

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلم  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir ElIbrahimi- Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie



## Mémoire de fin d'étude

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

**Filière :** Génie Civil

**Option :** Matériaux en Génie Civil

**Présenté par :** BEN AMRANE Imene et ZEHAR Tassadit Lilia

**Thème :**

**Evaluation des caractéristiques mécaniques, après traitement à la chaux, des marnes évolutives de la région de Bordj Bou Arreridj. Possibilité d'une valorisation en techniques routières.**

**Soutenu le : 19-09-2019**

**Devant le jury composé de :**

|                       |                            |                     |
|-----------------------|----------------------------|---------------------|
| <b>Président :</b>    | Dr. Noui Ammar             | Université de BBA   |
| <b>Encadreur :</b>    | Dr. Achour Yacine          | Université de BBA   |
| <b>Co-encadreur :</b> | Dr. Ayeche Riad            | Université de BBA   |
| <b>Examineur :</b>    | Dr. Bouglada Mohamed Salah | Université de Btana |
| <b>Examineur :</b>    | Mr. Mazouz Badis           | Université de BBA   |

## Remerciements

Nous exprimons toute notre gratitude et sincère dévouement à Dieu Le Tout puissant  
qui grâce à son aide nous avons terminé  
ce modeste travail.

Nous tenons à remercier chaleureusement nos encadrateurs **Mr. ACHOUR Yacine** et  
**Mr AYECHÉ Riad** pour son aide et son encadrement, ses encouragements et surtout sa  
compréhension durant toute la période de préparation de  
ce mémoire.

Nous remercions également l'honorable jury qui a bien voulu examiner notre travail.

Nos professeurs qui nous ont enrichis de connaissances, tous les ingénieurs de  
laboratoire de génie civil à leur aide, et sans oublié la personne qui nous a  
profondément touché pour son énorme travail

3ami RabeH.

Au terme de ce travail, nous tenant à exprimer notre gratitude et nos remerciements  
pour toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.

# *Dédicace*

*En guise de reconnaissance, je dédie*

*Ce travail*

- *A ma chère Maman pour son soutien sans faille tout au long de ma vie, L'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.*
- *A mon cher Père aucune dédicace ne saurait exprimer mon amour, pour toi*
- *A mes Frères Saber et Didou .*
- *A mon Mari.*
- *A chère binome Imene.*
- *A toute ma Famille ; mes Amis d'études*

*promotion 2019-2020*

*Lilia* 😊

# *Dédicace*

*A l'aide de dieu tout puissant, qui trace le chemin de ma vie j'ai pu arriver à réaliser ce modeste travail que Je dédie Aux êtres les plus chers, A la lumière de ma vie, ma mère NADIA et mon père REDA, exemple de courage et de sérieux qui m'ont tout donné pour me permettre de réaliser mes rêves.*

*En ces quelques mots, je leurs exprime tout mon amour et mon respect pour tout ce qu'ils m'ont offert comme soutien, encouragement et aide. Je leurs souhaite une bonne santé, que Dieu me les garde.*

*A mes chers frères MOHAMED, TAMIMO ,DJALILO. A mes toute chères amies A ma Fidèle binôme LILIA*

*promotion 2019-2020*

## **Résumé :**

Le traitement des sols en place à la chaux est une technique connue et tout à fait maîtrisée, et connaît un grand développement, depuis une vingtaine d'années. Ce développement est dû principalement à deux phénomènes. Le premier est relatif à des besoins économiques, ainsi qu'à une préoccupation écologique grandissante. En effet, tandis que les tracés géométriques des projets routiers deviennent de plus en plus complexes, sollicitant de larges mouvements de terre dans des sols parfois difficilement réutilisables ; les gisements naturels de matériaux nobles, diversement répartis, s'amenuisent. Il est donc impératif d'épargner les ressources existantes, d'autant plus que leur coût de transport est élevé. Ajouté à ces impératifs économiques, son avantage appréciable est l'amélioration du cadre de vie, ainsi que la protection de l'environnement.

Ce projet fait partie d'une étude menée sur les marnes dans la région de Bordj Bou Arreridj. Il consiste particulièrement en la caractérisation mécanique de ces matériaux en se basant sur des essais expérimentaux réalisés au laboratoire. Il permet ainsi de classer les marnes étudiées. Le travail expérimental présenté dans cette étude est basé sur des essais qui comportent des essais d'identification physiques et chimiques, ainsi que des essais mécaniques (portance CBR, résistance à la compression simple  $R_c$  et résistance à la traction indirecte (essai brésilien)  $R_{tb}$ ). Une tentative de valorisation à la fois de ces matériaux (marnes) et de la chaux résiduaire (déchet de processus de fabrication de l'acétylène) par traitement de la marne à la chaux, a été réalisée pour une éventuelle utilisation dans la construction de couche de forme (CDF)

Les résultats obtenus montrent que les marnes traitées donnent des résultats significatifs et présentent des caractéristiques très intéressantes vérifiant les conditions exigées par les spécifications.

## **Mots clés :**

*Traitement, chaux, marnes, résistance à la compression, résistance à la traction.*

## **Abstract:**

The treatment of soil in place with lime is a known technique and quite mastered, and known a great development, since about twenty years. This development is mainly due to two phenomena. The first is related to economic needs, as well as to a growing ecological concern. Indeed, while the geometric plots of road projects are becoming more and more complex, requiring large movements of soil in soils that are sometimes difficult to re-use; the natural deposits of noble materials, diversely distributed, diminish. It is therefore imperative to save existing resources, especially as their transport cost is high. Added to these economic imperatives, its appreciable advantage is the improvement of the living environment, as well as the protection of the environment.

This project is part of a study on marls in the region of Bordj Bou Arreridj. It consists particularly in the mechanical characterization of these materials based on experimental tests carried out in the laboratory. It allows to classify the marl studied. The experimental work presented in this study is based on tests that include physical and chemical identification tests, as well as mechanical tests (CBR , Rc simple compressive strength and indirect tensile strength (Brazilian test) Rtb). An attempt was made to recover both these materials (marls) and waste lime (waste of the process of acetylene production) by treating the marl with lime, for possible use in the construction of capping layer (CDF)

The results obtained show that the marl treated give significant results and have very interesting characteristics verifying the conditions required by the specifications.

## **Keywords :**

*Treatment, lime, marl, compression strength, tensile strength.*

## ملخص :

تعتبر معالجة التربة في مكانها مع الجير تقنية معروفة ومتقنة للغاية، ومعروفة بتطور كبير، منذ حوالي عشرين عاماً. هذا التطور يرجع أساساً إلى ظاهرتين. الأولى تتعلق بالاحتياجات الاقتصادية، فضلاً عن الاهتمام البيئي المتزايد. في الواقع، في حين أن القطع الهندسية لمشاريع الطرق أصبحت أكثر تعقيداً وتتطلب حركة نقل كبيرة من التربة والتي يصعب إعادة استخدامها في بعض الأحيان. في حين فإن الرواسب الطبيعية للمواد النبيلة موزعة بشكل متنوع وهي في تناقص مستمر. لذلك من الضروري توفير الموارد الطبيعية الحالية، خاصة وأن تكلفة النقل مرتفعة. إضافة إلى هذه الضرورات الاقتصادية، فإن ميزتها الملموسة هي تحسين البيئة المعيشية، وكذلك حماية البيئة.

هذا المشروع هو جزء من دراسة عن الصلصال في منطقة برج بوعريرج. حيث انه يركز بشكل خاص على التوصيف الميكانيكي لهذه المواد بناءً على الاختبارات التجريبية التي أجريت في المختبر. يستند العمل التجريبي المقدم في هذه الدراسة إلى تجارب فيزيائية وكيميائية ، بالإضافة إلى اختبارات ميكانيكية (CBR) ، قوة ضغط Rc وقوة شد غير مباشرة (اختبار برازيلي) (Rtb). . جرت محاولة للعثور على كل من هذه المواد (الصلصال) وجير النفايات (نفايات عملية إنتاج الأسيتيلين) عن طريق معالجة المرل مع الجير ، للاستخدام المحتمل في بناء الطبقات الشكل (CDF)

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الصلصال المعالج يعطى نتائج مهمة وله خصائص مثيرة للغاية للتحقق من الشروط المطلوبة في المواصفات.

الكلمات المفتاحية :

العلاج ، الجير ، صلصال ، قوة الضغط ، قوة الشد.

|                        |  |
|------------------------|--|
| Remerciements          |  |
| Dédicace               |  |
| Résumé                 |  |
| Sommaire               |  |
| Liste des abréviations |  |
| Liste des figures      |  |
| Liste des photos       |  |
| Liste des tableaux     |  |

## **I. Introduction Générale**

### **Chapitre I : Synthèse Bibliographique**

|                   |   |
|-------------------|---|
| Introduction..... | 1 |
|-------------------|---|

#### **Partie 1: Généralités sur les sols évolutifs**

|   |    |
|---|----|
| 1. Définition des sols évolutifs.....                         | 1  |
| 2. Particularités d'un sol évolutif .....                     | 1  |
| 3. Les principaux sols évolutifs.....                         | 2  |
| 3.1. Les marnes.....  | 2  |
| 3.2. Les limons.....  | 4  |
| 3.3. Les argiles.....   | 4  |
| 3.3.1. structure élémentaire des matériaux argileux.....      | 4  |
| 3.3.2. les différents types d'argiles.....                    | 6  |
| 4. Problèmes des sols argileux dans les projets routiers..... | 7  |
| 4.1. le gonflement.....                                       | 8  |
| 4.2. le Tassement .....                                       | 8  |
| 4.3. le Glissement.....                                       | 9  |
| 5. Composition d'une structure de chaussée.....               | 11 |
| 5.1. Dimensionnement de la chaussée .....                     | 11 |
| 5.2. Les différentes couches.....                             | 11 |
| 5.3 Les différents types des chaussées.....                   | 13 |

#### **Partie 2: Traitement Chimique à la chaux**

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 1. Utilisation de la chaux..... | 15 |
|---------------------------------|----|



|   |    |
|---|----|
| 2. Comportement des sols traités à la chaux.....  | 15 |
| 3. La chaux.....                                  | 16 |
| 3.1 Les réactions argile - chaux.....             | 17 |
| 3.2. Fabrication .....                            | 18 |
| 3.3 Les différents types de chaux aériennes ..... | 19 |
| 4 . La chaux résiduaire .....                     | 20 |
| 4.1 Préparation du carbure de calcium .....       | 21 |
| 4.2 Description du procédé.....                   | 22 |
| 4.3. Récupération de l'eau du lait de chaux ..... | 24 |
| 5. Conclusion.....                                | 24 |

## **Chapitre II : Techniques et procédures expérimentales**

|   |    |
|---|----|
| Introduction .....  | 25 |
| 1. Programme des essais au laboratoire.....                             | 25 |
| 2. Caractérisation géotechnique des sols.....                           | 25 |
| 2.1 Détermination de la teneur en eau.....                              | 25 |
| 2.2 Analyse granulométrique par tamisage.....                           | 26 |
| 2.3 Limites D'Atterberg.....  | 28 |
| 2.4 Essai Proctor.....  | 34 |
| 2.5 Essai bleu de méthylène.....  | 37 |
| 3. Caractérisation mécanique.....                                       | 40 |
| 3.1 Essai de la résistance à la compression simple.....                 | 40 |
| 3.2 Essai de résistance à la traction indirecte (Essai Brésilien).....  | 42 |
| 4. Caractérisation Chimique.....  | 44 |
| 4.1 Détermination de la teneur en carbonates Méthode du Calcimètre..... | 44 |

|  |    |
|--|----|
| 4.2 Détermination de la teneur en sulfates ..... | 47 |
|--|----|

### **Chapitre III :caractérisation Des Sols Etudiés**

|   |    |
|---|----|
| Introduction.....   | 50 |
| 1. Origine et localisation des échantillons à tester.....   | 50 |
| 1.1 Prélèvement des échantillons.....   | 50 |
| 2. Les résultats des différents essais.....   | 50 |
| 2.1 Essais géotechniques.....   | 50 |
| 2.1.1 Teneur en eau (NF P 94-050) : .....   | 51 |
| 2.1.2 Résultats d'analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056).....                                   | 51 |
| 2.1.3 Résultats des Limites d'Atterberg (NF P 94-05120).....  | 53 |
| 2.1.4 Résultats d'essai Proctor (NF P 94-093).....  | 55 |
| 2.1.5 Résultats d'essai au bleu de méthylène (NF P 94-068).....   | 56 |
| 2.1.6 Essais de portance CBR (Californian Bearing Ratio test) (NF P 94-078).....                            | 56 |
| 2.1.7 Essai de Fragmentabilité et essai de Dégradabilité.....   | 58 |
| 2.1.8 Classification géotechnique des sols étudiée.....   | 59 |
| 2.2 Essais mécaniques.....  | 60 |
| 2.2.1 Résistance à la compression simple et à la traction indirecte (NF P 98-232-1) et (NF P 98-232-3)..... | 60 |
| 2.3 Essais chimiques.....   | 62 |
| Conclusion.....   | 64 |

### **Chapitre IV : Caratérisation macanique des sols traités**

|   |    |
|---|----|
| Introduction.....   | 65 |
| 1. Techniques et procédures expérimentales.....                                       | 65 |
| 2. Les Matériaux utilisés.....  | 65 |
| 2.1 Sol utilisé.....  | 65 |
| 2.2 Choix du type de chaux.....   | 65 |
| 3. Les caractéristiques de la résistance de compression et de traction indirecte..... | 68 |
| 3.1 Préparation des mélanges et conservation des éprouvettes.....                     | 68 |

## **II. Conclusion générale**

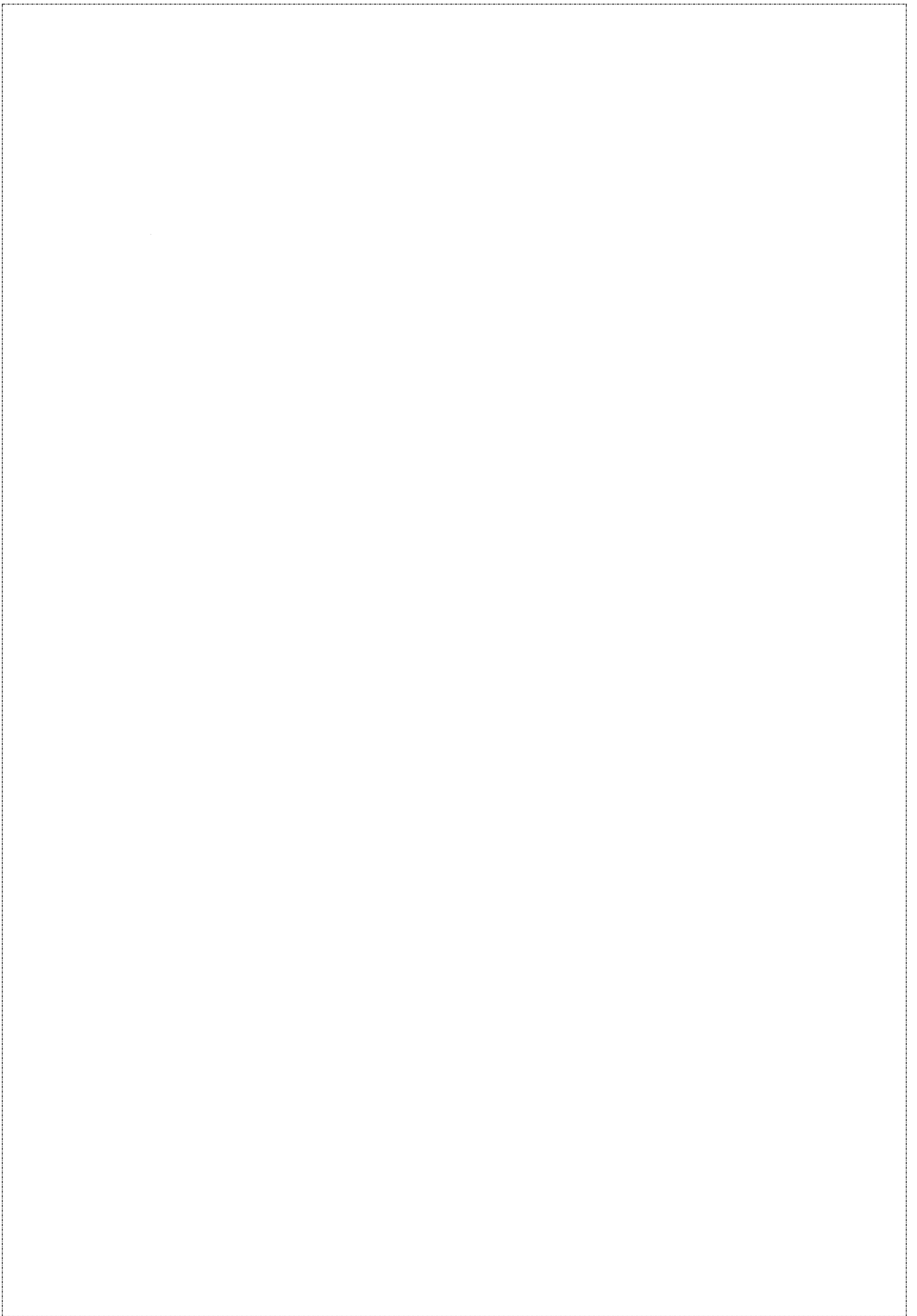




## Liste des abréviations

AFNOR: Association Française de Normalisation.  
BB: Couche Bitumineuse Mince.  
CBR : California Bearing Ratio.  
Cc : Coefficient de courbure.  
CDF : Couche De Forme.  
Cu : Coefficients d'uniformité.  
DG : dégradabilité.  
ERCO: Entreprise des Ciment et dérivés de l'ouest.  
ENGI: Entreprise Nationale de Gaz Industrielle  
FR : Fragmentabilité.  
 $\gamma_d$  : Densité Sèche.  
 $\gamma_{d\text{ opm}}$  : Densité Sèche de l'Optimum e Proctor Modifié.  
 $\gamma_{d\text{ opn}}$  : Densité Sèche de l'Optimum e Proctor Normal.  
GNT: Grave non Traité.  
GTR : Guide De Terrassement Routier.  
GTS : Guide de Traitement du Sol.  
I CBR I : Indice CBR Immédiat.  
 $I_C$  : Indice de Consistance.  
Imb-séch : imbibition-séchage.  
IP : Indice de Plasticité.  
IPI : Indice Portant Immédiat.  
LA : Los Angeles.  
LCPC : Laboratoire Centrale Des Ponts Et des Chaussées.  
LHR : Liant Hydraulique Routier.  
MDE : Micro Deval.  
MTLH: Matériaux Traités aux Liants Hydrolique  
PST : Partie Supérieure des Terrassements.  
VBS : Valeur au Bleu du Sol.  
W : Teneur En Eau.  
WL : Limite de Liquidité.  
WP : Limite de Plasticité.





# Liste des Figures

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 1</b> : Structure Elémentaire Tétraédrique.....   | 5  |
| <b>Figure 2</b> : Structure Elémentaire Octaédrique.....  | 5  |
| <b>Figure 3</b> : Structure de la kaolinite.....  | 6  |
| <b>Figure 4</b> : Structure de la montmorillonite.....  | 6  |
| <b>Figure 5</b> : Structure d'illite.....   | 7  |
| <b>Figure 6</b> : Fissuration longitudinale de routes due au retrait et gonflement des sols.....                                      | 8  |
| <b>Figure 7</b> : Tassement en bordure d'une route.....   | 9  |
| <b>Figure 8</b> : Schéma en coupe d'un glissement de terrain.....   | 10 |
| <b>Figure 9</b> : route coupée à Bouzaréah après un glissement de terrain.....  | 10 |
| <b>Figure 10</b> : Coupe type d'une structure de chaussée et terminologie des différentes couches.....                                | 11 |
| <b>Figure 11</b> : Chaussée souple.....   | 13 |
| <b>Figure 12</b> : Chaussée rigide .....  | 14 |
| <b>Figure 13</b> : modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de la chaux vive..... | 15 |
| <b>Figure 14</b> : Coupe transversale de la route.....  | 16 |
| <b>Figure 15</b> : Cycle de fabrication de la chaux.....  | 19 |
| <b>Figure 16</b> : l'eau de chaux déchargée dans l'environnement.....   | 20 |
| <b>Figure 17</b> : Dépôt de la chaux résiduaire de l'usine d'El Hadjar (Annaba).....  | 21 |
| <b>Figure 18</b> : Le carbure de calcium.....   | 21 |
| <b>Figure 19</b> : Schéma du procédé de fabrication de l'acétylène.....   | 23 |
| <b>Figure 20</b> : Schéma de principe de récupération de l'eau de chaux (ENGI).....   | 24 |
| <b>Figure 21</b> : balance.....   | 26 |
| <b>Figure 22</b> : Etuve.....   | 26 |
| <b>Figure 23</b> :Colonne des tamis.....  | 26 |



|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 24</b> : Représentation des limites d'Atterberg.....   | 28 |
| <b>Figure 25</b> : Appareil de Casagrande et Outil à rainurer.....                                       | 29 |
| <b>Figure 26</b> : Système d'évaluation du diamètre du rouleau de sol.....                               | 30 |
| <b>Figure 27</b> : Préparation de l'échantillon à teste.....   | 31 |
| <b>Figure 28</b> : Mise en place de l'échantillon dans la coupelle.....                                  | 31 |
| <b>Figure 29</b> : Réalisation de la rainure.....  | 31 |
| <b>Figure 30</b> : Fermeture de la rainure.....  | 32 |
| <b>Figure 31</b> : Exécution de la limite de liquidité WL.....   | 33 |
| <b>Figure 32</b> : Préparation du rouleau pour la détermination de WP.....                               | 34 |
| <b>Figure 33</b> : sol sec concassé.....   | 36 |
| <b>Figure 34</b> : Remplissage par 3 couches.....  | 36 |
| <b>Figure 35</b> : Phases de déroulement de l'essai bleu de méthylène.....                               | 38 |
| <b>Figure 36</b> : Aperçu schématique de l'essai de détermination de la valeur de bleu de méthylène..... | 39 |
| <b>Figure 37</b> : Papiers filtres montrant l'auréole Bleu clair pour la marne.....                      | 39 |
| <b>Figure 38</b> : Matériels utilisés.....   | 40 |
| <b>Figure 39</b> : Compactage.....   | 41 |
| <b>Figure 40</b> : Extracteur.....   | 41 |
| <b>Figure 41</b> : Conservateur.....   | 41 |
| <b>Figure 42</b> : écrasement de l'éprouvette.....   | 42 |
| <b>Figure 43</b> : Ecrasement des éprouvettes.....   | 43 |
| <b>Figure 44</b> : Schéma d'un Calcimètre .....  | 45 |
| <b>Figure 45</b> : Calcimètre Dietrich-Fruhlingutilisé.....  | 45 |
| <b>Figure 46</b> : Déroulement de l'essai.....   | 47 |
| <b>Figure 47</b> : Déroulement de l'essai.....   | 48 |
| <b>Figure 48</b> : Site de prélèvement.....  | 50 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 49 :</b> Courbe granulométrique de la marne étudiée.....  | 51 |
| <b>Figure 50 :</b> Courbe Proctor normal de la marne étudiée.....   | 55 |
| <b>Figure 51:</b> classification des sols selon la valeur de bleu de méthylène.....   | 56 |
| <b>Figure 52 :</b> Résultats des essais CBR après immersion.....  | 57 |
| <b>Figure 53 :</b> Valeurs de gonflement pour les 2 échantillons.....   | 57 |
| <b>Figure 54:</b> Courbes CBR portant immédiat de la marne étudiée.....   | 58 |
| <b>Figure 54 :</b> des éprouvettes d'une marne sans traitement.....   | 61 |
| <b>Figure 55 :</b> Conservation des éprouvettes dans une armoire.....   | 61 |
| <b>Figure 56 :</b> Influence de la durée de conservation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple de la marne naturelle (sans traitement)..... | 62 |
| <b>Figure 57 :</b> Influence de la durée de conservation des éprouvettes sur la résistance à la traction indirecte de la marne naturelle (sans traitement)..... | 62 |
| <b>Figure 58 :</b> Chaux vive de Saida.....   | 65 |
| <b>Figure 59 :</b> lais de Chaux (ENGI).....  | 67 |
| <b>Figure 60:</b> Préparation des matériaux.....  | 69 |
| <b>Figure 61 :</b> conservation des éprouvettes des différents pourcentages des 2 types d'chaux.....  | 70 |
| <b>Figure 62 :</b> mode de rupture (correcte) des éprouvettes cylindriques en compression.....  | 70 |
| <b>Figure 63 :</b> Écrasement des éprouvettes (compression simple).....   | 71 |
| <b>Figure 64:</b> Mode de rupture des éprouvettes cylindriques en traction.....   | 71 |
| <b>Figure 65 :</b> Écrasement des éprouvettes (traction indirecte).....   | 71 |
| <b>Figure 66 :</b> Évolution de la résistance RC en fonction du temps pour la marne traitée à chaux résiduaire.....   | 72 |
| <b>Figure 67 :</b> Évolution de la résistance RC en fonction du temps pour la marne traitée à Chaux commerciale.....  | 73 |
| <b>Figure 68 :</b> Évolution de la résistance RC en fonction du dosage en chaux résiduaire.....   | 74 |
| <b>Figure 69 :</b> Evolution de la résistance RC en fonction du dosage en chaux vive .....  | 74 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 70 :</b> Évolution de la résistance RTb en fonction du temps pour la marne traitée à chaux résiduaire..... | 75 |
| <b>Figure 71:</b> Évolution de la résistance RTb en fonction du temps pour la marne traitée à chaux commerciale..... | 75 |
| <b>Figure 72 :</b> Évolution de la résistance RC en fonction du dosage en chaux résiduaire.....                      | 76 |
| <b>Figure 73:</b> Évolution de la résistance RC en fonction du dosage en chaux commerciale.....                      | 76 |

# Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau 1 :</b> Classification du Massachusset Institute of Technology des sols suivants leurs dimensions.           | 2  |
| <b>Tableau 2 :</b> Classification courante des roches selon la teneur en carbonates et en argiles.                      | 3  |
| <b>Tableau 3:</b> Caractéristiques de certaines familles d'argile.  | 7  |
| <b>Tableau 4 :</b> Caractéristiques physico-chimiques de la chaux utilisée.   | 17 |
| <b>Tableau 5:</b> Les différentes caractéristiques de la chaux.   | 20 |
| <b>Tableau 6 :</b> Composition et caractéristiques du carbure de calcium (ENGI).  | 21 |
| <b>Tableau 7:</b> Conditions de chaque essai selon le moule retenu.   | 35 |
| <b>Tableau 8 :</b> Teneur en eau naturel de la marne étudié.  | 51 |
| <b>Tableau 9 :</b> Valeurs des coefficients Cu et Cc.   | 52 |
| <b>Tableau 10 :</b> Limites d'Atterberg de la marne étudiée.  | 53 |
| <b>Tableau 11 :</b> Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (GTR, 2000)                           | 54 |
| <b>Tableau 12:</b> Potentiel de gonflement d'après Snethen (1980).  | 54 |
| <b>Tableau 13 :</b> Caractéristiques de l'optimum Proctor normale de la marne étudiée.                                  | 56 |
| <b>Tableau 14 :</b> Spécification du GTR (essai de fragmentabilité).  | 59 |
| <b>Tableau 15 :</b> Récapitulatif des valeurs des différents essais géotechniques effectués sur les marnes non traitées | 59 |
| <b>Tableau 16 :</b> Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature.                               | 60 |
| <b>Tableau 17:</b> Résultats des analyses chimiques de la marne étudiée.  | 63 |
| <b>Tableau 18 :</b> Expression des résultats des analyses chimiques.  | 63 |
| <b>Tableau 19 :</b> Classification des matériaux en fonction du pourcentage massique en carbonate                       | 63 |
| <b>Tableau 20 :</b> Caractéristiques physico-chimiques de la chaux de Saida.  | 66 |
| <b>Tableau 21 :</b> Caractéristiques physico-chimiques des laits de chaux de l'ENGI.                                    | 68 |





---

## Introduction Générale

---



## **Introduction générale**

Le traitement du sol au liant hydraulique est communément appelé Soil-Mixing et consiste à mélanger mécaniquement et en place le sol avec un liant pour améliorer ses propriétés mécaniques.

De nombreuses études sur la méthode par voie sèche ainsi que quelques-unes sur la méthode par voie humide permettent d'apporter des éléments de réponses. Cependant, il n'existe pas d'étude paramétrique globale étudiant à la fois l'impact du type de sol et de la quantité d'eau sur la caractérisation du matériau. De même, l'ouvrabilité du matériau n'a pour l'instant pas été étudiée. L'influence de la partie argileuse ainsi que celle de la granulométrie sur le sol sont des questions qui font également partie des plus pertinentes. L'impact des conditions de cure n'a pas non plus été quantifié alors que le vieillissement du matériau et sa durabilité en dépendent.

L'amélioration des propriétés mécaniques des marnes ont fait l'objet de peu de travaux scientifiques en Algérie. Dans le présent travail, une caractérisation complète (physique, chimique et mécanique) a été réalisée sur des matériaux marneux. Ces matériaux présentent des caractéristiques mécaniques très faibles, les rendre inutilisables dans la construction routière. Par conséquent, nous avons pensé de s'intéresser aussi à une éventuelle utilisation de ces marnes pour la construction de la couche de forme (CDF), en les traitants à la chaux.

Notre étude a pour but de répondre à ces enjeux, en réalisant une étude expérimentale sur le matériau « marne-chaux ».

L'objectif principal de notre travail est donc de caractériser mécaniquement (à l'aide d'essais de compression simple et de traction indirecte) en laboratoire sur des mélanges idéaux le matériau « marne-chaux » réalisé par voie sèche, en prenant en compte le type de sol, sa granulométrie, le dosage en chaux et la quantité d'eau d'introduction.

### **Plan du mémoire**

Ce mémoire est constitué de quatre chapitres :

Le premier chapitre est une étude bibliographique sur les sols évolutifs en général et les marnes en particulier. Les constituants des sols fins sont ensuite présentés, avec leurs propriétés les plus importantes. Les résultats les plus significatifs des études antérieures à la nôtre sont présentés, couvrant les différents points que nous abordons dans les chapitres suivants.

Le deuxième chapitre regroupe les présentations des matériels utilisés tout au long de ce projet, notre démarche scientifique ainsi que le programme expérimental et les protocoles développés et suivis.

Le troisième chapitre porte sur la présentation des matériaux utilisés et la mise en œuvre au laboratoire des essais sur les sols non traités : il est composé d'une partie portant sur la préparation du sol, exécution des différents tests d'identification et interprétation de leurs résultats.

Dans le quatrième chapitre, nous nous concentrons sur les matériaux traités à différents dosages de deux chaux (commerciale et résiduaire). Nous nous étudions l'influence du dosage en chaux sur les propriétés mécaniques des marnes traitées en les comparant avec les résultats des essais mécaniques réalisés sur les marnes à l'état naturelle.

Une dernière partie vient apporter des conclusions générales et quelques perspectives de travail.





---

# **Chapitre I :** **Synthèse Bibliographique**

---



### **Introduction :**

L'étude géotechnique comporte une identification du sol naturel et une détermination fine des caractéristiques mécaniques du sol traité.

L'utilisation de la chaux pour stabiliser les sols fins a connu beaucoup de succès dans les dernières années (Ikhlef ,2014). En effet, plusieurs études ont été menées sur les chaux, par exemple : la valorisation de la chaux résiduaire, sous-produit de la fabrication d'acétylène, dans le traitement des eaux a été effectuée par Ayeche, 2013. L'étude du comportement mécanique des marnes traitées aux liants hydrauliques a été réalisée par Laifaoui et Saffidine, 2017.

La chaux joue un rôle très important (déshydratation, stabilisation et fixation des métaux lourds) dans les différentes opérations de traitement des sols.

Ce chapitre est destiné à décrire la complexité du sol et de ses constituants et à faire le point sur les connaissances relatives aux mécanismes de stabilisation des sols à l'aide de traitements chimiques.

### ***Partie 1 : Généralités sur les sols évolutifs***

#### **1. Définition des sols évolutifs :**

On peut définir un matériau évolutif comme un matériau dont les propriétés physiques et mécaniques évoluent dans le temps. Les sols qui ont un caractère évolutif sont les sols fins (limons, argiles, marne) qui peuvent créer dans les ouvrages, des tassements, gonflements et glissements pendant leur durée de vie (Zoubir, 2009).

#### **2. Particularités d'un sol évolutif :**

Dans ce type de sol, les forces d'attraction capillaire entre les grains sont prédominantes à cause de la valeur importante de la surface des grains. C'est pour cela qu'il faut étudier la notion de surface spécifique qui quantifie la somme des surfaces des grains obtenus dans une unité de masse du sol. Les autres types de sol sont caractérisés par leur grande perméabilité et l'absence d'une adhérence entre leurs grains. La notion de surface spécifique apparaît dans les sols fins (cas de l'argile) dont les particules ont de petites dimensions ( $< 2 \mu\text{m}$ ), difficiles à

déterminer ainsi que leur forme, contrairement au sable présentant des grains de dimensions > 50  $\mu\text{m}$  (Harr, 1981). Le tableau 1 nous renseigne sur la classification des sols selon la dimension de leurs particules.

**Tableau 1 :** Classification du Massachusset Institute of Technology des sols suivants leurs dimensions (Marwana et Muangongo, 2014).

| Diamètre des tamis  | Sol           |
|---------------------|---------------|
| >63mm               | Pierres       |
| 63-20mm             | Gravier gros  |
| 20-6mm              | Gravier moyen |
| 6-2mm               | Graviers fin  |
| 2-0,6mm             | Sable gros    |
| 0,6-0,2mm           | Sable moyen   |
| 0,2-0,06mm          | Sable fin     |
| 60-20 $\mu\text{m}$ | Limon gros    |
| 20-6 $\mu\text{m}$  | Limon moyen   |
| 6-2 $\mu\text{m}$   | Limon fin     |
| 2-0,6 $\mu\text{m}$ | Argile        |

### 3. Les principaux sols évolutifs :

#### 3.1. Les marnes :

Roche tendre composée en proportions variables d'argile et de calcaire mêlés à du sable, qui a la propriété de se déliter et qui est utilisée selon sa composition pour l'amendement des terres, la fabrication de ciments, de tuiles, de céramiques (Amoura et Maameri, 2014).

On considère, selon leur composition, trois grandes catégories:

- Les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35 % de carbonate de calcium.
- Les marnes proprement dites et les calcaires marneux avec des taux respectivement de (35 à 65 %) et de (65 à 95 %) (Tab.2).

**Tableau 2** Classification courante des roches selon la teneur en carbonates et en argiles (Pejon Le roux et Guignard, 1997).

| Classification de Jung |            | Classification LCPC    |                        |
|------------------------|------------|------------------------|------------------------|
| Roches                 | % d'argile | % de CaCO <sub>3</sub> | Roches                 |
| Calcaire               | 0 à 5      | 0 à 10                 | Argile ou silt         |
| Calcaire argileux      | 5 à 35     | 10 à 30                | Argile ou silt-marneux |
| Marne                  | 35 à 65    | 30 à 70                | Marne                  |
| Argile calcaire        | 65 à 95    | 70 à 90                | Calcaire-marneux       |
| Argile                 | 95 à 100   | 90 à 100               | Calcaire               |

Les marnes sont des roches relativement tendres, elles subissent une géodynamique très active à leur surface et leur fragilité les rend très vulnérables aux aléas de la nature et des êtres vivants. Une combinaison de facteurs naturels et anthropiques a provoqué une érosion hydrique intense qui s'est manifestée par une dégradation des sols et une diminution importante de leur productivité.

Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de craqueler sur une certaine profondeur en cas de sécheresse. Les marnes ont souvent fait l'objet d'exploitation en carrières à ciel ouvert où en souterrain pour donner respectivement : de la chaux avec les marnes argileuses ; de la chaux hydraulique avec les marnes proprement dites ; et du ciment avec les marnes calcaires ou calcaires marneux. Elles ont également été utilisées pour amender les terres des exploitations agricoles.

D'une façon générale, les marnes sont une assise de fondations bonne à moyenne en l'absence de gypse. En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse, avec risque de formation de fontis.

L'évolution des sols fins est due à la présence des minéraux argileux dans les sols tels que : les marnes, les argiles...etc qui manifestent une grande sensibilité à l'air (retrait, fissuration désagrégation progressive des couche de sol) et une forte affinité pour l'eau (avec les conséquences classiques de l'humidification : gonflement, déconsolidation, perte des caractéristique mécaniques).

### 3.2. Les limons :

Les limons, constitués de silt, de lœss, possèdent un squelette siliceux à silico-calcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles ; la teneur en argile est variable. Ils sont peu perméables et constituent des terres de culture fertiles. Leur assise est médiocre et sont donc à éviter pour les fondations.

### 3.3. Les argiles :

Les argiles du sol ont pour origine la transformation géochimique des minéraux primaires qui, eux-mêmes, proviennent de la fragmentation des roches-mères (Ikhlef, 2015). Cette fraction fait partie de ce que l'on appelle communément "Le Complexe D'altération" dont elle constitue la composante essentielle.

Le mot « argile » englobe deux connotations dont l'une liée à la taille des grains (inférieure à 2  $\mu\text{m}$ ) et l'autre à la minéralogie. La définition dépend de la discipline concernée. Une argile peut avoir deux origines : détritique (transportée) ou chimique. Si elle a une origine chimique, le gisement est homogène tant que la chimie du site est homogène et que les réactions de d'altération sont identiques. Deux grands modes d'altération (Millot et al., 1976 ; ) existent :

- L'altération superficielle liée à l'infiltration des eaux de surface affectant tout le massif et dont l'ampleur est en relation directe avec la proximité de la surface.
- L'altération hydrothermale, liée à la circulation de fluides (liquides ou gazeux), qui reste un phénomène local.

Dans le domaine de génie civil, le sol argileux désigne un sol qui contient un certain pourcentage de minéraux argileux et dont le comportement est influencé par la présence de ces derniers. Les sols argileux sont des sols fins, plastiques et cohérents. Ils sont actifs sur le plan électrochimique et ils absorbent l'eau en formant une pâte imperméable (perméabilité inférieure à 0,2 mm/h).

Les argiles peuvent être gonflantes, notamment celles de la famille des montmorillonites lorsqu'elles absorbent l'eau au contraire, diminuer de volume sous l'effet de la sécheresse. Le comportement du mélange est gouverné par l'effet de l'argile.

#### 3.3.1 Structure élémentaire des minéraux argileux :

Tous les minéraux argileux sont composés par l'assemblage, d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ), de silice, sous forme de silicate ( $\text{SiO}_3$ ) et d'aluminium, sous forme d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Leur structure

élémentaire, appelée feuillet, est constituée d'un arrangement de deux cristaux de base : silicates et alumines. Chaque minéral argileux est composé d'un empilement de feuillets. Ce dernier a un nombre variable de couches pouvant être regroupées en deux types :

- **Le Tétraèdre de silice  $\text{SiO}_4$**  : 4 atomes d'oxygène disposés au sommet d'un tétraèdre régulier ensèrent un atome de silicium. Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches tétraédriques (Oudni ,2017) (Fig. 1).

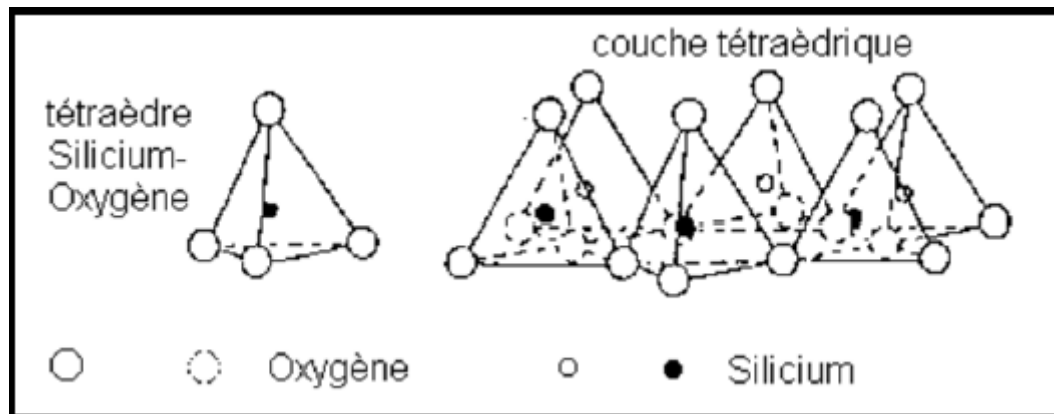


Figure 1 : Structure Élémentaire Tétraédrique (Oudni, 2017).

- **L'octaèdre d'alumine  $\text{Al}_2(\text{OH})_6$  et éventuellement de magnésium  $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$**

6 ions hydroxydes ensèrent un atome d'aluminium ou de magnésium. Les octaèdres se combinent également pour former des couches planes dites couches octaédriques (Fig.2).

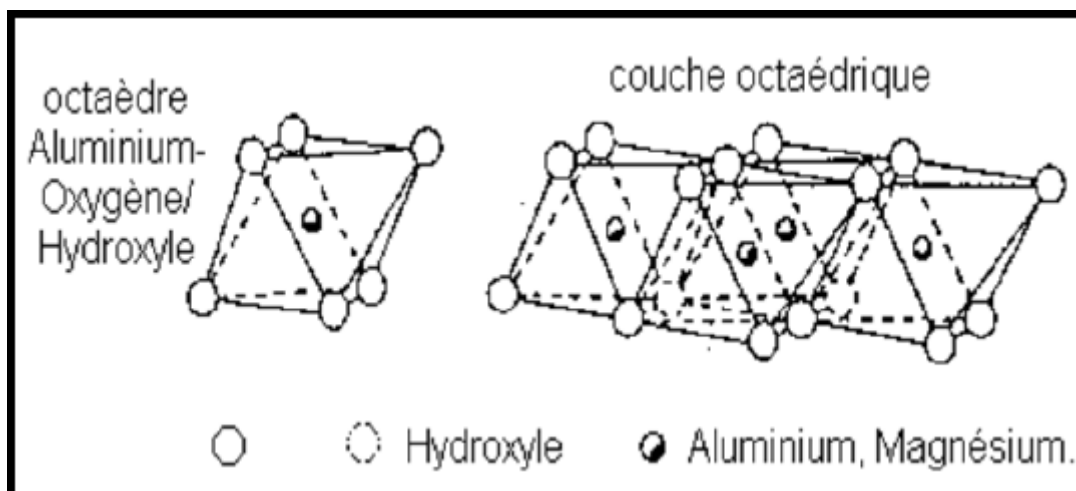


Figure 2 : Structure Élémentaire Octaédrique (Oudni ,2017).

## 3.3.2 Les différents types d'argiles :

Les types d'argiles les plus fréquents sont :

- ✓ **Kaolinite** : La kaolinite est constituée d'une succession alternée de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite). Les deux feuillets sont liés de telle manière que les sommets du feuillet de silice et ceux d'une des couches du feuillet en octaèdre ne forment qu'une seule et même couche (Fig.3).

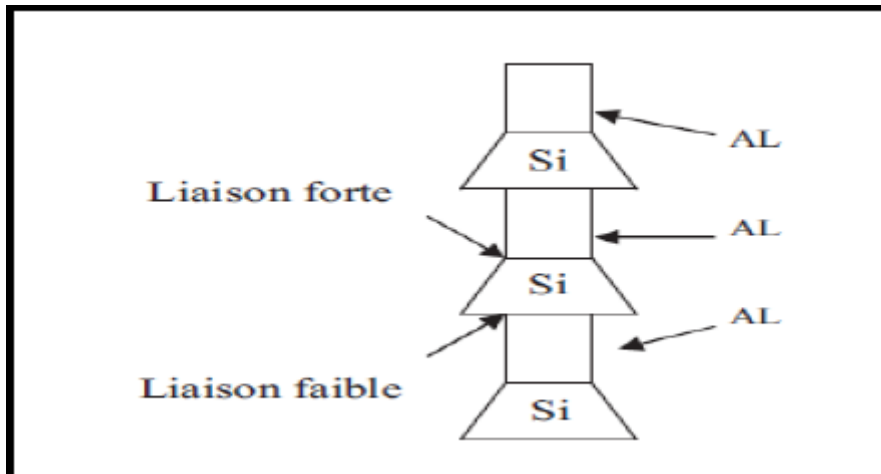


Figure 3: Structure de la kaolinite ( Oudni,2017).

- ✓ **Montmorillonite** : La montmorillonite est un minéral argileux important composé de deux feuillets de Silice et d'un feuillet d'Alumine (Gibbsite). Les feuillets en octaèdres se trouvent entre deux feuillets de Silice et les sommets des tétraèdres se confondent avec les hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former qu'une seule couche. Les sols qui contiennent de la montmorillonite peuvent être gonflants lorsque leur teneur en eau augmente, les pressions de gonflements qui en résultent peuvent facilement causer des dommages aux structures légères et pavages (Fig.4)

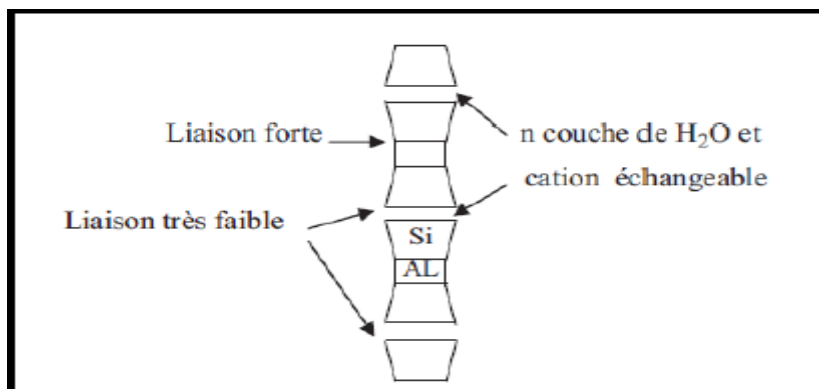


Figure 4 : Structure de la montmorillonite (Oudni, 2017)

- ✓ **Illite** : L'illite est une autre composante importante des sols argileux, elle a une structure analogue à la montmorillonite mais il y a des ions de potassium intercalés entre les feuillets tétraédriques. Grâce à ces ions la liaison est relativement forte et les molécules d'eau ne peuvent pratiquement plus s'intercaler. 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 (Fig.5)

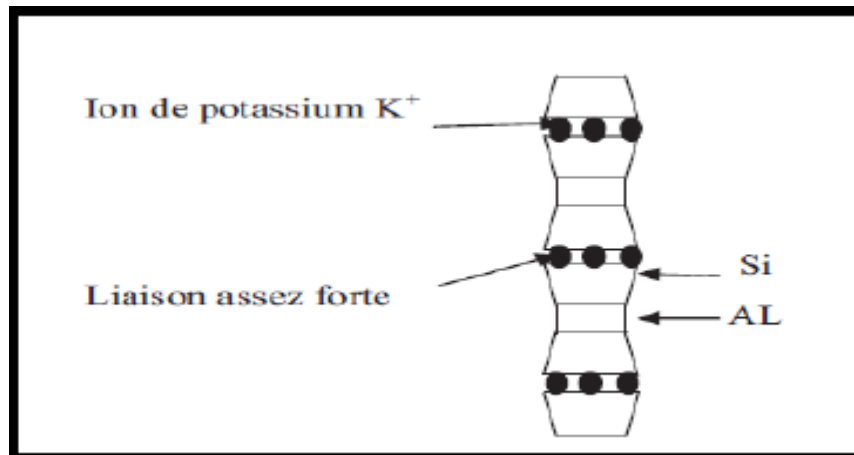


Figure 5 : Structure d'illite (Oudni, 2017).

Tableau 3: Caractéristiques de certaines familles d'argile (Oudni, 2017).

| Nom                        | Nombre de feuillets par particule | Diamètre d'une particule (µm) | Epaisseur d'une particule (µm) | Surface spécifique m <sup>2</sup> /g |
|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| Kaolinite                  | 100-200                           | 0.1-4                         | 1-10                           | 10-20                                |
| Illite                     | 1-10                              | 0.1-1                         | 0.003-0.01                     | 65-100                               |
| Montmorillonite (smectite) | 1                                 | 0.1                           | 0.001                          | 700-840                              |

## 4. Problèmes des sols argileux dans les projets routiers :

En Afrique, les problèmes de gonflement-retrait d'argile engendrent des dommages conséquents sur les structures comme dans le monde entier. En Algérie l'urbanisation de certains quartiers des villes et la construction des routes se heurtent aux problèmes que posent les phénomènes de gonflement, tassement, et de glissement.



### 4.1 Le gonflement :

Le gonflement est le terme utilisé pour dire que le volume du sol augmente lorsqu'il absorbe de l'eau. Ce phénomène est au moins partiellement réversible et un sol gonflant subit un retrait (une diminution de volume) quand sa teneur en eau diminue et peut être attribué au climat et à la surcharge. Les désordres subis par la chaussée se résument généralement à des fissures qui apparaissent à la fin de la saison sèche sur les accotements de la chaussée, en saison de pluie ces fissures permettent à l'eau de s'infiltrer plus facilement entraînant la saturation de ces zones et par conséquent leur gonflement, engendrant ainsi l'apparition de déformation à la surface de la chaussée, puis l'apparition de fissures longitudinales qui peuvent être assimilées à la chute de la portance dans les zones latérales de la chaussée entraînant l'affaissement des bords.

Ces phénomènes sont accélérés par le flux routier. Ces désordres s'amplifient avec le début de la saison sèche.



**Figure 6:** Fissuration longitudinale de routes due au retrait et gonflement des sols (Amoura et Maameri 2014)

### 4.2 Le tassement :

Le tassement se traduit par une diminution de la porosité, c'est-à-dire de l'espace disponible entre les particules du sol et la diminution de volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes, argiles) sous l'effet de charges appliquées et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation.



**Figure 7:** Tassement en bordure d'une route (Amoura et Maameri 2014)

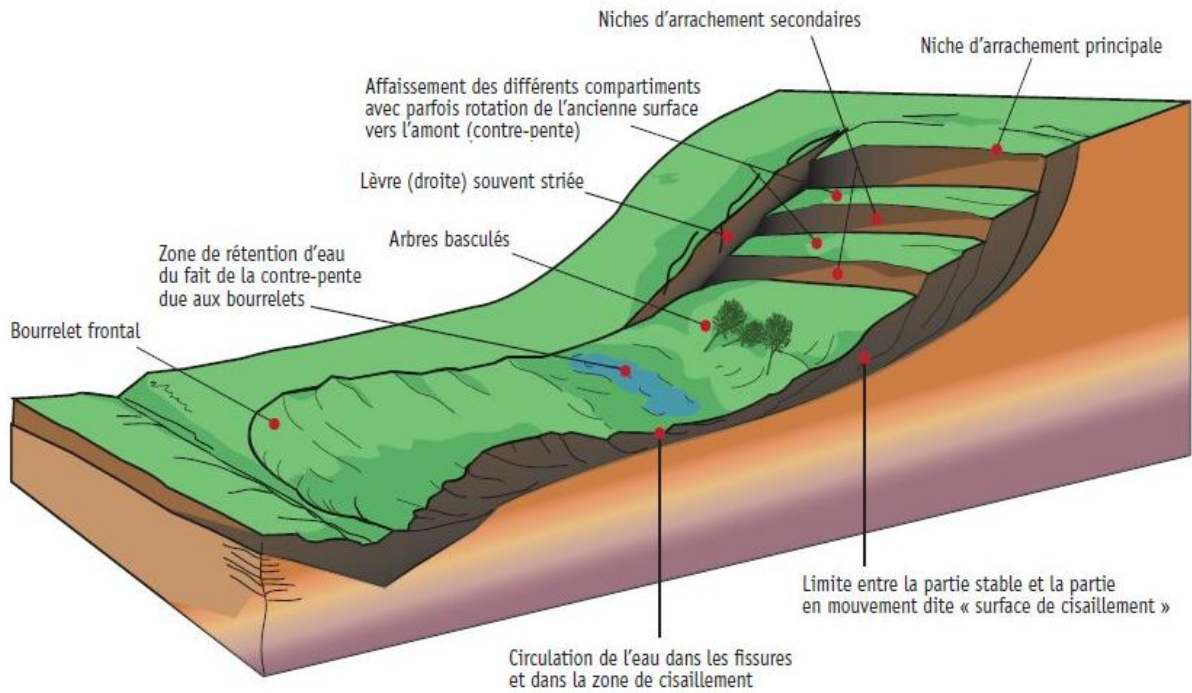
### 4.3 Glissements :

Les glissements de terrain sont des phénomènes naturels (des risques naturels les plus présents) ils affectent toutes les régions du monde, causant chaque année d'énormes dégâts tant en vies humaines qu'en dommages matériels. Ils affectent aussi bien des pentes naturelles que des ouvrages anthropiques comme les digues, barrages ou remblais.

Les types de mouvements, les causes, le rôle de l'eau et les méthodes de stabilisation sont exposés.

Ils sont des mouvements gravitaires d'une masse de sol dont le volume peut aller de quelques dizaines de m<sup>3</sup> à plusieurs dizaines de millions de m<sup>3</sup>. L'épaisseur du glissement peut varier de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres tandis que leur surface peut atteindre quelques km<sup>2</sup>. Il y a donc une extrême variabilité de glissements depuis celui qui peut entraîner une fermeture d'une route à celui qui modifie complètement la topographie d'un site. Ces glissements peuvent être terrestres ou sous-marins.

L'eau joue un rôle important dans le déplacement des matériaux. et parfois, dans certains grands glissements, on peut même trouver des habitations qui vont se déplacer au cœur du glissement quasiment sans subir de dégâts.



**Figure 8 :** Schéma en coupe d'un glissement de terrain.



**Figure 9 :** route coupée à Bouzaréah après un glissement de terrain (Amoura et Maameri 2014).

### 5. Composition d'une structure de chaussée

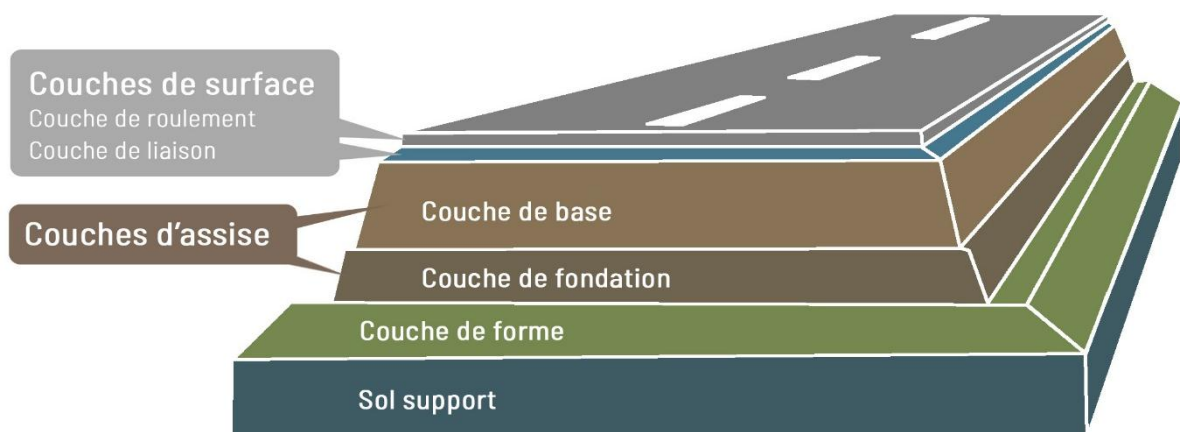
La chaussée est la partie renforcée et affectée à la circulation des véhicules. Pour subir directement les actions des véhicules et les facteurs naturels, sa largeur dépend essentiellement de considération de débit, elle est divisée en voies de circulations.

#### 5.1. Dimensionnement de la chaussée :

Une étude routière ne se limite pas en un bon tracé en plan et d'un bon profil en long, en effet, une fois réalisée, elle devra résister aux agressions des agents extérieurs et à la surcharge d'exploitation : action des essieux des véhicules lourds, effets des gradients thermiques, pluie, neige, verglas,...etc. Pour cela il faudra non seulement assurer à la route de bonnes caractéristiques géométriques mais aussi de bonnes caractéristiques mécaniques lui permettant de résister à toutes ces charges pendant sa durée de vie (Djelti et al., 2009)

#### 5.2. Les différentes couches :

Vue leur rôle, les chaussées se présentent comme des structures multicouches dont les épaisseurs doivent être suffisantes de manière à supporter sans dégradation la pression verticale transmise au sol. Comme la pression dans la couche granulaire décroît régulièrement en profondeur, on peut constituer une chaussée par la superposition de couche de caractéristiques mécaniques croissantes. En général, on rencontre les couches suivantes à partir du sol support (Chebrak, 2012). ( Fig 11) :



**Figure 10 :** Coupe type d'une structure de chaussée et terminologie des différentes couches (LCPC, Setra , 2000).

### a) Sol support :

Il est généralement surmonté d'une couche de forme pour former un ensemble appelé plate-forme support de chaussée. Cette dernière sert, comme son nom l'indique, de support au corps de chaussée.

### b) Couche de forme :

La couche de forme est un élément de transition qu'on introduit entre le sol support et la couche de sol afin d'améliorer et d'uniformiser la portance du sol. Cette couche, ne fait pas partie intégrante de la chaussée, elle est constituée soit de matériaux grenus roulés ou concassés, soit de matériaux traités au liant hydrauliques.

Elle a plusieurs fonctions :

- Lors des travaux elle protège le sol support, contribue au nivellement et permet la circulation des engins de chantier;
- Elle permet de rendre plus homogènes les caractéristiques du sol tassé et de protéger ce dernier du gel.

### c) Les couches d'assise :

L'assise de chaussée se décompose en deux sous-couches : La couche de fondation, surmonté de la couche de base.

- **Couche de fondation** : Elle est constituée de gravier concassé 0/40 mm d'une épaisseur de 20 cm. Elle répartit la pression sur le support, afin de maintenir les déformations.
- **Couche de base** : Elle est constituée de gravier 0/25 mm et bitume elle est d'une épaisseur de 20 cm, cette couche supporte exactement l'action des véhicules à l'intérieur de laquelle la pression élevée s'atténue avant d'être transmise à la couche de fondation.

### d) La couche de surface :

A son tour la couche de surface a généralement une structure bicouche :

- **La couche de roulement** : C'est la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat ;
- **La couche de liaison** : l'apport structurel de cette couche est secondaire sauf les chaussées à assise granulaire dont la couche de surface est la seule couche liée

### 5.3 Les différents types de chaussée :

#### a. Les chaussées souples :

Ce sont les structures dites traditionnelles composées d'une couche bitumineuse (BB) mince (< 15 cm) pour la couche de roulement, et d'un corps de chaussée, assise, constitué d'une ou plusieurs couches de grave non traité (GNT). L'épaisseur globale de la chaussée est comprise entre 30 et 60 cm. Figure (11) (Barabet, 2012)



Figure 11 : Chaussée souple. (LCPC, SETRA, Bagnex, 1998).

#### b. Les chaussées bitumineuses épaisses :

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

#### c. Les chaussées mixtes :

Elles sont composées d'une couche de roulement et d'une couche de base en matériaux bitumineux sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. Le rapport  $K$  de l'épaisseur des matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée est de l'ordre de 0,5. Ces structures allient le comportement des deux types de matériaux et limite la vitesse de remontée des fissures (Barabet, 2012).

#### d. Les chaussées semi-rigides :

Ce sont les chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques. Elles comportent une couche de surface bitumineuse et une ou deux couches d'assise en matériaux traités au liant hydraulique (MTLH) dont l'épaisseur est de 20 à 50 cm (Barabet, 2012).

#### e. Les chaussées à structure inverse :

Leur structure est composée de couches bitumineuses (surface et une couche d'assise) sur une couche de GNT (de 10 à 12 cm d'épaisseur) reposant sur une couche de fondation en MTLH. L'interposition d'une couche granulaire (absente de la structure mixte comportant

également une couche de matériaux traités au liant hydrocarboné et une couche de MTLH) permet de réduire efficacement la vitesse de remontée des fissures. Cette structure est une configuration utilisée pour les chaussées autoroutières (Barabet, 2012).

### f. Les chaussées rigides (en béton de ciment) :

Ces chaussées comportent une couche de base de roulement en béton de ciment de plus de 12 cm. La couche de béton repose sur une couche de fondation qui est soit en MTLH, soit en béton maigre, soit une couche drainant (GNT ou autre) ; soit elle repose directement sur le support de chaussée avec interposition d'une couche bitumineuse d'assise (environ 5 cm). La structure est constituée de dalles goudonnées (prise en compte des joints et bords de dalles dans le dimensionnement), ou de béton armé continu. (Fig12) (Barabet, 2012).



Figure 12 : Chaussée rigide (Barabet, 2012).

## Partie 2 : Traitement chimique à la chaux

La méthode d'amélioration chimique des sols par addition de la chaux, et d'autres ajouts cimentaires reste la plus utilisée et la moins onéreuse. Cette technique s'est développée très rapidement à travers le monde et qui est encore menée à connaître une importante croissance. Aisée à mettre en œuvre, économique et efficace.

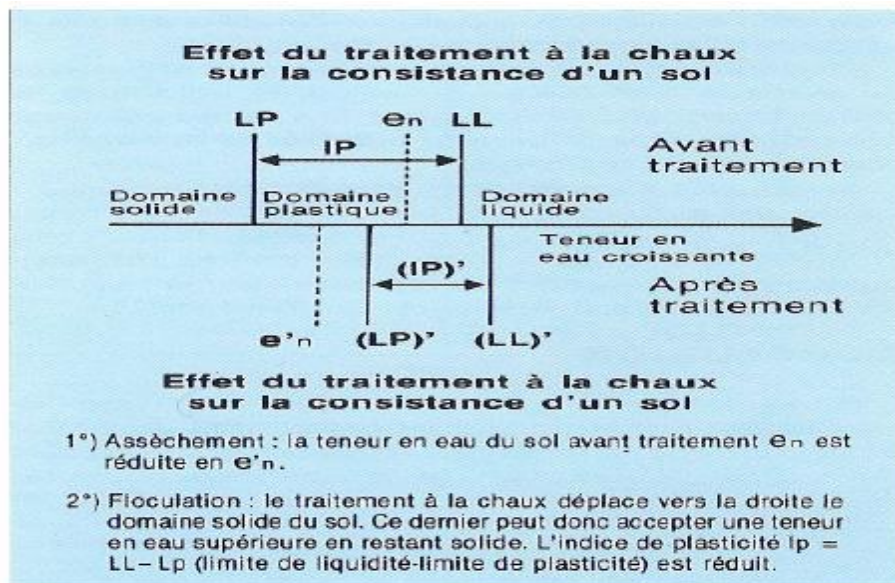
Deux types de chaux sont successivement utilisés dans la technique de traitement. Il s'agit de la chaux vive et la chaux résiduaire (des déchets industriels)

## 1 .Utilisation de la chaux :

L'utilisation de la chaux pour stabiliser les argiles a connu beaucoup de succès. En effet, plusieurs études ont démontré que les propriétés mécaniques. D'un sol traité à la chaux peuvent être modifiées de façon permanente. L'utilisation de la chaux se fait par l'addition des produits calcaires calcinés de monoxyde de calcium (chaux vive, CaO) ou d'hydroxyde de calcium (chaux hydratée, Ca(OH)). La chaux est plus efficace aux sols argileux que les sols granulaires.

## 2 . Comportement des sols traités à la chaux :

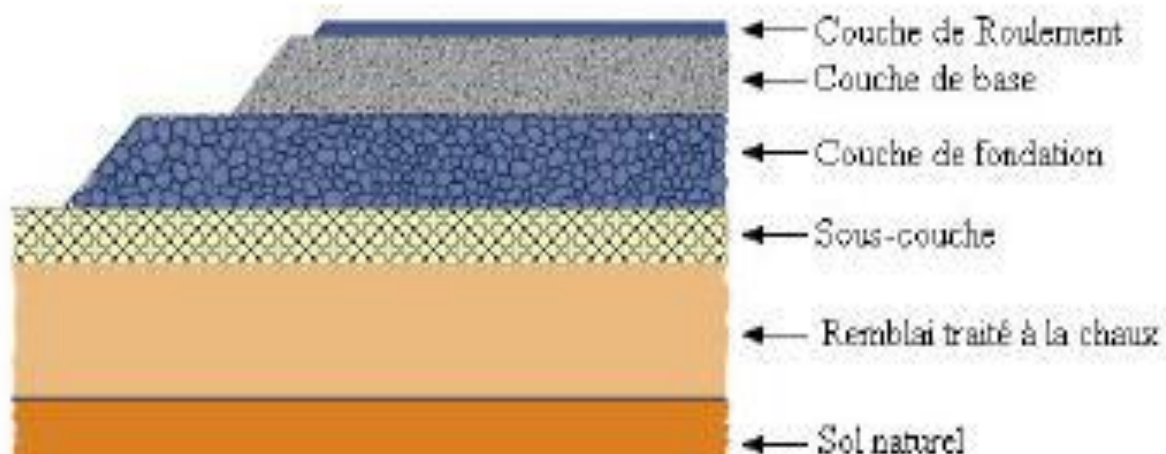
L'ajout de la chaux provoque une modification physico-chimique importante du sol, ainsi il corrige ses défauts et améliore ses qualités, par une diminution de l'indice de plasticité ( $I_p$ ), une augmentation de l'Indice portant, et produit un aplatissement de la courbe Proctor Normal avec une diminution de la densité de l'optimum Proctor et augmentation de la teneur en eau optimale. La chaux élève, donc, la contrainte au cisaillement et transforme les caractéristiques de compactage du matériau, (Fig 13).



**Figure 13 :** modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de la chaux vive (Ninouh, et Rouili )

Le traitement à la chaux améliore, durablement, la portance des sols ainsi que leur résistance, donc il permet de réduire l'épaisseur totale d'un corps de chaussée, figure, et aussi de réduire l'achat et le transport de matériaux supplémentaires.





**Figure 14:** Coupe transversale de la route (Ninouh ,et Rouili ).

### **3 . La chaux :**

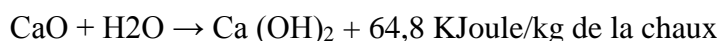
La chaux est un produit naturel et biologique, qui respecte l'environnement. La chaux est une matière, généralement, poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elle est utilisée depuis l'antiquité, notamment dans la construction. Elle trouve une place privilégiée dans le secteur du bâtiment et dans les matériaux de construction. La chaux intervient à différents stades du traitement des sols, et sa qualité a une influence directe sur l'efficacité du traitement des sols. Certaines propriétés de la chaux présentent des avantages particuliers pour les traitements de sols :

#### **a- Basicité :**

La chaux est fortement basique ; les solutions présentent un PH supérieur à 12 (réduire le degré d'acidité du sol).

#### **b- Hydratation :**

La chaux vive est très avide d'eau. En s'hydratant, elle s'éteint avec un fort dégagement de chaleur selon la réaction chimique suivante :



Cette propriété est utilisée pour assécher des sols très imprégnés d'eau.

#### **c- Flocculation :**

Le phénomène de flocculation s'explique par la formation de ponts  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ou  $\text{CaOH}^+$  entre les feuillets d'argile, ce qui modifie la consistance du milieu et le fait de passer d'un état

plastique à une structure grumeleuse stable ce qui permet un bon compactage (ou une bonne consolidation). La chaux utilisée dans cette étude est une chaux fabriquée à l'unité d'Oum Djérane (wilaya de Saida) affiliée au groupe ERCO (Entreprise des Ciments et Dérivés de l'Ouest) à l'ouest Algérien. Le tableau 4 donne les caractéristiques chimiques et physiques de la chaux utilisé dans cette étude.

**Tableau 4** : Caractéristiques physico-chimiques de la chaux utilisée (Ninouh et Rouili)

| Caractéristiques de base                             | La fiche technique de la chaux |
|--|--------------------------------|
| Apparence physique                                   | Poudre blanche sèche           |
| Oxyde de calcium CaO (%)                             | > 73.3                         |
| Oxyde de magnésium MgO (%)                           | < 0.5                          |
| Oxyde de fer Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)      | < 2                            |
| Oxyde d'aluminium Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | < 1.5                          |
| Dioxyde de silicium SiO <sub>2</sub> (%)             | < 2.5                          |
| Trioxyde de soufre SO <sub>3</sub> (%)               | < 0.5                          |
| Oxyde de sodium Na <sub>2</sub> O (%)                | 0.4-0.5                        |
| Dioxyde de carbone CO <sub>2</sub> (%)               | < 5                            |
| Carbonate de calcium CaCO <sub>3</sub> (%)           | < 10                           |
| Densité spécifique (g/cm <sup>3</sup> )              | 2                              |
| Plus de 90 µm (%)                                    | < 10                           |
| Plus de 630 µm (%)                                   | 0                              |
| Matériau insoluble (%)                               | < 1                            |
| Densité apparente (g/l)                              | 600-900                        |

### 3.1 Les réactions argile - chaux :

La chaux doit être suffisamment fine afin de réagir rapidement avec le sol (Cette caractéristique est garantie avec une granulométrie de 0-2mm). Lors du traitement des sols argileux à la chaux deux importantes réactions se produisent simultanément :

### a. Une réaction d'hydratation, fortement exothermique :

De la chaux vive avec l'eau présente dans les sols en diminuant la teneur en eau de ceux-ci. Cette réaction dégage de la chaleur, ce qui réchauffe le sol et entraîne l'évaporation de l'eau. La chaux hydratée peut, alors, réagir avec les minéraux argileux, provoquant une floculation des argiles.

### b. Une deuxième réaction lente :

Qui durcit progressivement le mélange sol-chaux compacté, responsable des effets à long terme (stabilisation du sol).

La chaux augmente le PH du sol, ce qui libère les silicates et les aluminates. Ces derniers peuvent, alors, réagir avec le calcium apporté par la chaux et l'eau présente dans le sol. Dès ce moment débute le durcissement du sol. Alors, la portance du sol, dépend de la nature et de la réactivité des minéraux argileux présents dans le sol à traité, ainsi que de la quantité de chaux ajoutée.

### 3.2. Fabrication :

La fabrication de la chaux consiste à cuire des carbonates de calcium et/ou de magnésium pour libérer le dioxyde de carbone et obtenir l'oxyde dérivé ( $\text{CaCO}_3 + \text{chaleur} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ).

L'oxyde de calcium produit par le four est habituellement concassé, broyé et/ou tamisé avant d'être transporté vers le stockage en silo. Du silo, la chaux cuite est soit livrée au client final pour utilisation sous forme de chaux vive, soit transférée dans une installation d'hydratation où elle est mise à réagir avec de l'eau pour produire la chaux éteinte.



La chaux aérienne peut durcir lentement (décarbonatation) sous l'action du  $\text{CO}_2$  atmosphérique (cette qualité de prise à l'air est à la base de la qualification de chaux aérienne).

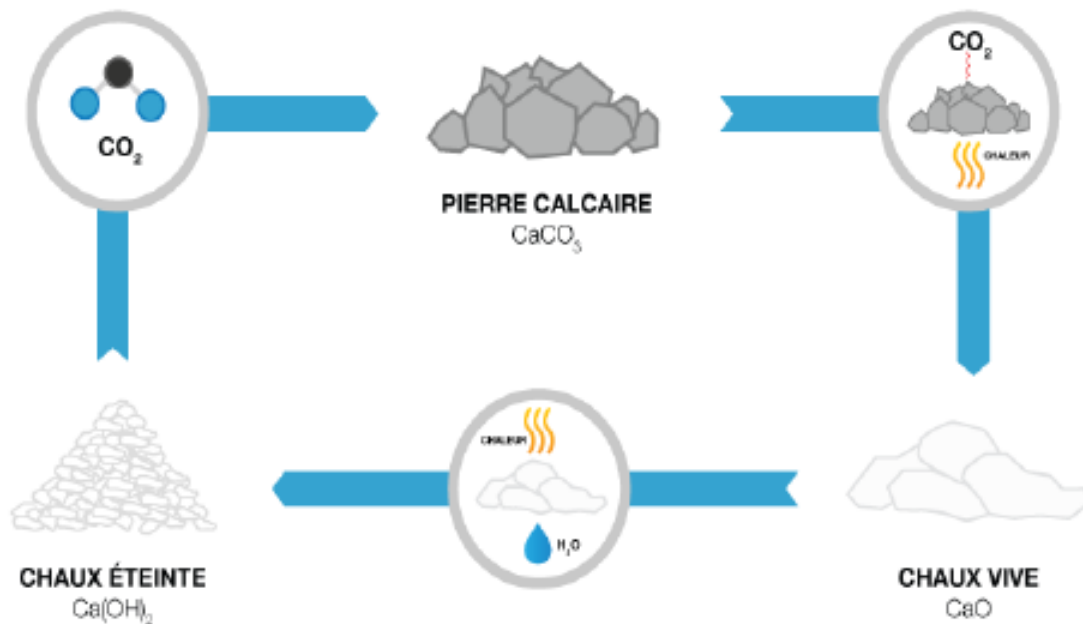


Figure 15 : Cycle de fabrication de la chaux ( Oudni, 2017).

### 3.3 Les différents types de chaux aériennes :

La chaux aérienne peut exister sous les trois formes suivantes:

- **Chaux vive** : Elle est principalement constituée d'oxyde de calcium  $\text{CaO}$  (en général à plus de 90 %).
- **Chaux éteinte** (ou hydratée): Elle est principalement constituée d'hydroxyde de calcium  $\text{Ca(OH)}_2$ . Elle est fabriquée par hydratation (extinction) de la chaux vive.
- **Lait de chaux**: Le lait de chaux est obtenu par mise en suspension de chaux éteinte dans de l'eau. La concentration varie entre 300 et 400 g de chaux éteinte par litre de lait. Le lait de chaux peut également être préparé à partir de chaux vive, mais des précautions particulières sont à prendre en raison de l'exothermicité de la réaction d'hydratation de l'oxyde de calcium. Son emploi en traitement de sols présente l'avantage de supprimer la poussière et d'humidifier les sols secs (alors que la chaux vive achève au contraire de les dessécher).

Les chaux utilisées en technique routière sont essentiellement les chaux aériennes.

Elles se présentent sous deux formes : **Chaux vive** et **Chaux éteinte**.

**Tableau 5:** Les différentes caractéristiques de la chaux (Oudni,2017).

|                                   | <b>Chaux vive</b> | <b>Chaux éteinte.</b> |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------------|
| <b>Teneur en chaux libre</b>      | > 80 %            | > 50 %                |
| <b>Finesse (passant à 0.08mm)</b> | > 50 %            | > 90 %                |
| <b>Réactivité</b>                 | T > 60° en 25°C   | /                     |

### 4 . La chaux résiduaire :

A L'objectif de valoriser la chaux résiduaire rejetée par l'usine de fabrication d'acétylène, l'Entreprise Nationale des Gaz industriels (ENGI), sise à Annaba. Très soucieux de ce problème, la valorisation de ce rebut chimique demeure une opération fastidieuse et complexe. Devant son importance, sa quantité déversée dans la nature et sa nuisibilité à l'environnement, ce résidu peut se révéler être un véritable problème.



**Figure 16 :** l'eau de chaux déchargée dans l'environnement.

L'Entreprise Nationale des Gaz Industriels (E.N.G.I.) produit de l'acétylène à partir de la réaction du carbure de calcium avec l'eau. Ce procédé conduit nécessairement à la production en parallèle de la chaux sous forme de lait de chaux. Après décantation, une partie de l'eau contenue dans ce lait de chaux est recyclée, et la bouillie de chaux produite est déchargée dans l'environnement (Ramasamy *et al.*, 2002 ; Cardoso *et al.*, 2009 ; MSDS, 1999 ; Hologado *et al.*, 1992 ). Ce rejet, très alcalin, a conduit à des catastrophes affectant le sol, l'eau, la faune et la flore (Ramasamy *et al.*, 2002 ; Cardoso *et al.*, 2009 ; Al-Khaja *et al.*, 1992 ; MSDS, 2000).



Figure 17 : Dépôt de la chaux résiduaire de l'usine d'El Hadjar (Annaba).

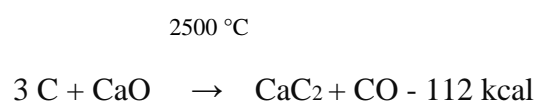
### 4.1 Préparation du carbure de calcium :

Le carbure de calcium est un produit manufacturé obtenu par la fusion, sous l'arc électrique, de chaux vive et de coke.



Figure 18 : Le carbure de calcium.

La réduction de la chaux par le coke donne naissance au carbure de calcium et au monoxyde de carbone suivant la réaction :



La chaux vive est fabriquée par décomposition du calcaire dans des fours à chaux. Le calcaire utilisé doit contenir le moins possible de sulfure et de phosphore de calcium.

Ces impuretés se retrouvent par la suite dans le carbure de calcium (Couturier, 1986 ; Desportes, 1972 ; Prévost, 1968).

Le coke métallurgique utilisé pour la fabrication du carbure de calcium doit comporter le minimum de cendres (moins de 7 %) pour limiter au maximum la formation d'impuretés (Whittington, 1996). La composition et les caractéristiques du carbure de calcium sont présentées dans le tableau 6.

**Tableau 6 :** Composition et caractéristiques du carbure de calcium (ENGI).

|                                       |                                       |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Formule chimique</b>               | <b>CaC<sub>2</sub></b>                |
| <b>Poids moléculaire</b>              | <b>64,10</b>                          |
| <b>Composition CaC<sub>2</sub></b>    | <b>78 / 82 %</b>                      |
| <b>Composition CaO</b>                | <b>14 / 20 %</b>                      |
| <b>Densité réelle</b>                 | <b>2,2</b>                            |
| <b>Densité apparente</b>              | <b>1,1 / 1,2</b>                      |
| <b>Teneur en hydrogène phosphoré</b>  | <b>0,06 % en volume</b>               |
| <b>Teneur en ferro-silicium</b>       | <b>1 % en masse</b>                   |
| <b>Granulométrie</b>                  | <b>25 / 50 mm</b>                     |
| <b>Dégagement minimum d'acétylène</b> | <b>300 L/kg (à 700 mm Hg et 15°C)</b> |

#### 4.2 Description du procédé :

- L'installation destinée à la production d'acétylène, comprend trois sections : le générateur, le traitement de l'acétylène et le recyclage de l'eau de process.
- Le carbure de calcium commercial de granulométrie 25/50 mm est introduit dans le générateur par l'intermédiaire d'une vis sans fin.
- Au contact de l'eau, le carbure de calcium se décompose en acétylène et en hydroxyde de calcium.
- L'acétylène qui se dégage passe vers la section de traitement d'acétylène.

Et l'hydroxyde de calcium qui provient du générateur, appelé lait de chaux, est purgé en permanence et stocké dans une fosse de décantation.

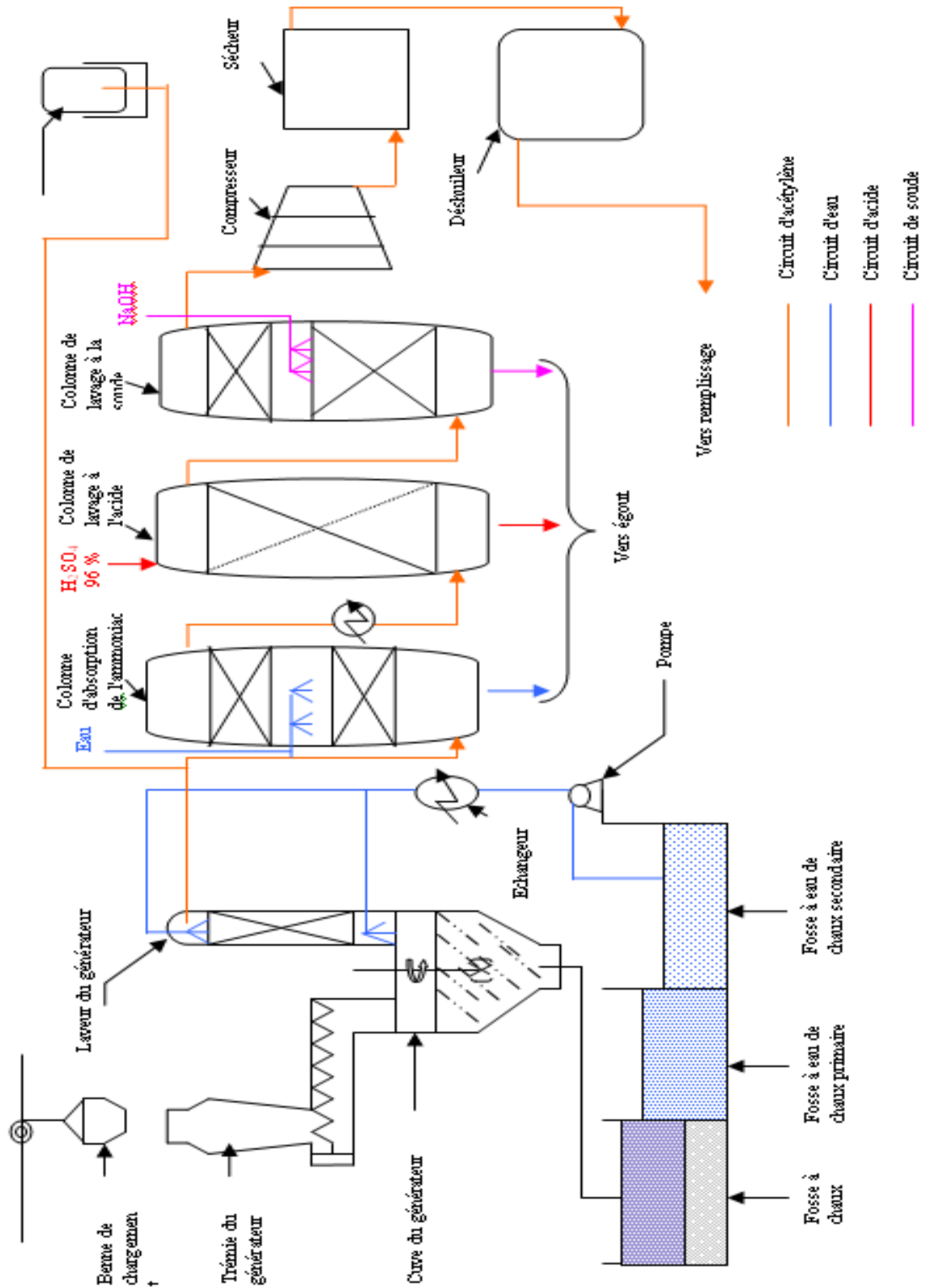


Figure 19 : Schéma du procédé de fabrication de l'acétylène.



### 4.3. Récupération de l'eau du lait de chaux :

L'hydroxyde de calcium qui provient du générateur, appelé lait de chaux, est purgé en permanence et stocké dans une fosse de décantation (Figure 20). L'eau de chaux issue du débordement de la fosse de décantation est stockée dans des fosses à eau de chaux (Walter et Ullmann, 1953 ; Scott et Wood, 2002 ; Ramasamy *et al.*, 2002 ; Cardoso *et al.*, 2009). Cette eau est réutilisée dans le procédé pour la production et le lavage de l'acétylène à un débit de  $3,1 \text{ m}^3/\text{h}$  et une température de  $30^\circ\text{C}$  (Al-Khaja *et al.*, 1992 ; ENGI).

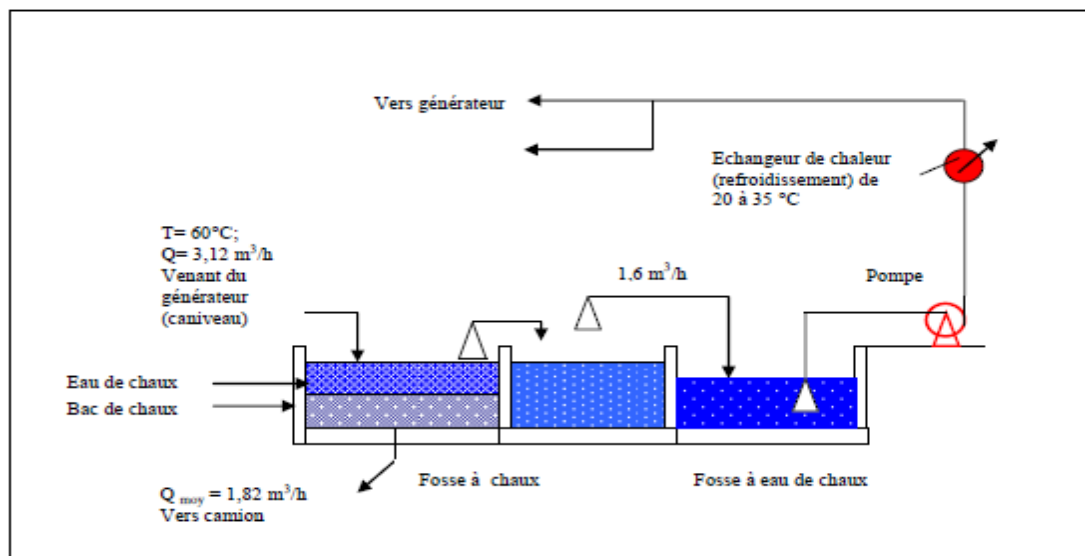


Figure 20 : Schéma de principe de récupération de l'eau de chaux (ENGI).

### Conclusion :

Les travaux de construction des remblais et des couches de formes représentent une part importante du coût global de réalisation des projets routiers.

Cette importance justifie une recherche d'optimisation globale, visant à minimiser les coûts. On a donc intérêt à privilégier les performances des remblais et de la couche de forme des structures routières, en sol argileux, par la technique de traitement des sols à la chaux. Elle permet surtout d'éviter de lourds travaux de terrassement destinés à rejeter les sols inadéquats et à faire appel à des matériaux d'emprunt de bonne qualité.

L'ajout de la chaux présente de nombreux avantages, notamment : l'économie d'énergie (traitement à froid), l'économie de transport de matériaux (travail in situ), l'économie en granulats d'apports (préservation de l'environnement), et l'économie sur le coût total des projets routiers.



---

## **Chapitre II : Techniques Expérimentales**

---



### **Introduction :**

Pour décider de la pertinence d'un traitement de sol, il faut le reconnaître et en prélever des échantillons représentatifs. L'étude préalable de ces échantillons en laboratoire portera sur l'état et les caractéristiques des sols à traiter.

### **1. Programme des essais au laboratoire :**

La procédure suivie pour notre étude expérimentale de traitement des sols à la chaux est essentiellement basée de quatre étapes principales suivantes :

1. Évaluation des échantillons du sol à l'état naturelle :

- Teneur en eau naturelle ;
- Identification par analyse granulométrique ;
- Limites d'Atterberg ;
- Valeur de bleu du sol.

2. Détermination des caractéristiques de l'optimum Proctor et des valeurs CBR immédiat.

3. Détermination de la composition chimique des sols étudiés.

4. Détermination de l'évolution de la résistance des sols traités par essais de compression simple et traction indirecte (essai brésilien).

### **2. Caractérisation géotechnique des sols :**

Dans cette étude, différents essais ont été effectués pour :

- Identifier les échantillons du sol naturel ;
- Evaluer le comportement des sols après traitement à la chaux.

#### **2.1 Détermination de la teneur en eau (NF P 94-050) :**

##### **a) Principe :**

La perte d'eau d'un échantillon de matériau est provoquée par étuvage. Les masses de l'échantillon et de l'eau évaporée sont mesurées par pesage.

##### **b) Méthode de calcul :**

La teneur en eau est déterminée par la formule suivante :

$$W (\%) = [(p_h - P_s) / P_s] \times 100$$

Avec:

- **W** : teneur en eau naturelle en (%) ;
- **Ph** : poids du sol humide en (g) ;
- **Ps** : poids du sol sec en (g).

### 2.2 Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056) :

#### a) But de l'essai :

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes tailles dans le sol. Elle s'effectue par tamisage (tamis à maille carrée) pour les grains de diamètre supérieur à  $80\mu\text{m}$ .

#### b) Principe :

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

Les masses des différents refus ou celles des différents tamisats sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

#### c) Appareillage et exécution de l'essai :

- **Appareillage:**

Une série de tamis dont les diamètres varient comme suit : 31.5 - 20 - 16 - 10 - 6.3 - 5 - 3,15 - 2 - 1,25 - 1 - 0,08 - (mm) et un fond, étuve, balance.



Figure 21: balance



Figure 22: Etuve



Figure 23: Colonne des tamis

- **Préparation d'échantillon**

Placer le matériau à tester à l'étuve à une température maximale de 105°C, pendant 24 heures. Après refroidissement, peser la prise d'essai. Le tamisage à sec peut alors être réalisé.

- **Tamisage**

- ✓ Verser le matériau séché dans la colonne de tamis. Cette colonne est constituée par l'empilement des tamis, en les classant de haut en bas dans l'ordre de mailles décroissantes.
- ✓ Agiter manuellement ou mécaniquement cette colonne, puis reprendre les tamis un à un, en commençant par celui qui a la plus grande ouverture en adaptant un fond et un couvercle, on agite chaque tamis en donnant à la main des coups réguliers sur la monture, d'une manière générale, on peut considérer qu'un tamisage est terminé lorsque le refus sur un tamis ne se modifie pas de plus de 1 % en une minute de tamisage.
- ✓ Verser le tamisât recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur.

- **Peser les refus**

- ✓ Peser le refus du tamis 1 soit « R1 » ; la masse de ce refus ayant la plus grande maille.
- ✓ On poursuit la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés...

### d) Expression des résultats

- **Calcul**

Les masses des différents refus cumulés « Ri », sont rapportées à la masse totale calculée de l'échantillon pour essai sec « Ms » et Les pourcentages des tamisât correspondants sont égaux à

$$100 - \left( \frac{R_i}{M_s} \times 100 \right) \dots \text{en}\%$$

- **Résultats**

- ✓ Les pourcentages des tamisât cumulés ou ceux des refus peuvent être présentés soit sous forme de tableaux (exploitation statistique), soit le plus souvent sous forme de courbe.

- **Tracé de la courbe granulométrique**

- ✓ Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisât ou des différents refus cumulés sur la feuille de papier semi-logarithmique.

- En abscisse : les dimensions des mailles, sur une échelle logarithmique
- En ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique.

### 2.3 Limites D'Atterberg (NF P 94-051) :

#### a) Principe :

L'essai s'effectue en deux phases sur la fraction 0/400  $\mu\text{m}$  d'un sol.

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés (Limite de liquidité WL);
- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimensions fixées et confectionné manuellement se fissure (Limite de plasticité WP).

#### b) But de l'essai :

Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état à l'aide de son indice de plasticité et de consistance.

La consistance d'un sol fin varie considérablement avec la teneur en eau. Son état va du solide s'il est desséché, à l'état liquide s'il est détrempe. Entre ces 2 états, il existe un état intermédiaire dit plastique (pâte à modeler) (Fig.24).

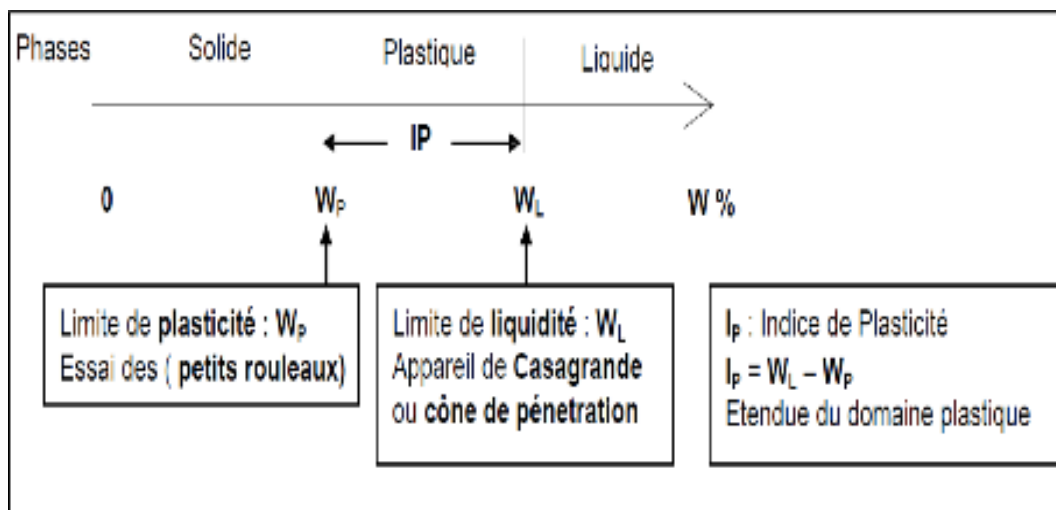


Figure 24 : Représentation des limites d'Atterberg.

La détermination des limites d'Atterberg permet de calculer :

**Indice de plasticité  $I_p$ :** Cet indice définit l'étendue du domaine plastique.

$$I_p = W_L - W_p$$

### c) Appareillage et exécution de l'essai :

- Pour la détermination de  $W_L$

#### Préparation de l'échantillon:

- ✓ Tamis à mailles carrées de 0.4 mm d'ouverture
- ✓ Bac de manutention (30\*20\*8cm) ;
- ✓ Récipient.

Appareil de Casagrande (NF P 94-051) (Fig.25), il est constitué d'une coupelle normalisée (coupelle lisse pour la majorité des essais et coupelle rugueuse pour les échantillons sableux qui ont tendance à glisser sur la surface de la coupelle lors de chaque choc), montée sur un support métallique avec manivelle, le tout étant fixé sur un socle en bois dur. L'ensemble permet de faire tomber la coupelle d'une hauteur de 10 mm sur le socle, chaque choc entraînant la fermeture progressive de la rainure pratiquée dans l'échantillon de sol jusqu'à sa fermeture d'une distance de 1 cm.



Figure 25 : Appareil de Casagrande et Outil à rainurer.

- Pour la détermination de WP

### Préparation de l'échantillon :

- ✓ Une plaque lisse en marbre pour le malaxage du sol et la confection des rouleaux de sol;
- ✓ Une plaque de verre et sa cale pour l'évaluation du diamètre du rouleau de sol (Fig.26);
- ✓ Des capsules ou boîtes de pétri, des spatules;
- ✓ Une balance de précision;
- ✓ Une étuve.

1. Après échantillonnage du sol et homogénéisation par brassage une masse de matériau (m) est mise à imbiber dans un récipient plein d'eau pendant 24 heures ;
2. Une fois imbibé, le matériau est tamisé par voie humide au tamis de 0.4 mm. L'eau de lavage et le tamisât sont recueillis dans un bac cet ensemble étant ensuite décanté pendant 12 heures ;
3. L'eau claire surnageant est siphonnée en prenant garde de ne pas entraîner de particules solides fines, l'eau excédentaire étant évaporée à l'étuve à 50°C jusqu'à obtenir un mortier mou. L'échantillon ainsi préparé doit contenir environ 300 g de particules solides

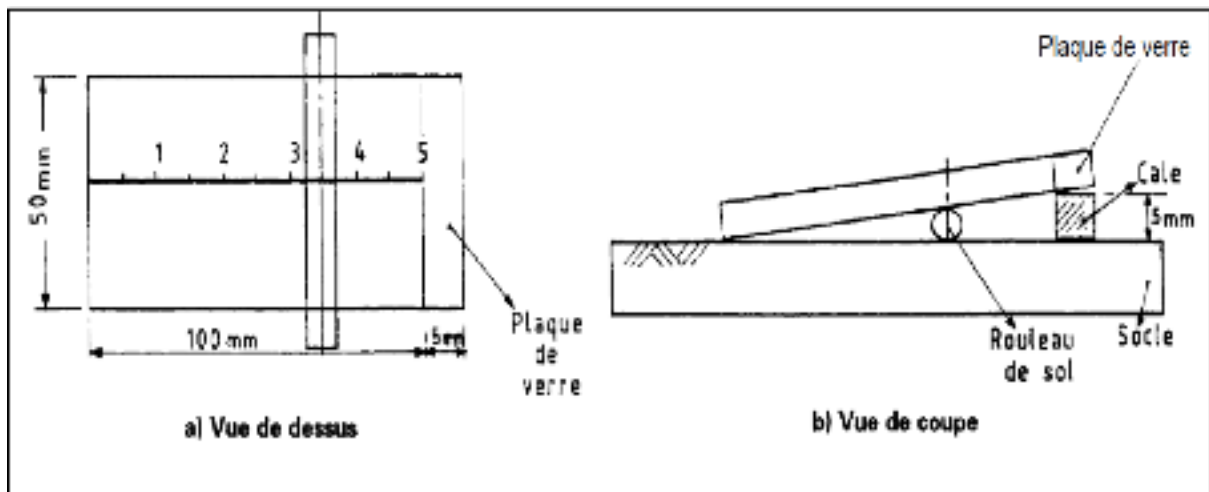


Figure 26 : Système d'évaluation du diamètre du rouleau de sol.





Figure 27 : Préparation de l'échantillon à tester.

- **Détermination de la limite de liquidité WL avec l'appareil de Casagrande**

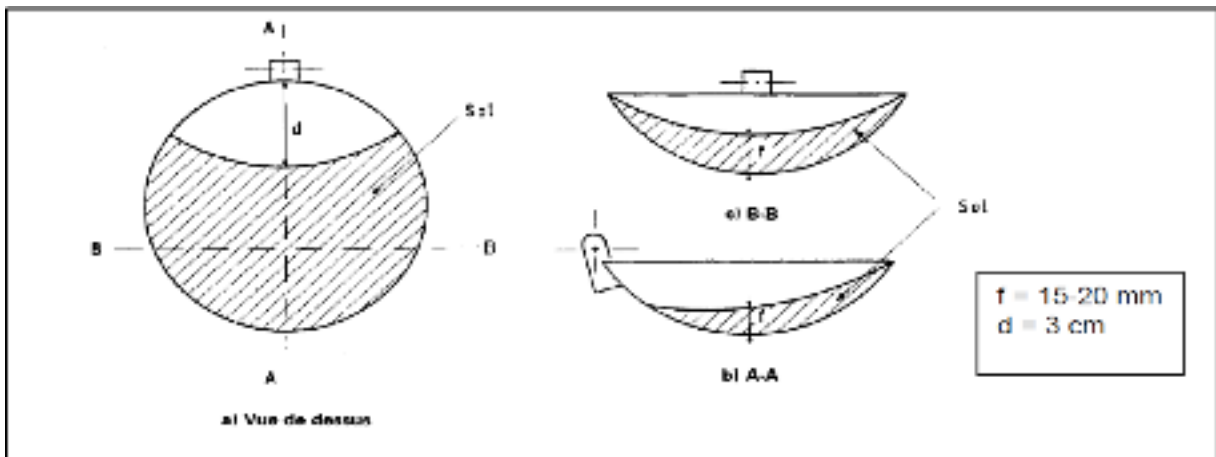


Figure 28 : Mise en place de l'échantillon dans la coupelle.

1. Faire une rainure dans l'axe de la coupelle à l'aide de l'outil à rainurer. L'outil étant sensiblement perpendiculaire à celle-ci (Fig.29).

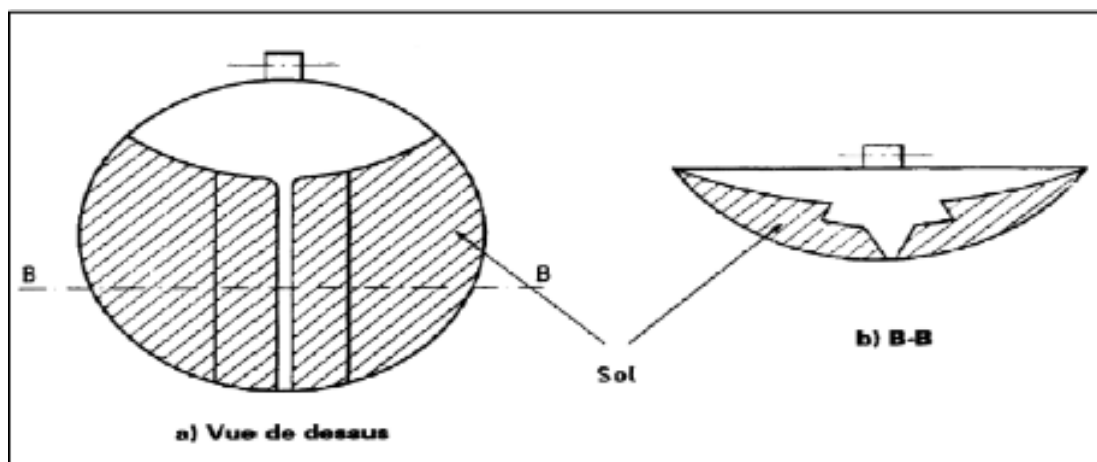


Figure 29 : Réalisation de la rainure.

2. Tourner la manivelle de manière très régulière, raison de deux chocs par seconde. On observe le fond de la rainure et on compte le nombre de chocs nécessaires pour que celle-ci referme sur 1cm environ (Fig30).

Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1cm de longueur en 25 chocs.

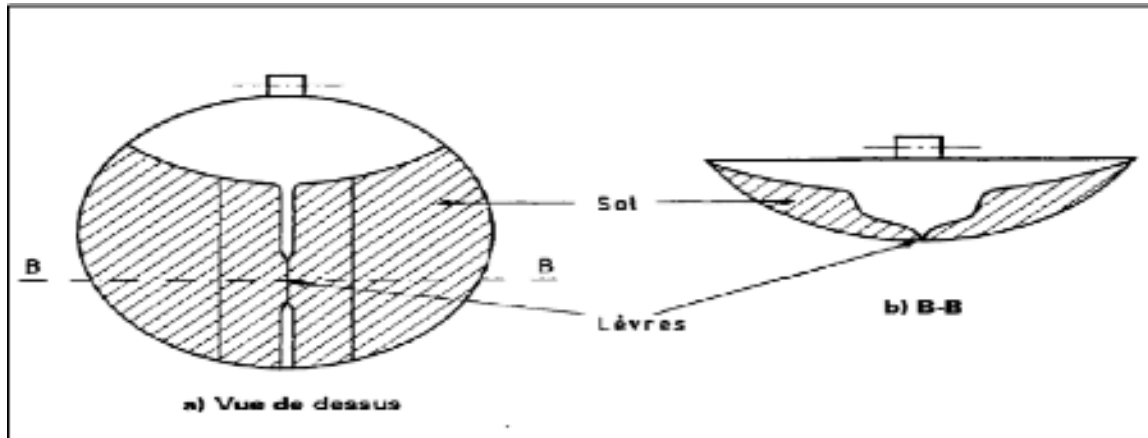


Figure 30 : Fermeture de la rainure.

3. Recommencer l'opération 4 à 5 fois avec des teneurs en eau décroissantes et telles que le nombre de chocs à chaque essai soit compris entre 15 et 35 :

- ✓ Si le nombre de chocs  $n$  a été inférieur à 15, laissé sécher un peu ;
- ✓ Si le nombre de chocs  $n$  est supérieur à 35, humidifier légèrement et bien homogénéiser le sol avant de reprendre l'essai ;
- ✓ Pour chaque essai tel que  $15 < n < 35$ , déterminer la teneur en eau  $W$ .

4. Prélever dans la coupelle, à l'aide d'une spatule une masse de chaque côté des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit où elles se sont refermées afin de déterminer la teneur en eau. Le prélèvement est placé dans une capsule de masse connue et pesé immédiatement avant d'être introduite dans l'étuve. L'opération complète est faite au moins quatre fois sur la même pate mais avec des teneurs en eau déférente.

#### d) Expression des résultats :

La limite de liquidité est déterminée à partir de la représentation graphique et la teneur en eau  $W$ , mesurée à chaque essai, en fonction du logarithme du nombre de coups correspondant. La limite liquidité est la teneur en eau lue sur le graphique pour  $N= 25$  coups. Elle s'exprime en pourcentage d'arrondi au nombre entier le plus proche.

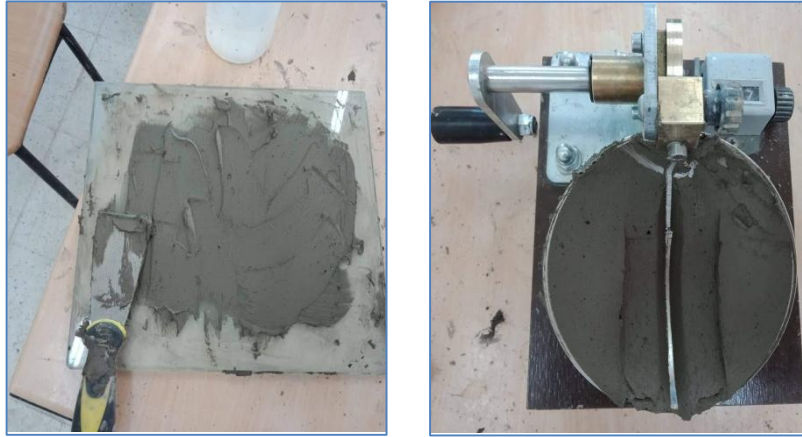


Figure 31 : Exécution de la limite de liquidité WL.

### • Détermination de la limite de plasticité $W_p$

À partir de la pâte préparée, former une boulette comme une noisette (environ 12 mm de diamètre) et en faire un cylindre en la roulant sur la plaque de marbre propre ; lisse et sèche Ceci se fait à la main, ou en utilisant une plaque plane, par un mouvement alternatif d'environ un aller et retour par seconde.

Par définition, la limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre qui se brise lorsque son diamètre atteint 3mm. Cette teneur en eau doit être déterminée immédiatement après le test selon la procédure décrite lors de la détermination de WL. Le cylindre terminé doit avoir 10 à 15 cm de longueur.

Dans la pratique, procéder ainsi:

- ✓ Confectionner le cylindre de 3 mm; S'il se brise avant d'atteindre ce diamètre le matériau est trop sec,
- ✓ Il faut alors le remodifier également;
- ✓ S'il ne s'est pas brisé. Le soulever en son milieu de 15 à 20mm. La limite de plasticité est atteinte si la rupture se produit pendant ce soulèvement. On effectue alors directement la mesure de la teneur en eau  $W$  sur le rouleau de sol ;
- ✓ Si la rupture ne se produit pas, laisser le teneur en eau diminuer. L'essai est effectué une deuxième fois. Les teneurs en eau obtenues ne devront pas s'écarter de plus de 2 % de la valeur moyenne, si non un nouvel essai est à effectuer.



Figure 32 : Préparation du rouleau pour la détermination de WP.

- **L'indice de plasticité IP**

Rappelons que:

$$I_p = W_L - W_p$$

Un sol, dont l'indice IP est grand, est très sensible aux conditions atmosphériques, car plus IP est grand plus le gonflement par humidification de la terre et son retrait par dessiccation seront importants.

### 2.4 Essai Proctor (NF P 94-093) :

#### a) But de l'essai :

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

#### b) Principe :

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, selon un processus bien défini, l'échantillon de sol à étudier et à mesurer sa teneur en eau et son poids spécifique sec après compactage.

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

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

- **L'essai Proctor Normale** : résistance souhaités relativement faible de type de remblai non ou peu chargé.

- **L'essai Proctor Modifié** : forte résistance souhaitée, du type chaussée autoroutière.

Le tableau ci-dessous résume les conditions de chaque essai selon le moule retenu (NF P 94-093).

**Tableau 7:** Conditions de chaque essai selon le moule retenu (NF P 94-093).

|                      | Masse de la dame (kg) | Hauteur de chute (cm) | Nombre de coups par couche | Nombre de couches | Energie de compactage KJ/m <sup>3</sup> |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------|---|
| <b>Essai Proctor</b> | Normale 2.490         | 30.50                 | 25 (moule Proctor)         | 3                 | 587                                     |
|                      |                       |                       | 55 (moule CBR)             | 3                 | 533                                     |
|                      | Modifié 4.540         | 45.70                 | 25 (moule Proctor)         | 5                 | 2680                                    |
|                      |                       |                       | 55 (moule CBR)             | 5                 | 2435                                    |

### c) Matériels nécessaires pour l'exécution de l'essai :

Moule Proctor normale, une dame Proctor normale;

- ✓ Une règle à araser ;
- ✓ Disque d'espacement ;
- ✓ Une éprouvette graduée, 150 ml environ ;
- ✓ Des bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau ;
- ✓ Une truelle, spatule, pinceau, burette à huile;
- ✓ Tamis 5 et 20 mm ;
- ✓ Petits récipients (mesures des teneurs en eau) ;
- ✓ Une balance portée, précision +5g ;
- ✓ Balance de précision 200g. précision (±) 0.1g ;
- ✓ Etuve 105°C (±) 5°C.

### d) Mode opératoire:

#### Préparation des échantillons soumis à l'essai

- **Quantité à prélever**

La réalisation de la courbe nécessitera au moins 5 essais (1 point (w ;  $\gamma_d$ ) par essai).

On prélèvera:

Moule Proctor : 15 kg.

Moule CBR : 30 Kg.

### • Préparation des éprouvettes

La totalité du matériau prélevé est, si nécessaire, séchée à l'air ou dans une étuve réglée à 50 °C maximum jusqu'à un état hydrique jugé suffisamment sec pour commencer l'essai.

Après séchage, le matériau est tamisé à 5 ou 20 mm et seul le tamisât est conservé pour l'exécution de l'essai.

Après imbibition, le matériau est homogénéisé et divisé par appréciation visuelle en trois ou cinq parts égales selon le l'essai Proctor choisis.



Figure 33 : sol sec concassé.



Figure 34 : Remplissage par 3 couches.

### b) Exécution de l'essai :

Le remplissage est fait en 3 couches. et pour l'essai Proctor modifié 5 couches.

Avant l'introduction du matériau dans le moule il y a lieu de :

Assembler: moule, embase+ disque de papier au fond du moule (facilité le démoulage) ;

- ✓ Peser l'ensemble;
- ✓ Adapter la rehausse;
- ✓ Introduire alors la première couche et la compacter avec la dame correspondante en appliquant respectivement 25coups ou 56coups par couche, et répéter l'opération autant de fois que l'exige le nombre de couches à réaliser ;
- ✓ Après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse, le matériau doit alors dépasser du moule d'une hauteur d'un centimètre au maximum ;
- ✓ Araser soigneusement à partir du centre ; on veillera, au cours de l'arasement à ne pas créer de trous sur la surface arasé ;
- ✓ Peser l'ensemble juste arasé ;

Prélever 2 prises représentatives sur l'échantillon pour en déterminer la teneur en eau;

La teneur en eau de moulage est alors déterminée avec l'excédent de matériau pré humidifié inutilisé dans la confection de l'éprouvette.

### e) Expression des résultats :

On trace la courbe  $\gamma_d = f(W)$  avec pour point de la courbe les coordonnées suivantes pour chaque point :

- **En abscisse** : teneur en eau (W)
- **En ordonnée** : densité sèche ( $\gamma_d$ )

Qui s'exprime:

$$\gamma_{dopm} = \frac{(Ph - Pm)}{(1+w)V_{moule}}$$

Avec:

**Ph**: poids totale humide;

**PM**: poids du moule vide.

## 2.5 Essai bleu de méthylène : (NBN EN 933-9 (1998)) :

### a) But de l'essai

L'essai au bleu de méthylène permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction Argileuse d'un sol en mesurant par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur la prise d'essai.

### b) Principe de l'essai :

L'essai au bleu de méthylène permet de déterminer la propreté d'un sol et de connaître le type de sol qu'il contient (sensibles à l'eau = gonflement).

L'essai consiste à mesurer la capacité d'absorption des particules successivement des doses élémentaires d'une solution de bleu de méthylène et on contrôle l'absorption du bleu après chaque ajout en effectuant une tâche sur un papier filtre.

### c). Mode opératoire :

- ✓ Prendre 100 g de sol sec passé au tamis de 5 mm.
- ✓ Tromper la prise d'essai dans un bécher avec 200 ml d'eau déminéralisé.
- ✓ Disperser la suspension à l'aide d'un agitateur (700 tr/min) pendant 5 min.
- ✓ Introduire 5 cm<sup>3</sup> de bleu à l'aide du dispositif du dosage. Au bout de 1min procéder au test de la tâche.
- ✓ Répéter les étapes pour les autres échantillons.

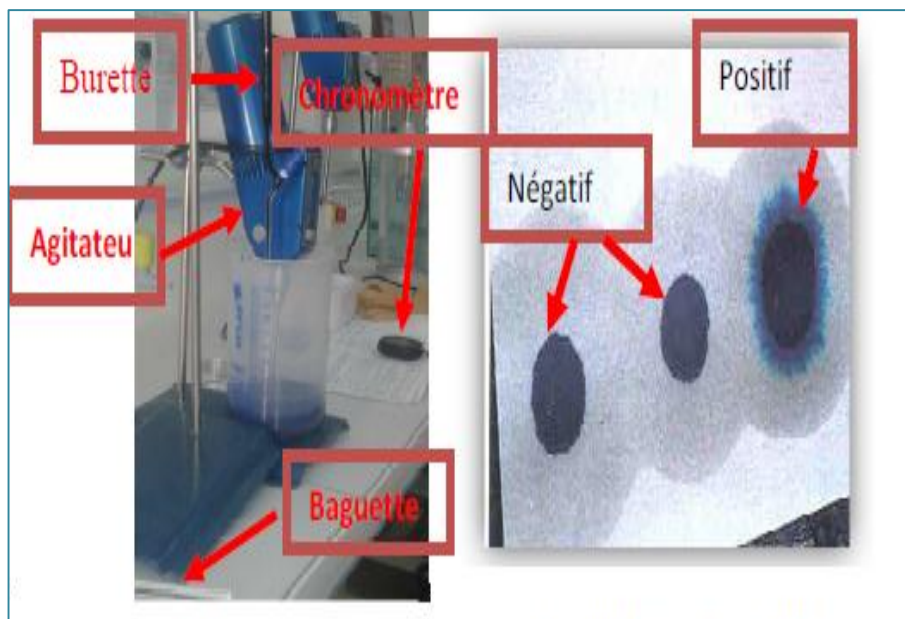


Figure 35 : Phases de déroulement de l'essai bleu de méthylène

### d) Le test de la tâche :

- ✓ Prélever à l'aide de la baguette de verre une goutte de suspension et la déposer sur le Papier filtre.
- ✓ Si la tache déposée sur le papier filtre est sans auréole, le test est négatif. Dans ce cas, Ajouter 5 cm<sup>3</sup> de bleu, laisser agiter pendant 1 minute et refaire l'essai de la tâche.
- ✓ Cette opération sera répétée autant de fois qu'il sera nécessaire tant que le test de la tache Restera négatif.



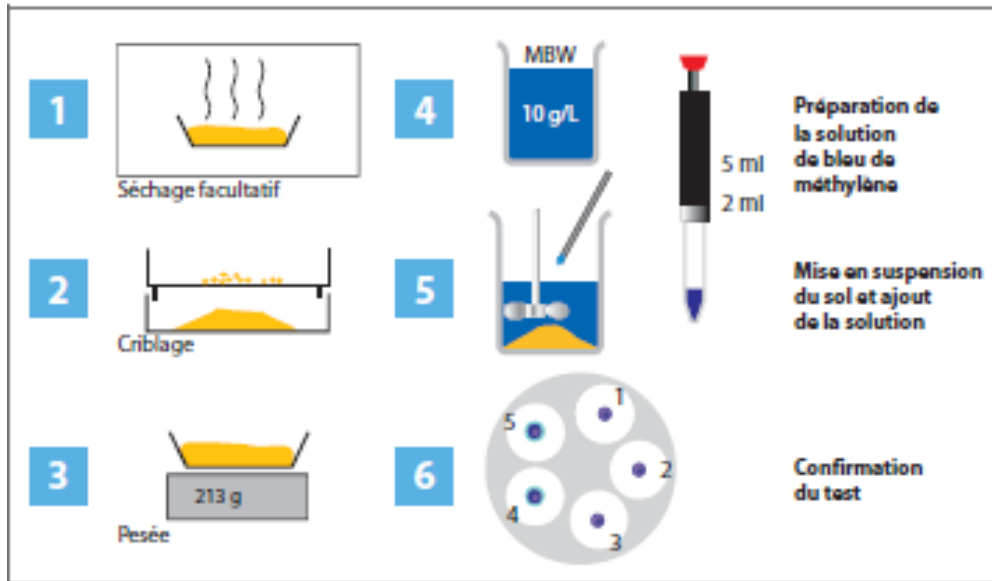


Figure 36 : Aperçu schématique de l'essai de détermination de la valeur de bleu de méthylène.

- ✓ Si la tache déposée sur le papier filtre forme une auréole, le test est positif. Dans ce Cas, procéder à 5 tests successifs de la tâche à raison d'un test par minute sans ajouter de bleu. Si les 5 tests s'avèrent positifs, l'essai est terminé.
- ✓ Si le 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup> ou 4<sup>ème</sup> test de la tache devient négatif, ajouter 5 cm<sup>3</sup> et reprendre les tests de la tâche de départ jusqu'à ce que les 5 tests de la tache soient positifs.

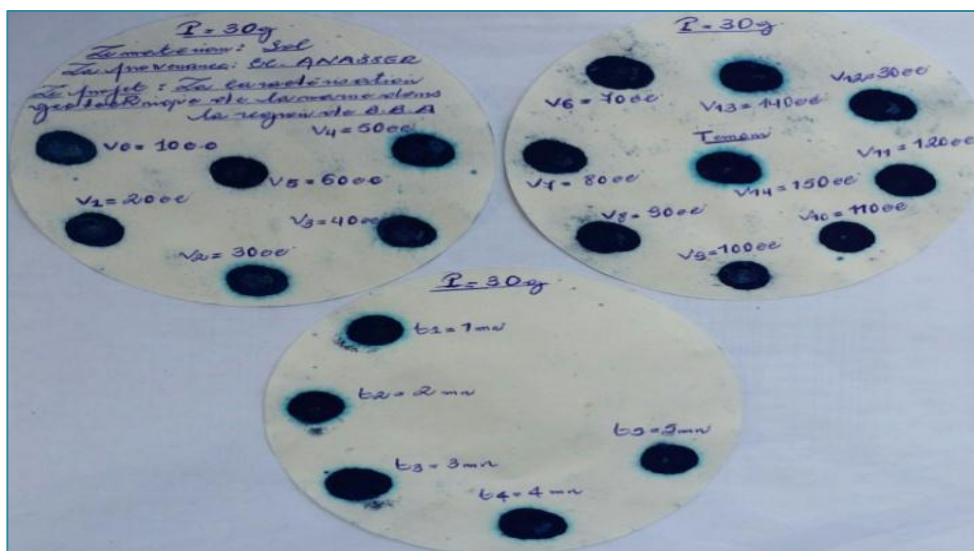


Figure 37 : Papiers filtres montrant l'auréole Bleu clair pour la marne.

### 3. Caractérisation mécanique :

#### 3.1 Essai de la résistance à la compression simple (NF p 98-232-1) :

##### a) Principe :

Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression. La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

- **Préparation du matériau:**

Le matériau séché à l'étuve à 105°C à une fraction de 6.3 mm, Il est imbibé à une teneur en eau égale à la teneur en eau de l'optimum Proctor Normal exécuté sur la fraction 6,3 mm.

La masse d'échantillon pour une éprouvette est en fonction du volume de moule et la densité sèche à l'optimum.

$$M = \gamma_{dopm} \times V$$

##### c). Mode opératoire:

- ✓ Moule :
- ✓ diamètre = 5cm ;
- ✓ hauteur = 10cm ;
- ✓ volume = 196.34 cm<sup>3</sup>.
- ✓ Extracteur ;
- ✓ Dispositif de compression (Presse à béton);
- ✓ Dispositif d'écrasement



Figure 38 : Matériels utilisés

- **Compactage de l'éprouvette :**

Après remplissage du moule, placer l'embase supérieure et retirer les deux parties

d'espacement du moule puis placer l'ensemble embase inférieur-moule-rehausse-embase supérieur dans le dispositif de compression.

- **Extraction de l'éprouvette :**

Après avoir enlevé les deux embases et le rehausse, on introduit un piston dans le moule et on place l'ensemble piston – moule dans l'extracteur.

À l'aide d'un bras en poussant le piston placé à l'intérieur du moule, l'éprouvette est extraite facilement.

Après extraction on vérifie les dimensions de l'éprouvette ; diamètre et hauteur.

- **Conservation Des Eprouvettes :**

Les éprouvettes extraites sont conservées pour les durées de conservation suivantes : 7,14, 28 jours.



Figure 39 : Compactage.



Figure 40 : Extracteur.



Figure 41 : Conservateur.

- **Ecrasement de L'éprouvette :**

L'éprouvette est placée entre les deux plateaux de la presse CBR puis écrasée à l'aide de la presse CBR jusqu'à la rupture.

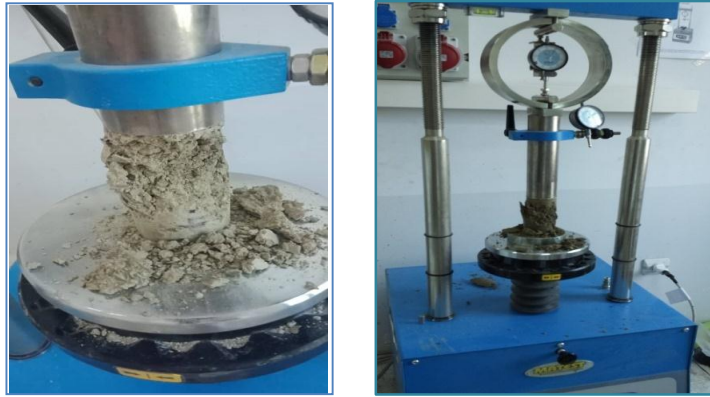


Figure 42 : écrasement de l'éprouvette.

- **Expression des résultats :**

Par définition la résistance est la limite du rapport entre une force et la surface sur laquelle, elle s'exerce. Donc, les valeurs de résistance sont obtenues en divisant les forces (charges) appliquées par le piston de la presse CBR sur la surface de l'éprouvette à écraser.

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$R_c = F/S$$

Avec:

- **R<sub>c</sub>**: Résistance à la compression simple, exprimée en (bar) ;
- **F** : Force maximale à la rupture, exprimée en (kgf) ;
- **S** : Surface de l'éprouvette, exprimée en (cm<sup>2</sup>).

### 3.2 Essai de résistance à la traction indirecte (Essai Brésilien) NF P 98-232-3 :

#### a) Principe :

Une éprouvette cylindrique est soumise sur toute sa génératrice à un effort de compression appliqué sur une zone étroite. Les contraintes de traction orthogonales qui en résultent provoquent la rupture de l'éprouvette par traction indirecte.

- **Appareillage et exécution de l'essai :**

Presse CBR ;

Bandes métallique : Un matériau dur d'une longueur supérieure à la longueur de la ligne de contact avec l'éprouvette.

- **Préparation et positionnement de l'éprouvette :**

L'éprouvette conservée à l'air, est placée horizontalement sur la machine d'essais d'une façon centrée, la surface de l'éprouvette sera en contact avec une bande métallique.

S'assurer que le plateau supérieur est parallèle au plateau inférieur au cours de la mise en charge.

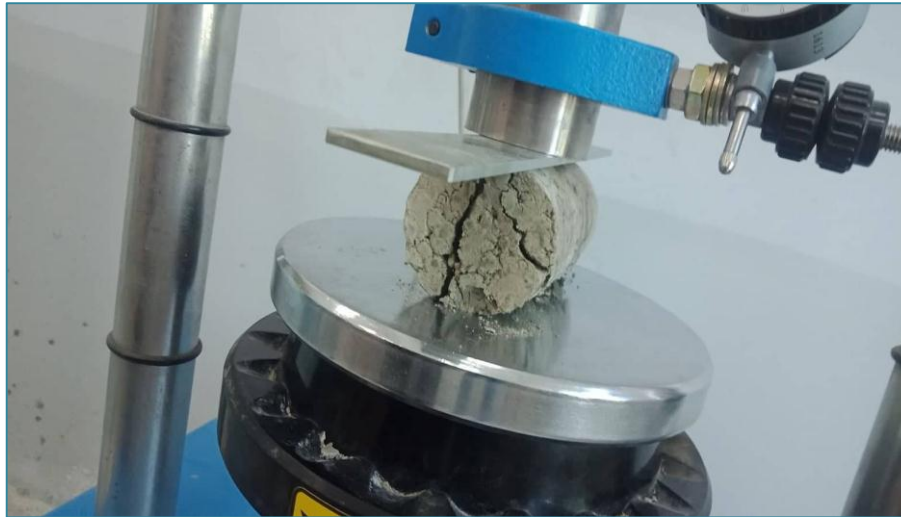


Figure 43: Ecrasement des éprouvettes.

- **Expression des résultats :**

La résistance à la traction indirecte est calculée par la formule suivante :

$$R_{tb} = \frac{2f}{\pi hd}$$

Avec:

- **R<sub>tb</sub>**: Résistance à la traction indirecte, exprimée en (MPa) ;
- **F**: Force maximale à la rupture, exprimée en (kN) ;
- **H**: La longueur de l'éprouvette, exprimée en (m) ;
- **D**: Le diamètre de l'éprouvette, exprimé en (m).

### 4. Caractérisation Chimique :

#### 4.1 Détermination de la teneur en carbonates Méthode du Calcimètre (NF P 94-048) :

##### a) Objectif :

Détermination de la teneur en carbonate par la méthode volumétrique.

##### b) Principe:

L'essai consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique en excès (dans des conditions de température et de pression atmosphérique connues) par un échantillon préparé pour l'essai.

##### c) Appareillage et exécution de l'essai:

- **Le Calcimètre**

Le Calcimètre se compose d'un bâti ainsi que il y a un exemple d'appareille pour expliquer bien les composant d'un Calcimètre (Fig.44) :

1. Un flacon avec ampoule de niveau ;
2. Burette graduée ;
3. Robinet ;
4. Flacon à réaction ;
5. Tube à essai ;
6. Matériau soumis à essai ;
7. Gaz dégagé par la réaction ;
8. Tubulure souple reliant 1 et 2 ;
9. Liquide (avec colorant éventuel).

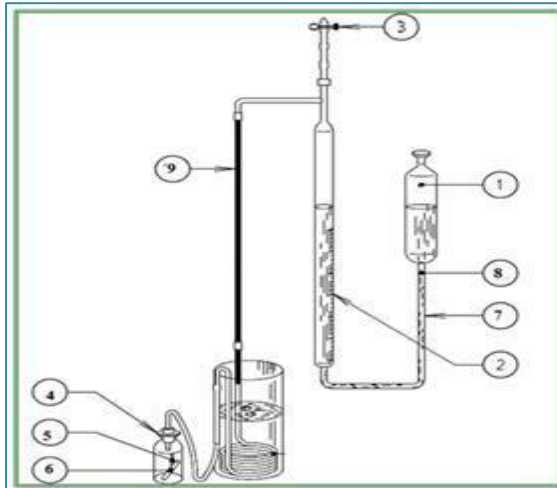


Figure 44 : Schéma d'un Calcimètre

Figure 45 : Calcimètre Dietrich-Fruhling utilisé

### d) Matériel et Produits :

Une balance dont les portées minimale et maximale sont compatibles avec les masses à peser et telle que les pesées sont effectuées avec une incertitude de  $1/1\ 000$  de la valeur mesurée ;

- ✓ Un thermomètre avec lequel le mesurage est effectué avec une exactitude de  $1^{\circ}\text{C}$ .  
La plage d'utilisation du thermomètre est de  $10^{\circ}\text{C}$  à  $35^{\circ}\text{C}$  ;
- ✓ Une pipette pour l'acide chlorhydrique ;
- ✓ Matériel courant de laboratoire ;
- ✓ Une enceinte thermique ou une étuve de dessiccation à température réglable à  $105^{\circ}\text{C}$  de classe d'exactitude c ;
- ✓ Eau distillée, à la température du local d'essai ;
- ✓ Acide chlorhydrique concentré de densité 1,19 (qualité analytique reconnue) ;
- ✓ Poudre de carbonate de calcium pur pour analyse (si nécessaire)

#### • Mode opératoire :

L'essai est effectué sur deux prises d'essai.

#### • Préparation de l'échantillon :

Après un séchage préalable, le matériau est broyé dans le mortier afin d'obtenir une poudre passant en totalité à un tamis d'ouverture de maille inférieure ou égale à  $200\ \mu\text{m}$ . Le séchage du matériau est poursuivi, à une température de  $105^{\circ}\text{C}$ , jusqu'à ce que sa masse ne varie pas de plus de  $2/1\ 000$  entre deux pesées successives, espacées de 1 h.

En l'absence d'information sur la teneur en carbonate présumée, choisir des prises d'essai d'une masse d'environ 0,5 g.

- **Déroulement de l'essai:**

- ✓ Introduire la prise d'essai, une fois pesée (de masse  $m$ ) dans le flacon (4) propre et sec ;
- ✓ Remplir le flacon (1) et la burette (2) d'eau distillée ou déminéralisée ;
- ✓ Faire coïncider le niveau bas du flacon (1) avec le zéro en partie haute de la burette (2) ;
- ✓ Introduire environ 10 cm<sup>3</sup> d'acide chlorhydrique concentré dans un tube à essai (5) placé dans le flacon (4) (ou, selon le matériel utilisé, dans la tubulure latérale du flacon (7) au moyen d'une pipette à bout recourbé) ;
- ✓ Ouvrir le robinet (3). Obturer le flacon à réaction (4) au moyen de son bouchon. La tubulure qui traverse ce dernier est reliée par (9) à la partie supérieure de la burette (2) ;
- ✓ Fermer le robinet (3). Mettre en contact l'acide chlorhydrique contenu dans le réservoir du flacon (4) au dans le tube d'essai avec le matériau. Au fur et à mesure que le dégagement gazeux exerce une pression sur l'eau de la burette (2), en déplaçant le flacon (1), le niveau dans le flacon (1), Agiter le flacon (4) jusqu'à ce que le niveau d'eau ne varie plus ;
- ✓ Après équilibre de la température (environ 5 min) amener les niveaux dans (1) et (2) dans le même plan horizontal et lire le volume  $V_b$  correspondant sur la burette (2). Noter la température de la salle d'essai et, le cas échéant, la pression atmosphérique ;
- ✓ S'assurer que le gaz recueilli dans la burette ne contient pas d'hydrogène sulfuré (H<sub>2</sub>S) à l'odeur très caractéristique. Ce serait un indice que la prise d'essai contenait des sulfures.

Si cela était le cas, il faudrait refaire un essai en ajoutant à l'acide chlorhydrique quelques centimètres cubes d'acétate de calcium à 5 % afin de neutraliser les dégagements gazeux parasites qui s'ajoutaient à ceux du dioxyde de carbone.





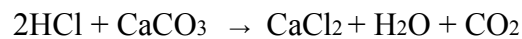
Figure 46 : Déroulement de l'essai.

### d) Détermination de la teneur en carbonate :

- **Calcul le volume de CO<sub>2</sub> dégagé :**

On fait basculer le tube contenant l'acide et on mesure le volume de CO<sub>2</sub> dégagé.

Avec:



$$\text{Teneur en carbonate (\%)} = \left\{ \frac{V_e(\text{CO}_2)}{V_c(\text{CO}_2)} \right\} 100$$

**V<sub>e</sub> (CO<sub>2</sub>) :** volume de CO<sub>2</sub> dégagé par l'échantillon ;

**V<sub>c</sub> (CO<sub>2</sub>) :** volume de CO<sub>2</sub> dégagé par le carbonate de calcium pur.

### 4.2 Détermination de la teneur en sulfates :

Détermination du pourcentage de la fraction sulfaté dans les sols et matériaux.

#### a) Principe:

Détermination du pourcentage de la fraction sulfaté dans les sols et matériaux.

#### b) Mode opératoire.

L'essai se déroule comme suit:

- ✓ Peser 1g d'échantillon broyé et tamiser, On le place dans un bécher puis on ajoute 100ml d'HCL pur, après la mise en solution on le met sur la plaque chauffante pour une douce ébullition pendant 10 minutes ;
- ✓ Filtrer la solution dans une fiole jaugée de 250 ml au-dessus d'un entonnoir qui contient le filtre de 125 mm (une filtration moyenne).on lave à l'eau distillée tiède

jusqu'à élimination de l'acide et l'échantillon ;

- ✓ Sécher les filtres à l'étuve à 60°C jusqu'à poids constant, on les pèse un à un ;
- ✓ Le filtrat recueilli dans la fiole jaugée est amené exactement à 250 ml d'eau distillée, on homogénéise en agitant plusieurs fois ;
- ✓ Prélever 100 ml du filtrat précédent, on le porte à douce ébullition ;
- ✓ Verser 35 cc à 40 cc de chlorure de baryum à 10 % également portée à ébullition (douce ébullition) dans les 100 ml du filtrat précédent ;
- ✓ Laisser bouillir pendant 20 minutes ;
- ✓ Laisser reposer une nuit à température ambiante.



Figure 47 : Déroulement de l'essai.

### Calcul :

On a utilisé les formules suivantes :

$$\% \text{Gypse} = \{(P_2 - P_1) + (f_{t1} - f_{t2})\} \cdot 100$$

% gypse ( $\text{CaSO}_4^{2-}$ )

- $p_1$  : pois du papier filtre vide ;
- $p_2$  : pois du filtre + échantillon sec ;
- $f_{t1}$  : filtre témoin ;
- $f_{t2}$  : filtre témoin après séchage



---

## **Chapitre III : Caractérisation Des Sols Etudiés**

---



### **Introduction :**

Quel que soit les objectifs recherchés dans une étude géotechnique, il est de règle d'effectuer initialement l'identification de sols concernés. Cette procédure permet d'orienter les analyses géotechniques ultérieures et surtout d'effectuer une classification des matériaux rencontrés. Les paramètres nécessaires pour cette classification sont aussi bien de natures physico-chimiques et mécaniques.

Ce chapitre présente l'origine et la localisation des échantillons prélevés ainsi que les résultats de l'ensemble des essais géotechniques effectués sur les marnes non traitées, au laboratoire de département de génie civil –université de Bordj Bou Arreridj.

### **1. Origine et localisation des échantillons à tester:**

La wilaya de Bordj Bou Arreridj, située dans la région des Hauts Plateaux à 240 km à l'Est d'Alger est limitée à l'Ouest par la wilaya de Bouira, au Nord par la wilaya de Bejaïa, à l'Est par la wilaya de Sétif et au Sud par celle de M'sila.

Elle se caractérise par un climat de type continental marqué par un été chaud et un hiver plus ou moins rigoureux et des vents forts. Les précipitations sont irrégulières et sont de l'ordre de 245 à 400 mm par an. La saison des pluies s'étend de Novembre à Mars. De Décembre à Janvier, il neige parfois en montagne et la neige peut tenir jusqu'à 1 mois et demi. La température moyenne annuelle est de 18 à 24°C. Elle est maximale au mois de Juillet avec 37 à 41°, en revanche elle est minimale au mois de décembre où elle peut descendre jusqu'à 0°.

Les objectifs présentés dans l'introduction générale orientent le choix du sol à étudier : le travail expérimental repose ainsi sur l'utilisation de sols marneux de la région de Bordj Bou Arreridj.

Le site de prélèvement à est situé à 10 km au sud du chef-lieu de la ville de Bordj Bou Arreridj, avec les coordonnées géographiques suivantes :

**Latitude :** 3984111.00 m N ;

**Longitude :** 655439.00 m E.



Figure 48 : Site de prélèvement.

### 1.1 Prélèvement des échantillons :

Les échantillons à tester ont été prélevés sur des déblais préalablement terrassés.

- Blocs : à partir d'une roche mère ;
- Matériau granuleux : résultat d'altération de la roche mère.

La quantité de sol prélevée doit être suffisante pour réaliser l'ensemble des essais de la phase expérimentale : l'estimation des besoins pour mener l'ensemble des analyses prévues amène à prélever une masse moyenne de 300 kg. Et a été placé dans des sachets en plastique et transporté au laboratoire pour préparation et exécution des essais géotechniques d'identification et de caractérisation. Sa classification a été déterminée suivant les normes AFNOR.

## 2. Les résultats des différents essais :

### 2.1 Essais géotechniques :

Essais d'identification du sol : permet de classer le sol et de calculer le divers paramètres donc il faut le reconnaître en prélevant des échantillons représentatifs.

L'étude préalable de ces échantillons en laboratoire portera sur l'état et les caractéristiques des sols :

- ✓ Teneur en eau naturelle.
- ✓ Granulométrie.
- ✓ Indice de plasticité (limites d'Atterberg).
- ✓ Compactage (Proctor normal et modifié).

✓ Valeur de bleu méthylène.

### 2.1.1 Teneur en eau (NF P 94-050) :

Détermination la teneur en eau pondérale des matériaux – méthode par étuvage.

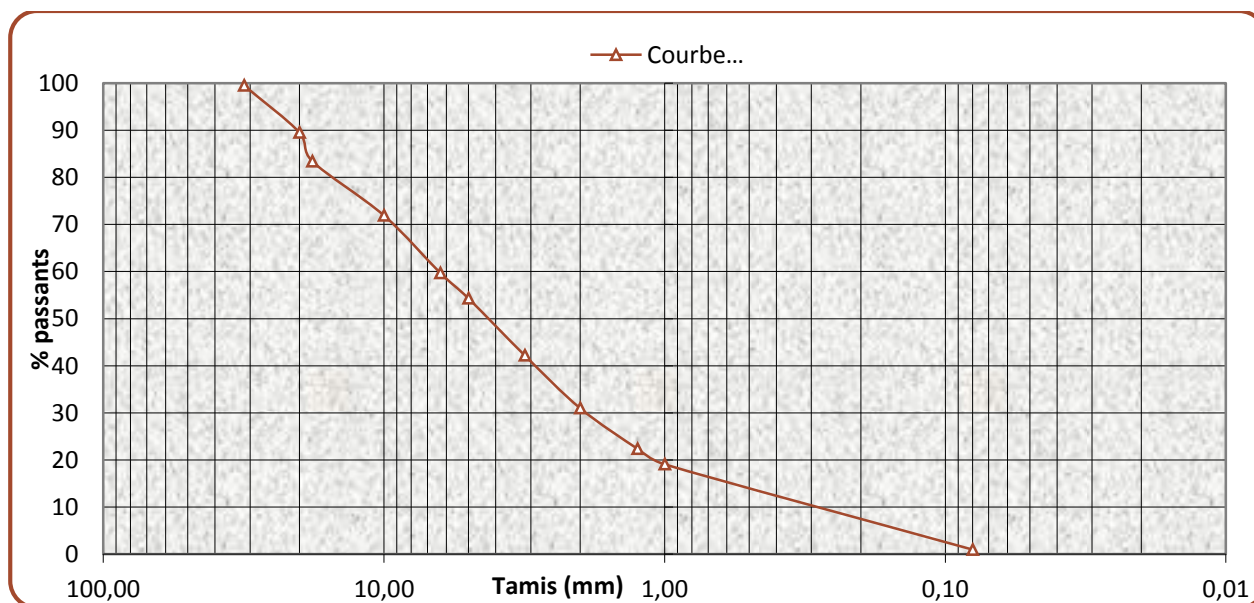
**Objectif :** Consiste à calculer le rapport du poids d'eau que le sol contient au poids de ses éléments secs, après dessiccation à l'étuve à 105° C (50°C dans le cas des sols contenant des éléments organique).

**Tableau 8 :** Teneur en eau naturel de la marne étudié.

| Provenance                 | La marne     |             |
|----------------------------|--------------|-------------|
| Echantillon                | ECH : 1      | ECH : 2     |
| <b>Poids totale humide</b> | <b>305</b>   | <b>552</b>  |
| <b>Poids totale sec</b>    | <b>290.5</b> | <b>532</b>  |
| <b>Poids de la tare</b>    | <b>106</b>   | <b>248</b>  |
| <b>Poids du sol sec</b>    | <b>184.5</b> | <b>284</b>  |
| <b>Poids de l'eau</b>      | <b>14.5</b>  | <b>20</b>   |
| <b>Teneur en eau (%)</b>   | <b>7.85</b>  | <b>7.04</b> |
| <b>Moyenne W (%)</b>       | <b>7.45</b>  |             |

### 2.1.2 Résultats d'analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056) :

La granulométrie est la distribution dimensionnelle d'un matériau donné. La méthode utilisée est celle par tamisage à sec après lavage de la norme française NF P 94-056. Pour les éléments supérieurs à 80µm.



**Figure 49 :** Courbe granulométrique de la marne étudiée.

D'après la courbe granulométrique on détermine les coefficients suivants :

- **Détermination graphique des diamètres D10, D30, et D60 :**

D10, D30, D60 représentent respectivement les diamètres des éléments correspondant à 10%, 30% et 60% de tamisât. Ils représentent respectivement les diamètres des mailles des tamis qui permettent le passage de 10%, 30%, et 60% du matériau de départ.

- **Coefficient de HAZEN (coefficient d'uniformité) :**

Le coefficient de HAZEN permet de savoir si la granulométrie est étalée ou serrée (Uniforme), Ce coefficient est défini par la relation suivante :

$$C_u = D_{60} / D_{10}$$

$C_u$  : Le coefficient de HAZEN, d'après CAQUOT et KERISEL

- $C_u < 2$  : La granulométrie est serrée (uniforme) ;
- $C_u > 2$  : La granulométrie est étalée.

- **Coefficient de courbure :**

Le coefficient de courbure vient en complément de coefficient de HAZEN, est donné par l'équation suivante :

$$C_c = (D_{30})^2 / D_{10}.D_{60}$$

$C_c$  : le coefficient de courbure :

- $1 < C_c < 3$  : La granulométrie est bien graduée (continuité bien répartie) ;
- $C_c < 1$  et  $C_c > 3$  : La granulométrie est mal graduée (continuité mal répartie).

Les résultats des coefficients d'uniformité et de courbure sont présentés dans le tableau 9.

**Tableau 9** : Valeurs des coefficients  $C_u$  et  $C_c$ .

| Le coefficient                                       | Valeurs de coefficient |
|--|------------------------|
| <b><math>C_c</math> : le coefficient de courbure</b> | <b>2.22</b>            |
| <b><math>C_u</math> : Le coefficient de HAZEN</b>    | <b>20</b>              |

### Interprétations des résultats :

- Le coefficient d'uniformité (Hazen) : ( $C_u > 2$ ) montre clairement que la courbe est étalée
- Le coefficient de courbure est dans les limites de spécification ( $1 < C_c < 3$ ). Matériau bien gradué (la continuité est bien répartie)

Par conséquent, on peut conclure que le matériau présente une courbe étalée, uniforme et régulière.

La courbe de la figure 49 représente la répartition dimensionnelle des grains de sol entre 80  $\mu\text{m}$  et 31.5mm. D'après l'allure de ces courbes, on constate ce qui suit :

La marne possède également une courbe granulométrique étalée. Le diamètre maximum des granulats ( $D_{\text{max}}$ ) est de 31.5 mm avec une fraction sableuse ( $< 2 \text{ mm}$ ) de l'ordre de 30% et des passants à 80  $\mu\text{m}$  de 1 %.

### 2.1.3 Résultats des Limites d'Atterberg (NF P 94-05120) :

L'essai a pour objet de déterminer les états de consistance d'un sol, cet essai effectué selon la norme (NF P 94-05120), les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau 10.

Tableau 10 : Limites d'Atterberg de la marne étudiée.

|                                  | Marne |
|----------------------------------|-------|
| Limite de liquidité : $W_L$      | 34,39 |
| Limite de plasticité : $W_P$     | 24,42 |
| Indice de plasticité : $I_p$ (%) | 13.3  |

Les limites sont des constantes physiques conventionnelles qui marquent les seuils entre :

- **Limite de liquidité ( $W_L$ )** : Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique. Est déterminé à l'aide de la méthode de Casagrande [norme NFP 94 051].
- **Limite de plasticité ( $W_P$ )** : Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide est déterminé par la méthode du rouleau [norme NF P 94 051]. Ces limites ont pour valeur des teneurs en eau, exprimées en pourcentage du poids du matériau.



La différence  $IP = WL - WP$  qui définit l'étendue du domaine plastique est particulièrement importante : c'est l'indice de plasticité.

Le tableau suivant donne la classification des sols en fonction de l'indice de plasticité selon le guide des terrassements routiers (GTR).

**Tableau 11** : Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (GTR, 2000)

| Indice de plasticité | Nature de sol        |
|----------------------|----------------------|
| $IP \leq 12$         | Faiblement argileux  |
| $12 < IP \leq 25$    | Moyennement argileux |
| $25 < IP \leq 40$    | Argileux             |
| $IP > 40$            | Très argileux        |

### Estimation du gonflement des sols :

Ainsi et comme le montre le tableau 11, Snethen (1980) (cité par Derriche et *al.*, 1998) propose une classification qui donne respectivement le potentiel de gonflement en fonction de l'indice de plasticité IP. Selon cette valeur de ce dernier, on peut évaluer le gonflement possible des sols. Généralement les sols gonflants ont un très grand indice de plasticité.

**Tableau 12**: Potentiel de gonflement d'après Snethen (1980).

| Ip(%)   | potentiel de Gonflement |
|---------|-------------------------|
| < 18    | Faible                  |
| 22 – 32 | Moyen                   |
| 22 – 48 | Elevé                   |
| > 35    | Très élevé              |

### Interprétations des résultats :

A partir des résultats obtenus (tableau 10), la valeur d' $I_p$  est de 13.3. Il apparaît que l'indice de plasticité peut se classer comme matériau moyennement argileux ( $12 < I_p \leq 25$ ).

Le matériau est associé à la classe de matériaux dits argileux avec une faible plasticité, et Dans le cas de notre matériau l'indice de plasticité  $I_p=13.3$ , Il est donc classé parmi les sols peu gonflants d'après le tableau 11.

#### 2.1.4 Résultats d'essai Proctor (NF P 94-093) :

L'essai Proctor (NF P 94-093) a pour but de déterminer La teneur en eau optimale ( $W_{OPM}$ ) et la densité sèche maximale ( $Y_{OPM}$ ) pour un sol de remblai, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore d'avoir une capacité portante maximale.

##### ✓ Essai Proctor normale :

Essai Proctor normale a la fraction 0/5 mm : résistance souhaitée relativement faible, du type remblai non ou peu chargé.

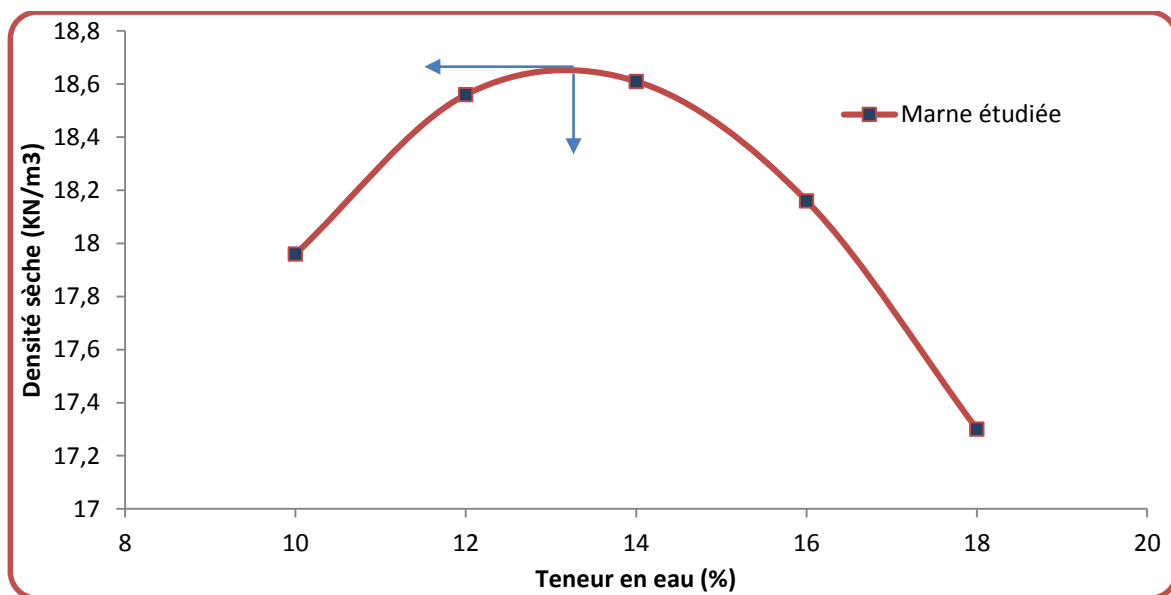


Figure 51 : Courbe Proctor normal de la marne étudiée.

Les caractéristiques de l'optimum ( $Y_{d_{opm}}$  et  $W_{opm}$ ) de l'essai Proctor normale sont présentées dans le tableau ci-dessous.

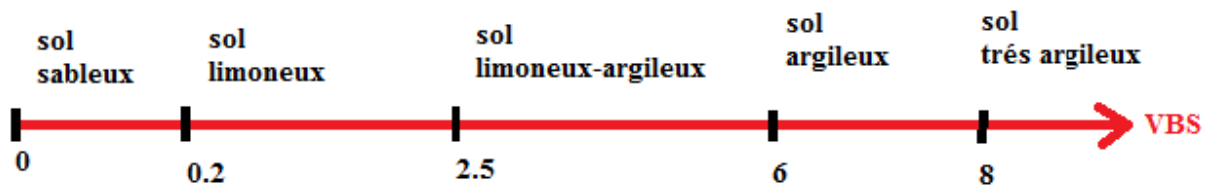
**Tableau 13 :** Caractéristiques de l'optimum Proctor normale de la marne étudiée.

| Proctor normal (0/5 mm)  | La valeur obtenue |
|--|-------------------|
| <b>Teneur en eau optimale</b> $W_{opn}$ (%)                      | <b>12.3</b>       |
| <b>Densité sèche maximale</b> $\chi_{dopm}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | <b>18.61</b>      |

### 2.1.5 Résultats d'essai au bleu de méthylène (NF P 94-068) :

Cet essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur la prise d'essai. Cette valeur est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/2 mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol. Elle constitue un des paramètres d'identification des sols décrite dans la norme (NF P 94-068)

Les résultats de cet essai donnent une valeur de **bleu du sol (VBS)** égale à 4.16 pour notre matériau.



**Figure 50:** Classification des sols selon la valeur de bleu de méthylène.

### 2.1.6 Essais de portance CBR (Californian Bearing Ratio test) (NF P 94-078) :

L'essai CBR est un essai de portance, c'est-à-dire qu'il permet de mesurer l'aptitude des matériaux à supporter les charges. On mesure 2 types d'indice en fonction des buts fixés :

- ***l'indice C.B.R. après immersion*** : Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau et soumis à des variations de régime hydrique.
- ***l'indice Portant immédiat (IPI)***: Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins de chantier directement sur sa surface lors des travaux

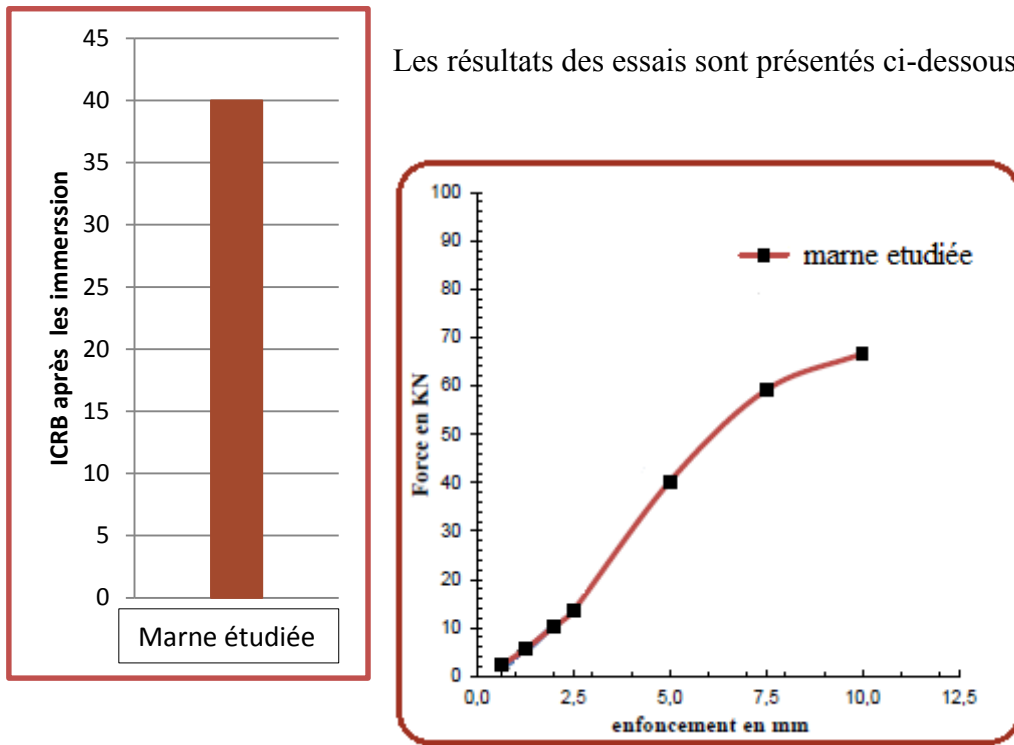


Figure 52 : Résultats des essais CBR après immersion.

La figure 52 montre l'évolution des forces en fonction des enfoncements, ainsi que les indices CBR en fonction du type de matériau.

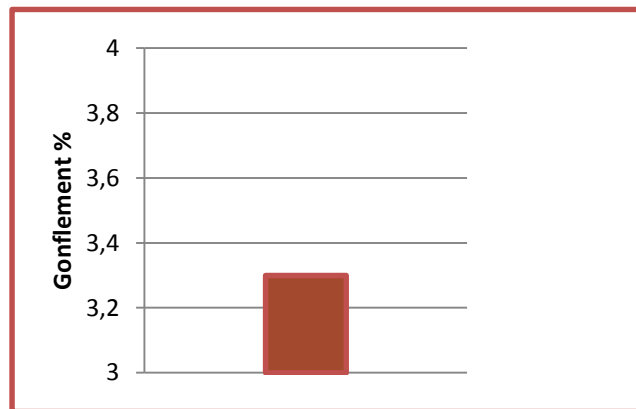


Figure 53 : Valeurs de gonflement pour la marne étudiée.

La figure 54 montre l'évolution de l'indice Portant immédiat en fonction de la teneur en eau

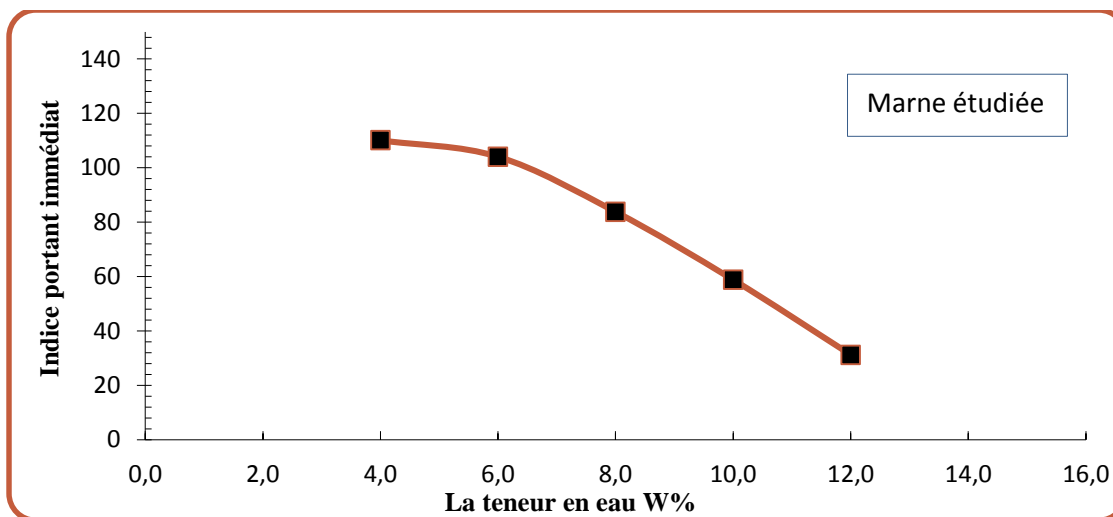


Figure 54: Courbes CBR portant immédiat de la marne étudiée.

**Interprétation des résultats :**

Les résultats obtenus par Laifaoui et Saffidine, 2017 montrent qu’il s’agit d’un matériau à bonne portance avec des indices CBR après immersion importantes (Fig. 52). Et en termes de gonflement, les matériaux étudiés sont considérés peu gonflants (Fig. 53).

La sensibilité à l’eau peut aussi être appréciée par la pente de la courbe W / CBR immédiat (Fig. 54). Plus la pente de cette courbe est forte, plus le sol est sensible à l’eau.

**2.1.7 Essai de Fragmentabilité et essai de Dégradabilité :**

D’après les travaux effectués par Laifaoui et saffidine, 2017 les résultats des essais de dégradabilité et de fragmentabilité sont les suivant :

La marne testé a une valeur  $DG = 137.5$ . Donc on peut la considéré comme matériau rocheux très dégradable (tableau 13). Elle a une valeur  $FR = 36.66$ , ce qui signifie qu’elle est fragmentable.

Tableau 13 : Spécification du GTR (essai de dégradabilité).

|               |  |
|---------------|--|
| $DG < 5$      | matériaux rocheux peu dégradables          |
| $5 < DG < 20$ | matériaux rocheux moyennement dégradables, |
| $DG > 20$     | matériaux rocheux très dégradables         |

**Tableau 14** : Spécification du GTR (essai de fragmentabilité).

|                  |                               |
|------------------|-------------------------------|
| <b>FR &lt; 7</b> | <b>roche peu fragmentable</b> |
| <b>FR &gt; 7</b> | <b>roche fragmentable</b>     |

### 2.1.8 Classification géotechnique des sols étudiée :

L'utilisation des terres en remblai et couche de forme est liée directement à leur classification et à leur comportement lors de leur mise en place. Le GTR 2000 (Guide des Terrassements Routiers) et la norme qui en découle NF- P 11-300 (Septembre 1992) proposent une classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

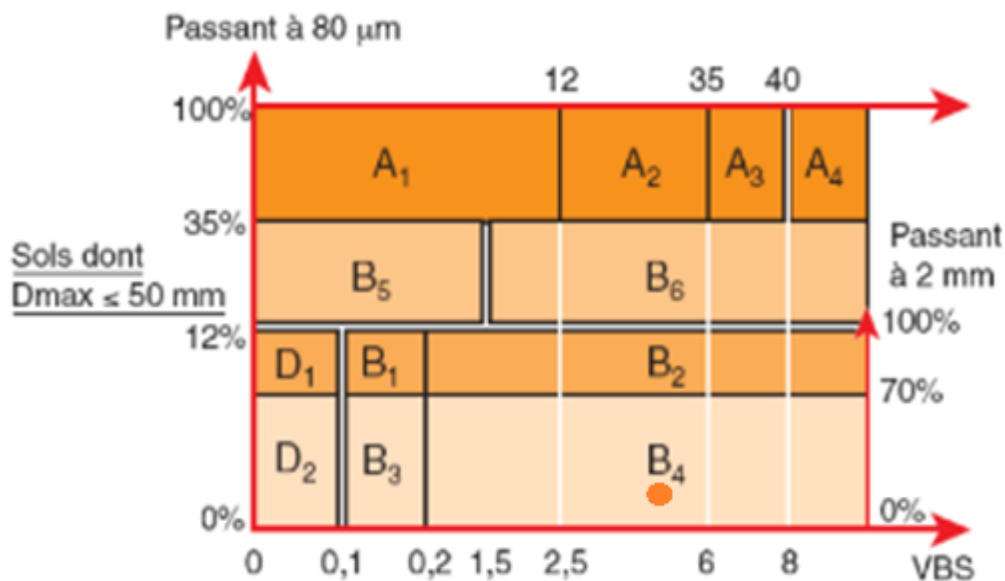
Ils permettent de définir la classe du matériau à partir des résultats de plusieurs types d'essais. La classification primaire des matériaux, basée sur leur granulométrie, leur argilosité et leur nature pétrographique.

Les caractéristiques physiques mesurées dans cette étude ont été choisies en fonction du secteur de valorisation envisagé. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau 15.

**Tableau 15** : Récapitulatif des valeurs des différents essais géotechniques effectués sur les marnes non traitées.

| <b>Caractéristiques géotechniques</b> | <b>Marne étudiée</b>        |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| <b>D<sub>max</sub></b>                | <b>31,5</b>                 |
| <b>Passant à 80µm</b>                 | <b>1</b>                    |
| <b>Passant à 2mm</b>                  | <b>31</b>                   |
| <b>V.B.S</b>                          | <b>4,16</b>                 |
| <b>IP</b>                             | <b>13.3</b>                 |
| <b>Xd opn et Wopn</b>                 | <b>1,86 KN/m3 et 12.8 %</b> |
| <b>W naturel</b>                      | <b>7,47%</b>                |
| <b>IPI (opm)</b>                      | <b>83,80</b>                |
| <b>Classe GTR</b>                     | <b>B4</b>                   |

**Tableau 16** : Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature, suivant (GTR).



A la lumière des résultats trouvés et pour les éléments inférieurs à 50 mm, indice de plasticité = 13.3%, VBS = 4,16, passant à 0.08 mm = 1% et 2 mm = 30 %), la marne est de la marne étudiée peut être classée dans la classe **B4** selon la classification du GTR.

### 2.2 Essais mécaniques :

#### 2.2.1 Résistance à la compression simple et à la traction indirecte (NF P 98-232-1) et (NF P 98-232-3) :

Les matériaux étudiés doivent présenter de bonnes performances mécaniques pour assurer un bon fonctionnement de la chaussée. Cette propriété est évaluée à travers les essais d'écrasement des éprouvettes cylindriques en compression simple et en traction indirecte.

Les essais mécaniques sont effectués sur les éprouvettes après 7 et 14, 28 jours de conservation.

#### Confection des éprouvettes :

En raison de la finesse des matériaux développés ( $D_{max}$  est inférieur à 6,3 mm) et en accord avec les prescriptions de la norme NF P 98 114 3 relative à l'étude des matériaux, les essais mécaniques peuvent être réalisés sur des éprouvettes cylindriques de 5 cm de diamètre et de 10 cm de longueur. Les modalités de confection de ces éprouvettes sont décrites dans la norme NF P 98 230 2.



**Figure 54 :** Confection des éprouvettes à partir du sol non traité.

Les éprouvettes ont été conservées à 20°C dans une armoire de conservation.



**Figure 55 :** Conservation des éprouvettes dans une armoire.

Les figures 56 et 57 représentent l'évolution de la résistance à la compression simple et à la traction indirecte en fonction de l'âge des éprouvettes des matériaux étudiés.



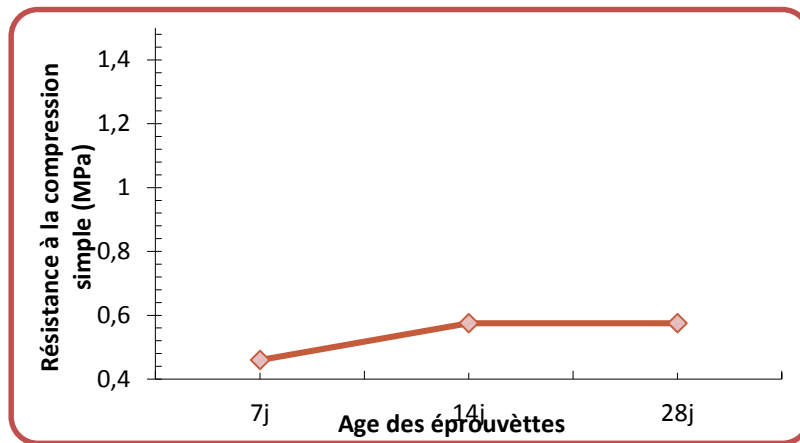


Figure 56 : Influence de la durée de conservation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple de la marne naturelle (sans traitement).

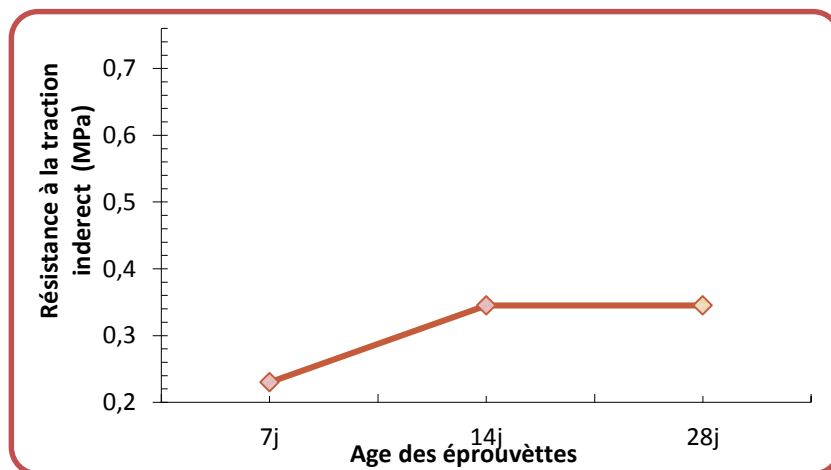


Figure 57 : Influence de la durée de conservation des éprouvettes sur la résistance à la traction indirecte de la marne naturelle (sans traitement).

### Interprétation des résultats :

La marne étudiée présente des valeurs faibles de résistance à la compression et de la traction indirecte. A partir de ces résultats il apparaît que la marne étudiée montre des performances mécaniques non adéquates qui la rendent non utilisable pour la réalisation de la couche de forme d'une chaussée.

### 2.3 Essais chimiques :

Pour déterminer la composition chimique des marnes étudiées. Une analyse chimique quantitative réalisée par Fluorescence X a été déterminée au laboratoire de M'sila par les étudiantes Laifaoui et Saffidine, 2017. Les résultats sont montrés dans le tableau 17.

**Tableau 17 :** Résultats des analyses chimiques de la marne étudiée

| Composant chimique             | Marne étudiée |
|--------------------------------|---------------|
| Titre                          | 17.5          |
| SiO <sub>2</sub>               | 47.23         |
| AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.08         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.81          |
| CaO                            | 9.31          |
| MgO                            | 2.71          |
| SO <sub>3</sub>                | 0.23          |
| K <sub>2</sub> O               | 2.248         |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.400         |
| Cl                             | 0.002         |
| PAF                            | 16.98         |
| PAF analysé                    | 15.68         |

**Tableau 18 :** Expression des résultats des analyses chimiques.

|               | CaCO <sub>3</sub> (%) | SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (%) | Insolubles (%) |
|---------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------|
| marne étudiée | 23,28                 | Traces                            | 73.25          |

**Tableau 19 :** Classification des matériaux en fonction du pourcentage massique en carbonate

| Teneur en CaCO <sub>3</sub> (%)                                       | Désignation géotechnique   |
|---|--|
| $\left\{ \begin{array}{l} 0-10 \\ 10-30 \\ 30-70 \end{array} \right.$ | $\left. \begin{array}{l} \text{Argile} \\ \text{Argile marneuse} \\ \text{Marne} \end{array} \right\} \text{ sol}$ |
| $\left\{ \begin{array}{l} 70-90 \\ 90-100 \end{array} \right.$        | $\left. \begin{array}{l} \text{Calcaire marneux} \\ \text{Calcaire} \end{array} \right\} \text{ roche}$            |

### Interprétation des résultats :

Les analyses chimiques du sol, ont montré des résultats très dispersés (tab 18). En effet, à titre d'exemple, le carbonate CaCO<sub>3</sub> dont l'influence est très importante sur le comportement mécanique des marnes, a une valeur de 23 %.

Cependant, en se référant au tableau 19, les analyses chimiques réalisées montrent que le matériau étudié est une argile marneuse (10% < CaCO<sub>3</sub> < 30%).

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, les propriétés géotechniques de notre matériau prélevé dans le site d'El Hammadia sont faibles. Donc, nous ne pouvons pas utiliser ce matériau dans les constructions routières vue sa qualité et son évolution. L'évolution actuelle du contexte d'environnement et d'économie dans le domaine des terrassements est marquée par la nécessité de réutiliser au maximum les matériaux situés dans l'emprise des projets, même ceux dont les caractéristiques mécaniques sont très faibles. Dans ce contexte, Il est cependant possible d'utiliser ces matériaux après amélioration de ses caractéristiques mécaniques par traitement aux liants hydrauliques. Pour cela, nous présenterons dans le chapitre suivant le mode ainsi que les résultats d'une tentative de traitement de la marne étudiée avec deux types de chaux.



---

## **Chapitre IV :** **Caractérisation Mécanique Des Sols Traités**

---



### **Introduction :**

Les travaux de construction des remblais et des couches de formes représentent une part importante du coût global de réalisation des projets routiers. Cette importance justifie une recherche d'optimisation globale, visant à minimiser les coûts. On a donc intérêt à privilégier les performances des remblais et de la couche de forme des structures routières, en sol argileux et marneux, ces sols peu convenables présentant une plasticité élevée et une faible capacité de portance sont fréquemment rencontrés, il a été donc nécessaire d'améliorer ces sols pour les rendre acceptables pour la construction.

Ce chapitre discute l'efficacité du traitement par deux liants : chaux vive et chaux résiduaire (déchet de la production de l'acétylène) sur le comportement d'un sol marneux. Il montre la possibilité d'utilisation à la fois des marnes et de la chaux résiduaire en techniques routières.

### **1. Techniques et procédures expérimentales :**

La méthode d'amélioration chimique des sols par addition de la chaux ou d'autres ajouts cimentaires reste la plus utilisée et la moins onéreuse. Cette technique s'est développée très rapidement à travers le monde et qui est encore menée à connaître une importante croissance. Aisée à mettre en œuvre, économique et efficace, elle permet surtout d'éviter de lourds travaux de terrassement destinés à rejeter les sols inadéquats et à faire appel à des matériaux d'emprunt de bonne qualité.

### **2. Les Matériaux utilisés :**

#### **2.1 Sol utilisé :**

A travers la géologie des terrains de la région de Bordj Bou Arreridj, la marne présente une faible capacité de portance. Les différentes caractéristiques physiques et mécaniques de la marne utilisée ainsi que sa classification ont été présentées dans le chapitre 3.

#### **2.2 Choix du type de chaux :**

Le choix des liants utilisés dans cette étude s'est porté sur leur efficacité dans le processus de traitement. Pour le traitement des sols, les chaux utilisées dans cette étude sont : la chaux vive de Saida et la chaux éteinte (résiduaire), sous-produit de l'industrie, provenant de l'Entreprise Nationale des Gaz industriels (ENGI), sise à Annaba.

- **La chaux vive :**

C'est une chaux produite par la société BMSD-SARL située dans la ville de Saïda (Sud-Ouest du territoire national), Un tamisage au tamis 0.4 mm avant son utilisation a été procédé pour éliminer les grumeaux qui peuvent se former en présence d'une éventuelle humidité (Fig 58).



**Figure 58 :** Chaux vive de Saïda.

Les propriétés physiques et chimiques de cette chaux sont présentées dans le tableau 20.

**Tableau 20 :** Caractéristiques physico-chimiques de la chaux de Saïda

| Caractéristiques de base    | La fiche technique de la chaux |
|-----------------------------|--------------------------------|
| <b>Apparence physique</b>   | <b>Poudre blanche sèche</b>    |
| CaO (%)                     | > 73.3                         |
| MgO (%)                     | < 0.5                          |
| Fe2O3(%)                    | < 2                            |
| Al2O3 (%)                   | < 1.5                          |
| SiO2(%)                     | < 2.5                          |
| SO3(%)                      | 0.4-0.5                        |
| Na2O(%)                     | < 5                            |
| CO2 (%)                     | < 10                           |
| CaCO3 (%)                   | 2                              |
| Densité spécifique (g/cm 3) | < 10                           |
| Plus de 90 µm (%)           | 0                              |
| Plus de 630 µm (%)          | < 1                            |
| Matériau insoluble (%)      | 600-900                        |
| Densité apparente (g/l)     |                                |

- **La chaux résiduaire :**

D'après les résultats obtenus par Ayeche 2013, les analyses par diffraction des rayons X de la chaux ont montré que la chaux résiduaire de l'ENGI est similaire en compositions chimiques et minéralogiques à la chaux industrielle, à l'exception de la présence de carbone dans la chaux résiduaire. Les analyses chimiques élémentaires et morphologiques ont confirmé que les particules de chaux résiduaire diffèrent de celles des chaux industrielles par la présence de formations de carbone.

L'essai de réactivité et l'analyse du sous-produit de la fabrication d'acétylène ont montré que c'est une chaux hydratée de 67,03 % de pureté. Le lait de chaux de l'ENGI présente une vitesse de sédimentation élevée due à sa répartition granulométrique et à la concentration élevée en ions chlorures et sulfates.



**Figure 59 :** lait de Chaux (ENGI).

Les principales caractéristiques physico-chimiques de lait de chaux de l'ENGI sont regroupées dans le tableau 21 :

**Tableau 21** : Caractéristiques physico-chimiques des laits de chaux de l'ENGI.

| Caractéristiques de base            | lait de Chaux ENGI        |
|-------------------------------------|---------------------------|
| <b>Apparence physique</b>           | <b>Poudre Gris cendré</b> |
| <b>CaO %</b>                        | <b>67.03</b>              |
| <b>SiO<sub>2</sub> %</b>            | <b>2.06</b>               |
| <b>SO<sub>3</sub> %</b>             | <b>0.12</b>               |
| <b>MgO%</b>                         | <b>0</b>                  |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>%</b> | <b>2.40</b>               |
| <b>CO<sub>2</sub> résiduel%</b>     | <b>1.28</b>               |
| <b>C%</b>                           | <b>0.65</b>               |
| <b>Perte au feu 1000°C %</b>        | <b>24.32</b>              |
| <b>Turbidité (NTU)</b>              | <b>17600</b>              |
| <b>pH</b>                           | <b>12,1</b>               |
| <b>Conductivité (µS/cm)</b>         | <b>10390</b>              |
| <b>Densité</b>                      | <b>1,043</b>              |

La chaux résiduaire rejetée par l'usine de fabrication d'acétylène, l'Entreprise Nationale des Gaz industriels (ENGI), sise à Annaba. la même opération de tamisage (au tamis 0.4 mm). Les propriétés physiques et chimiques de cette chaux sont présentées dans le tableau 21. Les caractéristiques physico-chimiques du lait de chaux de l'ENGI, prélevé à la sortie du générateur d'acétylène, ont été déterminées. La teneur en matières sèches est de l'ordre de 15,36 %. Le diamètre effectif et le coefficient d'uniformité des particules sont  $D_E = 75 \mu\text{m}$  et  $C_U = 2,1$  respectivement. La valeur moyenne de la taille des particules de chaux est de 118  $\mu\text{m}$  (Ayeche. 2013).

### 3. Les caractéristiques de résistance de compression simple et de traction indirecte :

Dans tous les problèmes de stabilité des sols (étude de fondation, ouvrages de soutènement, remblais, talus...) il devient nécessaire de connaître la résistance de compression et de traction indirecte du sol. A partir des valeurs de résistance  $R_C$  et  $R_{Tb}$  on peut ainsi définir les caractéristiques mécaniques du sol.

La confection des éprouvettes pour ces essais se fait en exploitant les valeurs ( $\gamma_{dopn}$ ,  $W_{opn}$ ) de l'essai Proctor Normal sur la fraction 0/6.3 mm. La masse de la prise d'essai, est on fonction du volume de moule et de la densité sèche de l'optimum Proctor Normal ( $\gamma_{dopn}$ ). La quantité d'eau introduite est la teneur en eau de l'optimum Proctor Normal ( $W_{opn}$ ).



L'étude des caractéristiques mécaniques a été réalisée pour les dosages en chaux suivant :

- Chaux résiduaire : (0%, 2%, 4%, 8%).
- Chaux commerciale : (0%, 14%, 18%, 24%).

### 3.1 Préparation des mélanges et conservation des éprouvettes :

Le sol est séché dans une étuve pendant 24h à 105°C. Il est ensuite mélangé avec la chaux à sec, manuellement, jusqu'à ce qu'un mélange visuellement homogène soit obtenu. Ensuite, l'eau est versée sur le mélange de manière uniforme. Deux à trois minutes sont alors nécessaires pour permettre une totale imprégnation du matériau. Il est important de noter que la teneur en eau utilisée tout au long de cette étude est la teneur en eau de l'optimum Proctor Normal. La préparation des éprouvettes est faite selon les étapes de compactage décrites dans le chapitre 2.



Figure 60 : Préparation des matériaux.

Les éprouvettes extraites sont conservées pour les durées de conservation suivantes : 7, 14 et 28 jours (Fig 61).



Figure 61 : Conservation des éprouvettes des différents pourcentages des 2 types d'chaux.

### Ecrasement des éprouvettes :

Lorsque chaque éprouvette atteint sa durée de conservation. Elle est placée entre les plateaux de la presse CBR puis écrasée jusqu'à la rupture.

Dans ce type des ruptures, deux cônes apparaissent aux extrémités de l'éprouvette rompue. En effet, la pression exercée par les plateaux de la presse à la jonction avec l'éprouvette gêne les déformations transversales dans cette zone. Dans la partie centrale, la formation transversale est libre. Ce sont ces contraintes de traction qui aboutissent dans la zone centrale à la fissuration longitudinale de l'éprouvette, puis à sa ruine (Fig 62).

La totalité des éprouvettes écrasées dans cette étude prennent la forme d'un style parmi les quatre styles de rupture correcte, données par la norme EN 12390-3 (Fig 62,63), Donc les phases de préparation, confection et écrasements des éprouvettes s'est déroulés correctement.

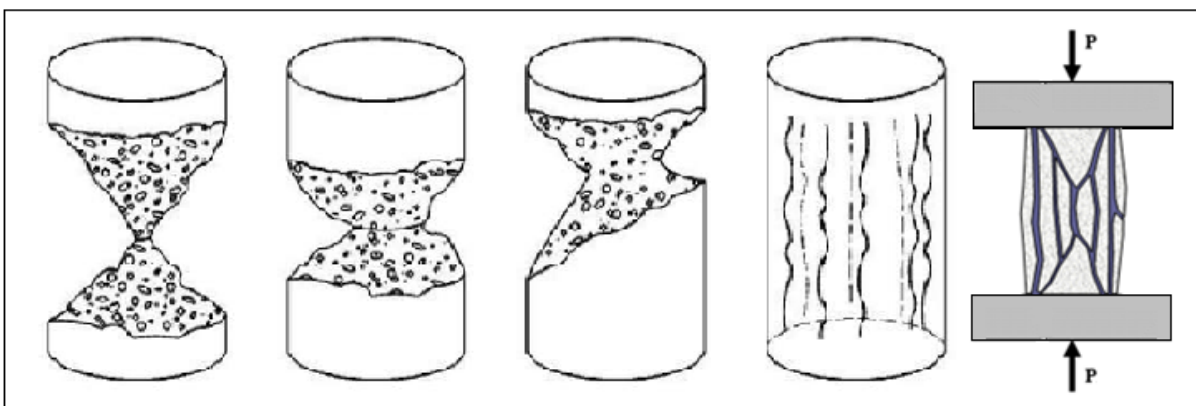


Figure 62 : Mode de rupture (correcte) des éprouvettes cylindriques en compression. (EN 12390-3 :2001)



Figure 63 : Écrasement des éprouvettes (compression simple).

Pour le cas de l'essai de traction indirecte, on applique à l'éprouvette un effort de compression induit des contraintes de traction (Fig 64 et 65).

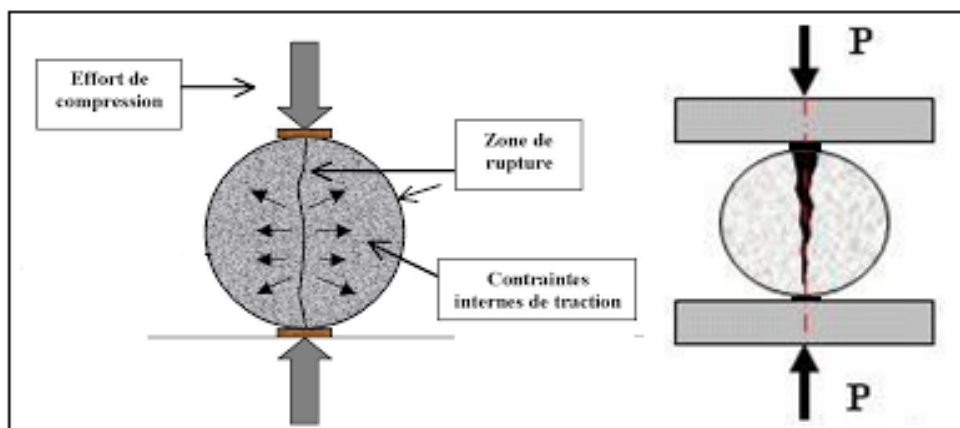


Figure 64 : Mode de rupture des éprouvettes cylindriques en traction.



Figure 65 : Écrasement des éprouvettes (traction indirecte).

### 3.2. Résultats de l'essai de résistance à la compression simple :

On peut voir sur la figure 66 les résultats d'essais de compression simple obtenus pour la marne étudiée et tous les dosages en chaux résiduaire, et sur la figure 67 les résultats obtenus sur les mélanges traités à la chaux commerciale. Ces figures montrent clairement que de manière générale tous les mélanges sol-chaux suivent la même allure de vieillissement.

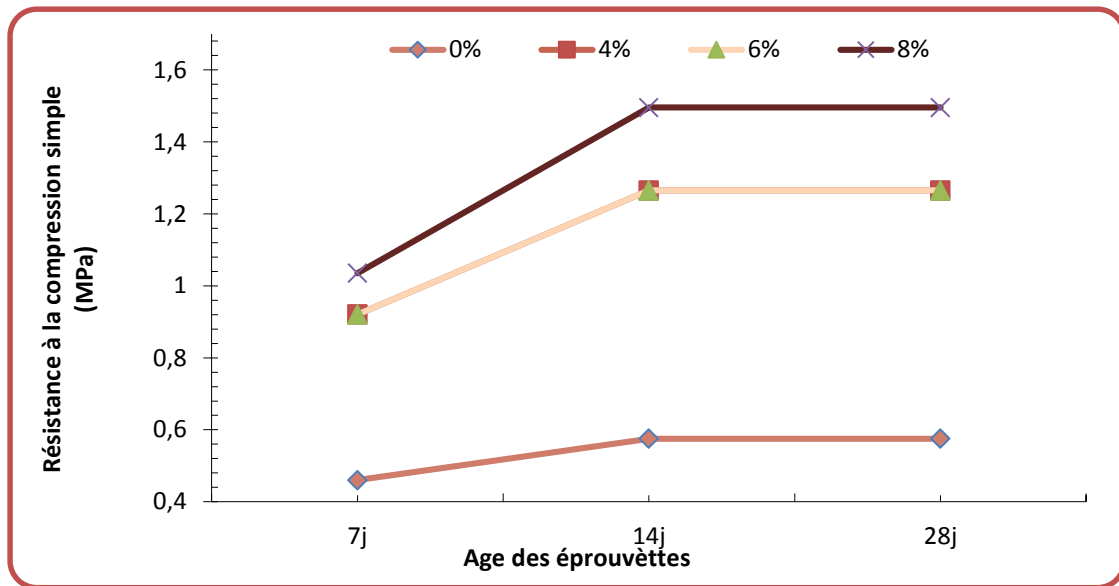
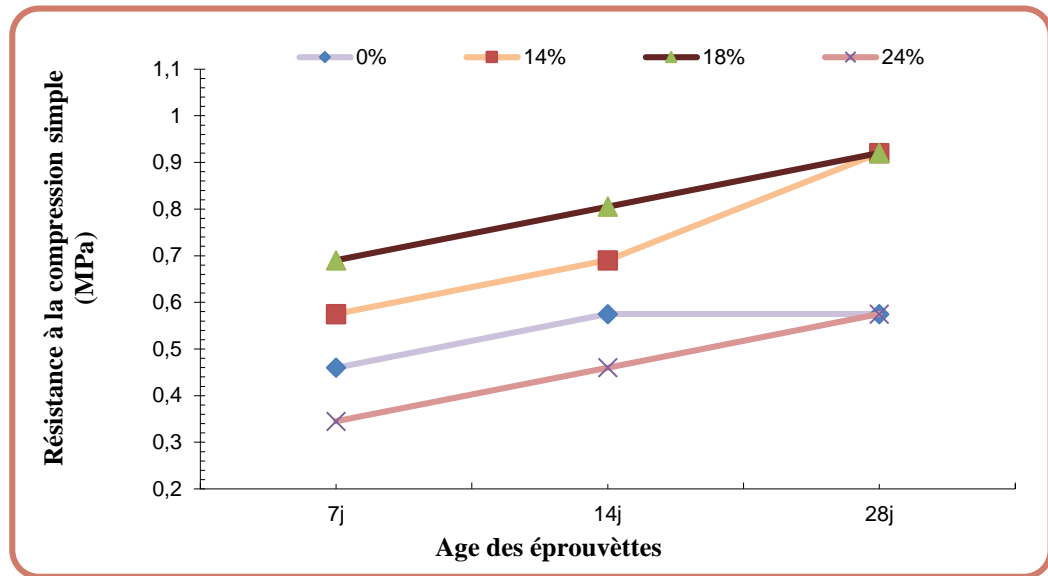


Figure 66 : Évolution de la résistance RC en fonction du temps pour la marne traitée à chaux résiduaire.

Logiquement, la résistance de tous les mélanges sol-chaux résiduaire augmente de manière très importante pendant les premiers jours puis elle atteint un plateau entre 14 et 28 jours. Pour un dosage en chaux résiduaire de 8 %, la marne présente une plus grande résistance que celui des autres dosages.



**Figure 67 :** Évolution de la résistance RC en fonction du temps pour la marne traitée à chaux commerciale.

Pour la chaux commerciale, c'est le dosage 24% qui donne la meilleure résistance. La chaux commerciale donne des valeurs en Rc faibles comparativement avec celle de la chaux résiduaire. Les différences de résistance sont dues à la composition chimique de la chaux résiduaire riche en éléments de silice et alumine.

Les histogrammes de la figure 68 et 69 montrent que pour un même dosage (exemple 8%), il y a une montée en résistance (Rc). Cette montée est importante de 7 à 14 j, et peu importante de 14 j à 28 j. En d'autres termes, la grande partie du durcissement a été faite entre 7 heures et 14 j. Pour le cas des autres dosages, on a constaté les mêmes remarques que celle du dosage de 8%.

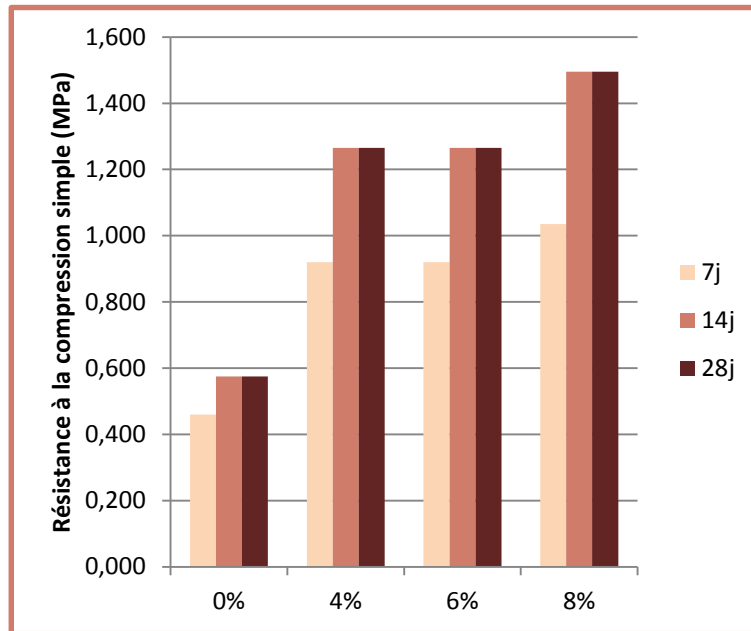


Figure 68 : Évolution de la résistance RC en fonction du dosage en chaux résiduaire.

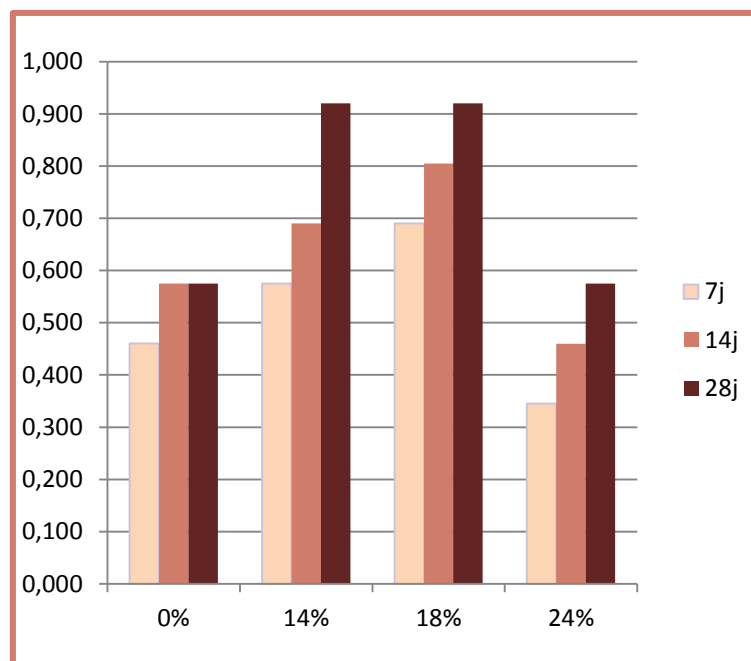


Figure 69 : Évolution de la résistance RC en fonction du dosage en chaux vive.

### 3.3. Résultats d'essai de résistance à la traction indirecte (Rtb) :

L'examen de l'évolution des résistances à la traction indirecte des marnes traités à avec les deux chaux permet de constater qu'il y a une grande analogie de cette évolution avec celle des résistances à la compression simple.

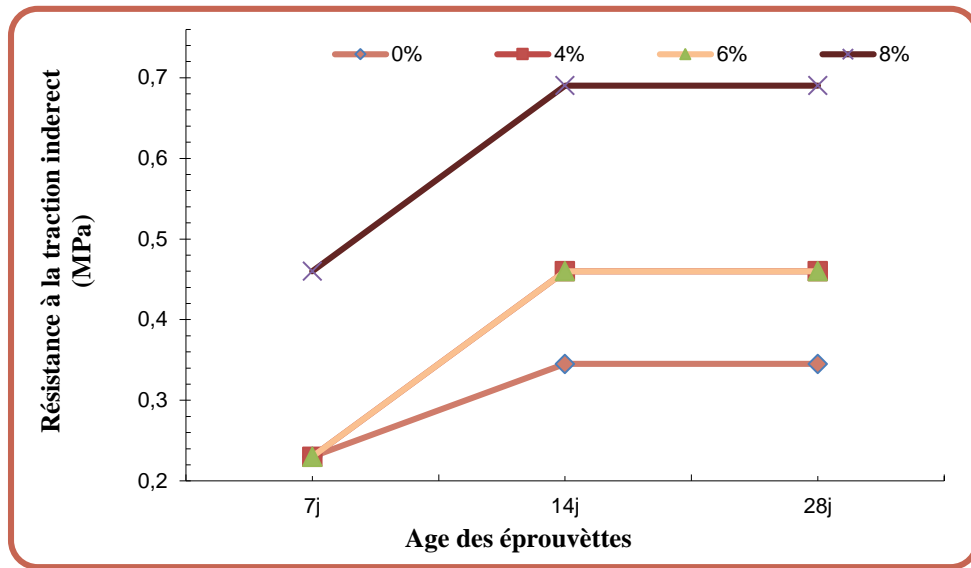


Figure 70 : Évolution de  $R_{tb}$  en fonction du temps pour la marne traitée à chaux résiduaire.

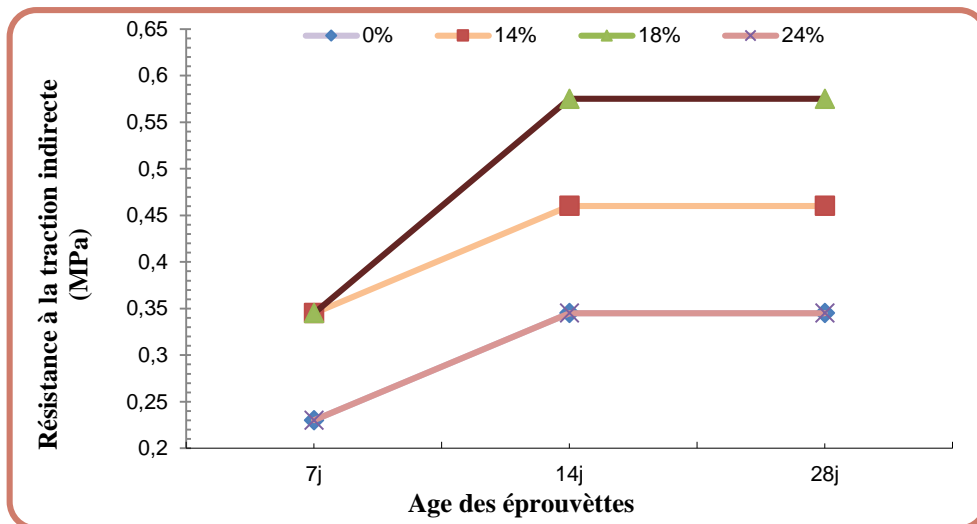


Figure 71 : Évolution de la résistance  $R_{Tb}$  en fonction du temps pour la marne traitée à chaux commerciale.

Les histogrammes de la figure 72 et 73 permettent de faire les mêmes conclusions que pour le cas de l'essai de compression simple.

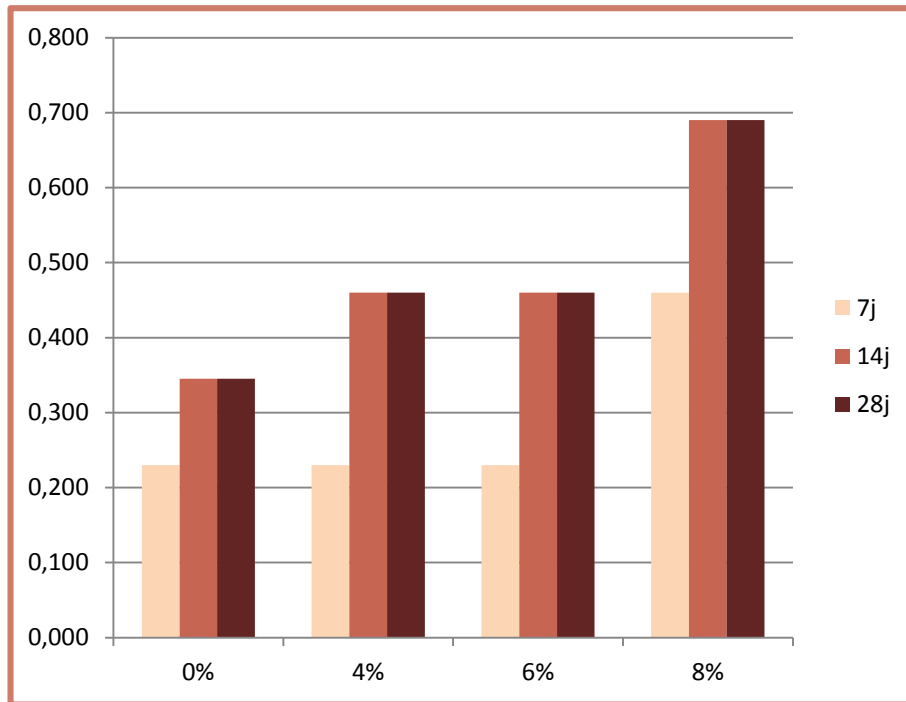


Figure 72 : Évolution de la résistance  $R_{tb}$  en fonction du dosage en chaux résiduaire.

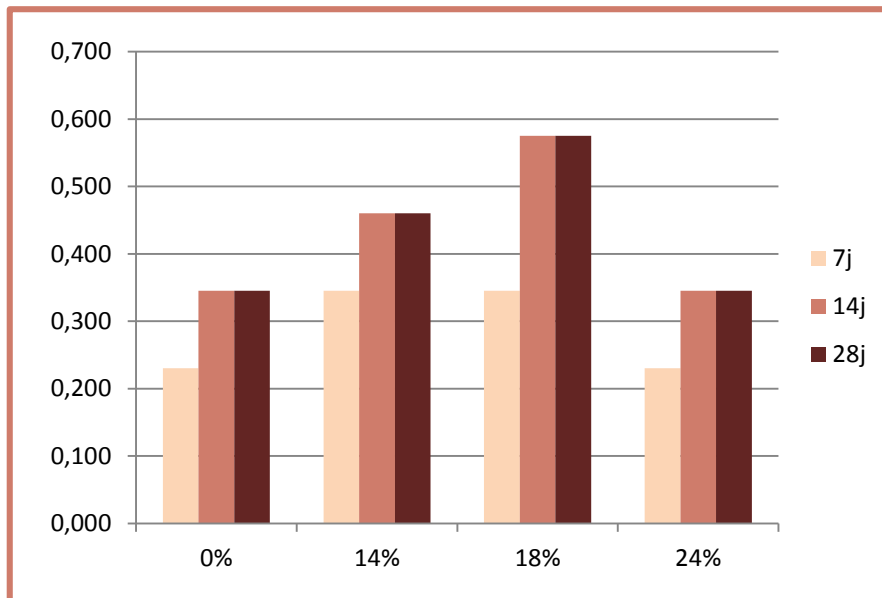


Figure 73 : Évolution de la résistance  $R_{tb}$  en fonction du dosage en chaux commerciale.



### 4. Possibilité d'utilisation des marnes traitées en CDF :

#### 4.1. Critères de jugement

Les critères de jugement sont les suivants :

- La CDF peut être circulée dès que  $R_c \geq 1$  MPa
- La résistance lors de l'apparition du gel :  $R_{tb} > 0,25$  MPa
- Les performances à long terme sont caractérisées par le couple  $R_t$  et  $E$ , qui permettent d'obtenir un classement mécanique des deux matériaux.

#### 4.2. Résultats de comparaison

La comparaison des résultats obtenus après traitement des marnes étudiées avec les valeurs des critères listés ci-dessus permet de souligner les points suivants :

- Le critère de traficabilité est satisfait dès 7 jours pour un traitement avec 8% de chaux résiduaire. Par contre, ce critère n'est pas satisfait pour le cas de la chaux commerciale ;
- Pour les deux chaux, le critère de résistance au gel est satisfait après 7 jours ;
- Concernant les performances à long terme, on a estimés les valeurs de  $R_t$  (Résistance à la traction directe) à partir des valeurs  $R_{tb}$  suivant la formule suivante :  $R_t = 0.8 R_{tb}$  (NF P 98-232-1). Cependant, l'obtention d'un classement mécanique des deux matériaux fait défaut car on n'a pas de valeurs de  $E$  (module élastique).

##### ○ Comparaison avec des matériaux naturels

Pour mieux analyser le comportement mécanique des matériaux étudiés, une comparaison avec les mêmes matériaux traités au ciment (Laifaoui et Saffidine, 2017) ainsi que d'autres matériaux traditionnellement réservés à la réalisation des couches de forme (Tufs calcaires) est recommandée (Benguedouad et Benaichouche, 2015).

D'après les études antérieures qui ont été réalisés sur le traitement des tufs calcaires, on peut faire les constatations suivantes :

- Les valeurs de  $R_c$  28 jours obtenus (1.53 MPa) sont très voisines de celle obtenues par un traitement de la même marne avec 6% de ciment (2 MPa) (Laifaoui et

Saffidine, 2017). Par contre, les valeurs de  $R_{tb}$  obtenus dans cette étude sont supérieures aux résultats obtenus par Laifaoui et Saffidine, 2017.

- Les valeurs de  $R_c$  28 jours obtenues sont très proches à celles obtenus par un traitement avec 5% de ciment des tufs provenant de Khelil ( $R_{c \text{ Khelil}} = 1.4 \text{ MPa}$ ,  $R_{c \text{ Belimour}} = 2.4 \text{ MPa}$ ). Pour ce qui est de  $R_{tb}$ , on peut dire que les valeurs obtenus sont nettement supérieures comparativement avec un traitement des tufs au ciment ( $R_{tb \text{ Khelil}} = 0.28$  et  $R_{tb \text{ Belimour}} = 0.37$ ) (Benguedouad et Benaichouche, 2015).

### Conclusion

D'après ces résultats on peut conclure qu'il est avantageux d'utiliser les marnes traitées avec 8% de chaux résiduaire en CDF. Des mesures de module élastique doivent être réalisées pour mieux comprendre le comportement de ces sols à long terme.



---

## Conclusion Générale

---



## **Conclusion générale**

Un travail expérimental a été mené pendant deux mois afin d'étudier le comportement mécanique des marnes traités à la chaux, à différents dosages et de comparer les résultats obtenus avec des résultats obtenus sur les mêmes marnes traités au ciment (Laifaoui et Saffidine, 2017).

Dans le premier chapitre, nous avons défini ce qu'est les sols évolutifs en général. Nous avons ensuite présentés tout au long de l'étude bibliographique quelques notions sur la construction routière et sur les techniques de traitement des sols dans la géotechnique routière.

Dans le deuxième chapitre, nous avons décrit de manière détaillée les moyens mis en œuvre et les protocoles et procédures développés pour répondre aux objectifs de notre projet. Notre programme expérimental et nos protocoles visant à créer et à étudier en laboratoire un matériau homogène que possible.

Dans le troisième et quatrième chapitre, nous avons mené une étude expérimentale au laboratoire de département de génie civil de notre université. Le matériau est constitué de sol et de liant : une attention toute particulière est à porter à la nature du sol et à sa granulométrie. De plus, de sa nature dépendra le type et la quantité de liant à utiliser. Les liants ne présentent en effet pas tous les mêmes performances : certains comme la chaux permettent d'obtenir une résistance élevée mais à long terme. Ensuite, toutes les étapes de réalisation et de conservation du matériau ont été décrites.

Le point a été mis sur l'utilisation de marnes traitées aux liants hydrauliques en CDF. Les résultats ont permis de démontrer que le traitement à la chaux résiduaire donne des résultats significatifs. En effet, la caractérisation mécanique, a montré qu'une formulation composée de la marne étudiée et 8% de ce déchet, présente des caractéristiques de portance et de résistance à la compression simple comparable avec celles obtenues dans le cas de traitement des mêmes marnes mais au ciment.

A l'issue de cette étude, nous pouvons conclure que les matériaux marneux traités de la région de Bordj Bou Arreridj ont présenté des résultats très intéressants vérifiant les conditions exigées par les spécifications. Ils peuvent par conséquent être proposés comme granulats routiers du moins dans le cas des chaussées de faible à moyen trafic.

Cette étude, peut-être d'un intérêt capital sur le plan économique et environnementale. Elle présente des matériaux dont les qualités sont très attirantes (disponibilité, propreté, économie d'extraction, économie de transport, ...) pour une exploitation routière.

**Perspectives :**

Les perspectives de ce travail sont nombreuses, tant le sujet est riche en sujets de recherche et en applications pratiques. En laboratoire, il serait intéressant de poursuivre l'étude en se focalisant sur les sols argileux du fait de la grande variété des minéraux. Le couplage eau – chaux est encore assez mal expliqué dans ces sols sensibles à l'eau. La détermination du dosage seuil de manière systématique sur un grand nombre de sols différents nous permettrait d'établir une classification des sols et de leur aptitude à être traité.

La durabilité du matériau est aussi une grande inconnue. Si les industriels veulent utiliser ces sols pour des utilisations différentes, il est nécessaire d'étudier son comportement dans le temps, dans des environnements différents. La prise du matériau et sa durabilité dans des milieux pollués (pour des parois étanches par exemple) pourront également faire l'objet d'une étude approfondie.

Enfin, Ceci n'est qu'une approche expérimentale de laboratoire, qui devra être confirmé par une expérimentation en vraie grandeur c.-à-d. construction d'une section de chaussée en marne traitée, et suivi de son comportement pour caler le comportement mécanique à long terme avec les résultats que nous avons obtenus.



---

## Référence Bibliographiques

---



## Références bibliographiques

### A

Amoura F; Maameri M .,(2014), Effet de la durée de cure sur la plasticité et sur les paramètres de cisaillement d'un sol fin argileux amélioré par la chaux , Université Hassiba Benbouali de Chlef.

Ayeche R., (2013), Valorisation de la chaux résiduaire, sous-produit de la fabrication d'acétylène, dans le traitement des eaux, Université Badji Mokhtar-Annaba.

### B

BARABET I ;( 2012) .le traitement des sols pour la couche de forme, plate-forme de chaussée. Mémoire de magister,

### C

Chebrak D, (2012). Étude du phénomène de l'orniérage de chaussées bitumineuse ; cas de la route nationale dans la wilaya de Tizi Ouzou. Mémoire de magister, université.

Couturier, J.P. (1986). Comment fabrique-t-on le carbure de calcium ? Revue trimestrielle des spéléologues du grand sud-ouest, N°37, septembre, pp.17-20.

### D

DERRICHE. Z, KEBAILI.M. (1998), Prévision du gonflement des argiles d'In-Aménas, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, **218**, novembre décembre, pp. 15-23.

Djelti, Abdelkader Zakaria; Hattou, Mohammed,(2009). Etude de la réhabilitation du chemin de wilaya CW54.Mémoire d'ingénieur, Tlemcen, université.

### H

Harr M.E., (1981), Mécanique des milieux formés de particules, Editions presses polytechniques romandes, Lausanne.

### I

Ikhlef N.,(2015),Comportement d'un matériau routier traite aux liants hydrauliques, Université Djillali Liabes-Sidi Be labbes.

### L

Laifaoui N Saffidine I.,(2017),Etude du comportement mécanique des marnes traitées aux liants hydrauliques : Expérimentations sur les sols de Bordj Bou Arreridj, Université Mohamed El Bachir Elibrahimi –Bordj Bou Arreridj.

LCPC, SETRA, (2000), Réalisation des remblais et des couches de forme ; Guide technique fascicule 1et2. 2éme édition. Paris.

LCPC, SETRA, Bagneux, 1998, Catalogue des structures types de chaussées neuves. Paris : ministres de l'équipement des transports et du logement.

## M

Marwana A ;Muangongo I.,(2014). Influence de la présence de sulfates sur le traitement du sol argileux par des ajouts minéraux , Université Djilali Bouanaama de Khemis Miliana.

Millot G., (1964) ,Géologie des argiles. Editions Masson (Paris) ; 499p.

## O

Oudni S.,(2017), Effet du traitement des sols limoneux par la chaux sur les caractéristiques de compactage, Université Larbi Ben M'hidi .Oum El Bouaghi .

## P

Pejon, o. J., le roux, a., & guignard, d. (1997). Comportement à l'eau des roches argilo-marneuses, suivi du gonflement, importance de la minéralogie et des textures. Bulletin of engineering geology and the environment, 55(1), 105-119.

## R

Ramasamy, P., Periathamby, A., Ibbrahim, S. (2002). Carbide sludge management in acetylene plants by using vacuum filtration, Waste Management and Research. Vol.20, N°6, pp.536-540.

## T

Tarek Ninouh et Ahmed Rouili Comportement des sols plastiques traités à la chaux (région de Tébessa).

## W

Walter, F., Ullmann, F. (1953). Acetylen in Enzyklopädie der technischen Chemie, Urban & Schwarzenberg, 3 Edition. Tome III, pp.43-65.

Whittington, B.I. (1996). The chemistry of CaO and Ca(OH)<sub>2</sub> relating to the Bayer process. Hydrometallurgy, Vol.43, pp.13-35.



Z

Zoubir W., (2009), Effet des résidus minéraux sur l'amélioration des sols argileux de la région de Chlef, Université Hassiba Ben-Bouali de Chlef.



---

## ANNEXE

---



**1) Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056) :**

**Les résultats des différents d'essais :**

**Echantillon : Masse=4000 g**

| <b>tamis<br/>D(mm)</b> | <b>refus partiel (g)</b> | <b>refus cumulé (g)</b> | <b>refus cumulé<br/>(%)</b> | <b>tamisât (%)</b> |
|------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------|
| <b>31,5</b>            | 0                        | 0                       | 0                           | 100                |
| <b>20</b>              | 419                      | 419                     | 10,475                      | 89,5               |
| <b>18</b>              | 244                      | 663                     | 16,575                      | 83,4               |
| <b>10</b>              | 460                      | 1123                    | 28,075                      | 71,9               |
| <b>6,3</b>             | 491                      | 1614                    | 40,35                       | 59,7               |
| <b>5</b>               | 216                      | 1830                    | 45,75                       | 54,3               |
| <b>3,15</b>            | 483                      | 2313                    | 57,825                      | 42,2               |
| <b>2</b>               | 446                      | 2759                    | 68,975                      | 31,0               |
| <b>1,25</b>            | 347                      | 3106                    | 77,65                       | 22,4               |
| <b>1</b>               | 132                      | 3238                    | 80,95                       | 19,1               |
| <b>0,08</b>            | 722                      | 3960                    | 99                          | 1                  |
| <b>fonds</b>           | 32                       | 3992                    | 99,8                        | 0,2                |

**2) Limites d'Atterberg (NFP 94-05120) :**

**Fraction 0/0.4mm**

**Limite de liquidité : WI = 34,39**

|                            | <b>ECH1</b> |       | <b>ECH3</b> |       | <b>ECH2</b> |       |
|----------------------------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
| <b>Nombre de chocs</b>     | 17          |       | 23          |       | 31          |       |
| <b>N° de la tare</b>       | 1           | 2     | 5           | 6     | 3           | 4     |
| <b>Poids totale humide</b> | 34,95       | 35,51 | 39,17       | 39,13 | 36,10       | 37,39 |
| <b>Poids totale sec</b>    | 30,69       | 32,11 | 34,84       | 34,77 | 32,40       | 33,58 |
| <b>Poids de la tare</b>    | 18,41       | 22,32 | 22,26       | 22,08 | 21,32       | 22,47 |
| <b>Poids de l'eau</b>      | 4,26        | 3,41  | 4,32        | 4,36  | 3,70        | 3,81  |
| <b>Poids du sol sec</b>    | 12,28       | 9,79  | 12,58       | 12,69 | 11,07       | 11,11 |
| <b>poids du sol humide</b> | 16,54       | 13,19 | 16,90       | 17,05 | 14,77       | 14,92 |
| <b>Teneur en eau (%)</b>   | 34,71       | 36,79 | 34,35       | 34,77 | 33,41       | 34,30 |
| <b>moyenne(%)</b>          | 35,62       |       | 34,56       |       | 33,86       |       |

**Limite de plasticité :  $W_p = 21.08\%$  ,  $I_p = 13.3$**

|                            | <b>ECH1</b> | <b>ECH2</b> |
|----------------------------|-------------|-------------|
| <b>N de la tare</b>        | <b>1</b>    | <b>2</b>    |
| <b>Poids totale humide</b> | 12,23       | 12,30       |
| <b>Poids totale sec</b>    | 11,87       | 11,96       |
| <b>Poids de la tare</b>    | 10,187      | 10,35       |
| <b>Poids de l'eau</b>      | 0,36        | 0,34        |
| <b>Poids du sol sec</b>    | 1,68        | 1,61        |
| <b>Teneur en eau (%)</b>   | 21,39       | 21,08       |
| <b>moyenne(%)</b>          | 21,235      |             |

**3) Proctor Normale (NF P 94-093) :**

**Fraction: 0/5 mm**

**Densité apparente sèche :**

| <b>Echantillon N°</b>           | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Eau ajoutée (%)</b>          | 10%      | 12%      | 14%      | 16%      | 18%      |
| <b>Poids totale humide (ph)</b> | 3558     | 3653     | 3694     | 3679     | 3619     |
| <b>Poids moule vide (PM)</b>    | 1700     | 1699     | 1700     | 1699     | 1700     |
| <b>Poids sol humide (Psh)</b>   | 1858     | 1954     | 1994     | 1980     | 1919     |
| <b>Volume du moule (V)</b>      | 940      | 940      | 940      | 940      | 940      |
| <b>densité sèche</b>            | 1,796    | 1,856    | 1,861    | 1,816    | 1,730    |

**Teneur en eau :**

| <b>N° de la tare</b>                 | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Poids totale humide (ph)</b>      | 105      | 77       | 94       | 86       | 86       |
| <b>Poids totale sec (Ps)</b>         | 98,38    | 69,43    | 86,242   | 77,573   | 76,473   |
| <b>Poids de la tare (po)</b>         | 18,074   | 10,243   | 22,251   | 22,455   | 21,76    |
| <b>Poids de l'eau (Pe= Ph-Ps)</b>    | 6,62     | 7,57     | 7,758    | 8,427    | 9,527    |
| <b>Poids du sol sec (pss=ps-po)</b>  | 80,306   | 59,187   | 63,991   | 55,118   | 54,713   |
| <b>Teneur en eau (%) (wi=pe/pss)</b> | 8,243    | 12,789   | 12,123   | 15,289   | 17,413   |

**Densité sèche max : 1.861**

**Teneur en eau optimal : 12.789 %**

**4) La résistance à la compression et à la traction indirecte (NF P 98-223-1) et (NF P 98-223-1) :**

- **Résultats d'écrasement du sol traité à chaux vive :**

**Fraction: 0/6.3mm**

Résistance à la compression en MPa

| <b>RC</b>  | <b>0%</b> | <b>14%</b> | <b>18%</b> | <b>24%</b> |
|------------|-----------|------------|------------|------------|
| <b>7j</b>  | 0,460     | 0,575      | 0,690      | 0,345      |
| <b>14j</b> | 0,575     | 0,690      | 0,805      | 0,460      |
| <b>28j</b> | 0,575     | 0,920      | 0,920      | 0,575      |

Résistance à la traction indirecte en MPa

| <b>RTb</b> | <b>0%</b> | <b>14%</b> | <b>18%</b> | <b>24%</b> |
|------------|-----------|------------|------------|------------|
| <b>7j</b>  | 0,230     | 0,345      | 0,345      | 0,230      |
| <b>14j</b> | 0,345     | 0,460      | 0,575      | 0,345      |
| <b>28j</b> | 0,345     | 0,460      | 0,575      | 0,345      |

- **Résultats d'écrasement du sol traité à chaux résiduaire :**

Résistance à la compression en MPa

| <b>RC</b>  | <b>0%</b> | <b>4%</b> | <b>6%</b> | <b>8%</b> |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>7j</b>  | 0,460     | 0,920     | 0,920     | 1,035     |
| <b>14j</b> | 0,575     | 1,265     | 1,265     | 1,495     |
| <b>28j</b> | 0,575     | 1,265     | 1,265     | 1,495     |

Résistance à la traction indirecte en MPa

| <b>RTb</b> | <b>0%</b> | <b>4%</b> | <b>6%</b> | <b>8%</b> |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>7j</b>  | 0,230     | 0,230     | 0,230     | 0,460     |
| <b>14j</b> | 0,345     | 0,460     | 0,460     | 0,690     |
| <b>28j</b> | 0,345     | 0,460     | 0,460     | 0,690     |