



**République Algérienne Démocratique  
Et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement supérieure  
Et de la recherche scientifique**  
**Université kasdi merbah ouargla**  
**Faculté de Mathématique et sciences de la Matière**  
**Département de chimie**

**Mémoire de master académique**  
Spécialité : chimie des produits naturels  
Présenté par : HABBI Safia  
Sous la direction de professeur : MEKHELFI Tarak  
Co-encadrement de professeur : ZAOUI Manel

**Thème**

**La stabilisation des sables dunaires en utilisant des  
matériaux locaux**

Soutenu publiquement

Le : 27/05/2025

Devant le jury :

BELFAR Mohamed el akhder  
MEKHALFI Tarak  
ZAOUI Manel  
ZENKHRI Louiza.

Professeur      Président  
Professeur      Encadreur  
Professeur      Co-encadreur  
Professeur      Examineur

UKM Ouargla  
UKM Ouargla  
UKM Ouargla  
UKM Ouargla

**Année Universitaire : 2024 /2025**

## ***DEDICACES***

*Je dédie ce mémoire*

*À toutes ma famille habbi*

*ET à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à accomplir*

*Ce travail.*

## **REMERCIEMENTS**

*On remercie DIEU le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de MKHELFY TARAK, on la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Mes remerciements vont également à Co-encadrement de ZAOUI MANEL, pour son suivi attentif, ses conseils judicieux et son accompagnement constant tout au long de ce travail.*

*Je tiens à remercier Monsieur BELFAR MOHAMED EL AKHDER, Professeur à l'Université Kasdi merbah ouargla, pour m'avoir fait l'honneur d'être Président du jury.*

*Mes remerciements vont également à MADAME ZENKHRI LOUIZA, professeur à l'université Kasdi merbah ouargla,*

*J'exprime mes sincères remerciements président d'ONDE ROUBAI  
MONIR NASREDDINE*

*A tout le personnel de :*

*Laboratoire des Sciences Appliquées de l'Université de Ouargla  
Mes remerciements les plus sincères vont particulièrement à Monsieur l'ingénieur Ali, pour sa disponibilité, ses conseils techniques  
Grand merci à tous ceux et toutes celles qui ont contribué de près ou de loin dans l'accomplissement de ce travail.*

# LISTE DES TABLEAUX

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1:Caractéristique des minéraux.....                        | 24 |
| Tableau 2: principales phase du ciment portland .....              | 36 |
| Tableau 3 : Composition chimique du clinker blanc et gris . .....  | 38 |
| Tableau 4: Résultas granulométriques de la bentonite étudiée. .... | 49 |
| Tableau 5: les données technique de ciment utilisé. ....           | 54 |
| Tableau 6: les conditions expérimentales. ....                     | 57 |
| Tableau 7: Résultats de la résistance à la flexion. ....           | 62 |
| Tableau 8: Résultats de la résistance à la compression.....        | 65 |

# LISTE DES FIGURES

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1: classification des liants.....                                          | 12 |
| Figure 2:Structure multi échelle de la montmorillonite.....                       | 17 |
| Figure 3:Structure de la montmorillonite.....                                     | 18 |
| Figure 4:Distribution de la charge dans la montmorillonite. ....                  | 19 |
| Figure 5 : Structure de la montmorillonite d'après Edelman. ....                  | 20 |
| Figure 6: Surface interne et externe des particules argileuses. ....              | 25 |
| Figure 7:Caractéristique colloïdale.....                                          | 25 |
| Figure 8: La formation de chaux vive.....                                         | 30 |
| Figure 9: Transformation du calcaire en chaux vive. ....                          | 30 |
| Figure 10: La formation de chaux éteinte. ....                                    | 30 |
| Figure 11: La chaux éteinte en poudre.....                                        | 31 |
| Figure 12: La chaîne de fabrication du ciment. ....                               | 35 |
| Figure 13: composition typique de ciment portland . ....                          | 36 |
| Figure 14: Courbe caractéristique de calorimétrie isotherme d'un ciment. ....     | 37 |
| Figure 15: Différents d'éléments minéraux. ....                                   | 39 |
| Figure 16 : sable de dune. ....                                                   | 44 |
| Figure 17: matériel d'essai d'analyse granulométrique . ....                      | 45 |
| Figure 18: Conditionnement et le site de bentonite ....                           | 47 |
| Figure 19: matériel d'essai analyses granulométriques.....                        | 48 |
| Figure 20: Chaux vive de GHERDAIA.....                                            | 53 |
| Figure 21: les matériaux utilisés.....                                            | 57 |
| Figure 22: la préparation des moules ....                                         | 58 |
| Figure 23: le remplissage des moules. ....                                        | 58 |
| Figure 24: l'appareille de choc. ....                                             | 59 |
| Figure 25: le marquage de l'éprouvette.....                                       | 59 |
| Figure 26: les éprouvettes à l'état finale.....                                   | 60 |
| Figure 27: le dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (3 points). .... | 60 |
| Figure 28: L'appareille De Test ....                                              | 61 |
| Figure 29: Les étapes de teste de flexion. ....                                   | 62 |
| Figure 30: Dispositif pour l'essai de résistance à la compression. ....           | 64 |
| Figure 31: Les étapes de teste de compression. ....                               | 65 |

# LISTE DES GRAPHS

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Grapshe 1: courbe granulométrique de sable de dune. ....                        | 45 |
| Grapshe 2: Courbe granulométrique de bentonite de MEGHNIA . ....                | 49 |
| Grapshe 3: Répartition des minéraux contenus dans le bentonite de MEGHNIA. .... | 51 |
| Grapshe 4: Analyse chimique de bentonite de Meghnia *oxydes* . ....             | 51 |
| Grapshe 5: Analyse chimique de bentonite de MEGHNIA *élément trace* . ....      | 52 |
| Grapshe 6: Résultats de résistance à la flexion. ....                           | 63 |
| Grapshe 7: Résultats de test de compression. ....                               | 66 |

# LISTE D'ABREVIATION

**A°** : Angströms

**CEC** : Capacité d'échange cationique

**Cu** : Coefficient d'uniformité de Hazen

**DRX** : Diffraction aux rayons X

**D** : Diamètre grand granulats

**W<sub>opm</sub>** : la teneur optimale en eau

**W<sub>L</sub>** : limite de liquidité

# SOMMAIRE

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| DEDICACES .....                                                  | i   |
| REMERCIEMENTS.....                                               | ii  |
| LISTE DES TABLEAUX.....                                          | iii |
| LISTE DES FIGURES .....                                          | iv  |
| LISTE DES GRAPHS.....                                            | v   |
| LISTE D'ABREVIATION .....                                        | vi  |
| SOMMAIRE .....                                                   | vii |
| INTRODUCTION .....                                               | 1   |
| CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....                          | 3   |
| I.1. Définition de sable.....                                    | 4   |
| I.2. Origine Des Sables .....                                    | 4   |
| I.3. Différents types de sable.....                              | 5   |
| I.3. 1. Les sables artificiels .....                             | 5   |
| I.3. 2. Les sables naturels.....                                 | 5   |
| A. Les sables marins.....                                        | 5   |
| B. Les sables fluviatiles.....                                   | 6   |
| C. Les sables éoliens .....                                      | 6   |
| D. Les sables du Sahara.....                                     | 6   |
| D.1. Sables alluvionnaires .....                                 | 6   |
| D.2. Sables de dunes.....                                        | 6   |
| D.3. Sables de regs .....                                        | 6   |
| I.4. Nature de sable dune.....                                   | 7   |
| I.4.1. Mécanismes De Formation .....                             | 7   |
| I.4.2. Types Des Dunes.....                                      | 7   |
| A. Les Avant-Dunes (Fore Dune Pour Les Anglophones).....         | 7   |
| B. Les Falaises Dunaires (Dune Cliff Pour Les Anglophones).....  | 7   |
| C. Les Dunes Perchees (Cliff-Top Dune Pour Les Anglophones)..... | 7   |
| D. Les Cordons Dunaires Artificiels .....                        | 7   |
| I.5. Classification des sables .....                             | 7   |

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| I .5.1. Granulométrie .....                             | 8  |
| I .5.2. Propreté .....                                  | 8  |
| I .5.3. Nature minéralogique.....                       | 8  |
| I .6. Propriétés mécaniques des sables .....            | 8  |
| I .7. Foisonnement des sables .....                     | 9  |
| I .8. Identification des sables de dunes du Sahara..... | 9  |
| I .8.1. Composition chimique .....                      | 9  |
| I .8.2. Granulométrie .....                             | 9  |
| I .8.3. Propreté .....                                  | 9  |
| I .8.4. Comportement mécanique .....                    | 9  |
| I .9. La stabilisation du sable .....                   | 10 |
| I .9.1. Différentes techniques de stabilisation.....    | 10 |
| I .9.1.1. Stabilisation mécanique .....                 | 10 |
| A. Compactage .....                                     | 10 |
| B. Drainage .....                                       | 11 |
| C. Substitution.....                                    | 11 |
| D. Application de fortes pressions.....                 | 11 |
| E. Pré-humidification.....                              | 11 |
| I .9.1.2. Traitement thermique .....                    | 11 |
| I .9.1.3. Stabilisation avec des additifs .....         | 12 |
| A. Hydrophobants .....                                  | 12 |
| B. Liants .....                                         | 12 |
| a. Liants hydrauliques.....                             | 13 |
| b. Liants organiques .....                              | 15 |
| I .10. Identification des matériaux utilisés .....      | 16 |
| I .10.1. Bentonite .....                                | 16 |
| I .1.1. Historique.....                                 | 16 |
| I .1.2. Structure de la Montmorillonite .....           | 17 |
| A. Structure multi échelle.....                         | 17 |
| B. Structure et composition.....                        | 17 |
| I .1.3. Applications de la bentonite.....               | 20 |
| I .1.4. Activation de la bentonite .....                | 21 |

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| A. L'Activation thermique .....                                                                                  | 21 |
| B. Activation chimique .....                                                                                     | 21 |
| C. Activation par échange de cations .....                                                                       | 22 |
| I .1.5. Propriétés physiques.....                                                                                | 23 |
| I.5 .1. Capacité d'échange cationique (CEC) .....                                                                | 23 |
| I .5.2. La surface spécifique.....                                                                               | 24 |
| I .5.3. Propriétés colloïdales .....                                                                             | 25 |
| I .5.4. La propriété de gonflement .....                                                                         | 26 |
| I .1.6. Les principales propriétés physiques de la bentonite qui la rendent adaptée à la fixation du sable ..... | 27 |
| A. Absorption d'eau.....                                                                                         | 27 |
| B. Comportement thixotrope.....                                                                                  | 27 |
| C. Cohésion et adhésion .....                                                                                    | 27 |
| D. Densité apparente faible .....                                                                                | 28 |
| E. Augmentation de la résistance au cisaillement .....                                                           | 28 |
| F. Formation d'une croûte physique.....                                                                          | 28 |
| I .10.2. La Chaux .....                                                                                          | 28 |
| I .1. Technique de stabilisation à la chaux.....                                                                 | 28 |
| I .2. Définition de chaux .....                                                                                  | 29 |
| I.2.1. La chaux vive .....                                                                                       | 30 |
| I.2.2. La chaux éteinte .....                                                                                    | 30 |
| 10.2.3. Utilisation de la chaux .....                                                                            | 31 |
| I.2.4. Stabilisation des sols à la chaux .....                                                                   | 32 |
| I .4.1. Modification des propriétés du sol.....                                                                  | 32 |
| I .4.2. Mécanismes de stabilisation à la chaux .....                                                             | 32 |
| I.10.3. Ciment portland.....                                                                                     | 33 |
| I.3.1. Rappel historique .....                                                                                   | 33 |
| I.3.3. Composition chimique du ciment portland .....                                                             | 35 |
| I.3.4. Mécanismes d'hydratation d'un ciment portland.....                                                        | 36 |
| I.3.5. Ciment blanc .....                                                                                        | 37 |
| I.5. 1.Choix des matières premières .....                                                                        | 38 |
| I.5. 2.Maîtrise de la couleur .....                                                                              | 39 |

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....                                | 40 |
| CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES .....                       | 43 |
| II.1. Sable.....                                                | 44 |
| II.1. 2.Analyse granulométrique : (NF P 18-540).....            | 44 |
| II.2. Bentonite .....                                           | 46 |
| II.2. 2.Origine de la bentonite utilisée .....                  | 46 |
| II.2. 2.Essais de caractérisation .....                         | 47 |
| II.2. 2.1. Analyse granulométrique.....                         | 47 |
| II.2. 2.2. Analyse minéralogique .....                          | 50 |
| II.2. 2.3Analyse chimiques.....                                 | 51 |
| II.3. Chaux .....                                               | 52 |
| II.3.1. Préparation de la chaux éteinte en laboratoire .....    | 53 |
| II.4. Ciment blanc .....                                        | 53 |
| II.3.1. COMPOSITION .....                                       | 53 |
| II.3.2. Données techniques .....                                | 54 |
| CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSIONS.....                     | 56 |
| III.1. La formulation d'un mortier modifié à la bentonite ..... | 57 |
| III.3. Confection et conservation des éprouvettes.....          | 57 |
| III.3.1. Préparation des matériaux .....                        | 57 |
| III.3.2. Préparation des moules.....                            | 57 |
| III.3.3. Préparation de mélange et remplissage des moules.....  | 58 |
| III.3.3. Serrage par appareillage de choc :.....                | 58 |
| III.3.3. Marquage.....                                          | 59 |
| III.4. Résistances mécaniques :.....                            | 60 |
| III.4.1. Résistance à la traction par flexion NFP18-407 .....   | 60 |
| III.4.1.1. L'appareillage de test.....                          | 60 |
| III.4.1. Résistance à la compression .....                      | 64 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....                                | 67 |
| CONCLUSIONS.....                                                | 68 |

# INTRODUCTION

Le Sahara représente plus de trois quarts de la superficie du territoire algérien. L'un des environnements les plus complexes pour la mise en œuvre de projets d'aménagement et de construction, en raison de leurs conditions géologiques et climatiques extrêmes. L'un des défis majeurs dans ces régions est l'abondance des dunes de sable, qui entravent considérablement la réalisation des infrastructures telles que les routes, les bâtiments et autres ouvrages civils. Le sable saharien, notamment celui des dunes, se caractérise par une granulométrie fine, une très faible cohésion et une résistance mécanique réduite, ce qui le rend inadapté, en l'état naturel, aux travaux de construction sans amélioration préalable de ses propriétés.

Dans ce contexte, la stabilisation des sables devient une nécessité technique et économique incontournable. Elle vise à renforcer les caractéristiques physiques et mécaniques du sable pour permettre son utilisation dans diverses applications de génie civil. La problématique à laquelle cette étude tente de répondre est la suivante : Comment améliorer les performances mécaniques des sables dunaires du Sahara en utilisant différents stabilisants tels que la bentonite, la chaux et le ciment blanc ? Quelle est la solution la plus efficace en termes de performance ?

Ce travail de recherche s'inscrit dans une démarche visant l'amélioration des propriétés géotechniques des sols sableux, reconnus pour leur faible cohésion, leur grande perméabilité et leur susceptibilité à l'érosion éolienne. Dans cette optique, l'utilisation de matériaux locaux tels que la bentonite, la chaux et le ciment est proposée comme solution de stabilisation. L'objectif principal de cette étude est de déterminer les proportions optimales de ces additifs afin d'améliorer significativement les caractéristiques mécaniques du sable, notamment la résistance au cisaillement, la compacité et la réduction de la perméabilité. Ce travail s'insère dans une logique de développement durable, en proposant une méthode accessible, économiquement viable et applicable in situ pour la lutte contre l'ensablement et la valorisation des sols dans les régions arides.

L'intérêt scientifique et pratique de cette recherche réside dans sa contribution à l'ingénierie des sols en milieux arides, à la lutte contre la désertification, ainsi qu'à la réduction des coûts liés aux matériaux importés. Elle offre également des perspectives concrètes pour l'aménagement durable et la réhabilitation des sols sablonneux.

Bien que plusieurs études antérieures aient exploré la stabilisation des sols à l'aide de la chaux ou du ciment, peu d'entre elles ont porté une attention particulière à la bentonite. Cela confère à cette étude un caractère novateur et pertinent pour les contextes sahariens et similaires.

Pour l'obtention de ces objectifs notre travail est composé de trois chapitres :

- Le premier chapitre est une présentation des différents types de sable, et les différentes méthodes de stabilisation de sable, ainsi que les de matériaux utilisé.
- Dans le deuxième chapitre on traitera les différentes caractéristiques physiques des matériaux utilisés pour la stabilisation de sable
- Le troisième chapitre est présente la formulation et préparation du mélange, ainsi que les différents essais et la discussion de l'ensemble des résultats obtenus.
- Enfin, une conclusion générale qui reprendra les principaux résultats dégagés de cette étude, suivi de recommandations pour d'éventuelle développement de ce présent travail.

# CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

## **I.1. Définition de sable**

Le sable est un matériau granulaire naturel ou artificiel constitué de particules de roche désintégrée, dont la taille varie généralement entre 80 micromètres ( $\mu\text{m}$ ) et 5 millimètres (mm). Cette plage de dimensions peut varier légèrement en fonction des normes et classifications adoptées dans différents pays et domaines d'application [1].

## **I.2. Origine Des Sables**

Les sables rencontrés sont le résultat d'une décomposition chimique ou d'une désintégration mécanique des roches suivies par un processus de transport qui est à l'origine de leurs caractéristiques physico-chimiques [3].

Les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation. Il comporte, à des degrés divers, une décomposition sur place des différentes roches suivie d'un transport fluvial et parfois éolien. Les différents processus qui conduisent de la roche massive aux sables sont suffisamment agressifs vis-à-vis des minéraux pour que seul subsistent les plus résistants ; c'est ainsi que la plus grande partie des formations sableuses est constituée de quartz qui devient de plus en plus abondant à mesure que la taille des grains décroît. La fraction comprise entre 0,2mm et 0,5mm est le plus souvent constituée de quartz à plus de 75% [3].

Selon l'importance et la nature de leur transport, ces grains de sable peuvent présenter un aspect différent :

- Grains émoussés et luisants (usure due au déplacement par l'eau).
- Grains ronds et mats (déplacement par le vent).
- Grains non usés.

A côté du quartz, on trouvera dans la fraction la plus grossière des débris de roche et de feldspath ; ce dernier est présent, en faible quantité, sous forme d'argile obtenue par destruction du réseau minéral par hydrolyse. En climat tropical, il est particulièrement caractérisé par une attaque chimique intense.

A cette composition classique des sables, peuvent s'ajouter des sulfates et des carbonates provenant de la cristallisation sous l'action de l'évaporation de sels en solution (en particulier dans les zones arides à faible pluviosité et forte évaporation).

Selon leur histoire géologique, les sables se distinguent les uns des autres par une multitude d'aspects : granulométrie, teneur, nature et caractéristiques des fines,

composition chimique, pétrologique et minéralogique, forme des grains, dureté, présence de matières humiques...etc.

Tous ces aspects sont d'inégale importance dans l'optique d'un usage routier et les classifications fonctionnelles reprendront les aspects les plus utiles [2].

### **I.3. Différents types de sable**

Indépendamment de leur origine minéralogique, les sables se différencient par un grand nombre de paramètres, on distingue deux catégories de sables :

- Les sables naturels.
- Les sables artificiels (issus d'une chaîne d'élaboration) [4].

#### **I.3. 1. Les sables artificiels**

Ce sont des matériaux produits dans une chaîne d'élaboration de granulats, et qui peuvent être soit :

- Des sables roulés de dessablage qui résultent du criblage primaire d'un tout-venant.
- Des sables de concassage obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires.

Ils présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres :

Origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage, ...etc. Les sables concassés sont de plus en plus utilisés en technique routière [4].

#### **I.3. 2. Les sables naturels**

Ce sont des matériaux qui existent, dans certaines régions, en abondance dans la nature. Ils sont le résultat d'un processus complexe d'érosion et de sédimentation. Leur formation s'effectue en trois étapes successives : la décomposition sur place des différentes roches suivie d'un transport qui les amène à un dépôt où ils demeurent sous différentes formes. Les plus rencontrés et les plus connus sont :

##### **A. Les sables marins**

Les sables marins sont caractérisés :

- Par leur composition minéralogique ; matériaux silicatés ou carbonatés (sables siliceux ou calcaires) ;
- Par leur origine ; matériaux provenant de l'érosion de roches cristallines ou sédimentaires (sables terrigènes).
- Les matériaux issus de la fragmentation et du remaniement d'organismes après leur mort (sables biogènes ou coquilliers).

Les sables marins se caractérisent par leur petite taille de forme anguleuse [5].

### **B. Les sables fluviaux**

On les trouve dans les fleuves et les rivières et éventuellement sur leurs côtes. Ce sont des restes d'altération transportés par ces cours d'eau et déposés avant d'atteindre la mer. En raison de la courte distance de transport, les grains de ces sables sont plus grossiers, mal concassés et présentent une forme anguleuse et un aspect très rugueux [2].

### **C. Les sables éoliens**

Ils sont constitués de grains de sable d'origine quelconque et se trouvent dans plusieurs régions du désert sous forme de dunes qui occupent de vastes surfaces (exemple de sud algérien). Leur origine est très différente ; ils sont pris et déposés par le vent. Ils se caractérisent par une granulométrie uniforme de taille moyenne (inférieure à 5 mm), de grains arrondis et dépolis à cause de nombreux chocs entre eux. La vitesse du vent, son pouvoir portant ainsi que les distances de transport sont les seuls facteurs qui déterminent la taille des grains [3, 2].

### **D. Les sables du Sahara**

Le sable est l'un des matériaux les plus abondants au Sahara et parfois le seul dans de vastes zones. Les sables sahariens les plus rencontrés et les plus connus sont [6, 7].

#### **D.1. Sables alluvionnaires**

Les sables de rivière rencontrés se trouvent soit dans des oueds à écoulement fréquent de la bordure de l'Atlas (Oued de Messaâd à Djelfa), soit dans des lits d'anciens oueds dont l'écoulement remonte à des époques géologiques antérieures. Les principaux types retenus pour les usages routiers sont les suivants:

- Sable graveleux ou non à granulométrie assez étalée et avec fines (15 à 30 %).
- Gros sable de préférence graveleux à granulométrie étalée pour enrobés.

#### **D.2. Sables de dunes**

On les trouve dans les dunes mouvantes ; ils sont composés de particules siliceuses. Pratiquement de même taille et de petites dimensions. Ces sables sont accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable. Les dunes sont constituées de sable plus ou moins fin, à granulométrie serrée ou très serrée [6].

#### **D.3. Sables de regs**

Le reg est une formation de surface qui recouvre de vastes zones plates ou à relief très mou. L'action du vent a balayé le sable fin et enrichi la surface d'éléments plus gros tels les cailloux, gravier, gros sable, qui se trouvent disposés d'une manière régulière [2].

## **I.4. Nature de sable dune**

### **I .4.1. Mécanismes De Formation**

Les dunes se forment dans des zones où le sable est abondant et non fixé par la végétation (désert, plage, lit fluvial à l'étiage). Le sable est érodé et pris en charge par le vent (déflation). Il est transporté aux ras du sol par saltation, puis s'accumule quand la compétence du vent chute (versant sous le vent). Une dune peut se déplacer par érosion du versant au vent et accumulation sur le versant opposé [9].

### **I .4.2. Types Des Dunes**

#### **A. Les Avant-Dunes (Fore Dune Pour Les Anglophones)**

Qui sont des bourrelets plus ou moins fixés par la végétation (oyats par exemples), Parallèles au trait de côte et solidaire de la plage, c'est à dire échangeant du sable avec elle, dans un même système sédimentaire. À ne pas confondre avec une ancienne arrière dune en cours d'érosion, ou avec une dune formée par du sable venant de terre sur un secteur ou un avant-dîner actif ne pourrait pas se former. En Espagne et en Tunisie, ces avant-dunes sont systématiquement considérées comme faisant partie du domaine public maritime, ce qui facilite leur protection. L'avant dune se forme à partir de fixation du sable en haut de plage, par des plantes pionnières spasmophiles.

#### **B. Les Falaises Dunaires (Dune Cliff Pour Les Anglophones)**

N'est pas une vraie dune mais un profil résultant de l'érosion marine d'une dune ancienne fixée par une pelouse ou un boisement qui ont été à l'origine de la formation d'une couche d'humus ou de sol sableux.

#### **C. Les Dunes Perchees (Cliff-Top Dune Pour Les Anglophones)**

Qui apparaissent au sommet d'une falaise vive ; alimentée en sable par le vent à partir de l'estran, voire à partir du profil de pente, quand il s'agit d'une falaise Dunaire.

#### **D. Les Cordons Dunaires Artificiels**

Qui sont construits de main d'homme, généralement comme élément de protection contre la mer ou d'une zone cultivée et/ou construite. Ils Nécessitent un entretien permanent, sans lequel ils se désintègrent en quelques décennies. Certains cordons sont semi-naturels (ex : avant-dunes plus ou moins dégradés rectifiées par des engins et fixées par des oyats à Sangatte dans le nord de la France) [9].

## **I .5. Classification des sables**

Ils ont classé les sables selon trois paramètres [10] :

**I .5.1. Granulométrie**

Elle permet de séparer les sables en trois catégories :

- Sables fins : plus de 75% des éléments supérieurs à  $80\mu\text{m}$ , sont inférieurs à  $0,5\text{mm}$   
Ces sables doivent être notablement corrigés pour acquérir des propriétés comparables à celles des graves.
- Sables moyens : Moins de 20% des éléments sont supérieurs à  $2\text{mm}$  et plus de 50% des éléments supérieurs à  $80\mu\text{m}$  sont compris entre  $0,2$  et  $2\text{mm}$ .
- Sables grossiers : Plus de 20% des éléments sont supérieurs à  $2\text{mm}$  et plus de 50% des éléments supérieurs à  $80\mu\text{m}$  sont compris entre  $0,5$  et  $5\text{mm}$ . Ces sables ont des propriétés qui se rapprochent des graves.

**I .5.2. Propreté**

La propreté d'un sable est une caractéristique déterminante ; elle est appréciée soit par l'essai d'équivalent de sable, soit l'essai au bleu de méthylène. Afin de donner des limites pour chaque type de sable, le deuxième essai est plus précis, car il est réalisé sur la totalité du sable en écrétant toute fois le matériau à  $6,3\text{mm}$ . Le résultat obtenu doit être exprimé en gramme de bleu [10].

**I .5.3. Nature minéralogique**

En général, les sables peuvent être classés comme suit [10] :

- Sables siliceux.
- Sables silico-calcaires.
- Sables calcaires

**I .6. Propriétés mécaniques des sables**

- Les sables constituent un matériau pulvérulent, c'est-à-dire sans cohésion propre du moins à l'état sec.
- Lorsqu'il est humidifié, il y apparaît trois phases : sable, air et eau.
- Les forces capillaires par mouillage des éléments solides au contact de l'élément liquide, et formation de ménisques à l'intérieur des capillaires, donnent un système cohérent, capable de supporter les efforts de cisaillement et de traction.
- Si le sable est gorgé d'eau, il n'y a plus que deux phases : sable et eau. On retrouve les propriétés des systèmes pulvérulents, résultant de la viscosité de l'eau qui d'ailleurs est relativement faible [2].

## **I.7. Foisonnement des sables**

Dans le cas des mélanges nécessitant l'eau pour le malaxage ou l'hydratation, on doit tenir compte de la présence d'humidité dans les granulats. Pour une correction des proportions dans la composition finale, on doit soustraire de la masse d'eau ajoutée au mélange, la masse d'eau libre contenue dans les granulats ; la masse des granulats humides doit être augmentée de cette même quantité. Dans le cas des sables, on assiste à un second effet de présence d'humidité : le foisonnement ; il s'agit de l'augmentation de volume d'une masse donnée de sable due à des films d'eau repoussant les particules des sables les uns des autres. Alors que le foisonnement en soi n'affecte pas les proportions massiques des matériaux dans le cas où ces proportions sont déterminées en volume, le foisonnement a pour effet qu'une plus petite masse de sable occupe le volume prévu [2].

## **I.8. Identification des sables de dunes du Sahara**

### **I.8.1. Composition chimique**

Ce sont des sables dont la composition chimique est très simple : plus de 95 % de silice, de 1 à 2 % de calcaire et des traces de différents oxydes. Du fait de cette constitution, le sable a une couleur blanche légèrement jaune et ocre ; il se dessèche et perd facilement sa cohésion en surface [4] .

### **I.8.2. Granulométrie**

Le diamètre des plus gros éléments des sables de dunes du Sahara est de l'ordre de 0,5 mm. Il est maximal aux endroits les plus proches de la roche mère et diminue de plus en plus quand on s'en éloigne. Les particules deviennent aussi de plus en plus arrondies. Le diamètre des éléments les plus fins est de l'ordre de 0,04 mm. Le coefficient d'uniformité ( $C_u = D_{60}/D_{10}$ ) est de l'ordre de 1,8 (inférieur à 2 ; granulométrie serrée), le coefficient de courbure ( $C_c = D_{30}^2/[D_{10}.D_{60}]$ ) est de l'ordre de 10 (mal gradué). Il s'agit donc d'un sable très fin mal gradué [11] [4] .

### **I.8.3. Propreté**

Le sable de dune ne contient pratiquement pas de traces d'argile. Il a une limite de liquidité  $W_L$  de l'ordre de 25 % et une limite de plasticité non mesurable. La valeur de l'équivalent de sable est supérieure à 60 %. La valeur de bleu de méthylène est de l'ordre de 0,1 [12 ,4].

### **I.8.4. Comportement mécanique**

Des essais de compactage puis de cisaillement direct ont été réalisés sur des sables de dune, Les principaux résultats trouvés sont que :

- L'effet de la teneur en eau sur le compactage est peu significatif quand la teneur en eau est faible (0 à 6 %) ;
- La cohésion a une valeur très faible, de l'ordre de 5 KPa.
- L'angle de frottement interne varie de 30 à 35°, selon la densité du sable.
- L'indice portant CBR de ces sables, au poids volumique et à la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié, est relativement faible. Il est de l'ordre de 10 %. C'est ce qui permet, entre autres, d'écarter toute possibilité d'utilisation de ces sables seuls en corps de chaussée [12].

## **I .9. La stabilisation du sable**

La stabilisation du sable est une technique visant à améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques des sols sableux pour divers usages dans la construction, l'agriculture et la gestion environnementale. Les sables, caractérisés par leur faible cohésion et capacité portante, posent des problèmes tels que l'érosion et l'instabilité des structures. Pour surmonter ces limites, différentes méthodes de stabilisation ont été mises en place, incluant l'utilisation de liants chimiques, l'ajout de matériaux naturels ou synthétiques, et des traitements biologiques. Cette technique est essentielle pour la construction d'infrastructures et contribue également au développement durable en optimisant l'utilisation des ressources locales

### **I .9.1. Différentes techniques de stabilisation**

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue :

- La stabilisation mécanique ;
- La stabilisation thermique ;
- La stabilisation chimique, (par additifs) [13].

#### **I .9.1.1. Stabilisation mécanique**

##### **A. Compactage**

Le compactage est une étape importante de la stabilisation. Un simple compactage permet de réduire la porosité du sol en expulsant l'air emprisonné.

Les caractéristiques optimales de compactage du sol sont déterminées par l'essai Proctor normal. Les caractéristiques mesurées, c'est-à-dire la teneur optimale en eau ( $W_{opt}$ ) permettant l'obtention de la densité sèche du sol la plus élevée est utilisée lors des études de la stabilisation et aussi lors du chantier.

La granulométrie, la morphologie des particules du sol, l'abrasivité et la teneur en argile, ont une influence sur le comportement du sol lors du compactage. En raison de leur petite

taille (quelques microns) les particules d'argiles permettent d'augmenter la densité sèche du sol en comblant sa porosité. Le comportement du sol dépend de la teneur en argile.

Dans le cas des sols fins, un simple compactage ne permet pas de garantir les caractéristiques de la couche de forme. La cohésion est avant tout liée à la présence d'eau : c'est un phénomène de tension superficielle qui lie les particules du sol.

Les caractéristiques de la couche de forme sont donc tributaires de la teneur en eau du sol. Cette cohésion ne crée pas de liaison suffisamment solide entre les particules pour s'opposer au gonflement des argiles. L'utilisation d'agents chimiques permettant une stabilisation irréversible est donc nécessaire. Plusieurs produits existent et sont couramment employés [13].

### **B. Drainage**

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

### **C. Substitution**

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

### **D. Application de fortes pressions**

Le gonflement peut être évité en appliquant au sol des pressions supérieures à la pression de gonflement. Il s'agit de pression de gonflement réelle, c'est-à-dire correspondant à la pression limite minimum nécessaire pour empêcher le sol de gonfler par des chemins de contraintes réelles, in situ, cette pression peut être appliquée soit par l'édifice lui-même, soit par des surcharges qui sont généralement des remblais des sols non gonflants.

### **E. Pré-humidification**

On crée ainsi un gonflement avant construction et si une forte teneur en eau est Maintenue. Le volume restera sensiblement constant par la suite. Deux techniques sont utilisées :

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

### **I.9.1.2. Traitement thermique**

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

### I.9.1.3. Stabilisation avec des additifs

Les propriétés d'un sol peuvent être modifiées par l'ajout de certains additifs. Ces derniers sont classés en deux grandes familles :

- Les hydrophobants;
- Les liants.

#### A. Hydrophobants

Les hydrophobants sont des produits dérivés amines des composés cationiques (par exemple : les amines aromatiques, les amines aliphatiques,). Les caractéristiques des hydrophobes permettent les variations de la teneur en eau en rendant le sol insensible à l'eau quelles que soient les conditions extérieures. L'absorption d'un produit hydrophobe se traduit par deux effets :

- Diminution momentanée ou définitive de l'affinité du sol pour l'eau ; Ce qui a pour conséquence d'accroître la résistance mécanique du sol et la réduction du gonflement.
- Diminution de la structure microscopique du sol.

#### B. Liants

Les liants se divisent en deux grandes familles qui sont les liants hydrauliques et les liants organiques.

Le schéma suivant donne les principaux liants existants dans l'industrie.

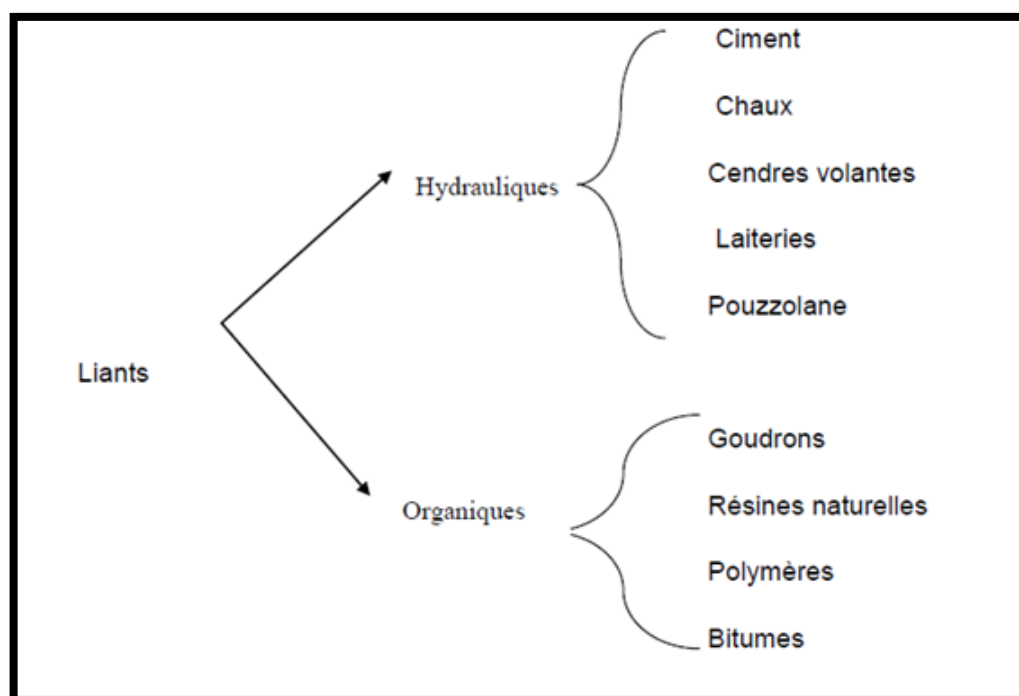


Figure 1: classification des liants.

**a. Liants hydrauliques**

Ce sont des produits d'origine minérale qui par réaction avec l'eau donnent des réseaux cristallins enchevêtrés ayant une bonne cohésion et pouvant aboutir à des jonctions avec le Squelette minéral. Ils sont tous à base de chaux qui réagit avec l'argile par :

- Echange cationique ;
- Flocculation et agglomération ;
- Carbonations ;
- Réaction pouzzolanique.

Ces réactions se traduisent par :

- Une amélioration immédiate des propriétés mécaniques du sol et une diminution de la sensibilité à l'eau par flocculation et échange cationique.
- Une réaction lente produisant les matériaux cimentant. C'est la réaction pouzzolanique.

**1. Stabilisation par ajout du ciment**

L'action, de stabilisation par les ciments, est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau et des conditions de température. De plus, la présence de la chaux dans les ciments provoque des réactions d'échange. Les pourcentages utilisés varient, comme pour la chaux, de 2 à 6%. Le ciment est parmi les liants les plus fréquemment utilisés dans le traitement de sols de surface.

**2. Stabilisation par les cendres volantes**

Les cendres volantes, produites dans la combustion des charbons bitumineux, présentent des caractéristiques de cimentage et peuvent être utilisées dans une large gamme des applications de stabilisation.

Le traitement de cendres volantes peut efficacement réduire le potentiel de gonflement des argiles fortement plastique et empêcher le gonflement sous les pressions plus petites de base.

**3. Stabilisation par la chaux**

La stabilisation par ajout de chaux est la technique de traitement des sols la plus répandue. L'utilisation de cette technique permet :

- D'éviter des volumes de terrassement importants dans le cas de substitution des sols médiocres.

- De donner aux sols argileux d'une manière assez rapide une bonne consistance pour des dosages compris entre 1% et 2%. Ceci montre aussi l'intérêt économique de ce procédé.
- De modifier les propriétés du sol.
- Sachant qu'il y a deux types de chaux, vive et éteinte, le choix s'effectue en basant sur les essais de laboratoire, les essais de chantier et sur le prix de revient. Généralement, c'est la chaux vive qui est préférée car elle fournit plus d'ions de  $\text{Ca}^{2+}$ , elle donne un produit plus dense et un abaissement de la teneur en eau important.
- Il est clair que c'est la phase argileuse du sol qui réagit avec la chaux. La qualité du résultat dépend des engins utilisés dans le traitement. L'expérience a montré que suite à un traitement, certaines modifications se produisent sur les caractéristiques du sol
- Diminution de la teneur en eau du mélange de 0.6% à 0.8% pour 1% de chaux Additivement à l'échange de cations  $\text{Na}^{+}$  et  $\text{K}^{+}$  par  $\text{Ca}^{2+}$  et la floculation des particules argileuses provoquée par les forces électriques, les limites de consistance changent.
- L'ajout de chaux, en réduisant la plasticité des sols par une augmentation immédiate de la limite de plasticité et une diminution de la limite de liquidité, produit des structures maniables et faciles à compacter. La quantité optimale pour avoir ces changements est appelée point de fixation de la chaux. Au-delà de ce point, des processus de formation de divers ciments se produisent augmentant la résistance du sol.
- De nombreuses études ont montré que la stabilisation des sols argileux par la chaux transforme ces derniers en sols fermes et améliore leur résistance, leur perméabilité et stabilise leurs volume après gonflement et retrait. Les mécanismes responsables de ces changements se résument selon un grand nombre d'auteurs est :
- **Échange cationique**  
L'addition de chaux engendre un excès de cations de calcium divalents qui tendent à remplacer les cations monovalents ( $\text{Na}^{+}$  et  $\text{K}^{+}$ ). Les ions de calcium non échangés seront adsorbés, ce qui conduit à augmenter la densité en ions, c'est à dire une baisse dans la capacité d'échange des particules. Tout ceci se traduit par une baisse du gonflement.
- **Floculation et agglomération des particules d'argiles**

L'ajout de chaux à des grains fins d'argiles cause une floculation et une agglomération des particules. Ce phénomène a comme résultat un changement apparent dans la texture, les petits grains se regroupent pour former d'autres grains de grande taille. Donc, la floculation d'argile augmente la grosseur effective des grains et joue un rôle important dans la stabilisation.

➤ **Carbonatation de la chaux**

La chaux réagit avec le dioxyde de carbone de l'air ( $\text{CO}_2$ ) pour former de faibles agents de cimentation comme les carbonates de calcium par exemple ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ) selon le type de chaux utilisée. Généralement, on essaie de réduire ce phénomène par compactage du sol traité après une petite durée de malaxage. Des études ont montré que cette réaction est probablement plus nuisible qu'utile dans la stabilisation du sol.

➤ **Réaction pouzzolanique**

Cette réaction se produit entre la silice et/ou l'alumine du sol et la chaux pour former certains types d'agents de cimentation ou de solidification. Le résultat de ces réactions donne la part la plus importante dans l'augmentation de la résistance du mélange sol-chaux ; les propriétés acquises par le sol peuvent durer des années. Ce phénomène est la cause principale qui assure la bonne stabilisation du mélange sol-chaux.

**b. Liants organiques**

Ce sont des produits de type colle, c'est à dire des composés organiques susceptibles d'une bonne adhésion au squelette.

On distingue deux sortes :

- Les mono-composants (un seul constituant) ont un caractère thermoplastique, ce sont par exemple les bitumes de pétrole, les goudrons et les brais de houille.
- Les bi-composants (deux constituants) sont à mélanger au moment de la mise en œuvre.

Le résultat est intermédiaire entre le collage thermique des mono-polymères, des résines ou des dopes. L'action de ces produits donne au sol des propriétés hydrophobes qui dépendent de l'enrobage des particules du sol par le liant. L'inconvénient majeur de ces liants organiques est leur biodégradabilité sous des climats tropicaux.

**1. Stabilisation par polymères**

Les polymères sont attirés par la surface des argiles quand ils portent des charges positives, et par les extrémités des feuillets quand les charges qu'ils portent sont négatives. La grande taille de ces molécules, permet une sorte d'encapsulage qui limite l'hydratation ultérieure de l'argile.

## **I .10. Identification des matériaux utilisent**

### **I .10.1. Bentonite**

La bentonite est une argile plastique souvent issue de la transformation de cendres volcaniques, composée principalement de minéraux smectites, généralement de la montmorillonite. Les autres minéraux du groupe des smectites, la saponite, la beidellite et la montmorillonite. Les smectites sont des minéraux argileux constitués de cristallites de moins de 2µm, formés de trois couches : deux couches tétraédriques et une couche octaédrique. Les couches de silicate ont une légère charge négative compensée par des ions échangeables ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  ou  $\text{Na}^{+}$ ). La bentonite contient également des minéraux accessoires comme le quartz, le feldspath, la calcite et le gypse, qui peuvent influencer sa valeur industrielle. La bentonite a des propriétés colloïdales fortes et son volume augmente plusieurs fois au contact de l'eau, formant un fluide gélatineux et visqueux. Ses propriétés spéciales (hydratation, gonflement, absorption d'eau, viscosité, thixotropie) la rendent utile pour de nombreuses applications. La bentonite est extraite par carrières, puis broyée et séchée. Selon l'application finale, elle est tamisée ou moulue, purifiée, ou traitée avec des acides ou des organiques pour produire des bentonites activées ou des organoclays.

#### **I .1.1. Historique**

La bentonite est une dénomination technique de la Montmorillonite. Cette dernière a été découverte dans des gisements argileux situés près de Montmorillon dans la Vienne [14]. Elle se rencontre dans la nature sous forme de mélanges très hétérogènes et en particulier dans les bentonites auxquelles elle confère des propriétés particulières.

Les bentonites découvertes dès 1928 contiennent au moins 75% de Montmorillonite [15,16]. La Montmorillonite provient en fait de la transformation naturelle de cendres volcaniques dont l'altération s'est produite, il y a des millions d'années, par lessivage acide ou alcalin [17].

## I .1.2. Structure de la Montmorillonite

### A. Structure multi échelle

Les montmorillonites ont la particularité de présenter différents niveaux d'organisation selon l'échelle d'observation. La Figure. 2 schématise les différentes unités structurales [22].

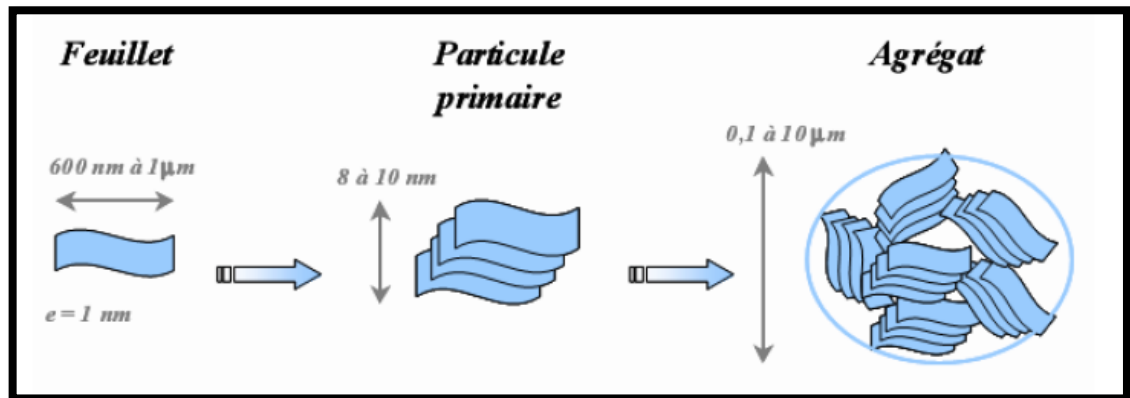


Figure 2: Structure multi échelle de la montmorillonite.

#### ➤ Le feuillet

Le feuillet est assimilable à un disque ou à une plaquette qui possède des dimensions latérales de l'ordre du micron et une épaisseur d'environ un nanomètre. Ces plaquettes sont considérées comme relativement souples et déformables.

#### ➤ La particule primaire

La particule primaire est constituée de 5 à 10 feuillets empilés, maintenus entre eux par des forces électrostatiques attractives de type Van der Waals. Elle fait généralement 8 à 10 nanomètres d'épaisseur et la taille de la particule est à peu près constante ; ainsi, lorsqu'une montmorillonite est gonflée, l'espace interfoliaire augmente mais il y a moins de feuillets dans une particule.

#### ➤ L'agrégat

L'agrégat est un ensemble de particules primaires orientées dans toutes les directions. Les agrégats ont une taille qui varie de 0,1 à 10 microns.

### B. Structure et composition

La bentonite est une roche tendre, friable, très onctueuse au toucher, de teinte blanchâtre, grisâtre ou légèrement teintée de bleu. C'est une terre douée d'un pouvoir gonflant au contact de l'eau (5 à 30 fois son volume initial). Elle est constituée, principalement, par un minéral argileux appelé Montmorillonite dont la structure est schématisée par la figure 3. La montmorillonite est composée de feuillets complexes à trois couches, séparés par des

molécules d'eau. Sa structure reste peu connue, c'est pourquoi diverses hypothèses sont admises, notamment celles d'Hoffmann, d'Edelmann et de Mc Conald.

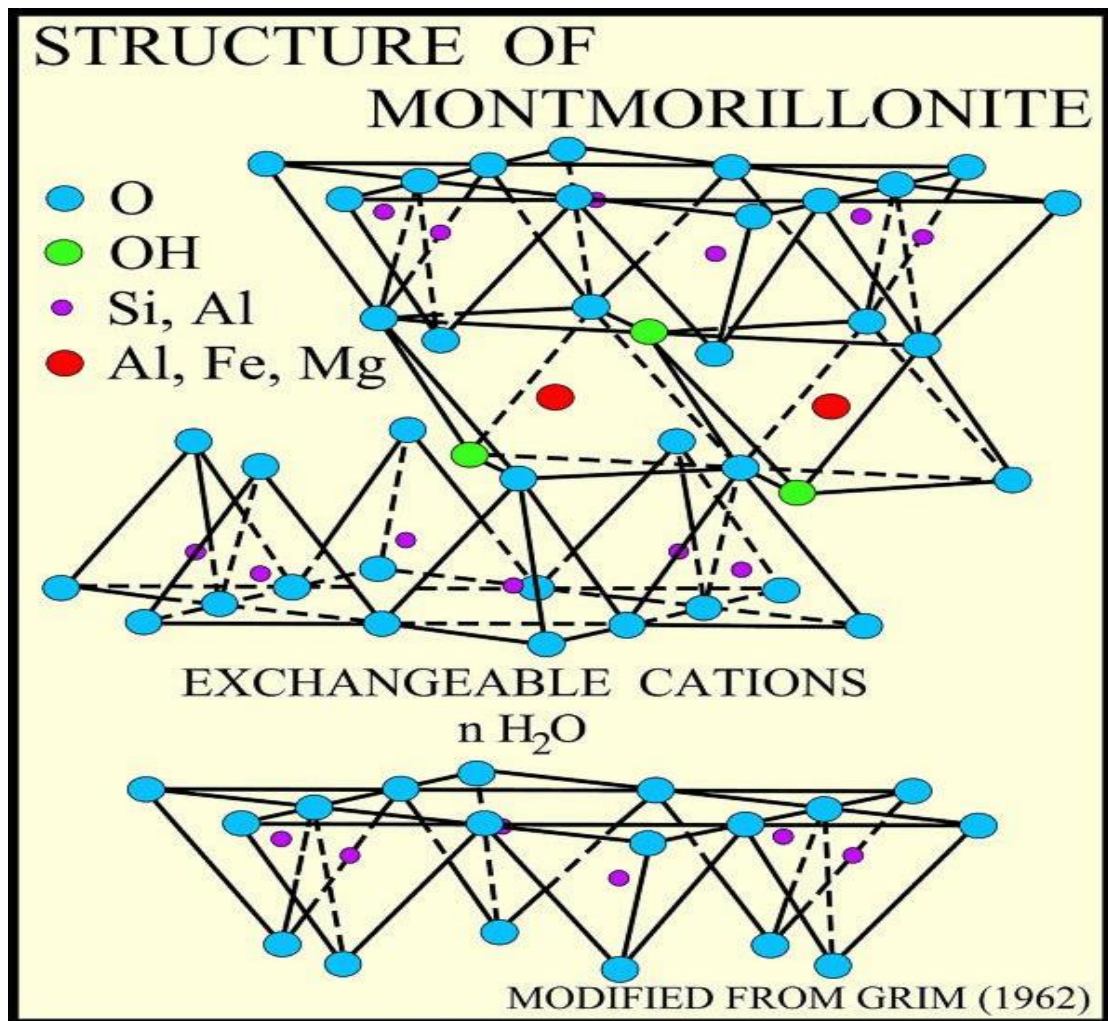


Figure 3: Structure de la montmorillonite.

La formule générale de la montmorillonite est (pour la demi-maille) [18].

- $\text{Si}_4\text{O}_{10} (\text{Al}+3(2-x) \text{R}+2x) (\text{OH})_2 \text{CE}_x n\text{H}_2\text{O}$ .
- Avec :  $\text{R}+2 : \text{Mg}+2, \text{Fe}+2, \text{Mn}+2$
- Al peut être remplacé par  $\text{Fe}+3, \text{Cr}+3$
- X : charge du feuillet.
- CE : Cation interfoliaire  $\text{Na}+, \text{K}+, \text{Ca}+2, \text{Mg}+2$ .

### 1. Hypothèse d'HOFMANN-HENDRICKS-MARSHALL

D'après Hoffmann et collaborateurs [19], la montmorillonite est un aluminosilicate phylliteux, composé d'unités structurales dites "feuillet" ; celles-ci sont constituées d'une couche octaédrique (alumino-magnésienne) comprise entre deux couches tétraédriques (silice-oxygène). Certains atomes d'oxygène sont communs aux couches de tétraèdres et d'octaèdres. Ils occupent une partie des groupements hydroxyles OH.

Des molécules d'eau peuvent pénétrer entre les feuillets et les écarter. Ainsi, les particules de la montmorillonite se dispersent en suspension colloïdale ; c'est pour cela que les dimensions du réseau de la montmorillonite dans la direction où les différentes couches se superposent ne sont pas fixées, elles peuvent varier de 9.6 Å dans le cas où il n'existe pas de molécules polaires entre les couches jusqu'à une séparation complète des couches dans le cas contraire. Il est à noter que les ions  $\text{Al}^{3+}$  de la couche octaédrique peuvent être remplacés partiellement par les ions  $\text{Fe}^{3+}$  sans pour autant changer la structure du feuillet ; par contre, la substitution des ions  $\text{Mg}^{2+}$  ou  $\text{Fe}^{2+}$  aux ions  $\text{Al}^{3+}$  entraîne un déficit de charges positives.

Pour rétablir la neutralité électrique de l'édifice cristallin, des cations compensateurs ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , ...) se placent dans les intervalles entre feuillets. Les bentonites différentes les unes des autres par la teneur en impuretés formées, généralement, de Fe, Ca, Na, Ti, K, Mn, Si, etc.

On parle, ainsi, de bentonite-Na, de bentonite-Ca.etc. D'autres substitutions peuvent avoir lieu dans la couche d'octaèdres, c'est le cas du groupe hydroxyle OH qui prend la place des atomes d'oxygène et inversement.

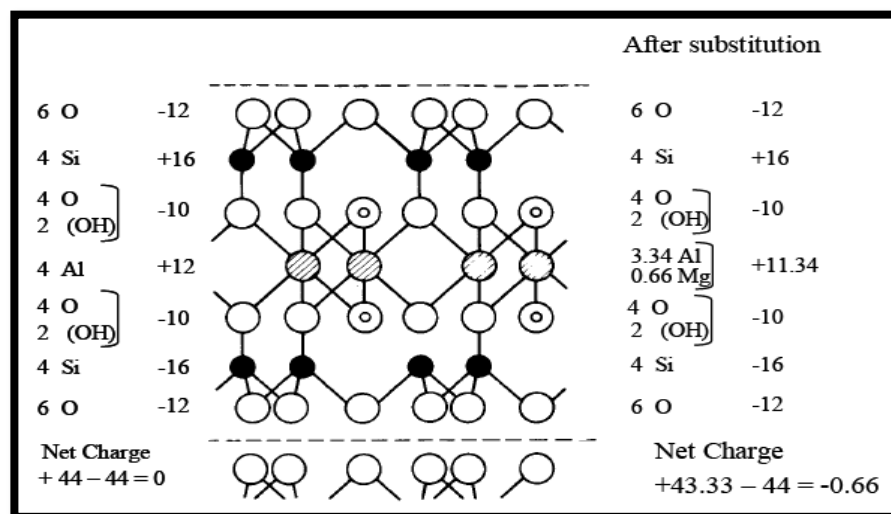
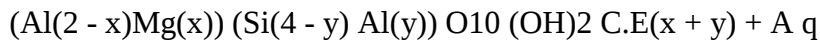


Figure 4: Distribution de la charge dans la montmorillonite.

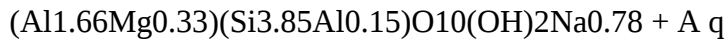
## 2. Hypothèse de Mc Conald

Mc Conald [19], quant à lui, a proposé en s'appuyant sur des recherches basées sur la déshydratation thermique, une structure dans laquelle un nombre d'ions oxygène de la couche silice sont remplacés par des groupements OH qui peuvent ou non être groupés en tétraèdres. Le centre de ces derniers demeure vide au lieu d'être occupé par un ion  $\text{Si}^{4+}$  ou  $\text{Al}^{3+}$ .

La formule de la montmorillonite est donnée, en général, comme suit:



La formule moyenne étant [21]:



Où C.E représente les cations échangeables et Aq désigne la solution aqueuse.

### 3. Hypothèse d'Edelmann

Edelmann et collaborateurs [20] ont proposé un autre schéma de structure de la montmorillonite où des tétraèdres de silicium dans les deux couches sont orientés dans des directions opposées (figure5).

Les mêmes auteurs, mentionnent que dans certains de ces tétraèdres de silicium, des groupements hydroxyle prennent la place des atomes d'oxygène.

Les bentonites se composent d'un mélange de smectites (principalement montmorillonites) et d'illite.

Elles contiennent au moins 75% de montmorillonite, cependant, d'autres argiles minérales à savoir l'illite et la kaolinite peuvent également y être présentes. Quoique certaines bentonites soient relativement pures, le contenu en minéraux non argileux est rarement inférieur à 10%. La composition en montmorillonite varie d'une bentonite à une autre.

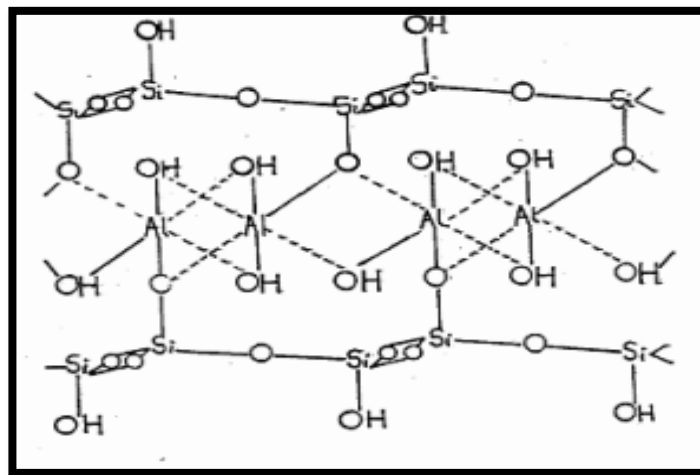


Figure 5 : Structure de la montmorillonite d'après Edelmann.

### I .1.3. Applications de la bentonite

Il existe 2 types de bentonites [23] :

- la bentonite à base de sodium qui augmente de volume lorsqu'elle est humide et qui peut absorber plusieurs fois sa masse en eau. Cette propriété est mise en valeur dans les mastics pour l'enfouissement de matières polluantes dans le sol. Elle est utilisée dans les puits de forage de pétrole et la recherche géothermique.

• la bentonite à base de calcium (pascalite), qui ne possède pas ces propriétés de gonflement, a des applications parapharmaceutiques dont les résultats restent à prouver, notamment dans le domaine du système digestif. Des tribus indigènes d'Amérique du sud, d'Afrique et d'Australie ont longtemps employé l'argile de bentonite pour cet usage.

En raison de ses fonctionnalités rhéologiques, la bentonite a un comportement. Des petites quantités de bentonite en solution aqueuse forment un mélange visqueux, dont la viscosité baisse lorsque l'effort mécanique qui lui est appliqué augmente.

A concentration élevée, (60 g/l), les solutions de bentonite prennent la texture d'un gel [24].

Le débouché le plus important de la bentonite se situe dans les techniques du génie civil, particulièrement dans l'étanchéité des édifices, la construction de digues, la pose de canalisations, l'édification de tunnels, l'injection de sol, la réalisation de fondations spéciales (parois moulée, barrettes, pieux).

D'autres utilisations reposent sur ses facultés d'absorption [25,23] :

- Comme adjuvant pour nourriture animale,
- Comme dégraissant et décolorant,
- Pour le génie civil : voiles d'étanchéité, injections de ciment,
- Pour les boues de forages,
- Pour la fabrication des moules de fonderie,
- Pour le bouletage du minerai de fer,
- Comme additif aux amendements des sols.

#### **I .1.4. Activation de la bentonite**

##### **A. L'Activation thermique**

L'activation thermique entraîne un changement du pouvoir adsorbant suite à la libération de surfaces actives occupées par l'eau d'adsorption.

Le séchage d'une bentonite à une température de 110°C, permet d'éliminer l'eau fixée entre les feuillets caractérisant sa structure. Une augmentation de cette température jusqu'à 700°C provoque le départ de l'eau de constitution et la destruction d'impuretés telles que les carbonates de calcium, ce qui affecte les pores et la surface spécifique de la bentonite et par conséquent sa capacité adsorptionnelle [20].

##### **B. Activation chimique**

Une amélioration de la capacité adsorptionnelle lors d'un traitement par les acides conduira à la formation de « bentonite acide » qui résulterait de la modification des liaisons

octaédriques de la couche centrale formée de quatre atomes d'aluminium. Le départ de deux atomes d'aluminium sur quatre laisserait l'ensemble du treillis de la structure élémentaire avec une charge négative, qui serait immédiatement compensée par un ion  $H^+$  de l'acide de traitement, conférant ainsi le caractère acide aux argiles activées et duquel dépend l'amélioration du pouvoir de sorption.

D'après d'autres chercheurs, l'activation chimique des argiles par traitement acide est dû au développement des pores après une dissolution uniforme du réseau, de façon à ce qu'il ait exactement un atome de silicium pour un atome d'aluminium ; lorsque la solution est saturée en silicium, l'aluminium continue à se dissoudre et disparaît du réseau, ce qui entraînait l'effondrement.

L'acide le plus utilisé est l'acide sulfurique car il présente un avantage particulier lié à sa pureté et à la solubilité de ses sels [20].

### **C. Activation par échange de cations**

Les argiles en général, et la bentonite en particulier, présentent une capacité d'adsorber certains cations et de les retenir dans les conditions d'échange.

Ils existent quatre facteurs principaux qui favorisent l'échange de cations:

- Les liaisons entre les différentes molécules se trouvant aux bords et aux coins des structures d'aluminosilicates, sont rompues, ce qui fait augmenter la proportion des charges libres.

Le broyage fin diminue la dimension des particules d'argile et augmente le nombre de liaisons cassées. Ainsi 30% de la capacité d'échange des bentonites dépend du broyage.

- Le remplacement des cations de haute valence par des cations de plus faible valence, induit la présence de charges libres ( $Al^{3+}$  peut être remplacé par  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ). La structure est non équilibrée, ce qui conduit à des échanges cationiques très intéressants (80% des échanges sont dues à cette raison) dans le cas de la bentonite.
- L'existence de groupes hydroxyles sur les surfaces des argiles et entre les feuillets pouvant être parfaitement remplacés par des cations  $H^+$ . Généralement, l'échange sur la surface est plus important qu'entre les feuillets, puisque la pénétration des cations est gouvernée par la taille de celle-ci et la distance entre ces feuillets.

Il existe d'autres modes d'activation telles que :

- L'activation hydrothermale;

- L'activation par les acides organiques;
- L'activation par radioactivité.

### I .1.5. Propriétés physiques

#### I.5 .1. Capacité d'échange cationique (CEC)

##### A. Définitions

Les argiles ont la propriété de fixer de façon réversible (échangeable) des cations contenus dans les solutions environnantes. La capacité d'échange cationique (CEC) correspond au nombre de charges négatives susceptible de fixer des cations de cette manière. Elle s'exprime en centi-moles par kg ce qui est traduit dans le système des unités internationales par des milliéquivalents pour 100g de produit (meq/100g). L'échange de cations n'est possible que s'ils sont retenus par des liaisons faibles sur les surfaces externes ou internes (zone interfoliaires) des cristaux [26].

- La CEC externe dépend du nombre de sites de fixation des cations sur les surfaces externes [26]. Aux bordures d'un feuillet, les valences du silicium et de l'oxygène en couche tétraédrique d'une part, de l'aluminium et de l'oxygène en couche octaédrique, d'autre part, ne sont pas saturées. Pour compenser ces valences, des molécules d'eau s'introduisent et il y a apparition de groupes silanol (Si-OH) ou aluminol (Al-OH) qui en fonction du pH peuvent capter ou libérer des protons. Ces derniers peuvent être échangés avec d'autres cations. Le nombre et la nature des charges de bordure de feuillet seront directement liés au pH [27].
- La CEC interne reflète le déficit de charge des feuillets 2/1 ; elle dépend donc des charges permanentes [26]. la substitution la plus fréquente est celle de  $Al^{3+}$  par  $Mg^{2+}$  dans la couche octaédrique. C'est le mécanisme principal d'échange pour une montmorillonite. Pour cette argile, la distance entre les sites négatifs situés au niveau de la couche octaédrique et le cation échangeable situé à la surface du feuillet est telle que les forces d'attraction sont faibles. Des substitutions de Si par Al dans la couche tétraédrique sont également possibles [27].

| MINERIA                | CEC (méq/100g) |
|------------------------|----------------|
| <b>Kalinite</b>        | 3-15           |
| <b>Montmorillonite</b> | 80-150         |
| <b>Illite</b>          | 10-40          |
| <b>Vermiculite</b>     | 100-150        |
| <b>Chlorite</b>        | 10-40          |

**Tableau 1:Caractéristique des minéraux.**

Les capacités d'échange cationique de la montmorillonite sont les plus importantes (dans la gamme de 80~150 meq/100g) parmi tous les minerais d'argile en raison de leur substitution isomorphe élevée dans les couches octaédriques et tétraédriques, respectivement, qui a comme conséquence une grande insuffisance ionique [29].

Exemple : calcul théorique de la CEC d'une montmorillonite

La capacité d'échange est définie comme la quantité de cations retenus par l'ensemble des charges négatives de 1g d'argile à pH 7. Elle s'exprime en milli-equivalents (meq) pour 100g d'argile. Le meq est égal à (charge/masse).1000 ; il est égal à une centimole de charge unitaire par kilogramme de matière sèche (Cmol/kg). La capacité d'échange est calculée suivant la relation :

$$CEC = (charge/masse) \cdot 1000 \cdot 100$$

Soit une montmorillonite dont la demi-maille a pour formule :  $Si_4 O_{10} Al_{1.7} Mg_{0.3} (OH)_2 Na_{0.3}$ . La masse de la demi-maille est égale à 367g ; la charge est égale à 0.33 donc  $CEC = (0.33/367) \cdot 1000 \cdot 100 = 89.9 \text{ meq/100g}$

Cette valeur de 89.9 meq/100g correspond à la capacité d'échange des sites interfoliaires. Il s'y ajoute la CEC liée aux surfaces externes des cristaux. L'ensemble varie de 100 à 120 meq/100g.

#### **B. Les paramètres qui influent sur la CEC**

La CEC varie avec les conditions de pH car les protons  $H^+$  entrent en compétition avec les autres cations pour se fixer sur les sites échangeables. Elle varie également avec le coefficient de sélectivité des cations. De ce fait, les méthodes d'analyses ont été standardisées à pH=7 de manière à pouvoir comparer les mesures de la CEC entre différentes argiles [26].

#### **I .5.2. La surface spécifique**

La surface spécifique d'une argile  $S_0$  correspond à la somme des surfaces de tous les sites échangeables accessibles à un ion ou une molécule donnée. Ces sites jalonnent face basales et bordures des cristaux en proportions variables suivant le type de minéral et les conditions locales de pH. La valeur maximum de la surface spécifique d'un phyllosilicate est égale à la somme des surfaces de toutes les faces de chacun des feuillets élémentaires [26] (figure 6).

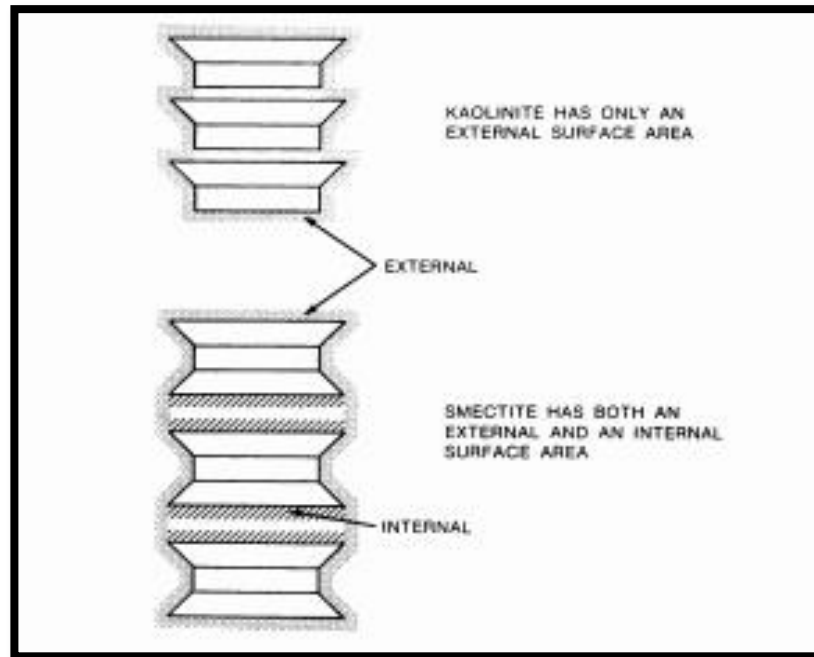


Figure 6: Surface interne et externe des particules argileuses.

### I .5.3. Propriétés colloïdales

Cette propriété est d'une grande importance pour les procédés de purification des argiles [29].

Elle est liée à la présence de charges négatives à la surface de chaque grain d'argile. Le caractère colloïdal se traduit par le recouvrement de chaque grain d'argile par une double couche d'ions hydrosolubles de charges opposées (figure 7. (a) et (b)).

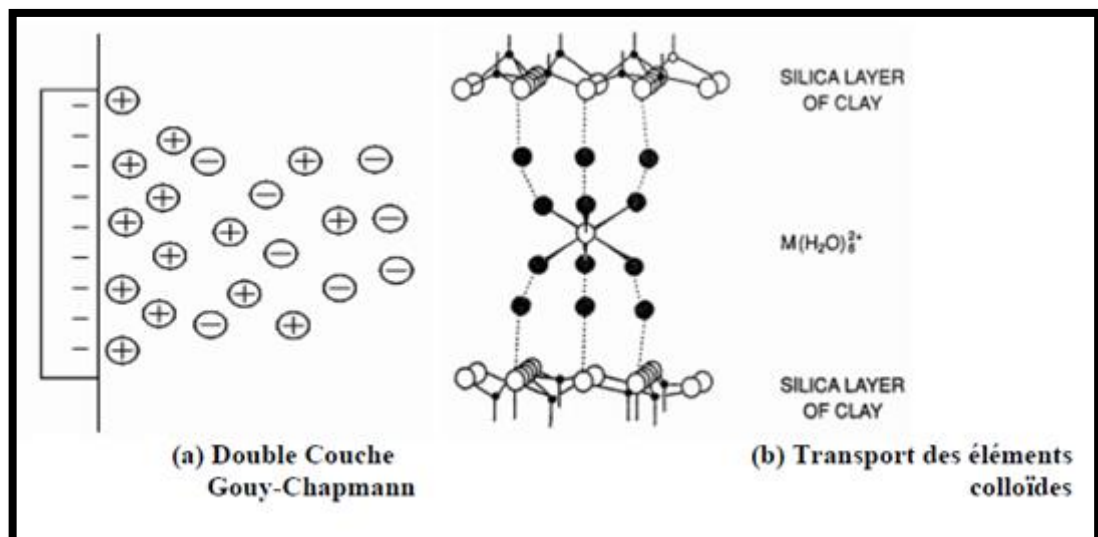


Figure 7:Caractiristique colloïdale.

### I .5.4. La propriété de gonflement

#### A. Définitions

Les argiles sont des matériaux poreux chargés électriquement et présentant des propriétés de rétention d'eau et d'échange cationique. La mise en oeuvre des argiles comme constituants des barrières ouvragées autour des déchets radioactifs en stockage souterrain a fortement motivé l'étude du comportement de l'eau et des ions dans les pores microscopiques des argiles, appelés « espaces interfoliaires ».

Dans ce type de porosité, les cations et les molécules d'eau se trouvent entre deux feuillets d'argile chargés négativement. Pour les faibles taux d'hydratation, les cations et l'eau sont confinés en couches bidimensionnelles caractérisées par une forte concentration ionique (l'ordre de 10 molécules d'eau par ion) [29].

La notion d'eau absorbée sur les surfaces ne correspond pas à la même réalité physique pour tous les types d'argiles. En effet, les minéraux neutres (kaolinite, pyrophyllite, talc, serpentines), ou de charge interfoliaire élevée (supérieure à 0.8 pour  $\text{Si}_4\text{O}_{10}$ ) tels qu'illites et micas ainsi que les chlorites n'ont de capacité d'adsorption que sur les surfaces externes des cristaux. Quelle que soit la pression partielle d'eau dans leur environnement, la distance inter-réticulaire ne varie pas. Tel n'est pas le cas des smectites ou vermiculites qui sont capables d'adsorber des molécules d'eau dans leurs espaces interfoliaires. Ces molécules dont le nombre croît avec la pression partielle d'eau s'organisent en couches et augmentent la distance inter-réticulaire. Ainsi pour la montmorillonite Wyoming saturée par  $\text{Na}^+$  la distance inter-réticulaire varie de 9.60 Å (0 couche d'eau) à 12.5 Å (1couche), 15.5 Å (2 couches) puis 18.8 Å (3couches) lorsque  $P/P_0$  augmente [30].

#### B. Principales causes du gonflement

La recherche bibliographique a permis de mettre en évidence quatre principaux phénomènes expliquant les causes du gonflement. Nous allons détailler le 1er phénomène [31]:

- Hydratation par adsorption,
- Hydratation par osmose,
- Hydratation par capillarité,
- Transformations chimiques.

#### ❖ Hydratation par adsorption

Les argiles sont principalement caractérisées par un déséquilibre électrique dû à une substitution isomorphe de cations dans la structure octaédrique des feuillets. Il en résulte

alors la formation de la double couche diffuse due à la fixation des cations échangeables qui s'installent à la surface des feuillets du fait des forces électrostatiques qui sont les suivantes.

#### **1/Forces d'attractions**

Généralement causées par les forces de Van Der Waals entre les feuillets voisins,

#### **2/Forces de répulsion**

Ayant plusieurs composantes (interaction des doubles couches associées aux deux feuillets, énergie d'hydratation des cations compensateurs).

Ces deux forces décroissent rapidement avec la distance inter-particulaire.

Quant à la force de répulsion, elle diminue également avec l'augmentation de la concentration en électrolytes.

Le gonflement est d'autant plus élevé que les potentialités de développement des doubles couches sont importantes. Cette double couche dépend de la nature des minéraux argileux et des cations compensateurs.

Les cations sont liés aux feuillets par des forces de nature électrostatique et possèdent la propriété d'être échangeables. Cette facilité d'échange sera aussi un facteur influant sur le gonflement.

### **I .1.6. Les principales propriétés physiques de la bentonite qui la rendent adaptée à la fixation du sable**

#### **A. Absorption d'eau**

La bentonite peut absorber des quantités significatives d'eau, ce qui aide à améliorer la rétention d'humidité du sol. Elle peut absorber jusqu'à 10 fois son poids en eau, augmentant la capacité de rétention d'eau des sols sableux [32,33].

#### **B. Comportement thixotrope**

La bentonite présente des propriétés thixotropes, ce qui signifie qu'elle peut passer d'un état gélatineux à un état liquide lorsqu'elle est perturbée. Cette propriété lui permet de remplir les interstices entre les particules de sable, créant une structure plus cohésive.

#### **C. Cohésion et adhésion**

Les particules d'argile dans la bentonite ont de fortes propriétés adhésives, ce qui aide à lier les particules de sable entre elles, formant des agrégats qui résistent à l'érosion et améliorent la stabilité du sol.

### **D. Densité apparente faible**

L'ajout de bentonite diminue la densité apparente des sols sableux, ce qui peut améliorer l'aération et la pénétration des racines pour les plantes.

### **E. Augmentation de la résistance au cisaillement**

La bentonite améliore la résistance au cisaillement des sols sableux, les rendant plus ristsants à l'érosion éolienne. Des études ont montré qu'un contenu en bentonite plus élevé augmente significativement la résistance au cisaillement du sol.

### **F. Formation d'une croûte physique**

À faibles proportions, la bentonite peut former une croûte physique à la surface des sols sableux, ce qui peut réduire les taux d'érosion de plus de 99 %.

Ces propriétés contribuent collectivement à l'efficacité de la bentonite dans la fixation du sable et à son application potentielle dans le contrôle de la désertification et les efforts de restauration écologique [32,33].

## **I .10.2. La Chaux**

Il y a quelques années, on a commencé à utiliser la chaux au lieu du ciment pour la stabilisation des sols, surtout de ceux constitués par des argiles fortes (très plastiques).

L'action de la chaux sur les argiles n'est pas encore bien définie. Il semble qu'elles agissent sur les bases de permutation en abaissant l'indice de plasticité et en formant, en outre, une espèce de ciment naturel, composé de silicates alumino-calciq complexes. On ne possède pas dans ce domaine une longue expérience comme dans les cas précédant. L'étude de ce type de stabilisation présente un grand intérêt [36],

### **I .1. Technique de stabilisation à la chaux**

L'emploi de la chaux comme stabilisant de sol remonte aux premiers Romains qui l'on utilisée pour la construction de leurs routes, et spécialement de la voie Appienne. Cette route depuis sa construction d'excellents service et sert encore au trafic. Aux Etats-Unis, l'emploi de la chaux comme matériau de construction de route remonte seulement à 1920. Depuis la seconde guerre mondiale, l'emploi de la chaux comme agent de traitement du sol s'est considérablement accru.

Les sols traités doivent contenir une partie argileuse non négligeable puisque c'est sur elle que la chaux réagit. Selon la nature des minéraux argileux présents dans le sol (Kaolinite, illite, montmorillonite,), les résultats obtenus varient sensiblement. Bien que la présence dans le sol de matières organiques réduise les effets de la stabilisation par la chaux, il est possible en augmentant les proportions de la chaux de traiter de façon satisfaisante des sols

contenants jusqu'à 20% de matières organiques ; c'est le procédé de stabilisation, qui s'accommode le mieux, de la présence, toujours nocive, de matière organique dans les terres traitées.

Avant d'aborder la stabilisation des sols par ajout de la chaux, il nécessaire de parler de la chaux d'une manière générale [54].

## **I .2. Définition de chaux**

Le terme « chaux » désigne les produits issus de la calcination du calcaire. Ou autrement dit, il désigne toutes les formes physiques et chimiques dans lesquelles peuvent apparaître l'oxyde de calcium et de magnésium ( $\text{CaO}$  et  $\text{MgO}$ ) et/ou l'hydroxyde de calcium et/ou de magnésium  $\text{Ca(OH)}_2$  et  $\text{Mg(OH)}_2$ . [35]

Le calcaire est extraits des carrières ou d'autres gisements (calcaire maritime), ces blocs sont concassés, puis criblés de façon à acquérir un calibre de pierres compatible avec le type de four utilisé. La cuisson du calcaire est appelée calcination, elle permet d'obtenir la chaux vive. [34]

Pour passer de la chaux vive à la chaux éteinte on procède à l'extinction, qui est une réaction dangereuse par la chaleur dégagée et les projections qu'elle produit. Elle s'accompagne d'une augmentation de volume «le foisonnement» (elle résulte d'un changement de structure moléculaire et de la formation d'aiguilles d'hydrate de chaux). L'extinction est obtenue par adjonction d'eau et peut s'effectuer selon diverses méthodes ; extinction spontanée, l'arrosage manuel, l'extinction par immersion et l'extinction par fusion, dite extinction ordinaire, consiste à mettre la quantité d'eau utile, pour obtenir une bouillie épaisse (chaux en patte). Cette méthode implique une bonne maîtrise de la quantité d'eau car il faut éviter de bruler (le manque d'eau se traduit par la présence de grumeaux et produit une chaux mal éteinte) ou de noyer (l'excès d'eau va produire un lait de chaux inutilisable qui devra attendre plusieurs mois que la chaux sédimente) la chaux. [34]

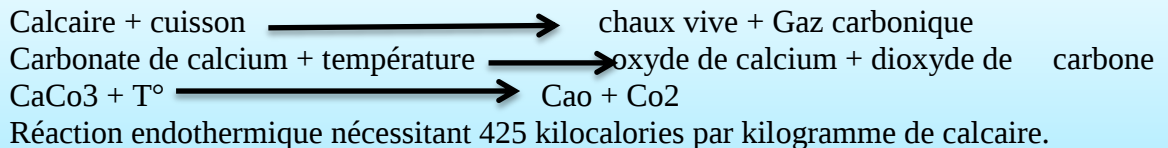
La méthode utilisée dans les procédés industriels modernes produit de la chaux éteinte sous forme de poudre. Les granulats de chaux vive sont broyés et passent dans un hydrateur (vis sans fin aspergée d'eau). L'eau introduite permet l'hydratation de la chaux vive, mais elle aide également à l'évacuation de la chaleur dégagée lors de la réaction. Les particules qui n'ont pas réagi (impuretés, surcuits, incuits) sont éliminées. La chaux éteinte pulvérulente est tamisée, conditionnée en sac ou en vrac. [51]

Pour les chaux hydrauliques, l'extinction de la chaux vive est s'effectue à une température supérieure à  $120^\circ\text{C}$ , afin d'éviter l'hydratation des silicates et des aluminates. On conserve

alors les propriétés hydrauliques. Ainsi le résultat de l'extinction entraine deux types de chaux éteintes : en poudre et en pate. [34]

### I.2.1. La chaux vive

La chaux vive désigne le matériau brut obtenu à la sortie du four. La calcination du calcaire (carbonate de calcium) entraine la formation de chaux vive (oxyde de calcium) et de gaz carbonique (dioxyde carbonique). [34]



Cette réaction s'effectue à une température entre 750 et 950°C et s'accompagne d'une

#### Figure 8: La formation de chaux vive.

Perte de poids d'environ 45% due à la perte en gaz carbonique. La chaux vive correspond à la forme la plus dangereuse du matériau ; avide d'eau, elle brule tous corps organiques en captant son eau. Après cuisson la chaux vive garde le même aspect physique que le calcaire utilisé, mais sa couleur est plus blanche et sa masse volumique apparente devient plus faible.

#### La calcination

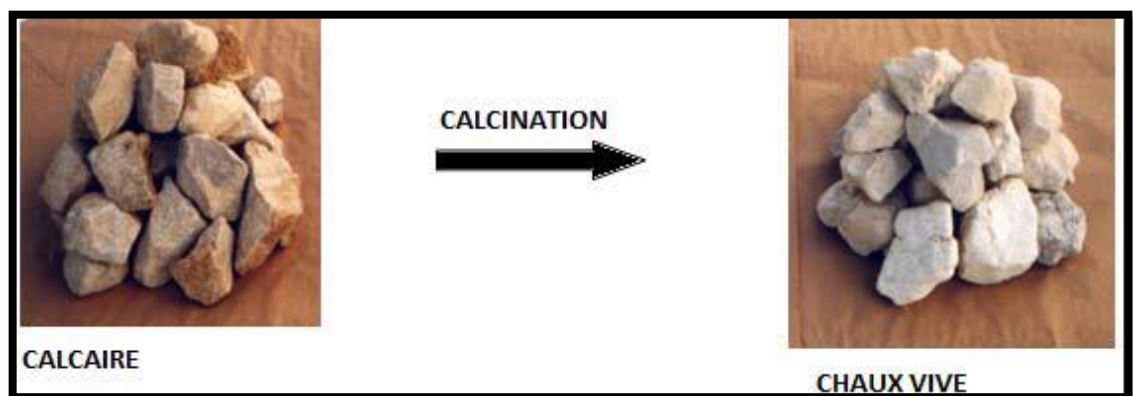


Figure 9: Transformation du calcaire en chaux vive.

### I.2.2. La chaux éteinte

La chaux vive devient éteinte lors de l'opération d'extinction ou d'hydratation, en ajoutant de l'eau.

#### L'extinction

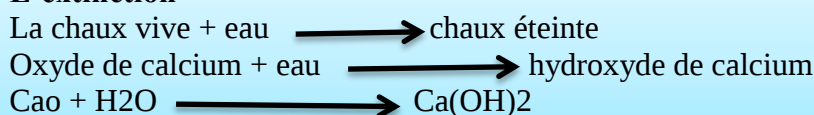


Figure 10: La formation de chaux éteinte.

Réaction exothermique dégageant 155 kilocalories par kilogramme de chaux vive.

La forme obtenue après extinction dépend de la quantité d'eau :

- En quantité limité, contrôlée : l'extinction produit une chaux en poudre ;
- Avec un excès d'eau : l'extinction produit une chaux en pâte.



**Figure 11: La chaux éteinte en poudre.**

### **10.2.3. Utilisation de la chaux**

La chaux entre dans un grand nombre d'utilisation, depuis des applications artisanales jusqu'à des processus industriels très évolués.

Elle intervient dans l'agriculture, La chimie, Le traitement des eaux, les sucreries, Industrie de la savonnerie, Industrie papetière, les tanneries, la sidérurgie et surtout dans La construction. Dans le domaine de la construction la chaux est utilisée pour la fabrication de briques silicocalcaire en mélangeant la chaux avec du sable siliceux, compacté et étuvé. Elle est également utilisée dans la confection des bétons cellulaires (à base de mortier de sable, de chaux/ou ciment). La chaux possède des caractéristiques techniques et esthétiques qui se combinent pour faire d'elle le matériau choisi pour la restauration, pour reprendre et compléter l'ancien,

Tout autant que pour garantir un ancrage dans la tradition constructive.

Et depuis fort longtemps, elle à été employée pour stabiliser les routes et chemins. Son utilisation perdure encore aujourd'hui pour modifier les caractéristiques du sol [36].

## **I.2.4. Stabilisation des sols à la chaux**

### **I .4.1. Modification des propriétés du sol**

Les observations sur les sols traités ont permis de noter les modifications suivantes dans leurs caractéristiques [35] :

#### **A. Modification de la teneur en eau**

L'hydratation de la chaux vive est une réaction immédiate et fortement exothermique, ce qui a pour effet d'élever la température du mélange. Une partie de cette chaleur va contribuer à l'évaporation d'une quantité d'eau du sol un autre phénomène intervient simultanément c'est l'aération du sol lors du malaxage. L'expérience a montré que pour 1% de chaux la teneur en eau du mélange diminue de 0,6 à 0,8%.

#### **B. Modification des propriétés géotechniques**

Elle se fait en deux étapes, l'une immédiate et l'autre lente, elle dépend de l'importance de la fraction argileuse contenue dans le sol et de sa nature.

##### **b.1. Modifications immédiates**

Additivement à l'échange de cations  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  par  $\text{Ca}^{++}$ , et la floculation des particules argileuses provoquée par les forces électriques mises en jeu par l'échange les caractéristiques suivantes :

- La limite de plasticité,
- L'indice de plasticité,
- Le CBR,
- L'allure de la courbe Proctor,
- Les caractéristiques optimales,

Se trouvent modifiées par l'ajout de chaux. Ces modifications sont obtenues par des dosages faibles en chaux, elles se traduisent par la formation de grumeaux non collants dans la masse du sol.

##### **b.2. Modifications à long terme**

A long terme l'argile et la chaux vont agir l'une sur l'autre en donnant naissance à de nouvelles espèces minérales qui constituent des ciments de qualités diverses, liant entre elles les particules inertes du sol. Ces ciments sont responsables de l'augmentation de la résistance mécanique du sol.

### **I .4.2. Mécanismes de stabilisation à la chaux**

Les théories de stabilisation à la chaux suggèrent cinq mécanismes de base [38]:

**a. Absorption d'eau :** En présence d'eau, dans une terre humide, la chaux vive subit une réaction d'hydratation qui s'accompagne d'un important dégagement de chaleur : environ 300kcal/kg de chaux vive.

**b. Echange cationique :** Lorsque l'on ajoute de la chaux à une terre humidifiée, celle-ci est saturée d'ions de calcium. Apparaît alors un phénomène d'échange de cations : les ions de calcium se substituent aux cations échangeables du complexe de la terre tels que magnésium, sodium, potassium et hydrogène. L'importance de cet échange cationique dépend de la quantité de cations échangeables présents dans la capacité totale d'échange cationique de la terre.

**c. Flocculation et agglomération :** Du fait de l'échange de cations et l'augmentation de la quantité d'électrolytes dans l'eau interstitielle, les particules de la terre flocculent et s'agglomèrent ; il y a augmentation de la taille des agrégats de la fraction fine. La texture et la structure changent.

**d. Carbonatation :** La chaux ajoutée à la terre réagit avec le dioxyde de carbone de l'air pour former des ciments carbonatés médiocres. Cette réaction consomme une partie de la chaux disponible pour les réactions pouzzolaniques.

**e. Réaction pouzzolanique :** c'est de loin le mécanisme le plus important qui influence principalement la stabilisation à la chaux les propriétés de résistance du matériau résultent pour l'essentiel d'une dissolution des minéraux argileux dans un environnement alcalin produit par la chaux et de la recombinaison de la silice et de l'alumine des argiles avec le calcium pour former des silicates complexes d'aluminium et de calcium qui cimentent les grains entre eux. La chaux doit être ajoutée à la terre en quantité suffisante afin de produire et de maintenir un pH élevé nécessaire à la dissolution des minéraux argileux, et pour une période suffisante qui permettra une réaction de stabilisation effective[38].

### I.10.3. Ciment portland

#### I.3.1. Rappel historique

Le premier ciment vraiment moderne fut fabriqué en 1845 par Issac Johnson, qui chauffa un mélange d'argile et de craie jusqu'à la clinkérisation, afin que les réactions nécessaires à la formation des composés hydrauliques aient lieu.

Le nom de « ciment portland », donné à l'origine en raison de la ressemblance de la couleur et de la qualité du ciment durci avec la pierre de portland-un calcaire exploité à Dorset-a été conservé pour désigner un ciment obtenu par mélange homogène d'argile et

de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine, et de l'oxyde de fer, cuit à la température de clinkérisation puis broyé. Les différentes normes définissant le ciment portland autorisent l'addition du gypse après la cuisson lors du broyage afin de contrôler la prise du ciment : à l'heure actuelle, d'autres matériaux peuvent être ajouté au ciment [37].

### **I.3.2. Définition**

Le ciment est avant tout une colle ou, plus exactement, un précurseur de colle. La vraie colle, ce sont les hydrates qui se forment par réaction du ciment anhydre avec l'eau, et même sous l'eau. C'est ce qui vaut au ciment de partager avec le plâtre l'appellation de liant « hydraulique ».

De ce fait, le ciment est un liant hydraulique, une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durci en réaction au processus d'hydratation. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau [37].



Figure 12: La chaine de fabrication du ciment.

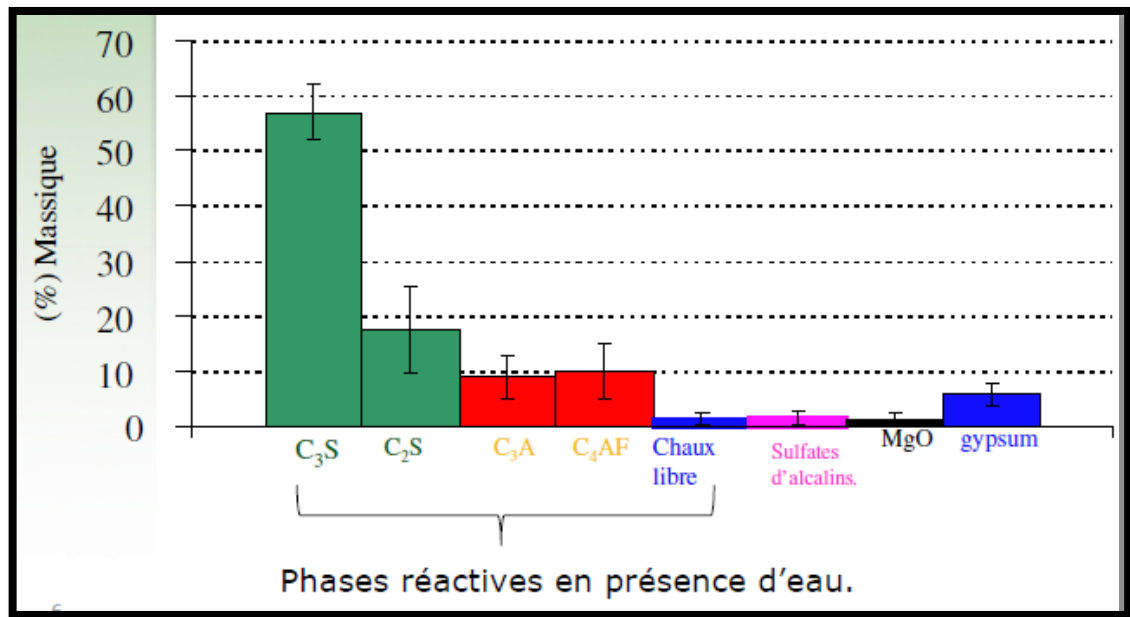
### I.3.3. Composition chimique du ciment portland

La composition « potentielle » est calculée à partir des quantités d'oxydes contenues dans le clinker comme si la cristallisation complète des produits d'équilibre avait eu lieu. Quatre composés[41], également appelés « phase », sont habituellement considérés comme les principaux constituants du ciment et sont énumérés dans le tableau 2 avec leur symboles abrégés. En effet, cette notation abrégée, utilisée par les chimistes de l'industrie du ciment, décrit chaque oxyde par une lettre :  $\text{CaO} = \text{C}$  ;  $\text{SiO}_2 = \text{S}$  ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$ . De la même façon,  $\text{H}_2\text{O}$  dans le ciment hydraté est désigné par H et  $\text{SO}_3$  par  $\text{S}$ .

| Composé                      | Composition                                                           | Abréviation           |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Silicate tricalcique         | $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$                                      | $\text{C}_3\text{S}$  |
| Silicate bicalcique          | $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$                                      | $\text{C}_2\text{S}$  |
| Aluminate tricalcique        | $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$                             | $\text{C}_3\text{A}$  |
| Aluminoferrite tétracalcique | $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{C}_4\text{AF}$ |

**Tableau 2: principales phases du ciment portland [40].**

Les réactions qui transforment le ciment portland en un liant ont lieu dans la pâte en présence d'eau. En d'autres termes, en présence d'eau, les silicates et les aluminates forment des produits d'hydratation qui donnent avec le temps une masse ferme et dure : la pâte de ciment hydraté.



**Figure 13: composition typique de ciment portland [40].**

L'avancement de l'hydratation du ciment peut être déterminé par différentes mesures : la quantité de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dans la pâte, la chaleur dégagée par l'hydratation, la densité de la pâte, la quantité d'eau combinée chimiquement, la quantité de ciment non hydraté présent (en utilisant l'analyse quantitative par rayons X) et, d'une manière indirecte, à partir de la résistance de la pâte de ciment hydraté. Les techniques de thermogravimétrie et de balayage par diffraction continue de rayon x sur des pâtes humides en cours d'hydratation peuvent être utilisées pour l'étude de toutes les premières réactions. La microstructure de la pâte de ciment hydraté peut aussi être étudiée par l'image des électrons rétrodiffusés dans un microscope électronique à balayage.

Il y'a plus de cent ans, le Chatelier a été le premier à remarquer que les produits d'hydratation du ciment sont chimiquement les mêmes que les produits d'hydratation des composés seuls, dans des conditions similaires.

### I.3.4. Mécanismes d'hydratation d'un ciment portland

L'hydratation du ciment portland implique, nous venons de le voir, la réaction des quatre phases minérales qui le composent [41]. Comme le ciment est composé principalement de

C3S, c'est l'hydratation du C3S qui contrôle la cinétique globale de l'hydratation. Il existe cependant une synergie entre les différentes réactions [42].

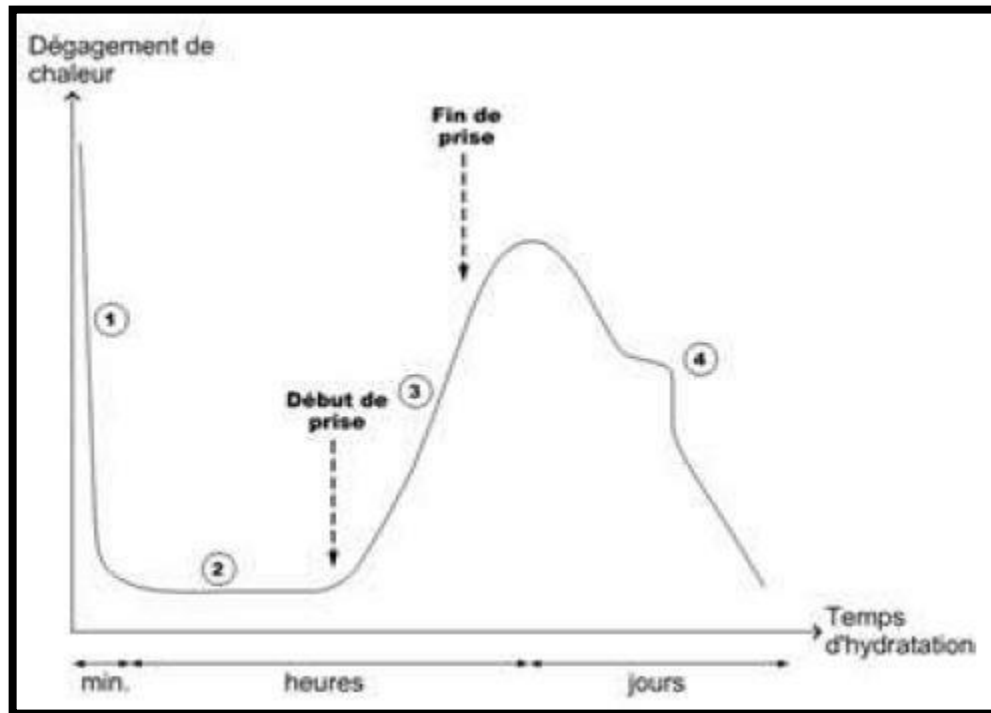


Figure 14: Courbe caractéristique de calorimétrie isotherme d'un ciment.

**Période 1 : Réactions initiales**

**Période 2 : Période dormante**

**Période 3 : Période d'induction des silicates.**

**Période 4 : Période d'accélération**

**Période 5 : Période de ralentissement**

**Période 6 : Passage suspension-pâte durcie**

### I.3.5. Ciment blanc

Le ciment blanc est un ciment Portland, il est fabriqué à partir des matières premières brutes particulièrement choisies qui sont généralement la craie pure et l'argile blanche (kaolin) contenant de très petites quantités d'oxyde de fer et d'oxyde de manganèse.

Le ciment blanc est fréquemment choisi par les architectes pour son utilisation dans la fabrication du béton Blanc, blanc cassé ou coloré, qui sera exposé, à l'intérieur ou à l'extérieur des édifices, au regard du public. [43]

Il est bien connu que la fabrication du ciment blanc exige un contrôle rigoureux et précis durant l'ensemble des étapes du processus technologique afin d'empêcher la contamination du produit avec le fer, le manganèse, et le titane. Le ciment blanc se caractérise par une

teneur extrêmement basse de C4AF (moins de 1,5%) et une teneur élevée de C3S et de C2S. La composition chimique du clinker de ciment Portland blanc en comparaison à celle du clinker du ciment gris est donnée dans le tableau 3.

| Composition                    | Clinker Gris | Clinker Blanc normal | Clinker blanc Minéralisé |
|--------------------------------|--------------|----------------------|--------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 20.3         | 23.1                 | 23.8                     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.5          | 3.2                  | 2.3                      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.61         | 0.28                 | 0.27                     |
| CaO                            | 65.6         | 67.8                 | 68.0                     |
| MgO                            | 2.13         | 0.83                 | 0.48                     |
| K <sub>2</sub> O               | 0.91         | 0.14                 | 0.12                     |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.19         | 0.05                 | 0.04                     |
| SO <sub>3</sub>                | 0.87         | 0.89                 | 0.65                     |
| LOI                            | 0.24         | 0.5                  | 0.9                      |

**Tableau 3 : Composition chimique du clinker blanc et gris [43].**

Le processus de fabrication du ciment blanc est tout à fait semblable à celui du ciment portland gris. Le processus inclut le choix des matières premières, la préparation du mélange cru, la cuisson du clinker, le blanchiment et le refroidissement et le broyage. La production se fait selon des conditions précises, qui sont contrôlées à chaque étape, afin d'éviter les contaminations possibles et les changements peu désirés.

Cependant, la principale différence technologique réside dans la combinaison du refroidissement et du blanchiment, nécessaires pour améliorer la blancheur du ciment et garantir l'homogénéité de la couleur.

### **I.5. 1.Choix des matières premières**

Puisque la composition chimique du ciment blanc exige l'absence de C4AF, la pureté des sources d'approvisionnement du silicium, calcium et l'aluminium est une exigence essentielle pour fabriquer le ciment blanc de haute qualité.

Pour le grade élevé du ciment blanc, le calcaire doit contenir moins de 0,15% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et moins de 0,015% de MnO ; l'argile (kaolin) doit contenir 65-80% de SiO<sub>2</sub>, pas plus de 1% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, moins de 0,8% de TiO<sub>2</sub> et seulement des traces de MnO. Généralement, le kaolin approprié contient 70-73% de SiO<sub>2</sub>, 18-20% de l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,4-1% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, et 0,8% de TiO<sub>2</sub> et sans aucune trace de MnO. Le sable de quartz doit contenir au moins 96% de SiO<sub>2</sub>, et 0,2% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [37].

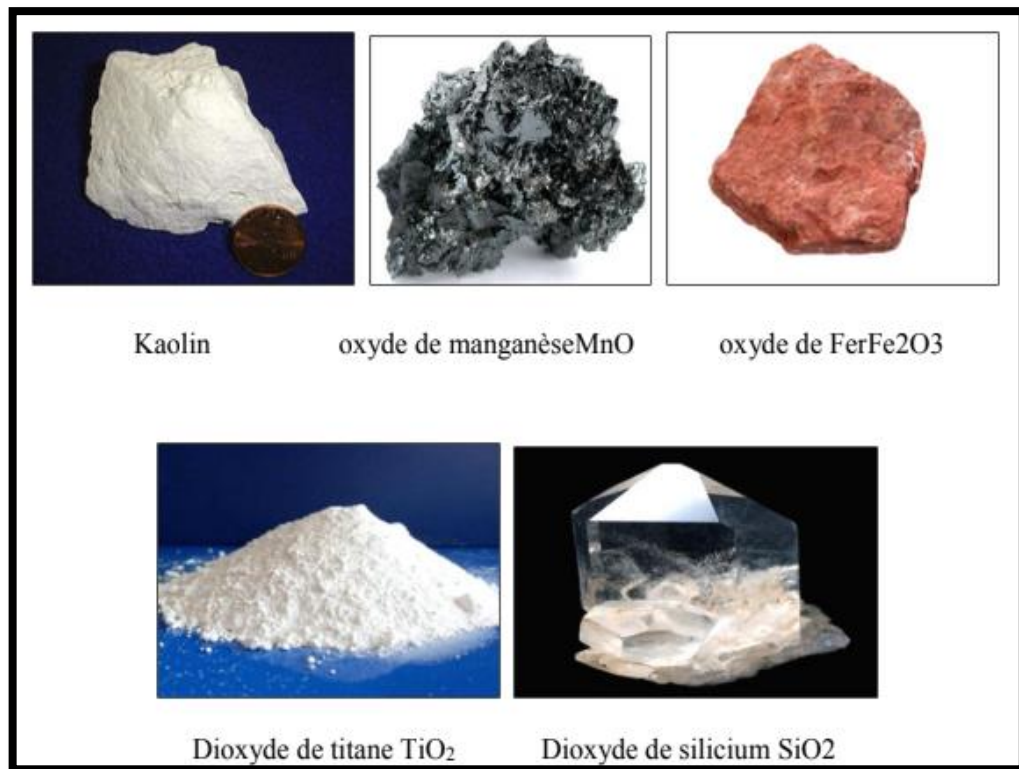


Figure 15: Différents d'éléments minéraux.

### I.5. 2. Maîtrise de la couleur

La couleur des minéraux naturels dépend de la présence des éléments chromophores colorants. Le Fe, Co, Ni, Mn, Cr, Ti et le Cu sont des chromophores bien connus et responsables de la couleur minérale. Parmi eux le  $Fe^{3+}$  est le chromophore le plus puissant: il fournit une forte intensité de coloration caractérisant les nuances de rouge, de pourpre, et jaune. Le  $Fe^{2+}$  fournit des nuances de vert et de bleu et le  $Cr^{3+}$  offre des nuances de rouge ou vert.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Ghrieb, A.** Stabilisation pour la valorisation des sables de dune en assises de chaussée, Thèse de doctorat, Département génie civil, Ecole Nationale Polytechnique Alger, 2013-2014, P 5-10.
- [2] **KETTAB, R.** Contribution à la valorisation du sable de dunes. Thèse de Doctorat d'état Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, 2007.
- [3] **CHAUVIN, J.J.** Les sables : guide technique d'utilisation routière. ISTED, 76 p. France, 1987
- [4] **SOUILMI Samiha. BEN MOUSSA Imane.** Etude des caractéristiques physicochimiques du sable des dunes (cas sites d'Adrar) MEMOIRE MASTER, Faculté des Sciences et de la Technologie. 2018/2019.
- [5] **AUGRI. C et CREUSSARD. P.** Les granulats marins, rapport scientifique et technique N° 51, Publication du centre français pour l'exploitation des océans, 1984.
- [6] **BEN DHIA M.H.** Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 213, 1998., pp.33-42
- [8] **DOMEC M,** Construction des chaussées au Sahara, Rapport technique du Laboratoire Central des Travaux Publics, Alger, Sep. 1980.
- [9] **H. Azouz.** Etude de bétons à base des sables de dune. Mémoire de Magister, Université Mohamed Kheider Biskra. 2009.
- [10] **H. BELKHIRI, A. DERRAGUI.** Contribution à l'étude des comportements mécaniques de mortier à base de sable de dune et fines siliceuses, Université Ziane Achour de Djelfa. 2016.
- [11] **GHRIEB. A,** Etude d'un béton de sable de dunes pour pistes aéronautiques, thèse de Magister, ENP, Alger, 2003.
- [12] **BEN DHIA M.H.** Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 213, 1998, pp.33-42
- [13] **Zeyneb belabbaci.** These de doctorat Stabilisation des sols gonflants. L'université Abou Bekr Belkaid Tlemcen. 2014.
- [14] **Deribere, M., Esme, A.** «la bentonite », Dunod, 2 Edition, 1943.
- [15] **Davis, C.W., Vacher, H.C.,** Technical Paper, N° 438, US Bureau Minis., Washington, (1928).

- [16] **Frylander, J.H.**, Rev.Prod.Chim.etAct.Sc. 32,325,1929.
- [17] **Mohellebi, F.** thèse doctorat «Analyse et régénération des huiles usagées » Département Génie Chimique, Ecole Nationale Polytechnique, 18octobre 2001.
- [18] **BOUGHERRA HADDA**, Elaboration de catalyseurs à base de Bentonite et de Kieselguhr. Application au craquage catalytique des hydrocarbures et du Gasoil. Département Génie Chimique ; ENP juin 2001
- [19]. **G. Edelmann et J. C. L. Favejee**, On the cristal structure of montmorillonite and hallosite", Ed. Kriste, 102, 417, (1940).
- [20] **A. Bendjama**, thèse de magister « Etude des bentonites Algériennes..» ENP, Alger, 1982.
- [21] <http://www.andra.fr/sciences/argile.html>.
- [22] **Ségolène HIBON** - Thèse en Matériaux Polymères et Composites INSA de Lyon – 2006.
- [23] **M. Carretero**, “Clay minerals and their beneficial effects on human health” Applied clay Science 21 (2002), p155-163.I
- [24] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Bentonite>.
- [25] **ANDRIANARISOA R.** L’argile montmorillonitique d’Ampasimpotsy. Rapp. 1980 Serv. Géol. Mad.
- [26] **Alain .Meunier** « Argiles ».Edition scientifique GB.(2002)
- [27] **Caillère S., Hénin S., Rautureau M.**,Minéralogie des argiles Tomes 1 et 2. Paris: Masson. 184p et 189 p, (1982).
- [28] **J. M. Adams And S. Evans**; “determination of the cation-exchange capacity (layer charge) of small quantities of clay minerals by nephelometry » Edward Davies Chemical Laboratories, University College of Wales, Aberystwyth, Dyfed, SY23 1NE, U.K. 24 April 1978.
- [29] **Gillot, Jack .E.** « Clay engeneering Geology » John Wiley & Sons, Inc. 1984
- [30] Société Française de la Neutronique. Revue « les échos de la SFN », N°05 ,Décembre 2007.
- [31] **Fatima Zohra Azzouz** ; mémoire de magister « Contribution a l’etude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen », 2006.
- [32] **Bani Baker, M., Abendeh, R., Sharo, A., & Hanna, A.** (2022). Stabilization of sandy soils by bentonite clay slurry at laboratory bench and pilot scales. Coatings, 12(12), 1922.

- [33] **Abulimiti, M., Wang, J., Li, C., Zhang, Y., & Li, S.** (2023). Bentonite could be an eco-friendly windbreak and sand-fixing material. *Environmental Technology & Innovation*, 29, 102981.
- [34] Ecole d'Avignon. « Technique et pratique de la chaux », Paris, Eyrolles, 2003
- [35] Association Française de normalisation. « Ciments et chaux », Paris, Afnor, 2003
- [35] **Farah LAZZALI.** « Contribution à l'étude de la stabilisation d'un sol gonflant (bentonite) par apport de chaux, thèse de magister, université des sciences et de technologie Houari Boumediene, 1997
- [36] **Gheddache, H.** *Stabilisation des sols a la chaux et a chaud* .Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri TiziOuzou. 2012.
- [37] **BELLIL, S.** Etude de l'effet du mélange bentonite-ciment sur le potentiel d'affaissement des sols .Doctoral dissertation, Université de Batna 2. 2019.
- [38] **Hugo HOUBEN, Hubert GUILLAUX.** « Traité de construction en terre », Parenthèses, Juin 1995.
- [40] **Charron, J.P., Marchand, J., Bissonnette, B et Pigeon, M** , “Comportement au jeune âge du béton-Vers un meilleur contrôle de la fissuration des. 2001 ouvrages”, Congrès de l'ACI Section du Québec et de l'Est de l'Ontario, Montréal, Canada.
- [41] **Vernet, C et Cadoret, G (1992),** “Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des BHP pendant les premiers jours dans les Bétons à Hautes Performances- Caractérisation, durabilité, applications”, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [42] **La Torre, A.G., de Vera, R.N., Cuberos, A.J.M and Aranda, M.A.G** (2008), “Crystal structure of low magnesium-content alite: Application to Rietveld quantitative phase analysis”, *Cement and Concrete Research*, X (11), pp 1261-1269.
- [43] **KHANOUS Amar.** M.F.E MASTER, thème ; optimisation du taux de calcaire pour la production d'un nouveau ciment blanc. Université des sciences et de la technologie d'oran mohamed boudiaf . 28 Septembre 2014.

# CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

## **II.1. Sable**

Dans cette étude nous avons utilisé un sable de carrière (CASAP SILIS) RN56 et un sable de dune (SD) de la région de Ain El Beida (Wilaya d'Ouargla) photo 16.



**Figure 16 : sable de dune.**

### **II.1. 2. Analyse granulométrique : (NF P 18-540)**

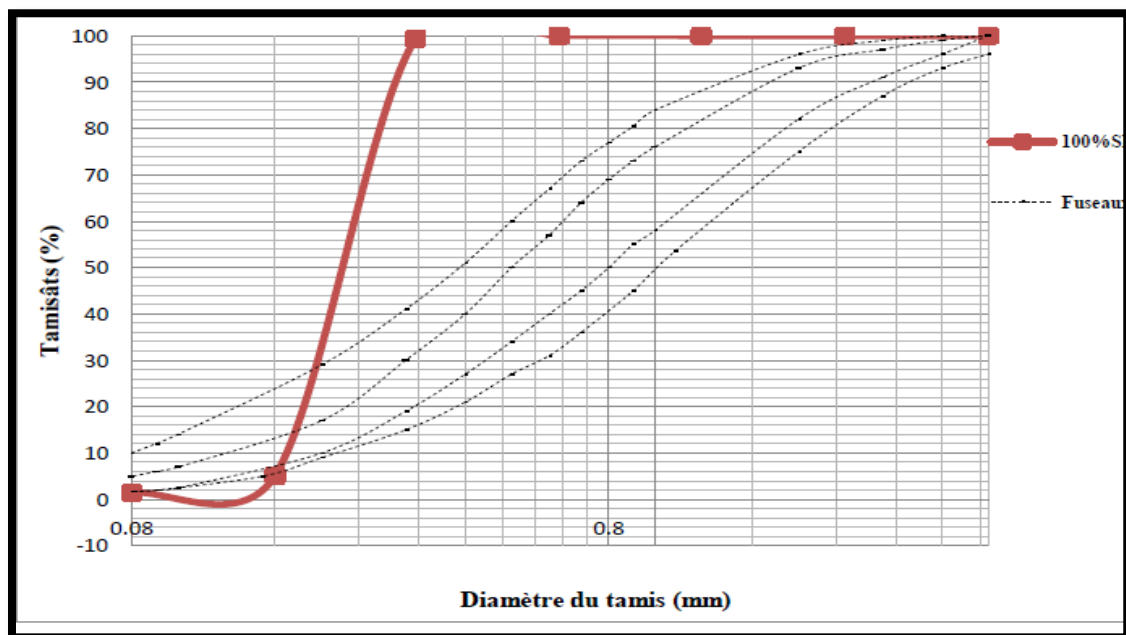
L'analyse granulométrique est l'étude des dimensions des diamètres des grains, leur distribution, de différencier les sols entre eux, (roche, gravier, Argile...etc.). Les sols sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par tamisage sur des tamis ou passoirs

- Le but de l'essai se matérialise par plusieurs points, on peut citer :
- Le dimensionnement des particules qui varie entre 10-6 mm à 1000 mm
- La classification utilisée pour caractériser les grains de différentes dimensions.
- L'établissement de la courbe granulométrique qui donne des informations très précises sur le sable étudié.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis.



Figure 17: matériel d'essai d'analyse granulométrique .



Graphe 1: courbe granulométrique de sable de dune.

- La courbe en rouge représente l'échantillon réel ("100% S").
- Les lignes pointillées représentent un **fuseau normatif** (valeurs recommandées pour un matériau bien gradué dans une application spécifique).
- On note une **courbe très abrupte entre 0,1 mm et 0,6 mm**, ce qui indique que presque **100 % des grains sont de taille très similaire**, donc **mal gradué**.
- **Calculs granulométriques**

On estime visuellement quelques diamètres caractéristiques :

D10 : diamètre tel que 10 % des grains sont plus fins  $\approx 0.18$  mm

D30 :  $\approx 0.22$  mm

D60 :  $\approx 0.28$  mm

Ces valeurs permettent de calculer :

D'uniformité ou coefficient de Hazen, qui est défini comme suit :

Cu : Coefficient d'uniformité

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

D60 : Diamètre des particules à 60%passant

D10 : Diamètre des particules à 10%passant

Si  $(D_{60}/D_{10}) < 2$  le sol présente une granulométrie uniforme.

Si  $(D_{60}/D_{10}) > 2$  le sol présente une granulométrie variée (étalée).

**Cu  $\approx 1.56$  donc le sol présente une granulométrie uniforme.**

Peu de granularité, donc mauvais comportement mécanique

## **II.2. Bentonite**

### **II.2. 2.Origine de la bentonite utilisée**

En Algérie, plusieurs gisements de bentonite sont répartis à travers le territoire national. Parmi ces gisements, celui situé dans la région de Maghnia (Hammam Boughrara) présente un intérêt économique croissant en raison de la qualité de l'argile extraite. La bentonite utilisée au cours de notre travail est une argile naturelle (bentonite de Maghnia), extraite du gisement de Hammam Boughrara. Elle a été obtenue à partir de l'\*\*\*ENOF (Entreprise Nationale des Produits Miniers Non Ferreux)\*\* de Bordj Bou Arréridj\*\*, située à environ 220 km à l'est d'Alger. Elle nous a été fournie à l'état naturel, finement broyée, par une entreprise locale spécialisée dans l'exploitation des minéraux industriels. Le produit a été livré non traité, conditionné dans des sacs de 40 kg, prêt à être utilisé pour les essais de laboratoire.



Figure 18: Conditionnement et le site de bentonite

## II.2. 2.Essais de caractérisation

Le programme expérimental consiste à effectuer une série d'essais pour déterminer les paramètres qui permettent l'identification des matériaux utilisés. Les essais menés sur les différents matériaux et mélanges sont [2] :

### II.2. 2.1. Analyse granulométrique

#### ➤ Le but d'essai

L'essai a pour but de déterminer en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions.

#### ➤ Mode opératoire

- Le matériau est versé le plus souvent en plusieurs fois pour ne pas surcharger les tamis supérieurs. Le tamisage à sec est recommandé pour les sols sableux ou renfermant surtout des cailloux et des graviers.

#### ➤ Appareillage

- Balance de précision 0.1g.
- Une série des tamis.
- Appareil d'analyse granulométrique.



**Figure 19: matériel d'essai analyses granulométriques.**

Les résultats de cette analyse sont traduits par des courbes. La courbe granulométrique nous renseigne sur son uniformité, on caractérise un sol par la granulométrie c'est-à-dire par le coefficient

D'uniformité ou coefficient de Hazen, qui est défini comme suit :

Cu : Coefficient d'uniformité

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

D60 : Diamètre des particules à 60%passant

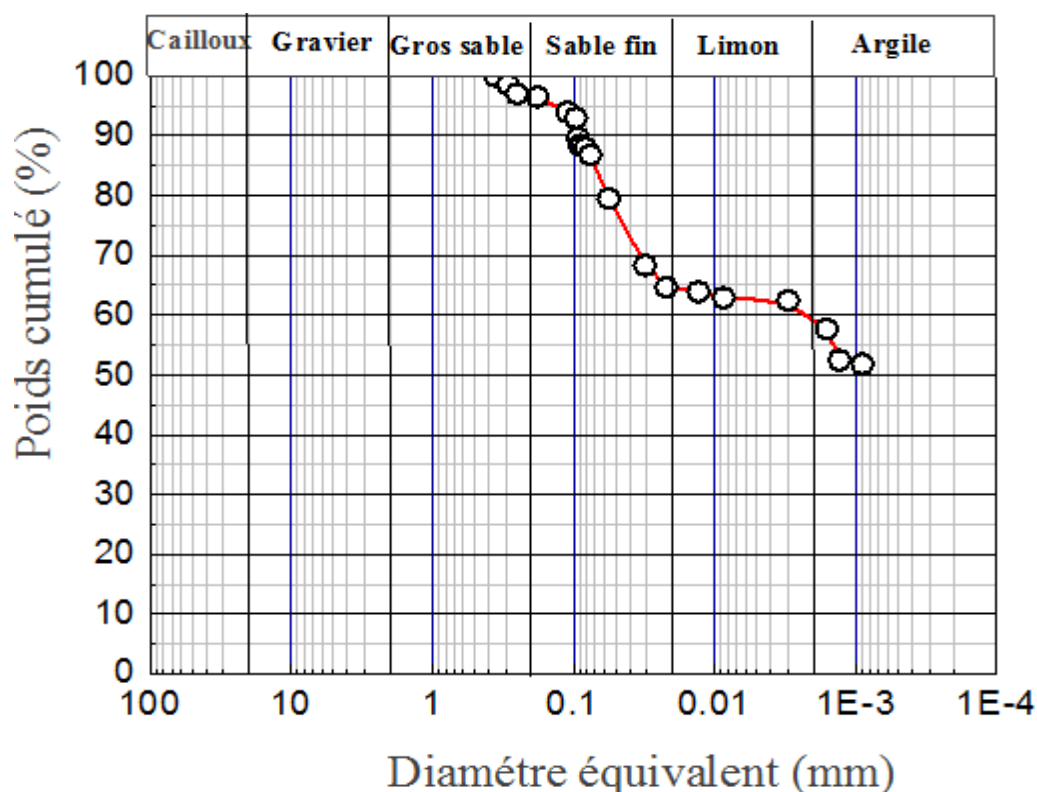
D10 : Diamètre des particules à 10%passant

Si  $(D_{60}/D_{10}) < 2$  le sol présente une granulométrie uniforme.

Si  $(D_{60}/D_{10}) > 2$  le sol présente une granulométrie variée (étalée).

### ➤ Résultats

Les résultats des analyses granulométriques de bentonite sont représentés graphiquement dans la graphe 2.



**Graph 2: Courbe granulométrique de bentonite de MEGHNIA [1].**

Les renseignements à tirer de cette analyse pour un sol gonflant sont :

- Le pourcentage des particules fines ( $C1 < 1\mu\text{m}$ )
- Le pourcentage des particules fines ( $C2 < 2\mu\text{m}$ )
- Le pourcentage des éléments fins ( $\emptyset < 80\mu\text{m}$ )

| $\emptyset < 80\mu\text{m}$ | $C2 < 2\mu\text{m}$ | $C1 < 1\mu\text{m}$ |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|
| 95%                         | 65%                 | 60%                 |

**Tableau 4: Résultats granulométriques de la bentonite étudiée.**

La courbe granulométrique présentée concerne un échantillon de bentonite prélevé dans la région de MEGHNIA. Elle permet de caractériser la répartition des tailles de particules présentes dans ce sol. D'après l'analyse de cette courbe, on observe que la majorité des particules possèdent un diamètre inférieur à 0,1 mm, ce qui correspond aux fractions limoneuses et argileuses. La courbe est nettement décalée vers la droite, traduisant une dominance marquée des éléments fins. Plus précisément, la portion la plus importante de la courbe se situe entre les domaines du sable fin, du limon et de l'argile, avec un aplatissement de la courbe dans la zone des argiles, indiquant une proportion significative de ces particules très fines. Cette distribution granulométrique est caractéristique des sols

argileux très plastiques, ce qui est cohérent avec la nature minéralogique de la bentonite, riche en montmorillonite. Sur le plan géotechnique, cette texture confère à la bentonite une très faible perméabilité, une plasticité élevée, et une forte capacité de gonflement. D'un point de vue géotechnique, cette distribution granulométrique confirme la nature **argileuse colloïdale** de la bentonite de MAGHNIA. Une telle texture implique des propriétés physiques importantes :

- **Très faible perméabilité**, idéale pour les applications d'étanchéité.
- **Forte capacité de rétention d'eau**, due à la finesse des particules.
- **Pouvoir gonflant élevé**, typique des bentonites sodiques.
- **Haute plasticité**, rendant la bentonite efficace dans les mélanges de boues de forage et dans les barrières géotechniques.

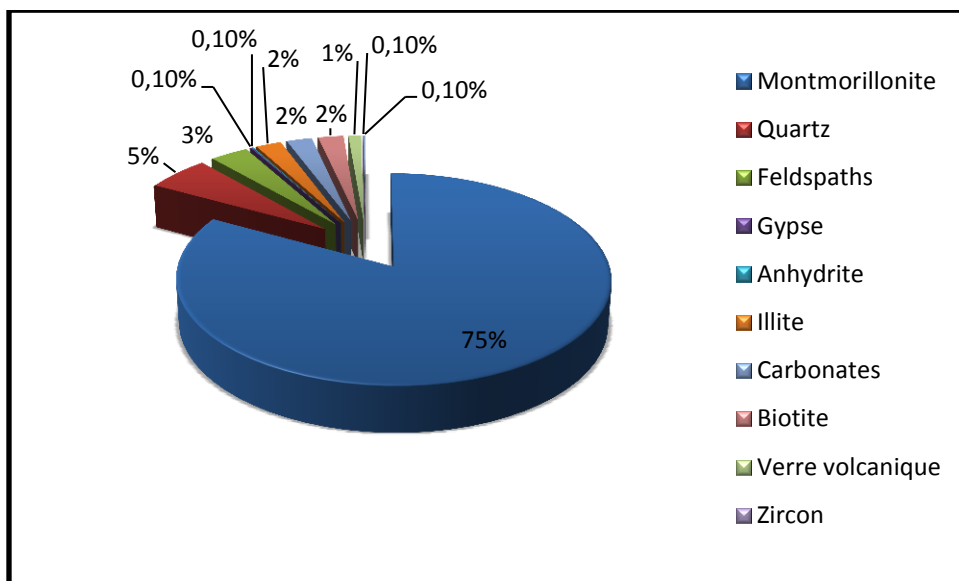
En conclusion, la courbe granulométrique met en évidence la qualité de la bentonite de MAGHNIA pour des usages industriels, en particulier dans les domaines du forage pétrolier, de la stabilisation des sols et de la conception des barrières étanches dans les ouvrages de génie civil.

## II.2. 2.2. Analyse minéralogique

Cette analyse permet d'identifier les types et les nombres des minéraux présents dans l'argile en utilisant la diffraction des rayons X.

La montmorillonite était identifiée comme étant le principal minéral présent dans les échantillons. La présence du quartz était également identifiée d'une façon positive dans tous les échantillons analysés. Les diffractogrammes révèlent la présence de plusieurs autres pics de faible intensité.

Cependant, ces pics de faible intensité peuvent être groupé pour coïncider avec les diffractogrammes standard de plusieurs autres minéraux qui sont normalement rencontrés dans la bentonite tels que : chlorite, illite, & etc.

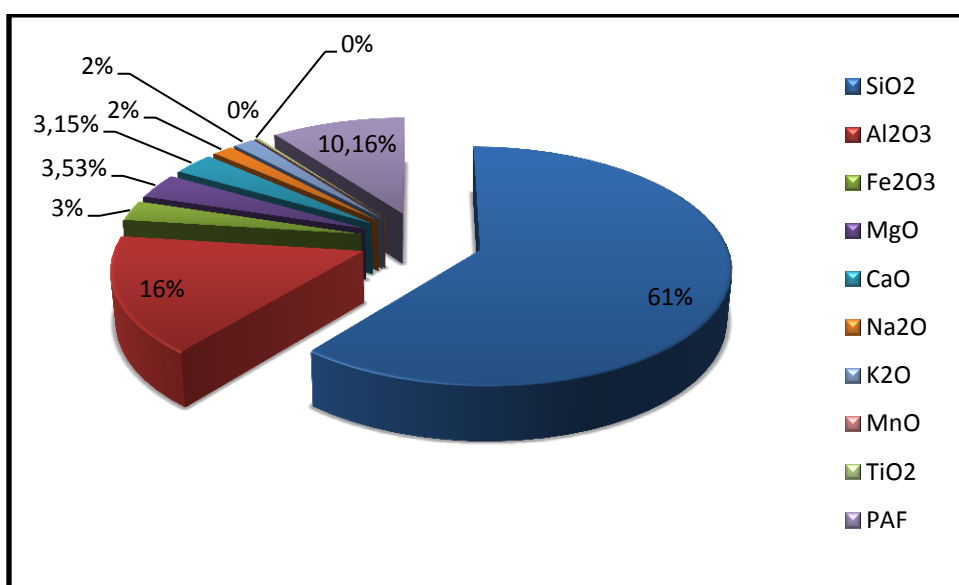


**Grphe 3:Répartition des minéraux contenus dans le bentonite de MEGHNIA.**

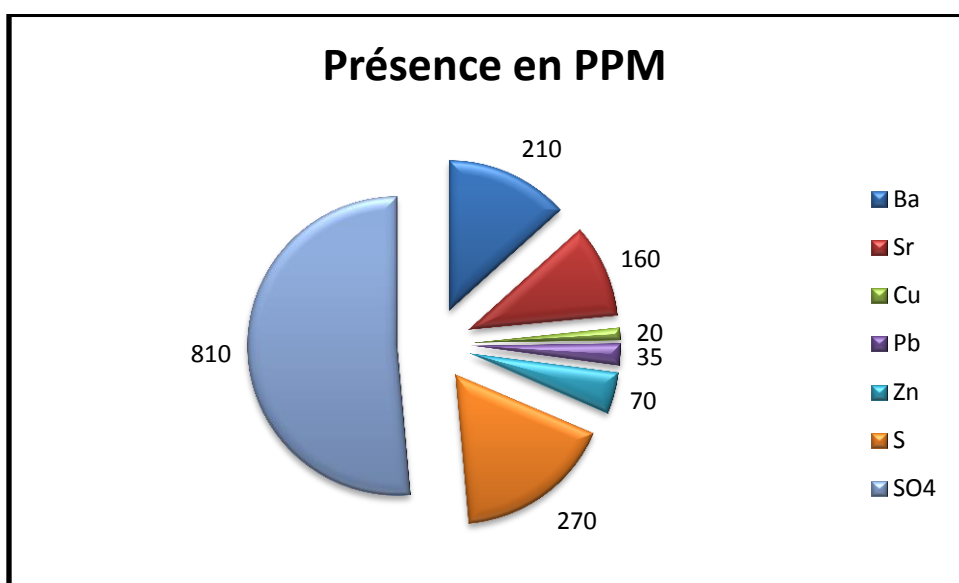
D'après ces résultats on note que la bentonite de MEGHNIA renferme un taux élevé de montmorillonite, indice de pureté des bentonites, et une faible teneur en quartz libre et verre volcanique qui nuit aux propriétés rhéologiques de la bentonite tel que la plasticité et par la suite la viscosité.

## II.2. 2.3Analyse chimiques

Elle permet de déterminer les types d'oxydes présents dans la matière ainsi que leurs teneurs. Les graphes ci-dessous montrent l'analyse chimique des échantillons de bentonite de MEGHNIA à l'état brut.



**Grphe 4:Analyse chimique de bentonite de Meghnia \*oxydes\***



**Graphique 5:Analyse chimique de bentonite de MEGHNIA \*élément trace\*.**

Le rapport molaire de la silice sur alumine de la bentonite de MEGHNIA est de 5,40.

En se référant à l'analyse minéralogique et chimique on peut dire qu'une partie de Na<sub>2</sub>O présente est liée au feldspath (albite) présente en grande quantité dans le gisement.

La présence du soufre, S, indique la présence des sels solubles qui gênent l'échange cationique.

Pour la montmorillonite pure, le rapport molaire silice sur alumine varie entre 2 - 3 pour une substitution maximale de Si<sup>4+</sup> par Al<sup>3+</sup> et 4 - 8 pour une substitution maximale d'Al<sup>3+</sup> par Mg<sup>3+</sup>.

Dans une tentative d'évaluer le degré de pureté d'une bentonite en son contenu de montmorillonite à partir de sa composition chimique seulement, le rapport molaire silice sur alumine peut être utile en tant qu'indicateur qualitatif.

### II.3. Chaux

Dans le cadre de cette recherche, nous avons eu recours à l'utilisation de la chaux vive issue de la région de Ghardaïa \*BASLIMANE CHAUX BERRIANE,SARL\* Zone Artisanale Oued Soudane Berriane. Ce choix s'inscrit dans une démarche visant à tirer parti des ressources locales disponibles, tout en évaluant l'efficacité de ce liant minéral dans les travaux de stabilisation des sols sableux, en particulier dans le contexte des conditions géotechniques propres aux zones arides.



Figure 20: Chaux vive de GHERDAIA.

### II.3.1. Préparation de la chaux éteinte en laboratoire

Dans le cadre de la préparation des échantillons, nous avons utilisé la chaux éteinte (hydroxyde de calcium,  $\text{Ca(OH)}_2$ ), obtenue par extinction de la chaux vive (oxyde de calcium,  $\text{CaO}$ ) avec de l'eau, selon la réaction chimique suivante :



Cette réaction produit une poudre fine de couleur blanche, caractérisée par des propriétés alcalines marquées en raison de sa solubilité partielle dans l'eau, formant ainsi une solution saturée appelée eau de chaux.

### II.4. Ciment blanc

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé **PEGOLAND® PORCELÁNICO FLEXIBLE**, une colle céramique haute performance, marque déposée de la société **PUMA**. Il s'agit d'un mortier-colle à liants mixtes, à glissement réduit et à temps ouvert prolongé, destiné à la pose de revêtements de sols, aussi bien en intérieur qu'en extérieur.

#### II.3.1. COMPOSITION

Produit à base de ciment haute résistance, de granulats tamisés, d'adjuvants et de résines synthétiques. Garantie d'un degré élevé d'accrochage, d'une bonne maniabilité et d'une résistance à l'usure.

### II.3.2. Données techniques

| Aspect Poudre                                               | BLANCHE ou GRISE                               |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Temps d'ajustement                                          | Environ 30 min. (Selon conditions climatiques) |
| Durée Pratique d'Utilisation (DPU)                          | Environ 2 h. (Selon conditions climatiques)    |
| Adhérence initiale                                          | $\geq 1 \text{ N/mm}^2$                        |
| Adhérence après action de l'eau                             | $\geq 1 \text{ N/mm}^2$                        |
| Adhérence après le vieillissement sous action de la chaleur | $\geq 1 \text{ N/mm}^2$                        |
| Adhérence après le cycle gel-dégel                          | $\geq 1 \text{ N/mm}^2$                        |
| Temps de jointoiment pour les sols et trafic léger          | 48 h                                           |
| Temps de jointoiment pour les revêtements                   | 24 h                                           |
| Temperature de service                                      | -30°C a 90°C                                   |
| Classification selon norme                                  | EN 12004 C2 TE                                 |
| - Adhérence initiale par traction                           | $\geq 1 \text{ N/mm}^2$                        |
| - Adhérence par traction après immersion dans l'eau         | $\geq 1 \text{ N/mm}^2$                        |
| - Adhérence par traction après vieillissement thermique     | $\geq 1 \text{ N/mm}^2$                        |
| - Adhérence initiale par traction                           | $\geq 1 \text{ N/mm}^2$                        |

**Tableau 5: les données technique de ciment utilisé.**

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **GUEDDOUDA Mohamed Kamel.** Comportement hydro-mécanique des sols compactés : Application à la conception d'une barrière ouvragée « sable de dune et bentonite », Université ABOUBAKR Belkaid 3 TLEMCEN.2011.
- [2] **A. BENKORICHI A. MESBAHI.** Mémoire magister en en Génie Chimique. Caractérisation de la Bentonite et Essai de fixation du cation  $Ni^{++}$ . ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE Alger. 2008.

# CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSIONS

### III.1. La formulation d'un mortier modifie a la bentonite

Cette recherche a adopté une méthodologie précise pour la préparation d'un mortier à la bentonite modifié en utilisant un système quaternaire de composants comprenant : la bentonite, la chaux étaient ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), le ciment colle et le sable fin. La proportion de sable a été maintenue constante comme référence, tandis que les ratios des liants (bentonite, chaux, ciment) ont été variés selon une matrice expérimentale bien définie.

| B1 | B2 | B3 |
|----|----|----|
|----|----|----|

Tableau 6: les conditions expérimentales.

### III.3. Confection et conservation des éprouvettes

#### III.3.1. Préparation des matériaux

Pesé les quantités nécessaires des différents matériaux bentonite. chaux. ciment coll



Figure 21: les matériaux utilisés.

#### III.3.2. Préparation des moules

Les essais ont été effectués à l'aide de moules de dimensions  $(4 \times 4 \times 16)$  cm. Avant le coulage, les moules sont soigneusement nettoyés puis lubrifiés avec de l'huile afin de faciliter le démoulage et d'éviter toute adhérence du matériau aux parois.



Figure 22: la préparation des moules

### III.3.3. Préparation de mélange et remplissage des moules

La quantité de mélange destinée à remplir les moules doit être suffisante pour qu'il reste, après serrage, une couche de mortier dans celle-ci, ayant une épaisseur de 10 % à 20% de la hauteur de l'éprouvette. Les échantillons doivent être serrés en au moins deux couches.



Figure 23: le remplissage des moules.

### III.3.3. Serrage par appareil de choc :

La choc doit être appliquée durant le temps nécessaire au serrage a refus du mortier , il est préférable que le moule soit fixé ou maintenu fermement contre cette table, toute autre choc excessive doit être évitée, afin de ne pas provoquer une diminution de l'air entraine

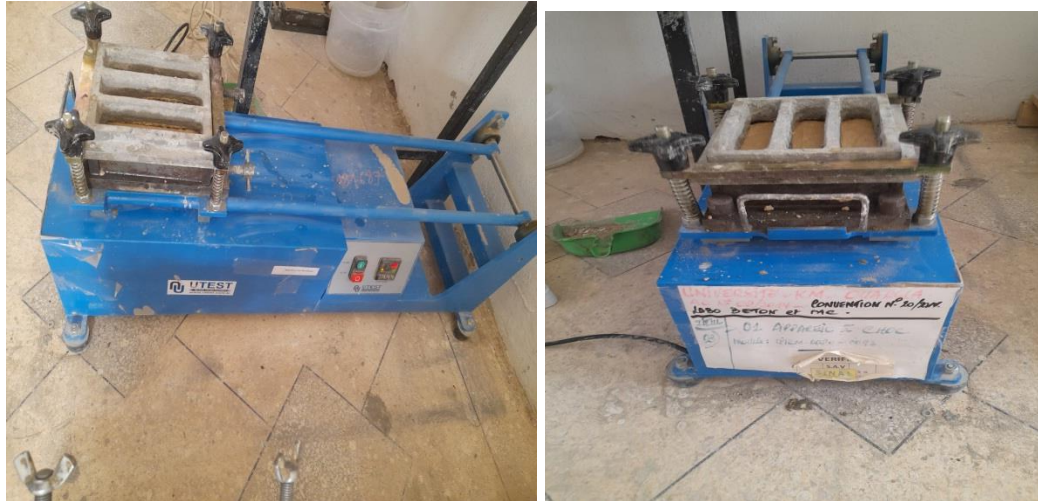


Figure 24: l'appareille de choc.

### III.3.3. Marquage

Les éprouvettes doivent être marquées sans endommagement de façon claire et durable, des enregistrements doivent permettre de garantir l'identification de l'éprouvette depuis le prélèvement jusqu'a l'essai.



Figure 25: le marquage de l'éprouvette

### II.4.4. Conservation des éprouvettes :

Les éprouvettes doivent rester dans la moule et être protégées contre les chocs, les vibrations et les dessiccations pendant un minimum de 16h et un maximum de 3jours, à la température ambiante .



Figure 26: les éprouvettes à l'état finale.

### III.4. Résistances mécaniques :

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression et à la traction des mortiers étudiés.

#### III.4.1. Résistance à la traction par flexion NFP18-407

Le comportement en traction est l'aspect le plus important pour un mortier de bentonite car ce matériau composite subit le plus souvent ce type de chargement dans ces applications. On ajoute de chaux et le ciment colle dans le mortier pour améliorer la ductilité et fournir un contrôle du mécanisme de fissuration.

C'est l'essai généralement le plus utilisé et le plus connu dans la caractérisation des matériaux.

L'essai est réalisé sur des éprouvettes (4x4x16) [1].

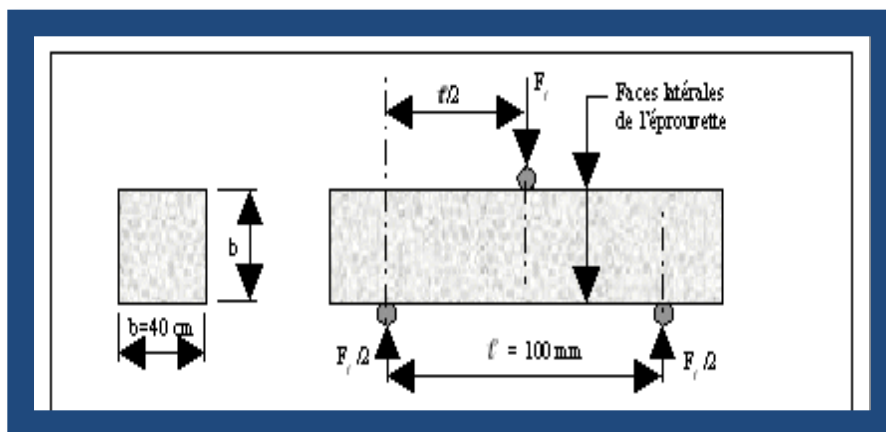


Figure 27: le dispositif pour l'essai de résistance à la traction par flexion (3 points).[2]

#### III.4.1.1. L'appareille de test

L'appareil sur la figure 28 est une presse hydraulique pour essais de compression de marque CONTROLS, modèle AUTOMAX 5. Il est principalement utilisé pour tester la résistance à la compression des échantillons de béton ou d'autres matériaux.

Principales composantes de l'appareil :

- Chambre de compression : Elle contient le vérin où l'échantillon (généralement un cube ou un cylindre en béton) est placé.
- Système hydraulique de chargement : Applique progressivement la charge jusqu'à la rupture de l'échantillon.
- Unité de commande numérique (AUTOMAX) : Permet de régler et contrôler le test (vitesse de chargement, démarrage, arrêt, enregistrement des résultats, etc.).
- Bouton d'arrêt d'urgence et autres éléments de sécurité.

**Usages courants :**

Essai de compression du béton.

Essai de compression de matériaux traités (sols stabilisés, composites...).

Possibilité de configurer d'autres essais comme la flexion ou la traction selon les accessoires.



**Figure 28: L'appareille De Test**

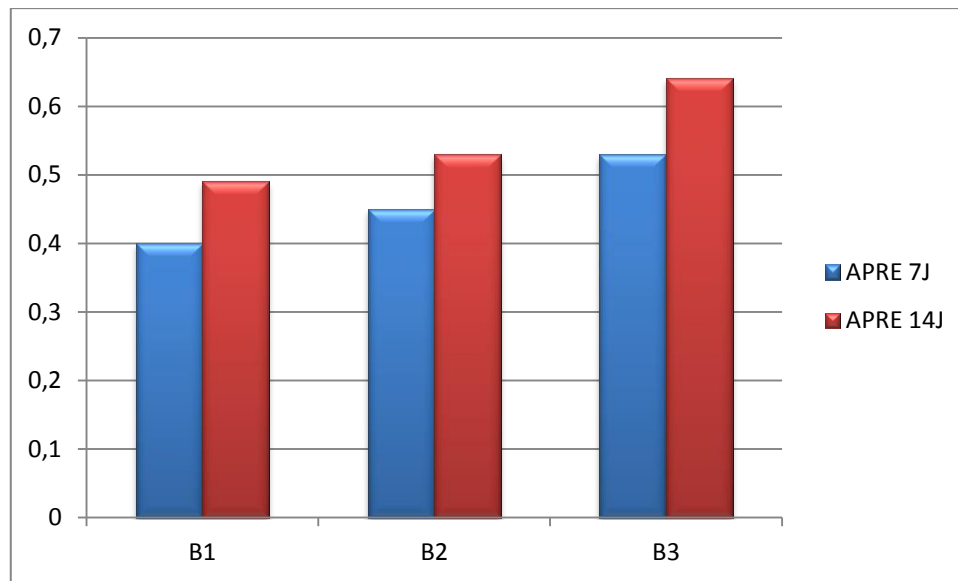


Figure 29: Les étapes de teste de traction flexion.

## ➤ Résultats

|           | La résistance |          |
|-----------|---------------|----------|
|           | Apré 7 J      | Apré 14J |
| <b>B1</b> | 0.40MPA       | 0.49MPA  |
| <b>B2</b> | 0.45MPA       | 0.53MPA  |
| <b>B3</b> | 0.53MPA       | 0.64MPA  |

Tableau 7: Résultats de la résistance à la flexion.



**Graphe 6: Résultats de résistance à la flexion.**

➤ **Discussion**

Les résultats expérimentaux indiquent une progression notable de la résistance à la flexion des échantillons B1, B2 et B3 entre 7 et 14 jours. Cette évolution s'explique par les processus de durcissement des liants présents dans les mélanges, notamment le ciment adhésif et la chaux.

**a) Effet du temps de cure**

L'augmentation progressive de la résistance au fil du temps est attendue dans les matériaux contenant des liants hydrauliques. Après 7 jours, la résistance est encore en cours de développement, tandis qu'à 14 jours, les réactions d'hydratation du ciment et de carbonatation de la chaux sont plus avancées, contribuant à une meilleure cohésion et rigidité du matériau.

**b) Rôle des composants**

Le bentonite apporte une amélioration de la compacité et de l'homogénéité du mélange, mais son influence sur la résistance mécanique reste limitée. Il agit principalement en tant qu'agent de remplissage colloïdal.

La chaux intervient à travers des réactions pouzzolaniques avec les silicates présents dans le mélange, ce qui permet la formation de gels cimentaires au fil du temps, améliorant la résistance.

Le ciment adhésif est le principal contributeur à la résistance mécanique, en particulier à court terme, grâce à ses propriétés hydrauliques qui favorisent le développement rapide d'une matrice rigide.

**c) Comparaison des performances**

**B1** présente la résistance la plus faible, traduisant probablement une teneur réduite en ciment ou un excès de bentonite.

**B2** montre une amélioration modérée, suggérant un équilibre plus adapté entre les composants actifs.

**B3** offre les meilleures performances mécaniques, atteignant 0.64 MPa à 14 jours. Cela reflète une formulation optimisée, avec une teneur en liants favorable au développement d'une bonne résistance à la flexion.

**Conclusion**

L'analyse des résultats confirme que la performance mécanique des mélanges est fortement dépendante de la nature et de la proportion des liants utilisés. Le mélange B3, en particulier, présente un potentiel intéressant pour des applications nécessitant une résistance mécanique accrue, comme la stabilisation des sols ou la fabrication d'éléments de construction alternatifs

**III.4.1. Résistance à la compression**

Contrôle de la qualité du mortier durci. Il s'agit des essais les plus courants Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

Les demi-prismes d'éprouvettes obtenues après rupture en flexion seront rompus en compression comme

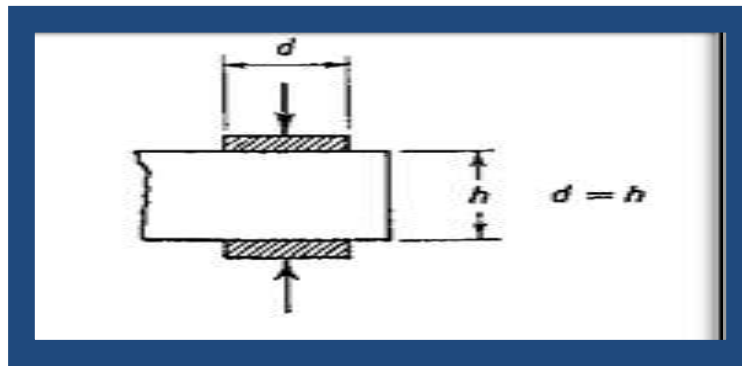


Figure 30: Dispositif pour l'essai de résistance à la compression. [2]

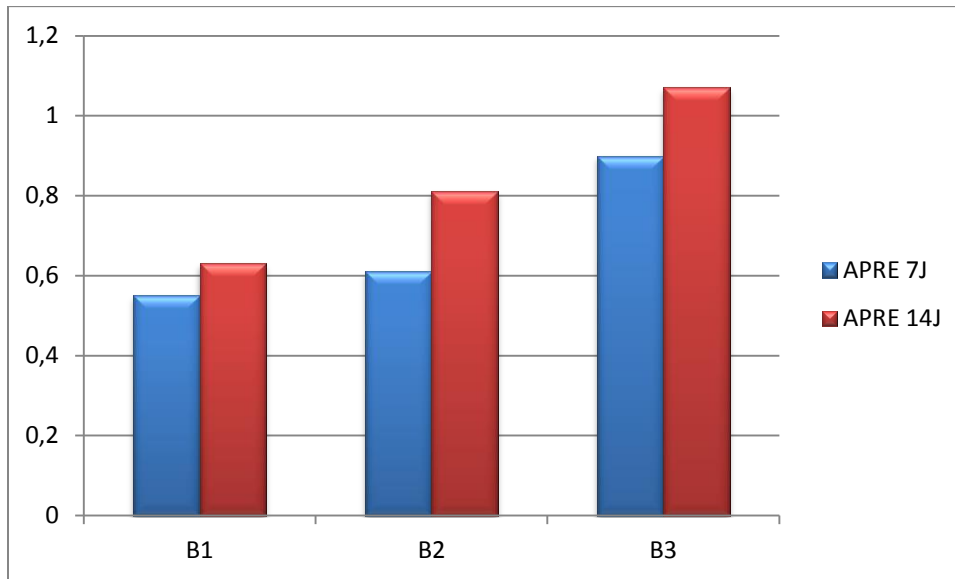


Figure 31: Les étapes de teste de compression.

## ➤ Résultats

|           | la résistance |           |
|-----------|---------------|-----------|
|           | Après 7 J     | Après 14J |
| <b>B1</b> | 0.55MPA       | 0.69MPA   |
| <b>B2</b> | 0.61MPA       | 0.81MPA   |
| <b>B3</b> | 0.91MPA       | 1.07MPA   |

Tableau 8: Résultats de la résistance à la compression.



**Graph 7: Résultats de test de compression.**

### ➤ Discussion

Le tableau 8 présente les résultats des essais de compression réalisés sur trois formulations de mélanges composés de bentonite, chaux et ciment blanc, après 7 jours et 14 jours de cure. Ces essais visent à évaluer l'évolution des performances mécaniques dans le temps en fonction des proportions des constituants.

Les données montrent une augmentation progressive de la résistance à la compression pour l'ensemble des échantillons entre le 7<sup>e</sup> et le 14<sup>e</sup> jour. Cette évolution est conforme au comportement attendu des matériaux à base de liants hydrauliques. L'échantillon B1 passe de 0,55 MPa à 0,69 MPa (+25,5 %), B2 de 0,61 MPa à 0,81 MPa (+32,8 %), et B3 de 0,91 MPa à 1,07 MPa (+17,6 %). Cette progression traduit le développement des réactions d'hydratation du ciment blanc ainsi que des réactions pouzzolaniques entre la chaux et les minéraux argileux présents dans la bentonite.

Parmi les formulations testées, le mélange B3 se distingue par la résistance la plus élevée à la fois à 7 jours et à 14 jours, suggérant une proportion plus importante de ciment blanc, favorisant ainsi le développement rapide de la résistance. Le mélange B2, quant à lui, montre un bon équilibre entre gain de résistance et potentiel de durcissement progressif, probablement dû à une meilleure synergie entre la chaux et la bentonite. B1 enregistre les valeurs les plus faibles, ce qui pourrait indiquer une teneur moins favorable en liant hydraulique actif.

En conclusion, l'analyse met en évidence l'importance de l'ajustement des proportions de chaux, ciment blanc et bentonite pour optimiser la résistance mécanique. Le mélange B3 apparaît comme le plus performant à court terme, tandis que B2 pourrait continuer à développer sa résistance au-delà de 14 jours, ce qui mérite un suivi à plus long terme.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] **GUERMITI.L**, Contribution a l'amélioration de certaines caractéristiques du béton de structure à base de sable de dune corrigé et renforcé par des fibres métalliques. Mémoire de magister. Université Kasdi Merbah d'Ouargla 2013.

[2] **AYACHI.A**, Etude des propriétés mécaniques du béton de sable de dunes. Mémoire de Master. Université Kasdi Merbah d'Ouargla. 2011.

# CONCLUSIONS

À travers cette étude, nous avons exploré les possibilités de stabilisation des sables de dunes sahariens, en particulier ceux de la région du sud algérien, à l'aide de liants tels que la bentonite, la chaux éteinte et le ciment blanc. Pour déterminer l'efficacité de mélange de matériau sur les propriétés mécaniques du sable, afin d'évaluer leur aptitude à une utilisation dans la stabilisation de sable, ou dans la construction routière.

Les résultats expérimentaux montrent que :

La bentonite, grâce à sa capacité d'absorption d'eau et son comportement thixotrope, a amélioré la cohésion des grains de sable et augmenté la résistance au cisaillement.

La chaux éteinte a permis une réduction de la plasticité et un gain progressif de résistance avec le temps, grâce à des réactions chimiques telles que l'échange cationique et la floculation.

Le ciment blanc a donné des résultats intéressants en termes de résistance à la compression, bien qu'il présente un coût plus élevé comparé aux autres liants.

Les essais de résistance à la traction et à la compression menés en laboratoire ont démontré que les mélanges sable - bentonite - chaux – ciment blanc offrent une amélioration significative des performances mécaniques, surtout lorsque les proportions sont bien maîtrisées. Le comportement global dépend de la nature du liant, de son dosage, et du mode de malaxage utilisé.

## **Limite de l'étude :**

L'étude a été limitée à des essais en laboratoire, en conditions contrôlées, ce qui ne permet pas de simuler parfaitement les effets des facteurs climatiques comme la température, l'humidité ou le vent.

Les essais ont été réalisés à court terme, sans suivi à long terme des performances des mélanges stabilisés.

Les contraintes économiques et environnementales n'ont pas été pleinement intégrées à l'analyse comparative des matériaux.

## **Perspectives et recommandations :**

Étendre les recherches à des études sur le terrain pour vérifier la durabilité des solutions proposées en conditions réelles.

Explorer de nouveaux stabilisants, notamment les polymères naturels, les additifs écologiques à base de déchets industriels.

Intégrer une analyse coût-efficacité et un bilan environnemental des techniques de stabilisation afin d'orienter les décisions vers des solutions durables.

Encourager la valorisation locale des matériaux sahariens dans les programmes de développement régional, notamment pour la lutte contre l'érosion et la désertification

### الملخص :

أصبحت تقنية تثبيت التربة واحدة من أهم الطرق المستخدمة لمعالجة مشكلات التربة، لما توفره من مزايا متعددة، أبرزها إمكانية استبدال المواد الإسمنتية بمواد مستدامة، أقل تكلفة، وسريعة التطبيق. وقد تم دراسة تقنية تثبيت التربة باستخدام المواد متعددة من أجل تحسين خصائص التربة وزيادة قدرتها على التحمل. ورغم أن آلية التقوية والنتائج المحصلة مشابهة لتلك التي يتم الحصول عليها عند استخدام الإسمنت، خاصة من حيث الصلابة، فإن هذا البحث يهدف إلى تقييم مدى جدوى استخدام البنتونايت والجير الميتم والإسمنت كبديل في عمليات التثبيت وتعزيز مقاومة التربة للضغط.

تم استخدام نسب مختلفة من البنتونايت والجير الميتم والإسمنت في تقوية التربة، وقد أجري اختبار الضغط على عينات التربة المحتوية على تراكيز مختلفة من المواد المستعملة. أظهرت النتائج أن مقاومة الضغط القصوى تم تسجيلها بعد مرور 7 و 14 يومًا.

ويُعزى ذلك إلى تأثير الخصائص والتركيبية الكيميائية الرئيسية للمواد المستعملة في تعزيز تفاعل التثبيت. تقدم هذه الدراسة مساهمة علمية جديدة في مجال تثبيت وتقوية الترب باستخدام البنتونايت والجير الميتم والإسمنت، حيث تلعب المعادن المكونة للتربة دورًا محوريًا في فعالية التثبيت بهذه المواد، لما لها من تأثير مباشر على الخصائص الجيوتقنية للتربة.

**الكلمات المفتاحية :** تثبيت التربة . البنتونايت . اختبار الضغط . الجير الميتم . الإسمنت . الرمال

### Résumé

La technique de stabilisation des sols est devenue l'une des méthodes les plus importantes utilisées pour traiter les problèmes liés aux sols, en raison de ses nombreux avantages, notamment la possibilité de remplacer les matériaux cimentaires par des matériaux durables, moins coûteux et rapides à appliquer.

Cette étude s'est penchée sur la technique de stabilisation des sols à l'aide de divers matériaux, dans le but d'améliorer les propriétés du sol et d'augmenter sa capacité portante. Bien que le mécanisme de renforcement et les résultats obtenus soient similaires à ceux obtenus avec l'utilisation du ciment, notamment en termes de rigidité, cette recherche vise à évaluer la faisabilité de l'utilisation de la bentonite, de la chaux vive et du ciment comme alternative dans les processus de stabilisation, en vue d'améliorer la résistance à la compression du sol.

Différents pourcentages de bentonite, de chaux vive et de ciment ont été utilisés pour renforcer le sol, et des essais de compression ont été réalisés sur des échantillons contenant différentes concentrations de ces matériaux. Les résultats ont montré que la résistance à la compression maximale a été enregistrée après 7 et 14 jours.

Cela est attribué à l'effet des propriétés et de la composition chimique principale des matériaux utilisés, qui favorisent la réaction de stabilisation. Cette étude apporte une contribution scientifique nouvelle dans le domaine de la stabilisation et du renforcement des sols à l'aide de la bentonite, de la chaux vive et du ciment. Les minéraux constituant le sol jouent un rôle central dans l'efficacité de cette stabilisation, en raison de leur impact direct sur les propriétés géotechniques du sol.

### Mots-clés :

Stabilisation des sols – Bentonite – Essai de compression – Chaux éteinte – Ciment-colle – Sable

### Abstract:

Soil stabilization has become one of the most important techniques used to address soil-related issues due to its multiple advantages, most notably the possibility of replacing cement-based materials with more sustainable, cost-effective, and rapidly applicable alternatives.

This study focused on soil stabilization using various materials to improve soil properties and enhance its load-bearing capacity. Although the reinforcement mechanism and the resulting outcomes are similar to those obtained when using cement—particularly in terms of strength—this research aims to evaluate the feasibility of using bentonite, quicklime, and cement as alternative stabilizing agents to enhance the soil's compressive strength.

Different proportions of bentonite, quicklime, and cement were used to reinforce the soil, and compression tests were conducted on samples containing various concentrations of these materials. The results showed that the maximum compressive strength was recorded after 7 and 14 days.

This improvement is attributed to the chemical properties and composition of the materials used, which enhance the stabilization reaction. This study presents a novel scientific contribution to the field of soil stabilization and reinforcement using bentonite, quicklime, and cement, highlighting the crucial role of the soil's mineral composition in the effectiveness of the stabilization process due to its direct impact on the soil's geotechnical properties.

### Keywords:

Soil stabilization – Bentonite – Compression test – Quicklime – Cement adhesive – Sand