



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

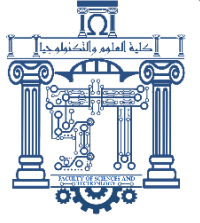
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث  
العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

جامعة الشهيد الشيخ العربي  
التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi Tébessa  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département du Génie Civil



## MEMOIRE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de **Master Académique**

**Spécialité : Géotechnique**

Par :

**Melle Bouziane Rahil & Melle Nessaib Sara**

## Sujet

# RENFORCEMENT DES ARGILES DE DOUKANE (Tébessa)

Présenté et soutenu publiquement, le 07 / 06 /2023, devant le jury composé de :

<b>Mr. Boufarh Rafik</b>	MCA	Université de Tébessa	Président
<b>Mr. Abdelhafid Fares</b>	MAA	Université de Tébessa	Rapporteur
<b>Mr. Fernane Ali</b>	MAA	Université de Tébessa	Examineur

Promotion : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## RESUME

Les problèmes posés aux ouvrages de génie civil par le comportement de certains sols dits ‘gonflants’ sont largement répandus. Le phénomène de gonflement des sols a été, aussi longtemps, considéré dans le domaine de la géotechnique, car il cause beaucoup d’endommagements et de désordres, qui se chiffrent à un coût très élevé. L’objet d’études de ce mémoire s’inscrit le cadre de la connaissance, l’amélioration et la stabilisation d’une argile de la région de Tébessa (Doukane).

Le présent travail fixe son premier objectif principal à une étude bibliographique concernant la connaissance des différentes caractéristiques minéralogiques, physiques et chimiques des argiles, ainsi que l’étude du phénomène de gonflement de ces matériaux particuliers. Dans un deuxième temps une analyse a été faite au laboratoire en exploitant les études géotechniques, afin de stabiliser et améliorer les caractéristiques de ces sols par l’ajout de la chaux et du ciment par quatre différents pourcentages (2% ciment et 2% chaux ; 2% ciment et 3% chaux ; 3% ciment et 2% chaux ; 4% ciment et 4% chaux).

Les résultats obtenus sur les sols prélevés ont permis de constater que la stabilisation par l’ajout de le ciment et la chaux ensemble ont montré que les valeurs de CBR sont augmentées.

**Mots-clés** : Argile, gonflement, amélioration, stabilisation, Ciment, Chaux.

## **ABSTRACT**

The problems posed to civil engineering works by the behavior of certain so-called “swelling” soils are widespread. The phenomenon of soil swelling has long been considered in the field of geotechnics, because it causes a lot of damage and disorder, which comes at a very high cost. The object of this thesis falls within the framework of knowledge, the improvement and the stabilization of a clay of the region of Tébessa (Doukane).

The present work sets its first main objective to a bibliographic study concerning the knowledge of the different mineralogical, physical and chemical characteristics of clays, as well as the study of the phenomenon of swelling of these particular materials. In a second step, an analysis was made in the lab by exploiting the geotechnical studies, in order to stabilize and improve the characteristics of these soils by adding lime and cement at four different percentages (2% cement and 2% lime; 2% cement and 3% lime; 3% cement and 2% lime; 4% cement and 4% lime).

The results obtained on the soils sampled that the stabilization by adding cement and lime together showed that the CBR values are increased.

**Keywords:** Clay, swelling, improvement, stabilization, Cement, Lime.

## ملخص

أثبتت الدراسات في مجال الهندسة المدنية فيما يخص نوعية بعض التربة أنها تتميز بخاصية الانتفاخ مما يترتب عنه عدم استقرار للتربة و بالتالي زيادة تكاليف معالجتها تحت إطار المجال الجيوتقني مما دفعنا لدراسة هاته الظاهرة على مستوى ولاية تبسة تحديدا منطقة الدكان التي تعرف انتفاخ في التربة الطينية وذلك من اجل تحسينها وتثبيت استقرارها.

الهدف الرئيسي لهاته الدراسة البييليوغرافية تحديد مختلف الخصائص المعدنية الفيزيائية والكيميائية للتربة الطينية حيث قمنا بدراسة تحليلية على مستوى المخبر اعتمادا على طرق جيوتقنية لتحسين خصائص هذه التربة من خلال إضافة الجير والاسمنت وذلك بأربعة نسب مختلفة (2% الاسمنت و 2% الجير، 2% الاسمنت و 3% الجير ، 3% الاسمنت و 2% الجير ، 4% الاسمنت و 4% الجير).

أظهرت نتائج التربة المعالجة أن تحسين نوعيتها عن طريق إضافة الأسمنت والجير معًا يبين زيادة قيم (الغمر) CBR.

**الكلمات المفتاحية:** الطين ، الانتفاخ ، التحسين ، التثبيت ، الاسمنت ، الجير.

## REMERCIEMENT

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

*Nous tenons à remercier chaleureusement notre promoteur Abdelhafid Fares pour son aide et son encadrement, ses encouragements et surtout sa compréhension durant toute de la période de préparation de ce mémoire.*

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

*Nous remercions tous nos enseignants durant toute notre formation et tout le personnel administratif de l'université.*

*Mon remerciement le responsable de laboratoire de l'université de Larbi TEBESSI, ACHI Souad.*

*Nous remercions aussi tous nos amis pour leurs aides, leurs patiences, leurs Compréhensions et leurs encouragements.*

*Merci* 

## LISTE DES FIGURES

FIGURE1 : LOCALISATION DE WILAYA DE TEBESSA.....	4
FIGURE2 : LOCALISATION DU LIEU DU PROJET DE DOUKANE .....	4
FIGURE3 : LA ZONE DE PRELEVEMENT .....	5
FIGURE4 : RELIEF ET ASPECT DU SITE DOUKANE. ....	5
FIGURE5 : LE CYCLE GEOLOGIQUE DES MINERAUX ARGILEUX [2].....	13
FIGURE6 : DIFFERENTS NIVEAUX STRUCTURAUX DES SOLS GONFLANTS (GENS ET ALONSO, 1992) [28]. .....	17
FIGURE7 : STRUCTURE D'UNE ARGILE [32]. ....	17
FIGURE8 : STRUCTURE DES MINERAUX ARGILEUX [23].....	18
FIGURE9 : STRUCTURE ELEMENTAIRE TETRAEDRIQUE [29]. ....	20
FIGURE10 : STRUCTURE ELEMENTAIRE OCTAEDRIQUE [29].....	20
FIGURE11 : REPRESENTATION DES EMPILEMENTS DE TETRAEDRES SILICEUX ET D'OCTAEDRE ALUMINEUX D'UN MINERAL DE TYPE 1 :1[6]. ....	21
FIGURE 12 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES EMPILEMENTS DE TETRAEDRES SILICEUX ET D'OCTAEDRES ALUMINEUX D'UN MINERAL DE TYPE 2 :1[6]. ....	22
FIGURE13 : REPRESENTATION DES EMPILEMENTS DE TETRAEDRES SILICEUX ET D'OCTAEDRE ALUMINEUX D'UN MINERAL DE TYPE 2 :1 :1[6]. ....	23
FIGURE 14: STRUCTURE DES MINERAUX INTERS STRATIFIES [15]. ....	24
FIGURE15 : INFLUENCE DE LA FORME DE LA PARTICULE SUR LA SURFACE SPECIFIQUE [7]. ....	25
FIGURE16 :SURFACE DES PARTICULES ARGILEUSES (SMECTITES), INTERNE ET EXTERNE [7].....	25
FIGURE17 : LOCALISATION DE L'EAU DANS LES PARTICULES ARGILEUSES, (A) MOLECULES D'EAU ADSORBEES SUR LA SURFACE D'ARGILE, (B) MOLECULE D'EAU ASSOCIEES AVEC LES CATIONS DANS L'ESPACE INTER FOLIAIRE, (C) EAU « CRISTALLINE » SOUS FORME D'HYDROXYLES QUI PAR DESHYDROXYLATION FORME DES MOLECULES D'EAU [7].....	27
FIGURE18 : STRUCTURE DES SOLS GONFLANTS D'APRES GENS & ALONSO, 1992[9].....	30
FIGURE19 : TYPES DE GONFLEMENTS [9]. ....	32
FIGURE20 : MECANISMES DE GONFLEMENT DES ARGILES PAR HYDRATATION. [9]. ....	33
FIGURE21 : COURBE DU GONFLEMENT EN FONCTION DU TEMPS (CHEN, 1988) [9]. ....	33
FIGURE22 : FORCES ELECTROSTATIQUES DANS LA DOUBLE COUCHE, REPARTITION DES IONS AUTOUR D'UNE PARTICULE CHARGEE [10]. ....	42
FIGURE23 : PHENOMENE OSMOTIQUE IDEAL [10]. ....	43
FIGURE24 : LA CHAUX VIVE [28].....	51
FIGURE25 : CHAUX ETEINTE [28].....	51
FIGURE26 : EFFET DU CIMENT SUR LES LIMITES D'ATTERBERG (OSULA1991) [4].....	57
FIGURE27 : INFLUENCE DU DOSAGE EN CIMENT SUR LES LIMITES D'ATTERBERG (CHEW ET AL. 2004) [4].....	58
FIGURE 28 : EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE (MILLER AND AZAD 2000) .	59
FIGURE29 : EFFET DU CIMENT SUR LES CARACTERISTIQUES DE CISAILLEMENT (GAY ET SCHAD, 2000) [4].....	59
FIGURE30 : VARIATION DE LA COHESION NON DRAINEE EU FONCTION DE LA PERIODE DE CURE (SAEED SASANIAN.2010) [4]. ....	60
FIGURE31 : CONSTRUCTION D'UN CHEMIN AVEC MATERIAUX STABILISE SELON LE PROCEDURE MIX IN PLANT.....	61
FIGURE32 : APPAREIL D'INCORPORATION DU CIMENT. ....	62
FIGURE33 : UNE ETUVE. ....	66
FIGURE34 : SERIE DE TAMIS. ....	66
FIGURE35 : LES ETAPES DE L'ESSAI ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE HUMIDE. ....	66
FIGURE36 : MATERIELS UTILISES D'ESSAI SEDIMENTOMETRIE.....	68

FIGURE37 : LA SEDIMENTOMETRIE.....	68
FIGURE38 : COURBE GRANULOMETRIQUE.....	69
FIGURE39 : APPAREIL DE CASAGRANDE.....	71
FIGURE40 : PREPARATION D'ECHANTILLON.....	71
FIGURE41 : ESSAI POUR LA DETERMINATION DE LA LIMITE DE LIQUIDITE.....	72
FIGURE42 : ESSAI POUR LA DETERMINATION DE LA LIMITE DE PLASTICITE.....	73
FIGURE43 : COURBE LIMITE DE LIQUIDITE POUR LE SOL NATUREL.....	74
FIGURE44 : CLASSIFICATION DE L'ECHANTILLON SELON L'ABAQUE DE CASAGRANDE.....	76
FIGURE45 : MATERIELS UTILISES D'ESSAI BLEU DE METHYLENE.....	77
FIGURE46 : ESSAI DE LA TACHE SUR PAPIER FILTRE.....	78
FIGURE47 : CLASSIFICATION DE L'ARGILE ETUDIEE EN FONCTION DE LA VALEUR AU BLEU DE METHYLENE (VBS) SELON GTR.2000.....	79
FIGURE48 : LES OUTILS UTILISES D'ESSAI PROCTOR.....	80
FIGURE49 : LES ETAPES D'ESSAI PROCTOR.....	81
FIGURE 50 : COURBE PROCTOR NORMAL.....	83
FIGURE51 : LA MACHINE DE CISAILLEMENT.....	84
FIGURE 52 : LES ETAPES D'ESSAI CISAILLEMENT.....	85
FIGURE53 : VARIATION DE CONTRAINTE CISAILLEMENT EN FONCTION DE DEPLACEMENT HORIZONTAL DE SOL VIERGE.....	85
FIGURE54 : RESULTATS D'UN ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT DANS LE PLAN DE MOHR DE SOL VIERGE.....	86
FIGURE55 : PRESSE CBR.....	87
FIGURE56 : COURBE (EFFORT – ENFONCEMENT) (SOL NON TRAITE).....	89
FIGURE57 : COURBE (EFFORT – ENFONCEMENT) (SOL TRAITE).....	92



## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : LES DIFFERENTS TYPES D'ARGILES ET LEURS CARACTERISTIQUES [13].....	15
TABLEAU 2: MODELES D'ESTIMATION DU TAUX DE GONFLEMENT (E_G) ET DE LA PRESSION DE GONFLEMENT (AG) [30]. .....	39
TABLEAU 3 : DIMENSIONS DES CATIONS HYDRATES ET NON HYDRATES, (ILTIS, 1979) [10]. .....	42
TABLEAU 4 : EFFET DU CIMENT SUR LES LIMITES D'ATTERBERG (OKAGBUE ET OCHULOR, 2007) [4]. .....	57
TABLEAU 5: GRANULOMETRIE DU SOL PAR TAMISAGE HUMIDE. ....	67
TABLEAU 6: RESULTAT D'ESSAI SEDIMENTOMETRIE.....	69
TABLEAU 7: RESULTATS DE L'ESSAI LIMITE D'ATTERBERG (LIMITE DE LIQUIDITE). ....	73
TABLEAU 8: RESULTATS DE L'ESSAI LIMITE D'ATTERBERG (LIMITE DE PLASTICITE).....	74
TABLEAU 9: DEGRE DE PLASTICITE DES SOLS. ....	75
TABLEAU 10: CLASSIFICATION DE L'INDICE DE CONSISTANCE.....	75
TABLEAU 11: CLASSIFICATION DE SOL PAR VALEUR DE BLEU DE METHYLENE. ....	78
TABLEAU 12: LES RESULTATS DE L'ESSAI PROCTOR NORMAL.....	81
TABLEAU 13 : LES RESULTATS DE L'ESSAI PROCTOR NORMAL.....	82
TABLEAU 14: LES PARAMETRES DE L'OPTIMUM PROCTOR.....	82
TABLEAU 15: LES RESULTATS D'ESSAI CBR 8 % D'EAU.....	87
TABLEAU 16: LES RESULTATS D'ESSAI CBR 10 % D'EAU.....	88
TABLEAU 17: LES RESULTATS D'ESSAI CBR 11% D'EAU.....	88
TABLEAU 18: LES RESULTATS D'ESSAI CBR 12% D'EAU.....	88
TABLEAU 19: LES RESULTATS DE L'INDICE CBR.....	88
TABLEAU 20 : CLASSIFICATION DES SOLS EN FONCTION DU CBR .....	89
TABLEAU 21: LES RESULTATS D'ESSAI CBR (SOL TRAITE) 4 % CIMENT, 4 % LA CHAUX.....	90
TABLEAU 22 : LES RESULTATS D'ESSAI CBR (SOL TRAITE) 2% CIMENT, 3 % LA CHAUX.....	90
TABLEAU 23: LES RESULTATS D'ESSAI CBR (SOL TRAITE) 3% CIMENT, 2 % LA CHAUX.....	91
TABLEAU 24: LES RESULTATS D'ESSAI CBR (SOL TRAITE) 2% CIMENT, 2 % LA CHAUX.....	91
TABLEAU 25: LES RESULTATS D'ESSAI CBR (SOL TRAITE) 2% CIMENT, 2 % LA CHAUX.....	91
TABLEAU 26: LES RESULTATS DE L'INDICE CBR (TRAITE). ....	92

## LISTE DES ABREVIATIONS

$W_{op}$  : Teneur en eau à l'optimum Proctor.

$I_p$ : Indice de plasticité.

$I_c$  : Indice de consistance

$W_L$  : Limite de liquidité.

$W_P$  : Limite de plasticité.

**VBS**: Valeur du bleu méthylène.

**CBR** : California Bearing Ratio.

$\gamma_d$  : Poids volumique sec.

$\gamma_h$  : Poids volumique humide.

$W(\%)$  : La teneur en eau.

**B** : Masse de bleu de méthylène.

$\eta$ : Viscosité (poiseuilles).

$\sigma$ : Contrainte normale .

$\phi$ : Angle de frottement.

**c**: Coefficient de cohésion.

$C_s$  : L'indice de gonflement.

$\sigma_x$  : Contrainte extérieure.

**u** : La pression interstitielle.

$\sigma'$  : La contrainte effective.

$W_i$ : Teneur en eau initiale.

$C_g$ : La pression de gonflement.

**p<sub>c</sub>** : La pression capillaire.

$\phi'$  : L'angle de frottement effective.

**c'** : La Cohésion effective.

**GTR** : Guide des Terrassements Routiers.

# SOMMAIR

<b>INTRODUCTION</b> .....	1
<b>Chapitre01:Présentation de la zone d'étude</b>	
1. Situation Géographique .....	4
2. Morphologie du site.....	5
3. Etude Géologique .....	6
4. Etude géotechnique .....	7
5. Les Pentes.....	8
6. Réseau hydrographique .....	9
<b>Chapitre02:Généralité sur les argiles</b>	
1. Introduction .....	12
2. Définition des argiles.....	12
3. Origine des argiles.....	12
4. Formation des argiles .....	13
5. Différents types d'argile .....	14
5.1. Kaolinite .....	14
5.2. Illite .....	14
5.3. Smectites .....	14
5.4. Bentonite .....	14
5.5. Chlorite.....	15
5.6. Vermiculite .....	15
6. Texture microscopique des particules d'argile.....	15
7. Structure des argiles .....	17
8. Les minéraux argileux .....	18
8.1. Altération.....	18
8.2. Transformation des minéraux argileux par dégradation et aggradation .....	19
8.3. Néof ormation en milieux confinés .....	19
8.4. Structure élémentaire des minéraux argileux .....	19
9. Classification des minéraux argileux.....	20
9.1. Les minéraux à 7Å de type 1/1 .....	21
9.2. Les minéraux à 10Å de type 2/1 .....	22
9.3. Les minéraux à 14Å de type 2/1/1.....	22
9.4. Minéraux inter stratifiés .....	23
10. Propriété des argiles .....	24

10.1.	Forme et surface spécifique.....	24
10.2.	Capacité d'échange cationique.....	26
10.3.	Capacité de gonflement et d'adsorption.....	26
11.	Principaux problèmes des sols argileux.....	27
11.1.	Phénomène de gonflement.....	27
11.2.	Tassements.....	28
11.3.	Glissements.....	28

### **Chapitre03:Phénomène de gonflement des sols**

1.	Introduction.....	30
2.	Les sols gonflants.....	30
3.	Définition des paramètres du gonflement.....	31
3.1.	La pression de gonflement.....	31
3.2.	Le potentiel de gonflement.....	31
3.3.	L'indice de gonflement Cs.....	32
4.	Description du phénomène de gonflement.....	32
5.	Mécanismes du gonflement des argiles.....	34
5.1.	Le gonflement au sens physico-chimique.....	34
5.1.1.	Hydratation des espaces inter foliaires.....	34
5.2.	Gonflement au sens mécanique.....	37
6.	Cinétique de gonflement.....	38
7.	Méthodes d'estimation du gonflement.....	38
7.1.	Estimation du gonflement –Méthodes empiriques (indirectes).....	38
7.2.	Les méthodes directes.....	40
7.1.1.	Méthode de gonflement libre.....	40
7.1.2.	Méthode de gonflement sous charges constantes.....	40
7.1.3.	Méthode de gonflement empêché.....	41
8.	Principales causes de gonflement.....	41
8.1.	Hydratation par adsorption.....	41
8.1.1.	Forces d'attractions.....	41
8.1.2.	Forces de répulsion.....	41
8.2.	Hydratation par osmose.....	43
8.3.	Hydratation par capillarite.....	44
9.	Facteurs qui affectent le gonflement.....	45
9.1.	Facteurs intrinsèques.....	45
9.2.	Facteurs externes.....	45
10.	Conclusion.....	45

## **Chapitre04:Technique de stabilisation des sols**

1. Introduction .....	48
2. Définition de la stabilisation.....	48
3. Principaux objectifs de la stabilisation .....	48
4. Les diverses techniques de la stabilisation .....	49
4.1. Stabilisation mécanique.....	49
4.2. Stabilisation physique.....	49
4.3. Stabilisation chimique .....	49
5. stabilisations par la chaux et le ciment .....	50
5.1. Chaux .....	50
5.1.1. Définition.....	50
5.1.2. Les différents types de chaux .....	51
5.1.3. Les effets de la chaux dans la stabilisation des sols .....	52
5.1.4. Mécanismes de stabilisation à la chaux.....	53
5.1.5. Action de la chaux sur les argiles .....	54
5.1.6. Avantages de la chaux .....	55
5.1.7. Inconvénients de la chaux .....	55
5.2. Le ciment.....	55
5.2.1. Définition.....	55
5.2.2. Type de ciment .....	55
5.2.3. Domaine d'application .....	56
5.2.4. Effet du ciment .....	57
5.2.4.1. Influence du ciment sur les limites d'Atterberg .....	57
5.2.4.2. Influence du ciment sur les caractéristiques du compactage .....	58
5.2.5. Mécanisme de stabilisation par l'ajout de ciment .....	60
5.2.6. Méthode de stabilisation au ciment .....	61
6. Traitement mixte .....	62
7. Conclusion.....	62

## **Chapitre05:Etude expérimentale (Résultats et Interprétation)**

1. Introduction .....	64
2. Le sol non traité.....	64
2.1. Les essais physiques .....	64
2.1.1. Analyse granulométrique.....	64
2.1.1.1.2. But de l'essai .....	65
2.1.1.1.3. Principe de l'essai.....	65
2.1.1.1.4. Appareillage .....	65

2.1.1.1.5. Mode opératoire de l'essai.....	66
2.1.1.1.6. Calcul et résultats .....	67
2.1.1.2. Analyse granulométrique par sédimentométrie .....	67
2.1.1.2.1. But de l'essai .....	67
2.1.1.2.1. Principe de l'essai.....	67
2.1.1.2.2. Appareillage .....	67
2.1.1.2.3. Mode opératoire de l'essai.....	68
2.1.1.2.4. Calcul et résultats .....	69
2.1.2. Les limites d'Atterberg.....	70
2.1.2.1. But de l'essai .....	70
2.1.2.2. Principe de l'essai.....	70
2.1.2.3. Appareillage .....	70
2.1.2.4. Mode opératoire de l'essai.....	71
2.1.2.5. Calcul et résultats .....	73
2.1.3. Bleu de méthylène .....	76
2.1.3.1. But de l'essai .....	76
2.1.3.2. Principe de l'essai.....	76
2.1.3.3. Appareillage .....	76
2.1.3.4. Mode opératoire de l'essai.....	77
2.1.3.5. Calcul et résultats .....	78
2.2. Les essais mécanique.....	79
2.2.1. Proctor normale .....	79
2.2.1.1. But de l'essai .....	79
2.2.1.2. Principe de l'essai.....	79
2.2.1.3. Appareillage .....	80
2.2.1.4. Mode opératoire de l'essai.....	80
2.2.1.5. Calcul et résultats .....	81
2.2.2. Cisaillement.....	83
2.2.2.1. But de l'essai .....	83
2.2.2.2. Principe.....	83
2.2.2.3. Appareillage .....	83
2.2.2.4. Mode opératoire.....	84
2.2.2.5. Calcul et résultats .....	85
2.2.3. CBR.....	86
2.2.3.1. But de l'essai .....	86
2.2.3.2. Appareillage .....	86

2.2.3.3. Mode opératoire de l'essai.....	87
2.2.3.4. Calcul et résultat.....	87
3. conclusion.....	89
4. Le sol traité.....	90
4.1. CBR (traité).....	90
4.2. Conclusion.....	92
<b>Conclusion</b> .....	94
<b>Annexes</b> .....	102



# *Introduction*

## INTRODUCTION

Le phénomène de gonflement est spécifique à certains types d'argile. Il touche la variation du volume d'un objet ou d'un milieu dans des conditions particulières, notamment le gonflement des argiles compactées. Ces changements importants dans les propriétés des sols sont principalement liés aux variations de leurs conditions hydriques et de leur compacité.

L'étude bibliographique a permis de comprendre que les sols argileux sont constitués de minéraux, qui varient dont l'affinité à quelques micromètres et dépend de plusieurs paramètres, entre autres la structure minéralogique. Certains sols comportent une liaison particulière des particules argileuses telles que les Illites et les Smectites,...

Par conséquent, ces sols nécessitent quelques traitements pour augmenter leur stabilité mécanique et améliorer ses performances. La durabilité naturelle du sol peut être améliorée en utilisant les différents types de stabilisants (ciment, chaux, cendres volantes...). L'application de la chaux ou du ciment dans l'ingénierie routière, est développée depuis plus de trentaine d'années, alors que dans le présent travail on a vu l'influence de l'application des deux à la fois. Ce traitement a deux avantages :

- ✓ Application aux sols sec ou humide.
- ✓ Amélioration des propriétés géotechniques (résistance mécanique, sensible à l'eau)

La présente étude est une contribution de stabiliser et d'améliorer des sols de la région de Tébessa en utilisant un traitement par liant hydraulique en ajoutant de différents pourcentages de chaux et du ciment.

### **Problématique**

Pour résoudre de tels problème, on propose dans ce travail de projet de fin d'étude d'améliorer et de stabiliser le sol étudié par divers pourcentages de liants hydrauliques.

Ce phénomène pose des problèmes complexes et divers pour de nombreux chercheurs des métiers de la géotechnique et du génie civil.

#### **Organisation du mémoire**

Le travail réalisé est présenté dans ce mémoire organisé en cinq chapitres :

**Le premier chapitre** présente une identification géographique et géologique de la région étudiée.

**Le deuxième chapitre** intitulé « généralités sur les argiles » est consacré à la présentation des principaux types de minéraux argileux, leurs méthodes d'identification.

**Le troisième chapitre** on expose le mécanisme de gonflement, les paramètres de gonflement des sols et les méthodes de détermination de ces paramètres. Et on présente aussi les facteurs qui affectent le gonflement des sols.

**Le quatrième chapitre** présent la méthode de stabilisation de cette argile par ajout de ciment et la chaux ensemble.

**Le dernier chapitre** est consacré à l'étude expérimentale des sols argileux de la région de Tébessa (Doukane) stabilisation du sol étudié par la chaux et le ciment par différents dosages.

*Chapitre I :*  
*Présentation de la*  
*zone d'étude*

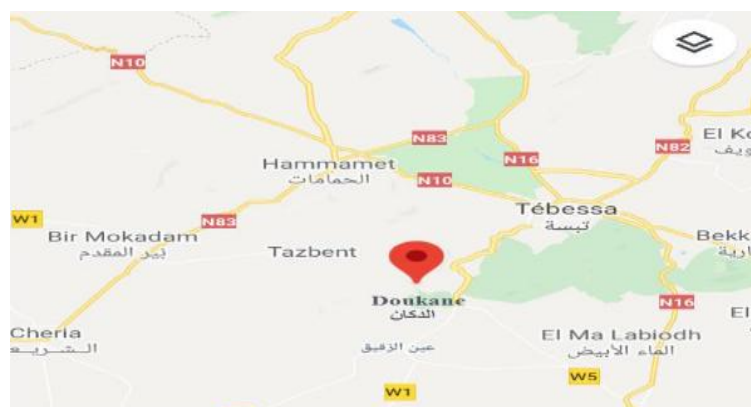
## 1. Situation Géographique

La wilaya de Tébessa est limitée au nord par la wilaya de la Souk Ahras , de l'Ouest par la wilaya de Khenchela et d'Oum El Bouaghi, à l'est par Tunisie et du Sud par la wilaya d'El Oued. La wilaya de Tébessa s'étend sur une surface de 14 227 km<sup>2</sup>, réparties sur 28 communes et 12 daïras.



**Figure1** :Localisation de wilaya de Tébessa.

La commune de Tébessa est située dans la partie nord par rapport au territoire de la wilaya, dans ce travail, nous mettons en exergue en particulier la région de Doukane est située au sud de la ville de Tébessa, s'étale sur une surface totale de 2658432.51 m<sup>2</sup> soit 265.84 ha.



**Figure2** :Localisation du lieu du projet de Doukane

## 2. Morphologie du site

Le site est un terrain accidenté traversé par un réseau hydrographique important composé de grands oueds qui traversent la ville et causes des dégâts considérables dans les zones basses au nord.

La présence de ces oueds a décomposé le site en plusieurs entités morphologiques sous forme de collines ce qui rend difficile la liaison de ces entités [19].



Figure3 : la zone de prélèvement.



Figure4 : Relief et aspect du site Doukane.

### 3. Etude Géologique

Caractéristiques des terrains des plus anciens aux plus récents, on rencontre les formations suivantes :

#### ✓ **Marno-calcaire du crétacé inférieur et moyen**

Epaisse série formant les reliefs entourant la plaine. Fossilifères, ces terrains sont composés de calcaire en plaquettes alternant avec des marnes noire, verte ou gris, et des calcaires beiges ou blancs plus ou moins massifs. L'ensemble de la série (4 à 600 m d'épaisseur) est recoupé de failles allongées E-W.

#### ✓ **Calcaires massif du crétacé supérieur**

Calcaire constituant les massifs de KOUDIAT SOLTANE au Sud-Ouest de la ville, de KEF EL ABIED, de REZACA à l'ouest, ils forment les massifs montagneux des DJEBELS MESTIRI, DOUKANE, METAGJINARO.

On rencontre cette même série au Nord/Est dans le KSAR GOURAYA et au Nord du DJEBEL GUENIFIDA.

Les failles sont de direction E-W ou NE-SW : bordant les massifs.

#### ✓ **Argilo-sableux du pliocène**

Largement au N.E au pied du GUENIFIDA et de GOURAYA, cet ensemble très épais et très consolidé il n'affleure pas dans la partie Sud.

#### ✓ **Matériel d'épandage ancien du quaternaire**

Il recouvre tout le plateau sud au pied du DJEBEL OZMOR , c'est sur cet ensemble que repose la ville de Tébessa. Peu épais, matériel mixte, surtout argileux parfois impliquant des débris calcaires crétacés, et ensemble paraît assez stable et consolide dans certaines vallées entaillées par les oueds, on remarque pendage nord très faible.

#### ✓ **Alluvions anciennes de bordures de la Merdja**

Argileuses ou caillouteuses, ces alluvions sont assez consolidées et présentent une assez importante épaisseur. On les retrouve au nord et sud de la faille, encadrant la vallée de la Merdja [19].

#### 4. Etude géotechnique

L'aire de la présente étude zone POS présentent beaucoup de différences du point de vue de la constructibilité. Ces différences sont liées aux formations géologiques, à la qualité géotechnique des sols, au relief et aux conditions hydrogéologiques (présence d'eau souterraine) et hydrologiques (ravins, oueds, inondations) et la dégradation du sol (érosion).

Il n'a été procédé à aucun sondage ni essai de laboratoire. De ce fait, les conclusions de la présente étude ne pourront servir qu'à orienter les urbanistes dans leurs choix des terrains à aménager.

##### ✓ Les zones favorables à l'urbanisation avec conditions

Caractérisé par une croûte calcaire en couches ou sol caillouteux et argileux sur des marnes crétacées, parfois marnes ou Marno-calcaires crétacés en surface. Présentent des pentes inférieures à 16 %.

Cette zone englobe les parties est, centre et ouest du terrain où la formation superficielle contient en général des matériaux d'apport et de l'argile. La présence d'eau et la pente raide caractérisant la zone sont les facteurs essentiels responsables des instabilités provoquées. Donc c'est une zone de mouvement de terrain dessinant un relief bombé dont les eaux sont en circulation ou sous forme stagnante.

Cette couche argileuse est sensible à l'eau et donc au gonflement, ce qui peut avoir une influence sur les constructions fondées sur cette couche.

La construction sur ces terrains nécessite certaines précautions à savoir :

- Etudier de près la stabilité du terrain et caractéristiques physiques parce que les sols argileux (gonflement) sont sensibles aux variations d'humidité.
- Création d'ouvrages de soutènement pour stabiliser les sols.
- Les constructions et ouvrages importants (équipements, habitats collectifs à plusieurs niveaux) une étude de sol spécifique doit être faite et des fondations profondes sont conseillées.



- Imperméabilisation et suppression de toutes les zones de stagnation d'eau pour éviter toute infiltration d'eau dans le sol des fondations.

- ✓ **Les zones moyennement favorables à l'urbanisation**

Terrain ayant les mêmes caractéristiques géotechniques que la première zone, mais la morphologie est compliqué (pentes raides) de 16 à 25%.

- ✓ **Les zones faiblement favorables à l'urbanisation**

Terrains très ravinés et chahutés par de nombreuses lignes d'écoulement. Les eaux de ruissellement difficiles à canaliser.

- ✓ **Les zones défavorables à l'urbanisation :**

Ce sont les zones où le processus d'érosion est très marqué, ainsi que les fonds d'oued et ravins et leurs servitudes [19].

## 5. Les Pentes

La connaissance au préalable de la topographie d'un site avant son urbanisation est primordiale, car la déclivité du terrain exprimée en pourcentage permet d'avoir une idée sur les volumes des terrassements et la nature des constructions à implanter.

- Ces éléments constituent des indices importants sur les coûts de réalisation et les aspects techniques de différentes constructions que peut recevoir le terrain (VRD et création des murs de soutènement, dressage, etc. ...).
- Dans un cadre général, la topographie du site en question est représentée par pentes allant de 0 % à supérieur à 25%.

- ✓ **Pentes inférieures à 08%**

Cette topographie est apte à recevoir tout sort de construction nécessitant des terrains ayant une faible pente (équipements, habitat collectif, ... etc.). Elle permet la bonne exécution des voiries et réseaux divers avec un minimum de dépenses et travaux de terrassement.

**✓ Pentes de 08 à 16%**

Elle permet de réaliser n'importe quel type de projet, mais avec un cout de viabilisation plus important surtout pour les équipements qui nécessitent de grandes surfaces. Les différents projets doivent être conçus et implantés sur en tenant compte de relief du terrain pour avoir un tissu urbain homogène intègre et en épousant la forme du terrain.

**✓ Pentes de 16 à 25%**

La réalisation des équipements collectifs, des infrastructures diverses nécessite un grand soin et une étude approfondie, les travaux de terrassement seront beaucoup plus importants, surtout pour les constructions nécessitant de grandes superficies, les différents projets doivent être conçus et implantés sur en tenant compte de relief du terrain pour avoir un tissu urbain homogène intègre et en épousant la forme du terrain et pour réduire le volume et le coût énorme des terrassements.

- Le tracé de la voirie doit être conçu en parallèle des courbes de niveau afin d'éviter les fortes pentes pour les voies carrossables et réduire les vitesses d'écoulement les différents réseaux.

**✓ Pentes supérieure 25%**

Ce sont des terrains très accidentés, déconseillé pour les constructions (l'urbanisation sur ces sites demande des techniques un peu spéciales et couteuses) à réserver de préférence aux espaces verts [19].

**6. Réseau hydrographique**

La commune de Tébessa fait partie du sous-bassin de l'Oued CHABRO qui s'étale sur un territoire (1560 Km<sup>2</sup>) regroupant cinq communes vastes. Concernant la commune de Tébessa les rapports d'eau de surface ; **Volume annuel utilisable 0.88 hm<sup>3</sup>**.

Dans le bassin de l'Oued CHBRO, chaque année, le volume des apports solides est estimé à 6.24 millions de tonnes de terre charriés par les principaux oueds. Ceci est dû à la fragilité des sols, au régime torrentiel des précipitations et à la faible couverture du tapis végétal.

En effet le taux de couverture forestière est relativement faible car il ne couvre que les 17 % du territoire.

La zone d'étude se caractérise par un réseau hydrographique dense composé essentiellement de ravins et ravineaux qui prennent leurs débuts dans les montagnes environnantes vers la grande dépression qui correspond à la plaine, plusieurs paramètres conditionnent la formation de ce réseau à savoir :

- ✓ La grande différence d'altitude (montagne plaine).
- ✓ La nature des sols fragiles et peu résistants aux éléments d'érosion.
- ✓ Couvert végétal très peu dense.

Les oueds importants dans le site se caractérisent par des largeurs qui varient entre 10 et 40 m ainsi que des profondeurs qui arrive jusqu'à 10 m. Ces oueds nécessitent des servitudes dans un intervalle de 30-50 m qui doivent être respectées; et cela avant leurs aménagements [19].

*Chapitre II:  
Généralité sur les  
Argiles*

### **1. Introduction**

L'argile est l'un des matériaux les plus anciens utilisés par l'être humain. Récoltée à même la terre dans des carrières, on ne trouve pas une mais des argiles. De part une structure spécifique, ainsi que des propriétés multiples, les argiles répondent à de nombreuses indications. L'argile est déformable, transformable, adhérente, coulante, glissante, fixant et a ainsi de nombreuses capacités parmi lesquelles le transport, la capture, la libération de substances liquides, gazeuses, mais également solides, vivantes, et mortes [32].

### **2. Définition des argiles**

D'une manière générale, lorsque la proportion de particules argileuses dépasse 30% le sol est considéré comme une argile.

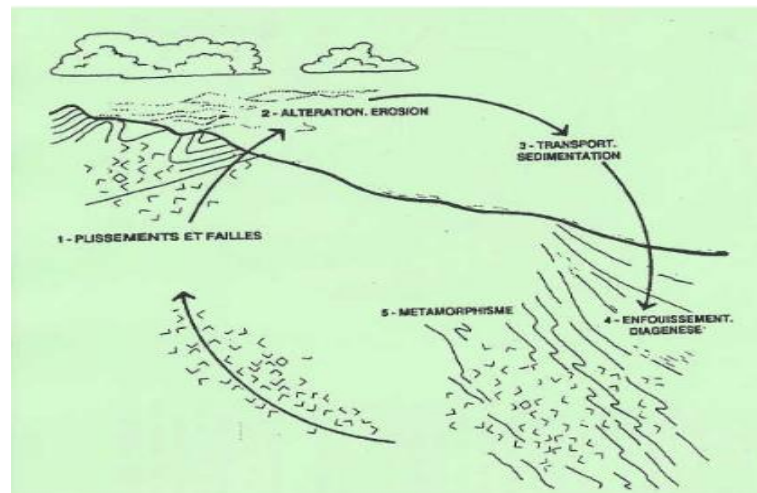
Les particules d'argile présentent la fraction minérale inférieure à 2 $\mu$ m. L'argile étant pratiquement imperméable, elle est souvent employée comme matériaux d'étanchéité est élevée, et en général, les charges qu'elle peut supporter sont de dans les noyaux de barrage en terre ou de digues. Toutefois, sa compressibilité loin inférieure à celles que supportent les graviers et les sables. Les particules d'argile, contrairement à celles des autres types de sol, sont attirées les unes vers les autres et se regroupent. Cette attraction qui porte le nom de cohésion, est à l'origine de la consistance. Dans des conditions d'humidité favorables, la consistance est telle que l'argile devient plastique et qu'il est possible de façonner, une opération pratiquement irréalisable avec le gravier ou le sable.

En général des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant une structure feuilletée (phyllosilicates) expliquant leur plasticité, ou fibreuse (sépiolite et palygorskite) expliquant leur qualité d'absorption [1].

### **3. Origine des argiles**

Il s'agit de minéraux formés au cours des temps géologiques par altération de diverses roches silicatées de surface ou de proche surface, selon les conditions locales d'hydratation, de drainage, d'hydrolyse et de pression, et selon les climats.

Les argiles sont le devenir de ces roches lorsque, remontant des profondeurs par le jeu de la tectonique des plaques, elles se font agresser par les dures conditions de la surface : oxygène, gaz carbonique, variations de température, ruissellement. Ce sont des structures qui se sont adaptées à ce changement de milieu : les roches se réorganisent en se structurant davantage, puisque les silicates d'alumine sont des cristaux, un motif répétitif de silice  $SiO_3$ , d'alumine  $Al_2O_3$  et d'eau  $H_2O$  [2].



**Figure5** : Le cycle géologique des minéraux argileux [2].

#### 4. Formation des argiles

Les argiles désignent de très fines particules de matière arrachées aux roches par l'érosion. Observées au microscope, elles ont la forme de plaquettes, ce qui explique leur plasticité. La plupart de ces particules proviennent de la désagrégation de roches silicatées : du granite (mica et feldspath), du gneiss ou encore des schistes. Ces particules sont transportées par le vent ou l'eau sous forme de limon ou de vase. Les fleuves véhiculent des argiles qui finissent par se déposer en alluvions, dans le cours d'eau lui-même, à son embouchure, dans un lac ou dans la mer. Les dépôts peuvent alors sédimenter et former une roche argileuse par diagenèse : déshydratation et compactation. En tant que roches sédimentaires, les affleurements argileux présentent une succession de strates empilées les unes sur les autres, qui ressemblent à un feuillet [22].

## 5. Différents types d'argile

On peut distinguer les types d'argiles suivants:

### 5.1. Kaolinite

Kaolinite, halloysite, dickite et nacrite sont des minéraux à deux couches. Une couche tétraédrique à cœur de silicium et une couche octaédrique à cœur d'aluminium. La formule chimique structurale est  $\text{SO}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{H}_2\text{O})_2$ . L'équidistance inter-foliaire est de 7 Å (Konesshloo, 2007). La kaolinite est utilisée pour blanchir le papier et pour la fabrication de la porcelaine.

### 5.2. Illite

Les illites (du nom de l'état américain de l'Illinois), sont des minéraux à trois couches constituées de trois couches d'octaèdres à cœur d'aluminiums positionnés entre deux couches tétraédriques à cœur de silicium. La formule chimique structurale des illites est  $\text{KAl}_2(\text{OH})_2(\text{AlSi}_3(\text{O.OH})_{10})$ . L'espace inter foliaire est de 10 Å.

### 5.3. Smectites

Les smectites (du grec mectos « je nettoie »), ou la famille des montmorillonites (de Montmorillon, dans le département de la Vienne) sont structurées selon le même schéma que les illites, soit trois couches. La formule chimique des smectites est  $\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{22}(\text{H}_2\text{O})_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$ . L'espace inter foliaire est de 14 à 17 Å. Dans ce groupe, les feuillets sont minces et peu reliés entre eux, d'où la possibilité d'association avec l'eau et la matière organique dans l'espace inter foliaire, d'où le terme d'argile gonflante.

### 5.4. Bentonite

La bentonite est une argile colloïdale dont le nom vient de Fort Benton dans le Wyoming aux États-Unis. Connue aussi sous le terme de « terre à foulon », elle peut être considérée comme une smectites, essentiellement constituée de montmorillonite  $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.33}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_n$  (80%), ce qui explique sa capacité de rétention d'eau.

### 5.5. Chlorite

Les chlorites (du grec chlore « vert-jaune pâle ou jaune clair », couleur du chlore à l'état gazeux). Ce sont les argiles vertes pour des emplois médicaux divers. Les feuillets sont étroitement reliés les uns aux autres par des groupements hydratés de magnésium, d'aluminium et de fer. L'espace inter foliaire atteint 14 Å;

### 5.6. Vermiculite

Les vermiculites tirent leur nom de leur aspect de petits vers, après chauffage (vermiculas, « petit vers » en latin). L'eau contenue entre leurs feuillets peut être éliminée par chauffage à plus de 300°C. L'espace interfoliaire se réduit alors de 14 à 10 Å. Ce sont les argiles utilisées dans le bâtiment comme isolants [13].

**Tableau 1** : Les différents types d'argiles et leurs caractéristiques [13].

Espèce minérale	Formule chimique	Nombres de couches	Taille de l'espace interfoliaire	Type
Kaolinite	$\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{H}_2\text{O})_2$	Minéraux à 2 couches	7 Å	non gonflante
Illite	$\text{KAl}_2(\text{OH})_2 \cdot (\text{AlSi}_3(\text{O} \cdot \text{OH})_{10})$	Minéraux à 3 couches	10 Å	non gonflante
Smectite ou montmorillonite	$\text{Si}_3\text{Al}_4\text{O}_{22}(\text{H}_2\text{O})_2 (\text{H}_2\text{O})_n$	Minéraux à 3 couches	10 et 17,5 Å	gonflante
Bentonite	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0,33}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_n$	Minéraux à 3 couches		gonflante
Chlorite	$(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Al})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_3$	Minéraux à 3 couches	14 Å	gonflante
Vermiculite	$(\text{Mg}, \text{Ca})_{0,7}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_3(\text{Al}, \text{Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Minéraux à 2 couches	14 à 10 Å	gonflante

## 6. Texture microscopique des particules d'argile

Au sens pédologique, la texture est liée à la granulométrie, alors que la structure désigne d'une part l'assemblage de plusieurs minéraux sous forme d'agrégats et d'autre part l'arrangement de ces agrégats au sein du matériau (Audiguier, 1979). D'après le dictionnaire de géologie (Foucault et Raoult, 2001) et l'étymologie du mot en français, la texture regroupe ces deux notions.



La phase solide des argiles est structurée suivant une organisation spatiale particulière: le feuillet, la particule et l'agrégat (Jackson & Sherman, 1953 ; Caillere & Hénin, 1959 ; Grim, 1962; Millot, 1964 ; Voïnovitch, 1971 ; Mitchell, 1976, 1993, ...), cités par Vincent et al (2006):

**a) Le feuillet**

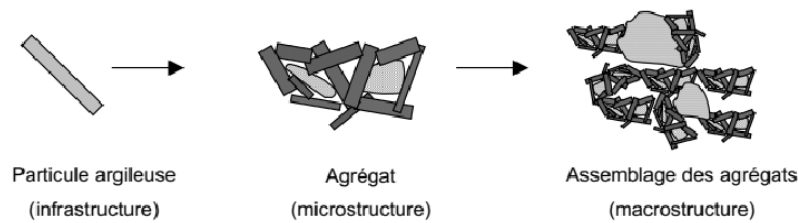
Est défini comme une superposition de plans ioniques organisés suivant deux types de couches : les couches tétraédriques et les couches octaédriques.

**b) La particule** (Appelée aussi cristallite ou tactoïde)

Est un empilement (superposition) de feuillets argileux suivants différentes configurations, qui peut atteindre une taille maximale de 2  $\mu\text{m}$ . La position des feuillets les uns par rapport aux autres et le nombre de feuillets par particule, sont variables suivant le type d'argile considéré et sont également fonctions de son état hydrique (Ben Rhaeim et al. 1986 ; Saiyouri, 1996) cité par Mrad (2005).

**c) L'agrégat** (Appelé aussi grain)

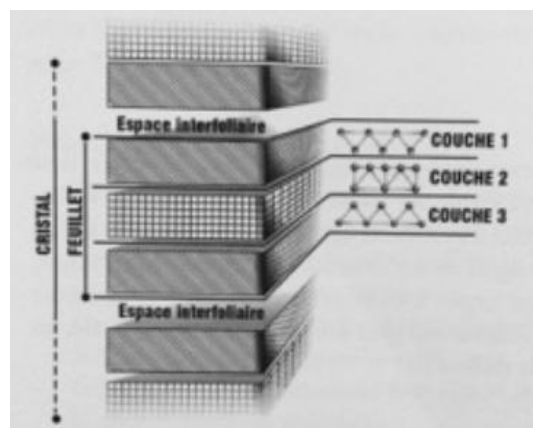
Est un assemblage désordonné entre les particules d'argile dont la forme et les dimensions peuvent varier. A l'échelle de l'agrégat, trois niveaux structuraux peuvent alors être distingués : l'infrastructure qui correspond à la particule argileuse, la microstructure qui correspond aux agrégats formés par l'assemblage des particules argileuses et des autres éléments du sol, et la macrostructure qui correspond à l'assemblage macroscopique des agrégats. Une représentation de cette structure est donnée sur la figure 6 L'approche microstructurale de base qui permet d'expliquer le comportement réel des argiles gonflantes doit tenir compte de ces différents niveaux structuraux. Ceci n'est pas du tout évident dans la pratique, car il est difficile d'établir une relation entre ces différents niveaux (Gens et Alonso, 1992) [28].



**Figure6 :** Différents niveaux structuraux des sols gonflants (Gens et Alonso, 1992) [28].

## 7. Structure des argiles

Les argiles se distinguent les unes des autres de par leur composition ainsi que leur structure. D'un point de vue géologique, une argile est un minéral dont la granulométrie est inférieure à 4 micromètres. Les argiles utilisées en thérapeutique sont de nature phyllosilicate, en feuillets hydratés d'alumine finement cristallisés. Les roches argileuses sont caractérisées par leur maille élémentaire. Quatre niveaux d'organisation de l'argile peuvent être distingués (Figure 7). La maille se répète de façon périodique pour former un réseau ou couche tétraédrique d'atomes, une combinaison de couches est appelée feuillet, un empilement de feuillets forme un cristal. Ce réseau cristallin est identifié par diffractométrie aux RX (rayons X) [32].



**Figure7 :** Structure d'une argile [32].

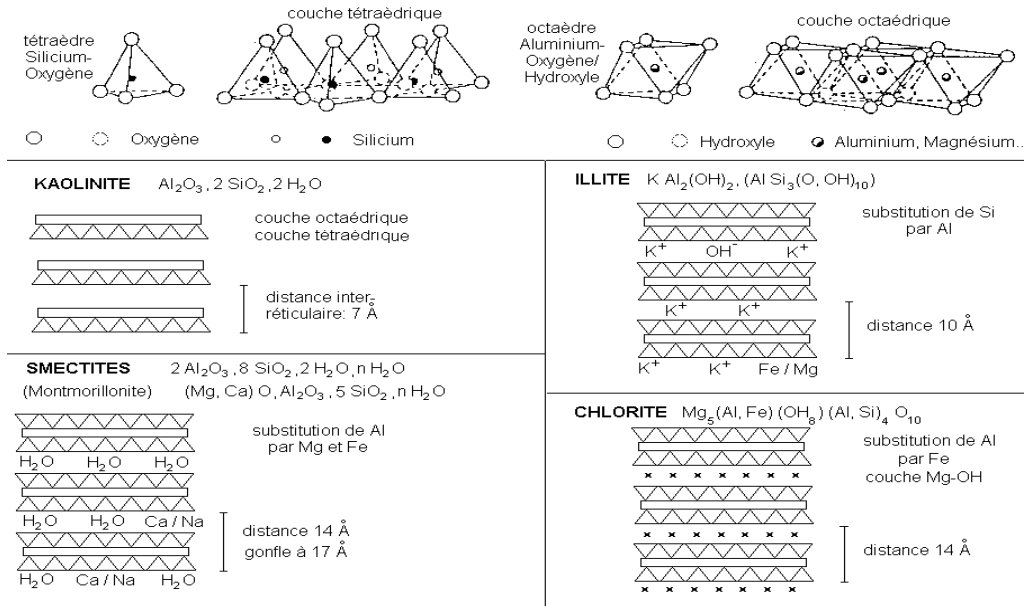


Figure8 : structure des minéraux argileux [23].

## 8. Les minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des particules très fines dont le diamètre équivalent est inférieur à 0,002mm, ils appartiennent à la famille des phyllosilicates. Ce sont pour la plus part des silicates d'aluminium, de magnésium ou de fer dont les atomes sont disposés de façon à former des figures géométriques très régulières. Chaque minéral argileux est formé par l'empilement de cristaux microscopique, qui portent le nom de feuillets.

### 8.1. Altération

L'altération physique des roches est l'une des origines de minéraux argileux. Les minéraux qui en résultent sont différents selon la nature des roches mères et le climat. En climat froid, l'altération est faible, les minéraux argileux sont identiques ou peu différents des minéraux de la roche mère (illite et chlorite). En climat chaud et humide, l'hydrolyse est poussée et donne de la kaolinite en milieu drainé et des Smectites en milieu confiné. En climat tempéré et humide, l'altération est modérée, il apparaît des interstratifiés, des illites, des chlorites dégradées et des vermiculites.

## 8.2. Transformation des minéraux argileux par dégradation et aggradation

La transformation des minéraux argileux implique la modification des minéraux argileux tout en conservant leur type structurel. Ils peuvent être transformés par dégradation (soustraction d'ions) et/ou par aggradation (fixation d'ions supplémentaires).

Ces transformations se produisent à la fois pendant l'altération, la sédimentation et la diagenèse.

## 8.3. Néof ormation en milieux confinés

Les minéraux argileux sont formés par précipitation d'ions en solution (silicium, aluminium et potassium) susceptibles de réagir entre eux, quand ils sont mis en contact par diffusion ou mélange, les types de néoformations sont les suivants:

- ✓ Néof ormation de sépiolite par concentration des ions par évaporation;
- ✓ Néof ormation de glauconie (illite ferrifère) dans les vases littorales;
- ✓ Néof ormation des "argiles rouges des grands fonds" (smectites ferrifères provenant des vases calcaires et siliceuses et des cendres volcaniques) [27].

## 8.4. Structure élémentaire des minéraux argileux

Tous les minéraux argileux sont composés par l'assemblage, d'eau ( $H_2O$ ), de silice, sous forme de silicates ( $SiO_3$ ) et d'aluminium, sous forme d'alumine ( $Al_2O_3$ ). Leur structure élémentaire, appelée feuillet, est constituée d'un arrangement de deux cristaux de base : silicates et alumines. Chaque minéral argileux est composé d'un empilement de feuillets. Ce dernier a un nombre variable de couches pouvant être regroupées en deux types :

- ✓ **Le Tétraèdre de silice  $SiO_4$**  : 4 atomes d'oxygène disposés au sommet d'un tétraèdre régulier ensèrent un atome de silicium.

Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches tétraédriques.

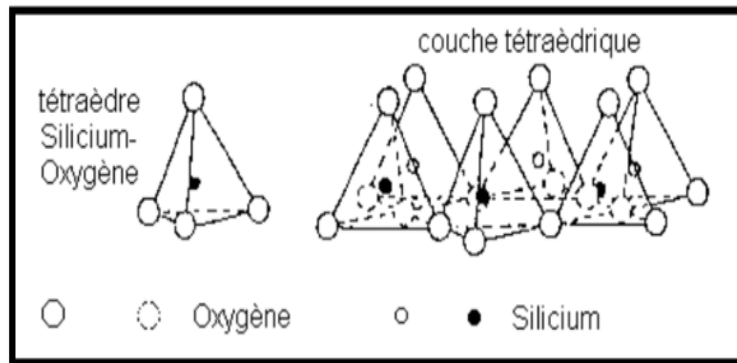


Figure9 : Structure Elémentaire Tétraédrique [29].

- ✓ L'octaèdre d'alumine  $\text{Al}_2(\text{OH})_6$  et éventuellement de magnésium  $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$ : 6 ions hydroxydes enserrent un atome d'aluminium ou de magnésium. Les octaèdres se combinent également pour former des couches planes dites couches octaédriques [29].

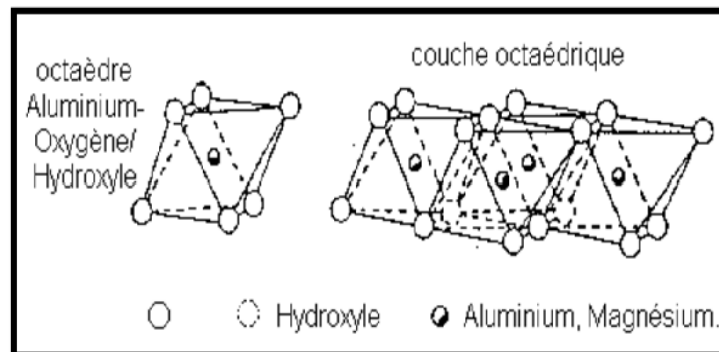


Figure10 : Structure Elémentaire Octaédrique [29].

## 9. Classification des minéraux argileux

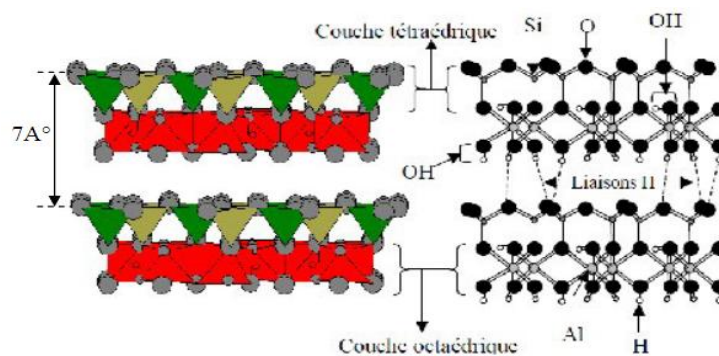
La classification des argiles et leur nomenclature dépendent de leur composition chimiques et de l'ordre structural. La classification adoptée par le comité de nomenclature de l'Association Internationale pour l'Etude des Argiles (AIPEA) varie avec les données structurales. Ce sont des matériaux lamellaires constitués par l'empilement de feuillets.

Un feuillet est formé par l'association de couches tétraédriques (T) à base de tétraèdres  $SiO_4$  et de couches octaédriques ( $AlO_6$ ) (O). Suivant le mode d'agencement des tétraèdres et des octaèdres on distingue 2 grandes familles de minéraux :

- ✓ Les minéraux fibreux qui sont des espèces à pseudo feuillets, par exemples les palygorskites (attapulgite) et les sépiolites.
- ✓ Les minéraux phylliteux à structures lamellaires. Ces derniers sont les plus répandus et les plus étudiés. Leur classification est basée sur le mode d'association des couches structurales et le degré d'occupation des sites de la couche octaédrique (di ou tri octaédrique). Selon la séquence d'empilement des couches tétraédriques et octaédriques on distingue des minéraux de type 1/1 (T-O), 2/1 (T-O-T) et 2/1/1(T-O-T-O) [14].

### 9.1. Les minéraux à 7Å de type 1/1

Ils sont constitués de feuillets comprenant une couche tétraédrique, accolée à une couche octaédrique, Son épaisseur est d'environ 7 Å, l'exemple le plus cité est la kaolinite [24].

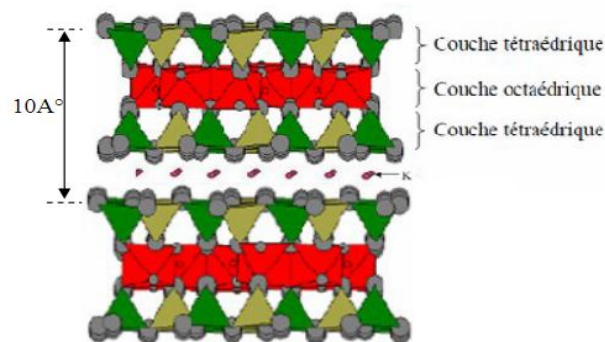


**Figure11** : Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdre alumineux d'un minéral de type 1 :1[6].

### 9.2. Les minéraux à 10Å de type 2/1

Cette structure comporte trois couches: deux tétraédriques encadrant une couche octaédrique, elle est variable en fonction du contenu de la couche inter foliaire de 9Å à 15Å, elle est de :

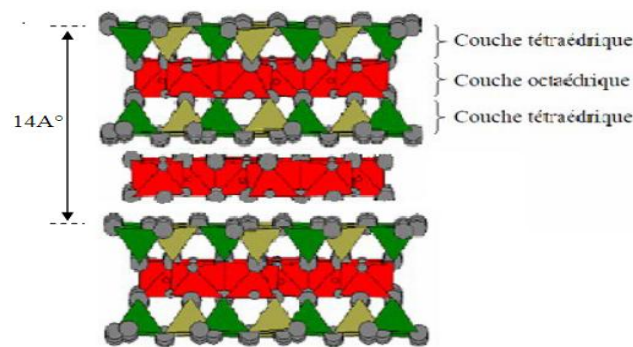
- ✓ 9 Å si l'espace est vide (groupe à pyrophyllites-talcs) ;
- ✓ 10 Å si les cations inter foliaires sont anhydres (cas de  $K^+$  pour le groupe des micas et micas durs) ;
- ✓ 12,5 Å si les cations échangeables inter foliaires sont entourés d'une couche d'eau (cas de  $Na^+$  pour le groupe des smectites et celui des vermiculites) ;
- ✓ 15 Å si les cations échangeables inter foliaires sont entourés de deux couches d'eau (cas de  $Ca^{2+}$  pour le groupe des smectites et celui des vermiculites) [24].



**Figure 12 :** Représentation schématique des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux d'un minéral de type 2 :1[6].

### 9.3. Les minéraux à 14Å de type 2/1/1

Cette famille est caractérisée par un feuillet à quatre couches (Te, Oc, Te, Oc) constitué en plus des trois couches de la série 2/1, par une couche octaédrique qui s'insère dans l'espace inter foliaire ; les chlorites, par exemple appartiennent à cette famille [24].



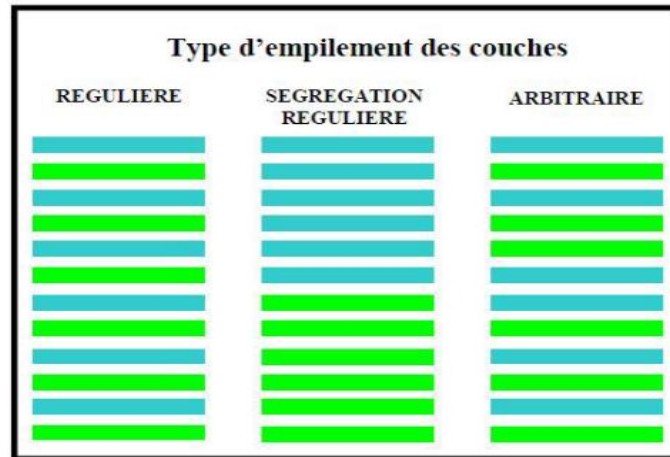
**Figure13** : Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdre alumineux d'un minéral de type 2 :1 :1[6].

#### 9.4. Minéraux inter stratifiés

Les similitudes dimensionnelles, à micro échelle, des différentes argiles, permettent l'inter stratification de plusieurs types de feuillets. Parmi l'inter stratifiés les plus fréquents, citons : illite-smectites, entre argiles T-O-T, mais aussi inter stratifiés entre argiles T-O-T et argiles T-O, tel que smectites-kaolinite. Ces inters stratifiés peuvent présenter tous les degrés d'ordre, entre distribution parfaitement régulière et distribution totalement aléatoire des différents types de feuillets.

Un minéral inter stratifié régulier est formé de l'empilement régulier de feuillet de minéraux argileux élémentaires de nature différente, en proportion variées. Dans ce cas l'empilement des différents types de feuillet se fait selon des séquences répétitives (exemple : A-B-A-B-A-B). Un inter stratifié est considéré comme irrégulier si l'empilement des différents types de feuillets est aléatoire, c'est-à-dire si aucune séquence répétitive ne se dessine [15].





**Figure 14:** Structure des minéraux inters stratifiés [15].

## 10. Propriété des argiles

Les minéraux argileux se caractérisent par plusieurs propriétés physico-chimiques dont les principales sont:

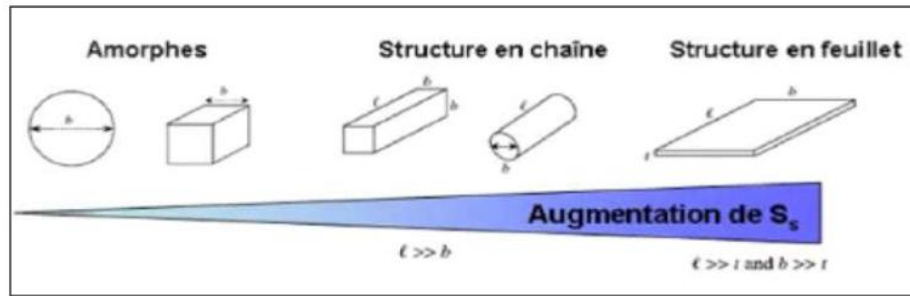
- ✓ Formes et surfaces spécifiques.
- ✓ Capacités d'adsorption d'eau et de gonflement.
- ✓ Capacité d'échanges cationiques.

### 10.1. Forme et surface spécifique

Par définition, la surface spécifique ( $S_S$ ) appelée aussi « aire massique » représente la surface totale  $A_S$  ( $A_S$ ) par unité de masse ( $M$ ) et on l'exprime généralement en  $m^2/g$ :

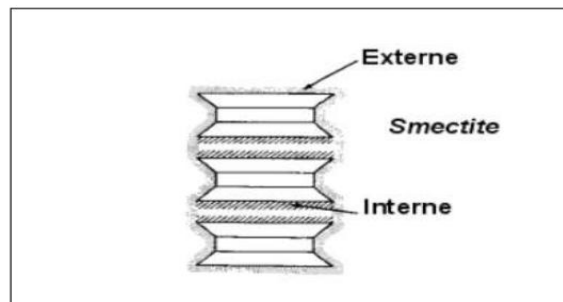
$$S_S = \frac{A_S}{M} \left( \frac{m^2}{g} \right)$$

La taille fine des argiles possède une grande surface spécifique qui dépend de la nature du minéral argileux, la surface des minéraux argileux est supérieure à celles des minéraux de même taille mais de forme différent La (Figure 11), montre également que la surface spécifique ( $S_S$ ) dépend de la forme de la particule. On peut remarquer que celle-ci tendance à s'aplatir quand la surface spécifique ( $S_S$ ) augmente.



**Figure15 :** Influence de la forme de la particule sur la surface spécifique [7].

Les propriétés des argiles sont principalement contrôlées par leur surface interne et externe. La surface totale comprend la surface externe, compris entre les particules argileuses, et la surface interne, correspondant à l'espace inter foliaire.



**Figure16 :** Surface des particules argileuses (smectites), interne et externe [7].

Parmi les méthodes les plus utilisées pour déterminer la surface spécifique, on cite la volumétrie d'adsorption d'azote exploitée par la méthode Brunnauer, Emmett et Teller (BET). Cette approche consiste à faire adsorber sur une surface argileuse préalablement activée par un traitement thermique, des molécules dont on connaît leur dimension et leurs possibilités d'arrangement.

L'azote ( $N_2$ ) est le gaz le plus utilisé dans cette méthode car aucune interaction spécifique n'intervient durant son mécanisme d'adsorption. Mais ce gaz inerte présente une faible affinité pour les liaisons au niveau de l'espace inter foliaire et par conséquent, il nous permet de mesurer juste la surface externe.

### 10.2. Capacité d'échange cationique

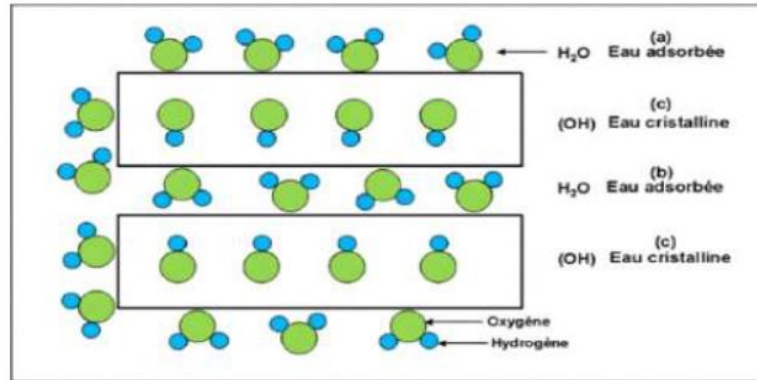
Les argiles ont la capacité de fixer de façon réversible des cations en solution, la capacité d'échange cationique est définie comme étant la concentration totale des sites superficiels disponibles aux cations. Ce paramètre est exprimé en quantité de charge par unité de masse milliéquivalents pour 100g (meq /100g) ou elle s'exprime en centi-mol.kg-1.

Le principe général d'évaluation de la capacité d'échange cationique (CEC) consiste à mesurer la quantité totale fixée d'un cation indicateur introduit en excès dans une suspension argileuse. Cette mesure est souvent réalisée à pH fixe puisque la capacité d'échange cationique est tributaire aussi du pH suite à la présence des groupements silanols et alumineux sur les surfaces latérales susceptible de se protoner ou de se déprotéger.

### 10.3. Capacité de gonflement et d'adsorption

Généralement, toutes les argiles possèdent une capacité de former facilement des complexes lamellaires par l'insertion des molécules d'eau ou organique dans l'espace inter foliaire (Figure 13). Ce phénomène est appelé gonflement, le degré de gonflement ou degré d'hydratation varie d'une famille argileuse à une autre.

Les smectites, les vermiculites et les minéraux interstratifiés sont parmi les argiles qui se caractérisent par une capacité d'expansion beaucoup plus importante que celles des autres espèces argileuses. L'incorporation d'eau est réversible à la pression atmosphérique et dépend de la température et de l'humidité relative (la pression de vapeur d'eau) de l'air: plus l'air est humide, plus l'argile pourra incorporer de l'eau jusqu'à sa limite de saturation. La plupart des phyllosilicates possédant de telles propriétés de gonflement sont classés dans la famille de smectites [7].



**Figure17 :** Localisation de l'eau dans les particules argileuses, (a) molécules d'eau adsorbées sur la surface d'argile, (b) molécule d'eau associées avec les cations dans l'espace inter foliaire, (c) eau « cristalline » sous forme d'hydroxyles qui par déshydroxylation forme des molécules d'eau [7].

## 11. Principaux problèmes des sols argileux

Dans de nombreux pays du monde, le gonflement est à l'origine de fréquents désordres des ouvrages légers. Aux Etats-Unis d'Amérique les dommages provoqués par le gonflement des sols présentent un coût supérieur à celui de toutes les catastrophes naturelles.

En Algérie l'urbanisation de certains quartiers des villes et la construction des routes se heurtent aux problèmes que posent les phénomènes de gonflement, tassement, et de glissement.

### 11.1. Phénomène de gonflement

Ce phénomène est lié au changement d'humidité de certains sols très argileux ou tourbeux qui sont capables de fixer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse.

Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes et varient en fonction de leur teneur en eau) ; la variation de volume d'un terrain est consécutive à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle) et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'élément jointifs).

**11.2. Tassements**

Il s'agit de la diminution de volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes, argiles) sous l'effet de charges appliquées et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation.

**11.3. Glissements**

Ces mouvements, au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins continu d'un versant instable de montagne ou de colline. Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites.

La masse de matériaux meubles ou rocheux fracturés se détache suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes, visibles ou non, et de formes diverses [8].

# *Chapitre III:*

## *Phénomène de gonflement des sols*

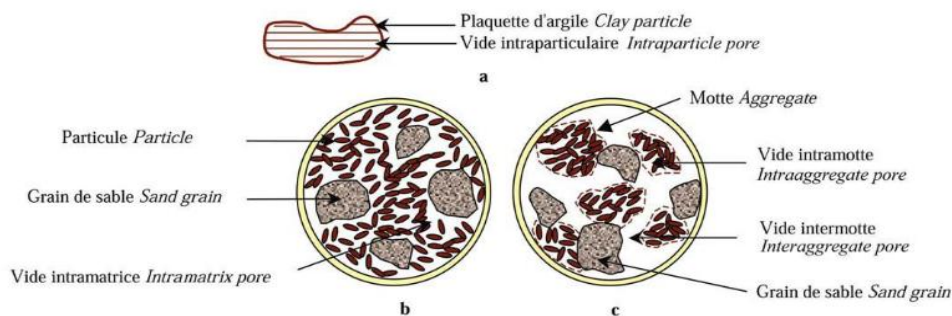
## 1. Introduction

Le gonflement des sols naturels est spécifique à certains sols argileux. Il est principalement lié aux variations de la teneur en eau.

Dans ce chapitre, on présente phénomène de gonflement à l'échelle microscopique, les différents paramètres macroscopiques, l'importance et les conséquences du gonflement sur la stabilité et le comportement des ouvrages enterrés dans les matériaux argileux.

## 2. Les sols gonflants

Les feuillets argileux ont tendance à s'agglomérer pour former des particules de taille variable (figure 19). Ce degré d'organisation correspond à l'ultrastructure ou infrastructure d'un sol. À ce niveau, les vides correspondent aux espaces interfoliaires que l'on qualifiera de vides intraparticulaires.



**Figure18** : Structure des sols gonflants d'après Gens & Alonso, 1992[9].

Il existe en fait deux grands types de structure pour les sols compactés, structures qui ont été reconnues dans un grand nombre de matériaux différents à partir d'études réalisées au microscope électronique à balayage Collins & McGown. (1974) ; Yong & Warkenti. (1975) ; Gilliot. (1979). La figure 19.b représente le premier cas où l'ensemble du matériau est constitué d'une matrice homogène formée à partir des argiles et des autres constituants du sol. Il est alors possible de distinguer deux types de pores : les vides intraparticulaires et les vides intramatrices.

Cette structure est typique des sols compactés du côté humide de l'optimum.

La figure 19.c correspond à la deuxième possibilité qui est représentative de la majorité des sols naturels ou compactés du côté sec de l'optimum. Les particules argileuses s'associent aux autres constituants du sol pour former des agrégats. Trois niveaux structuraux peuvent alors être distingués : l'infrastructure, la microstructure qui correspond aux agrégats, et la macrostructure qui correspond à l'arrangement des agrégats entre eux. Les agrégats contiennent des pores qualifiés de micropores et la macrostructure des macropores situés entre les agrégats. Gens & Alonso (1992) ont repris ce schéma d'organisation, qu'ils qualifient de double structure, comme fondement de leur modèle de comportement des sols gonflants où sont réunies l'infrastructure et la microstructure. Al-Mukhtar et al. (1996), citant différents auteurs, indiquent que la taille moyenne des pores de l'ultrastructure est comprise entre 10 et 15 Å, celle des micropores entre 25 et 2 000 Å, et celle des macropores supérieure à 2 000 Å[9].

### 3. Définition des paramètres du gonflement

Les paramètres du gonflement Dans la littérature géotechnique, on distingue trois principaux paramètres pour la caractérisation des Paramètres hydromécaniques des sols gonflants. Ces paramètres sont : la pression de gonflement, le potentiel de gonflement et l'indice de gonflement.

#### 3.1. La pression de gonflement

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

#### 3.2. Le potentiel de gonflement

D'un sol, dont l'état physique initial est connu, est la déformation maximale ( $A_h/h_0$ ) que provoque l'imbibition de cet élément soumis à un état De contrainte nulle ou quasi nulle jusqu'à sa saturation complète.



### 3.3. L'indice de gonflement Cs

D'un sol traduit l'importance de la déformation de gonflement induite par un déchargement par rapport à un état de contrainte donnée, il est Défini par la pente de la courbe  $e = f(\log x)$  obtenue en déchargement lors d'un essai œdométrique classique. Il n'y a pas de proportionnalité entre la pression de gonflement et le potentiel de gonflement [16].

## 4. Description du phénomène de gonflement

Mouroux et al. (1988) ; Popescu (1986) ont distingués deux types de gonflement, un gonflement intraparticulaire (interfoliaire) et un gonflement interparticulaire (Figure 20 et 21).

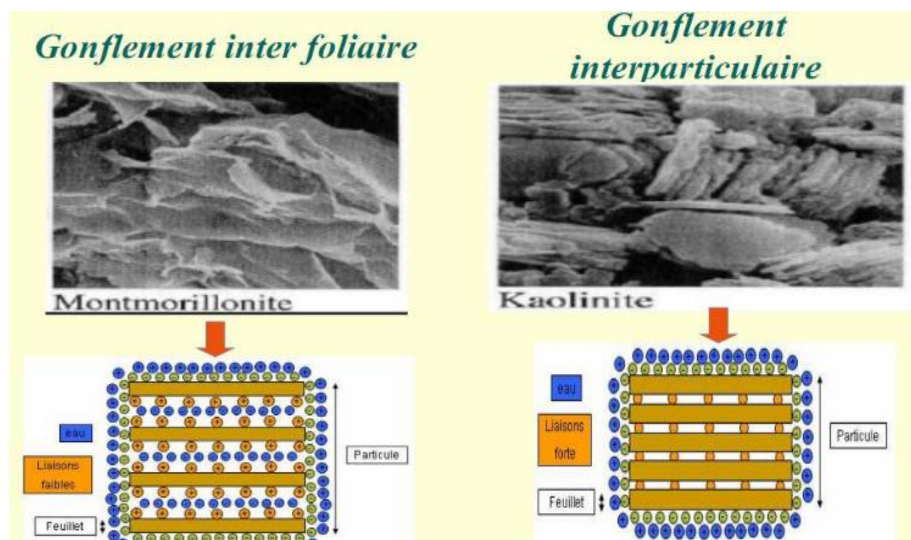
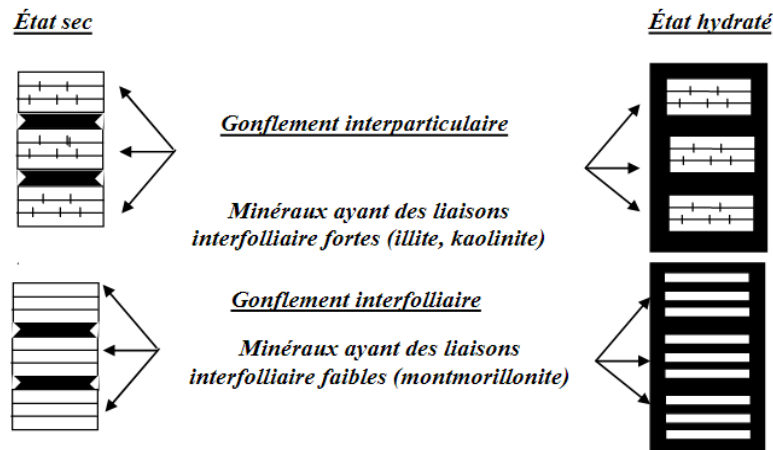


Figure19 : types de gonflements [9].

- ✓ **Le gonflement intraparticulaire ou interfoliaire** : Il s'agit de l'adsorption de molécules d'eau sur la surface externe de la particule d'argile. Lors d'une hydratation inter particulaire, les changements de volume qui s'ensuivent sont généralement faibles.
- ✓ **Le gonflement interparticulaire** : pour les argiles dont la structure fait intervenir des cations compensateurs, il se produit au contact de l'eau une hydratation de ces cations. Le cation hydraté acquiert une taille plus importante parce qu'il s'entoure de molécule d'eau.

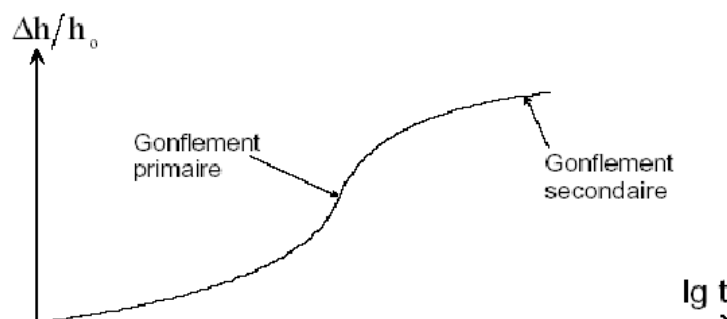
Il en résulte une augmentation de la distance interfoliaire et par voie de conséquence un affaiblissement de la liaison entre les feuillets. Ce qui permet à d'autres molécules d'eau de s'immiscer entre les feuillets d'une même particule, c'est l'adsorption interfoliaire [9].



**Figure20** : Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation. [9].

Holtz et Gibb (1956), Chen (1988) ont divisé le gonflement en un gonflement primaire et un gonflement secondaire, (figure 3) représente la variation relative de la hauteur d'échantillon en fonction du logarithme du temps, dans laquelle on distingue les deux phases de gonflement :

- ✓ **Gonflement primaire:** qui prend place très tôt, sa fin est caractérisée par un point d'inflexion permettant le changement de l'allure de la courbe.
- ✓ **Gonflement secondaire :** qui est caractérisé par la portion linéaire de la courbe [9].



**Figure21** : Courbe du gonflement en fonction du temps (Chen, 1988) [9].

## 5. Mécanismes du gonflement des argiles

### 5.1. Le gonflement au sens physico-chimique

Les phénomènes physico-chimiques et mécaniques varient. Le gonflement d'un sol peut résulter de la diminution des contraintes en place à la suite d'un déchargement, après une excavation, ou par imbibition du sol. Il se traduit par une augmentation du volume du sol ou un accroissement des pressions régnant dans le milieu selon que le matériau peut se déformer ou non. Il est à noter que l'augmentation de la teneur en eau lors d'une imbibition ne provoque pas toujours une augmentation de volume suivant la nature du matériau.

En effet, un sol sec essentiellement sableux ou silteux peut s'humidifier par remplacement de l'air contenu dans les vides, sans augmentation conséquente de volume. Par contre, dans le cas de sols argileux, le gonflement résulte de forces de répulsion qui s'exercent entre les particules argileuses, entraînant une augmentation de volume à mesure que la teneur en eau augmente. Le gonflement des particules argileuses, à l'échelle microscopique, est directement lié à leurs Propriétés minéralogiques, électrochimiques et à leurs surfaces spécifiques qui varient d'une famille d'argiles à l'autre; le phénomène de gonflement paraît relever de deux causes :

- ✓ l'hydratation des espaces interfoliaires, entraînant une augmentation de la porosité interfoliaires (gonflement interfoliaires ou gonflement cristallin).
- ✓ la répulsion entre les particules, soit l'augmentation de la porosité interfoliaires et inter particulaire pouvant affecter toutes les argiles (gonflement inter particulaire ou gonflement osmotique).

#### 5.1.1. Hydratation des espaces inter foliaires

Lors de l'hydratation d'une éprouvette d'argile sèche, l'eau pénètre dans l'espace inter foliaire et s'organise en couches mono moléculaires, puis interagit avec les feuillets et les cations déjà présents.

Cette hydratation favorise la création d'une pression, appelée pression de disjonction, qui a pour conséquence une augmentation de la distance interfoliaire et donc un gonflement de l'ensemble des deux feuillets, c'est le gonflement cristallin. Ce gonflement n'est possible que lorsque les liaisons inter feuillets sont très faibles pour laisser pénétrer l'eau dans l'espace interfoliaire. C'est le cas par exemple de la montmorillonite.

Le phénomène de gonflement est influencé par la nature des cations interfoliaires. Ainsi la montmorillonite sodique ( $Na^+$ ) gonfle plus qu'une montmorillonite calcique ( $Ca^{2+}$ ).

En effet, le rayon ionique de  $Na^+$  est plus proche de la taille de la molécule d'eau et son interaction avec cette dernière est plus faible que pour le cation  $Ca^{2+}$ . L'eau se répartit alors plus facilement à la surface du feuillet. Dans les argiles illitiques, le gonflement cristallin est très faible et il est quasiment inexistant dans les kaolinites. Ce type de gonflement ne représente qu'environ le dixième du gonflement macroscopique total d'une argile gonflante. Il est donc nécessaire selon lui d'envisager un autre mécanisme de gonflement que celui relevant uniquement des seules variations interfoliaire [3].

### 5.1.2. Répulsion entre les particules

Le gonflement osmotique se produit lorsque l'énergie d'hydratation est suffisante pour franchir la barrière de potentiel due aux forces électrostatiques attractives entre feuillets.

L'adsorption des cations par les particules argileuses et la formation de la double couche diffuse sont responsables de la répulsion des deux particules. En effet, dans une argile sèche, cation  $Ca^{2+}$ . L'eau se répartit alors plus facilement à la surface du feuillet. Les cations sont fortement adsorbés à la surface des feuillets argileux. Les cations en excès, par rapport à ceux assurant l'électro neutralité des particules argileuses et des anions associés, sont présents sous forme de sels. Si l'argile sèche est placée au contact de l'eau, les sels s'y dissolvent, mais les différents ions se répartissent de manière non homogène, la concentration en cation devient plus forte au voisinage des surfaces externes des argiles, tandis que les anions ont plutôt tendance à s'éloigner des surfaces argileuses.

La zone perturbée, ainsi créée par cette répartition non homogène des cations et des anions, est appelée la double couche diffuse. Cette dernière assure l'électro neutralité du système entre la particule d'argile et la double couche diffuse du modèle de Stern. La théorie de la double couche diffuse a permis de démontrer mathématiquement que le recouvrement de deux couches diffuses de même signe est responsable de la répulsion de deux particules. Appliquée à la multitude de particules constituant une éprouvette d'argile, cette théorie permet d'expliquer le gonflement à l'échelle macroscopique.

Une autre approche plus fréquemment utilisée permet, d'expliquer le gonflement de manière plus pratique, c'est le concept de "pression osmotique". Dans cette approche, du fait des différences de concentration au sein de la couche diffuse, des pressions osmotiques sont développées à chaque fois que les doubles couches de deux particules se chevauchent. La surface argileuse chargée négativement jouerait un rôle comparable à celui d'une membrane semi-perméable, séparant deux solutions de concentration en sel différentes (aucun cation ne vient cependant traverser la surface argileuse). La différence de pression osmotique créée entre les deux particules et la solution à l'équilibre environnant les particules d'argile est appelée "pression de répulsion inter particulaire". On peut alors imaginer qu'à l'échelle macroscopique, ce phénomène d'origine microscopique, répété un très grand nombre de fois, se répercute par l'apparition d'un gonflement observable. Rappelons également que le gonflement d'un sol argileux dépend non seulement de la minéralogie des argiles mais aussi de la texture, c'est-à-dire de l'agencement du squelette et du réseau poreux de ces minéraux au sein des autres minéraux constituant le matériau. Sous certaines conditions, les minéraux argileux gonflants peuvent se retrouver piégés au sein d'une matrice siliceuse ou carbonatée, créant des complexes susceptibles d'empêcher ou d'annuler le Gonflement de ces minéraux.

En résumé, la pression osmotique joue un rôle prépondérant dans le gonflement des argiles saturées. Une diminution de contraintes effectives dans le sol se traduit au niveau macroscopique par le gonflement des

argiles. La théorie de la double couche fournit une interprétation intéressante des phénomènes physico-chimiques sur le plan qualitatif, mais l'application quantitative de cette théorie aux minéraux argileux ne permet pas toutefois de caractériser au mieux la texture réelle et complexe d'un matériau argileux. De plus, lorsque les argiles ne sont plus saturées, suite à une dessiccation répétée par exemple, d'autres forces deviennent prépondérantes dans l'hydratation des argiles, comme les forces d'attraction dues aux charges électriques, les forces capillaires de Van der Waals et les forces dérivant de l'énergie d'hydratation des cations échangeables. L'ensemble de ces forces constitue la force de succion qui agit directement sur les molécules d'eau. Cette succion est faible à nulle pour des sols saturés et très forte pour des sols secs [3].

## 5.2. Gonflement au sens mécanique

Le phénomène de gonflement, de même que le tassement, peut provenir d'une modification de l'état de contraintes dans le sol en présence d'eau. La théorie de Terzaghi (1931) définit le gonflement comme un déchargement mécanique.

Considérons un élément de sol saturé à l'équilibre. Si une contrainte extérieure  $\sigma_x$  est appliquée à cet élément du sol, l'eau étant moins compressible que le squelette solide, la contrainte  $\sigma_x$  est immédiatement reprise par la phase liquide au temps initial  $t = 0$ .

On a :  $u = \sigma_x$  ,  $\sigma' = 0$ .

Si l'on permet alors au sol de se drainer, un phénomène de consolidation va se développer, correspondant à l'expulsion de l'eau et au transfert de contrainte de l'eau vers le squelette solide. Un nouvel équilibre va alors s'établir pour l'état de contraintes :  $u = 0$ ,  $\sigma' = \sigma_x$ .

Si la contrainte  $\sigma_e$  est alors supprimée, le même phénomène se produit en sens inverse, et immédiatement :  $u = -\sigma_x$ ,  $\sigma' = \sigma_x$

La pression interstitielle devient négative et opposée à la variation de contrainte totale. Dans des conditions de libre circulation de l'eau, un phénomène de gonflement va alors se développer, exprimant l'absorption de l'eau et le transfert de contrainte négative de ce dernier sur le squelette solide, jusqu'à l'état final :  $u = 0$ ,  $\sigma' = 0$  [30].

## 6. Cinétique de gonflement

Comme le gonflement des argiles est très lent à cause de la faible perméabilité et dépend de la nature et de l'état du sol, il est donc essentiel de comprendre la partie mécanique qui est caractérisée par la relation déplacement-temps c.à.d. ( $\xi e^0 - \log t$ ), elle dépend de plusieurs facteurs :

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

Le processus de gonflement des sols argileux est contrôlé par plusieurs mécanismes superposés à différentes échelles et s'exprime de manière différée à l'échelle macroscopique [17].

## 7. Méthodes d'estimation du gonflement

### 7.1. Estimation du gonflement –Méthodes empiriques (indirectes)

Les méthodes indirectes consistent à établir une corrélation entre le taux de gonflement ou la pression de gonflement et quelques paramètres géotechniques faciles à obtenir au laboratoire. Ainsi, après avoir déterminé les paramètres géotechniques du sol, l'emploi de formules empiriques permet de connaître rapidement le potentiel de gonflement du sol, c'est-à-dire d'estimer ou de quantifier le gonflement et (ou) la pression de gonflement qui peuvent se développer en cas de variations des conditions hydriques et (ou) mécaniques.

De nombreux auteurs ont tenté de relier la pression de gonflement  $\sigma_g$  ou le potentiel de gonflement  $C_g$  aux paramètres classiques de mécanique des sols (teneur en eau initiale  $w_i$ , densité sèche initiale  $d$ , limite de liquidité  $W_L$ , indice de plasticité  $IP$ , limite de retrait  $w_s$ , pourcentage des particules d'argiles  $< 2$  micromètre,...) qui semblent être les facteurs les plus influents sur le gonflement des argiles. Plusieurs relations empiriques ont été proposées.

**Tableau 2:** Modèles d'estimation du taux de gonflement ( $\epsilon_g$ ) et de la pression de gonflement ( $\sigma_g$ ) [30].

Auteur(s)	Equations	Paramètres
Seed et al(1962)	$\epsilon_g = 2.16.10^{-3}(IP)^{2.44}$	$\epsilon_g$ et IP sans unités (-)
Komomik et David(1969)	$\epsilon_g = 6.7 + 2.4 * IP$ $\log \sigma_g = - 2.132 + 0.0208 * WL + (6.66 * 10^{-4}) * \gamma_{d0} - 0.0269 * Wi$	$\epsilon_g(\%)$ , $\sigma_g(\text{kpa})$ Wi et WL(%) $\gamma_{d0}(\text{kg/m}^3)$
Vijayvergiya et Ghazzaly (1973)	$\log(\epsilon_g) = 0.033 * WL - 0.083 * Wi + 0.458$ $\log(\sigma_g) = 0.033 * WL - 0.083 * Wi - 1.967$	$\epsilon_g(\%)$ , $\sigma_g(\text{kpa})$ WL et Wi(%)
Vijayvergiya et Ghazzaly (1973)	$\log(\epsilon_g) = 0.033 * WL - 0.0032 * \gamma_{d0} - 6.692$ $\log(\sigma_g) = 0.033 * WL - 0.0032 * \gamma_{d0} - 5.154$	$\epsilon_g(\%)$ , $\sigma_g(\text{kpa})$ WL(%), $\gamma_{d0}(\text{kg/m}^3)$
Didier et al(1973)	$\log(\sigma_g) = 2.55 * (\gamma_{d0} / \gamma_w) - 1.705$	$\gamma_{d0}(\text{g/cm}^3)$ , $\sigma_g(\text{bars})$
O'Neil et Ghazzaly(1977)	$\epsilon_g = 2.77 + 0.131 * WL - 0.27 * Wi$	$\epsilon_g(\%)$ WL et Wi sans unités (-)
Johnson et Snethen(1978)	$\log(\epsilon_g) = 0.458 + 0.036 * WL - 0.0833 * Wi$	$\epsilon_g(\%)$ WL et Wi sans unités (-)
Guiras-Skandaji (1996)	$\epsilon_g = - 117.59 + 3.0571 * Wi$	$\epsilon_g(\%)$ Wi (%)



## 7.2. Les méthodes directes

Le gonflement d'un sol est caractérisé par deux paramètres: le potentiel et la pression de gonflement. Le potentiel de gonflement ou gonflement libre est la variation de hauteur totale d'un échantillon inondé sous le poids du piston à l'œdomètre. La pression de gonflement est la pression que peut exercer un sol lors de son humidification, les variations de volume étant empêchées. Il existe ce pendant plusieurs méthodes de détermination de ces paramètres. Les principales méthodes expérimentales sont la méthode du gonflement libre, méthode du gonflement sous charges constantes et méthode du gonflement empêché.

### 7.1.1. Méthode de gonflement libre

L'essai de gonflement libre est issu directement des procédures traditionnelles de l'essai œdométrique. Après montage dans la bague œdométrique, l'éprouvette est imbibée et est autorisée à gonfler sous le poids du piston. Une fois le gonflement stabilisé, le chargement s'effectue par paliers selon un taux d'accroissement approprié jusqu'à la stabilisation des déformations sous chaque palier. La pression de gonflement correspond à la charge nécessaire pour ramener l'éprouvette à sa hauteur initiale. L'avantage de cette méthode est qu'elle nécessite une seule éprouvette et permet d'obtenir, outre la pression de gonflement et le gonflement libre, et la courbe de compressibilité du sol saturé (après gonflement).

### 7.1.2. Méthode de gonflement sous charges constantes

Quatre éprouvettes, identiques, au moins sont soumises à quatre pressions verticales différentes. Ces quatre éprouvettes sont ensuite humidifiées et le potentiel de gonflement final est déterminé dans chaque cas. La courbe  $\Delta h/h$  en fonction de la pression appliquée lors de l'humidification est tracée. Une interpolation linéaire est réalisée entre les quatre points pour estimer le potentiel de gonflement.

### 7.1.3. Méthode de gonflement empêché

Contrairement à la méthode de gonflement libre, l'essai consiste à maintenir à volume constant l'échantillon mis en contact avec l'eau. En chemin œdométrique, ceci consiste à bloquer totalement le piston contre un capteur de force qui permet de lire directement la pression de gonflement développée par l'échantillon pour un volume rigoureusement constant [30].

## 8. Principales causes de gonflement

La recherche bibliographique a permis de mettre en évidence quatre principaux phénomènes expliquant les causes du gonflement :

- ✓ Hydratation par adsorption.
- ✓ Hydratation par osmose.
- ✓ Hydratation par capillarité.

### 8.1. 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 diffusée due à la fixation des cations échangeables qui s'installent à la surface des feuillets du fait des forces électrostatiques qui sont les suivantes :

#### 8.1.1. Forces d'attractions

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

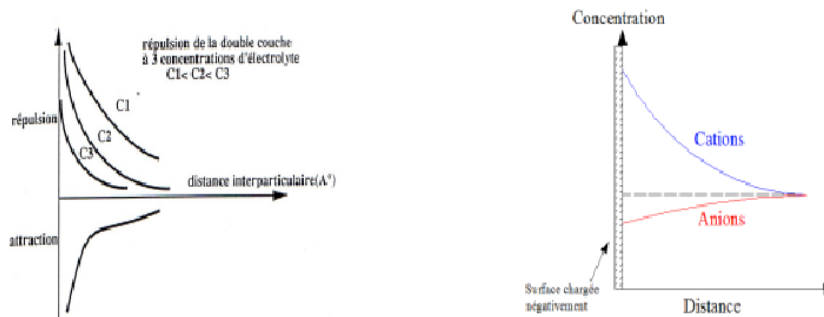
#### 8.1.2. Forces de répulsion

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

Ces deux forces décroissent rapidement avec la distance interparticulaire. Quant à la force de répulsion, elle diminue également avec l'augmentation de la concentration en électrolytes.

Les variations de concentrations en cations, et en anions dans la double couche, diffusée, sont déterminées à partir de l'équation de Poisson-BOLTZMANN.

A proximité de la surface chargée, la concentration en cations est plus élevée que celle en anions.



**Figure22** : Forces électrostatiques dans la double couche, Répartition des ions autour d'une particule chargée [10].

La nature des cations compensateurs joue un rôle important. En effet, le rayon ionique hydraté varie avec le type du cation échangeable comme le tableau 2 présente, lors de l'hydratation du cation compensateur, l'écartement des feuillets d'argiles sera d'autant plus faible que le rayon ionique hydraté sera petit (WAKIM, 2005).

**Tableau3** : Dimensions des cations hydratés et non hydratés, (ILTIS, 1979) [10].

Cation compensateur	Rayon ionique (Å°)	
	Non hydraté	Hydraté
Li <sup>+</sup>	0.6	7.3
Na <sup>+</sup>	0.95	5.6
K <sup>+</sup>	1.33	3.8
Rb <sup>+</sup>	1.58	3.6
Cs <sup>+</sup>	1.67	3.6
Ca <sup>2+</sup>	0.99	9.6
Mg <sup>2+</sup>	1.08	10.8

ABOUBEKER et AISSA MAMOUNE, 2004 ont montré l'influence du rayon hydraté de la solution chimique (KCl, NaCl, et CaCl<sub>2</sub>) sur le gonflement des argiles. Leurs essais du gonflement libre témoignent du fait que le cation (Ca<sup>2+</sup>.) Cause le plus grand gonflement, (K<sup>+</sup>) le plus faible et (Na<sup>+</sup>.) est intermédiaire.

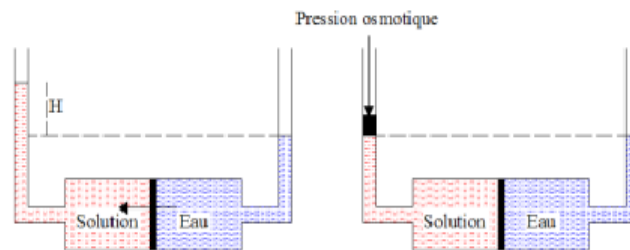
La stabilité des cations compensateurs est aussi très importante. En effet, les cations sont liés aux feuillets par des forces de nature électrostatique et possèdent les propriétés d'être échangeables.

Cette facilité d'échange sera aussi un facteur influant sur le gonflement.

Le classement général admis est le suivant :  $Li^+$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ . D'après cette série, le lithium est le plus facile à remplacer alors que l'aluminium est le plus difficile.

## 8.2. Hydratation par osmose

Lorsqu'une solution saline est séparée de l'eau pure par une membrane semi-perméable idéale (permettant uniquement le passage des molécules d'eau mais non des substances dissoutes), l'eau pure a alors tendance à traverser la membrane pour diminuer la concentration de la solution. Ce phénomène est appelé osmose. La pression qu'il faut appliquer pour empêcher l'arrivée de l'eau dans la solution saline est nommée la pression osmotique (figure 6)



**Figure23** : Phénomène osmotique idéal [10].

Si la concentration de l'eau libre est inférieure à la concentration de l'eau de la double couche, ils ont résultent alors une migration des molécules d'eau des pores larges vers les particules argileuses entraînant l'augmentation de la distance inter feuillet.

Par contre, il en résulte une pression osmotique d'attraction entraînant la contraction du matériau argileux. Le phénomène d'hydratation par osmose permet d'expliquer le fait que lorsque la salinité de la solution d'hydratation augmente, le matériau argileux gonfle moins (AZZOUZ, 2006).

### 8.3. Hydratation par capillarité

La capillarité est une caractéristique des matériaux non saturés de faible porosité. Elle se traduit par une extension dans la phase liquide lors de la saturation ou par une contraction lors de la désaturation.

La saturation des matériaux fins après une phase de drainage peut entraîner le piégeage de l'air par l'eau à l'intérieur du réseau poreux. Ce mécanisme peut engendrer la compression de l'air responsable de la dégradation ou de la fragmentation des matériaux argileux.

La capillarité dépend du phénomène d'adsorption, le film d'eau adsorbé diminue l'espace poreux et modifie par la suite la capillarité. Dans l'hypothèse de pores cylindriques, la pression capillaire ( $P_c$ ) est déterminée par la loi de Jurin :

$$p_c = U_a - U_w = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_c}$$

( $U_a$ ) et ( $U_w$ ) sont respectivement les pressions d'air et d'eau, ( $\sigma$ ) est la tension de surface eau-air et ( $\theta$ ) est l'angle de raccordement entre le ménisque et le solide.

Cette relation implique qu'au niveau du ménisque,  $r_c$  plus est petit, plus la pression d'eau est inférieure à la pression d'air. Comme en mécanique des sols ou des roches, la pression atmosphérique est négative.

Plusieurs facteurs affectent la capillarité des milieux poreux :

- ✓ La pression et la distribution des pores.
- ✓ Les fluides et solides impliqués et l'histoire de saturation.

En résumé, l'attraction de l'eau par un matériau argileux non saturé se réduit pas simplement à l'action de la succion totale ou interviennent également les actions d'adsorption physico-chimiques.

SANTOS et al, 1996 ont exposé deux échantillons d'argilite initialement sèches à l'eau et à l'huile. L'échantillon mis en contact avec de l'eau est altéré. Malgré le fait que l'huile soit infiltrée dans le deuxième échantillon, ce dernier n'a pas réagi. Les auteurs ont attribués ce phénomène aux interactions physico-chimiques primordiales dans les milieux argileux et non à l'effet de la capillarité [10].

## 9. Facteurs qui affectent le gonflement

Les résultats de nombreuses études ont montré que l'amplitude du gonflement dépend de deux types de facteurs :

- ✓ les facteurs intrinsèques.
- ✓ les facteurs externes.

### 9.1. Facteurs intrinsèques

- ✓ La composition minéralogique.
- ✓ Le type de cations compensateur.
- ✓ La Capacité d'échange en cations (CEC).
- ✓ La Surface spécifique.
- ✓ La structure du sol.
- ✓ La quantité de minéraux non argileux.

### 9.2. Facteurs externes

D'autres paramètres indépendants de la structure des argiles et de la composition chimique de la solution hydratante peuvent avoir une influence importante sur le gonflement, on cite en particulier :

- ✓ Les conditions de compactage (statique ou dynamique).
- ✓ L'énergie de compactage.
- ✓ La teneur en eau initiale.
- ✓ La densité sèche.
- ✓ L'effet d'échelle.
- ✓ Le régime de contraintes.
- ✓ Le frottement latéral.
- ✓ Les cycles retrait-gonflement.
- ✓ La durée des essais et la température [10].

## 10. Conclusion

En général on conclut que le phénomène de gonflement est sans doute dangereux car il représente une part non négligeable dans les sinistres constatés sur les édifices publics ou privés dans le monde entier.

Sa maîtrise demande de grandes connaissances, il est important de mieux comprendre d'une part les mécanismes de déclenchement de ce phénomène naturel et d'autres part les paramètres de gonflement.

---

En réalité, le processus de gonflement est un processus physico-chimique qui a des conséquences mécaniques.

Les différents facteurs montrent qu'il est difficile de corréler un comportement macroscopique à des observations microscopiques.

*Chapitre IV:  
Technique de  
stabilisation des sols*



## 1. Introduction

Le traitement chimique des sols est un procédé connu depuis des décennies. Extrêmement écologique et économique, il a connu un véritable essor ces dernières années.

Années, accompagnées par la qualité du travail et précision et fiabilité de l'adhésif dans ce chapitre, nous aborderons en détail deux types de traitements chimiques sol:

- ✓ Traitement des sols à la chaux.
- ✓ Traiter le sol avec du ciment.

## 2. Définition de la stabilisation

Le centre des nations unies pour les établissements humains a défini la stabilisation d'un sol comme étant, la modification des propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatible avec une application particulière.

Mais la stabilisation est un problème complexe car de très nombreux paramètres interviennent. Il faut en effet connaître : les propriétés de la terre, les améliorations envisagées, l'économie du projet, les techniques de mise en œuvre de la terre choisie pour le projet et la maintenance du projet réalisé.

## 3. Principaux objectifs de la stabilisation

La stabilisation répond à un certain nombre d'objectifs qui sont:

- ✓ Réduisait le volume des vides entre les particules solides (porosité).
- ✓ Colmater les vides qui ne peuvent être supprimés (perméabilité).
- ✓ Créer des liens ou améliorer les liaisons existant entre les particules (résistance mécanique).

Ces trois objectifs permettent d'améliorer les caractéristiques du matériau et de :

- ✓ Obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques: augmenter la résistance à la compression simple à l'état sec, à l'état humide et la résistance à la traction et au cisaillement.
- ✓ Obtenir une meilleure cohésion.
- ✓ Réduire la porosité et les variations de volume : gonflement-retrait à l'eau.
- ✓ Améliorer la résistance à l'érosion du vent et de la pluie : réduire l'abrasion de surface et imperméabiliser.
- ✓ Réduire sa sensibilité à l'eau : gonflement et retrait. Il est entendu que les améliorations obtenues doivent avoir un caractère irréversible.

#### 4. Les diverses techniques de la stabilisation

Dans la géotechnique, les procédés à utiliser pour stabiliser surtout les sols argileux sont nombreux. Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue :

- ✓ La stabilisation mécanique.
- ✓ La stabilisation thermique.
- ✓ La stabilisation chimique (par additifs).

##### 4.1. Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique est le terme général utilisé pour la stabilisation du sol par compactage. Ce procédé modifie les propriétés de la terre (la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité), en intervenant sur la structure.

##### 4.2. Stabilisation physique

Les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur la texture : mélange contrôlé de fractions de grains différentes (argile et sable).

##### 4.3. Stabilisation chimique

La stabilisation de la terre est assurée par l'ajout d'autres matériaux ou de produits chimiques qui modifient ses propriétés, soit du fait d'une réaction physicochimique entre les particules de la terre et le produit

ajouté soit en créant une matrice qui lie ou enrobe les particules. On peut citer, en particulier du ciment, de la chaux, du bitume, et de sous-produits industriels. Le choix et la quantité de matériaux ou de produits chimiques à ajouter dépendent de la nature du sol et du degré d'amélioration de la qualité du sol souhaité [18].

## **5. stabilisations par la chaux et le ciment**

### **5.1. Chaux**

#### **5.1.1. Définition**

La chaux est à la fois le liant minéral majeur de l'histoire de la construction et un des produits minéraux les plus utilisés depuis le début de l'ère industrielle. Avant la chaux, le plâtre, fut la première matière cuite pour réaliser l'acte de construire. Issu du gypse, roche évaporitique, il fut notamment maîtrisé dès l'Ancien Empire de l'époque pharaonique. Puis, les mélanges avec des matériaux carbonatés apparurent. Le présent article ne cherchera pas à retracer l'histoire des liants minéraux et se focalisera sur la chaux seule. L'apparition des ciments dits « naturels » et des ciments dits « Portlands » suivra dans le temps, même si cette chronologie linéaire n'est pas si simple : tous ces produits ont parfois cohabité et cohabitent encore.

La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par calcination du calcaire, industriellement dans un four à chaux. Elle est utilisée depuis l'Antiquité, notamment dans la construction.

Chimiquement, c'est un oxyde de calcium avec plus ou moins d'oxyde de magnésium mais la désignation usuelle de chaux peut englober différents états chimiques de ce produit [31].

### 5.1.2. Les différents types de chaux

- **La chaux vive**

La chaux vive est la chaux sortie du four à chaux. Elle prend l'apparence de pierres pulvérulentes en surface. Le principal constituant de la chaux vive est l'oxyde de calcium, qui a pour formule  $\text{CaO}$ .

La chaux vive est une chaux qui n'a pas été éteinte. La chaux vive pouvait être amenée sous cette forme sur chantier où elle était éteinte ou transportée sur de longues distances dans des sacs, à l'abri de l'humidité.



Figure24 : La chaux vive [28].

- **La chaux éteinte**

La chaux vive est transformée en chaux éteinte par immersion dans l'eau. Cette immersion, provoque une dislocation, un foisonnement, ainsi qu'une forte chaleur (autrement dit la réaction est exothermique). Le résultat est une pâte, qui prend le nom de chaux éteinte (portlandite), qui a pour formule,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , soit de l'hydroxyde de calcium.



Figure25 : Chaux éteinte [28].

- **La chaux hydraulique**

La chaux hydraulique (chaux maigre) est obtenue à partir de calcaire contenant 10 à 20 % d'argile qui lors de la calcination donne des silicates

et aluminates de calcium. Elle fait prise, en quelques heures, au contact de l'eau, d'où son appellation. Plus une chaux est hydraulique, plus elle présente de résistance à la compression moins elle est plastique. Sa masse volumique est d'environ 800 kg/m<sup>3</sup>.

- **La chaux aérienne**

C'est de l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Son nom minéralogique est portlandite. La chaux aérienne (chaux hydratée, chaux éteinte, chaux grasse, chaux maigre) est obtenue par hydratation de chaux vive issue d'un calcaire très pur. On la trouve sous différentes appellations : chaux éteinte, CAEB (ancienne normalisation : chaux aérienne éteinte pour le bâtiment). L'appellation conseillée par la norme NF EN 459-1 est CL (Calcic Lime traduit par chaux calcique) pour les chaux contenant moins de 5 % d'oxyde de magnésium suivi d'un chiffre 90, 80 ou 70 indiquant le pourcentage de CaO[11].

### 5.1.3. Les effets de la chaux dans la stabilisation des sols

Les effets que peut avoir l'emploi de chaux pour stabiliser les sols sont au nombre de trois. Et plus précisément, la chaux peut être utilisée dans les sols instables pour assécher, modifier ou stabiliser.

- ✓ **Assèchement du sol**

La chaux vive (oxyde de calcium) est hautement efficace pour l'assèchement de tout sol humide. Après son mélange avec la terre argileuse, la chaux vive absorbe l'eau à travers une réaction exothermique qui réduit significativement l'humidité du sol par hydratation et évaporation. La baisse d'humidité variera en fonction de la chaux ajoutée et des conditions ambiantes, mais elle peut osciller entre 2% et 5%. Ce processus intervient immédiatement dès l'ajout de chaux.

- ✓ **Modification du sol**

En rajoutant de la chaux au sol, la répartition des charges à la surface des particules du sol argileux se modifie en donnant lieu à un échange ionique entre le Sodium (Na) du sol et le Calcium (Ca) de la Chaux. Ce

processus se déclenche aussi immédiatement après l'ajout de chaux. L'effet produit est que la terre perd sa faculté à retenir l'eau.

✓ **Stabilisation du sol**

Dans ce cas, l'effet se produit plutôt à moyen terme et de manière graduelle. L'argile du sol (qui contient de la silice et de l'alumine) en contact avec la chaux est en mesure de former des silicates et des aluminates calciques hydratés. Cette réaction, dite "pouzzolanique", aboutit à une augmentation de la compression simple du sol, ainsi qu'à une meilleure stabilité face au gel [25].

#### 5.1.4. Mécanismes de stabilisation à la chaux

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

- **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.

- **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.

- **Floculation 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 floculent et s'agglomèrent ; il y a augmentation de la taille des agrégats de la fraction fine. La texture et la structure changent.

- **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.

- **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 [21].

### 5.1.5. Action de la chaux sur les argiles

Les argiles sont des minéraux généralement issus de l'altération des roches. On les trouve dans les sols, sédiments, roches sédimentaires, ainsi que dans les zones d'altération hydrothermales. Ce sont principalement des phyllosilicates. C'est-à-dire qui présente sous forme de feuillets d'aluminium plus ou moins hydraté et de petite taille. Les feuillets sont constitués de couches de tétraèdres  $\text{SiO}_4$  et de couches d'octaèdres  $\text{Al}(\text{OH})_6$ , reliées par les atomes  $\text{O}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$  mis en commun. L'aptitude des minéraux argileux à adsorber des molécules d'eau, dans l'espace inter foliaire varie d'un type d'argile à l'autre. Elle est à l'origine de la sensibilité des argiles à l'eau. Lorsqu'on mélange de la chaux vive avec un sol argileux humide, elle s'hydrate rapidement en fixant une quantité d'eau.

### 5.1.6. Avantages de la chaux

- ✓ Augmenter la résistance.
- ✓ Il est efficace pour les sols.
- ✓ Stabilisation à la chaux augmente la résistance à la compression parfois aussi élevé que 60 fois.
- ✓ Force est généralement améliorée.
- ✓ Le sol devient plus réalisable [12].

### 5.1.7. Inconvénients de la chaux

- ✓ La chaux est produite par la combustion de la pierre à chaux dans les fours, de sorte qu'il est nocif pour l'environnement.
- ✓ Il a besoin de plus de frais pour la pierre de chaux vive.
- ✓ Il n'est pas efficace pour les sols sableux.
- ✓ Il y a une limite de la quantité de chaux nécessaire environ 2 à 10% du sol [12].

## 5.2. Le ciment

### 5.2.1. Définition

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire que mélangé à l'eau il forme une pâte qui fait prise et durcit (propriétés hydrauliques). Il est utilisé sous forme de poudre pour confectionner du béton ou du mortier.

Les ciments courants sont élaborés à partir d'un mélange d'environ 80% de calcaire et 20% d'argile, mélange qui est progressivement chauffé à une température voisine de 1450°C, puis brusquement refroidi. Au cours de ces opérations, s'enchaînent plusieurs réactions chimiques. Il en résulte le clinker qui, mélangé avec du gypse et éventuellement avec d'autres produits, puis finement broyé, donne le ciment [26].

### 5.2.2. Type de ciment

Les ciments selon la norme européenne doivent au moins être désignés par leur type, complété du nombre 32.5, 42.5 ou 52.5 qui désignent la classe de résistance. La classe de résistance à jeune âge est fixée par l'ajout de la lettre N ou R. On distingue cinq types de ciments courants :



- ✓ CEM I: Ciment Portland.
- ✓ CEM II: Ciment Portland composé.
- ✓ CEM III: Ciment de haut-fourneau.
- ✓ CEM IV: Ciment pouzzolanique.
- ✓ CEM V: Ciment composé [33].

### 5.2.3. Domaine d'application

#### CEM I :

- ✓ Béton armé en général coulé sur place ou préfabriqué.
- ✓ Béton précontraint.
- ✓ Décoffrage rapide, mise en service rapide (de préférence classe R).
- ✓ Bétonnage jusqu'à température extérieure entre 5 et 10 °C.
- ✓ Béton étuvé ou auto-étuvé.

#### CEM II/ A ou B :

Ces ciments sont les plus couramment utilisés.

- ✓ Béton en élévation, armé ou non, d'ouvrages courants.
- ✓ Fondations ou travaux souterrains en milieux non agressifs.
- ✓ Dallages, sols industriels.
- ✓ Maçonneries.
- ✓ Stabilisation des sols.

#### CEM III/ A. B ou C – CEM V / A ou B:

Travaux souterrains en milieux agressifs:(terrains gypseux, eaux d'égouts, eaux industrielles, etc.).

- ✓ Ouvrages en milieux sulfatés : les ciments produits sont tous ES, ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates, en conformité à la norme NFP 15-319.
- ✓ Travaux à la mer: les ciments pour travaux à la mer, en conformité à la norme NF P 15-317.
- ✓ Bétons de masse.
- ✓ Travaux en béton armé ou non, hydrauliques et souterrains (fondations).

- ✓ Travaux nécessitant une faible chaleur d'hydratation.
- ✓ Stabilisation des sols [29].

#### 5.2.4. Effet du ciment

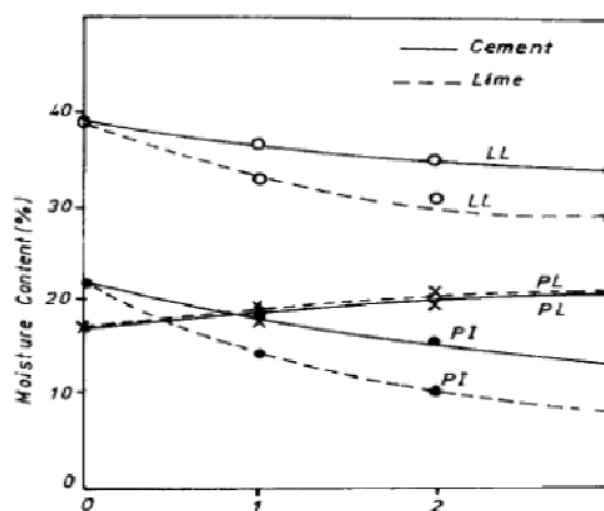
##### 5.2.4.1. Influence du ciment sur les limites d'Atterberg

Le ciment est généralement utilisé pour les sols de faible plasticité. Tous les auteurs s'accordent que l'addition du ciment cause une réduction dans l'indice de plasticité. Ces résultats ont été confirmés par de nombreux chercheurs. L'efficacité du ciment portland sur l'amélioration des rejets de charbon sur les limites d'Atterberg sont montrés dans le tableau 4.

**Tableau4** : Effet du ciment sur les limites d'ATTERBERG (Okagbue et Ochulor, 2007) [4].

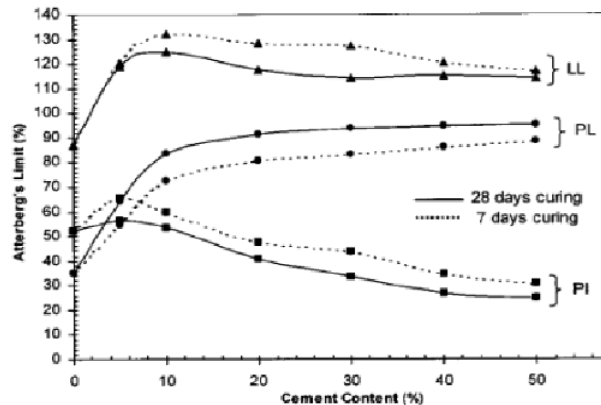
Ciment%	Limite de liquidité	Limite de plasticité	Indice de plasticité
0	32	21	12
2	37	22	15
6	38	25	13
10	39	29	10

De plus, Osula (1991) a montré que l'addition du ciment a engendré une diminution de l'indice de plasticité



**Figure26** : Effet du ciment sur les limites d'Atterberg (Osula1991) [4].

Ont a montré que la limite de plasticité augmente avec le dosage du liant et avec la durée de cure :



**Figure27** : Influence du dosage en ciment sur les limites d'Atterberg (Chew et al. 2004) [4].

Le comportement inverse est observe pour l'indice de plasticité ou on observe une diminution remarquable.

#### 5.2.4.2. Influence du ciment sur les caractéristiques du compactage

Plusieurs chercheurs [Rahman 1986, Bell 1994, Osula 1996, Gay and Schad 2000, Basha et al. 2003, Sivapullaiah et al. 2003, Basha et al. 2005, Hossain et al. 2006, Hossain et al. 2007, Mu'Azuz 2007, Eren and Filiz 2009, Sariosseiri and Muhunthan 2009] se sont penchés sur l'étude de l'effet de l'addition du ciment comme stabilisant aux sols à traiter sur les caractéristiques de compactage de ces sols améliorés. Le même comportement est constaté pour les sols traités à la chaux. Autrement dit, la réduction de la densité sèche maximale est due à la floculation et l'agglomération des particules d'argile tandis que l'augmentation de la teneur en eau optimale est due à l'eau nécessaire pour l'hydratation et pour la réaction pouzzolanique à prendre effet. Miller and Azad (2000) a observé le même comportement. Les auteurs ont constaté une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche maximale pour différentes teneurs du stabilisant.

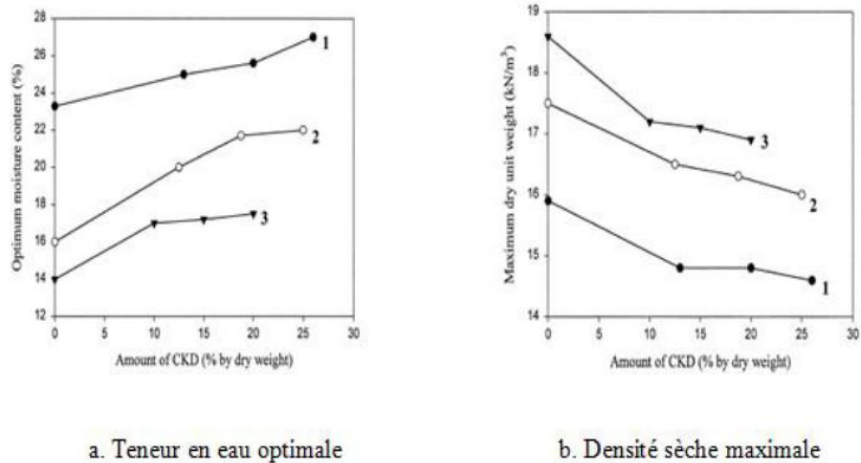


Figure 28 : Evolution des caractéristiques de compactage (Miller and Azad 2000).

Influence du ciment sur la résistance au cisaillement : Gay et Schad (2000) ont montré que les caractéristiques de cisaillement d'un sol instable traité avec différentes teneurs en ciment ont été améliorées d'une façon remarquable et ceci pour différentes périodes de cure.

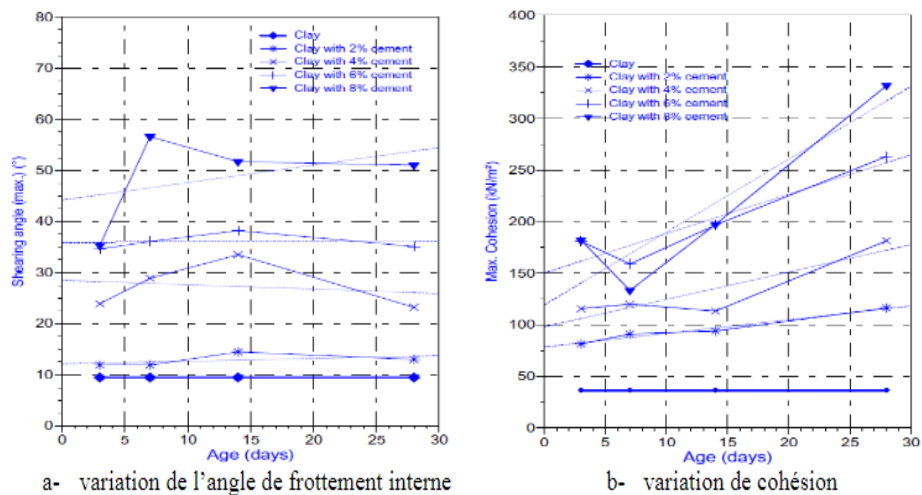
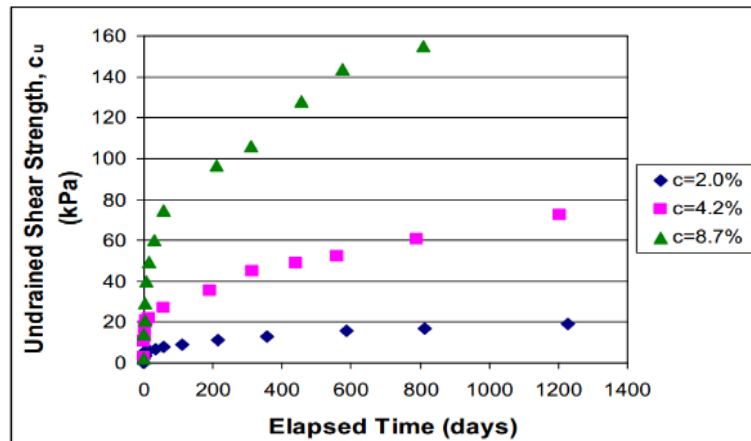


Figure 29 : Effet du ciment sur les caractéristiques de cisaillement (Gay et Schad, 2000) [4].

Ainsi pour une teneur en ciment de 8% et une période de cure de 28 jours, l'angle de frottement interne est environ 5 fois celui du sol instable non traité. Ceci traduit bien la stabilité requise après l'amélioration par le ciment du sol instable. Le même comportement est observé pour la cohésion qui représente 7.5 fois celle du sol non traité.

La figure (7) montre qu'il ya une augmentation notable de la cohésion non drainée pour différents dosage en ciment et différentes période de cure (Saeed Sasanian.2010) [4].



**Figure30** : variation de la cohésion non drainée eu fonction de la période de cure (Saeed Sasanian.2010) [4].

### 5.2.5. Mécanisme de stabilisation par l'ajout de ciment

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

#### ✓ hydratation par ciment

Les fortes interactions se développent entre les particules de sol. Le plus haut squelette continu des formes matérielles dure et fortes et enferme une matricide sol inchangé, renforçant le matériel traité et en remplir des vides.

#### ✓ Echange cationique

L'échange cationique change la charge électrique, réduit la plasticité et a pour résultat la floculation et l'agrégation des particules de sol.

#### ✓ Carbonatation

La chaux libre produite pendant l'hydratation du ciment réagit avec de l'anhydride carbonique en air aux agents de cimentages de forme.

**✓ Réaction pouzzolanique**

La chaux libre libérée pendant l'hydratation réagit avec la silice ou l'alumine des particules d'argiles en présence de l'humidité pour former les agents de cimentation [29].

**5.2.6. Méthode de stabilisation au ciment**

Il existe deux méthodes d'exécution des stabilisations des sols au ciment :

**a. Mixe in place**

On répand le ciment et l'eau sur le sol auquel on les mélange au moyen de machines mobiles. Puis on compacte la couche traitée. Cette méthode s'applique pour la stabilisation du terrain naturel en place et souvent également pour celle d'une couche de matériaux d'apport.

**b. Mixe in plant**

Le mélange s'exécute dans un malaxeur à béton, fixe ou mobile. Ce procédé n'est intéressant que si les matériaux à stabiliser proviennent d'un emprunt et doivent être transportés. Le mélange est répandu mécaniquement sur les chantiers importants ou à bras s'il s'agit de petites surfaces; il est ensuite soigneusement compacté [5].



**Figure31** : Construction d'un chemin avec matériaux stabilisé selon le procédé mix in plant.



**Figure32** : Appareil d'incorporation du ciment.

## 6. Traitement mixte

Dans le cas où le sol est humide (on préconise la chaux) et peu argileux (on préconise le ciment), on utilise d'abord la chaux à faible dose (0,5 à 2 %) et ensuite le ciment, ces liants ayant une action complémentaire. Le traitement préalable à la chaux par son action immédiate amène le sol à un état optimal pour le traitement au ciment [20].

## 7. Conclusion

De nombreux chercheurs ont étudié la stabilité de l'argile.

De nombreuses méthodes et dispositifs ont été développés pour déterminer l'efficacité de la solution ou du produit pour stabiliser l'argile.

Afin d'utiliser l'une ou l'autre méthode de stabilisation, il est nécessaire de considérer des techniques pratiques et les moins coûteuses pour la mise en œuvre sur le terrain et levé pour assurer la continuité entre les recherches menées au laboratoire et leur réalisation sur le terrain.

*Chapitre V :*  
*Etude expérimentale*  
*(Résultats et Interprétation)*



## 1. Introduction

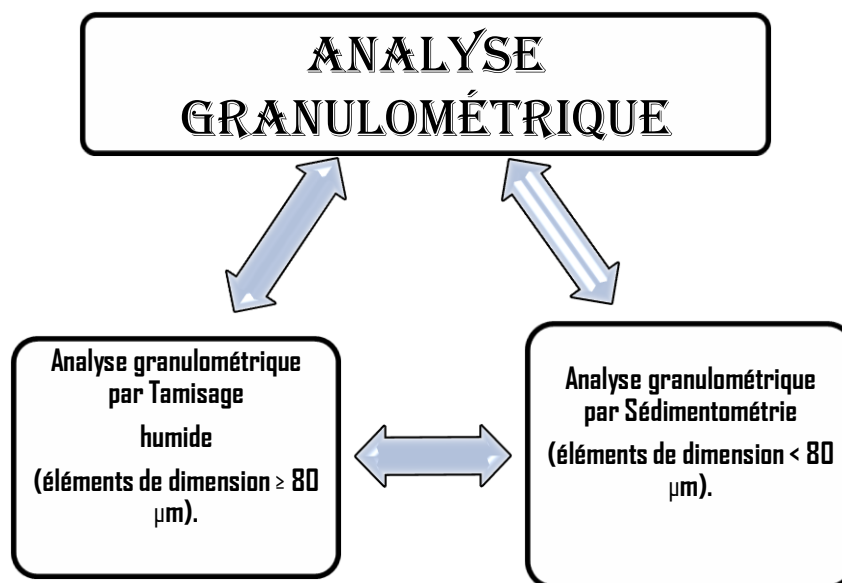
Quel que soit l'objectif d'une étude géotechnique, le sol d'intérêt commence généralement par l'identification. Cette procédure peut guider l'analyse géotechnique ultérieure et surtout la classification du matériau rencontré. Ce chapitre est un ensemble d'essais géotechniques réalisés en laboratoire pour identifier le sol à l'étude. Des recherches expérimentales ont été menées au laboratoire de génie civil de l'université de Tébessa. Le programme est divisé en deux parties, dont :

## 2. Le sol non traité

### 2.1. Les essais physiques

#### 2.1.1. Analyse granulométrique

**Granulométrie :** (selon la norme NF P 94-057/1992) L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution relative des diamètres des grains dans un sol. Elle comprend deux opérations:



#### 2.1.1.1. Analyse granulométrique par Tamisage humide

##### 2.1.1.1.1. Définitions de l'essai

- ✓ **Tamis :** Un tamis est une grille de maillage plus ou moins fin, servant à trier les particules solides, fixée sur un cadre, avec différent diamètre.

- ✓ **Refus sur un tamis** : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.
- ✓ **Tamisât (ou passant)** : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.
- ✓ **Refus cumulé** : c'est la somme de tous les refus, celui du tamis lui-même, plus tous les refus des tamis de maille plus grande. Il peut être exprimé en gramme ou en % de refus cumulés.

#### 2.1.1.1.2. But de l'essai

L'essai d'analyse granulométrique permet essentiellement de déterminer et répartir la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains d'un échantillon.

Le but de l'essai se matérialise par :

- ✓ Le dimensionnement des particules qui varie entre 10-6mm 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 sol étudié.

#### 2.1.1.1.3. Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série des tamis, emboîtées les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieur des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

#### 2.1.1.1.4. Appareillage

- ✓ Tamis.
- ✓ Balance.
- ✓ Une étuve ventilée à température réglable à 105°.
- ✓ un bac.



**Figure33** : Une étuve.



**Figure34** : Série de Tamis.

#### 2.1.1.1.5. Mode opératoire de l'essai

- ✓ Peser un échantillon de sol sec d'environ 2Kg.
- ✓ On place le bac de sol à l'étuve à 105°C pendant 24h.
- ✓ Prélever 2 kg de matériau (la pris d'essai).
- ✓ Imbiber cette quantité dans l'eau pendant 24h.
- ✓ Placé la quantité dans la sérié des tamis et on secoue à la main.
- ✓ Le passant utilisé pour la sédimentation et le refus utilisé pour analyse granulométrique.
- ✓ On enlève chaque tamis, puis les à mettre dans l'étuve à 24h puis mesure les tamis.



**Figure35** : les étapes de l'essai Analyse granulométrique par Tamisage humide.

### 2.1.1.1.6. Calcul et résultats

**Tableau 5:** Granulométrie du sol par tamisage humide.

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
1.6	189.3	189.3	9.46	90.54
1.25	23.6	212.9	10.165	89.84
0.80	36.1	249	12.45	87.55
0.56	26.5	275.5	13.775	86.23
0.28	39.9	315.4	15.77	84.23
0.20	15.8	331.2	16.56	83.44
0.14	13.55	344.75	17.2375	82.77
0.071	25.2	369.65	18.4975	81.51
Fond	1582	1957.95	97.89	2.11

### 2.1.1.2. Analyse granulométrique par sédimentométrie

#### 2.1.1.2.1. But de l'essai

C'est un essai géotechnique qui complète l'analyse granulométrique par tamisage d'un sol et qui peut être nécessaire à sa description.

Il s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure à 0.08mm.

#### 2.1.1.2.1. Principe de l'essai

- ✓ Basé sur la loi de Stokes qui mesure la vitesse ( $v$ ) de décantation des particules sphériques.
- ✓ Fonction de la viscosité du milieu défloculent pour décoller les feuillets d'argile, Solution d'hexamétaphosphate de sodium à 5%.
- ✓ Mesure de la masse volumique du liquide, avec un Densimètre, à 0.5, 2, 5, 10, 20, 40, 80, 240, 1440 minutes.

#### 2.1.1.2.2. Appareillage

- ✓ Deux éprouvettes de 2 litre.
- ✓ Un densimètre.
- ✓ Un agitateur mécanique.
- ✓ Un thermomètre; chronomètre.

- ✓ Un agent défloculent" hexamétaphosphate de sodium  $\text{NaPO}_3$ ".
- ✓ Agitateur manuel.



**Figure36** : Matériels utilisés d'essai sédimentométrie.

### 2.1.1.2.3. Mode opératoire de l'essai

La procédure consiste à prendre  $30 \text{ cm}^3$  de défloculent dilué dans de l'eau distillé pour obtenir  $200 \text{ cm}^3$  de suspension. Une moitié de cette solution sera versée dans une éprouvette de 1 litre et complétée avec de l'eau distillée jusqu'à  $1000 \text{ cm}^3$ ; éprouvette témoin B. L'autre moitié de la solution sera versée dans un bécher à laquelle on ajoute 20 gr de sol sec récupéré du tamisât à  $80 \mu\text{m}$  fond du tamis". L'ensemble sera soumis à l'agitation mécanique pendant 3min environ. La suspension obtenue sera versée dans une éprouvette de 2 litre et complétée à  $1000 \text{ cm}^3$  avec de l'eau distillé: éprouvette A.



**Figure37** : La sédimentométrie.

## 2.1.1.2.4. Calcul et résultats

Tableau 6: Résultat d'essai sédimentométrie.

Temps (min)	Lecture R	Température (C°)	Lecture corrigée	D (mm)	D (μm)	P (%)
0.5	1021.1	26.9	1020.2	0.08	80	80.8
1	1020.9	26.9	1020.1	0.073	73	80.4
2	1020.4	26.9	1019.5	0.051	51	78
5	1019.3	26.9	1018.4	0.032	32	73.6
10	1018.2	26.9	1017.3	0.021	21	69.2
20	1017.6	26.8	1016.7	0.015	15	66.8
40	1016.6	26.3	1015.7	0.010	10	62.8
80	1011.1	25.8	1010.2	0.006	6	40.8
240	1003.4	24.1	1002.5	0.002	2	10
1440	1000.3	24.3	999.4	0.001	1	1.6

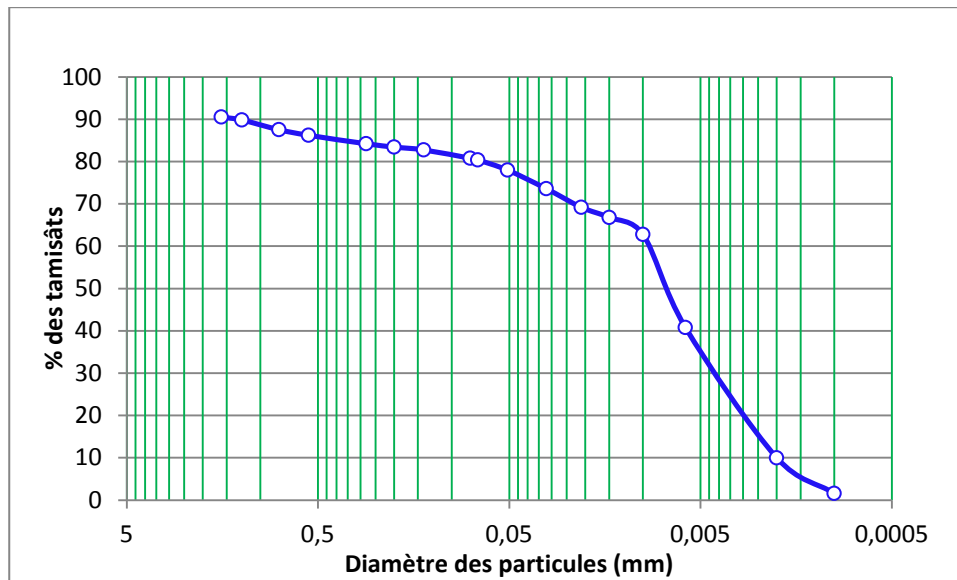


Figure38 : Courbe granulométrique.

### 2.1.2. Les limites d'Atterberg

#### 2.1.2.1. But de l'essai

L'essai laboratoire limites d'Atterberg permet de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action de la teneur en eau, il se fait uniquement sur les éléments fins du sol (caractériser les sols fins).

#### 2.1.2.2. Principe de l'essai

- ✓ Détermination de la limite de liquidité  $W_L$

On recherche la valeur de la teneur en eau pour laquelle une rainure de dimension normalisée, pratiquée dans le sol disposé dans la coupelle de Casagrande, se ferme sous l'action de 25 chocs appliqués.

- ✓ Détermination de la limite de plasticité  $W_p$

Il s'agit de rechercher la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol de diamètre 3mm, confectionné manuellement, se fissure lorsqu'on le soulève.

#### 2.1.2.3. Appareillage

- ❖ Matériel pour la préparation du sol
  - ✓ Un récipient.
  - ✓ Un bac.
  - ✓ Un tamis à la maille carrée de 0,4mm d'ouverture.
- ❖ Matériel pour la détermination la limite de liquidité  $W_L$  :
  - ✓ Un appareil de Casagrande.
  - ✓ Une balance.
  - ✓ Une étuve.
  - ✓ Des capsules ou boites de pétri.
  - ✓ Spatule.
  - ✓ truelles.

- ❖ Matériel pour la détermination la limite de plasticité  $W_p$  :
  - ✓ Une plaque lisse en marbre pour le malaxage et la confection des rouleaux de sol.
  - ✓ Des capsules ou boites de pétri.
  - ✓ des spatules.
  - ✓ Une balance.



Figure39 : Appareil de Casagrande.

#### 2.1.2.4. Mode opératoire de l'essai

- **Préparation d'échantillon**

- ✓ Imbiber une masse de sol dans un récipient d'eau.
- ✓ Tamiser par voie humide au tamis 400 $\mu$ m.
- ✓ Recueillir l'eau de lavage et le tamisât dans un bac.
- ✓ Siphonner l'eau claire du bac sans entraîner de particules solides après une décantation d'au moins 24 heures.
- ✓ Evaporer l'eau excédentaire à une température ne dépasse pas 105°C.
- ✓ Malaxer la totalité du tamisât afin d'obtenir une pâte homogène.



Figure40 : Préparation d'échantillon.



- **Limite de liquidité**

- ✓ Prendre une partie de la pate et l'étaler dans la coupelle de l'appareil de Casagrande à l'aide de la spatule.
- ✓ Pratiquer une rainure dans cette pate de telle sorte à la diviser en deux. L'outil à rainurer devra être tenu perpendiculairement a la coupelle en présentant sa partie biseauté face a la direction du mouvement.
- ✓ soumettre la coupelle et le matériau qu'elle contient a des chocs répétés avec une cadence de 2 coups par seconde.
- ✓ Arrêter les chocs quand les deux lèvres se rejoignent sur environ 1cm, noter le nombre de coups N correspondant.
- ✓ Prélever des deux cotés des lèvres a l'endroit ou elles se sont refermées environ 5 gr de sol. afin d'en déterminer la teneur en eau.
- ✓ Rehomogénéiser le sol et le sécher un peu puis reprendre les opérations de 3 a 7. IL faut au moins trois essais avec un nombre de coups croissant et de préférence bien étalé entre 15 et 35.



**Figure41** : Essai pour la détermination de la limite de liquidité.

- **Limite de plasticité**

On mélange l'échantillon avec des quantités variables d'eau, on façonne avec la pâte un rouleau de  $3 \text{ mm} \pm 5$  de diamètre pour une centaine de 10 mm de longueur. La limite de plasticité est la teneur en eau en % du rouleau qui se fissure et se brise lorsqu'il atteint un diamètre de 3 mm.



Figure42 : Essai pour la détermination de la limite de plasticité.

### 2.1.2.5. Calcul et résultats

#### ✓ Limite de liquidité

Tableau 7: Résultats de l'essai limite d'Atterberg (limite de liquidité).

	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3
<b>Nombre de coups</b>	18	29	33
<b>Poids de la tare <math>M_0</math></b>	34.01	33.71	33.74
<b>Poids de la tare + la masse humide <math>M_1</math></b>	58.36	68.72	64.15
<b>Poids de la tare + la masse sec <math>M_2</math></b>	50.22	57.47	54.50
<b>Poids humide <math>M_h = M_1 - M_0</math></b>	24.35	35.01	30.41
<b>Poids sec <math>M_s = M_2 - M_1</math></b>	16.21	23.76	20.76
<b>Poids de l'eau <math>M_w = M_1 - M_2</math></b>	8.14	11.25	9.65
<b>Teneur en eau <math>W = (M_w / M_s) \times 100</math></b>	50.21	47.34	46.48

$$W_L (\%) = W (N/25)^{0.121}$$

$$W_{L1} (\%) = 48.5; W_{L2} (\%) = 48.06 . W_{L3} (\%) = 48.19.$$

$$W_L (\%) = \frac{wl1 + wl2 + wl3}{3} = 48.25.$$

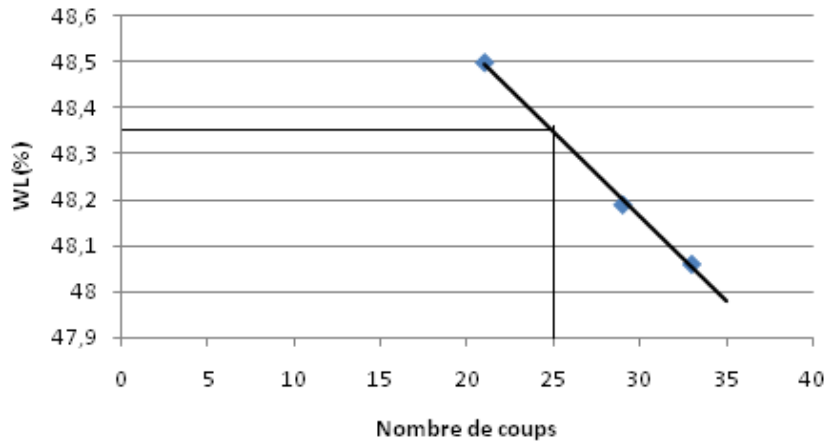


Figure43 : Courbe limite de liquidité pour le sol naturel.

$W_L$  (Optimale a 25 coups)=48.36.

✓ **Limite de plasticité**

Tableau 8: Résultats de l'essai limite d'Atterberg (limite de plasticité).

	Échantillon 1	Échantillon 2
<b>Poids de la tare <math>M_0</math></b>	33.89	33.43
<b>Poids de la tare + la masse humide <math>M_1</math></b>	35.27	34.44
<b>Poids de la tare + la masse sec <math>M_2</math></b>	34.96	34.21
<b>Poids humide <math>M_h = M_1 - M_0</math></b>	1.38	1.01
<b>Poids sec <math>M_s = M_2 - M_1</math></b>	1.07	0.78
<b>Poids de l'eau <math>M_w = M_1 - M_2</math></b>	0.31	0.23
<b>Teneur en eau <math>W = (M_w / M_s) \times 100</math></b>	28.97	29.48

$$W_P (\%) = \frac{w_1 - w_2}{2}$$

$$W_P (\%) = 29.22.$$

✓ **Détermination de l'indice de plasticité ( $I_P$ )**

$$I_P (\%) = W_L - W_P$$

$$I_P (\%) = 48.28 - 29.22 = 19.03.$$

Suivant la valeur de l'indice de plasticité, les sols peuvent se classer comme suit :

**Tableau 9:** Degré de plasticité des sols.

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

A partir des résultats obtenus, on a  $15 < I_p = 19.03 < 40$ , donc on classe le sol suivant son degré de plasticité comme **une argile plastique**.

✓ **Détermination de l'indice de consistance ( $I_c$ )**

$$I_c (\%) = \frac{W_L - W}{I_p}$$

$$I_c (\%) = \frac{48.25 - 48.01}{19.03} = 0.012.$$

**Tableau 10:** Classification de l'indice de consistance.

Indice de consistance	Consistance
$I_c > 0$	Liquide
$0 < I_c < 0.25$	Pâteuse ou très molle
$0.25 < I_c < 0.5$	Molle
$0.5 < I_c < 0.75$	Ferme
$0.75 < I_c < 1$	Très ferme
$I_c > 1$	Dure

$I_c = 0.012 > 0$ , donc on classe le sol comme **une argile très molle**.

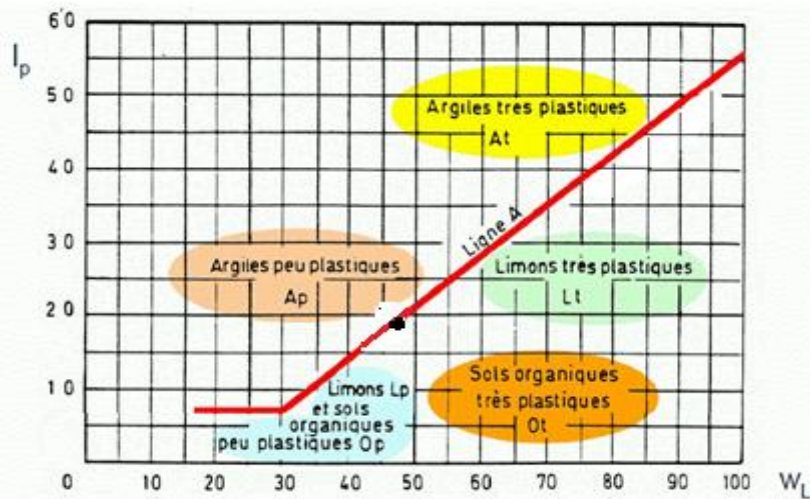


Figure44 : classification de l'échantillon selon l'abaque de Casagrande.

### 2.1.3. Bleu de méthylène

#### 2.1.3.1. But de l'essai

Mesurer la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour saturer un sol. Cette dernière est directement liée à la surface spécifique qui est elle-même reliée à l'activité du sol.

#### 2.1.3.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à prélever du granulat un échantillon de la fraction granulométrique 0/2mm et d'injecter successivement des doses élémentaires d'une solution de bleu de méthylène dans un bain aqueux contenant l'échantillon. La capacité d'absorption correspond à la quantité totale de bleu introduite lorsqu'on est en présence d'un début d'excès.

#### 2.1.3.3. Appareillage

- ✓ Agitateur à ailettes de diamètre 70 à 80mm et de vitesse de rotation 400 à 500 tours par minute au minimum.
- ✓ Papier filtre.
- ✓ Une balance.
- ✓ Un chronomètre.

- ✓ Capable de vitesses de rotation contrôlées variables pouvant atteindre 600 tr/min avec 3 ou 4 ailettes de 75 mm de diamètre.
- ✓ Une tige de verre.
- ✓ L'eau distillée.
- ✓ Bleu de méthylène.



Figure45 : Matériels utilisés d'essai Bleu de méthylène.

#### 2.1.3.4. Mode opératoire de l'essai

- **Préparation le bleu**

Une solution de bleu de méthylène de qualité pharmaceutique à 10 g/litre de l'eau déminéralisée ou distillée.

- **Les étapes d'essai**

- ✓ Prendre 80 grammes de sol sec passé au tamis 5mm.
- ✓ Mettre la prise d'essai à tremper dans un bécher avec 100 cm d'eau.
- ✓ A l'aide de l'agitateur (700 tr/min), dispersée la suspension pendant 5 min.
- ✓ A l'aide du dispositif de dosage, introduire 5 cm<sup>3</sup> de bleu et agiter (400 tr/min) pendant 1 min.
- ✓ A l'aide d'une baguette, déposer une goutte de la suspension sur du papier filtre (l'essai de la tâche).

Si le test est négatif (tâche sans auréole), ajouter 5 cm<sup>3</sup> de bleu et refaire l'essai de la tâche après une minute. Cette opération sera répétée autant de fois qu'il sera nécessaire jusqu'à ce que le test de la tâche soit positif (tâche avec auréole).

Si le test est positif (tâche avec auréole), procéder à 5 essais successifs (un test par minute) sans ajouter de bleu. Si les 5 essais sont positifs, l'essai est terminé.



Figure46 : Essai de la tâche sur papier filtre.

#### 2.1.3.5. Calcul et résultats

$$V_{bs} = \frac{B}{m_0} \times 100$$

B : Volume de bleu de méthylène utilisé (cm<sup>3</sup>) × 0.01.

m<sub>0</sub> : Masse de sol (g).

$$VBS = \frac{(240 \times 0.01)}{30} \times 100$$

$$VBS = 8$$

La valeur de bleu de notre argile est : VBS= 8

Les catégories des sols selon la valeur de bleu de méthylène d'après le guide de Terrassements Routiers (GTR, 1992), sont présentées dans le tableau 11.

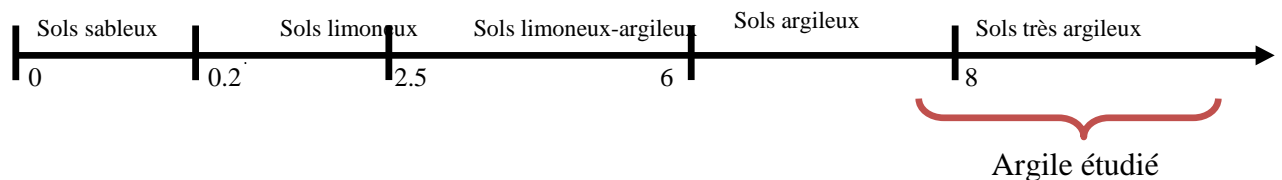
Tableau 11: Classification de sol par valeur de bleu de méthylène.

Valeur de VBS	Valeur de bleu de méthylène
VBS < 0.1	Sol insensible à l'eau
0.2 ≤ VBS < 1.5	Sol sablo limoneux, sensible à l'eau
1.5 ≤ VBS < 2.5	Sol argileux, peu plastiques
2.5 ≤ VBS < 6	Sol limoneux de plasticité moyenne
6 ≤ VBS < 8	Sol argileux
VBS > 8	Sol très argileux

D'après le tableau, on confirme que notre sol est un sol très argileux.

### Classification du sol :

Selon aussi « le Guide Technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme », [GTR.2000], en fonction de la valeur de bleu de méthylène qui est égale à 8, le sol étudié est placé dans le groupe des sols.



**Figure47 :** Classification de l'argile étudiée en fonction de la valeur au bleu de méthylène (VBS) selon GTR.2000.

## 2.2. Les essais mécanique

### 2.2.1. Proctor normale

#### 2.2.1.1. But de l'essai

L'essai Proctor a pour but de déterminer, pour un compactage d'intensité donnée, la teneur en eau à laquelle doit être compacté un sol pour obtenir la densité sèche maximum. La teneur en eau ainsi déterminée est appelée « Teneur en eau optimum Proctor ».

#### 2.2.1.2. Principe de l'essai

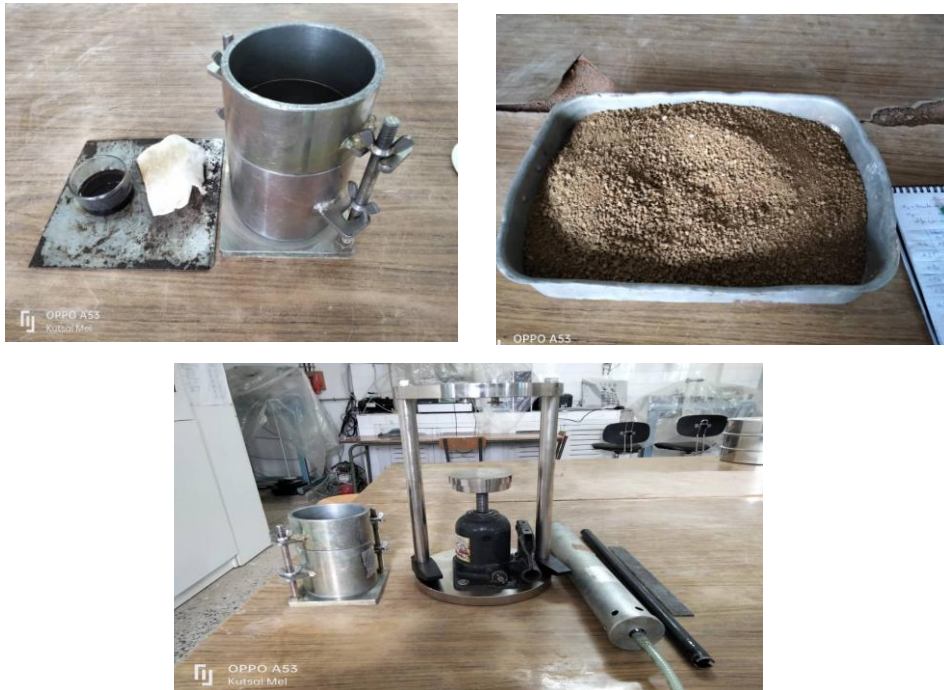
L'essai Proctor consiste à compacter dans un moule standard, à l'aide d'une dame standard et selon un processus bien déterminé, un échantillon du sol à étudier et à déterminer le teneur en eau du sol et sa densité sèche après le compactage.

L'essai Proctor est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes ( 7% ,8%,10% ,11%)On détermine ainsi plusieurs points de la courbe représentative des densités sèches en fonction des teneurs en eau. On trace alors la courbe en interpolant entre les points expérimentaux. Elle représente un maximum dont l'abscisse est « la teneur en eau optimum Proctor », et l'ordonnée « la densité sèche maximum Proctor ».



### 2.2.1.3. Appareillage

- ✓ Le moule Proctor constitué par un tube cylindrique métallique inoxydable de 10,15 cm de diamètre intérieur et 11,7 cm de hauteur, pourvu d'un fond et d'une hausse métallique amovibles.
- ✓ La dame Proctor normal.
- ✓ Une étuve.
- ✓ Une règle à araser.
- ✓ un bac.
- ✓ Une balance.
- ✓ Papier filtre.



**Figure48** : Les outils utilisés d'essai Proctor.

### 2.2.1.4. Mode opératoire de l'essai

- ✓ On prend 2kg de sable préalablement préparé qu'on verse dans un bac.
- ✓ On ajoute une certaine quantité d'eau (7 %,8%, 10%, 11 %).
- ✓ On malaxe bien le sol.
- ✓ solidariser : moule, embase et rehausse puis Lubrifier parois du moule.
- ✓ On remplit le moule Proctor normalisé en trois couches puis après avoir versé chaque couche on compacte l'aide de la dame Proctor normal en 25 coups en respectant la hauteur de chute et en assurant une répartition

équitable des coups sur la surface à compacter. On procède de la même manière après la mise en place de la 2eme et 3eme couche.

- ✓ Une fois le moule rempli, on arase le sable avec une règle à araser, on comble les vides laissés à la surface.
- ✓ Peser l'ensemble du moule avec le matériau.
- ✓ On prélève ensuite un échantillon d'environ 100 g à la surface du moule puis on les fait passer à l'étuve au moins pendant 24h, aux termes des quelles on va repeser les échantillons.



Figure49 :Les étapes d'essai Proctor.

### 2.2.1.5. Calcul et résultats

Tableau 12: Les résultats de l'essai Proctor normal

Pourcentage d'eau (%)	7	8	10	11
Poids d'eau (g)	140	160	200	220
Poids total (sol + moule) (g)	4645	4864	4934	4543
Poids de moule (g)	3297	3297	3297	3297
Poids de sol (g)	1348	1567	1637	1246
Poids volumique humide $\gamma_h$ ( $g/cm^3$ )	1.43	1.66	1.74	1.32
Poids volumique sec $\gamma_d$ ( $g/cm^3$ )	1.33	1.54	1.58	1.19

Hauteur de moule H= 11.7 cm

Diamètre de moule Proctor : 10.13cm

$$\text{Avec : } V = \left( \frac{\pi \times D^2}{4} \right) \times H \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$\text{Donc : } V = \left( \frac{\pi \times 10.13^2}{4} \right) \times 11,7$$

$$V = 942.48 \text{ cm}^3$$

$$\circ \gamma_h = \frac{m}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$$\circ \gamma_d = \frac{\gamma_h}{1+w} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

**Tableau 13** : Les résultats de l'essai Proctor normal.

Echantillons	1	2	3	4
Poids total (humide + tare) (g)	76.03	61.34	84.91	91.15
Poids total (sec + tare) (g)	72.59	58.79	79.51	84.94
Poids de tare (g)	33.31	33.75	33.78	33.95
Poids de sol sec (g)	39.28	25.04	45.73	50.99
Poids de sol humide (g)	42.72	27.59	51.13	57.20
Poids d'eau (g)	3.44	2.55	5.4	6.21
Teneur en eau (%)	8.75	10.18	11.80	12.17

**Tableau 14**: Les paramètres de l'optimum Proctor.

$\gamma_{h \text{ opt}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$\gamma_{d \text{ opt}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$W_{\text{opt}} \text{ (%)}$
<b>1.74</b>	<b>1.58</b>	<b>10</b>

✚ Les résultats obtenus donne ne teneur en eau optimale de **10 %** et ne masse volumique sèche **1.58 (g/cm<sup>3</sup>)**.

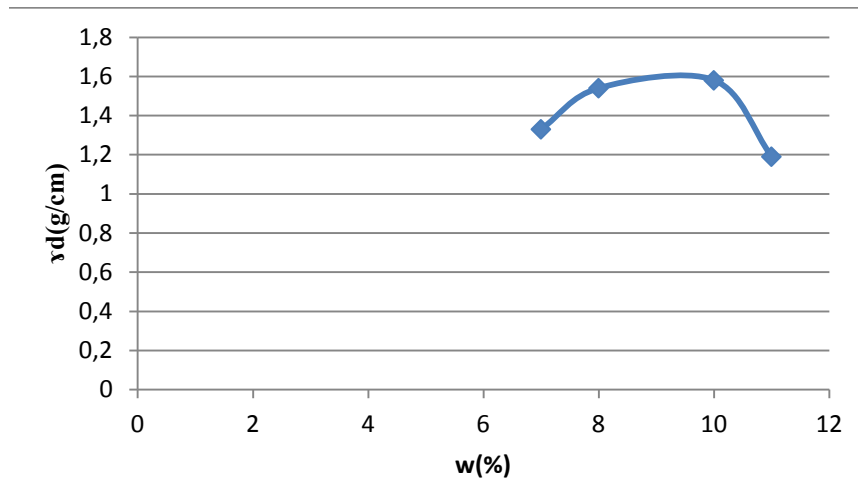


Figure 50 : Courbe Proctor normal.

## 2.2.2. Cisaillement

### 2.2.2.1. But de l'essai

Détermination des paramètres de résistance au cisaillement des sols et principalement la cohésion et l'angle de frottement dans le cas d'essai.

### 2.2.2.2. Principe

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de 2 demi-boîtes indépendantes. L'essai est réalisé sur 3 éprouvettes en augmentant à chaque fois la contrainte normale appliquée.

### 2.2.2.3. Appareillage

- ✓ Le bâti.
- ✓ La boîte de cisaillement.
- ✓ Le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette.
- ✓ Le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre Ses deux demi-boîtes.
- ✓ Le système de mesure des efforts, des déplacements et du temps.
- ✓ Demi-boîtes inférieure et supérieure.
- ✓ Fond et couvercle.
- ✓ Pierres poreuses.
- ✓ Plaques striées (drainantes ou non).

- ✓ Vis de montage des demi-boîtes.

La vitesse de déplacement de la demi-boîte inférieure est assurée par une boîte devitesses. La vitesse choisie pour l'essai est de 0.5mm/min.



**Figure51** : La machine de cisaillement.

#### 2.2.2.4. Mode opératoire

- ✓ Les vis de fixation de l'anneau dynamométrique doivent être desserrées.
- ✓ Assembler les 2 demi-boîtes puis placer le fond, une pierre drainante et, une plaque striée.
- ✓ Prélever avec la trousse coupante un échantillon de sol, le peser. Cette pesée peut servir à calculer la masse volumique du sol.
- ✓ Placer l'échantillon dans la boîte.
- ✓ Tasser légèrement l'échantillon avec le pilon (cette opération sera effectuée si le sol a été prélevé en profondeur).
- ✓ Compléter le montage de la boîte avec la plaque striée supérieure, la pierre poreuse et le couvercle.
- ✓ Placer la boîte dans le bâti, la demi-boîte supérieure étant solidaire de l'anneau dynamométrique de mesure de l'effort de cisaillement  $\tau$ .
- ✓ Amener le système de mise en charge verticale au droit de la boîte vissé le doigt de mise en charge de manière à assurer le contact avec le couvercle.
- ✓ Placer une charge sur le plateau.
- ✓ abaisser le plateau pour libérer cette charge, alors commence la consolidation du sol.

- ✓ Serrer les vis de fixation de l'anneau dynamométrique de manière à combler les jeux (16kg, 36kg, 72kg).
- ✓ Retirer les vis d'assemblage de la boîte.
- ✓ Mettre en route, l'essai commence. Il faut en général relever la valeur indiquée par l'anneau dynamométrique toutes les **15 secondes**.
- ✓ L'essai peut s'arrêter automatiquement.

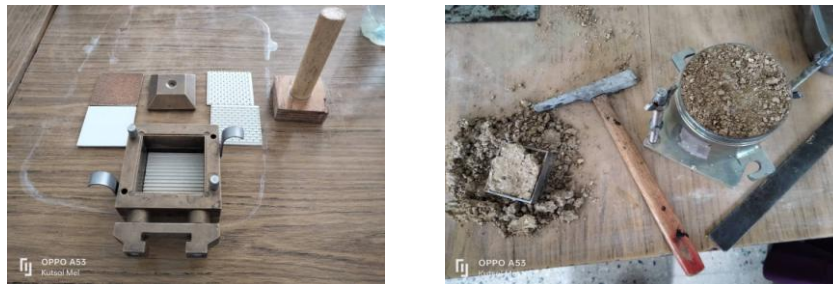


Figure 52 : Les étapes d'essai cisaillement.

#### 2.2.2.5. Calcul et résultats

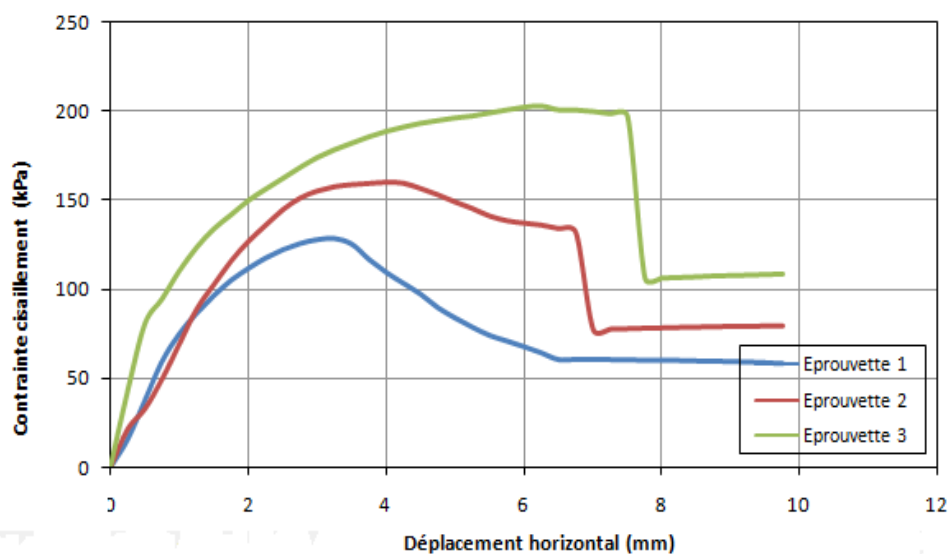
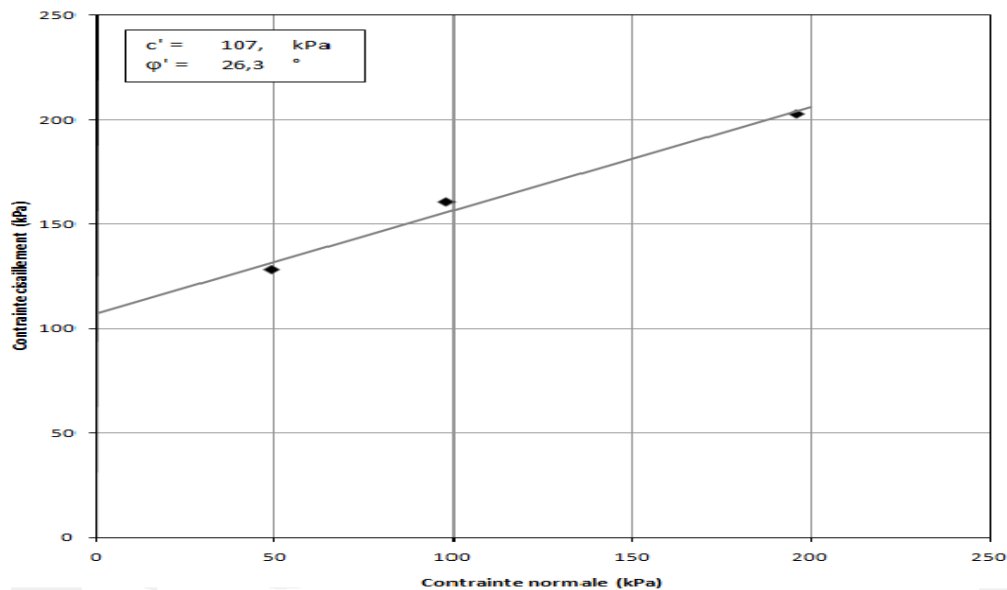


Figure 53 : variation de contrainte cisaillement en fonction de déplacement horizontal de sol vierge.



**Figure54** : résultats d'un essai de cisaillement direct dans le plan de Mohr de sol vierge.

### 2.2.3. CBR

#### 2.2.3.1. But de l'essai

Détermination de la portance du sol donné, il s'agit en fait de comparer la portance du sol que l'on est entrain de tester à la portance d'un sol standard de l'état de Californie aux Etats Unis.

#### 2.2.3.2. Appareillage

- ✓ Le moule Proctor constitué par un tube cylindrique métallique inoxydable de 10,15 cm de diamètre intérieur et 11,7 cm de hauteur, pourvu d'un fond et d'une hausse métallique amovibles.
- ✓ La dame Proctor normal.
- ✓ Une règle à araser.
- ✓ Un bac.
- ✓ Une balance.
- ✓ Papier filtre.
- ✓ Chronomètre.

- ✓ Presse CBR.

### 2.2.3.3. Mode opératoire de l'essai

- ✓ On pose l'éprouvette sur la presse en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et on procède au poinçonnement de la manière suivante :
- ✓ Approcher la face supérieure de l'éprouvette vers le piston, à l'aide des dispositifs prévus sur la presse jusqu'à ce que le piston vienne affleurer le matériau.
- ✓ Régler la mise à zéro du dispositif dynamométrique et celle du comparateur mesurant l'enfoncement du poinçon.
- ✓ Noter les efforts de poinçonnement correspondant aux enfoncements suivants : 1,25 - 2 - 2,5 - 5 - 7,5 et 10 mm.



Figure55 : Presse CBR.

### 2.2.3.4. Calcul et résultat

Les résultats de l'indice CBR à 8 % d'eau, est rapporté sur le tableau 15.

Tableau 15: Les résultats d'essai CBR 8 % d'eau.

Enfoncement (mm)	Lectures	Forces (KN)
1.25	71	1.4791
2	92	1.9166
2.5	101	2.1041
5	142	2.9583
7.5	170	3.5416
10	203	4.2291

Les résultats de l'indice CBR à 10 % d'eau, est rapporté sur le tableau 16.



**Tableau 16:** Les résultats d'essai CBR 10 % d'eau.

Enfoncement (mm)	Lectures	Forces (KN)
1.25	73	1.5208
2	91	1.8958
2.5	102	2.1249
5	122	2.5416
7.5	139.5	2.8853
10	149.5	3.0937

Le résultat de l'indice CBR à 11% d'eau, est rapporté sur le tableau 17.

**Tableau 17:** Les résultats d'essai CBR 11% d'eau.

Enfoncement (mm)	Lectures	Forces (KN)
1.25	86	1.7916
2	108.5	2.2395
2.5	116	2.4166
5	147	3.0624
7.5	163	3.3958
10	174	3.6249

Le résultat de l'indice CBR à 12% d'eau, est rapporté sur le tableau 18.

**Tableau 18:** Les résultats d'essai CBR 12% d'eau.

Enfoncement (mm)	Lectures	Forces (KN)
1.25	60	1.2499
2	86	1.7916
2.5	97	2.0208
5	139	2.8958
7.5	152	3.1666
10	172	3.5833

**Tableau 19:** les résultats de l'indice CBR.

Pourcentages d'eau %	8	10	11	12
Indice CBR	15.761	15.916	18.101	15.317

$$CBR_1 = \frac{\text{l'effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (KN)}}{13.35} \times 100$$

$$CBR_2 = \frac{\text{l'effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (KN)}}{19.93} \times 100$$

$$CBR = \text{Max} (CBR_1 ; CBR_2)$$

Tableau 20 : Classification des sols en fonction du CBR

L'indice CBR	Classification
	Portance très faible
	Portance faible
	Portance moyenne
	Portance bonne
$30 < CBR$	Portance excellente

A partir les résultats obtenus, on a  $15 < 15.317; 15.761; 15.916; 18.101 < 30$

Donc on classe le sol en fonction du CBR comme **une portance bonne**.

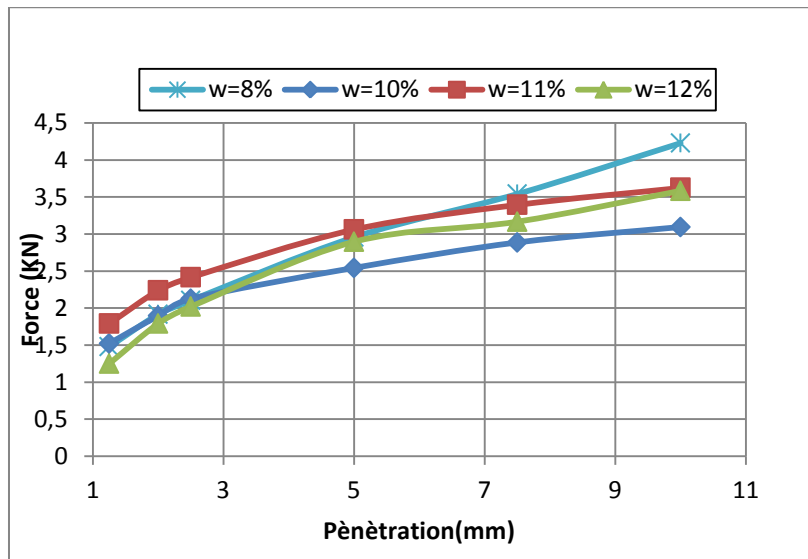


Figure56 : Courbe (effort – enfoncement) (sol non traité).

### 3. conclusion

- ✓ D'après les résultats de l'analyse granulométrique réalisée donne un pourcentage des passants à 80  $\mu\text{m}$  égale à 80 %. Cette valeur indique que le sol présente une granulométrie très fine de classe A3 selon la classification GTR.
- ✓ La valeur au bleu VBS est égale à 8, D'après la norme française (NF P 11-300), il s'agit d'un sol très argileux.
- ✓ Les résultats de l'indice de plasticité ( $I_p = 19.03\%$ ) indiquent que le sol étudié est une argile plastique.
- ✓ La valeur de l'indice C.B.R (18.101%).
- ✓ Le résultat de l'essai de cisaillement montrent
  - $\varphi' (0\%) = 26.3^\circ$
  - $c' (0\%) = 107\text{KPa}$

Les propriétés géotechniques du sol étudié ne répondent pas aux conditions d'utilisation des matériaux d'assise spécifiés dans le GTR sans traitement, et les modes de traitement préconisés dans ce référentiel sont le traitement à la chaux et au ciment.

Les sections suivantes sont réservées à la stabilisation de l'ajout de différentes doses de chaux et de ciment.

#### 4. Le sol traité

Pour le traitement du sol expansif, on a utilisé Le chaux et le ciment de différent pourcentage :

- ✓ 2 % Ciment, 2 % la chaux.
- ✓ 4 % Ciment, 4% la chaux.
- ✓ 3 % Ciment, 2 % la chaux.
- ✓ 2 % Ciment, % la chaux.

##### 4.1. CBR (traité)

Le résultat de l'indice CBR à 4 % Ciment, 4 % la chaux, est rapporté sur le tableau 21.

**Tableau 21:** Les résultats d'essai CBR (sol traité) 4 % Ciment, 4 % la chaux.

Enfoncement (mm)	Lectures	Forces (KN)
1.25	39	0.8124
2	64	1.3333
2.5	89	1.8541
5	201	4.1874
7.5	261	5.4149
10	310	6.4830

Le résultat de l'indice CBR à 2% Ciment, 3 % la chaux, est rapporté sur le tableau 22.

**Tableau 22 :** Les résultats d'essai CBR (sol traité) 2% Ciment, 3 % la chaux.

Enfoncement (mm)	Lectures	Forces (KN)
1.25	37	0.7499
2	72.5	1.5103
2.5	100	2.0833
5	181	3.7708
7.5	241.5	5.0322
10	270	5.6355

Le résultat de l'indice CBR à 3% Ciment, 2 % la chaux, est rapporté sur le tableau 23.

**Tableau 23:** Les résultats d'essai CBR (sol traité) 3% Ciment, 2 % la chaux.

Enfoncement (mm)	Lectures	Forces (KN)
1.25	80	1.6666
2	107.5	2.2291
2.5	119	2.4791
5	159.5	3.3124
7.5	209	4.3541
10	256	5.3389

Le résultat de l'indice CBR à 2% Ciment, 3 % la chaux, est rapporté sur le tableau 24.

**Tableau 24:** Les résultats d'essai CBR (sol traité) 2% Ciment, 2 % la chaux.

Enfoncement (mm)	Lectures	Forces (KN)
1.25	23	0.4791
2	58	1.2083
2.5	76	1.5833
5	155.5	3.2291
7.5	197	4.1041
10	225.5	4.6874

❖ **4 % Ciment, 4 % la chaux**

$$CBR_1 = \frac{1.8541}{13.35} \times 100 = 13.888$$

$$CBR_2 = \frac{4.1874}{19.93} \times 100 = 21.010$$

$$CBR = \text{Max} (13.888; 21.010) = 21.010$$

❖ **2 % Ciment, 3 % la chaux**

$$CBR_1 = \frac{2.0833}{13.35} \times 100 = 15.605$$

$$CBR_2 = \frac{3.7708}{19.93} \times 100 = 18.920$$

$$CBR = \text{Max} (15.605; 18.920) = 18.920.$$

❖ **3 % Ciment, 2 % la chaux**

$$CBR_1 = \frac{2.4791}{13.35} \times 100 = 18.570$$

$$CBR_2 = \frac{3.3124}{19.93} \times 100 = 16.620$$

$$CBR = \text{Max} (18.570; 16.620) = 18.570.$$

❖ **2 % Ciment, 2 % la chaux, 12 % eau.**

$$CBR_1 = \frac{1.5833}{13.35} \times 100 = 11.859$$

$$CBR_2 = \frac{3.2291}{19.93} \times 100 = 16.202$$

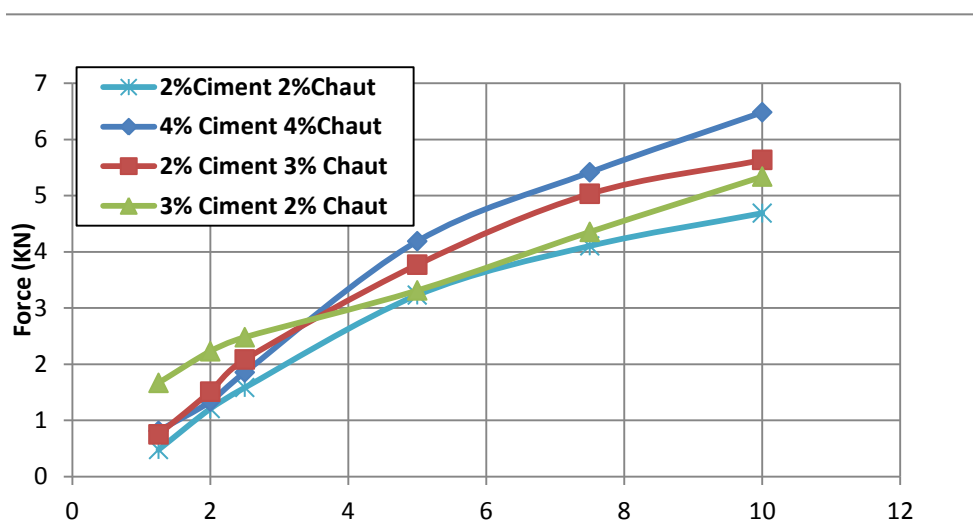
$$CBR = \text{Max} (11.859; 16.202) = 16.202.$$

**Tableau 26:** les résultats de l'indice CBR (traité).

Pourcentages (ciment, chaux)%	4 % Ciment, 4 % la chaux	2 % Ciment, 3 % la chaux	3 % Ciment, 2 % la chaux	2 % Ciment, 2 % la chaux
<b>Indice CBR</b>	21.010	18.920	18.570	16.202

A partir les résultat

obtenus,  $15 < 16.202; 18.570; 18.920; 21.010; 21.951 < 30$ , donc on classe le sol en fonction du CBR comme **une portance bonne**.



**Figure57 :** Courbe (effort – enfoncement) (sol traité).

#### 4.2. Conclusion

Le dosage de 4 % Ciment, 4 % chaux est préconisé car il améliore l'indice de plasticité, réduit considérablement le gonflement, améliore nettement CBR après immersion et la portance du sol.

# *Conclusion*

## Conclusion

Le choix de la technique de stabilisation dépend de plusieurs paramètres, tels que : Considérations économiques, nature du sol à traiter, durée d'exploitation, disponibilité des matériaux utilisés et les conditions environnementales.

La stabilisation du sol avec de la chaux ou le ciment est l'une des méthodes les plus populaires. Plus communément, la conversion des sols naturels en nouveaux matériaux avec des performances attendues.

Le travail présenté dans cet ouvrage vise à étudier les sols prélevés sur un site de la wilaya Tébessa zone de DOUKANE pour améliorer ces caractéristiques géotechniques en rajoutant de la chaux et du ciment. Ce terrain a été choisi en raison des obstacles que peut présenter la nature du sol argileux sur les bâtiments et voiries du site.

Les résultats expérimentaux sont résumés comme suit :

- ✓ D'après les résultats de l'analyse granulométrique réalisée, on a un pourcentage des passants de 80  $\mu\text{m}$  égale à 80 %. Cette valeur indique que le sol présente une granulométrie très fine de classe A3 selon la classification GTR.
- ✓ La valeur au bleu VBS est égale à 8, d'après la norme française (NF P 11-300), il s'agit d'un sol très argileux.
- ✓ Les résultats de l'indice de plasticité ( $I_p = 19.03\%$ ) indiquent que le sol étudié est une argile plastique.
- ✓ La valeur de l'indice C.B.R (18.101%)
- ✓ Le résultat de l'essai de cisaillement montrent  
 $\varphi' (0\%) = 26.3^\circ$   
 $c' (0\%) = 107\text{KPa}$

De l'ensemble des résultats obtenus on peut conclure que notre sol est une argile marneuse peu plastique.

Le traitement de cette argile a été effectué en utilisant les dosages suivants :

- ✓ 2 % Ciment, 2 % la chaux

- ✓ 4 % Ciment, 4% la chaux
- ✓ 3 % Ciment, 2 % la chaux
- ✓ 2 % Ciment, 3 % la chaux

Les résultats des tests obtenus étaient cohérents avec les études précédentes, où le traitement avec du ciment et de la chaux a entraîné une amélioration des propriétés du sol. Notez également que :

- ✓ l'ajout de chaux et du ciment augmente aussi la portance du sol et augmente l'indice CBR immersion, Cependant les meilleures performances sont obtenues pour un dosage de 4% de chaux et 4% de ciment.



*Références  
Bibliographiques*

## REFERENCES

### A

- [1]Ait Amrane .T, (2018) ,Caractérisation de la stabilisation par des plastiques recyclés des sols argileux eaux essais de cisaillement, Mémoire de master, département génie civil, option géotechnique, université de Tizi Ouzou, p 02.
- [2]Allègre, J. (2012), Les silicates d'alumine (ARGILES) en thérapeutique (Doctoral dissertation, université paris), p 16.
- [3]Ammour .R. Mehal .S, Stabilisation des sols fins: Etude expérimentale de l'argile de Mers- el-Kébir, master académique filière : Génie Civil, spécialité : Voie et Ouvrage d'Art, p 23- 24-25-26.
- [4]Amoura. F. Maameri .M.(2015), Effet de la durée de cure sur la plasticité et sur les paramètres de cisaillement d'un sol fin argileux amélioré par la chaux, université Hassiba Benbouali de Chlef ,p 32-33-34.
- [5]Articla : (1962-1963) La stabilisation au ciment dans la construction des routes modernes, p02.

### B

- [6]Boudchicha .M.R, Etude de la cristallisation et des propriétés mécaniques et diélectriques de céramiques préparés à partir de kaolin-dolomite, université El-Hadj Lakhdar –Batna, p 8-10.
- [7]Beghou .H. Hamaizia. K, Adsorption de cuivre en milieu aqueux par le kaolin DD, mémoire de magister, option : Sciences analytiques et l'environnement, p 17-18-19.
- [8]Bengaraa, H. (2004), Contribution a l'étude de la stabilisation du gonflement par ajout du sable, thèse de magister.
- [9]Benaissa.M, Étude expérimentale sur la stabilisation des sols gonflants de la région de Mostaganem et de Relizane, mémoire de

magister, spécialité : Génie civil, option : Matériaux et durabilité de la construction, p 17-18-19.

[10]Belabbaci. Z. (2014), Stabilisation des sols gonflants, faculté de technologie département génie civil thèse de doctorat LMD formation doctorale : Sols et structures, p 16 -17 -18 -19.

[11]Beztout.S. Belferoum .H(2015), Etude de l'influence d'un sable préparé sur le comportement mécanique d'un mortier à base de ciment portland, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi B.B A.

[12]Boudjadja .R. Benkedidah.A. (2018), Etude de stabilisation chimique des sols, université de Jijel p21.

## C

[13]Charles .N, Colin .S, Gutierrez. T, Lefebvre .G, (2018), Mémento kaolin et argiles kaoliniques. Rapport final. Rapport BRGM/RP-67334-FR, p 13 -14.

[14]Charradi .K. (2010), Contribution des argiles ferrifères à l'élaboration de biocapteurs ampérométriques : Etude de l'interaction de l'hémoglobine avec des argiles et des hydroxydes doubles lamellaires. université de Grenoble, page 5.

[15]Choufa .N, Epuration des eaux usées: l'élimination des micropolluants dans les eaux usées par un matériau argileux, mémoire de magister spécialité : Chimie analytique et physique, option: Environnement\_ Eau, p 12.

## D

[16]Djoudi. A Nedjahi. A, Stabilisation des sols gonflants par ajout des liants hydrauliques, mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de master, en génie civil, option : Géotechnique.

[17]Draou .N. Nebati .F, Stabilisation des sols fins, mémoire de master en génie civil, spécialité : Ingénierie des infrastructures de base et géotechnique, p 24.

[18]Diaf. O, Valorisation de la brique de terre comprimée et stabilisée par du ciment et de la chaux.

## E

[19]Etude de sol, site de Doukane de L'OPGI (Plan D'occupation des sol (P.O.S.) N°28 ville de Tébessa.

## F

[20]Fiches techniques génie hippique(2004), Traitement des sols à la chaux ou au ciment, p 02.

## G

[21]Gheddache .H(2012), Stabilisation des sols a la chaux et a chaud, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, p 39.

## H

[22]<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Argile-page-2.html>.

[23] <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/argiles.htm>.

[24]<https://agronomie.info/fr/classification-des-mineraux-argileux/>

[25]<https://www.calcinor.com/fr/nouvelles/analyse-de-produit/la-chaux-un-produit-trois-effets-dans-la-stabilisation-des-sols>.

[26]<https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication/>.

## K

[27]Krine. I, Merabet. M.(2022), Etude du comportement d'un sol argileux traité par des ajouts du ciment et du laitier de haut fourneau mémoire de master, département génie civil, option géotechnique, P 15-16.

## L

[28]Lakhdar. M, (2018), Comportement d'une argile expansive fortement sur consolidée, thèse de doctorat, département de génie civil option géotechnique, université de M'sila, p 10-11.

## M

[29]Messaoudi. M.(2018), Effet du traitement des sols limoneux par le ciment sur les caractéristiques de compactage, mémoire de master, département génie civil, option géotechnique, , université Larbi ben m'hidi Oum el Bouaghi, p 4-5-31-33.

[30]Massinissa Koussaila. S. (2017), Stabilisation des sols gonflants avec la chaux cas de la région de Mila, mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master en génie civil option : Géotechnique p 14-15.

[31]Martinet, Gilles et Souchu, Philippe. La chaux-définitions et histoire. 2009.

## T

[32]Thèse Pour Le diplôme d'état de docteur en pharmacie. L'argile, son utilisation a l'officine, p 10-31-32.

## Z

[33]Zerkane.Ch. (2022) Etude de comportement géotechnique d'une argile stabilisée par des stériles miniers, université Larbi Tébessi - Tébessa, p28-29.

# *Annexes*

Annexes

مخبر الأشغال العمومية في شرق البلاد



**EPE LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'EST**

GRUPE LCTP-SGP-TP/SINTRA  
SOCIETE PAR ACTIONS AU CAPITAL DE 908.000.000 DA  
DIRECTION REGIONALE D'ANNABA  
ANTENNE DE TEBESSA



**ETUDE DE SOL**

**PROJET:**

**100/1000 LOGEMENTS**

**PROGRAMME 2000 LPL**

**TRANCHE 2011**

**"PARTIE : BET DJOUNI MED TAHA)**

**DOUKANE TEBESSA**



Code Document  
2013.12.24.13.41.1037  
SOS CAS 01  
VISA :  
G E D

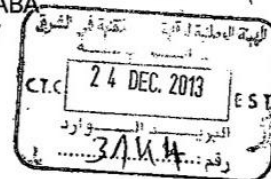
**CLIENT :**

**O.P.G.I TEBESSA**

**DOSSIER N°: 41/12/12/113**

*Jullali  
24/12/13*

DIRECTION REGIONALE DE ANNABA  
11, RUE ATTIA MOHAMED, BP 192 ANNABA  
Tel: 038 84 84 50 Fax: 038 84 89 27  
ANTENNE DE TEBESSA  
TEL/FAX : 037 48 01 43



LTP.EST DIRECTION RÉGIONALE ANNABA ANTENNE DE TEBESSA

**III-2 Interprétation des essais au laboratoire :**

Toutes les caractéristiques physiques et chimiques sont insérées dans les tableaux récapitulatifs ci-après :

SONDAGE N°		01		02	
Profondeur m		1.00-2.00	2.00-10.00	0.00-1.20	1.20-10.00
DENSITE SECHE $\gamma_d$ t/m <sup>3</sup>		/	1.68	/	1.53
TENEUR EN EAU w%		/	23.3	/	21.9
DENSITE HUMIDE $\gamma_h$ t/m <sup>3</sup>		/	2.06	/	1.86
DEGRE DE SATURATION SR %		/	104	/	77
ANALYSE GRANULOME TRIQUE	2mm	74	77	44.56	74.8
	0.080mm	63.6	58.4	38.25	55.4
Equivalent de sable	Es%			3	
LIMITES D'ATTERBERG	WL%	/	63	/	52
	IP%	/	45	/	32
Valeur au bleu de méthylène	VB	/	5.59	/	3.10
ESSAI DE CISAILLEMENT	C bars	/	2.7	/	3.09
	Ø degré	/	23°	/	17°
ESSAI OEDOMETRIQUE	Pc Kg/Cm <sup>3</sup>	/	0.875	/	1.795
	Ct	/	0.204	/	0.191
	Cg	/	0.086	/	0.070
	Pg Kg/Cm <sup>2</sup>	/	7.10	/	7.50
ANALYSES CHIMIQUES	Insolubles	/	77.96	/	65.16
	Carbonates	/	20.69	/	18.10
	Gypse	/	Traces	/	14.68
	SULFATE	/	Traces	/	81867.42
	Degré d'agressivité	/	Nulle	/	Très forte

NB : Vu le caractère remanié et feuilleté de certain échantillons, les essais mécaniques n'ont pu être réalisés.