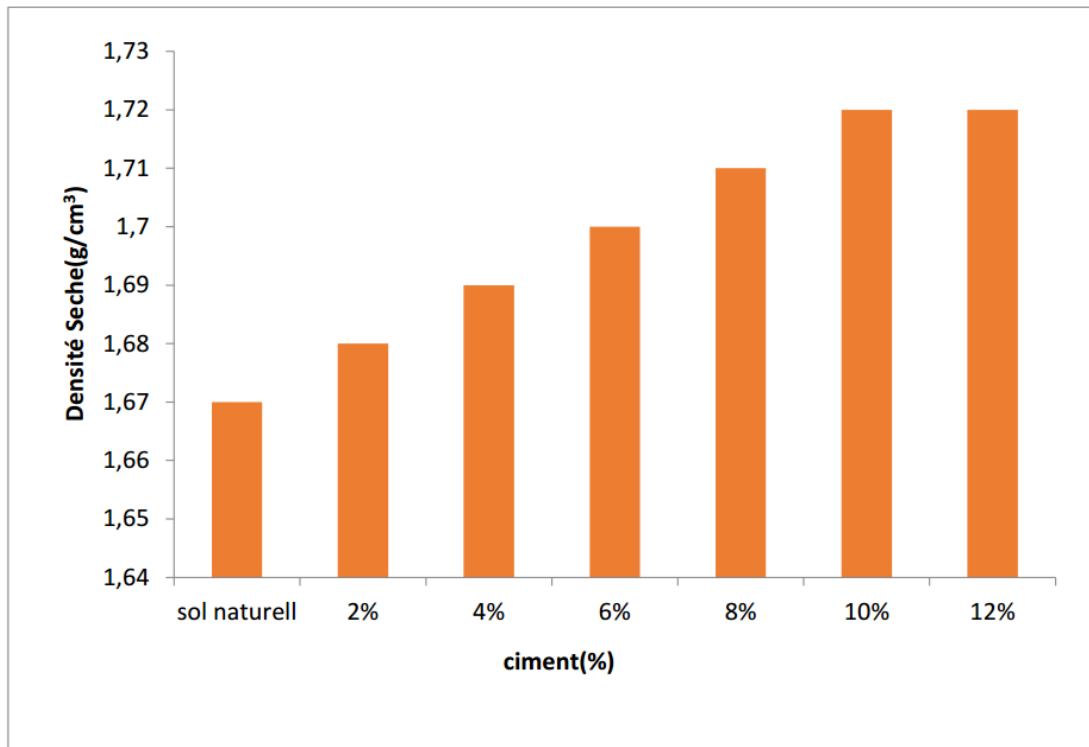


Figure. III.19. Histogramme De densité sèche en fonction des différents teneurs en ciment (Matine) (d'après MOTASEM, A.T. & HADJADJ, T. (2019)).

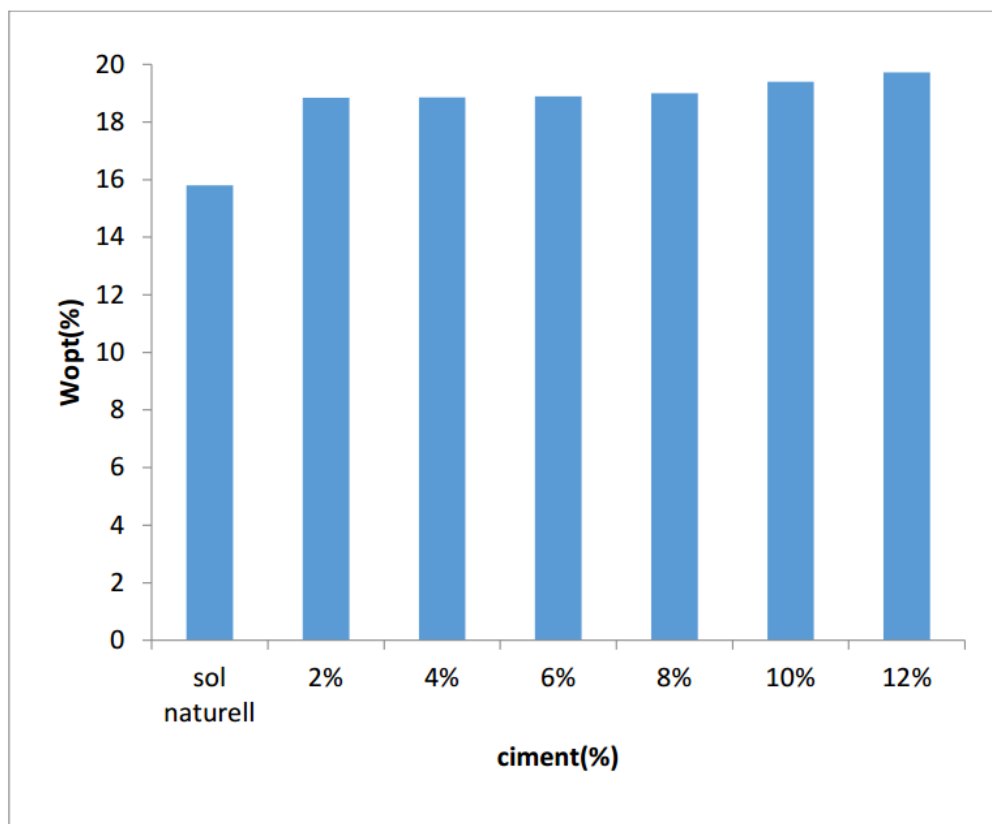


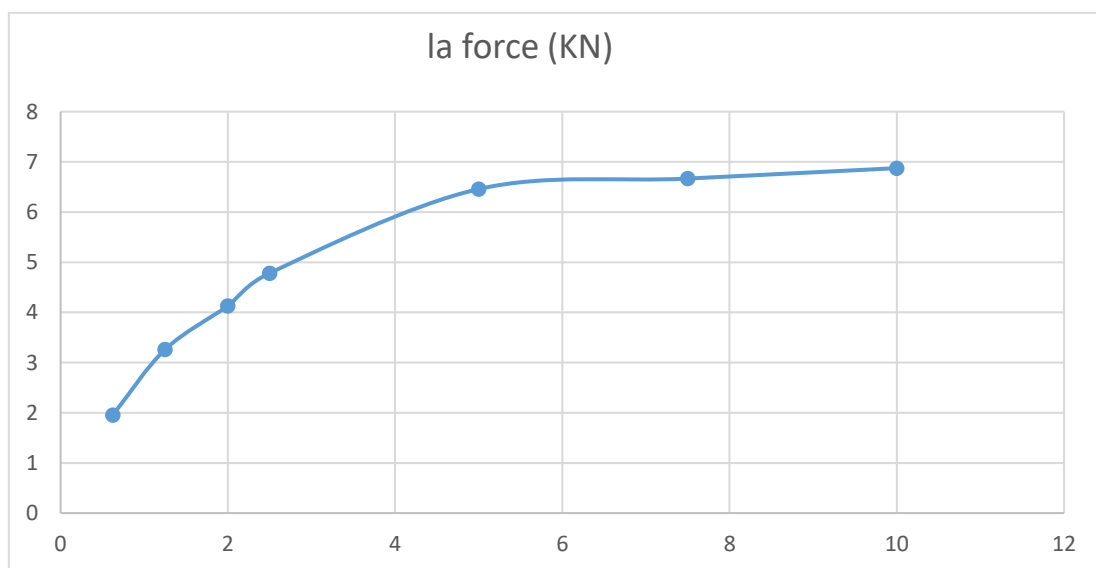
Figure. III.20. Histo Représenté la teneur en eau en fonction des différents teneurs en ciment matine (d'après MOTASEM, A.T. & HADJADJ, T. (2019))

### III.2 Résultats ESSAI CBR :

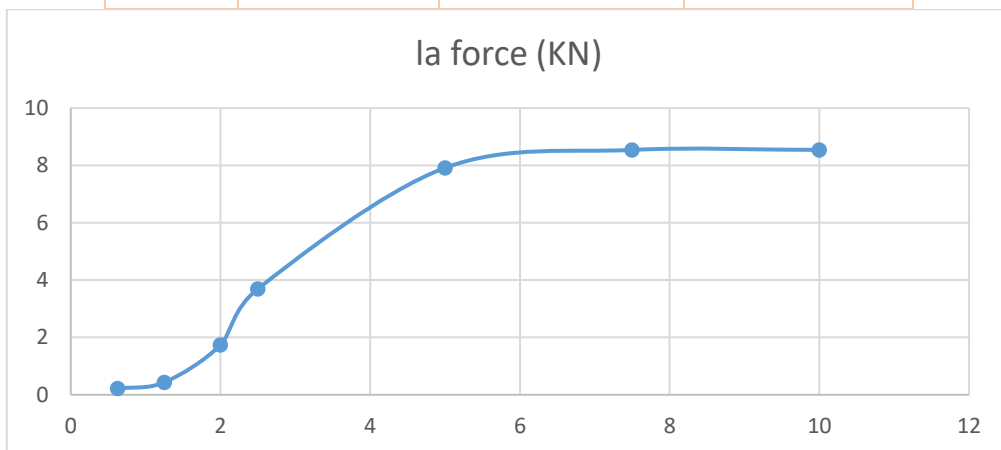
#### a) Essai C.B.R immédiat :

Des tableaux et figures présente l'ensemble des résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements, traitées à différents dosages en ciment. %2/4/6/8/10/12 SUIVANTS:

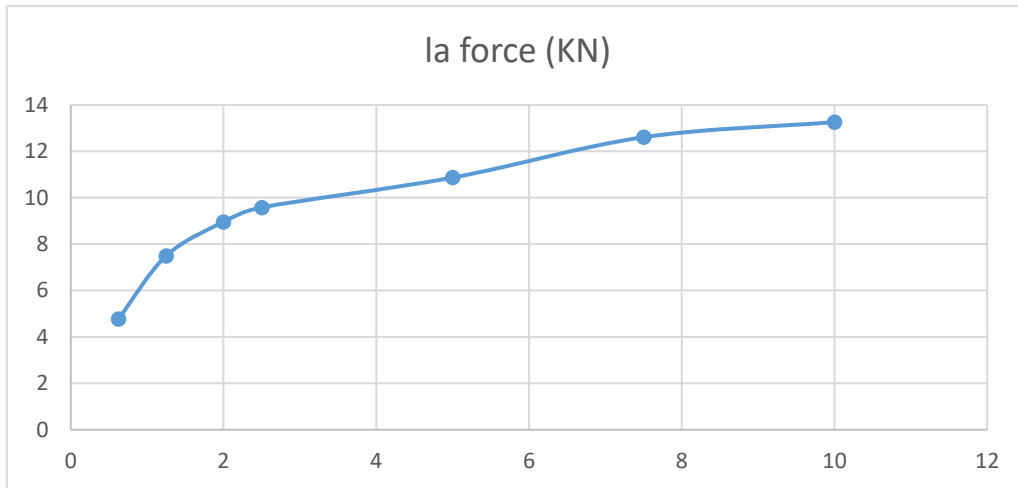
ESSAI 1			
	dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
	0.625	0.09	1.9565
	1.25	0.15	3.26
	2	0.19	4.1304
	2.5	0.22	4.7826
	5	0.3	6.4583
	7.5	0.31	6.6666
	10	0.32	6.8749
	L'indice le plus grand		35.4



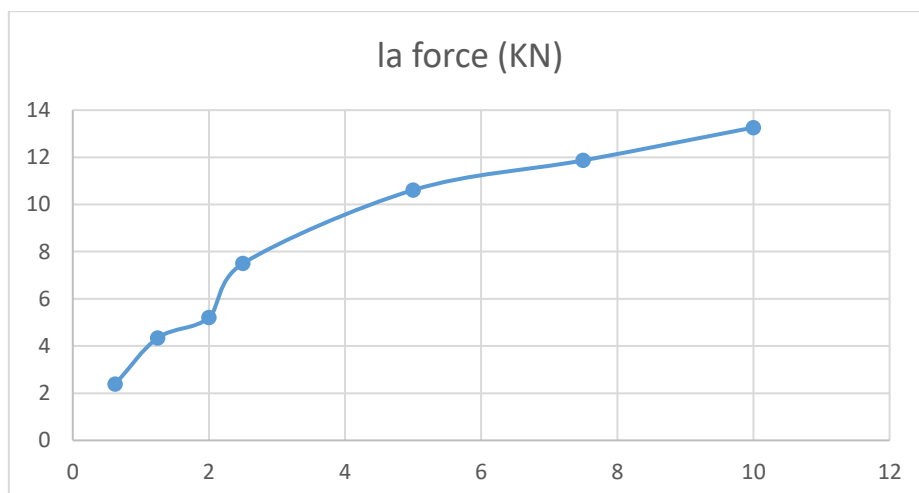
<b>ESSAI</b>			
<b>2</b>			
	dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
	0.625	0.01	0.2173
	1.25	0.02	0.4347
	2	0.08	1.7391
	2.5	0.17	3.6956
	5	0.37	7.9166
	7.5	0.4	8.5416
	10	0.4	8.5416
	L'indice le plus grand	39.72	



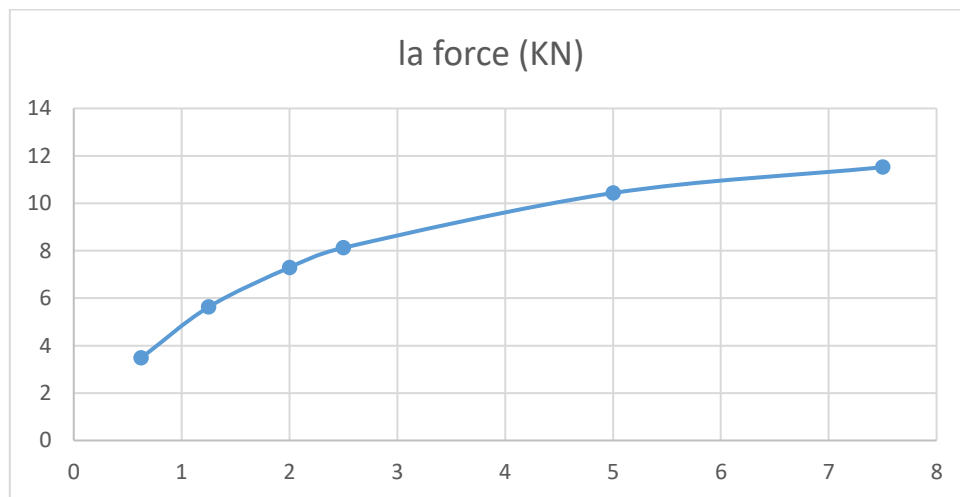
<b>ESSAI 3</b>			
	dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
	0.625	0.22	4.7826
	1.25	0.35	7.4999
	2	0.42	8.9585
	2.5	0.45	9.5833
	5	0.51	10.8695
	7.5	0.59	12.6086
	10	0.62	13.2608
	L'indice le plus grand	55.51	



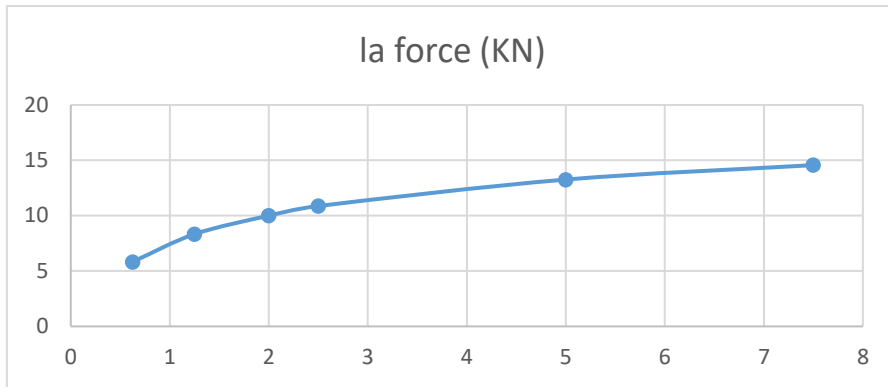
ESSAI 4			
	dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
	0.625	0.11	2.3913
	1.25	0.20	4.35
	2	0.24	5.21
	2.5	0.35	7.50
	5	0.51	10.61
	7.5	0.59	11.87
	10	0.62	13.2608
	L'indice le plus grand	60.31	



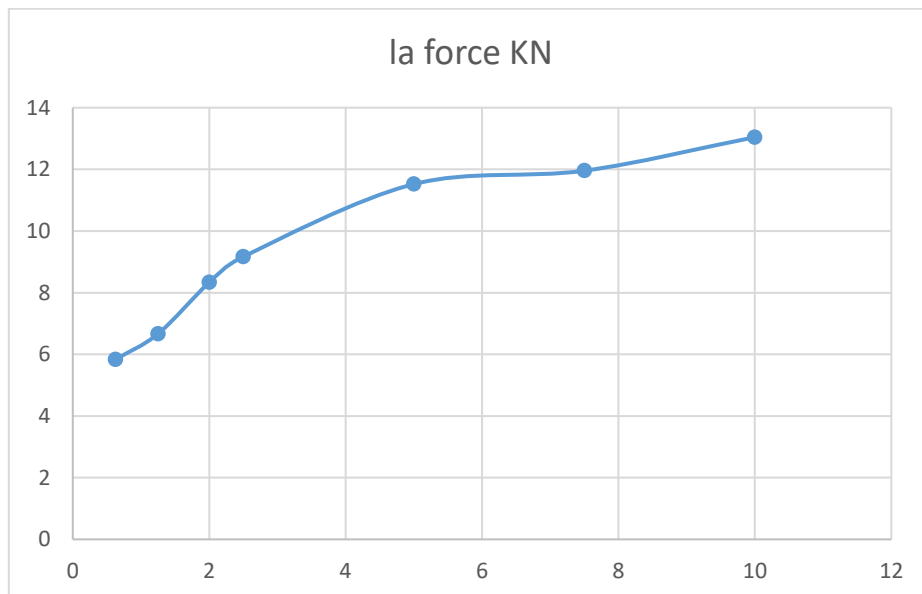
ESSAI 5	dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
	0.625	0.16	3.4782
	1.25	0.26	5.6249
	2	0.34	7.2916
	2.5	0.38	8.1249
	5	0.49	10.4347
	7.5	0.54	11.5217
	10	0.57	12.1739
	L'indice le plus grand	66.85	



ESSAI 6	dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
	0.625	0.27	5.8333
	1.25	0.39	8.3333
	2	0.47	10
	2.5	0.51	10.8695
	5	0.62	13.2608
	7.5	0.68	14.5652
	10	0.72	15.4347
	L'indice le plus grand	70.93	

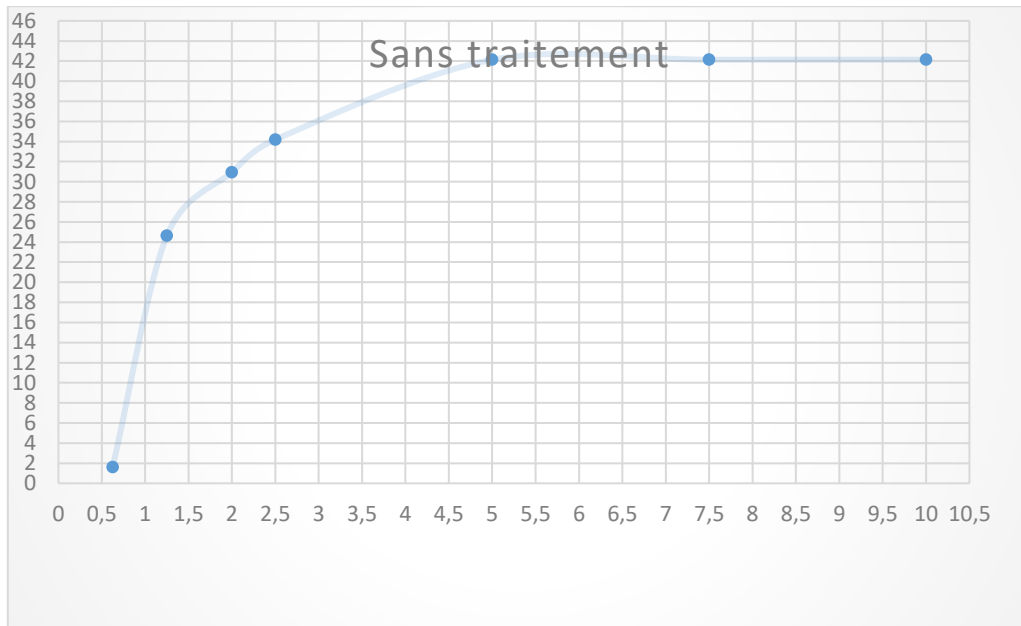


ESSAI 7	dép de piston	dép de force (mm)	la force (KN)
	0.625	0.27	5.8333
	1.25	0.31	6.6666
	2	0.39	8.3333
	2.5	0.43	9.1666
	5	0.54	11.5217
	7.5	0.56	11.9565
	10	0.61	13.0434
	L'indice le plus grand	80.45	



Essai 2)

Poinçonnement		SANS TRAITEMENT%	
Date :		Coef Anneau:	50KN
Temps	Enfoncement enmm	Force totale	
		Lecture DE FORCE comparateur (mm)	EFFORT DE PENETRATION x Coef) (KN)
30'	0,625	0,1	
		0,15	0,2173
1'	1,25	0,19	3,2608
1'40''	2	0,21	4,1304
2'	2,5	0,26	4,5652
4'	5	0,26	5,6249
6'	7,5	0,26	5,6249
8'	10	0,1	5,6249
10'	12,5		
			0,2173
<b>Calculs et résultats de l'indice portant :</b>			
<b><u>Effortde pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (KN)</u></b>		<b>x 100</b>	<b>34.19%</b>
13,35			
<b><u>Effortde pénétration à 5 mm d'enfoncement (KN)</u></b>		<b>x 100</b>	<b>28.22 %</b>
19,93			
L'indice recherchées est la plus grande valeur :			<b>34.19%</b>



**Figure III: Courbes des forces sans traitement de chaque enfoncement (C.B.R. immédiat)**

**Tableau III.21: Résultats des LECTEUR DES COMPAREUR forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en ciment**

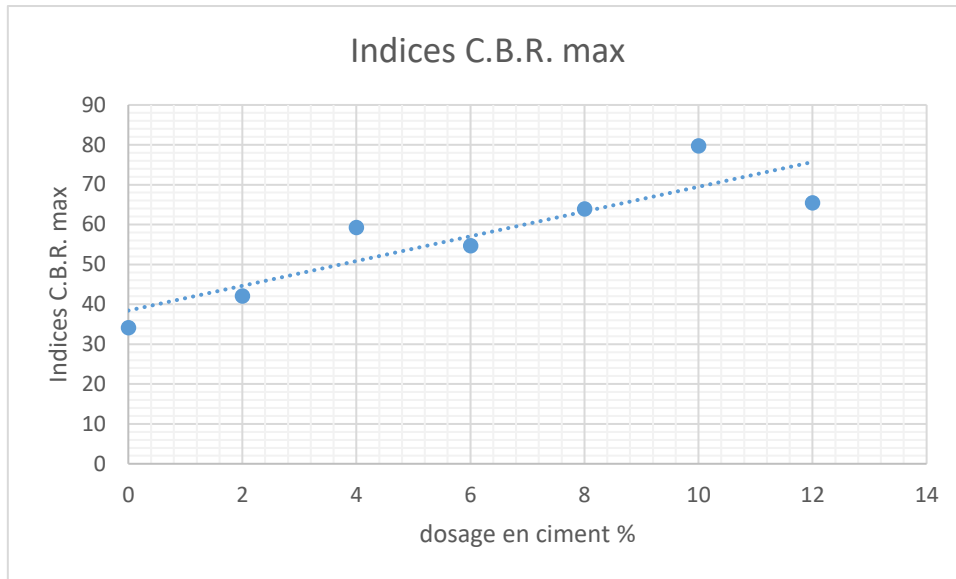
Poinçonnement							
Date :		Coef Anneau: 50KN					
Temps	ENFONCEMENT	Lecture comparateur (mm)					
		DOSAGES EN CIMENT					
		2%	4%	6%	8%	10%	12%
30'	<b>0,625</b>	0,01	0,04	0	0,20	0,26	0,26
1'	<b>1,25</b>	0,19	0,24	0,1	0,29	0,38	0,30
1'40"	<b>2</b>	0,23	0,33	0,29	0,36	0,46	0,37
2'	<b>2,5</b>	0,26	0,37	0,34	0,4	0,50	0,41
4'	<b>5</b>	0,35	0,46	0,47	0,51	0,61	0,51
6'	<b>7,5</b>	0,38	0,5	0,52	0,52	0,67	0,57
8'	<b>10</b>	0,39	0,52	0,55	0,56	0,71	0,60

**Tableau III.21: Résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en ciment**

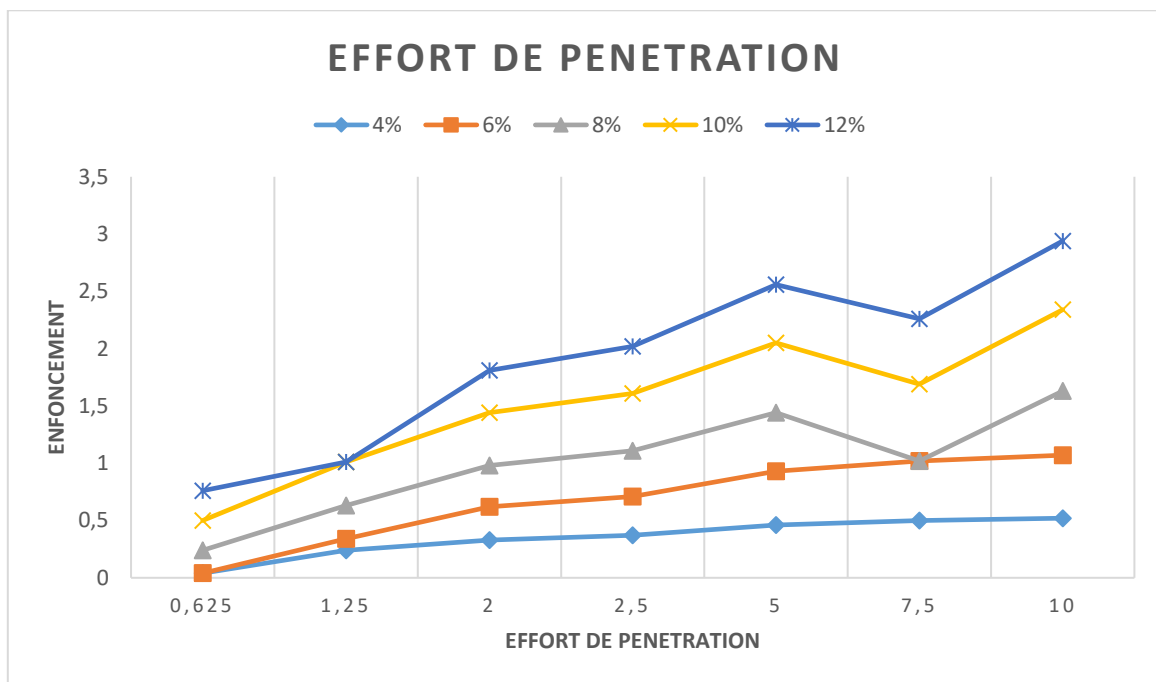
Poinçonnement							
Date :		Coef Anneau: 50KN					
Temps	Enfoncement	EFFORT DE PENETRATION (Lecture) x Coef)KN					
		DOSAGES EN CIMENT					
		2%	4%	6%	8%	10%	12%
30'	<b>0,625</b>	2.1739	0.8695	0	4.3478	5,6249	5,6249
1'	<b>1,25</b>	4,1304	5.2083	0.2173	6.2499	8,1249	6.4583
1'40"	<b>2</b>	5	7.0833	6.2499	7.7083	9.7916	7.9166
2'	<b>2,5</b>	5,6249	7.9166	7.2916	8.5416	10.6521	8.7499
4'	<b>5</b>	7,4999	9.7916	10	10.8695	13.0434	10.8695
6'	<b>7,5</b>	8,1249	10.6521	11.0869	11.0869	14.7826	12,1739
8'	<b>10</b>	8,3333	11.0869	11.16	11.9565	15.2173	12,8260

**Tableau. III.28: Résultats des indices C.B.R. immédiats pour différents dosages en ciment.**

Dosage en ciment %	0	2	4	6	8	10	12
<b>Indice C.B.R. immédiat à 2,5mm</b>	<b>34.19</b>	<b>42.09</b>	<b>59.25</b>	<b>54.68</b>	<b>63.97</b>	<b>79.77</b>	<b>65.46</b>
<b>Indice C.B.R. immédiat à 5mm</b>	<b>28.22</b>	<b>37.63</b>	<b>49.17</b>	<b>50.17</b>	<b>54.54</b>	<b>74.15</b>	<b>54.49</b>
<b>Indice C.B.R. max</b>	<b>34.19</b>	<b>42.09</b>	<b>59.25</b>	<b>54.68</b>	<b>63.97</b>	<b>79.77</b>	<b>65.46</b>



**figure III.20: Indices C.B.R. après imbibition en fonction des dosages en ciment et leur droite moyenne.**



**Figure III.22: Courbes des forces en fonction du dosage en ciment de chaque enfoncement (C.B.R. immédiat)**

**b) Essai C.B.R après imbibition :**

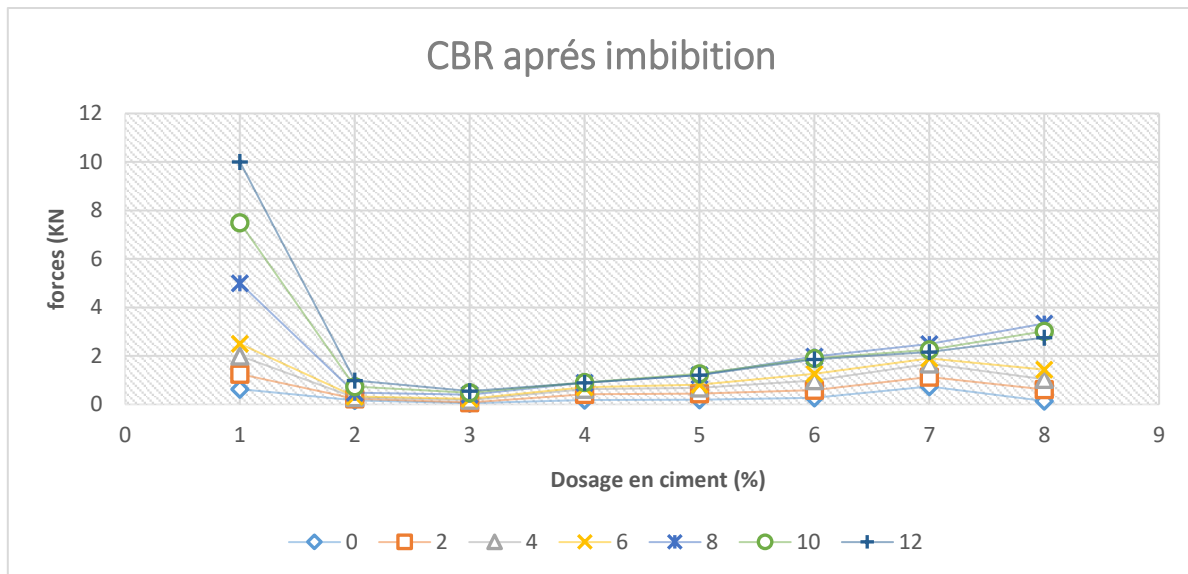
Les tableaux III.29 et III.30 présentent les idem des forces de pénétration en fonction des enfoncements et les indices C.B.R des éprouvettes traitées à différentes teneurs en ciment après leur imbibition

**. Tableau. III. 29: Résultats des forces de pénétration en fonction des enfoncements pour différents dosages en ciment.**

	Dosage en ciment	0	2	4	6	8	10	12
TEMPS	Enfoncement(mm)	FORCE DE PENETRATION KN						
30	0,625	0,17	0,05	0,18	0,2	0,27	0,74	0,14
1	1,25	0,23	0,08	0,42	0,44	0,59	1,13	0,61
1,4	2	0,28	0,18	0,63	0,68	0,99	1,67	1,04
2	2,5	0,33	0,23	0,71	0,81	1,26	1,9	1,43
4	5	0,49	0,4	0,89	1,21	1,97	2,49	3,34
6	7,5	0,73	0,48	0,91	1,26	1,9	2,25	3,02
8	10	0,99	0,55	0,89	1,21	1,86	2,16	2,76

**Tableau. III.30: Résultats des indices C.B.R. imbibés pour différents dosages en ciment.**

Dosage en ciment %	0	2	4	6	8	10	12
Indice C.B.R. immédiat à 2,5mm	2,43	1,62	5,16	5,98	9,33	14,18	10,64
Indice C.B.R. immédiat à 5mm	2,44	1,95	4,44	6,06	9,88	12,42	16,73
Indice C.B.R. max	2,44	1,95	5,16	6,06	9,88	14,18	16,73



**Figure III.23: Courbes des forces en fonction des dosages en ciment de chaque enfoncement (après imbibition).**

### Interprétation des résultats:

On remarque que dans notre cas l'augmentation des forces de pénétration en fonction des enfoncements est notable et s'accroît avec le dosage en ciment ajouté. La figure Visualise l'évolution des courbes des forces de pénétration en fonction du dosage en ciment de chaque enfoncement dans le sol avant et après traitement. On observe que la force d'enfoncement augmente avec le dosage en ciment et s'accroît au-delà de l'enfoncement de 1.25 mm, sachant que l'enfoncement lui-même ne varie pas et ceci confirme donc l'efficacité du traitement

On peut noter que les valeurs du CBR immédiat et imbibé augmentent linéairement avec le dosage en ciment. Le traitement au ciment de cette argile se traduit, dans les deux cas, par une nette amélioration de sa portance et un abaissement très sensible de sa déformabilité, résultant d'une humidification excessive après son compactage aux conditions l'optimum Proctor.

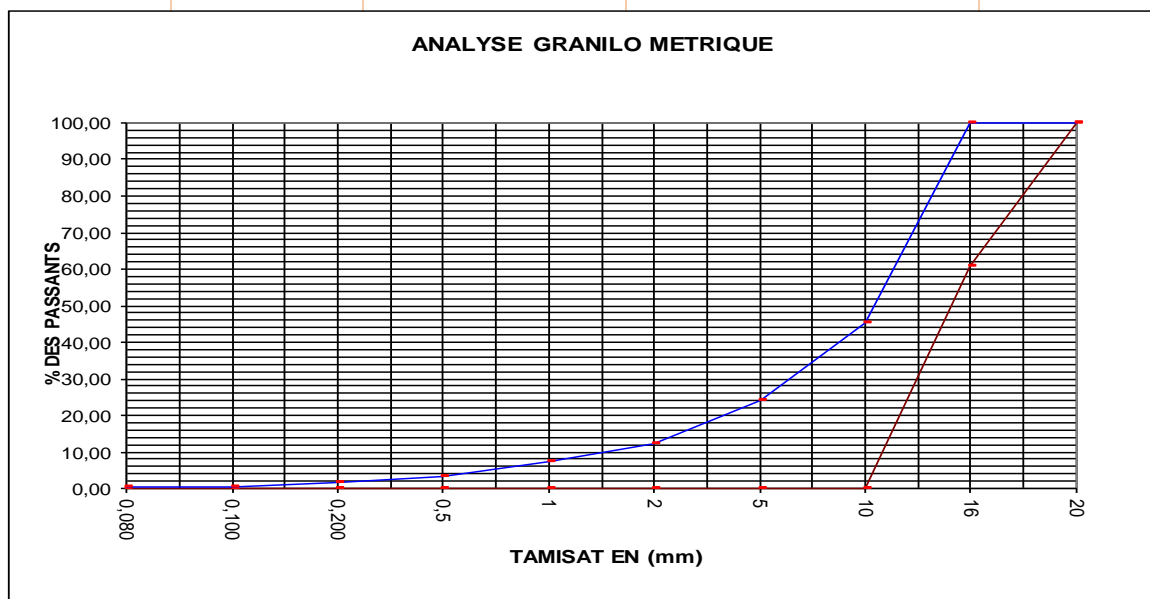
L'augmentation du dosage en ciment agit directement sur l'augmentation de l'indice de portance (indice C.B.R.)

### III.3.Paramètres d'évolutivité

#### A/ Coefficient de fragmentabilité

Des tableaux. III.31 Figure. III 24 et figures présente l'ensemble des résultats des fragemntabilité traitées à différents dosages en ciment. %2/4/6/8/10/12 suivants:

Tamis en (mm)	Avant des passants	Après pilonnage
<b>20</b>	100,00	100
<b>16</b>	60,74	100,00
<b>10</b>	0,00	33,96
<b>5</b>	0,00	17,86
<b>2</b>	0,00	8,13
<b>1</b>	0,00	4,79
<b>0,5</b>	0,00	2,14
<b>0,200</b>	0,00	0,96
<b>0,100</b>	0,00	0,41
<b>0,080</b>	0,00	0,25
	Fr=4,07	



4%		
Tamis en (mm)	% des passants	Après pilonnage
20	100,00	100
16	72.61	100,00
10	325.8	72,61
5	663.1	78,43
2	991.7	56,09
1	1203.2	34,34
0,5	1383.1	20,33
0,200	1472	8,42
0,100	0,00	2,53
0,080	0,00	0,40
<b>Fr=13.5</b>		

8%		
Tamis en (mm)	% des passants	Après pilonnage
20	100,00	100
16	731.4	100,00
10	560.2	66.5
5	1040	48.00
2	1317.3	38.50
1	1547	24.70
0,5	1757.7	13.50
0,200	1887.9	4.22
0,100	1901	3.75
0,080	1935.8	2.51
<b>Fr=18</b>		

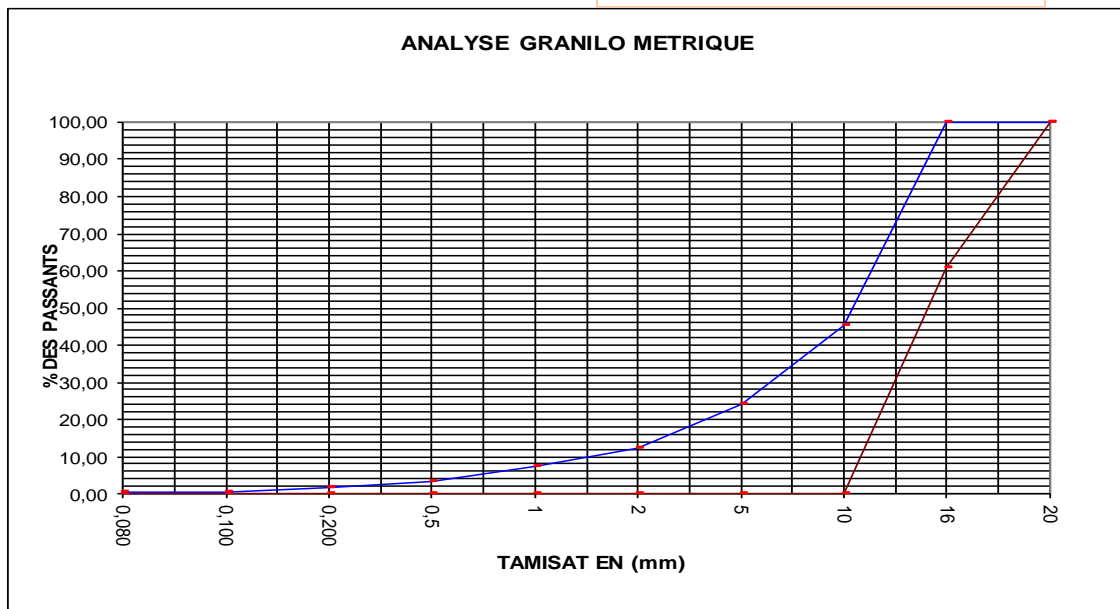
2%		
Tamis en (mm)	% des passants	Après pilonnage
20	100,00	100
16	72.61	100,00
10	325.8	72,61
5	663.1	78,43
2	991.7	56,09
1	1203.2	34,34
0,5	1383.1	20,33
0,200	1472	8,42
0,100	0,00	2,53
0,080	0,00	0,40
<b>Fr=12.3</b>		

6%		
Tamis en (mm)	% des passants	Après pilonnage
20	100,00	100
16	1101.6	100,00
10	850.2	57.49
5	1195.8	40.24
2	1512.3	24.38
1	1715.3	14.23
0,5	1858.8	7.06
0,200	1916g	4.20
0,100	1952.4g	2.38
0,080	1957.2g	2.14
<b>Fr=15.54</b>		

Tamis en (mm)	% des passants	Après pilonage
20	100,00	100
16	72.61	100,00
10	325.8	72,61
5	663.1	78,43
2	991.7	56,09
1	1203.2	34,34
0,5	1383.1	20,33
0,200	1472	8,42
0,100	0,00	2,53
0,080	0,00	0,40
	FR=38.3	

Tamis en (mm)	% des passants	Après pilonage
20	100,00	100
16	629.1	100,00
10	621.0	72,61
5	1038.1	78,43
2	1392.7	56,09
1	1614.2	34,34
0,5	1801.8	20,33
0,200	1883.6	8,42
0,100	1929.7	2,53
0,080	1949.4	0,40

Fr=21.5



**Tableau. III.32. Influence du traitement simple sur le coefficient de fragmentabilité de l'argile.**

<b>Dosage CIMENT (%)</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12</b>
<b>Coefficient FR ESSAI 1</b>	4.07	12.3	13.5	15.54	18	21.5	38.3
<b>ESSAI2</b>	6.87	11.5	12.1	14.66	20	23.05	36.1
<b>Classification</b>	<b>peu fragmentable</b>	<b>fragmentable</b>					

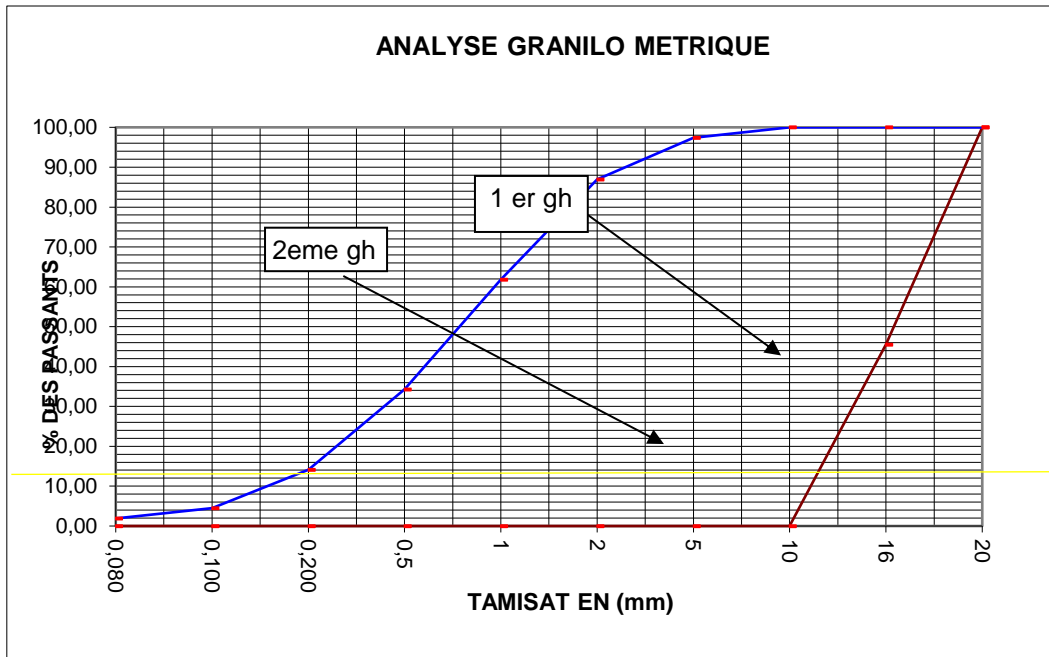
On peut noter que, Les essais effectués sur échantillons traités au ciment selon la classification LCPC-SETRA (2000b), l'argile demeure peu fragmentable JUSTE sans teneur en ciment, mais devient fragmentable au-delà de cette valeur.

### **B/ Coefficient de dégradabilité**

Des tableaux III.33 et Figures III.25 présente les valeurs du coefficient de dégradabilité obtenues pour chacun des dosages en ciment considérés. Suivants:

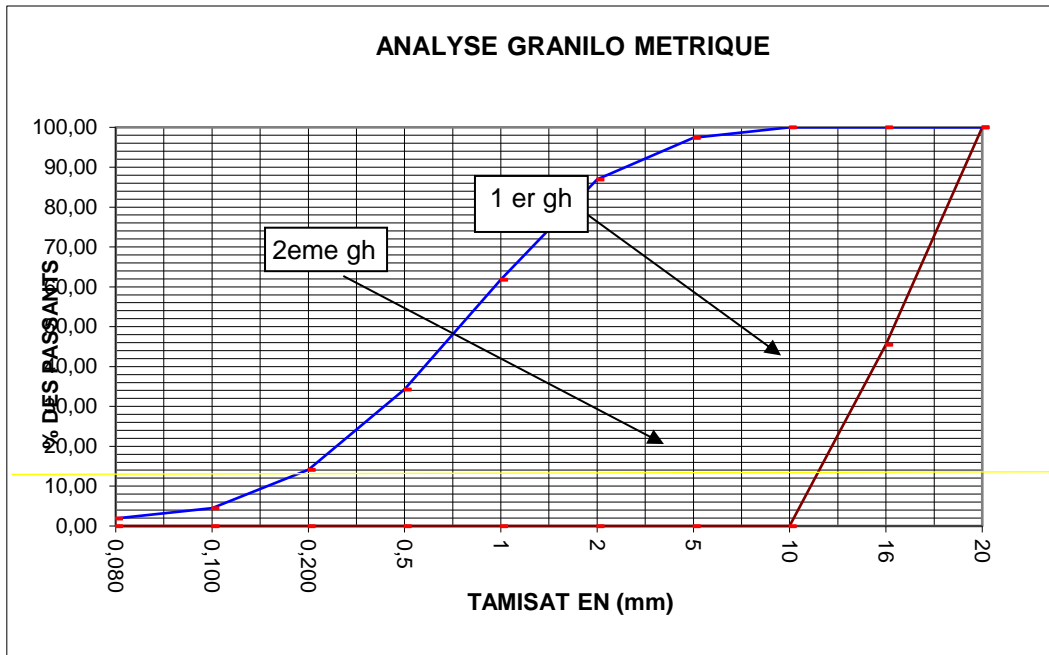
#### **Essai POUR DOSAGE 2%**

Tamis en (mm)	% des passants <sup>2</sup>	Colonne3
	1 <sup>er</sup> gh	2 <sup>eme</sup> gh
<b>20</b>	100,00	100
<b>16</b>	56,16	100,00
<b>10</b>	0,00	100,00
<b>5</b>	0,00	95,57
<b>2</b>	0,00	71,96
<b>1</b>	0,00	46,77
<b>0,5</b>	0,00	22,15
<b>0,200</b>	0,00	12,63
<b>0,100</b>	0,00	7,16
<b>0,080</b>	0,00	6,40
	<b>DG2%=91</b>	



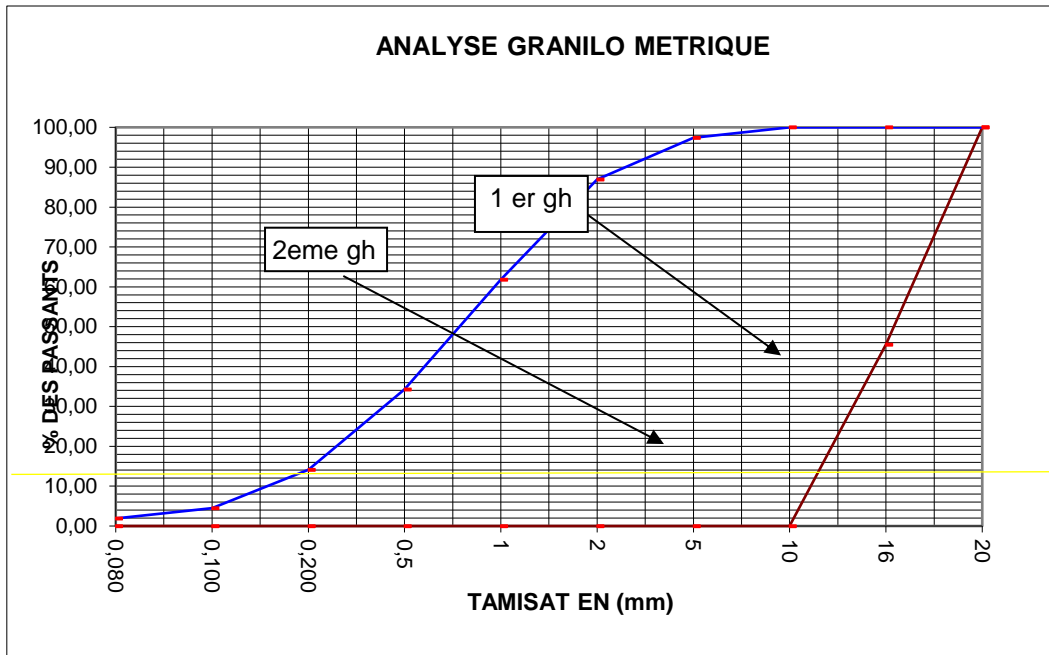
**Essai POUR DOSAGE 4%**

Tamis en (mm)	% des passants2	Colonne3
	1er gh	2 eme gh
<b>20</b>	100,00	100
<b>16</b>	51,88	100,00
<b>10</b>	0,00	100,00
<b>5</b>	0,00	99,57
<b>2</b>	0,00	83,01
<b>1</b>	0,00	54,48
<b>0,5</b>	0,00	26,81
<b>0,200</b>	0,00	15,57
<b>0,100</b>	0,00	9,25
<b>0,080</b>	0,00	8,08
	DG4%=86	



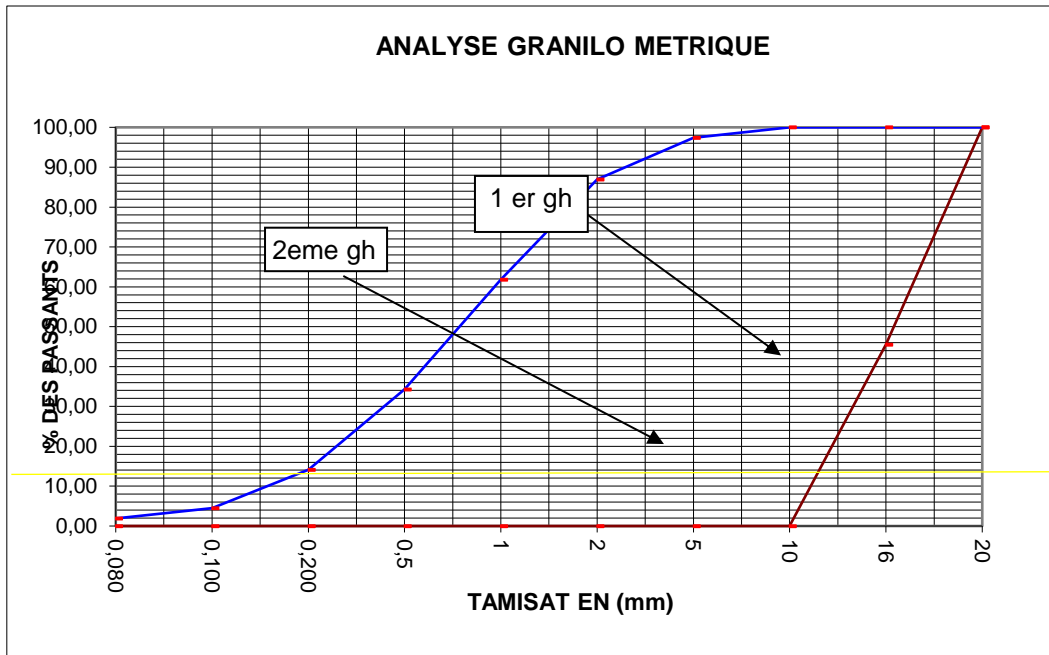
**Essai POUR DOSAGE 6%**

Tamis en (mm)	% des passants2	Pilonnage
	1er gh	2eme gh
<b>20</b>	100,00	100
<b>16</b>	45,53	100,00
<b>10</b>	0,00	94,62
<b>5</b>	0,00	84,45
<b>2</b>	0,00	68,08
<b>1</b>	0,00	46,88
<b>0,5</b>	0,00	27,90
<b>0,200</b>	0,00	17,43
<b>0,100</b>	0,00	13,39
<b>0,080</b>	0,00	11,91
	<b>DG 6%=80</b>	



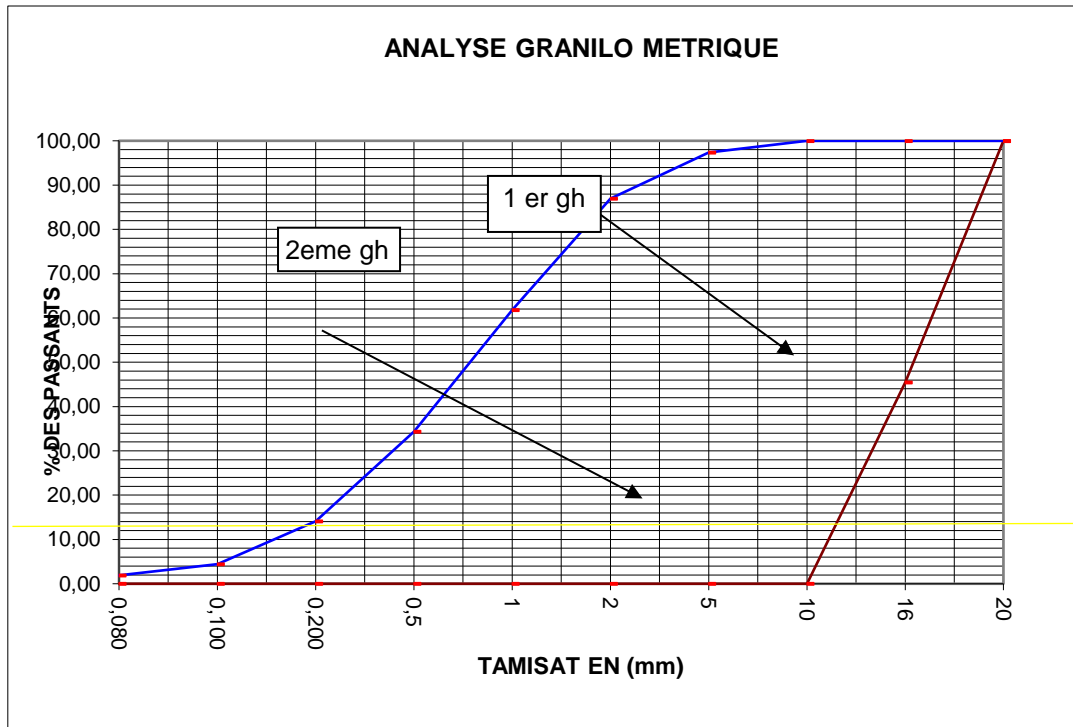
**Essai POUR DOSAGE 8%**

Tamis en (mm)	% des passants	Pilonnage
	1 er gh	2eme gh
<b>20</b>	100,00	100
<b>16</b>	45,49	100,00
<b>10</b>	0,00	100,00
<b>5</b>	0,00	97,37
<b>2</b>	0,00	86,93
<b>1</b>	0,00	61,80
<b>0,5</b>	0,00	34,31
<b>0,200</b>	0,00	14,09
<b>0,100</b>	0,00	4,45
<b>0,080</b>	0,00	1,90
	<b>DG8%=77</b>	



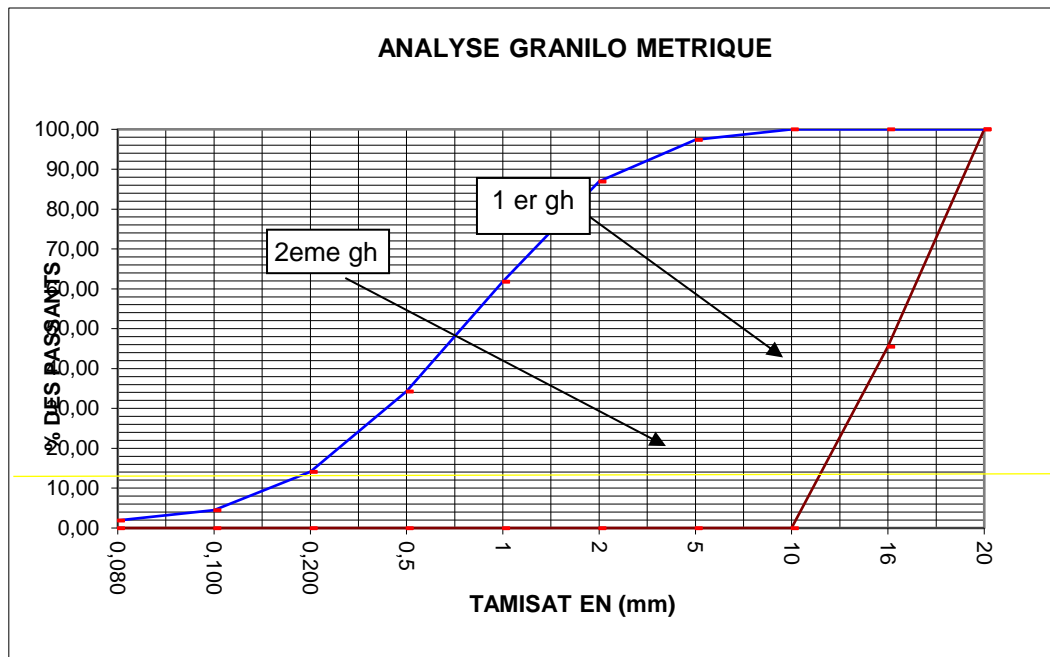
**Essai DEGRADABILITE POUR DOSAGE 10%**

Tamis en (mm)	% des passants2	Colonne3
	1er gh	2eme gh
<b>20</b>	100,00	100
<b>16</b>	56,16	100,00
<b>10</b>	0,00	100,00
<b>5</b>	0,00	95,57
<b>2</b>	0,00	71,96
<b>1</b>	0,00	46,77
<b>0,5</b>	0,00	22,15
<b>0,200</b>	0,00	12,63
<b>0,100</b>	0,00	7,16
<b>0,080</b>	0,00	6,40
	<b>DG10%=64</b>	



**Essai DEGRADABILITE POUR DOSAGE 12%**

Tamis en (mm)	% des passants2	Colonne3
	1er gh	2eme gh
<b>20</b>	100,00	100
<b>16</b>	51,88	100,00
<b>10</b>	0,00	100,00
<b>5</b>	0,00	99,57
<b>2</b>	0,00	83,01
<b>1</b>	0,00	54,48
<b>0,5</b>	0,00	26,81
<b>0,200</b>	0,00	15,57
<b>0,100</b>	0,00	9,25
<b>0,080</b>	0,00	8,08
	<b>DG12%=58</b>	



**Tableau III.34: Influence du traitement simple sur le coefficient de dégradabilité de l'argile.**

Dosage CIMENT (%)	0	2	4	6	8	10	12
Coefficient DG ESSAI 1	100	91	86	80	77	64	58
ESSAI2 DG	100	95	90	82	79	76	70
moy	100	93	88	81	78	70	64
Classification	<i>Matériau rocheux très dégradables</i>						

**NB:** On peut noter que, selon la classification LCPC-SETRA (2000b), l'argile est un Matériau rocheux très dégradables.

## ***Conclusion***

De cette étude effectuée, on peut tirer plusieurs conclusions. Le traitement de cette argile été effectué en utilisant un ciment Portland composé de type MATINE (CPJ-CEMII/B 42,5-NA 442).

Les résultats d'essais obtenus permettent de conclure que le traitement simple au ciment conduit à une amélioration sensible des propriétés mécaniques de l'argile expansive compactée aux conditions de l'optimum Proctor. Les résultats obtenus semblent indiquer que les traitements Permettent:

- L'augmentation du dosage en ciment influe directement sur la diminution de la valeur de bleu de méthylène, et donc la surface spécifique. 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.
- d'accroître les indices de portance (indices CBR immédiat et imbibé), permettant d'accroître la portance de l'argile en place comme en laboratoire et de réduire de ce fait son expansibilité;
- Les essais effectués sur échantillons traités au ciment selon la classification LCPC-SETRA (2000b), l'argile demeure peu fragmentable JUSTE sans teneur en ciment, mais devient fragmentable au-delà de cette valeur.

## CONCLUSION GENERALE

Cette étude expérimentale avait pour finalité de vérifier les aspects physico-mécanique évoqués ci-dessus et de caractériser le comportement d'une argile naturelle prélevée sur le site urbain de la commune de Sidi-Hadjrès (wilaya de M'sila) vue de son utilisation en construction routière. L'étude effectuée vise à déterminer les paramètres physiques et mécaniques de cette argile traitée par un ciment Portland composé de type MATINE (CPJCEM II/B 42,5 R-NA 442), puis à analyser l'influence du traitement sur ses propriétés mécaniques.

Le choix de ce site a été motivé en raison de son extension vers des zones à risques, où des désordres apparaissent fréquemment dans les infrastructures routières, voies et réseaux divers et même dans les constructions civiles et industrielles de faible hauteur.

Les résultats obtenus ont permis de dégager les conclusions suivantes:

- ✓ Conduit à une amélioration sensible des propriétés mécaniques de l'argile expansive compactée aux conditions de l'optimum Proctor normal. D'accroître les indices de portance (indices CBR immédiat et imbibé), permettant la portance de l'argile en place comme en laboratoire et de réduire de ce fait son expansibilité ;
- ✓ Les valeurs de la limite de liquidité diminuent avec l'augmentation de la teneur en 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 de la teneur en ciment.
- ✓ L'augmentation de la teneur en ciment agit directement sur l'augmentation de la teneur en eau.
- ✓ Selon la classification LCPC-SETRA (2000b), l'argile demeure peu fragmentable et très dégradables
- ✓ Les sols testés sont identifiés comme une argile marneuse très plastique. Les différentes classifications utilisées montrent que cette argile marneuse est caractérisée par un potentiel de gonflement très élevé.

## Références bibliographiques

- [1] **AFNOR (1996) Norme Française: NF P 94-041:** Sols: Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique, méthode de tamisage par voie humide
- [2] **AFNOR (1992) Norme Française: NF P 94-057:** Sols: Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie
- [3] **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.
- [4] **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.
- [5] **AFNOR (1999) Norme Française: NF P 94-093** Sols: Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié.
- [6] **AFNOR (1997) Norme Française: NF P 94-078** Sols: Indice CBR immédiat— Indice CBR après immersion — Indice Portant Immédiat
- [7] **Didier G. (1972)** Gonflement cristallin et macroscopique des montmorillonites: Préviation. Thèse de docteur ingénieur. Université C. Bernard Lyon, pp.
- [8] **GRUNBERGER D., (1995)**, étude expérimentale de l’évolution des microstructures et des propriétés physiques et mécaniques des argiles au cours de la compaction, thèse université de Montpellier ii, sciences et techniques du Languedoc, 20 décembre 1995.
- [9] **Khemissa, M., Mekki, L., & Bakir, N. (2008)**. Comportement œdométrique des argiles expansives de M’sila (Algérie). In SEC’2008: Symposium international sécheresse et constructions, Presses du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France (pp. 229-234).
- [10] **Khemissa, M., Mekki, L., & Mahamedi, A. (2018)**. Laboratory investigation on the behaviour of an overconsolidated expansive clay in intact and compacted states. *Transportation Geotechnics*, 14, 157-168.
- [11] **Khemissa, M., Mahamedi, A., & Mekki, L. (2015)**. Problematic soil mechanics in the Algerian arid and semi-arid regions: Case of M’sila expansive clays. *Journal of Applied Engineering Science & Technology*, 1(2), 37-41.
- [12] **Khemissa, M., Mahamedi, A., & Mekki, L. (2017)**. Laboratory investigation of the treatment effects by hydraulic binders on the physical and mechanical properties of an overconsolidated expansive clay. *International Journal of Geotechnical Engineering*.
- [13] **KHEMISSA, M., & MEKKI, L. (2007)**. Caractérisation des argiles expansives de M’sila (Algérie). Colloque « Sols et Matériaux à Problèmes », Tunisie.
- [14] **Khemissa, M., & Mekki, L. (2005)**. Détermination des paramètres de gonflement des argiles expansives de M’sila. 2ième Journée d’études sur les sols gonflants, Université Aboubekr, Tlemcen (Algérie), 19-27.
- [15] **KHEMISSA, M., & MEKKI, L. (2006)**. Caractérisation du gonflement des argiles expansives de M’sila (Algérie). *International Symposium on urban geotechnics GeocityNet’2005*, Lille, France

- [16] **LCPC-SETRA. (2000) Guide des terrassements routiers:** Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique, Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Bagnaux, France
- [17] **Le Roux A. (1972)** Caractéristiques mécaniques des roches argileuses en relation avec leur texture. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°61, pp. 155-176.
- [18] **MAHAMEDI Abdelkrim (2014)** Caractérisation et traitement des sols gonflants compactés en vue de leur utilisation en construction routière. Thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf-M'sila.
- [19] **MARTIN R.T. (1960)** - "a review of adsorbed water on clay". Proceeding of the 9th national Conference on clay and clay minerals, pergamon, New York, pp. 28-70.
- [20] **MEKKI, Lakhdar. (2006)** Méthodologie d'étude et techniques d'identification des paramètres de comportement des sols fins sursaturés à des cycles de sécheresse prolongée (Application aux argiles expansives de M'sila). Mémoire de magistère. Université Mohamed Boudiaf-M'sila.
- [21] **MEKKI, Lakhdar (2018).** Comportement d'une argile expansive fortement surconsolidée. Thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf-M'sila.
- [22] **Mitchell J.K. (1976)** Fundamentals of soil behavior, series in soils engineering. John Wiley & sons Inc, 422 pages.
- [23] **MOTASEM, A.T. & HADJADJ, T. (2019)** Caractérisation d'une argile expansive traitée par différents types de ciment et reconstituée à forte énergie de compactage. Mémoire de master académique. Université Mohamed Boudiaf-M'sila.
- [24] **RICHARD L.A. (1931)** "capillary conduction of liquids through porous medium". physics 1, pp.169-173.
- [25] **SLAMANI Brahim (2014/2015):** Etude des caractéristiques élastiques d'une argile expansive stabilisée au ciment
- [26] **V. Ferber, Y. Deniaud, R. Bocciardi, E Manier, D. Criado** pour les crédits photos Autoroute du Sud de la France (ASF), Réseau Ferré de France (RFF), Direction Départementale de l'Équipement de Guyanne (DDE 973)
- [27] **Williams A.B, Donaldson G.W. (1980)** Developments related to building on expansive soils in South Africa: 1973-1980. Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Denver, vol. 2, 834-844.
- [28] **YONG R.N. & WARKENTIN B.P. (1966)** "interaction to soil behavior". Macmillan, new York.