

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

Scientifique



Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté: Technologie

Département: Génie Civil

Spécialité : Structure

Thème

***Influence de l'ajout de déchet sur le
comportement mécanique et thermique
des argiles***

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie civil

Présente par:

AOUDIA Celia.

BOULKOUANE Louisa.

Encadré par :

M^{er}. BOUZEROURA Mansour.

Devant les jurys

M^{er}. CHELOUAH Nacer

M^{er}. TAHAKOURT Abdelkader

Année universitaire: 2023_2024

Remerciement

Merci au bon dieu qui nous a donné la force et le courage et qui a illuminé notre chemin pour arriver là aujourd'hui

Nous tenons dans un premier temps à remercier tout particulièrement notre encadreur M^{er} BOUZROURA Mansour pour sa patience, sa disponibilité malgré ses responsabilités et c'est grâce à lui que ce travail de recherche scientifique a pu voir le jour, avec ses précieuses orientations qu'il ne nous jamais refusées.

Nous tenons aussi à remercier les membres de jury qui nous ont fait l'immense honneur de présider et d'examiner ce travail.

Nous remercions toute l'équipe pédagogique du département génie civil et laboratoire de recherche à l'université Abderrahmane mira de Bejaia

Nous remercions tout l'effectif du L.N.H.C unité d'Elkseur à Bejaia plus particulièrement le directeur d'unité, ainsi que les chefs de structures, ingénieurs et techniciens qui nous ont accueillis.

Nous tenons à témoigner toute notre reconnaissance à ceux qui nous ont vraiment appris au cour du stage, et même à ceux qui on eut la gentillesse de faire de ce stage un moment très profitable et riche de formation.

Dédicaces

Je l'ai fait pour le clin d'œil de ma mère et l'effort de mon père !

Je dédie ma graduation à celui que Dieu a couronné de dignité, celui qui m'a appris à donner sans attendre en retour, celui dont je porte le nom avec fierté : papa M^{er} AOUDIA Djamel, que Dieu le protège. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être.

A celle à qui Dieu a réservé le paradis sous ses pieds, qui m'a inondé d'amour et tendresse, qui m'a fait sentir heureux et en sécurité : que Dieu la préserve, Maman. ACHOURI Hayette

Affable, honorable, aimable tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement. Tu n'as jamais cessé de m'encourager et prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour ces enfants, en ne guidant sur le bon chemin dans ma vie et mes études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.

Je dédie ma réussite à mon grand-père Smail que dieu lui accorde une longue vie

Voici votre fille, mes parents ! qui progresse sur le chemin de la graduation. Merci à vous et à tous ceux qui ont éclairé l'esprit des autres par leur savoir. Je dédie ma graduation et mes moments de bonheur à tous qui croient en moi.

A ceux dont l'amour coule dans mes veines et dans mon cœur mes deux chère sœur Nesrine et Chahinez et mon petit neveu mon chou chou Amir et mes beaux frères

A tous ceux qui j'ai partagé des moments d'amitié et camaraderie chers amis sans oublier ma binôme Louiza.

CELIA

Dédicaces

Je remercie Dieu Tout-Puissant pour lui et son aide pour mener à bien cette recherche

A mon très cher père Boulkouane djoudi

Tu as toujours été à mes cotes pour me soutenir et m'encourager que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A Ma très chère mère Messoudi Zehra

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bien vaillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de joie pour affronter les différents obstacles.

À mes frères et sœurs qui ont partagé avec moi le fardeau de la vie

À mes amis, pour leur encouragement et leur compréhension tout au long de ce parcours.

À mes professeurs et mentors, pour leurs précieux conseils et leur dévouement à notre éducation.

Sans oublier ma binôme Celia

Enfin, à tous ceux qui ont cru en moi et m'ont aidé à atteindre cet objectif.

Merci du fond du cœur.

Louiza

Résumé

Malgré l'ancienneté des techniques de construction en terre, les règles régissant leur comportement sont assez mal connues. En effet, il n'existe pas de réglementations techniques spécifiques à ce matériau sol. Dans ce contexte, notre travail de recherche vise à donner un aperçu général sur le comportement de ce matériau terre (associé à un déchet industriel) à travers une série de caractérisations. Le produit obtenu, est appelé (BTC) bloc de terre comprimé, confectionner pour deux argiles de compositions chimique différente et provenance de deux régions éloignées notamment, la région de SKIKDA et de BEJAIA (REMILA).

Un déchet industriel de fabrication du ciment communément appelé poussière de four à ciment et noté en anglais (CKD) ciment kiln dust, a été incorporé dans les BTC à différents pourcentages : 0, 5, 10, 15, 20% et pour étudier l'effet de l'eau sur le comportement du matériau mélange, on fait varier l'optimum Proctor de 10 à 16% avec un pas de 2%.

Les résultats obtenus montrent que l'incorporation des CKDS dans l'argile stabilisée améliore considérablement sa résistance mécanique et ces performances thermiques.

Mots clés : BTC, argile, déchets ciment, CKD, résistance en compression, stabilisation, renforcement. Conductivité thermique.

Table des matières

Table des matières

Remerciement

Dédicaces

Résumé

Table des matières

Table des figures

Table des tableaux

Introduction générale..... 1

Chapitre I: Etude Bibliographique

1.1 Introduction 3

1.2 Historique construction en terre 4

1.3 La construction en bloc de terre comprimée dans le monde 4

1.4 Exemples de construction de terre en Algérie 5

1.5 Techniques de construction en terre 6

1.6 Les blocs de terre comprimée 8

1.6.1 Définition 8

1.6.2 Les avantages de BTC 8

1.7 Constituants 9

1.7.1 Argiles 9

1.7.1.1 Rappel sur les argiles..... 9

1.7.1.2 Définition 9

1.7.1.3 Définition géotechnique des argiles 13

1.7.1.4 Les caractéristiques mécaniques des argiles 14

1.8 Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de la terre..... 15

1.8.1 Stabilisation..... 15

1.8.1.1 Définition..... 15

1.8.1.2 Objectifs 16

1.8.1.3 Procédés	16
1.8.1.4 Stabilisation au ciment	17
1.8.1.4.1 Généralités	17
1.8.1.4.2 Mécanisme de stabilisation.....	17
1.8.1.4.3 Traitement au ciment	19
1.8.1.5 Stabilisation à la chaux.....	19
1.8.1.5.1 Généralité.....	19
1.8.1.5.2 Mécanisme de stabilisation	20
1.8.1.5.3 Traitement à la chaux	21
1.9 La poussière de four	22
1.9.1 Définition de CKD	22
1.9.2 Utilisation des CKD	22
1.9.3 Stabilisation des sols par des CKD	23
1.10 Conclusion	24

Chapitre II: Protocol expérimentale Identification, classification et caractérisation des Sols

2.1 Identification des sols	25
2.1.1 Introduction.....	25
2.1.2 Détermination de la teneur en eau des sols (NF P94-050).....	25
2.1.2.1 Limite d'atterberg : (NF P94-051)	27
2.1.2.2 Analyse granulométrique	30
2.1.2.3 Essai bleu méthylène (NF EN 933-9)	34
2.2 Classification des sols.....	37
2.2.1 Etudes des caractéristiques mécaniques des argiles.....	46
2.2.1.1 Essai Proctor : (NF P 94- 093)	46
2.2.1.2 Essai de cisaillement rectiligne à la boîte (EN P94-071-1).....	48
2.2.1.3 Essais de compressibilité à l'odomètre (NF P94-090-1).....	51
2.2.1.4 Essai triaxiale (NF P 94-074)	53
2.2.2 Confection des éprouvettes	55
2.2.3 La résistance mécanique	58
2.3 La conductivité thermique	59

Chapitre III: Résultats expérimentaux et discussion

3.1 Expression et résultats des essais.....	62
3.2 Présentation de résultat.....	62
3.2.1 Limite de plasticité WP.....	64
3.3 Essai au bleu de méthylène.....	68
3.4 Classification des argiles	69
3.4.1 Limite d'atterberg.....	69
3.4.2 La plasticité.....	70
3.4.3 La Consistance	72
3.5 Les caractéristiques de compactage.....	73
3.5.1 Argile de SIKIKDA	73
3.5.2 Argile de Relima.....	76
3.6 Interprétation des résultats.....	79
3.6.1 La variation de la masse volumique sèche du pourcentage d'ajout.....	79
3.6.2 Superposition des courbes.....	80
3.7 Les résultats de l'odomètre.....	81
Conclusion générale	95
Références bibliographiques	

Table des figures

Figure1-1 : Maison palmier à Marrakech, Maroc.....	5
Figure 1-2 : construction en bloc Comprimée.....	5
Figure1-3 : Différents produits de bloc de Terre comprimée	5
Figure 1-4 : A Dakar au Sénégal une villa Moderne en BTC.....	5
Figure 1-5 : construction en blocs de terre comprimée en Algérie (Ghardaïa, Timimoune).....	6
Figure 1-6 : schéma des différentes techniques de construction en terre établi par le groupe CRATERRE EN 1986 (Houben, 2006).	7
Figure 1 -7 : Schéma de la structure d'Argileuse « la kaolinite ».....	11
Figure 1- 8 : Structure de minérale la kaolinite, (d'après Lambe, 1953)	11
Figure 1- 9 : Structure de minérale argileuse (illite).	11
Figure 1-10 : Photographie au microscope à balayage électronique d'une illite de Fithian, Illinois. La longueur du trait de lumière est de 5 µm. (Holtz1991).....	12
Figure 1-11 : Schéma de la structure de la montmorillonite, (d'après Lambe, 1953) ..	13
Figure 1-12 : structure de minéraux argileux (Chlorite, la montmorionillite).....	13
Figure 2-1 : Etuve réglable à 50°et 105°	26
Figure 2-2 : Balance	26
Figure 2-3 : Des tares	26
Figure2-4 : Un tamis 0.4mm.....	28
Figure2-5 : Un bac.....	28
Figure 2-6 : Appareil de CASSAGRANDE.....	28
Figure 2-7 : Outil a rainuré.....	28
Figure 2-8 : Un spatule	29
Figure 2-9 : une balance	29
Figure2-10 : les étapes de l'essai des limites.....	30
Figure 2-11 : Un dispositif de lavage.....	31
Figure 2-12 : une série de tamis et Fonds de tamis.	31
Figure 2-13 : Les Etapes de l'essai granulométrique.....	32
Figure 2-14 : un densimètre gradué.	33
Figure 2-15 : Une éprouvette graduée.....	33
Figure 2-16 : dé flocculant (solution hexa méta Phosphate de sodium à 5%).....	33
Figure 2-17 : Les étapes de L'essai Sédimentométrie.....	34

Figure 2-18 : La Balance.....	35
Figure 2-19 : Agitateur.....	35
Figure 2-20 : Chronomètre.....	36
Figure2-21 : Solution de bleu méthylène	36
Figure 2 -22 : les étapes de l'essai de bleu méthylène.....	37
Figure 2-23 : classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre supérieur.	39
Figure 2-24 : Abaque de Plasticité de Casagrande. Classification LC PC des sols fins.	41
Figure2-25 : Moule Proctor.....	46
Figure2-26 : Dam Proctor.....	46
Figure 2-27 : Une étuve.....	47
Figure2-28 : Bacs et Balance.....	47
Figure 2-29 : les étapes de l'essai Proctor.....	48
Figure 2-30 : Machine De Cisaillement.....	49
Figure 2-31 : la boit de cisaillement.....	49
Figure 2-32 : Une pierre poreuse.....	49
Figure 2 – 33 : Les étapes de L'essai Cisaillement.....	51
Figure 2-34 : Moule œdométrique métallique Rigide de Section cylindrique.....	52
Figure 2-35 : Appariier d'œdomètres.....	52
Figure 2-36 : Les étapes de l'essai odomètre.....	53
Figure 2-37 : Machine de triaxiale.....	54
Figure 2-38 : les étapes de l'essai triaxial.....	55
Figure 2-39 : Malaxeur Mélangeur.....	56
Figure 2-40 : Presse Hydraulique.....	56
Figure 2-41 : Moules prismatiques (40×40×160) mm ³	56
Figure 2-42 : les etaps de l'essai de Confection	57
Figure 2-43 : les étapes de l'essai flexion et de compression.....	58
Figure 2-44 : sonde de fil	59
Figure 2-45 appareils CT METRE.....	59
Figure 2 -46 : effectuer l'opération de la conductivité thermique.....	60
Figure 3-1 : Argile de REMILA	61
Figure3-2 : Argile de Skikda.....	62
Figure3-3 : limite de liquidité de l'argile Skikda	63

Figure3-4 : limite de liquidité de l'argile REMILA	64
Figure3-5 : Courbe analyse granulométrique de l'argile de SKIKDA.....	67
Figure 3-6 : courbe analyse granulométrique de l'argile de RMILA.....	68
Figure3-7 : Abaque de plasticité de Casagrande. Classification LCPC de sol REMILA.....	69
Figure 3-8 : Abaque de plasticité de Casagrande. Classification LCPC de sol Skikda	69
Figure 3-9 : courbe Proctor (sans ajout Skikda)	73
Figure 3-10 : courbe Proctor (ajout de 5% CKD de l'argile Skikda)	74
Figure 3-11 : courbe Proctor (ajout de 10% de CKD de l'argile Skikda).....	74
Figure 3-12 : courbe Proctor (ajout de 15% CKD de l'argile Skikda)	75
Figure 3-13 : courbe Proctor (ajout de 20% CKD de l'argile Skikda)	76
Figure 3-14 : courbe Proctor (sans ajout de l'argile REMILA).....	76
Figure 3-15 : courbe Proctor (ajout de 5% CKD de l'argile REMILA).....	77
Figure 3-16 : courbe Proctor (ajout de 10% CKD de l'argile REMILA)	78
Figure 3-17 : courbe Proctor (ajout de 15% CKD de l'argile REMILA)	78
Figure 3-18 : courbe Proctor (ajout de 20% CKD de l'argile REMILA).....	79
Figure 3-19 : la variation de la teneur en eau en fonction du pourcentage d'ajout.....	79
Figure 3-20 : La variation de la masse volumique sèche du pourcentage d'ajout	80
Figure 3-21 : Les courbes Proctor pour les différents ajouts de l'argile de SKIKDA...	80
Figure 3-22 : Les courbes Proctor pour les différents ajouts de l'argile de REMILA...	81
Figure 3-23 : courbe de compressibilité de l'argile naturelle de l'argile Skikda.....	82
Figure 3-24 : courbe de compressibilité de l'argile naturelle de l'argile REMILA ...	83
Figure3-25 :la variation tangentielle en fonction du déplacement horizontal à 1,2 ,3 bar (Skikda).....	84
Figure 3-26 : la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale (Skikda)	85
Figure3-27 :la variation tangentielle en fonction du déplacement horizontal à 1,2 ,3 bar (REMILA).....	85
Figure 3-28 : la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale (REMILA)	86
Figure 3-29 : Cercle de Mohr de l'argile REMILA	86
Figure 3-30 : Cercle Mohr de l'argile Skikda	86
Figure 3-31 : Courbe compression pour 7 jours.....	88

Figure 3-32 : Courbe compression pour 14 jours.....	89
Figure 3-33 : Courbe compression pour 28 jours	89
Figure3-34 : Courbe contrainte de traction par flexion pour 07 jours.....	90
Figure 3-35 : Courbe contrainte de traction par flexion pour 14 jours	91
Figure3-36 : Courbe contrainte de traction par flexion pour 28jours	91
Figure3-37 : Courbe de conductivité thermique 7 jours.....	93
Figure3-38 : Courbe de conductivité thermique 14 jours	93
Figure3-39 : Courbe de conductivité thermique 28 jours	94

Table des tableaux

Tableau 2-1 : Classification des sols grenus (plus de 50 % d'éléments > 0,08 mm).....	42
Tableau 2-2 : La classification GTR pour les sols A.	46
Tableau 3-1 : Limite de liquidité de l'argile Skikda :.....	62
Tableau 3-2 : Limite de liquidité de l'argile de RMILA :.....	63
Tableau 3-3 : Limite de plasticité de l'argile Skikda :	64
Tableau 3-4 : Limite de plasticité de l'argile RMILA	65
Tableau 3-5 : l'indice de consistance et de plasticité.....	65
Tableau 3-6 : Analyse granulométrique de l'argile de Skikda.....	65
Tableau 3-7 : Analyse granulométrique de l'argile de RMILA.....	66
Tableau 3-8 : Analyse granulométrique par sédimentométrie d'argile de SKIKDA	66
Tableau 3-9 : Analyse granulométrique par sédimentométrie d'argile de RMILA.	67
Tableau 3-10 : valeur de bleu méthylène.....	68
Tableau 3-11 : l'absorbation d'eau.....	70
Tableau 3-12 : classification proposée par Dakshanamurthy et Raman (1973).....	70
Tableau 3-13 : Qualificatif de la fraction du sol constituée d'éléments inférieurs à 400um en fonction de l'indice de plasticité afnor P94-011.....	71
Tableau 3-14 : potentiel de gonflement d'après Ranganatham et Satyanarayana (1965).....	71
Tableau 3-15 : la susceptibilité de variation de volume en fonction de V_{BS} Bigot et zerhouni,2000.....	72
Tableau 3-16 : Qualificatif de fraction argileuse d'après La norme afnor P 94-011	72
Tableau 3-17 : Qualificatif du sol en fonction de l'indice de consistance afnor P94-011.....	73
Tableau 3-18 : Résultats des mesures (sans ajout de l'argile Skikda).....	73
Tableau 3-19 : résultats des mesures (5%CKD Skikda).....	74
Tableau 3-20 : résultats des mesures (10%CKD Skikda).....	75
Tableau 3-21 : résultats des mesures (15% CKD Skikda).....	75
Tableau 3-22 : résultats des mesures (20%CKD Skikda).....	76
Tableau 3-23 : résultats des mesures (sans ajout REMILA).....	77
Tableau 3-24 : résultats des mesures (5% CKD REMILA).....	77
Tableau 3-25 : résultats des mesures (10%CKD REMILA).....	78

Tableau 3-26 : résultats des mesures (15% CKD REMILA).....	78
Tableau3-27 : résultats des mesures (20%CKD REMILA).....	79

Introduction générale

L'argile est le matériau le plus employé sur Terre depuis des siècles, comme l'attestent divers sites archéologiques à travers le monde. Aujourd'hui, des constructions en terre sont encore visibles sur tous les continents. On estime qu'un tiers de la population mondiale vit dans des habitations en terre. Avec le développement économique et technologique, d'autres matériaux résistants et durables, tels que le ciment, la chaux, le bitume et l'acier, ont été introduits pour les infrastructures. Toutefois, les préoccupations liées au réchauffement climatique ont poussé à l'utilisation de matériaux écologiques sans émission de gaz à effet de serre, favorisant ainsi le retour de la terre dans la construction.

La première raison est la disponibilité de la terre et sa proximité des chantiers. Sa mise en œuvre est relativement simple, ne nécessitant ni matériel lourd ni technologie avancée. De plus, le matériau terre ne requiert pas d'énergie pour sa mise en œuvre et possède une excellente inertie thermique en raison de sa masse élevée, garantissant des habitats frais en été et chauds en hiver. Cependant, la terre présente aussi des inconvénients, notamment une faible résistance mécanique et une grande sensibilité à l'eau.

L'homme a constamment cherché à remédier aux faiblesses de la terre en utilisant divers moyens de stabilisation, qu'ils soient mécaniques, chimiques ou physiques, menant à la création de différents produits en terre tels que l'adobe, le torchis, le pisé, les briques de terre cuites, et le bloc de terre comprimé (BTC). Parmi ces produits, le BTC est la version moderne de l'adobe, offrant des avantages comme un retrait limité, une résistance élevée, une faible sensibilité à l'eau et des formes bien définies avec des arêtes droites. Pour améliorer ses caractéristiques, divers stabilisants sont utilisés, tels que le ciment, la chaux, le bitume et des fibres naturelles ou synthétiques.

Depuis longtemps, la paille est utilisée comme renfort dans la construction. Cette technique perdure encore aujourd'hui. Par exemple, dans la production industrielle d'adobes aux États-Unis, la terre est mélangée avec de la paille et du bitume. Est aussi employée dans les productions artisanales de briques en terre crue telles que l'adobe, la terre-paille, le torchis, la bauge, le pisé et le BTC. Les fibres naturelles ou synthétiques sont incorporées dans la terre pour améliorer ses résistances mécaniques.

L'un des stabilisants couramment utilisés est la poussière de ciment (Cément Kiln Dust ou CKD), un sous-produit de la fabrication du ciment. L'influence des CKD sur le comportement mécanique des argiles BTC est un domaine de recherche en plein essor, qui vise à exploiter les propriétés stabilisantes de ce matériau pour renforcer la résistance et la durabilité des blocs de terre compressée. La CKD contient des composés chimiques actifs qui peuvent réagir avec

l'argile pour améliorer sa cohésion et sa solidité, réduisant ainsi sa sensibilité à l'eau et augmentant sa capacité à supporter des charges mécaniques importantes.

Cette étude se concentre sur l'analyse des effets des CKD sur le comportement mécanique des argiles BTC, en examinant les améliorations potentielles en termes de résistance à la compression, de durabilité et de stabilité dimensionnelle. Elle vise également à évaluer les implications environnementales et économiques de l'utilisation de la CKD comme stabilisant, afin de déterminer son efficacité et sa viabilité à grande échelle. En combinant des techniques expérimentales et des analyses théoriques, cette recherche contribue à une meilleure compréhension des mécanismes d'interaction entre les CKD et l'argile, ouvrant la voie à des innovations dans le domaine des matériaux de construction durables.

En Algérie, la construction en terre est très répandue dans toute sa longue histoire, particulièrement dans les zones rurales et les régions arides. Aujourd'hui, on assiste à un regain d'intérêt pour ce matériau.

Pour une exploitation rationnelle de ces déchets de ciment dans les constructions de la région et plus précisément dans la production de blocs de terre comprimée (BTC), en vue de fabriquer des matériaux de construction de qualité, de coût abordable et qui s'accommode avec les conditions climatiques sévères de certaines régions de l'Algérie, et ceci pour améliorer la situation de la population face à la pénurie d'habitat surtout dans les zones rurales, on a mené cette étude dans le but d'examiner les propriétés mécaniques du bloc de terre comprimée (BTC) avec des déchets de ciments

Outre l'introduction générale, ce travail est structuré en trois chapitres :

- ✚ Chapitre 1 : Etude Bibliographique
- ✚ Chapitre 2 : Protocol expérimentale Identification, classification et caractérisation des Sols
- ✚ Chapitre 3 : Résultats expérimentaux et discussion
- ✚ Conclusion générale.

Chapitre I

Etude Bibliographique

1.1 Introduction

Introduction :

L'idée de construire remonte à des millénaires et s'appuie sur une ressource abondante, locale et écologique. La terre, utilisée comme matériau de construction, offre de nombreux avantages, notamment en termes de durabilité, de régulation thermique et d'impact environnementale réduit. Cependant, malgré ces atouts, la terre crue présente certaines limites, notamment en ce qui concerne sa résistance mécanique et sa sensibilité à l'eau.

Pour pallier ces faiblesses l'incorporation de déchets industriels dans les mélanges de terre constitue une approche innovante et durable. Parmi ces déchets, les CKD (Cement Kiln Dust), Sous-produits de l'industrie cimentière, ont montré un potentiel significatif pour améliorer les propriétés des matériaux de construction en terre. Les CKD contiennent des éléments chimiques et particules fines qui, lorsqu'ils sont mélangés à terre, modifient ses caractéristiques mécaniques.

Dans notre étude, l'ajout de CKD au sol vise à renforcer ses propriétés mécaniques et à la rendre plus résistant. L'intégration de CKD dans le matériau terre permet non seulement de recycler un déchet industriel mais aussi d'augmenter la durabilité et la stabilité des constructions en terre. Cette modification des caractéristiques mécaniques se traduit par une meilleure résistance à la compression, une diminution de la plasticité à l'eau, rendant ainsi le matériau plus adapté pour des applications structurelles.

En résumé l'utilisation des CKD dans la construction en terre représente une solution doublement avantageuse : elle valorise un déchet industriel et améliore les performances des constructions en terre, répondant ainsi aux exigences **contemporaines** de performance mécanique et thermique.

1.2 Historique construction en terre

Par rapport à l'histoire de la construction en terre, la technique du bloc de terre comprimée, BTC et une technique récente.

Elle a été développée dans les années 50 en Colombie dans le cadre d'un programme de recherche sur l'habitat rural, cette méthode consiste à comprimer la terre dans des moules pour créer des blocs solides et durables, offrant ainsi une alternative améliorée à l'adobe. Les blocs obtenus par compression de la terre légèrement humide dans une presse métallique et placés à la main dans des moules en bois sont plus réguliers en forme et en dimensions que ceux moulés manuellement. De plus, ces blocs, appelée BTC, sont plus denses et offrent une meilleure résistance à la compression et à l'eau. [1]

-le bloc de terre comprimée, une évolution moderne du bloc d'adobe traditionnel, a ses racines dans des techniques anciennes utilisant des pilons en bois pour compacter la terre.

Au XVIII^e siècle, François Cointreau en France a développé la crécise, dérivée d'un pressoir à vin, pour produire ces blocs. Cependant, ce n'est qu'au début du XX^e siècle que les premières presses mécaniques sont apparues, marquant le début d'une utilisation plus répandue de cette technique. L'année 1952 a été un tournant avec l'invention de la presse « CINVA-RAM » par l'ingénieur RAUL Ramirez à Bogota, en Colombie, ouvrant la voie à une utilisation généralisée de cette technologie. Depuis les années 70 et 80, de nouvelles mécaniques et motorisées ont contribué à l'essor du marché des blocs de terre comprimée dans le monde entier. [2]

1.3 La construction en bloc de terre comprimée dans le monde

Plusieurs constructions ont été réalisées en bloc de terre comprimée à travers les quatre coins du monde, profitant des avantages de cette technique moderne, que ce soit sur le plan économique, écologique, esthétique, thermique et environnemental. On peut citer ici quelques exemples :



Figure 1.1 : Maison palmier à Marrakech, Maroc



Figure 1.2 : construction en bloc
Comprimé



FigureI.3 : Différents produits de bloc de
Terre comprimée



Figure 1.4 : A Dakar au Sénégal une villa
Moderne en BTC

1.4 Exemples de construction de terre en Algérie

L'Algérie est un pays magnifique avec une richesse naturelle incroyable. Sa diversité climatique et géographique offre une variété de paysages à couper le souffle, des côtes méditerranéennes aux montagnes majestueuses du nord, en passant par les vastes étendues désertiques du Sahara. Chaque région a son propre charme distinct, ce qui rend l'Algérie unique et attrayante pour les touristes en quête d'aventure et de découvertes.

Timimoune, situé dans une oasis du même nom, est célèbre pour ses palais construits en terre et en argile rouge. Ces bâtiments, construits en hauteur, forment un magnifique ensemble de palais, particulièrement beau pendant la saison hivernale.

Quant à Ghardaïa, elle est réputée pour son architecture magnifique, notamment ses vieux bâtiments construits en briques crues soutenues par de la chaux. Cette ville est un véritable trésor architectural, témoignant de l'ingéniosité des techniques de construction traditionnelles utilisées dans la région.

Ces villes du sud de l'Algérie sont non seulement des exemples remarquables d'architecture locale, mais elles représentent également une partie importante du patrimoine culturel et historique de la région.



Figure 1- 5 : construction en blocs de terre comprimée en Algérie

(Ghardaïa, Timimoune)

1.5 Techniques de construction en terre

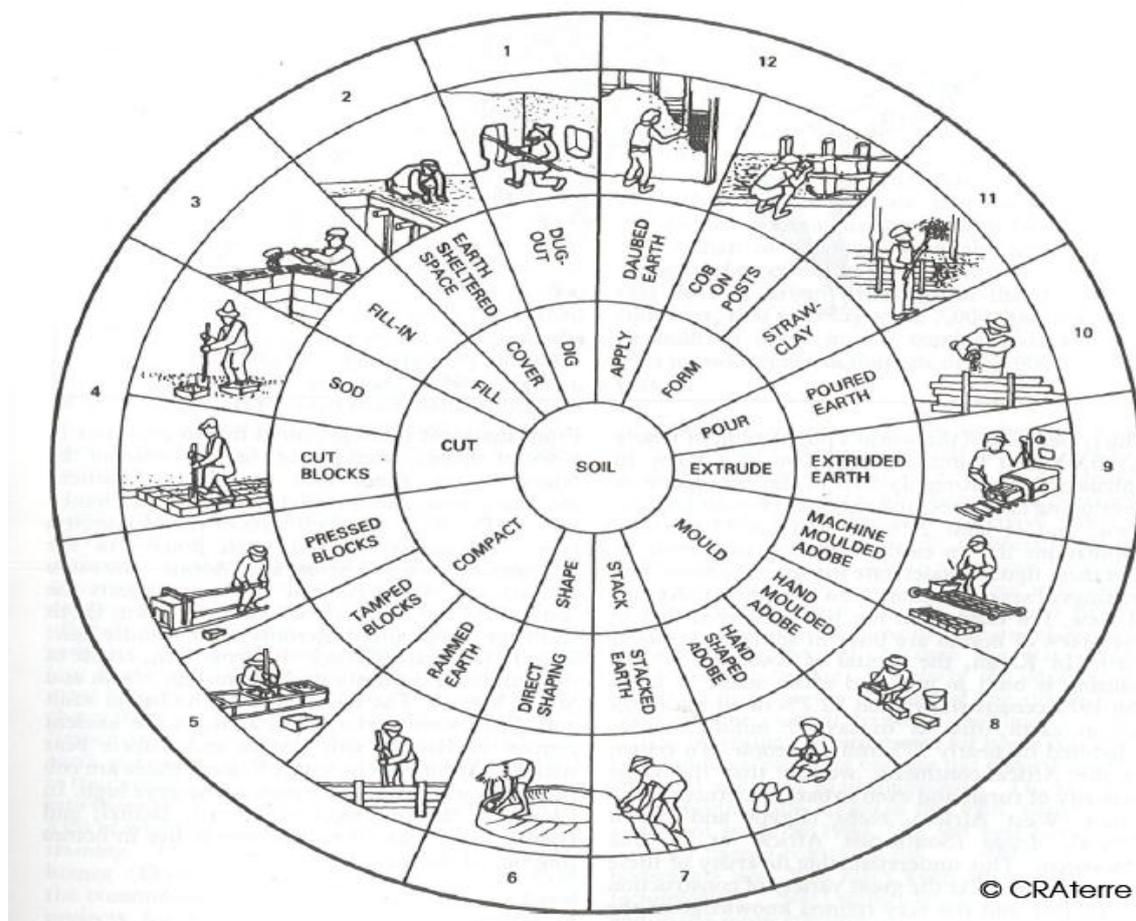
Diverses techniques de construction en terre sont illustrées dans la figure 1-1, sélectionnée dans la figure établie par le groupe [1].

Huit méthodes sont communément employées

- **Adobe** : la terre, mélangée avec beaucoup d'eau, forme une pâte malléable souvent renforcée avec de la paille. Des blocs sont formés et séchés au soleil.
- **Pisé** : une terre moins humide est compactée en couches dans des coffrages.
- **Terre-paille** : de l'eau est ajoutée à la terre pour obtenir un mélange épais auquel on ajoute de la paille cette combinaison nécessite un support pour la construction.

- **Torchis** : un mélange d'argile, d'eau et de fibres naturelles utilisé pour couvrir les structures en bois.
- **Terre façonnée** : une combinaison d'argile, de paille et d'eau utilisée pour construire des murs de manière similaire à la poterie.
- **Terre extrudée** : la terre est extrudée à l'aide d'un dispositif puissant adapté à la fabrication de matériaux pour cuisson.
- **Bauge** : la terre est mélangée avec de la paille ou d'autres fibres, façonnée en boules et empilée pour former des murs monolithiques.
- **Terre comprimée** : la terre est compressée dans un moule métallique pour former des blocs.

Des presses variées sont utilisées pour cette technique.



1.6 Les blocs de terre comprimée

1.6.1 Définition

La terre est pressée dans un moule pour former un bloc. Autrefois, cela se faisait en compactant la terre avec un pilon ou en abaissant un couvercle lourd sur le moule, mais maintenant, on utilise une variété de presses.

Le bloc de terre comprimée peut être stabilisé pour devenir (un bloc de terre comprimée stabilisée). La stabilisation de la terre implique la modification des propriétés d'un système terre-eau-air afin d'obtenir des caractéristiques permanentes adaptées à une application spécifique.

Pour stabiliser les blocs de terre comprimée, on ajoute à la terre un stabilisant, qui dans la plupart des cas, est un liant classique tel que le ciment ou la chaux. Le pourcentage en poids de ces liants varie de 3 à 19%, avec une moyenne de 6 à 8%. [3]

1.6.2 Les avantages de BTC

La technique de fabrication de blocs de terre comprimée offre plusieurs avantages significatifs qui méritent d'être soulignés

➤ La production de ces blocs à l'aide de presses mécaniques modernes représente une amélioration considérable par rapport aux méthodes traditionnelles telles que l'adobe ou la compression manuelle de la terre. Cette approche garantit une régularité de qualité des produits, favorisant ainsi leur acceptation sociale dans le secteur de la construction en terre.

➤ La fabrication des blocs de terre comprimée est généralement accompagnée de procédures rigoureuses de contrôle de qualité, répondant aux normes et réglementations en vigueur dans le secteur de la construction, notamment en milieu urbain. Dans des contextes où les pratiques de construction reposent déjà sur l'utilisation de petits éléments de maçonnerie, comme la brique cuite ou la pierre, l'intégration des blocs de terre comprimée est aisée et constitue une avancée technologique précieuse pour le développement socio-économique du secteur du bâtiment.

➤ La flexibilité des méthodes de production des blocs de terre comprimée, qu'il s'agisse de productions artisanales ou industrielles, aussi bien en milieu rural qu'urbain, suscite un vif intérêt chez les décideurs politiques, les investisseurs et les entrepreneurs.

En outre, les ouvrages réalisés avec des blocs de terre comprimée, lorsqu'ils sont conçus et mis en œuvre de manière adéquate, présentent une qualité architecturale rurale.

En termes de performances techniques, le compactage de terre à l'aide de presses mécaniques améliore la qualité du matériau en produisant des blocs réguliers et résistants à la compression, à l'érosion et l'humidité. Cette polyvalence se traduit par une grande variété d'applications, allant de construction de murs porteurs à celle d'arcs, de voutes de planchers.

Le BTC offre ainsi une alternative locale aux matériaux importés, tout en répondant aux exigences de standardisation, et sa qualité architecturale en fait un choix attrayant pour divers projets de construction, qu'ils soient modestes ou prestigieux. [2]

1.7 Constituants

1.7.1 Argiles

1.7.1.1 Rappel sur les argiles

Les argiles sont des minéraux résultant de la décomposition des roches. Elles se présentent comme des matériaux hétérogènes à diverses échelles. A grande échelle, elles sont souvent associées à d'autres minéraux tels que le quartz et le feldspath. A une échelle plus fine, elles exhibent une structure en feuillet. Il est crucial de considérer la nature physico-chimique des argiles, car leur comportement rhéologique est dicté par l'interaction entre les feuillets argileux. Dans cette section, pour déterminer cette nature physico-chimique, nous examinons la caractérisation minéralogique des différents niveaux d'organisation qui composent les argiles.

1.7.1.2 Définition

Le terme "Argile" peut être défini de différentes manières selon le domaine d'étude ou d'application. Cette diversité de définitions découle des propriétés physiques, de l'utilisation pratique ou même de la structure cristallographique de l'argile.

À l'état naturel, l'argile est rarement constituée d'un seul minéral. Elle est souvent composée d'un mélange de phyllo silicates, où le minéral majoritaire donne généralement son nom à l'argile. Cependant, il peut y avoir d'autres minéraux associés, comme des carbonates, de la silice, des oxydes et hydroxydes d'aluminium, ainsi que des minéraux ferri-fères.

Ainsi, la définition de l'argile prend en compte ce mélange de minéraux, en mettant l'accent sur les minéraux argileux principaux tout en reconnaissant la présence d'autres composants. Cette diversité de composition confère à l'argile ses propriétés spécifiques et détermine son utilisation dans différents domaines, allant de la céramique à la construction en passant par la médecine et l'industrie. Il semble que vous parliez de la composition et des caractéristiques des minéraux,

tels que les feldspaths, le quartz et les impuretés comme l'oxyde de fer et le titane, ainsi que de leur mélange, qui est caractérisé par une certaine plasticité et des grains de taille inférieure à 2 μm . [4]

Les argiles sont principalement des phyllosilicates hydrate d'aluminium.

Le préfixe phyllo exprime que la forme des silicates est en feuillets. Elles présentent une structure cristalline en feuillets. Suivant l'arrangement des couches dans le feuillet et les substitutions ioniques. On obtient de nombreux types d'argile dont les principales sont les silicates hydratés d'alumine à structure en feuillet.

Il existe plusieurs familles de minéraux (phyllosilicates).

- ✓ La famille des minéraux à 7 Å.
- ✓ La famille des minéraux à 10 Å.
- ✓ La famille des minéraux à 14 Å.

Famille des minéraux à 7 Å

Chaque feuillet est constitué par l'association d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Le représentant le plus commun de cette famille est la kaolinite. Il s'agit d'un minéral composé de feuillets en tétraèdres (silice) et en octaèdres (aluminium). Les deux feuillets sont agencés de manière à former une seule couche d'une épaisseur d'environ 7 Å, s'étendant indéfiniment dans les deux autres directions. La liaison entre deux feuillets adjacents est assurée par des liaisons hydrogènes. Ces liaisons se forment entre les hydroxyles de la couche octaédrique et les oxygènes de la couche tétraédrique. Elles provoquent un rapprochement des feuillets adjacents, empêchant toute pénétration de molécules d'eau, de molécules organiques ou d'ions minéraux. Par conséquent, il n'y a aucune possibilité de gonflement ou de rétraction des feuillets. La faible capacité d'échange des kaolinites est due à la présence de sites de surface amphotères. Les schémas des motifs unitaires sont généralement représentés. [5]

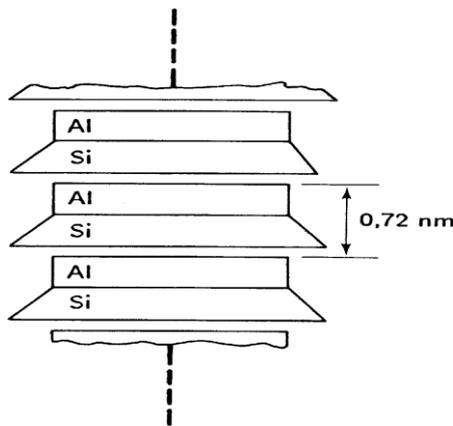


Figure 1.7 : Schéma de la structure de argileuse « la kaolinite ».

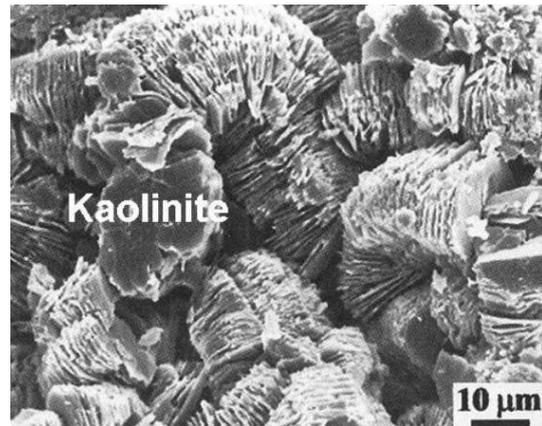


Figure 1.8 : Structure de minérale kaolinite, (d'après Lambe, 1953)

Famille des minéraux à 10 Å :

C'est une famille où chaque feuillet est constitué par une couche octaédrique prise en sandwich entre deux couches tétraédriques. C'est l'une des plus importantes par le nombre de variétés et par sa fréquence dans les sols. Les membres les plus communs de cette famille incluent les micas plus ou moins altérés (illites) et la glauconite. L'illite se présente sous forme de feuillets de 10 Å composés de trois couches. Ses caractéristiques minéralogiques sont proches de celles des micas, ce qui explique l'existence d'intermédiaires illite-mica blanc. La glauconite se présente sous forme de f jaunâtre ou vert bleu euillets de 10 Å, dont les plaquettes empilées peuvent former de petites graines vert

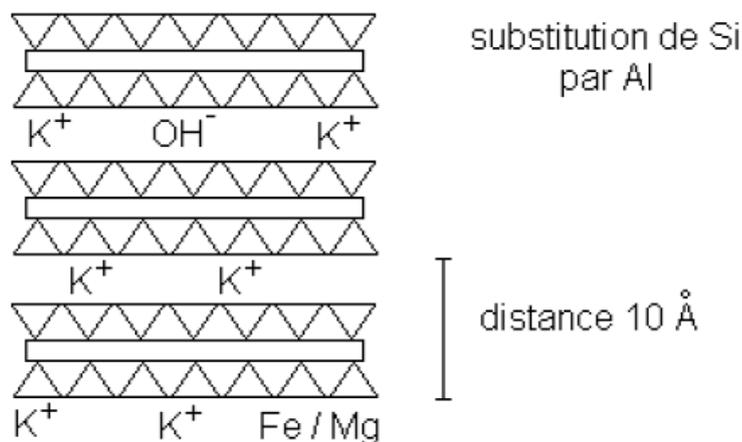
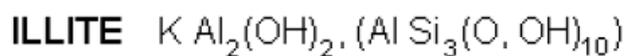


Figure 1.9 : Structure de minérale argileuse (illite).

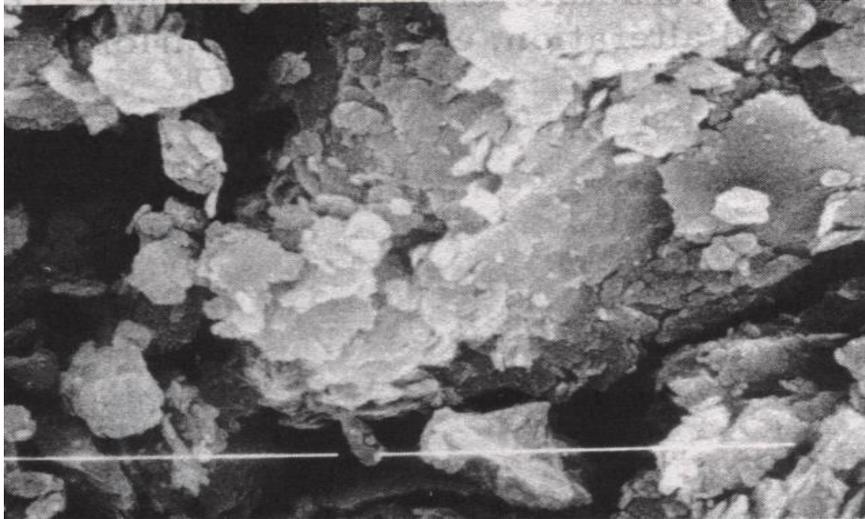


Figure 1.10 : Photographie au microscope à balayage Électronique d'une illite de Fithian, Illinois. La Longueur du trait de lumière est de 5 μm .(LAHCEN B ,2012)

✚ Famille des minéraux à 14 Å :

Cette famille de minéraux se distingue par sa structure composite, formée par la superposition de deux feuillets élémentaires : un feuillet de 14 Å de type mica et un feuillet brucitique. Les membres de cette famille, généralement appelés chlorites vrais, sont caractérisés par une équidistance stable en raison de la charge électrique du feuillet brucitique. Lorsque ces chlorites présentent un déficit de charge, des cations hydratés peuvent se substituer entre les feuillets, conduisant ainsi à des chlorites gonflants.

✚ Montmorillonite :

La montmorillonite, également connue sous le nom de smectite, est un minéral argileux abondant découvert à Montmorillon, en France. La montmorillonite est un minéral argileux important, composé de deux feuillets de silice et d'un feuillet d'alumine. Les feuillets sont liés par des hydroxyles dans la couche octaédrique, formant ainsi une seule couche. Les forces de van der Waals qui soudent les sommets des feuillets de silice sont faibles, ce qui entraîne une déficience en charge négative nette dans la couche octaédrique [6].

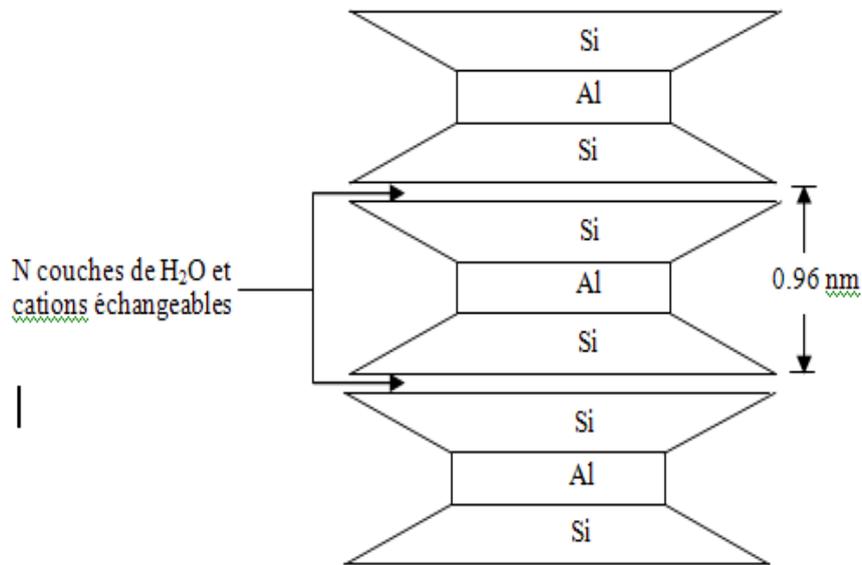


Figure 1.11 : Schéma de la structure de la montmorillonite, (d’après Lambe, 1953)

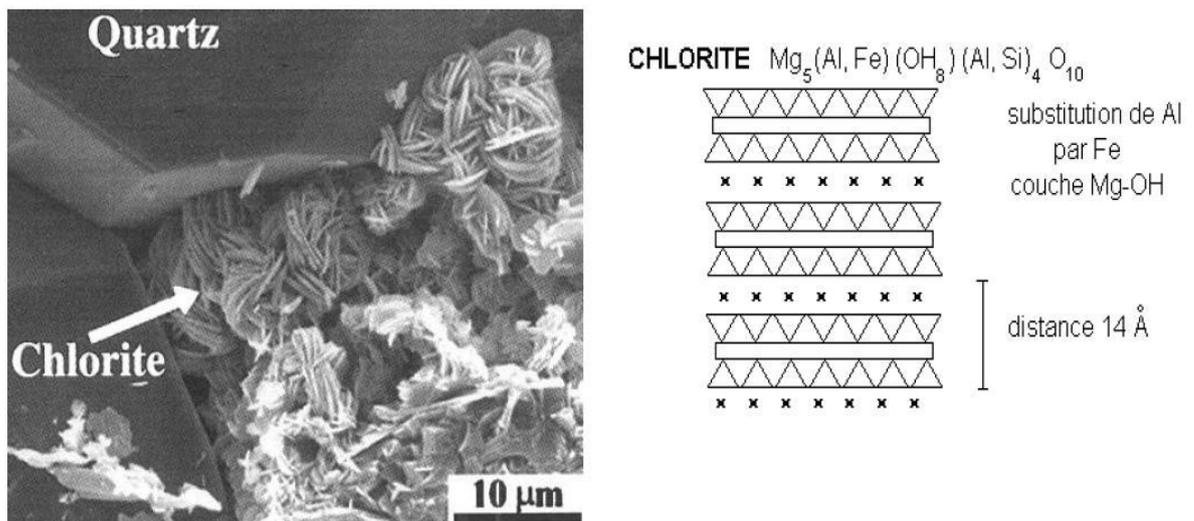


Figure 1.12 : structure de minéraux argileux (Chlorite, la montmorionillite).

1.7.1.3 Définition géotechnique des argiles

Les argiles désignent la fraction des particules du sol dont la taille est inférieure à 0.002mm(=2μ). Les particules de moins de 2μ ne sont plus visibles avec un microscope optique. Il faut alors recourir à la sédimentométrie pour pouvoir déterminer la quantité de particules contenues dans un sol et en déterminer la nature a l’aide de méthodes basées sur la diffraction des rayons X.

En effet, la nature des argiles a une grande incidence sur les propriétés mécaniques des sols, en particulier sur leur comportement avec l’eau.

Les argiles constituent la fraction plus fine des sols. A L'opposé, la fraction la plus grossière des sols est appelée « squelette » et comprend les pierres et les blocs. Entre ces deux extrêmes, on trouve la fraction des limons ou silts, des sables et des graviers.

La fraction fine des sols, dimensions :

Argile : <0.002mm

Limons ou silts : de 0.002mm à 0.063mm

Fraction fine des sols : souvent <0.006mm- argiles et limons fins

1.7.1.4 Les caractéristiques mécaniques des argiles

Le comportement mécanique des matériaux est évalué à l'aide de divers paramètres, paramètres, permettant d'estimer les tassements, la compressibilité ou la consolidation, ainsi que la résistance au cisaillement des sols. Ces paramètres sont obtenus à partir d'essais géotechniques en laboratoire, notamment [7]:

- **Essai de compactage Proctor** : Il vise à étudier l'influence de la teneur en eau sur le poids volumique sec d'un échantillon de sol soumis à une énergie de compactage déterminée. Cet essai permet de déterminer la teneur en eau optimale pour obtenir la densité sèche maximale du sol ou des matériaux analysés.

- **Indice portant immédiat (IPI)** : Mesuré à teneur en eau naturelle, cet indice exprime la capacité de poinçonnement d'une éprouvette de sol compactée à énergie Proctor.

- **Essai de cisaillement direct à la boîte** : Cet essai a pour but de déterminer la résistance au cisaillement du sol(la contrainte de cisaillement à la rupture τ) et les caractéristiques mécanique(C et φ) pour une contrainte normale donnée (σ), selon un plan de cisaillement horizontal imposé.

- **Essai de cisaillement à l'appareil triaxial** : Il a pour objectif de déterminer la résistance au cisaillement du sol ainsi que les caractéristiques mécaniques (C et φ) pour une contrainte de confinement donnée ($\sigma\tau$).

- **Essai de compression simple** : Cet essai mesure la force axiale de rupture de l'échantillon sous une vitesse de compression donnée.

- **Essai œdométrique** : Cet essai permet d'évaluer le tassement et le gonflement du matériau au cours du temps, et de classer les sols en fonction de leur compressibilité.

1.8 Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de la terre

Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de la terre sont des éléments cruciaux à considérer lors de l'utilisation de la terre dans la construction. Ces propriétés sont influencées par les caractéristiques de la matière première dominante dans le sol. Voici les principales propriétés à prendre en compte :

➤ **Granulométrie** : La granulométrie fait référence à la répartition des différentes tailles de particules dans le sol. Elle influence la capacité du sol à drainer l'eau et à supporter des charges. Une connaissance précise de la granulométrie est essentielle pour déterminer la capacité portante du sol et son comportement hydraulique.

➤ **Limite d'Atterberg** : Les limites d'Atterberg sont des paramètres qui définissent les états de consistance du sol, notamment la limite de liquidité, la limite de plasticité et la limite de retrait. Elles fournissent des informations sur la plasticité et la compressibilité du sol, ce qui est crucial pour évaluer sa capacité à supporter des charges et son comportement sous différentes contraintes.

➤ **Cohésion** : La cohésion est la force qui maintient les particules du sol ensemble. Elle dépend de la nature des particules du sol ainsi que de leur arrangement. Une cohésion élevée confère au sol une meilleure stabilité et résistance aux forces externes, telles que la pression de l'eau ou les charges appliquées.

➤ **Compressibilité** : La compressibilité du sol fait référence à sa capacité à se comprimer sous l'effet d'une charge appliquée. Elle est liée à la structure du sol, à sa teneur en eau et à sa composition. Une connaissance précise de la compressibilité est essentielle pour concevoir des fondations appropriées et pour prédire le comportement du sol sous des charges statiques et dynamiques.[8]

Ces propriétés physiques et chimiques sont essentielles pour comprendre le comportement du sol et pour prendre des décisions éclairées lors de sa stabilisation et de son utilisation dans la construction. Elles sont développées en détail dans le chapitre 3.

1.8.1 Stabilisation

1.8.1.1 Définition

La stabilisation des sols, selon le centre des Nations Unies pour les établissements humains, consiste à modifier les propriétés d'un système terre –eau –air afin d'obtenir des caractéristiques permanentes adaptées à une utilisation spécifique [9]. Cependant, ce processus est complexe

car il implique de nombreux paramètres tels que la connaissance des propriétés du sol, les améliorations envisagée, l'économie du projet, les techniques de mise en œuvre du sol choisi, ainsi que la maintenance du projet réalise .[8]

1.8.1.2 Objectifs

Les principaux objectifs de stabilisation des sols, selon des sources telles que. [10]. [9] et [11]. Comprennent

- Amélioration des caractéristiques mécaniques du sol :
 - Augmentation des résistances à la compression, à la traction et au cisaillement. Cela peut rendre le sol plus stable pour supporter des charges ou des contraintes mécaniques.
- Réduction de la porosité et des variations de volume :
 - Réduction du retrait et du Gonflement Causés par l'humidité. Cela peut aider à prévenir les mouvements du sol, tels que le tassement ou le soulèvement, qui peuvent endommager les structures construites sur le sol.
- Amélioration de la résistance à l'érosion causée par le vent et la pluie :
 - Réduction de l'abrasion de surface et de la perméabilité à l'eau. Cela peut protéger la surface du sol contre l'érosion due aux conditions météorologiques extrêmes, aidant ainsi à maintenir l'intégrité du sol et à prévenir la perte de sol fertile.

1.8.1.3 Procédés

Il existe trois procédés de stabilisation, selon. [10]. [9], et [12] :

- **Stabilisation mécanique** : ce procédé consiste à modifier les propriétés du sol par compactage, affectant sa densité, sa compressibilité, sa perméabilité et sa porosité en agissant sur sa structure.
- **Stabilisation physique** : les caractéristiques du sol peuvent être altérées en manipulant sa texture, notamment en réalisant un mélange contrôlé de différentes fractions de grains, comme l'argile et sable.
- **Stabilisation chimique** : ce processus implique l'ajout de matériaux ou de produits chimiques pour modifier les propriétés du sol. Cela peut se faire par des réactions physicochimiques entre les particules du sol et les produits ajoutés, ou en créant une matrice qui lie ou enrobe les particules. Des exemples incluent l'utilisation de ciment, de chaux, de

bitume et de sous-produits industriels. Le choix et la quantité de matériau ou de produit chimique à ajouter dépendent de la nature du sol et du degré d'amélioration souhaité. [13].

- Traitement dans la masse ; cela implique l'introduction d'une quantité minimale de stabilisant dans le sol.

- Traitement de surface ; il s'agit de l'application d'enduits, de badigeons ou d'hydrofuges pour protéger la surface en l'imprégnant sur partie exposée . [14]

1.8.1.4 Stabilisation au ciment

1.8.1.4.1 Généralités

La méthode d'amélioration des propriétés mécaniques du sol grâce à des liants minéraux est une pratique qui a été introduite en Allemagne en 1920 et aux Etats-Unis en 1935. Dans le domaine routier, l'utilisation du ciment pour la stabilisation remonte à 1952 aux Etats-Unis, et s'est ensuite étendue aux routes et aux pistes d'aéroport. La maîtrise de cette technique permet de couvrir l'ensemble des travaux de génie civil. [8]

L'ajout de ciment avant la compression est certainement bénéfique pour améliorer les propriétés du bloc de terre comprimée, surtout en renforçant sa résistance à l'eau grâce aux liaisons qu'il crée entre les particules. Cependant, il est préférable d'éviter les terres excessivement argileuses (>30%) car elles peuvent rendre l'utilisation de ciment inutile, voire nuisible, puisque le ciment agit principalement sur les sables et les graviers, comme dans le béton ou un mortier sables – ciment. [3]

Selon. [15], tous les types de ciment standard peuvent être utilisés pour la stabilisation des sols, mais les ciments de classes inférieures sont préférés car une forte résistance n'est pas nécessaire. Par conséquent certain auteurs. [16]

Recommandent un type spécifique de ciment en fonction de la composition du sol.

-sol contenant un certain pourcentage d'argile : emploi du ciment riche en alite C_3S et bélite C_2S qui donne, après hydratation, beaucoup de portlandite, $Ca(OH)_2$. D'autres proposent que le ciment pour les sols dont la teneur en argiles n'excède pas 20 à 30% (IP <25%). [17].

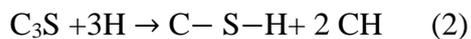
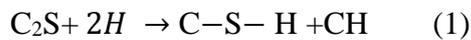
1.8.1.4.2 Mécanisme de stabilisation

Le ciment est composé de plusieurs éléments, dont les principaux sont les suivants : le silicate tricalcique ou alite (SiO_2-3CaO), le silicate bi calcique ou belite (SiO_2-2CaO), l'aluminate tricalcique ou aluminat (Al_2O_3-3CaO), et le Ferro –aluminat tetracalcique ou ferrite (Al_2O_3-

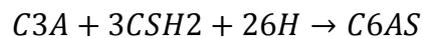
Fe_2O_3-4CaO). Ces composés sont notés respectivement C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF dans la terminologie du ciment. Les constituants secondaires incluent la chaux libre (CAO) ainsi que les sulfates de sodium et de potassium ($NaSO_4$ et K_2SO_4) [18].

Les propriétés du ciment varient en fonction de ses constituants. Par exemple, une forte teneur en C_3S confère une résistance mécanique élevée, tandis qu'une forte teneur en C_3A se traduit par une faible résistance à l'action des eaux agressives.

Lorsque le ciment est mélangé au sol, il se dissout et s'hydrate si la quantité d'eau est suffisante pour former des composés hydratés. La réaction principale provient de l'hydratation des deux silicates de calcium (C_3S et C_2S), qui donnent naissance à deux nouveaux composés : la portlandite (CH) et le silicate de calcium hydraté ($C-S-H : 3CaO. 2SiO_2. 3H_2O$)



La présence de gypse dans le ciment conduit à l'hydratation des aluminates tricalciques (C_3A), favorisant ainsi la formation d'étringite, ce qui contribue à renforcer la résistance du matériau.



En l'absence de gypse, les C_3A réagissent avec l'eau pour donner des C_4AH_{13} , C_2AH_8 , et des C_3AH_6 . Les C_4AH_{13} et C_2AH_8 sont instables. Sous l'action de la chaleur d'hydratation, ils se transforment en C_4AH_8 .

La phase ferrite (C_4AF) réagit rapidement en présence de gypse pour former de l'étringite selon la réaction suivante :



La composition minéralogique et la granulométrie des sols traités ont peu d'impact sur les effets du ciment, car celui-ci renferme déjà tous les éléments nécessaires à sa réaction et à la

Formation des produits cimentaires. Le ciment établit des liaisons physiques entre les particules du sol, ce qui renforce leur résistance. [19].

Dans le cas des sols pulvérulents, les particules sont généralement plus grandes que celles des grains de ciment, permettant ainsi leur revêtement par le ciment. Celui-ci peut alors réagir avec lui-même ou avec le squelette granulaire du sable pour solidifier le sol. [9].

Dans les sols cohérents, les particules sont souvent plus fines que les grains de ciment, empêchant ainsi leur revêtement par ce dernier [20]. Toutefois, le compactage des hydrates de

ciment crée un squelette rigide qui gagne en résistance à mesure que l'hydratation progresse, conduisant ainsi à une augmentation de la résistance.

De plus, une réaction en trois étapes avec de l'argile se produit.[9] :

➤ L'hydratation entraîne la formation de gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile. La chaux libérée pendant l'hydratation du ciment réagit immédiatement avec l'argile. La chaux est rapidement épuisée et l'argile commence à se dégrader.

➤ Pendant que l'hydratation progresse, les agglomérats d'argile se désagrègent, ceux – ci sont ensuite pénétrés en profondeur par les gels de ciment.

➤ Les gels de ciment et agglomérats argileux interagissent intimement, favorisant une hydratation qui persiste mais à un rythme plus lent.

Dans certains cas, les particules d'argile peuvent retarder la prise du ciment en formant une enveloppe protectrice autour des grains. La composition chimique et minéralogique des argiles, ainsi que leur quantité, jouent un rôle essentiel dans les interactions à long terme avec le ciment [15]. En conséquence, trois structures se forment, comme décrit par Hoben en 2006 :

Une matrice sableuse liée au ciment, une matrice d'argile stabilisée et une matrice de terre non stabilisée.

1.8.1.4.3 Traitement au ciment

Le ciment est utilisé pour renforcer rapidement et durablement les résistances mécaniques des sols et leur stabilité face à l'eau et au gel. Il réagit avec les composants du sol, notamment les silicates et aluminates de calcium anhydres, par hydratation, suivie de cristallisation des produits hydratés, ce qui renforce le sol, réduit sa compressibilité et son gonflement, et forme une couche solide, cohérente et imperméable. Ce traitement est utilisé pour améliorer la résistance des sols et leur durabilité, ainsi que pour stabiliser les couches de surface, les fondations et les sous –couches de routes et de chemins

1.8.1.5 Stabilisation à la chaux

1.8.1.5.1 Généralité

La chaux, comme le ciment, a joué un rôle essentiel dans la stabilisation des matériaux de construction depuis des siècles, utilisée par les Romains et d'autres civilisations anciennes pour renforcer les chaussées et les pistes.[21]

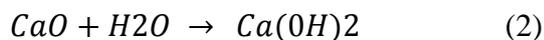
Elle est obtenue en chauffant un mélange de calcaire et d'argile à environ 1000°C, produisant deux types de chaux :

-La chaux vive est obtenue par incinération du calcaire plus ou moins pure.

Il s'agit de l'oxyde de calcium (CaO) (1)



La chaux aérienne ou chaux éteinte quant à elle provient de la réaction de la chaux vive avec de l'eau. Elle est appelée aérienne parce qu'elle se durcit en présence de l'air. La chaux aérienne est constituée surtout d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂)



La chaux hydraulique contrairement à la chaux aérienne agit en présence d'eau. Elle provient de la calcination d'un calcaire surtout argileux.

Tous les types de chaux peuvent être utilisées pour la stabilisation du matériau terre [16]. Son utilisation est conseillée pour les sols contenant 20% d'argile et les sols qui ont IP > 17 et LL > 40.

La chaux éteinte est préférable à la chaux vive en raison de ses inconvénients, notamment sa difficulté à être conservée en présence d'humidité avant son utilisation et sa manipulation laborieuse lors des préparations de mélanges [22]. La résistance d'un sol contenant beaucoup de kaolinite augmente à mesure que la teneur en chaux augmente. En revanche, pour un sol riche en illite, des résultats satisfaisants à moyen et long terme ne sont obtenus qu'à partir de 5% de chaux. [22].

I.8.1.5.2 Mécanisme de stabilisation

Les théories de la stabilisation à la chaux identifient cinq mécanismes fondamentaux [23] :

➤ Absorption d'eau : Notable lors de l'utilisation de chaux vive, la réaction d'hydratation de la chaux réduit la teneur en eau du mélange.

➤ Echange cationique : l'ajout de la chaux à une terre humide introduit des ions calcium, qui remplacent les Cations échangeables (magnésium, sodium, hydrogène...) dans la terre, via un processus d'échange cationique.

➤ Flocculation et agglomération : l'augmentation des électrolytes dans l'eau interstitielle, due à l'échange cationique, favorise la flocculation et l'agglomération des

particules fines du sol, entraînant ainsi une modification de la structure et de la texture de celui-ci.

➤ Carbonatation : la réaction entre la chaux et le dioxyde de carbone atmosphérique produit du carbonate de calcium, ce qui consomme une partie de la chaux disponible pour les réactions pouzzolaniques.

➤ La réaction pouzzolanique est le principal mécanisme qui influence la stabilisation à la chaux. Les propriétés de résistance du matériau résultent principalement de la dissolution des minéraux argileux dans un environnement alcalin créé par la chaux, ainsi que de la réaction de la silice et de l'alumine des argiles avec le calcium pour former des silicates d'aluminium et de calcium, qui agissent comme un liant entre les grains.

I.8.1.5.3 Traitement à la chaux

La chaux est obtenue par cuisson de carbonate de calcium pur (CaCO_3). Elle se présente sous deux formes :

Sous forme de chaux vive (CaO) : $\text{CaCO}_3, \text{CaO} + \text{CO}_2 (T > 900^\circ\text{C})$

Sous forme hydratée (Ca(OH)_2) : $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{chaleur}$.

Le traitement à la chaux a un impact significatif sur les sols fins argileux ou limoneux grâce à trois actions distinctes :

1-Réduction de la teneur en eau : la présence de chaux réduit la teneur en eau du mélange sol-chaux de plusieurs manières, notamment en absorbant de l'eau lors de son hydratation et en favorisant l'évaporation grâce à la chaleur dégagée lors de ce processus.

2-Modifications immédiates des propriétés géotechniques du sol : l'ajout de chaux à un sol argileux favorise l'agglomération des fines particules d'argile en éléments plus gros et plus friables, ce qu'on appelle la floculation.

Les indices de ces réactions sur le mélange sol-chaux sont :

- Diminution de l'indice de plasticité (IP).
- Augmentation de l'indice portant immédiat (IPI).
- Aplatissement de la courbe Proctor avec diminution de la densité de l'optimum Proctor et augmentation de la teneur en eau (pour les matériaux évolutifs comme les marnes, schistes, craies, ou $\text{IP} > 20$).

En génie routier, la chaux est utilisée comme stabilisant ou pour rendre compactable les sols fins trop humides. Ses avantages sont multiples : valorisation des matériaux médiocres, meilleure gestion des ressources naturelles, réduction du trafic des poids lourds, diminution des immobilisations dues aux intempéries, réduction de la durée des travaux, et surtout réduction des coûts [24].

1.9 La poussière de four

1.9.1 Définition de CKD

Le CKD est un déchet à grains fins retiré des gaz d'échappement des fours à ciment pour éviter une accumulation excessive de sel. Même si une partie est réutilisée, sa forte teneur en alcalis peut gêner le recyclage. Cela a entraîné des impacts environnementaux et financiers importants en Algérie, où l'industrie du ciment génère environ 4 000 tonnes de kilos de poussière par an. Des efforts ont été déployés pour gérer et utiliser ces déchets, mais des défis demeurent en raison des spécifications internationales limitant la teneur en alcalis du ciment.

La poussière de four à ciment (CKD), également connue sous le nom de "clinker kiln dust" en anglais, est un sous-produit de la fabrication du ciment. Elle est générée lors du processus de cuisson du mélange de matières premières dans un four à ciment pour produire du clinker, qui est ensuite broyé pour fabriquer du ciment. Le CKD se compose principalement de particules fines de matières minérales calcinées, telles que du calcaire, de l'argile, du carbonate de calcium et d'autres composants présents dans le mélange de matières premières.

Le CKD est composé de plusieurs éléments. Les quatre éléments de base. Sont C_2S alite, C_2S belite, C_3A celite et C_4AF ferrite. Une teneur élevée en CS se traduit par une résistance et une durabilité accrues des sols argileux et une réduction [25]

1.9.2 Utilisation des CKD

Les poussières de fours à ciment (CKD) peuvent être utilisées pour la stabilisation des sols comme alternative à la chaux, souvent employée dans la construction de routes. L'utilisation de CKD est non seulement efficace pour améliorer la résistance des sols, mais elle permet aussi de réduire les temps de travail et les coûts. Contrairement à la chaux, qui nécessite un remélange et une compaction du sol 48 heures après son application, les poussières de ciment éliminent cette étape supplémentaire : le mélange initial et la compaction suffisent à stabiliser le matériau.

De plus, les CKD sont utilisées pour la stabilisation et la solidification des déchets. Elles représentent une alternative économique et efficace aux matériaux classiques de traitement des

déchets comme le ciment et la chaux. Les poussières de four à ciment ont été utilisées avec succès pour traiter divers types de matériaux de déchets, allant des effluents de mine de charbon et des eaux usées industrielles, aux boues d'épuration et huiles. (13), (20), (21)

1.9.3 Stabilisation des sols par des CKD

Des recherches ont été menées sur l'utilisation (Cement kiln Dust) en combinaison avec des matériaux tels que la chaux, le ciment portland et les cendres volantes pour la stabilisation des Sols. Il est possible de remplacer avec succès une partie de la chaux par des CKD dans le système de stabilisation sol-sable utilisant la chaux et les cendres volantes (24).

En ce qui concerne l'utilisation des CKD et des cendres volantes dans la construction routière (25), il a été constaté que ces matériaux peuvent être intégrés de manière efficace.

L'utilisation des CKD dans la stabilisation des Sols sableux pour les fondations de pavage a conduit à un mélange optimal de 15% de CKD, contenant 5,9% de CaO libre et MgO, et 0,97% d'alcalis totaux (K_2O+Na_2O), avec une résistance en compression de 5,2 MPA après 14 jours. Cependant, aucune donnée n'a été spécifiée pour le comportement à long terme de ce système (26). Pour la stabilisation dans la construction des autoroutes, en se basant sur les propriétés géotechniques des différents mélanges, telles que la résistance à la compression à 7 jours, la relation densité – teneur en eau, le CBR, le gonflement et les considérations économiques. Les auteurs ont conclu qu'un mélange de 30% de CKD et 70% de sable donnait les performances optimales (27).

Pour la stabilisation des Sols avec des CKD, les mélanges contenaient de 3,8% à 10% de CKD. En testant différentes propriétés, telles que la résistance à la compression, la masse volumique – teneur en eau, la limite de liquidité et l'indice de plasticité, les résultats obtenus étaient comparables à ceux des sols stabilisés avec de la chaux hydratée et du ciment portland.

En utilisant des poussières de four de cimentaires, des tentatives de stabilisation d'argile gonflante ont été effectuées. Les mélanges argile-CKD contenaient entre 5% et 40% de CKD en poids et ont mûri pendant 56 jours.

Les résultats ont montré que, à l'exception de la masse volumique humide, les propriétés géotechniques des mélanges CKD-argile sont comparables à celles des sols stabilisés avec des cendres volantes et du ciment (28) et (29).

Cette étude a montré que :

1-l'addition de CKD réduit la masse volumique humide maximale des argiles tandis que la teneur en eau optimale augmente.

2-la résistance à la compression non confinée de l'argile naturelle augmente avec l'augmentation des ajouts de CKD et une longue période de mûrissement.

3- la limite de liquidité diminue et la limite de plasticité décroît avec l'ajout de CKD et une longue période de mûrissement. Ces auteurs ont montré que l'indice de plasticité (IP) était de 12,1% après 56 jours et 40% de CKD, comparé à 64% pour l'argile naturelle.

4-le CBR est amélioré pour les échantillons muris pendant 4jours leur capacité portante augmentant avec l'ajout de CKD.

5- le potentiel de gonflement de l'argile naturelle, mesuré selon la norme ASTM 4546, diminue de 9% à 0% avec 25% de CKD. Le volume des vides passe de 7% pour l'argile naturelle à des valeurs comprises entre 1%et 23% pour les échantillons avec 25% de CKD.

1.10 Conclusion

La recherche bibliographique indique que la terre crue a été largement utilisée comme matériau de construction depuis des siècles en raison de sa disponibilité, de sa faible consommation d'énergie et de son absence de déchets. Cependant, les constructions modernes privilégient le béton pour des performances mécaniques élevée. Pour renforcer la résistance et la durabilité des matériaux à base de terre, divers traitements, dont celui aux liants, sont utilisés.

En résumé, l'emploi de liants minéraux tels que le ciment, la chaux comme stabilisants dans la fabrication des BTC offre des avantages significatifs en termes de résistance mécanique et de résistance à l'eau. Ces résultats sont cohérents avec d'autres études qui ont démontré l'efficacité de la stabilisation chimique pour améliorer les propriétés des matériaux de construction, y compris les briques de terre compressée.

Chapitre II

Protocol expérimentale Identification, classification et caractérisation des Sols

2.1 Identification des sols

2.1.1 Introduction

Identifier un sol signifie la détermination de ces propriétés physiques, mécaniques ou chimiques qui permettent de caractériser. Ces propriétés sont évaluées à travers des essais simples et rapides, appelés « essais d'identification ». Ces essais fournissent une description précise et chiffrée du sol, ce qui est essentiel car des sols similaires en apparence peuvent avoir des comportements très différents, notamment sur le plan mécanique. Ils servent de base aux systèmes de classification des sols et permettent d'estimer grossièrement les propriétés mécaniques des sols et de dimensionner des ouvrages. Il existe deux grandes catégories d'essais d'identification : ceux qui évaluent l'arrangement et la répartition des phases du sol, et ceux qui traduisent les propriétés des particules du sol et leur interaction avec l'eau. Ces essais nous aident à comprendre la nature, la composition et la répartition des grains de différentes tailles dans le sol. Les essais géotechniques les plus courants comprennent l'analyse granulométrique, la limite d'Atterberg et le bleu de méthylène.

2.1.2 Détermination de la teneur en eau des sols (NF P94-050)

❖ Définition

✓ La teneur en eau d'un sol (intact, remanié, ou reconstitué) est le rapport de la masse de l'eau évaporée lors de l'étuvage (m_w) sur la masse des grains solides (m_d), exprimé en pourcentage. $w = \frac{m_w}{m_d} 100\%$

✓ La détermination de la teneur en eau se fait par passage à l'étuve (NF P94-050) ou par passage au four à micro-ondes (NF P94-049-1) ou en utilise la méthode à plaque chauffante (NF P94-049-2).

✓ Dans cet essai on se limite à l'étuvage.

❖ Principe de la détermination de la teneur en eau

Le principe de la détermination de la teneur en eau consiste à mesurer la perte d'eau d'un échantillon de matériau provoquée par étuvage. Les masses de l'échantillon et de l'eau évaporée sont mesurées par pesage.

❖ Appareillage



Figure 2-1 : Etuve réglable à 50° et 105°



Figure 2-2 : Balance



Figure 2-3 : Des tars

❖ Mode opératoire

- ✓ Placer l'échantillon dans les tars
- ✓ Peser immédiatement
- ✓ Mettre à l'étuve à 105° pour les matériaux insensibles à la chaleur et 50° pour les matériaux sensibles à la chaleur

Peser l'échantillon sec immédiatement à la sortie de l'étuve

2.1.2.1 Limite d'atterberg : (NF P94-051)**❖ Domaine d'application**

✓ Détermination des limites d'atterberg (limite de liquidité à la coupelle et limite de plasticité du rouleau) s'applique aux sols dont les éléments passent à travers le tamis de dimension nominale d'ouverture de 400µm.

✓ Cette norme destinée à la détermination des deux limites d'atterberg (limites de liquidité à la coupelle et limite de plasticité du rouleau) s'applique aux sols les éléments passent à travers le tamis de dimension nominale d'ouverture de maille 400µm.

❖ Définition et but de l'essai

✓ Les sols fins ont la particularité de changer de consistance en fonction de leur teneur en eau, passant de l'état solide lorsqu'ils sont desséchés à l'état liquide lorsqu'ils sont détremés, avec un état intermédiaire plastique entre les deux.

✓ Les limites d'Atteberg, établies en 1911 par l'agronome suédois atterberg et ensuite modifiées par Casagrande en 1932, définissent ces seuils.

✓ La limite de liquidité (w_l) marque le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique, tandis que la limite de plasticité (W_P) marque le passage de l'état plastique à l'état solide.

✓ Ces limites sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol, car ce sont les seuls sur lesquels l'eau agit pour modifier la consistance.

Bien qu'il existe d'autres limites d'Atterberg, les principales sont la limite de liquidité et la limite de plasticité, utilisées pour classer les sols.

A partir de ces limites on détermine deux paramètres

1- Indice de plasticité IP : cet indice définit l'étendue du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et de plasticité : $IP = WL - WP$

2- indice de consistances IC : cet indice prend la teneur en eau W du sol à l'état naturel pour la fraction inférieure à 0.4mm : $IC = \frac{wl - w}{I_p}$

❖ **Principe de la méthode**

L'essai s'effectue en deux phases :

- 1- Recherche de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande.
- 2- Recherche de la limite de plasticité par formation de rouleaux de 3mm de diamètre.

❖ **Appareillage :**

-Matériel pour préparation du sol :



Figure2-4 : Un tamis 0.4mm



figure2-5 : Un bac

-Un récipient d'eau

-Matériel pour la limite de liquidité et plasticité :



Figure 2-6 : Appareil de
CASSAGRANDE



Figure 2-7 : Outil a rainurer



Figure 2-8 : Un spatule



Figure 2-9 : une balance

❖ **Mode opératoire :**

1-détermination de la limite de liquidité avec la limite d'atterberg :

- ✓ La totalité de tamisât est malaxée afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide.
- ✓ Répartir avec la spatule dans la coupelle une masse d'environ 70g de pâte.
- ✓ Partager la pâte en deux, ou moyen de l'outil à rainurer
- ✓ Actionner la came de façon à soumettre la coupelle à une série de chocs à la cadence de 2 coups par seconde.
- ✓ Noter le nombre N de chocs nécessaire pour que les lèvres de rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 1cm
- ✓ L'essai n'est poursuivi que lorsque N compris entre 15et 35.
- ✓ Prélever dans la coupelle environ 5g de pâte de chaque côté de lèvres afin d'en déterminer la teneur en eau.



Figure2-10 : les étapes de l'essai des limites

2-Détermination de la limite de plasticité :

- ✓ Former une boulette à partir de pâte préparée.
- ✓ La limite de plasticité est obtenue lorsque le rouleau se fissure.
- ✓ Introduire dans l'étuve et déterminer la teneur en eau

2.1.2.2 Analyse granulométrique

- ✚ **Tamis** : il est constitué d'une tôle métallique définissant des trous carrés.
- ✚ **Refus** : c'est la partie retenue par le tamis.
- ✚ **Le tamisât** : C'est la partie qui traverse le tamis.

Principe de l'essai :

L'analyse granulométrique des sols est un essai d'identification qui fait l'objet de deux normes :

✓ L'analyse granulométrique par tamisage à sec après lavage, décrite par **La norme NF P 94-056(1996)**. Elle concerne les sols dont la dimension des éléments est supérieure à 80 μ m (0.08mm). Ces les éléments qui constituent le refus au tamis 80 μ m (0.08mm).

✓ L'analyse granulométrique par sédimentation, décrite par **La norme NF P 94-057(1992)**. Elle concerne les sols dont la dimension des particules est inférieure à 80 μ m (0.08mm). C'est les particules qui passent au tamis 80 μ m (0.08mm).

1-L'analyse granulométrique par tamisage

Selon la norme **NF P 94-056 (1996)**.

✓ Déterminer la distribution dimensionnelle des différents grains d'un échantillon de granulats.

✓ Etablir la courbe granulométrique.

✓ Classification de l'échantillon.

❖ **Matériels utilisés :**



Figure 2-11 : Un dispositif de lavage.



Figure 2-12 : une série de tamis et
Fonds de tamis.

-Récipients en matériau non altérable, brosses, pinceaux ;

-Balance de précision, dont les portée maximale et minimale sont compatibles avec les masses à peser et telles que les pesées sont effectuées avec une incertitude de 1/1000de la valeur mesurée ;

- une étuve de dessiccation à température réglable.

❖ Mode opératoire :

- ✓ Verser la totalité du matériau sèche au sommet d'une colonne de tamis d'ouverture de maille décroissante du haut vers le bas et un fond de tamis a base.
- ✓ Agiter manuellement ou mécaniquement la colonne de tamis.
- ✓ Terminer le tamisage en remuant soigneusement le matériau à la Main dès que à ce que plus aucun élément ne dépasse à travers les mailles de chaque tamis.
- ✓ Verser dans un récipient le refus du premier tamis.
- ✓ Poursuivre le processus sur chaque tamis constitue la colonne.



Figure 2-13 : Les Etapes de l'essai granulométrique.

2- L'analyse granulométrique par sédimentométrie (selon la norme NF P 94-057)**❖ But de l'essai**

L'analyse granulométrique par sédimentaire permet de déterminer la distribution en poids des particules fines (de diamètre inférieur à 80 μ m) d'un sol en fonction de leurs dimensions donc elle compléte l'analyse granulométrique par tamisage.

❖ **Appareillage : Appareillage :**



Figure 2-14 : un densimètre gradué.



Figure 2-15 : Une éprouvette graduée.



Figure 2-16 : dé flocculant (solution hexa méta
Phosphate de sodium à 5%).

-chronomètre

-un agitateur mécanique à grande vitesse de rotation ou manuel

❖ **Mode opératoire**

- ✓ Prendre 50g de matériau de la fraction inférieur à 80 μ m.
- ✓ Verser ces 50g dans un bécher et compléter avec 500cm³ d'eau distillée et 30cm³ de défoullant.
- ✓ Laisser reposer 12h minimum, compte tenu du délai minimum de repos de l'échantillon du matériau préparé à l'avance.

- ✓ Le contenu du bécher ainsi traité est versé dans le récipient de l'agitateur mécanique en ajoutant 500 cm³ d'eau distillée.
- ✓ Procéder à l'agitation ou mixer à très grande vitesse pendant 2min.
- ✓ Verser, dans une éprouvette graduée de 500cm³ environ d'eau.
- ✓ Introduire alors le matériau en suspension, après avoir lavé le récipient de l'agitateur, compléter enfin à 500cm³ de l'eau.



Figure 2-17 : Les étapes de L'essai Sédimentométrie.

2.1.2.3 Essai bleu méthylène (NF EN 933-9)

❖ But de L'essai :

- ✓ Les minéraux argileux présents dans les sols sont principalement issus de l'altération physico-chimique des roches. La structure cristalline feuilletée des argiles leur confère un ensemble de propriétés de comportement lié à leur affinité pour l'eau (appelée activité), ce qui entraîne les phénomènes de gonflements, de plasticité et de cohésion constatés sur ces sols.

- ✓ Le bleu de méthylène étant adsorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer, cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments.
 - ✓ Le but de l'essai est d'évaluer la richesse en argile d'un sol en mesurant sa capacité d'adsorption de molécules de bleu de méthylène.
- ❖ **Principe de l'essai :**
- ✓ Le principe de la méthode consiste à contrôler l'adsorption du bleu de méthylène injecté dans un bain aqueux contenant les fines de la prise d'essai, en observant une goutte de suspension déposée sur une feuille de papier filtre.
 - ✓ La tache formée se compose d'un dépôt central du matériau, coloré d'un bleu soutenu, entouré d'une zone humide incolore. La saturation des fines en bleu de méthylène se traduit par la formation d'une auréole bleu clair persistante autour du dépôt central.
- ❖ On appelle valeur de bleu de méthylène du sol VBS, la quantité exprimée en gramme de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fines. Le VBS est un indicateur essentiel dans la classification des sols concernés par les travaux de terrassements.
- ❖ **Appareillage :**



Figure 2-18 : La Balance.



Figure 2-19 : Agitateur.



Figure 2-20 : Chronomètre.



Figure 2-21 : solution de
bleu méthylène

- Tamis maille carrée d'ouverture 5 mm
- Un récipient de 3 litres en matière plastique.
- Eau déminéralisée ou distillée Papier filtre.

❖ Mode Opératoire :

1 - Préparation de l'échantillon :

L'essai s'effectue sur la fraction du matériau qui passe le tamis de 0,08 mm. On peut donc récupérer le tamisât (passant) 0,08 mm de tamisage par voie humide.

- ✓ On place 30 g de ce matériau sec inférieur à 0,08 mm dans le béccher, mélangés avec 500cm³ d'eau déminéralisée ou distillée.
- ✓ L'agitateur à ailettes est immergé dans la suspension afin de faire subir à l'échantillon une agitation constante pendant 5 minutes à 600 tours par minute (tr/mn), puis à une agitation de 400 tr/mn pour la totalité de l'essai.

2- Exécution de l'essai :

On administre des quantités graduelles de cm³ de la solution de bleu de méthylène dosée à 10g/l.

- ✓ Après chaque administration d'une dose de bleu, on patiente pendant 1 minute puis, à l'aide d'une baguette de verre, on prélève une goutte de liquide que l'on dépose sur un papier filtre.

- ✓ La tache ainsi obtenue se compose d'un dépôt central de matériau, généralement coloré en bleu intense, entouré d'une zone humide formant une auréole incolore.
- ✓ Tant que cette auréole est complètement absorbée par l'argile, le test est négatif ; cependant, lorsque l'auréole commence à se teinter de façon persistante en bleu clair, le test est considéré comme positif.
- ✓ Si au bout de 5 min le test est toujours positif, le dosage est considéré comme terminé.

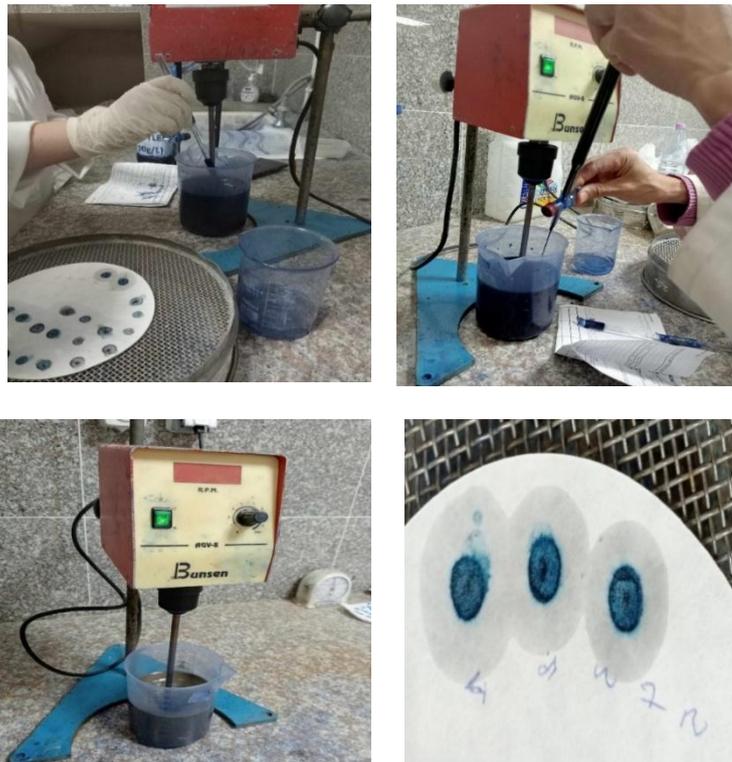


Figure 2 -22 : les étapes de l'essai de bleu méthylène l'essai de bleu méthylène.

2.2 Classification des sols

❖ But de la classification :

Pour résoudre les problèmes de mécanique des sols, il est important de caractériser et de classer les différents types de sols afin de les regrouper selon leurs comportements similaires. A travers le mode, il existe de nombreuses classifications. En général, l'identification visuelle permet de nommer les matériaux : par exemple, marne, bleue, argile jaune, sable fin.

❖ Principe de classification :

Les systèmes de classification des sols conçus pour répondre aux besoins des ingénieurs civils en fournissant des informations fiables sur le comportement des sols, essentiellement pour la construction de routes, de pistes d'atterrissage et de barrages. Ils regroupent les sols en Familles présentant des caractéristiques géotechniques similaires, permettant ainsi d'analyser efficacement de nombreux échantillons recueillis lors de sondages et d'établir des coupes géotechniques du terrain. Ces coupes sont précieuses pour les ingénieurs car elles complètent les données géologiques, qui ne fournissent pas toujours des informations géotechniques précises.

Il existe de nombreux systèmes de classification des sols, certains basés sur l'adaptation du sol à un usage spécifique en génie civil. Cependant, ces classifications sont souvent limitées à un usage particulier et ne peuvent être généralisée à d'autres usages.

Les sols sont basés sur certains essais d'identification. Parmi ces systèmes, plusieurs se réfèrent uniquement à la granularité du sol (diagramme triangulaire, par exemple) et diffèrent par les seuils granulométriques adopté. D'autres utilisent simultanément la granularité et la plasticité du sol. On décrira ici l'une de ces classifications, dite (classification des laboratoires des ponts et chaussées) ou (classification LPC), qui n'est autre que la classification USCS (Unified Soil classification système), adaptée aux seuils granulométriques utilisés en France (1965), puis la classification LPC modifiée pour mieux décrire les sols contenant des matières organiques (1974/1980).

❖ Nombreuses classifications dans différents pays :

- Classification U.S.C.S (Unified Soil classification Système) établie par Casagrande.
- Classification L.C.P.C (laboratoire central des ponts et chaussées) identique à la classification U.S.C.S
- Classification A.A.S.H.O (American Association State Highways Officials).
- Classification G.T.R (Guide des terrassements routiers).

❖ Classification triangulaire :

Pour classer un sol utilisant le diagramme de classification triangulaire, on suit une méthode précise qui implique les proportions de sable, de silt (limon), et d'argile. Ce type de diagramme,

comme illustré dans la figure 5-2, est un outil couramment utilisé en pédologie pour déterminer la texture des sols en fonction des proportions relatives de ces trois composantes. C'est le point sur le diagramme qui correspond à ces proportions, mais il est situé dans la zone des argiles ; on attribue donc à ce sol l'appellation d'argile, malgré que sa fraction argileuse ne soit pas la plus grande. La classification triangulaire reconnaît ainsi l'importance de la matrice argileuse dans le comportement des sols.

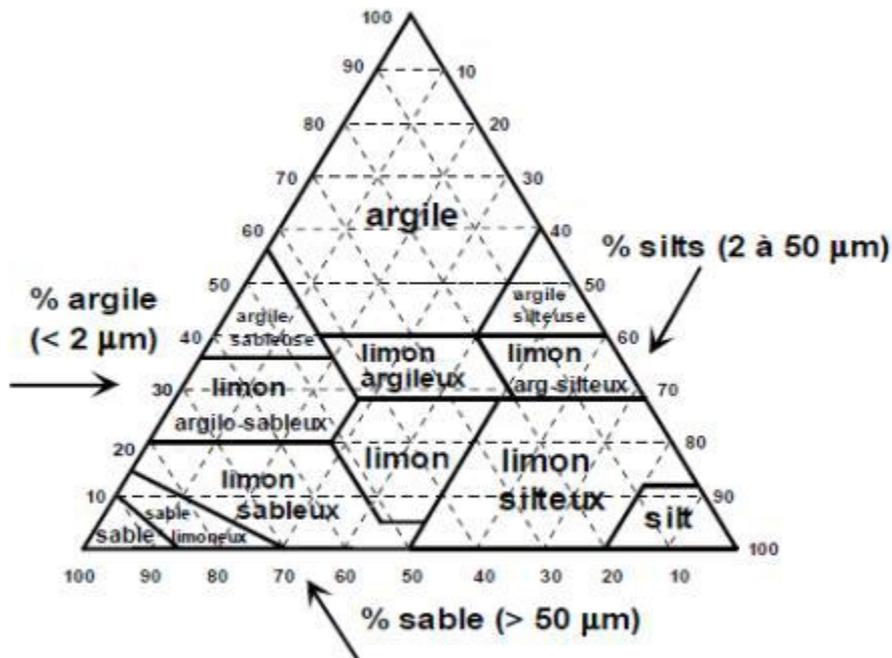


Figure 2-23 : classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre supérieur. (Guettche Amar,2015/2016)

❖ **Classification (LPC/USCS) des sols :**

La classification LPC (1965) utilise les résultats d'essais classiques d'identification des sols :

Des critères granulométriques :

- Les pourcentages de gravier, sable et particules fines (tamisât à 2mm et 0,08 mm) ;
- La forme de la courbe granulométrique :
 - Coefficient d'uniformité ou de Hazen C_u ,
 - Coefficient de courbure C_c ;

Les caractéristiques de plasticité w_L et IP , et la ligne A d'équation :

$IP = 0,73 (wL - 20)$ (relation de Casagrande) ; La teneur en matières organiques.

La classification peut également s'effectuer à partir de l'observation visuelle du sol et de tests simples de chantier. Mais il faut une grande expérience pour appliquer correctement Cette méthode de classification.

❖ **La classification des sols fins :**

La classification des sols fins basée sur les critères de plasticité, utilisant les limites d'Atterberg, est une méthode couramment employée en géotechnique pour évaluer les propriétés des sols. Ces limites, à savoir la limite de liquidité (WL) et la limite de plasticité (WP), permettent de déterminer l'indice de plasticité (IP), qui est défini comme la différence entre WL et WP ($IP = WL - WP$).

Le diagramme de plasticité (aussi connu sous le nom de diagramme de Casagrande) est utilisé pour classer les sols selon ces critères. Sur ce diagramme, l'axe des abscisses représente la limite de liquidité (LL) et l'axe des ordonnées représente l'indice de plasticité (IP). Voici comment les différentes catégories de sols sont définies selon leur position sur ce diagramme :

- ✚ Les limons très plastiques : Lt
- ✚ Les limons peu plastiques : Lp
- ✚ Les argiles très plastiques : At
- ✚ Les argiles peu plastiques : Ap

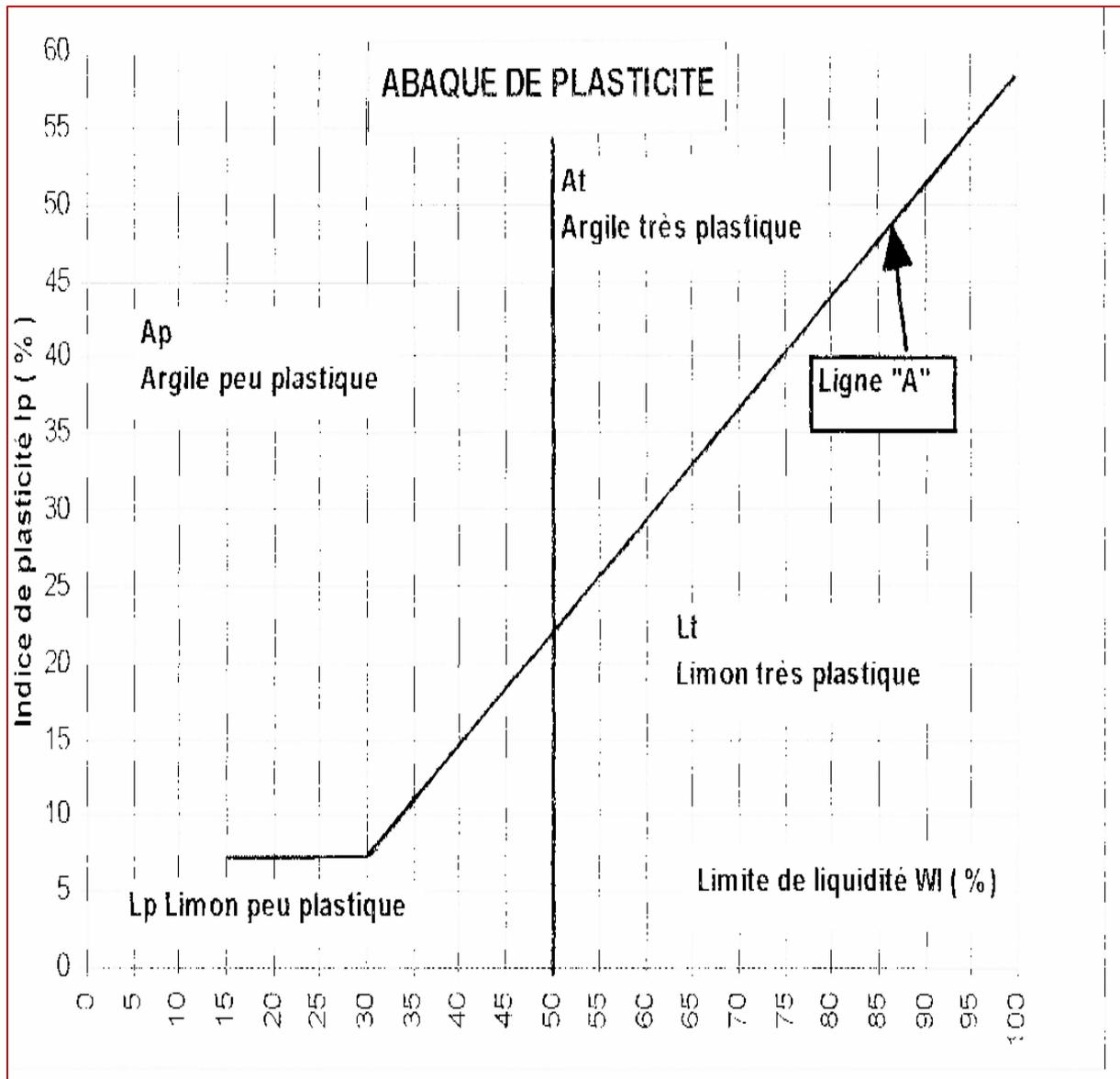


Figure 2-24 : Abaque de Plasticité de Casagrande. Classification LC PC des sols fins.

❖ Sols grenus :

La classification des sols grenus se fait par la granulométrie et les limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le tableau ci-après (Tableau 2-1).

Tableau 2-1 : Classification des sols grenus (plus de 50 % d'éléments > 0,08 mm).

Définitions			Symbole LPC (USCS)	Conditions	Appellations
Graves	Plus de 50% Des éléments > 0,08mm ont un diamètre >	Moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Gb (GW)	$Cu = D_{60}/D_{10} > 4$ et $1 < Cc = (D_{30})^2/D_{10} D_{60} < 3$	Grave Propre bien Graduée
			GM (GP)	Une des conditions de Gb n'est pas satisfaite	Grave Propre mal Graduée
		Plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	GL (GM)	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A	Grave Limoneuse
			GA (GC)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	Grave Argileuse
Sable	Plus de 50% des éléments > 0,08mm ont un diamètre < 2mm	Moins de 5% D'éléments < 0,08mm	SL (SM)	Une des conditions de Sb n'est pas satisfaite	Sable propre mal gradué
			Sm (SP)	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A	Sable Limoneux
		SA (SC)	Limites d'Atterberg au- dessus de la ligne A	Grave Argileux	
Lorsque la teneur en particules fines (< 0,08 mm) est comprise entre 5% et 12% on utilise un double symbole. Par exemple : Sb-SL					

Si le pourcentage de fines est entre 5 et 12 %, le sol sera représenté par deux symboles.

Si le pourcentage de fines est inférieur à 8.5%, le premier symbole est respectivement entre Gb, Gm ou Sb, Sm et le deuxième est respectivement entre

GA, GL ou Gb, GM ; inversement pour un pourcentage de fines supérieur à 8.5%.

Dans le cas des sols fins, si $Wl < 50$, nous avons de l'argile Ap ou du limon Lp peu Plastique ; si $Wl > 50$, nous avons de d'argile At ou du limon très plastique Lt.

Une autre méthode de classification utilisée est celle du Guide de Terrassement Routier GTR. Elle est en fonction du pourcentage de fines, de la valeur au VBS et de l'indice de plasticité.

Classification LPC modifiée :

Les modifications apportées à la classification LPC/USCS concernent uniquement la description des sols organique (ayant une teneur en matières organiques supérieurs à 3%). Seuls les sols contenant moins de 10% de matière organiques continuent d'être classés parmi les sols fins. Pour des teneurs plus élevées en matières organiques, l'accent est mis sur le degré de décomposition (d'humification) des fibres organiques, évalué au moyen du test classification aboutit à vingt –deux types de sols, incluant :

- Les sols grenus (Gb, GM, GA, GL, Sb, SM, SA, SL)
- Les sols fins (At, AP, Lt, LP)
- Les sols faiblement organiques (FO-At, FO-AP, FO-Lt, FO-LP)
- Les sols moyennement organiques (mo-amo-sf,mo-f)
- Les sols très organiques (to-a,to-sf,to-f)

Les symboles pour les sols grenus et les sols fins restent les mêmes que dans la classification LPC /USCS. Pour les sols organiques, les symboles « à », « SF » et « f » désignent respectivement une matière organique amorphe, semi-fibreuse et fibreuse. Tableau2-1 présente le schéma général de la classification des sols LPC modifiée (1974/1980) et détaille les modifications par rapport à la classification LPC/USCS.

❖ Classification GTR :

La classification GTR est la seule d'un réel intérêt pratique et utilisée dans les travaux de terrassement. Sa mise en œuvre est détaillée dans le guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme, d'où son nom de classification GTR.

Elle définit des classes de sols basées sur leur aptitude au compactage en fonction des conditions de chantier et leur comportement mécanique ultérieur. Bien qu'elle prenne en compte les mêmes caractéristiques de base que classification LPC/USCS, elle est plus précise pour les particules argileuses, qui influencent fortement les travaux de terrassement, et considère l'altérabilité des matériaux au fil du temps. Les principes généraux de cette classification sont présentés dans le tableau 2-2. la classification détaillée se trouve dans un guide technique du LCPC et du SETRA ainsi que dans la norme NF P11-300.

On distingue trois familles :

1-Les sols de classes A, B et C.

2-Les matériaux rocheux de classe D.

3-Les sols organiques et sous-produits industriels de classe F.

Les quatre classes de sols (famille 1) sont :

- Classe A : Sols fins
- Classe B : Sols Sableux et graveleux avec fines
- Classe C : Sols comportant des fines et des gros éléments
- Classe D : Sols insensibles à l'eau

Tableau 2-2 : La classification GTR pour les sols A. (d'après la norme NF P 11-300)

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

2.2.1 Etudes des caractéristiques mécaniques des argiles

❖ Comportement mécanique :

Le comportement mécanique des matériaux est défini par des critères qui évaluent les déformations, la compressibilité, la consolidation et la résistance au cisaillement des sols. Ces critères sont dérivés des essais géotechniques en laboratoire, notamment :

- L'essai de compactage Proctor,
- L'essai de cisaillement direct à la boîte,
- L'essai triaxial.
- L'essai œdométrique,

2.2.1.1 Essai Proctor : (NF P 94- 093)

❖ Le But de L'essai :

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

Appareillage :



Figure2-25 : Moule Proctor.



Figure2-26 : Dam Proctor.

**Figure 2-27 :** Une étuve.**Figure2-28 :** Bacs et Balance.

- Règle à araser
- Disque d'espacement
- Tamis 20 mm
- Eprouvette graduée
- Petits récipients (mesures des teneurs en eau)

❖ Principe de la Méthode :

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

❖ Mode opératoire :

- L'ensemble du matériel nécessaire à l'essai est desséché dans une étuve à 50°C jusqu'à un niveau d'humidité considéré comme suffisamment sec avant de débiter l'essai
- Puis il est broyé et tamisé, ne conservant que le tamisât pour l'essai.
- L'échantillon est ensuite humidifié à différentes teneurs en eau, homogénéisé et divisé en cinq échantillons.
- Le compactage se réalise en cinq couches de même épaisseur. Après avoir compacté la dernière couche et retiré la surélévation

- ✓ Le matériau doit dépasser le bord du moule de 1 à 2 cm au maximum. Tout excès est soigneusement nivelé au niveau du moule. Si des grains sont arrachés, laissant des vides à la surface de l'éprouvette, ils sont comblés avec des éléments plus fins et la surface est lissée.
- ✓ Après démoulage, le poids humide est déterminé, puis l'éprouvette est mise à l'étuve pour déterminer le poids sec.
- ✓ Ces opérations sont répétées pour tous les échantillons compactés



Figure 2-29 : les étapes de l'essai Proctor.

2.2.1.2 Essai de cisaillement rectiligne à la boîte (EN P94-071-1)

❖ Objectif :

L'expérimentation vise à évaluer les propriétés de rupture d'un échantillon de sol fin saturé lorsqu'il est soumis à une contrainte de cisaillement direct selon un agencement prédéterminé, à une vitesse uniforme. À des vitesses plus basses et dans des conditions de drainage, il est possible de dériver les valeurs de l'angle de frottement effectif φ' et de la cohésion effective c' , des variables cruciales pour la conception de fondations, les calculs de sécurité pour la stabilité

des pentes et pour établir les forces de poussée et de butée agissant sur les structures de soutènement.

❖ **Principe de l'essai :**

L'échantillon de sol à étudier est placé entre deux demi-bottes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre.

Un piston permet d'exercer sur le sol une contrainte normale s déterminée.

❖ **Appareillage :**



Figure 2-30 : Machine De Cisaillement. **Figure 2-31 :** la boîte de cisaillement.



Figure 2-32 : Une pierre poreuse.

❖ **Déroulement de l'essai :**▪ **Mise en place de l'enchastement dans la boîte :**

Les deux moitiés des boîtes étant fermées à clef, on dispose successivement :

- ✓ Le bas de la boîte,
- ✓ Une pierre poreuse,
- ✓ Une plaque striée,
- ✓ L'échantillon de sol,
- ✓ Une plaque striée identique à la précédente,
- ✓ Le piston.

▪ **Mise en place de la boîte sur la machine :**

- ✓ Positionner l'étrier de charge sur le piston de la boîte,
- ✓ Installer le comparateur vertical et le calibrer à zéro,
- ✓ Fixer l'anneau dynamométrique sur la machine, le connecter à la boîte, et éliminer les jeux en appliquant légèrement une traction sur l'anneau et en ramenant progressivement le comparateur de l'anneau à zéro,
- ✓ Appliquer la charge désirée sur l'échantillon. Désolidariser les deux moitiés des boîtes en retirant les goupilles,
- ✓ Mettre la machine en marche à la vitesse souhaitée.

▪ **Fin de l'essai :**

- Enlève les pois du plateau de charge,
- ✓ Désengager l'anneau dynamométrique,
- ✓ Retire la boîte du chariot et sors l'éprouvette de la boîte,
- ✓ Évaluer le poids spécifique final,
- ✓ Établir la teneur en eau de l'échantillon,
- ✓ Purger soigneusement les pierres poreuses et la boîte



Figure 2 – 33 : Les étapes de L'essai Cisaillement.

2.2.1.3 Essais de compressibilité à l'odomètre (NF P94-090-1)

❖ But de l'essai :

La manipulation a pour but de déterminer les caractéristiques de compressibilité d'un sol qui permet d'estimer le tassement d'un massif de sol, sous l'effet des charges appliquées, le sol va se déformer : il va subir un tassement. Pour en évaluer l'ampleur, on reproduit le phénomène au laboratoire.

❖ Matériels utilisés :

Les odomètres utiliser sont des odomètres a chargement par l'avant, ils sont composés principalement de :



Figure 2-34 : Moule œdométrique métallique **Figure 2-35** : Machine œdométrique.

Rigide de Section cylindrique.

-Bâti de chargement.il comprend essentiellement un levier qui transmet les surcharges au piston.

-Disques de poids connus pour charger l'échantillon.

-comparateur mécanique pour la mesure des tassements.

-deux pierres poreuses avec le papier filtrent. Ce dernier sert à protéger les pierres du colmatage dû aux grains fins.

-chronomètre.

❖ **Mode opératoire :**

- ✓ Commencer le cycle de chargement en plaçant successivement sur le plateau les poids fendus 1, 2,5, 10,20 kg.
- ✓ Noter après chaque application de charge, le tassement en fonction du temps jusqu'à stabilisation du comparateur.
- ✓ Effectuer à nouveau un cycle de déchargement par deux paliers en fonction du temps jusqu'à stabilisation du comparateur
- ✓ Démontez puis pesez immédiatement l'éprouvette de sol.



Figure 2-36 : Les étapes de l'essai odomètre.

2.2.1.4 Essai triaxiale (NF P 94-074)

L'épreuve de pression triaxiale permet de mieux accéder aux propriétés mécaniques des matériaux, car elle altère l'état de contraintes in situ. Ce type d'épreuve permet de surveiller et de Mesurer la pression interstitielle, appliquer une variété de pressions de confinement (isotrope ou anisotrope) pour consolider initialement l'échantillon à un état prédéfini. Les différentes sortes d'essais réalisables sont :

- Essai UU (Unconsolidated-undrained) : essai non consolidé non drainé effectué sur matériau saturé ou non
- Essai CU (Consolidated-undrained) : essai consolidé non drainé sur matériau saturé ou non

- Essai CU+u (Consolidated-undrained) : essai consolidé non drainé sur matériau saturé avec mesure de la pression interstitielle
- Essai CD (Consolidated-drained) : essai consolidé drainé sur matériau saturé

❖ **But de l'essai :**

La détermination de la courbe intrinsèque du sol étudié à fin de calculer la résistance au cisaillement τ sous une contrainte normale s et de déduire les caractéristiques mécaniques (angle de frottement interne) et C (cohésion).

❖ **Appareillage :**



Figure 2-37 : Machine de triaxiale.

❖ **Mode Opérateur ;**

L'essai de compression triaxiale consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à un champ de contrainte uniforme où une pression hydraulique σ_3 est appliquée par l'intermédiaire d'un fluide remplissant la cellule, et une contrainte axiale ou déviatrice ($\sigma_1 - \sigma_3$) est appliquée par l'intermédiaire d'un piston. Dans un essai, l'éprouvette est soumise à un champ de contraintes isotropes jusqu'à une valeur donnée. On maintient ensuite à niveau constant la pression hydraulique représentée par σ_1 et σ_3 , et on augmente progressivement la contrainte axiale σ_1 ou le déviateur ($\sigma_1 - \sigma_3$) jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Les essais peuvent être effectués à différentes pressions de confinement. Dans l'essai de compression triaxiale avec cycles de

chargement-déchargement-rechargement, l'éprouvette est soumise à des sollicitations. À différents niveaux de la contrainte axiale dévia torique (1, 2 et 3), on la décharge jusqu'à l'état hydrostatique, puis on la recharge jusqu'à un niveau de contrainte axiale supérieur au précédent niveau de contrainte axiale de déchargement, et de nouveau, on décharge, et ainsi de suite, jusqu'à la rupture.

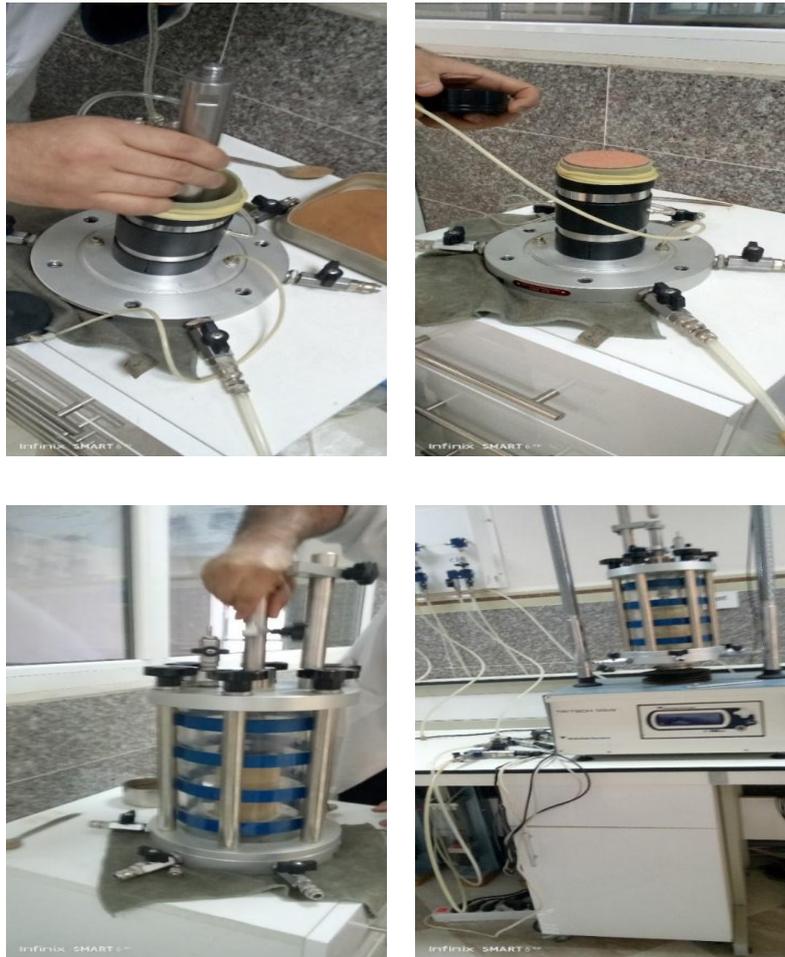


Figure 2-38 : les étapes de l'essai triaxial

2.2.2 Confection des éprouvettes

Principe :

Le principe est de confectionner des éprouvettes en argile auquel on incorpore des déchets de ciment en faisant varier les pourcentage d'eau (10% 12 %14 %et 16 %) et les quantités CKD (0, 5, 10, 15 et 20% en poids) dans cette brique, pour ensuite la soumettre à un ensemble de

teste et protocoles expérimentaux visant à déterminer et évaluer l'effet de ces ajouts sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques cette éprouvette.

❖ **Matériel utilisé :**



FIGURE 2-39 : Malaxeur Mélangeur



Figure 2-40 : Presse Hydraulique



Figure 2-41 : Moules prismatiques (40×40×160) mm³

- Balance
- Broyeur +Tamis (0.20 mm).
- Étuve

❖ **Mode opératoire :**

Cinq séries d'éprouvettes prismatiques ont été confectionnées en fonction des pourcentages d'ajout en déche de ciment (CKD) première série témoin 0%, deuxième série 5%, troisième série 10%, quatrième série 15% et enfin la cinquième série avec 20% en poids) dans chaque série en compte quatre types d'éprouvettes qui diffère par les pourcentages d'eau utilisés pour les confectionnées (10. 12.14.16%).

Pour confectionner ces briques, l'argile préalablement séchée dans l'étuve pendant 24 h à 65 °C est d'abord mélangée à sec avec les (CKD) pour une durée de 2 minutes puis malaxés avec l'eau dans un malaxeur pendant 3 minutes afin d'assurer l'homogénéité et le bon mélange des deux matériaux et l'obtention d'une pâte. Le mélange est ensuite mis en place et compacté juste après le malaxage dans des moules de (4cm ×4cm× 16cm) à l'aide d'une presse hydraulique à charge uniaxiale égale à 20 MPA.



Figure 2-42 : Les etaps de l'essai de Confection

2.2.3 La résistance mécanique

Les essais de traction par flexion et de compression sont menés de façon successive sur les éprouvettes. C'est-à-dire qu'une éprouvette est d'abord testée en traction par flexion, puis, après rupture, les deux parties de l'éprouvette sont testées en compression. Le premier essai est réalisé selon le principe de flexion trois points.

- L'essai est conduit jusqu'à rupture, on obtient la contrainte de rupture dite de traction par flexion.
- Les deux demi-prismes qui résultent de cet essai sont ensuite testés en compression. L'essai est également conduit jusqu'à rupture des demis- éprouvette, pour finalement déterminer la résistance à la compression.



Figure 2-43 : les étapes de l'essai flexion et de compression

2.3 La conductivité thermique

La conductivité thermique est la quantité de chaleur transférée en une unité de temps au travers d'un matériau d'une unité de surface et d'une unité d'épaisseur, quand les deux faces opposées diffèrent d'une unité de température. La conduction thermique est le mode de transfert de chaleur correspondant. Elle s'exprime en $W.m^{-1}.K^{-1}$. Pour un corps donné, sa valeur peut être influencée par la température et par la présence d'impuretés.

❖ Principe de l'essai :

Le principe consiste à placer un élément chauffant qui se présente sous la forme d'un fil entre les surfaces de deux éprouvettes du matériau à caractériser. Le fil délivre un flux de chaleur sous forme d'échelon afin de produire localement un échauffement de quelques degrés du matériau. Cet échauffement est en règle générale mesuré ponctuellement par thermocouple. C'est l'analyse mathématique (grâce un logiciel a interface graphique) de cet échauffement qui permet de déterminer la conductivité thermique.



Figure 2-44 : sonde de fil



Figure2 -45 : appareil CT METRE

○ La sonde se fil :

Selon la norme AFNR B40-303 (épaisseur 0.2mm) destiné à s'insérer entre deux morceaux plans de l'échantillon à mesurer.

○ LE CT METRE :

Appareil aisément transportable, a été élaboré dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les caractéristiques thermiques d'un certain nombre de matériaux, exemple :

(La brique, les roches, le béton...).



Figure 2-46 : Effectuer l'opération de la conductivité thermique.

2

Chapitre III

Résultats expérimentaux et discussion

➤ **L'argile de REMILA**

L'argile de REMILA se trouve dans la région de Bejaia, une ville côtière de la Kabylie en Algérie. La région est connue pour ses riches dépôts d'argile qui sont exploités à la fois industriellement et artisanalement. Cette argile est souvent d'une couleur rougeâtre ou brunâtre en raison de sa teneur en oxyde de fer. Cette teinte distinctive peut varier selon les gisements spécifiques et profondeur d'extraction.

L'argile est couramment utilisée dans la fabrication des produits céramique tels que des briques et des poteries ainsi également employée dans le domaine de construction.

Les artisans utilisent cette argile pour créer des objets décoratifs ; parfois elle est utilisée dans les produits cosmétiques.

En résumé, l'argile de REMILA à Bejaia est un matériau précieux utilisé dans diverses industries grâce à ces propriétés physiques et esthétiques distinctives.



Figure 3-1 : Argile de REMILA

➤ **L'argile de SKIKDA**

L'argile de Skikda est une variété d'argile qui provient de la région de Skikda, une ville portuaire située dans le nord-est de l'Algérie.

Cette argile est utilisée dans divers domaines, notamment la poterie, la céramique, et la construction. Elle est réputée pour sa qualité et ses propriétés favorables à la fabrication de céramiques fines.

L'argile de Skikda est généralement de couleur rouge ou brunâtre en raison de sa teneur en oxydes de fer.



Figure 3-2 : Argile de Skikda

3.1 Expression et résultats des essais

- **Limite de liquidité avec la limite d'atterberg :**

La limite liquidité w_l est la teneur en eau du matériau qui correspond à une fermeture sur 1 cm des lèvres de la rainure après 25 chocs.

- **Limite de plasticité :**

La limite de plasticité w_p est la teneur en eau d'un rouleau de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint 3mm.

- **Indice de plasticité :**

IP est la différence entre les valeurs des limites de liquidité et de plasticité.

3.2 Présentation de résultat

Tableau 3-1 : Limite de liquidité de l'argile Skikda :

	essai 1		essai 2		essai 3		essai 4	
p humide	16,620	17,209	17,959	17,476	16,654	16,319	14,476	16,353
P s sec + tare	14,358	14,862	15,474	15,137	14,466	14,230	12,876	14,319
p tare	9,475	9,802	10,037	10,007	9,619	9,604	9,276	9,763
poid eau	2,262	2,347	2,485	2,339	2,188	2,089	1,600	2,034
p sol sec	4,883	5,060	5,437	5,130	4,847	4,626	3,600	4,556
w(%)	46,32	46,38	45,71	45,59	45,14	45,16	44,44	44,64
moyenne	46,35		45,65		45,15		44,54	
Wl(%)	44,95							

D'après ses résultats on trace une courbe des teneurs en eau fonction du nombre de chocs.

La limite de liquidité (wl) est déterminée graphiquement par la projection du point correspondant à N=25 sur la droite tracée, le point d'intersection est ensuite projeté sur l'axe des teneurs en eau

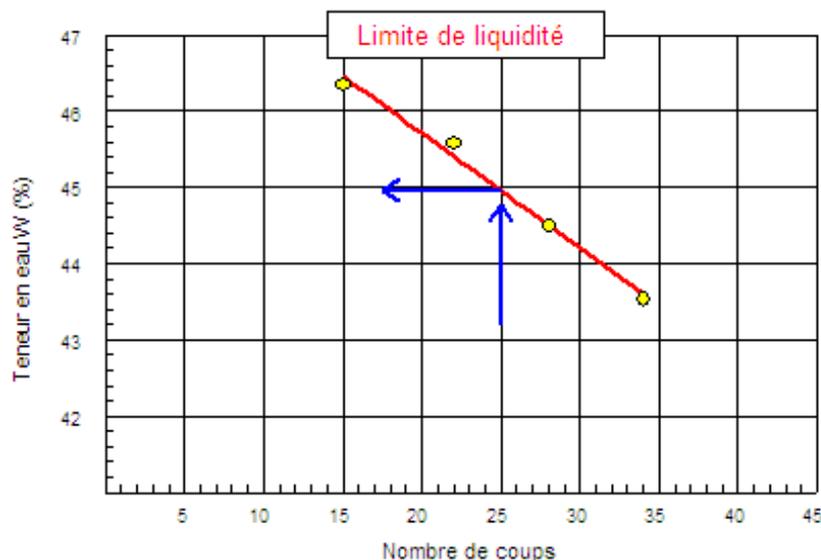


Figure3-3 : Limite de liquidité de l'argile Skikda

Tableau 3-2 : Limite de liquidité de l'argile de RMILA

	essai 1		essai 2		essai 3		essai 4	
p humide	21,025	17,335	20,754	17,985	20,292	19,830	21,712	17,562
P s sec + tare	18,200	15,280	17,580	15,694	17,414	17,273	18,654	15,637
p tare	10,360	9,720	8,608	9,215	9,164	9,958	9,651	9,938
poid eau	2,825	2,055	3,174	2,291	2,878	2,557	3,058	1,925
p sol sec	7,840	5,560	8,972	6,479	8,250	7,315	9,003	5,699
w(%)	36,03	36,96	35,38	35,36	34,88	34,96	33,97	33,78
moyenne	36,50		35,37		34,92		33,87	
wl(%)	35.03							

D'après ces résultats on trace une courbe des teneurs en eau fonction du nombre de chocs.

La limite de liquidité (wl) est déterminée graphiquement par la projection du point correspondant à N=25 sur la droite tracée, le point d'intersection est ensuite projeté sur l'axe des teneurs en eau

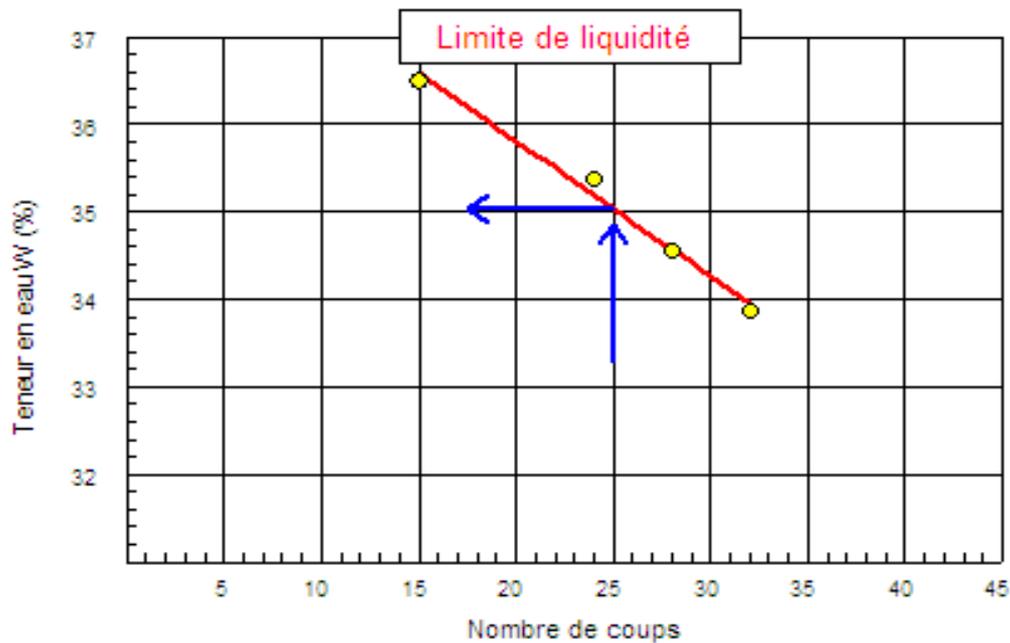


Figure3-4 : limite de liquidité de l'argile Remila

3.2.1 Limite de plasticité WP

Tableau 3-3 : Limite de plasticité de l'argile Skikda :

	essai 1	essai 2	essai 3
p t humid	9,585	10,120	10,736
P s sec + tare	9,485	10,005	10,630
p tare	9,036	9,511	10,156
poind eau	0,100	0,115	0,106
p sol sec	0,449	0,494	0,474
w(%)	22,27	23,28	22,36
WP(%)	22,64		

Tableau 3-4 : Limite de plasticité de l'argile RMILA

	essai 1	essai 2	essai 3
p t humid	11,318	10,452	10,427
P s sec + tare	11,230	10,376	10,336
p tare	10,732	9,937	9,817
poïd eau	0,088	0,076	0,091
p sol sec	0,498	0,439	0,519
w(%)	17,67	17,31	17,53
WP(%)	17,51		

Tableau 3-5 : l'indice de consistance et de plasticité

	l'argile Skikda	l'argile RMILA
Limite de liquidité WL(%)	44.96	35.03
Limite de plasticité WP(%)	22.64	17.51
Indice de Plasticité IP=WL-WP	22.32	17.52
Teneur en eau du sol w(%)	23.634	22.64
Indice de consistance I_c $I_c = \frac{wl-w}{ip}$	0.96	0.71

Tableau 3- 6 : Analyse granulométrique de l'argile de Skikda

Ouvertures des tamis (mm)	Masse de refus cumulés R(g)	Pourcentages des refus cumulés R(%)	Pourcentages des tamis cumuléés T(%)
2	0	0	100
1.25	6	1.2	98.8
1	12	2.4	97.6
0.63	36	7.2	92.8
0.40	56	11.2	88.8
0.25	106	21.2	78.8
0.20	126	25.2	74.8
0.125	186	37.2	62.8
0.100	210	42	58.00

0.080	236	47	53
-------	-----	----	----

Tableau 3-7 : Analyse granulométrique de l'argile de RMILA

Ouvertures des tamis (mm)	Masse de refus cumulés R(g)	Pourcentages des refus cumulés R(%)	Pourcentages des tamis cumulés T(%)
2	0	0	100
1.25	8	1.6	98.4
1	12	2.4	97.6
0.63	16	3.2	96.8
0.40	20	4	96
0.25	24	4.8	95.2
0.20	26	5.2	94.8
0.125	28	5.6	94.4
0.100	30	6	94
0.080	31	6.2	93.8

Tableau 3-8 : Analyse granulométrique par sédimentométrie d'argile de SKIKDA

Temps de lecture	Lecture R densimètre	Température (°C)	D(μm)	Tamisât (%)
30sec	26	23.1	80	52.80
1 min	24	23.1	75	48.83
2 min	22	23.1	55	44.86
5 min	18	23.1	38	36.92
10 min	13.8	23.1	25	28.58
20 min	11	23.1	17	23.03
40 min	8	23.1	12	17.07
80 min	6	23.1	8	13.10
240	4	23.4	5	9.24
1440	02	20	2	4.06

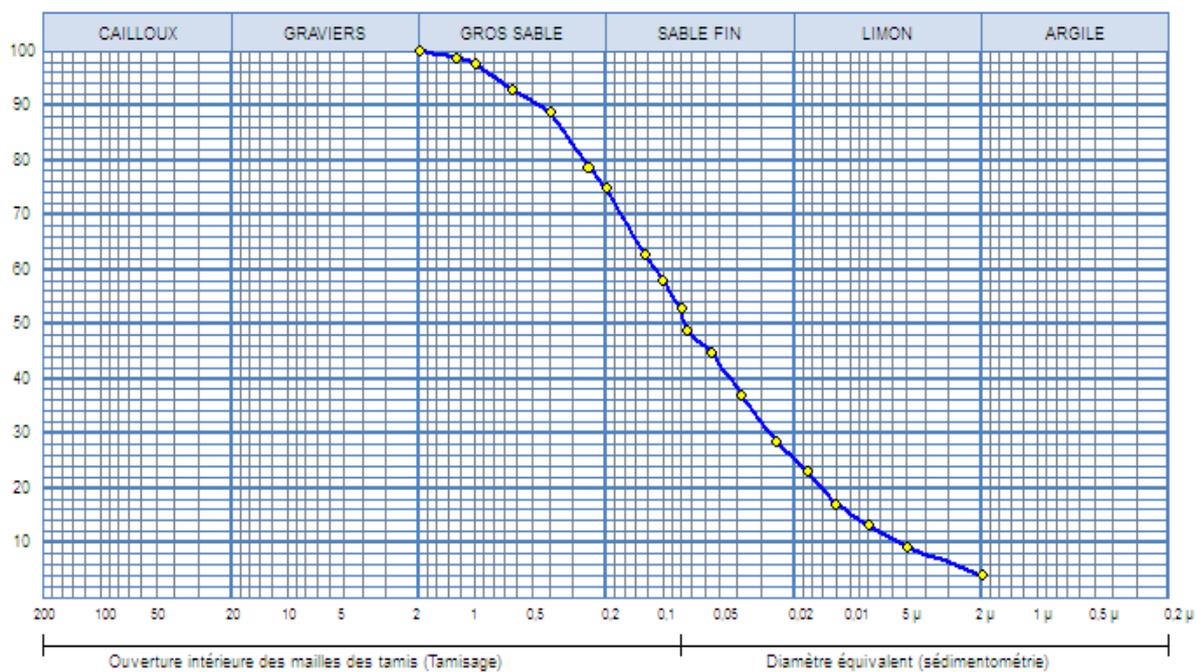


Figure 3-5 : Courbe analyse granulométrique de l’argile de SKIKDA

Tableau 3-9 : Analyse granulométrique par sédimentométrie d’argile de RMILA

Temps de lecture	Lecture R densimètre	Température (°C)	D(μm)	Tamisât (%)
30sec	26	23.1	80	93.8
1 min	24	23.1	75	86.75
2 min	23	23.1	55	83.22
5 min	19	23.1	38	69.12
10 min	16	23.1	25	58.54
20 min	13.8	23.1	17	50.78
40 min	11	23.1	12	40.91
80 min	8	23.1	8	30.33
240	6	23.2	5	2.33
1440	02	22.4	2	8.72

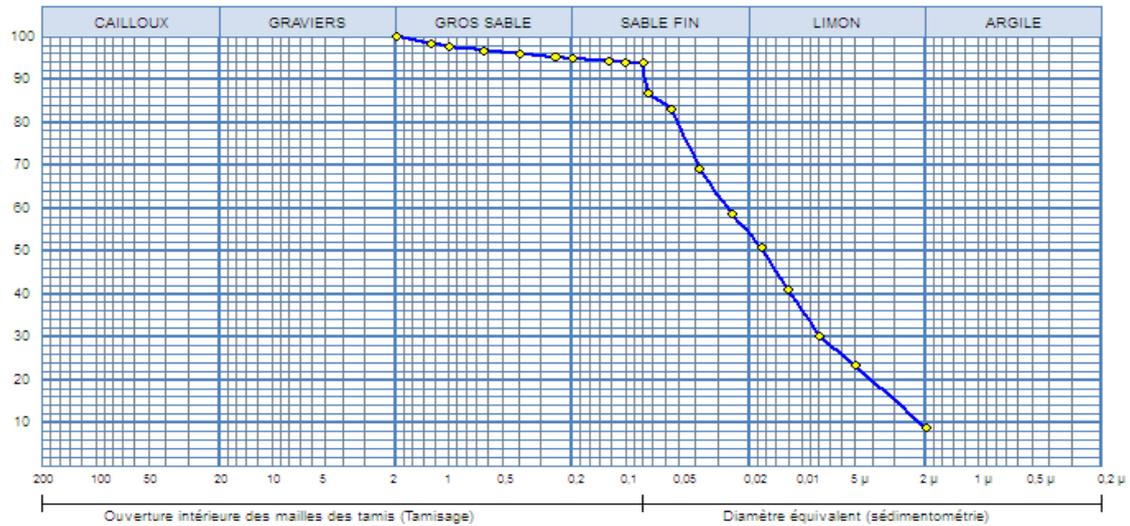


Figure 3-6 : courbe analyse granulométrique de l’argile de RMILA.

3.3 Essai au bleu de méthylène

-valeur de bleu pour la fraction concernée :

$$vB = \frac{VL}{md}$$

-l’activité de bleu de fraction argileuse

L’activité argileuse ACB est le rapport entre la valeur de bleu de méthylène VBS déterminé selon la norme NF P 94-068 est la teneur C2 en particules de dimension inférieures à 2µm estimée selon la norme NF P 94-057

$$ACB = \frac{VBS}{C2}$$

Tableau 3-10 : valeur de bleu méthylène

	Argile de Skikda	Argile de RMILA
Valeur de bleu VBS	1.67	1.86
L’activité de bleu ACB	41.13	21.33

Valeur de bleu d’argile de Remila et de Skikda est seuil entre les sols sablo argileux, peu plastiques et sols limoneux $1,5 < VBS < 2,5$.

3.4 Classification des argiles

3.4.1 Limite d'atterberg

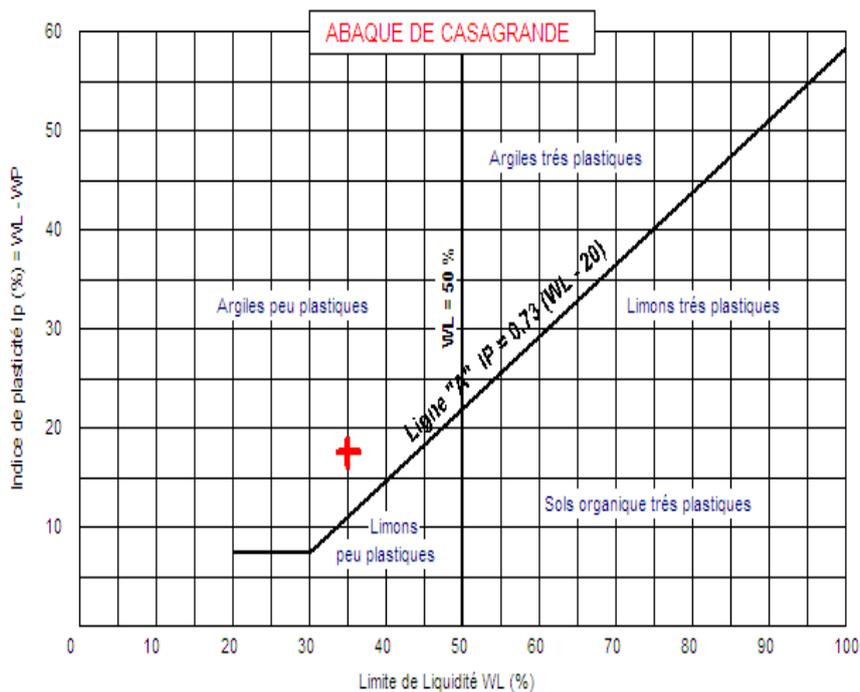


Figure3-7 : Abaque de Plasticité de Casagrande. Classification LC PC des sols REMILA

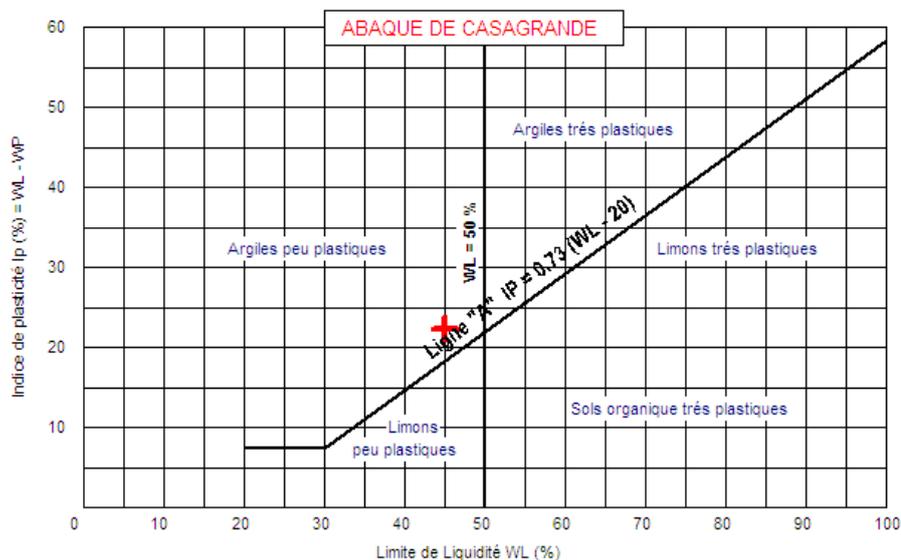


Figure3-8 : Abaque de Plasticité de Casagrande. Classification LC PC des sols SKIKDA.

-La projection des résultats obtenus à partir de l'expérience terminée sur le graphique présenté dans l'image ci-dessus, nous concluons que :

- Argile de Skikda peu plastique.

- Argile de RMILA peu plastique

Tableau 3-11 : l'absorption d'eau

Absorption d'eau	Wl
Faible	20 à 10
Moyenne	25 à 50
élevée	50 à 70
Très élevée	Au –delà de 70

-l'absorption de l'eau par des argiles de Skikda et RMILA est moyenne.

-Le gonflement des argiles s'accroît avec l'augmentation de l'eau absorbée, Dakshanamurthy et Raman (1973) donnent une relation entre la limite de liquidité et le gonflement des argiles.

Tableau 3-12 : classification proposée par Dakshanamurthy et Raman (1973).

Limite de liquidité Wl	Classification
0-20	Non gonflent
20-35	Gonflent faible
35-50	Gonflent moyen
50-70	Gonflent élevé
70-90	Gonflent très élevé
>90	Gonflent critique

En se référant aux limites d'atterberg le gonflement de l'argile de Skikda et l'argile de RMILA est moyen.

3.4.2 La plasticité

Les éléments inférieurs à 400µm contenus dans un sol sont caractérisés au moyen des limites d'atterberg et de l'indice de plasticité (Tableau 3-13) :

Tableau 3-13 : Qualificatif de la fraction du sol constituée d'éléments inférieurs à 400µm en fonction de l'indice de plasticité afnor P94-011

Indice de plasticité	Qualificatif
$IP \leq 12$	Non plastique
$12 < IP \leq 25$	Peu plastique
$25 < IP \leq 40$	Plastique
$IP > 40$	Très plastique

-l'indice de plasticité pour les argiles de Skikda et RMILA est peu plastique.

Ainsi, la classification de Ranganatham et satyanarayana (1955) donnée par le tableau

Tableau 3-14 : potentiel de gonflement d'après Ranganatham et Satyanarayana (1965).

IP	Potentiel de gonflement
>35	Très élevé
20-35	Elevé
10-20	Moyen
<10	Faible

A partir des résultats de la tendance réalisée, nous puissions dans les données du tableau ci-dessus le potentiel de gonflement de l'argile de Skikda est élevé, et RMILA est moyenne.

Valeur au bleu méthylène :

Les résultats de cet essai montrent que, la petite quantité de bleu méthylène absorbé par les argiles de Skikda et RMILA est faible.

D'après Bigot et Zerhoun, (2000) on peut savoir la susceptibilité de variation de volume en fonction de valeur au bleu adsorbé (Tableau 3-14).

Tableau 3-15 : la susceptibilité de variation de volume en fonction de V_{BS} Bigot et zerhouni, 2000.

V_{BS}	Susceptibilité de variation de volume du sol
>6	Fort
$2 < V_{BS} < 6$	Moyen
<2	Faible

-Résultats de l'expérience sur le bleu méthylène et des données du tableau ci-dessus nous concluons que

- -l'argile de Skikda est faible.
- -l'argile de RMILA est faible.

Tableau 3-16 : Qualificatif de fraction argileuse d'après La norme afnor P 94-011

Activité de la fraction argileuse du sol	Qualificatif
$0 \leq A_{CB} \leq 3$	Inactive
$3 < A_{CB} \leq 5$	Peu active
$5 < A_{CB} \leq 13$	Moyenne
$13 < A_{CB} \leq 18$	Active
$18 < A_{CB}$	Très active

-D'après les expériences qui ont été faites et d'après le tableau ci –dessus, nous concluons que :

- L'argile de Skikda très active.
- L'argile de RMILA très active.

3.4.3 La Consistance

Indice de consistance I_c Situe la teneur en eau w (en générale, la teneur en eau naturelle W_{nat}) mesurée sur fraction granulométrique que les limites d'Atterberg, par rapport aux limites d'atterberg.

Tableau3-17 : Qualificatif du sol en fonction de l'indice de consistance afnor P94-011

I_c	<0	$[0-0.25]$	$[0.25-0.5]$	$[0.5-0.75]$	$[0.75-1]$	>1
Consistance	Liquide	Très molle	Molle	Ferme	Très ferme	Dure

- L'argile de SKIKDA est très ferme.
- L'argile de RMILA est très ferme.

3.5 Les caractéristiques de compactage

3.5.1 Argile de SIKIKDA

✓ Essai Proctor sans ajout

La figure suivante présente la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, à l'état naturel

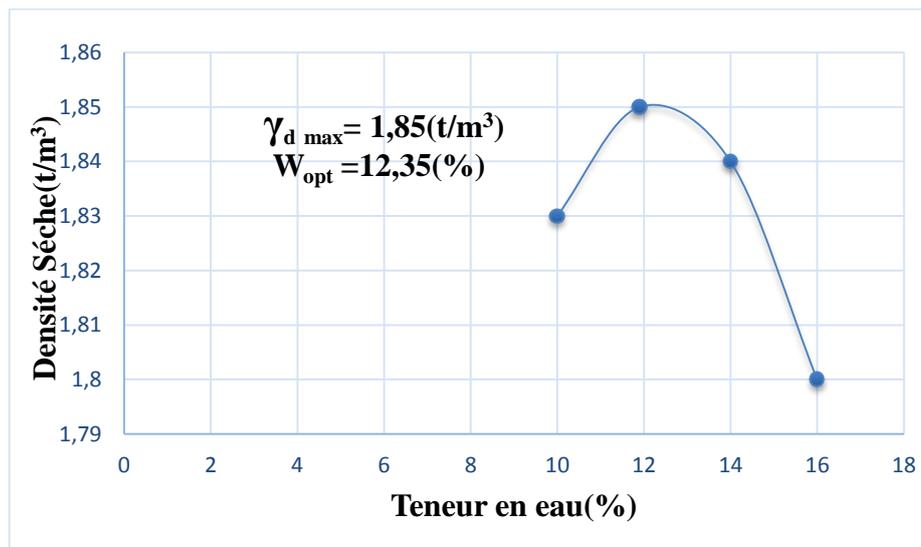


Figure 3-9 : courbe Proctor (sans ajout)

Tableau 3-18 : Résultats des mesures

W (%)	10,0	11,9	14 ,0	16,0
Densité (T/m³)	1,83	1,85	1,84	1,80

✓ Ajout de 5 % CKD

La figure suivante présente la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec ajout de 5% de CKD

Tableau 3-19: résultats des mesures

W(%)	7,6	10,7	11,7	13,6
Densité (T/m³)	1,77	1,82	1,80	1,74

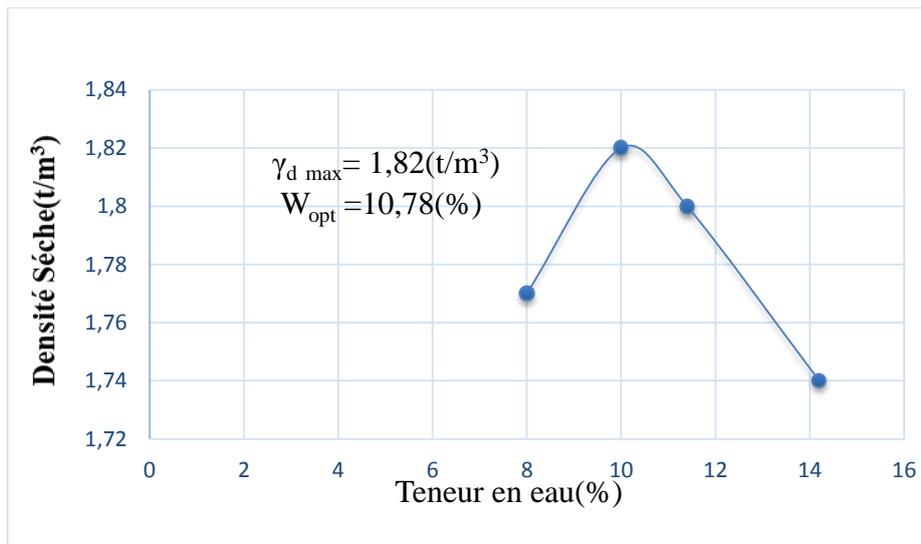


Figure 3-10 : courbe Proctor (ajout de 5% CKD)

Tableau 3-20: résultats des mesures

W(%)	8,0	10,0	11,4	14,2
Densité (T/m³)	1,77	1,82	1,8	1,73

✓ Ajout de 10% de CKD

La figure suivante présente la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec de 10% de CKD

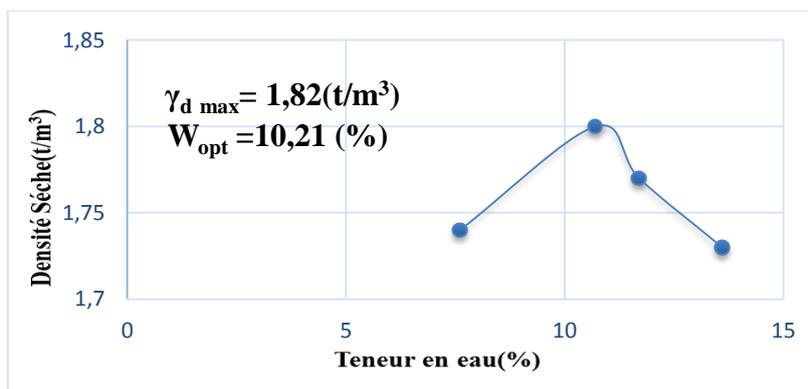


Figure 3-11: courbe Proctor (ajout de 10% de CKD)

✓ Ajout de 15% de CKD

La figure suivante présente la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec de 15% de CKD

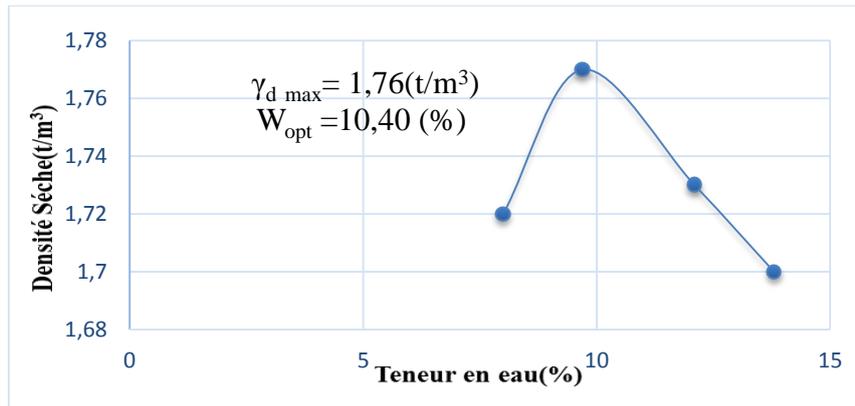


Figure 3-12 : courbe Proctor (ajout de 15% CKD)

Tableau 3-21 : résultats des mesures

W(%)	8,0	9,7	12,1	13,8
Densité (T/m ³)	1,72	1,77	1,73	1,70

✓ Ajout de 20% de CKD

La figure suivante présente la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec de 20% de CKD

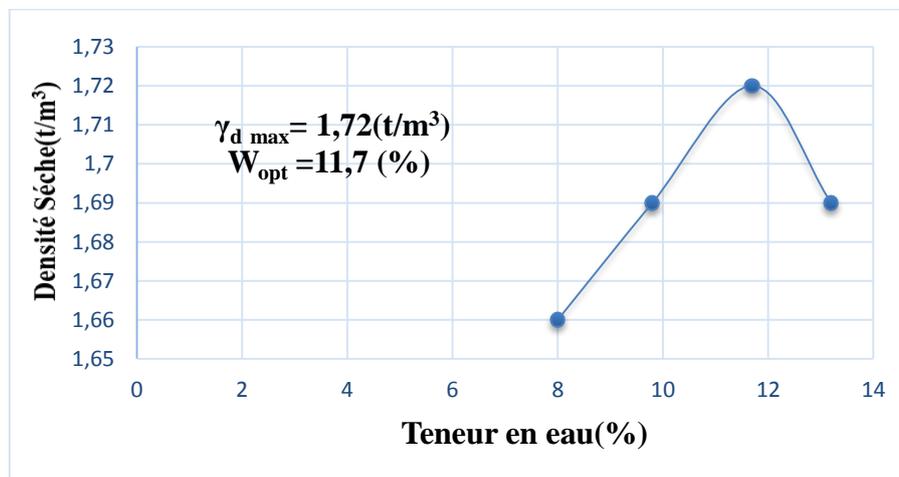


Figure 3-13 : courbe Proctor (ajout de 20% CKD)

Tableau 3-22 : résultats des mesures

W(%)	8,0	9,8	11,7	13,2
Densité (T/m ³)	1,66	1,69	1,78	1,70

3.5.2 Argile de Relima

Tableau 3-23 : résultats des mesures

W(%)	8	10,2	11,4	13,1
Densité (T/m ³)	1,88	1,95	1,91	1,90

✓ Essai Proctor sans ajout

La figure suivante présente la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, à l'état naturel

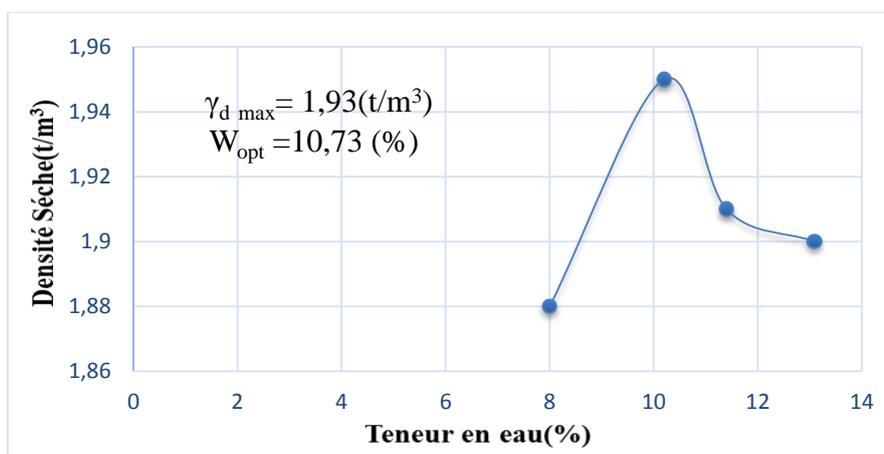


Figure 3-14 : courbe Proctor (sans ajout)

✓ Ajout de 5% de CKD

La figure suivante présente la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec de 5% de CKD

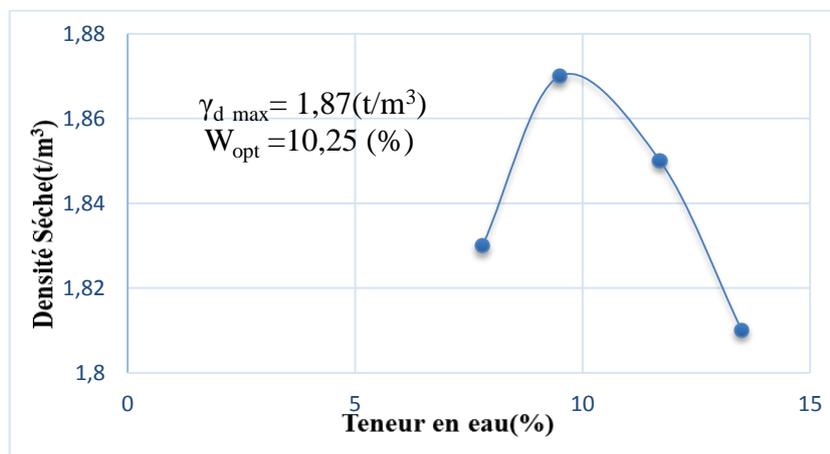


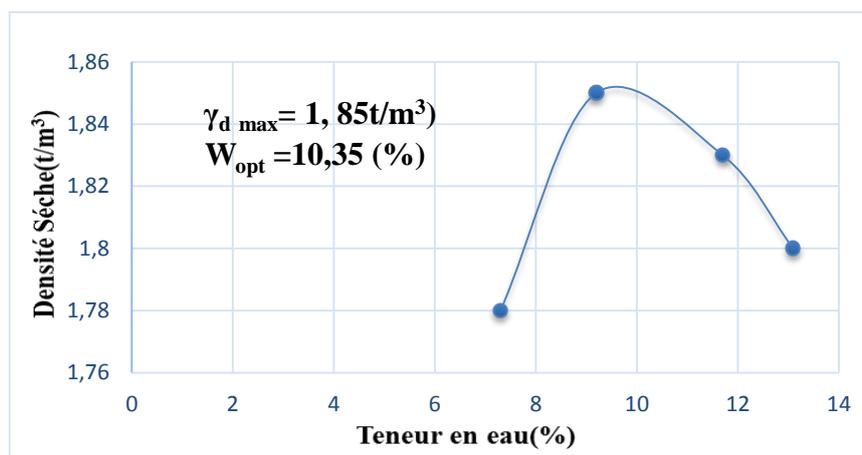
Figure 3-15: courbe Proctor (ajout de 5% CKD)

Tableau 3-24 : résultats des mesures

W(%)	7,8	9,5	11,7	13,5
Densité (T/m ³)	1,83	1,87	1,85	1,81

✓ **Ajout de 10% de CKD**

La figure suivante présente la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec de 10% de CKD

**Figure 3-16:** courbe Proctor (ajout de 10% CKD)**Tableau 3-25 :** résultats des mesures

W(%)	7,3	9,2	11,7	13,1
Densité (T/m ³)	1,78	1,85	1,83	1,80

✓ **Ajout de 15% de CKD**

La figure suivante présente la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec de 15% de CKD

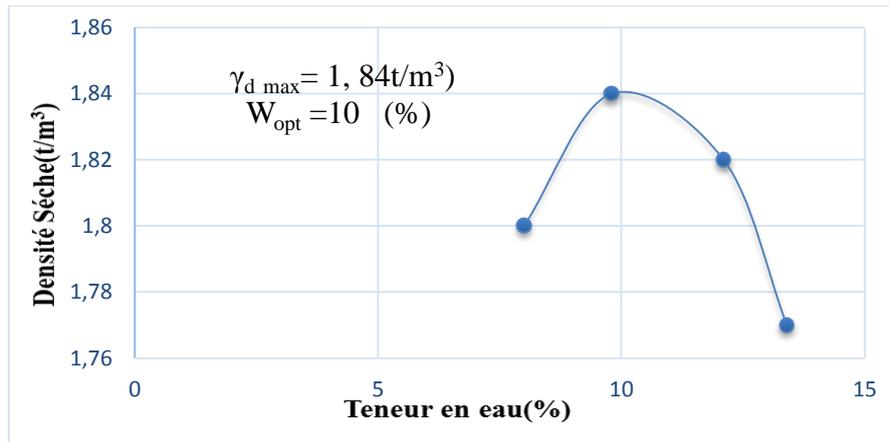


Figure 3-17: courbe Proctor (ajout de 15% CKD)

Tableau 3-26 : résultats des mesures

W(%)	8	9,8	12,1	13,4
Densité (T/m³)	1,80	1,84	1,82	1,77

✓ Ajout de 20% de CKD

La figure suivante présente la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec de 20 % de CKD

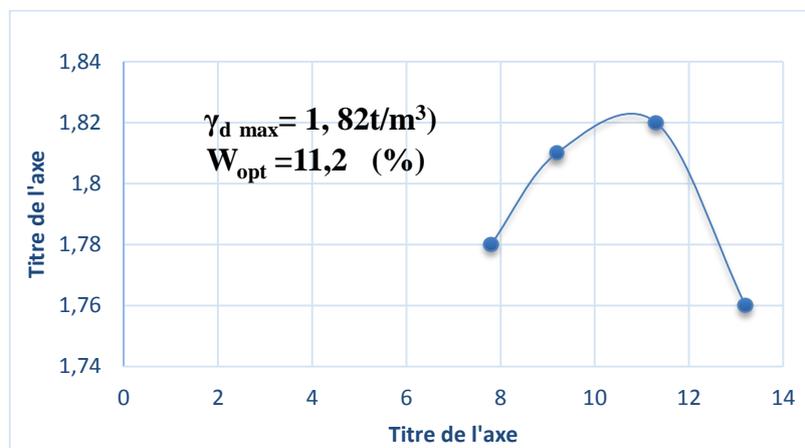


Figure 3-18 : courbe Proctor (ajout de 20% CKD)

Tableau3-27 : résultats des mesures

W(%)	7,8	9,2	11,3	13,2
Densité (T/m³)	1,78	1,81	1,82	1,76

3.6 Interprétation des résultats

- Argile de SKIKDA :

3.6.1 La variation de la teneur en eau en fonction du pourcentage d'ajout

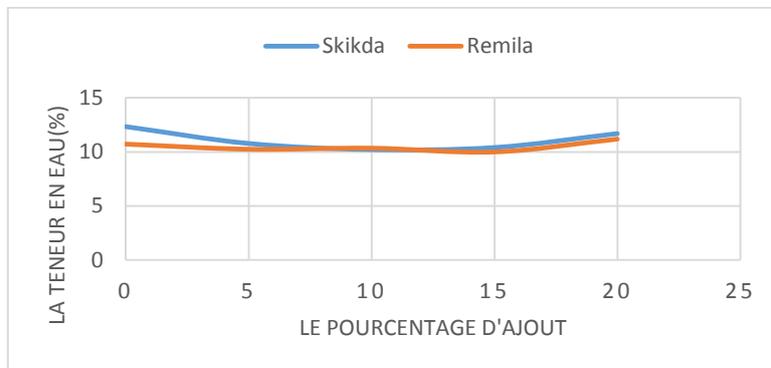


Figure 3-19 : la variation de la teneur en eau en fonction du pourcentage d'ajout

A travers la **Figure 3-19**, on constate une augmentation de la teneur en eau en fonction du pourcentage d'ajout, cela peut s'expliquer par la structure des grains de CKD qui est poreuse, donc une rétention d'eau pas nulle.

3.6.2 La variation de la masse volumique sèche du pourcentage d'ajout

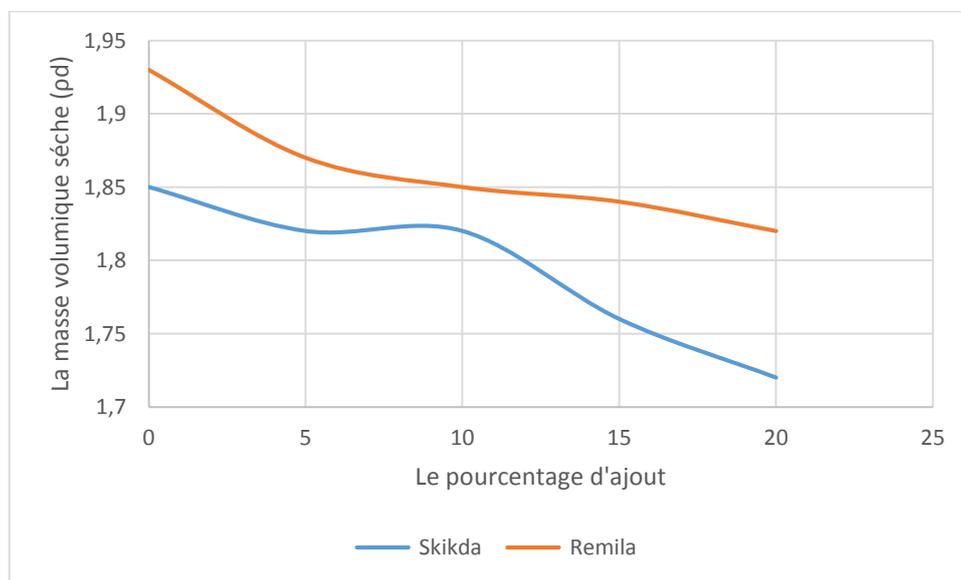


Figure 3-20 : La variation de la masse volumique sèche en fonction de pourcentage d'ajout

D'après la **Figure 3-20**, dans laquelle on remarque une diminution de la masse volumique sèche fonction du pourcentage d'ajout, Cette diminution est due à l'agglomération des grains de CKD et les particules d'argile.

3.6.1 Superposition des courbes

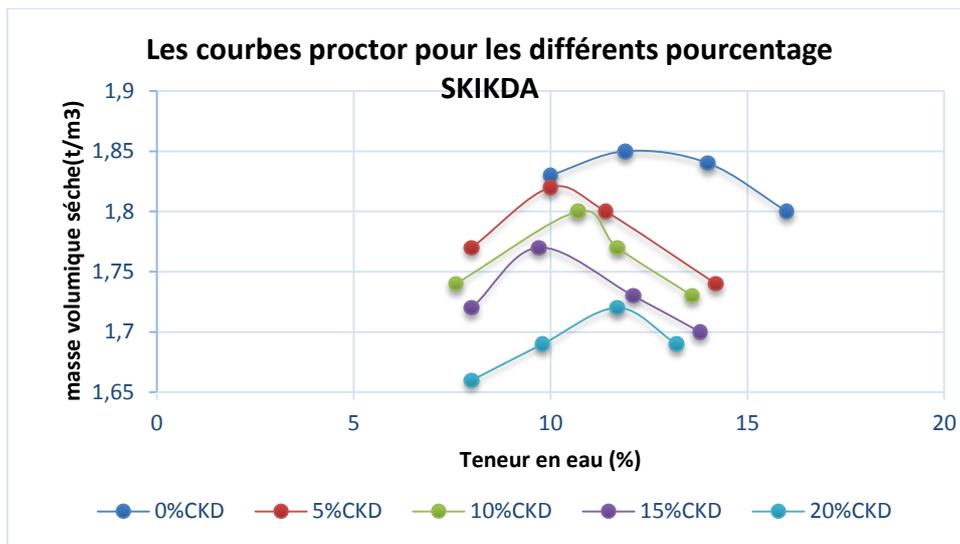


Figure 3-21 : Les courbes Proctor pour les différents ajouts de l’argile de SKIKDA

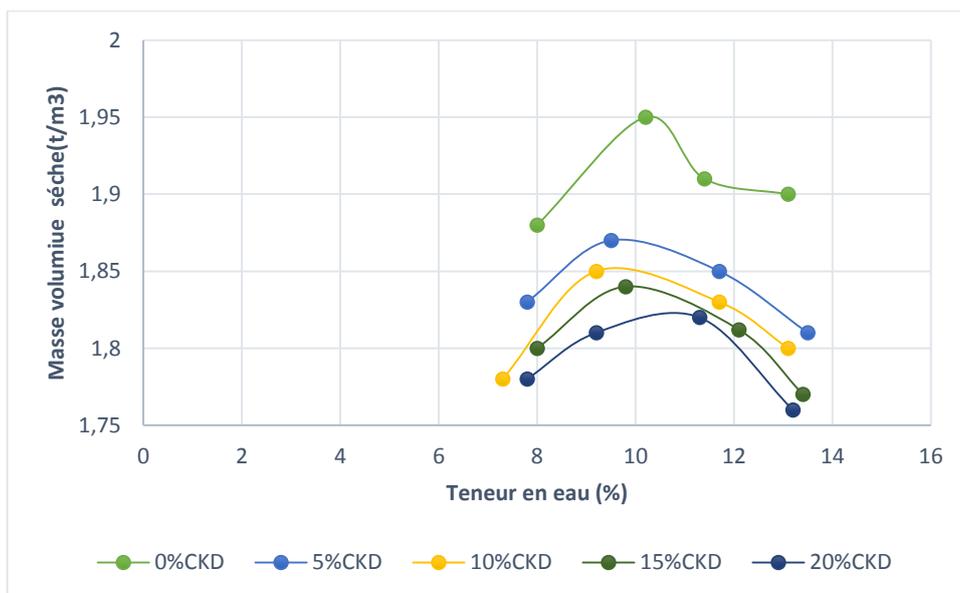


Figure 3-22 : Les courbes Proctor pour les différents ajouts de l’argile de REMILA

A travers la figure 3-21 et 3-22 ou sont représentés les différentes courbes Proctor pour les différents ajouts (5%,10%,15%,20%), on constate que les valeurs des teneurs en eau optimales (W_{opt}) diminuent et que la masse volumique sèche (ρ_d) augmente avec l’augmentation du pourcentage de CKD ajouté.

Cela est interprété par l’agglomération des particules de CKD avec les particules d’argile ce qui a permis une augmentation la masse volumique sèches.

La diminution des teneurs en eau avec l'augmentation du pourcentage d'ajout est due à l'augmentation des grains de CKD contenue dans le sol, ces grains n'obtiennent pas de pores, alors elles laissent l'eau s'infiltrer facilement, donc le sol sera de plus en plus perméable.

3.7 Les résultats de l'odomètre

❖ Argile de SKIKDA (Argile naturelle) :

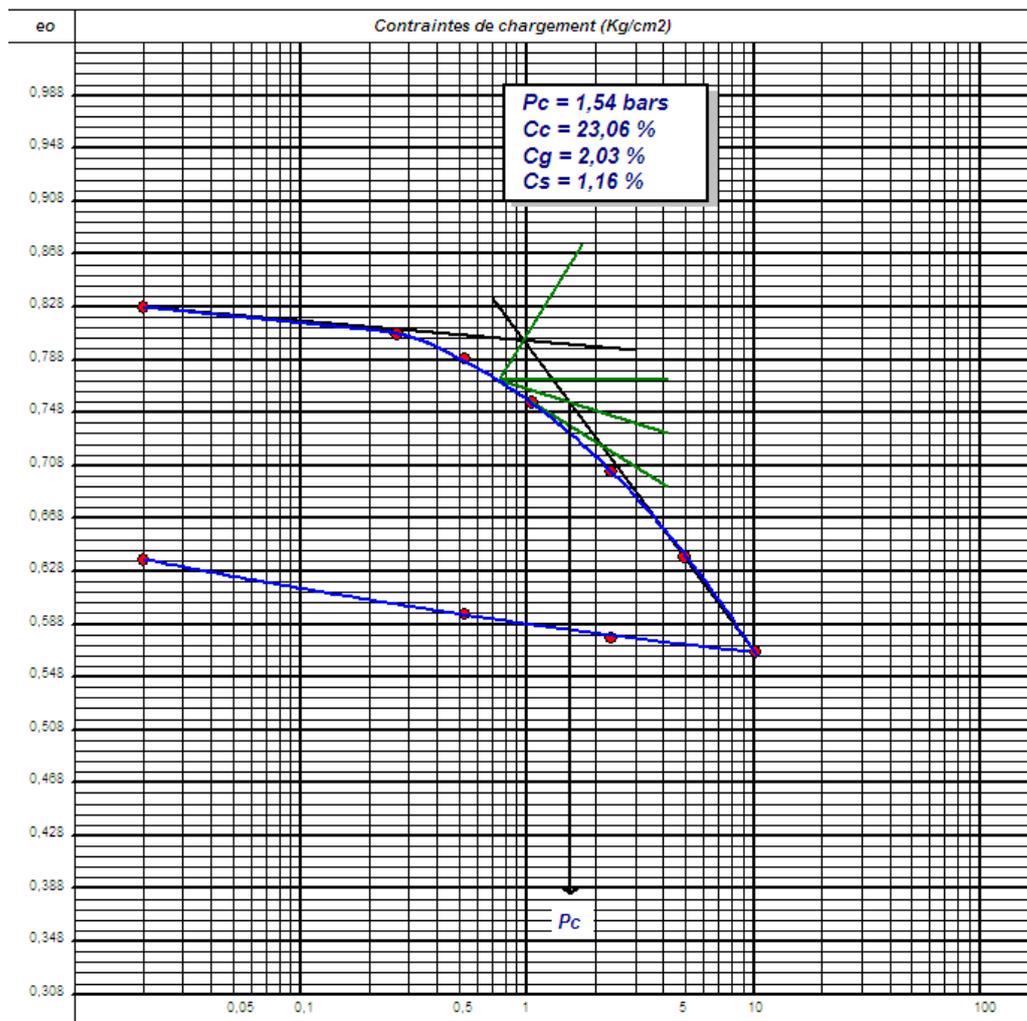


Figure 3-23 : courbe de compressibilité de l'argile naturelle

Les résultats indiquent un sol assez compressible avec une pression de préconsolidation notable. Voici quelques implications pratiques :

***Consolidation primaire** : le sol subira une consolidation primaire significative sous des charges applicables, étant donné le coefficient de compressibilité primaire élevé ($C_c = 23,06\%$)

* **Conception Secondaire** : Bien que moins significative que la consolidation primaire, une certaine consolidation secondaire ($C_g = 2,03\%$ et $C_s = 1,16\%$) se produira également sur une période prolongée, ce qui peut affecter les structures posées sur ce sol à long terme.

***Conception des fondations :** les ingénieurs doivent prendre en compte la haute compressibilité ($C_c=23,06\%$) du sol pour concevoir les fondations appropriées, en s'assurant que les charges appliquées ne dépassent pas la pression de pré consolidation ($p_c=1,54\text{bar}$).

***Evaluation des déformations :** il est crucial d'évaluer les déformations potentielles à court et à long terme pour éviter des problèmes structuraux futurs.

Ces résultats peuvent être utilisés pour prévoir le comportement du sol sous des charges futures et pour concevoir des fondations et des structures appropriées pour minimiser les risques de déformations excessives

❖ **Argile de REMILA (Argile naturelle) :**

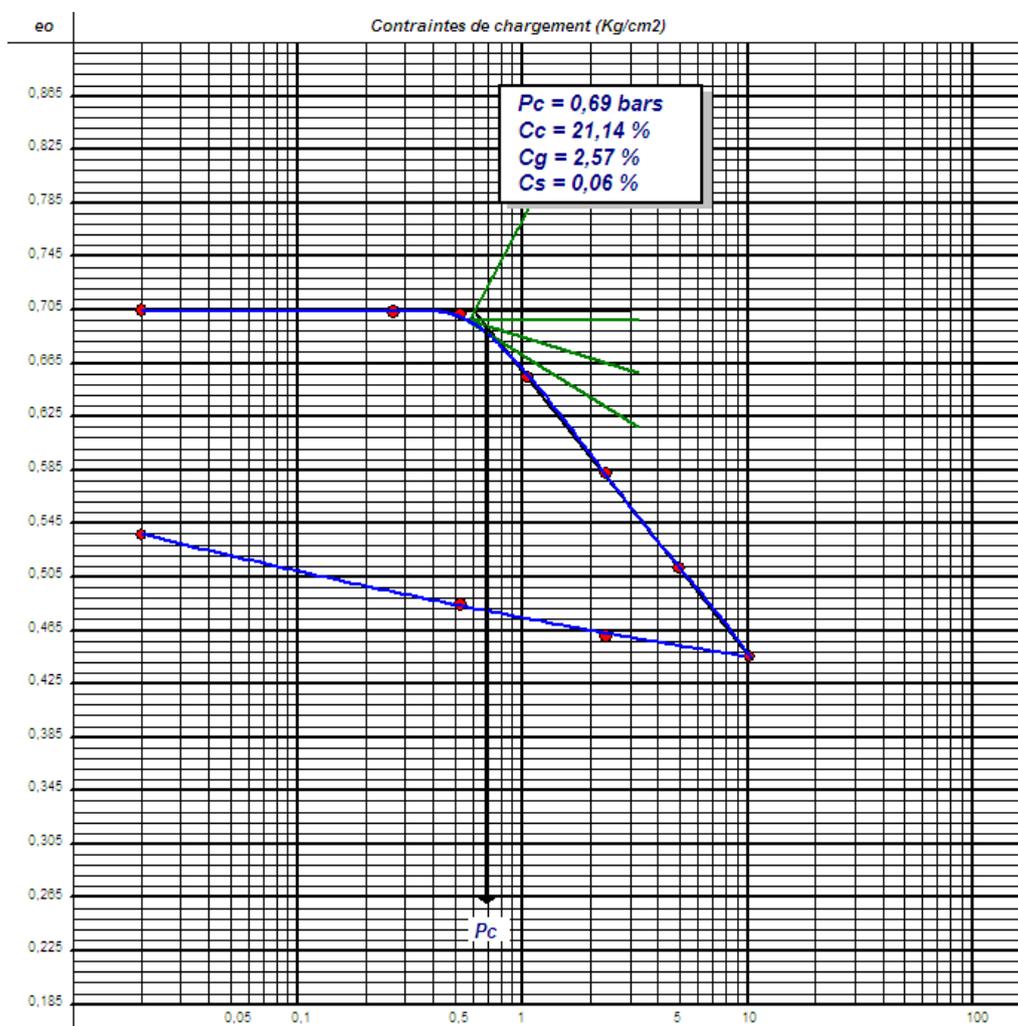


Figure 3-24 : courbe de compressibilité de l'argile naturelle

Consolidation antérieure : la pression de préconsolidation de 0,69bar indique que le sol a été soumis à cette pression auparavant et a déjà subi une consolidation partielle.

***compressibilité :** l'indice de compression élevé (21,14%) indique que le sol est très compressible sous de nouvelles charges, ce qui est typique des sols argileux ou limoneux sensibles.

***Gonflement :** un indice de gonflement de 2,57% montre que le sol a une tendance modérée à gonfler lorsqu'il est déchargé, ce qui peut causer des problèmes de stabilité pour les structures construites sur ce sol.

***consolidation lente :** le coefficient de consolidation faible (0,06%) suggère que le processus de consolidation sera lent, nécessitant plus de temps pour atteindre la stabilisation sous des charges appliquées.

Les paramètres indiquent un sol potentiellement problématique en termes de stabilité et déformation sous des charges nouvelles. Une attention particulière doit être portée à la conception des fondations et au contrôle de l'humidité pour assurer la stabilité à long terme des structures sur ce sol

Echantillon Skikda

Essai de cisaillement rectiligne-caillement direct

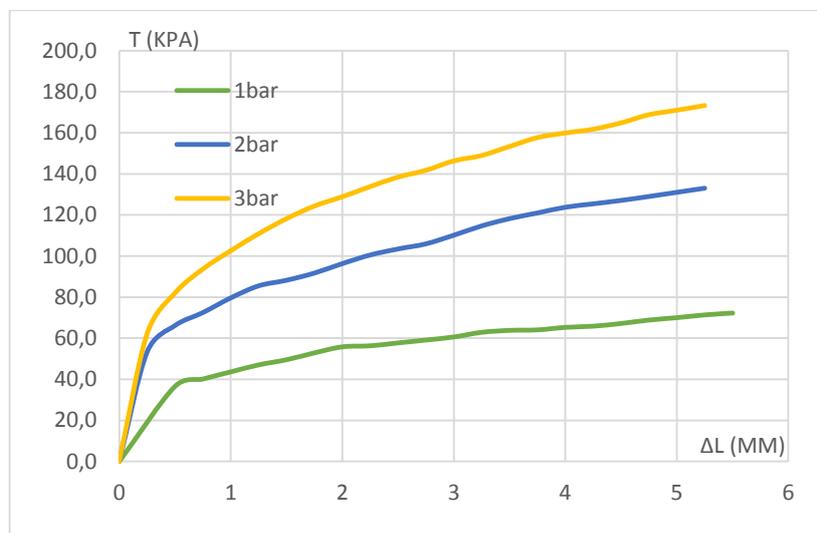


Figure3-25 : La contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal à 1, 2 ,et 3 bar

Les résultats de l'essai de cisaillement du sol naturelle, montrent une augmentation de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal, après chaque chargement comme représenté sur la figure3-25la contrainte tangentielle maximale à 3bar est de 173 ,3Kpa

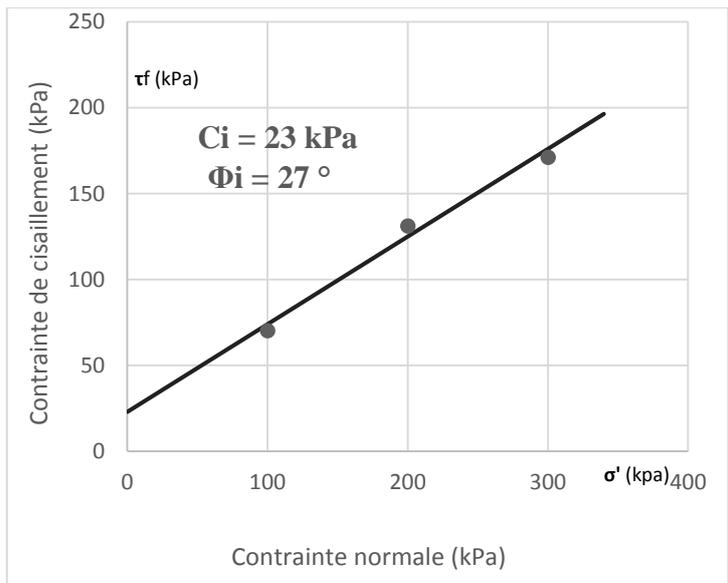


Figure 3-26 : La contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale

Les résultats obtenus, d’après la courbe de contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale représentée sur la figure 3-26 sont :

- La cohésion =23 KPA
- L’angle de frottement interne =27°

Echantillon REMILA

Essai de cisaillement rectiligne –cisaillement direct

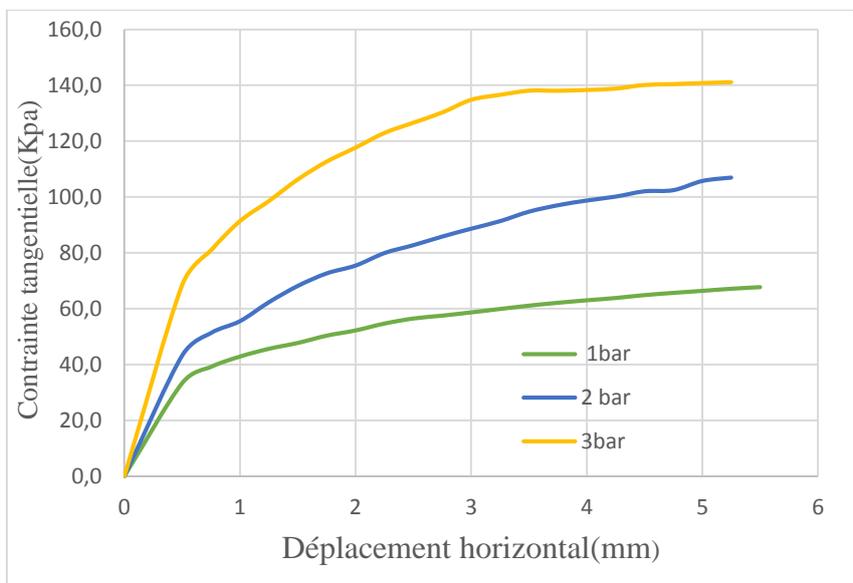


Figure 3-27 : La contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal à 1, 2 ,et 3 bar

Les résultats de l'essai de cisaillement du sol naturelle, montrent une augmentation de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal, après chaque chargement comme représenté sur la figure 3-27 la contrainte tangentielle maximale à 3bar est de 141 ,1Kpa

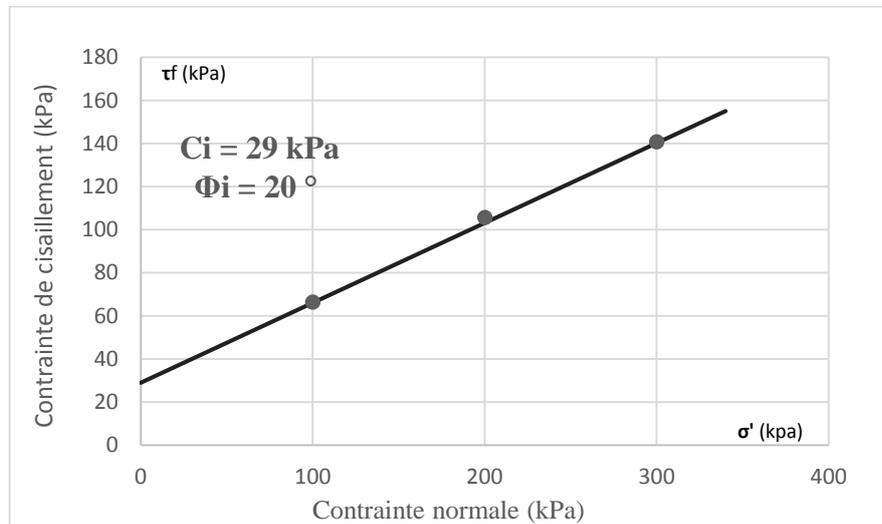


Figure 3-28 : La contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale

Les résultats obtenus, d'après la courbe de contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale représentée sur la figure 3-28 sont :

- La cohésion =29 KPa
- L'angle de frottement interne =20°

Essai triaxiale

*L'argile de REMILA

$C' = 32,2 \text{ KPa}$

$\varphi' = 22,8^\circ$

* l'argile de Skikda

$C' = 55,1 \text{ KPa}$

$\varphi' = 22,4^\circ$

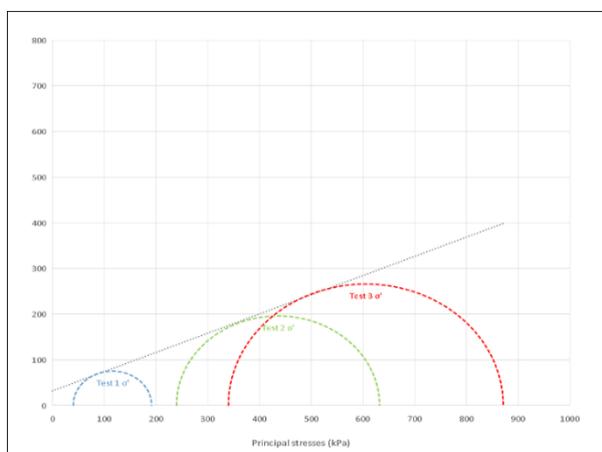


Figure 3-29 : cercle de Mohr

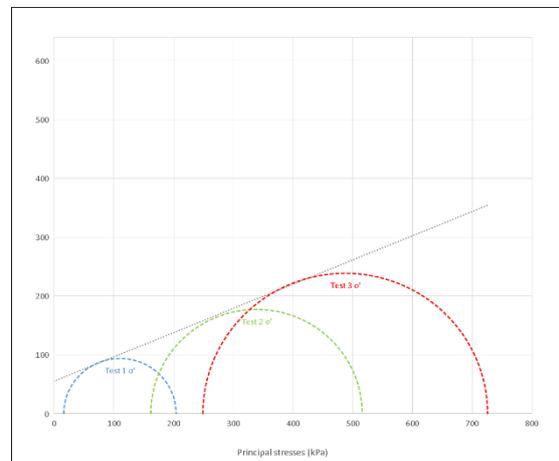


Figure 3-30 : cercle de Mohr

En à répéter l'essai 3 fois

Le cercle de Mohr a la rupture les contraintes effectives

-le cercle de Mohr de premier essai

-le cercle de Mohr du deuxième essai

-le cercle de Mohr du troisième essai

Puisque que si je suis arrivée à la rupture tous les cercles ils sont tangente a la résistance du sol au cisaillement qui donner par la formule suivante $\tau' = c' + \sigma' \tan \varphi'$

Donc tout résistant au cisaillement du sol

τ' = La résistance au cisaillement.

C' = la cohésion effective du sol.

σ' = est la contrainte normale du sol effective appliquer.

φ' = l'angle de frottement effective du sol.

Quesque on remarque sur ce schéma si en augmente σ_0 le cercle de rupture sera plus grand

Plus σ_3 devient plus grand plus le cercle devient plus grand

C'est-à-dire si le sol est plus consolidé plus la marge entre cette contrainte de consolidation et la contrainte qui vas donner la rupture est plus grande cette marge est plus grand c'est-à-dire il y a un espace là où le sol pourrait appliquer les contraintes supplémentaires c'est-à-dire plus σ_3 est plus important la contrainte de consolidation est plus grande le sol est plus consolide plus devient plus fort ne pouvant appliquer les contraintes plus importante avant d'arriver a la rupture .

La cohésion : est une mesure de l'attraction ou de la force interne entre les particules d'un matériau. C'est la partie de la résistance au cisaillement d'un matériau qui indépendante de la contrainte normale. C'est la force qui maintient ensemble les particules du sol, même en l'absence de toute pression externe.

L'angle de frottement : l'angle de frottement interne est une mesure de la résistance au glissement des particules de sol les unes contre les autres. Il présente l'angle au quel un matériau Commencera à se déformer ou à glisser sous l'effet d'une contrainte de cisaillement. Plus l'angle de frottement élevé, plus le sol a une résistance au cisaillement importante. Cet angle

dépend de la texture, de la granulométrie et de la forme des particules du sol. L'angle de frottement est mesuré en degrés.

Les deux paramètres sont essentiels pour déterminer la stabilité des pentes, la capacité portante des fondations, et pour concevoir divers ouvrages en génie civil.

Résultats et discussion

Résistance à la compression

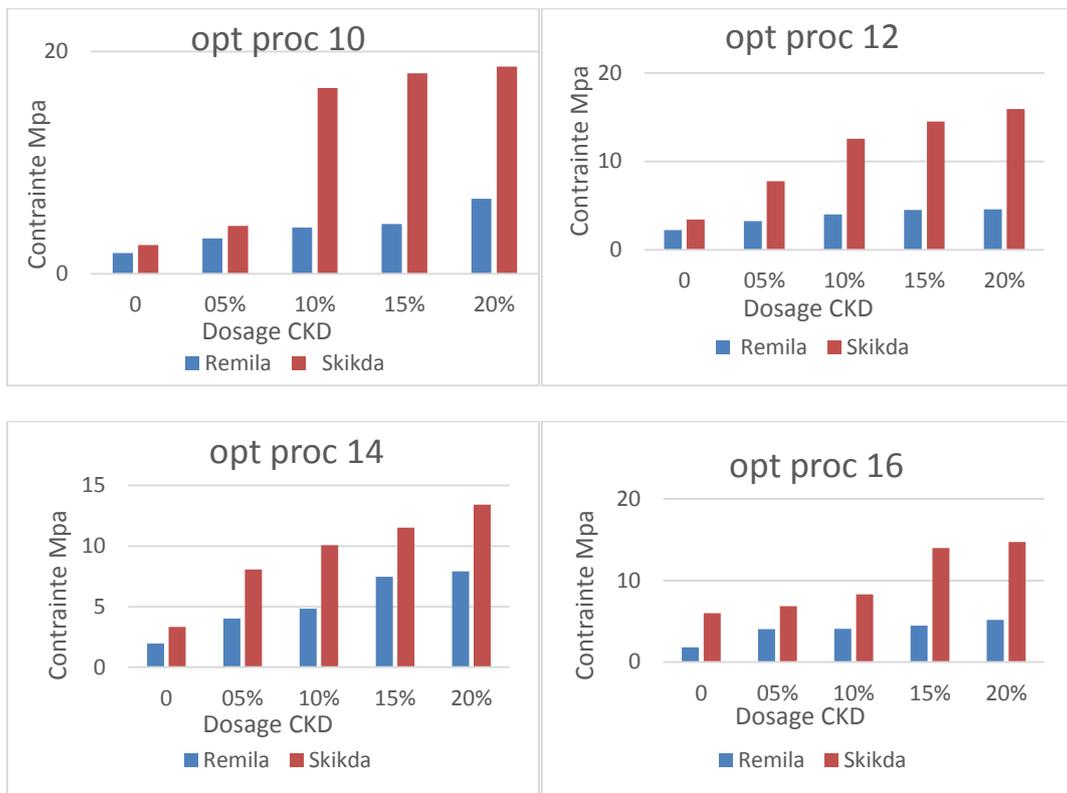


Figure 3-31 : Courbe compression pour 7 jours

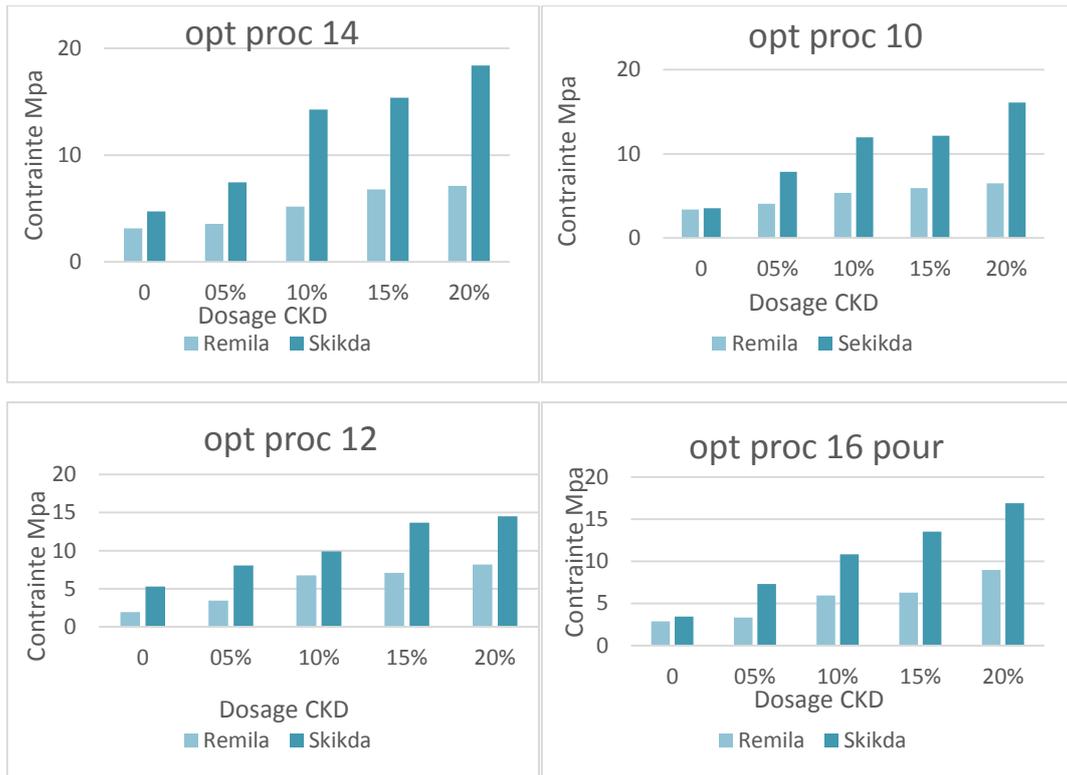


Figure 3- 32 : Courbe compression pour 14 jours

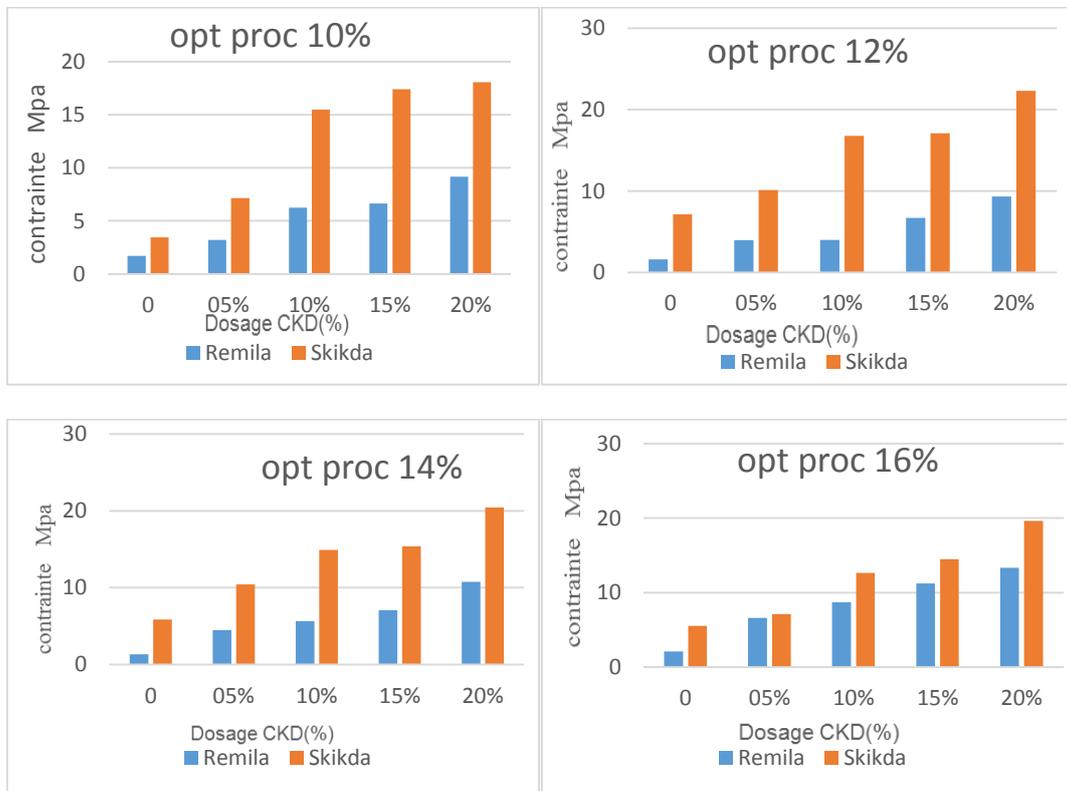


Figure 3-33 : Courbe compression pour 28 jour

Les résultats indiquent clairement la variation de la résistance à la compression sèche avec la concentration de CKD à 7,14 et 28 jours.

La figure 3.33 représente l'effet du CKD sur la résistance à la compression du BTC. Il peut être démontré que la quantité de CKD dans les blocs a un impact sur la résistance à la compression, car la résistance augmente à mesure que la teneur en eau en CKD augmente. Il atteint des valeurs maximales de 13,33 MPA lorsque les blocs sont réalisés avec de l'argile REMILA est 20 %CKD et optimum Proctor 16% après 28jours, et 22,345 MPA avec un optimum Proctor 12 % lorsque les BTC sont réalisés avec de l'argile Skikda.

Résistance à la flexion

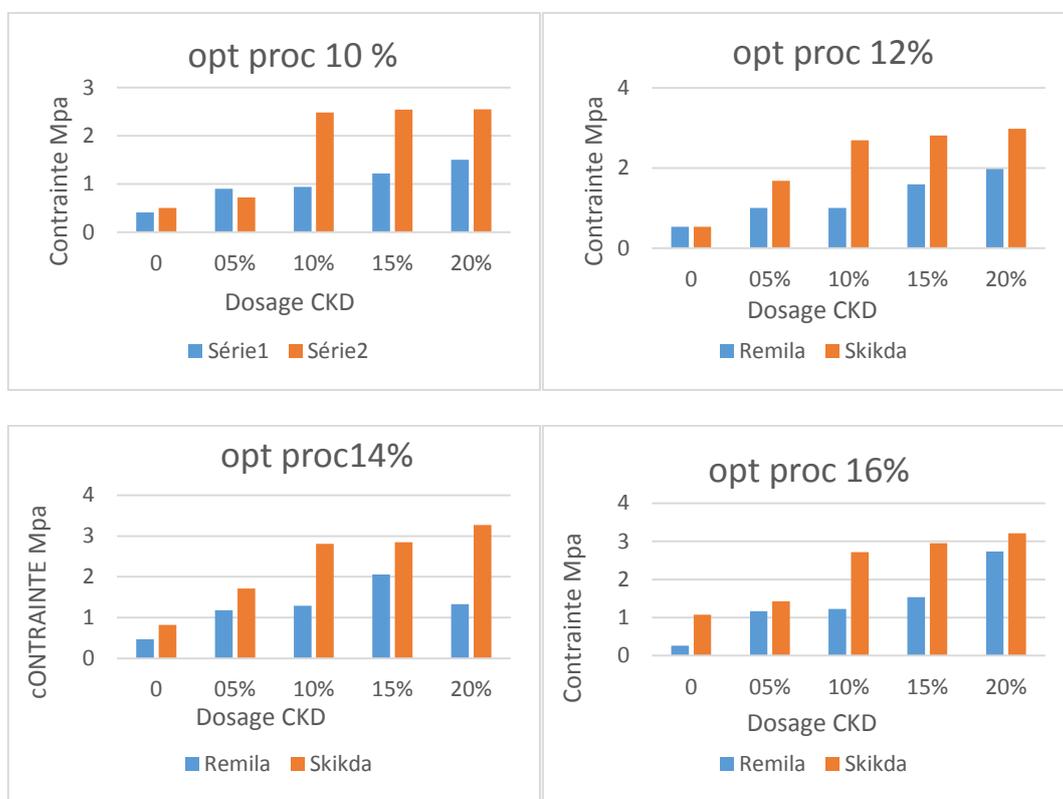
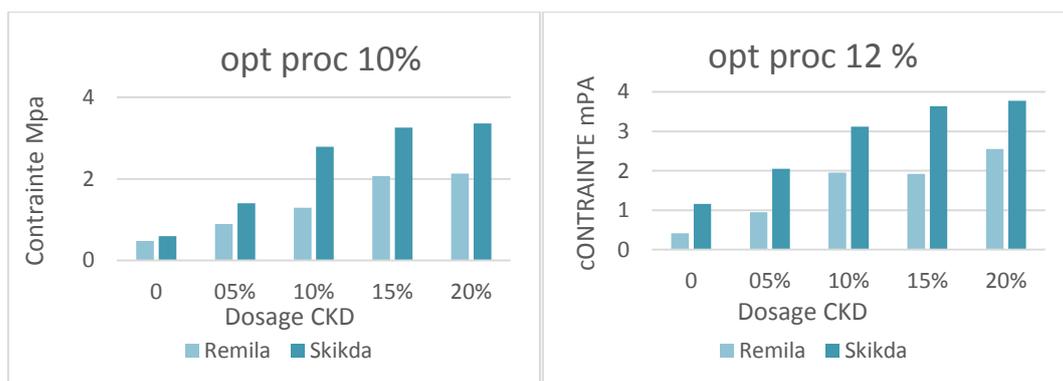


Figure 3-34 : Courbe contrainte de traction par flexion pour 07 jours



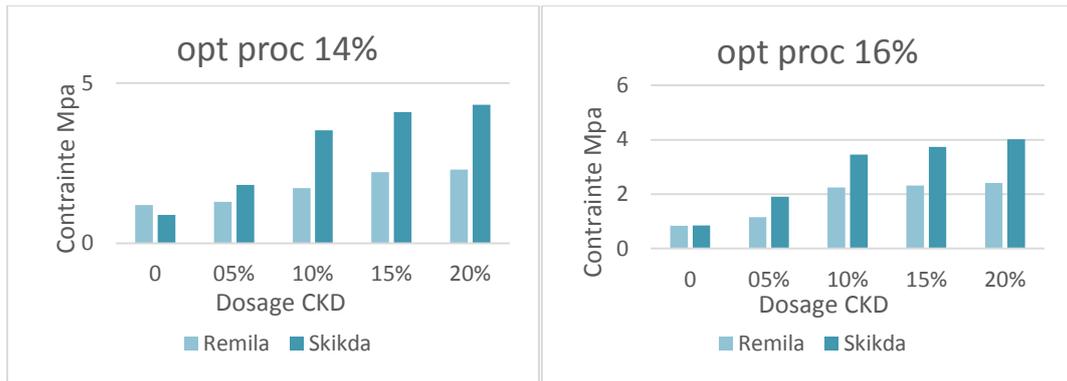


Figure 3-35 : Courbe contrainte de traction par flexion pour 14 jours

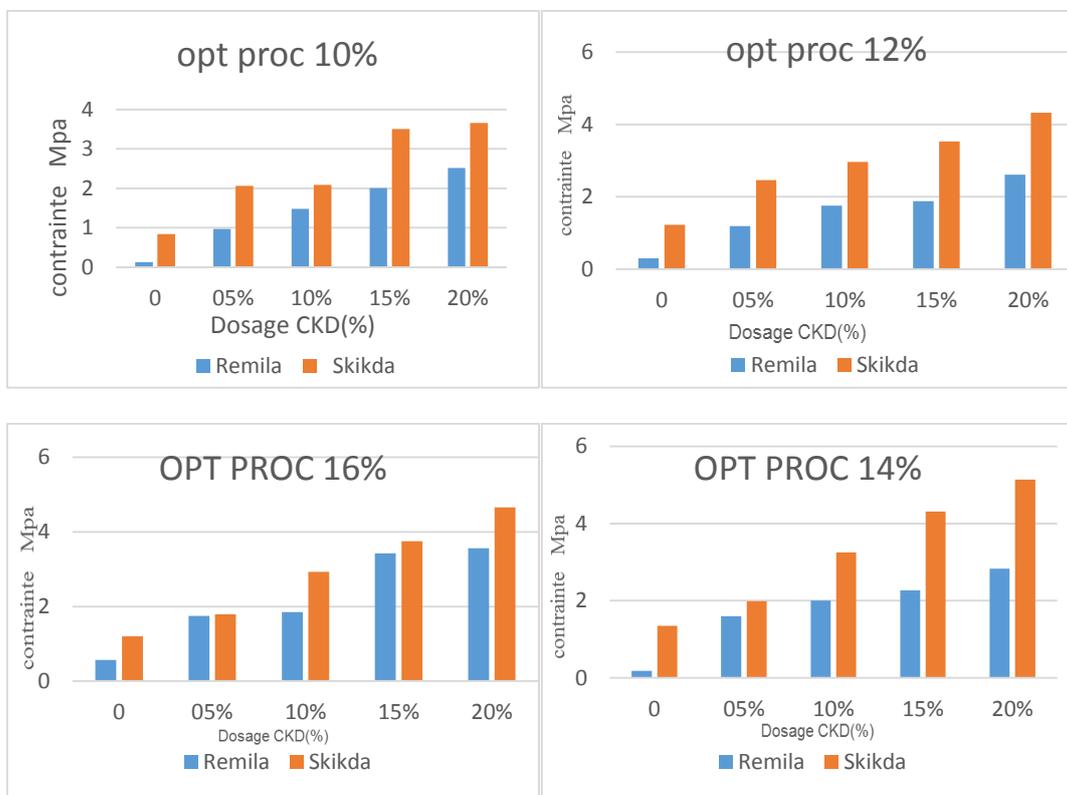


Figure 3-36 : Courbe contrainte de traction par flexion pour 28jour

L'effet de la CKD sur la résistance à la flexion du BTC a été étudié à 7,14 et 28 jours, la variation de la résistance à la flexion est fonction de dose de CKD et optimum Proctor, tout comme compression.

Un essai de flexion en trois point utilisé pour définir la résistance à la flexion des blocs. La figure 3-34 ,3-35,3-36 montre que la résistance à la flexion des blocs fabriqués avec l'argile REMILA est de 2,73 MPA à 7 jours et 2,55 MPA à 14 jours, et 3,56 MPA à 28 jours avec 16, 12et16% de l'optimum Proctor successivement.

Tandis que la résistance à la flexion des blocs réalisés avec l'argile de SKIKDA est de 3,27 MPA à 7 jours, 4,32 MPA à 14 jours et 5,14 MPA à 28 jours avec 14% de l'optimum Proctor. Pour les échantillons préparés avec CKD. Les résultats montrent que le BTC créé avec l'argile Skikda a une résistance à la flexion plus élevée que le BTC fabriqué avec de l'argile RMILA. L'ajout de CKD augmente progressivement, comme indiqué dans figure 3-36.

L'ajout de CKD augmente progressivement la résistance à la flexion atteinte après 28 jours avec 20 % de CKD.

À 7 jours, 4,32 MPA à 14 jours et 5,14 MPA à 28 jours pour les échantillons préparés avec CKD. Les résultats montrent que le BTC créé avec l'argile SKIKDA a une résistance à la flexion plus élevée que le BTC fabriqué avec de l'argile RMILA. L'ajout de CKD augmente progressivement, comme indiqué dans figure 3-36 L'ajout de CKD augmente progressivement la résistance à la flexion atteinte après 28 jours avec 20 % de CKD.

Les composants anhydres du CKD et de l'eau réagissent avec les minéraux des types d'argile pour former des hydrates et diminuent ainsi la structure poreuse du BTC. Ces composants ont la capacité de combler les vides entre les particules, augmente ainsi la résistance à la compression et à la flexion du BTC, rendant ainsi la matrice plus dense. la Silice , le carbonate de calcium , le sulfate de calcium et l'oxyde de calcium (chaux libre) sont tous des composants mineurs de la CKD , à savoir les sulfates et les chlorures .lorsque le système de liant, qui comprend de la chaux libre, se combine avec l'eau contenue dans l'argile , un gel CSH se forme à la suite d'une réaction pouzzolanique et des produits supplémentaires , notamment de l'ettringite, sont produits .par conséquent, le CKD et ses produits d'hydratation peuvent contribuer à augmenter la résistance de l'argile stabilisée

Conductivité thermique

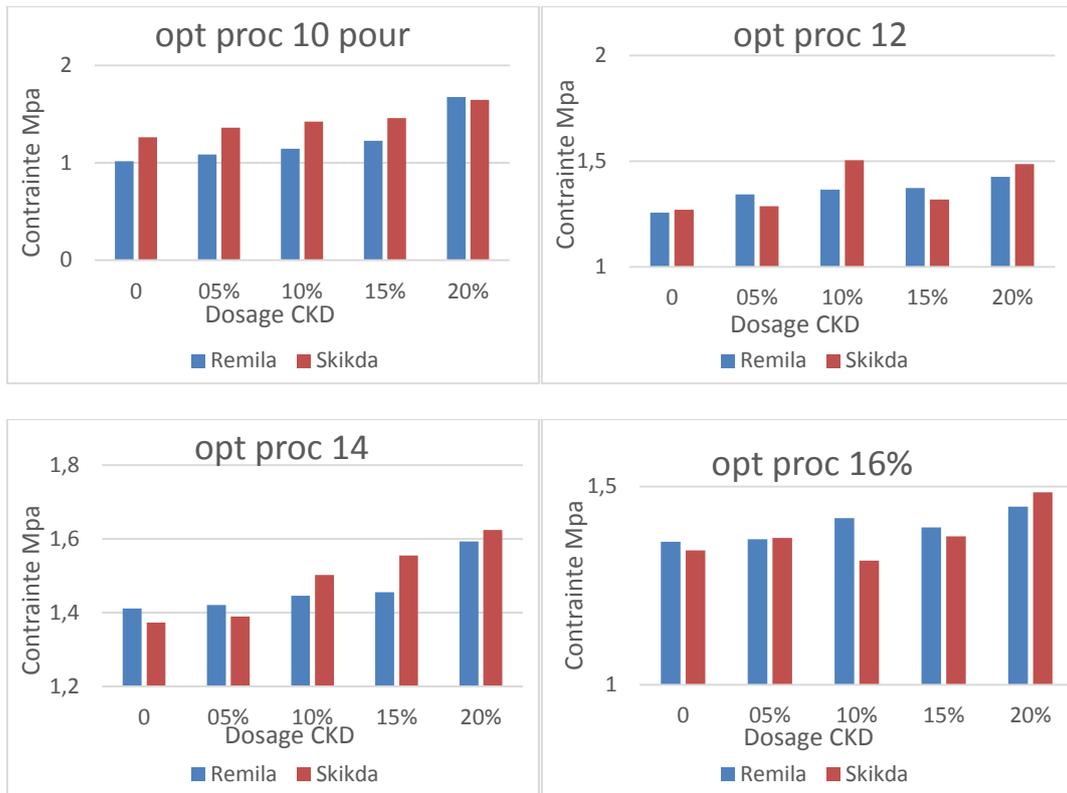


Figure 3-37 : Courbe conductivité thermique 7 jour

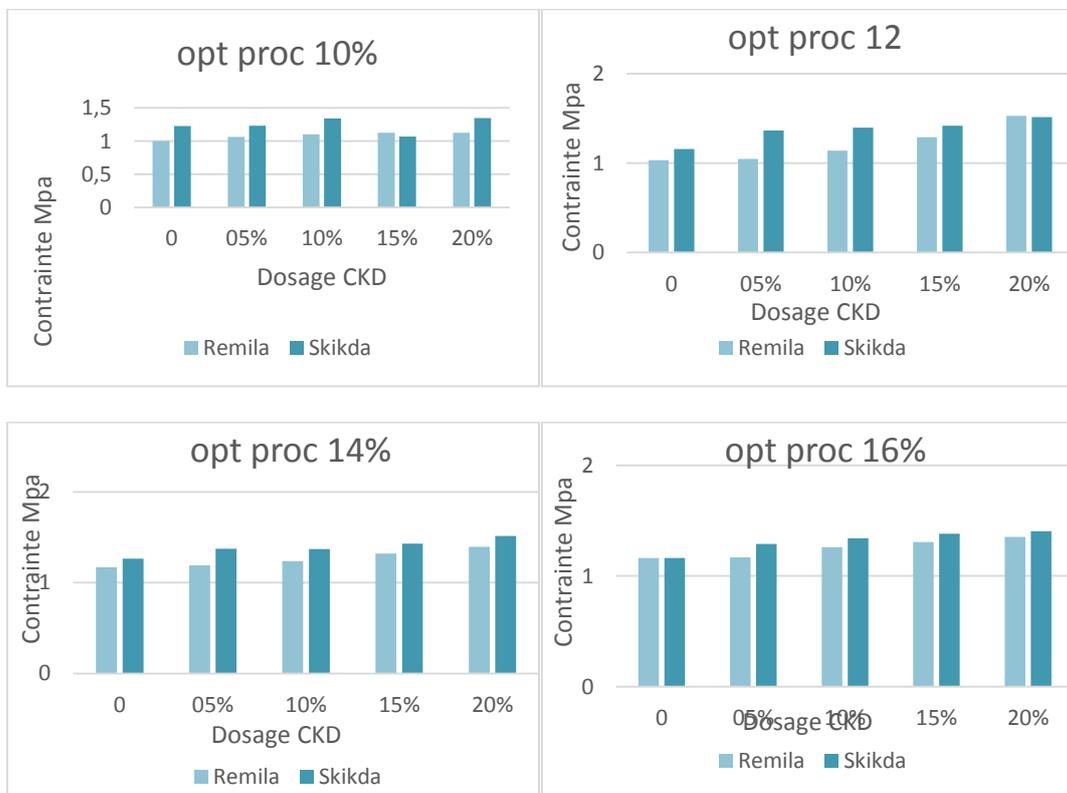


Figure 3-38 : Courbe conductivité thermique 14 jour

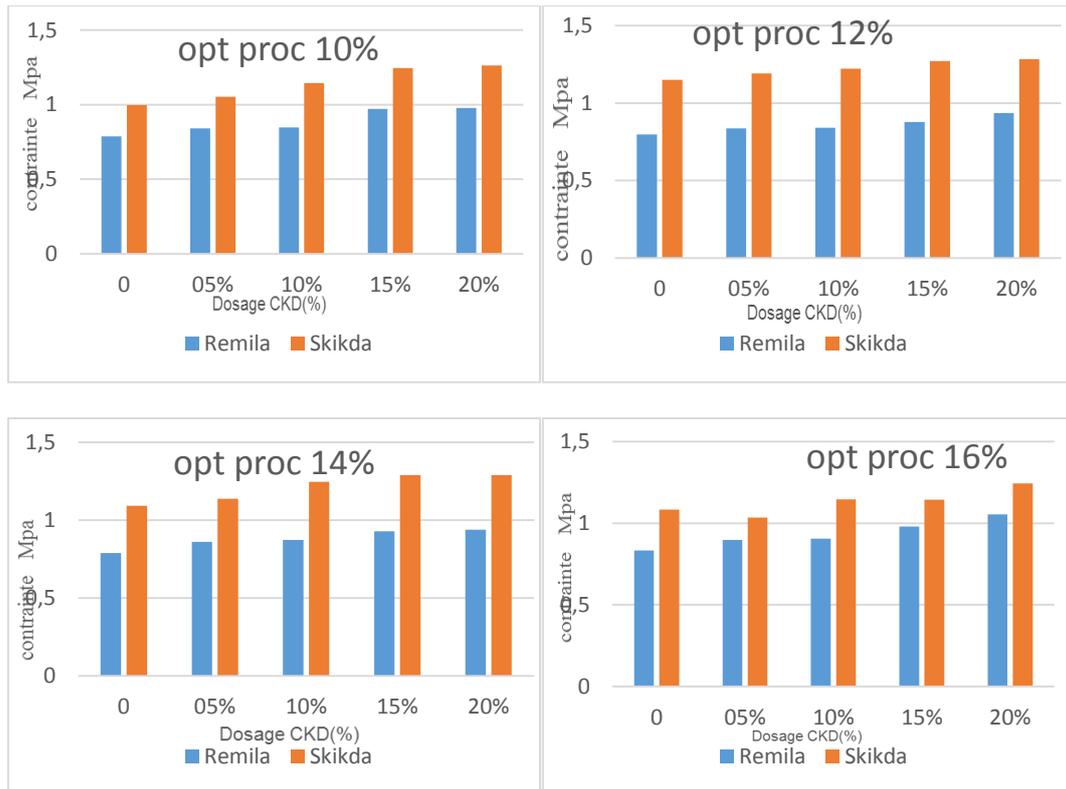


Figure 3-39 : Courbe conductivité 28 jour

La conductivité thermique du BTC a été mesurée à l'aide du CT-mètre, la figure 3-37,3-38 ,3-39. Illustre la variation de la conductivité thermique du BTC en fonction de la teneur en CKD pour les blocs réalisés avec deux argiles, les graphes présentés montrent une augmentation de la conductivité thermique avec l'augmentation de la teneur en CKD. Les valeurs de conductivités thermique sont comprises entre 0,861 et 1,6753 W/M k pour le BTC réalisé avec l'argile REMILA et entre 1,068 et 1,5124 w/mk pour le BTC réalisé avec l'argile de SKIKDA la meilleure valeur de conductivité thermique est obtenue avec l'argile SKIKDA sans CKD supplémentaire, du fait de sa faible teneur en eau par rapport à l'argile REMILA

La variation de conductivité thermique est principalement due à la teneur en CKD ; en effet, lorsque la teneur en CKD est réduite, la conductivité thermique diminue. Ces résultats peuvent s'expliquer par l'augmentation de la densité des blocs due à l'augmentation du pourcentage de CKD et à la forte pression de compactage qui a contribué à éliminer une grande partie des pores rendant des blocs plus denses. Marmour et coll.(35)

Explique que le transfert de chaleur se produit principalement aux points de contact entre les grains formant un matériau, En effet, comme décrit par Zhang et al (36), les produits d'hydratation formés lors du processus d'hydratation modifient légèrement la capacité des

blocs, ce qui se traduit par une légère diminution de la porosité du BTC sous le renforcement des produits hydratés.

Conclusion générale

Dans ce travail, les propriétés physico-mécanique d'un BTC produit à la base de deux argiles (REMILA, Skikda), on a déterminé, l'étude expérimentale réalise selon les normes. S'articule sur deux approches

-la première consiste à l'incorporation des déchets de fours à ciment dans le but de produire un matériau respectant l'environnement.

-la seconde consiste à l'emploi des déchets comme renfort dans le sol

Les déchets du four à ciment on a ajoutées de différents pourcentage (0%, 5%, 10%, 15% et 20% et d'autre pourcentage de l'optimum Proctor (10%, 12%, 14%, 16%))

-les principales conclusion qu'on peut tirer de ce travail peuvent résumer comme suit

- Le choix de type d'argile est un paramètre important dans le processus de fabrication du BTC
- L'utilisation de déchets de fours à ciment dans la fabrication de blocs de terre comprimée contribue à réduire l'impact négatif de ce sous-produit industriel rejeté dans l'environnement.
- L'ajout de poussière de four à ciment (CKD) a contribué à combler les espaces entre les particules, minimisant la porosité et augmentant la densité des blocs.
- En augmentant la quantité de CKD et la période de durcissement la résistance augmente
- Un pourcentage de 20% CKD de poussière de four à ciment et 14% optimum Proctor suffit à conférer CKD la résistance mécanique et durabilité comparée à l'argile de REMILA, le BTC fabriqué avec l'argile Skikda avec CKD présente une excellente résistances mécanique, conductivité thermique.
- La résistance à la compression et à la flexion relativement élevée à 14 et 28 jours est très probablement due à l'évolution à long terme de réaction pouzzolanique.
- La valorisation des déchets de CKD dans les applications au génie civil, notamment dans les sols sous forme de renfort, est considérée comme une solution intéressante sur le plan économique et environnement

Enfin, ces résultats conduisent à conclure que l'ajout de poussière de four à ciment au BTC fabriqué à partir des ressources locales augmente considérablement les propriétés mécaniques et la durabilité. De plus, les bâtiments fabriqués en BTC stabilisé CKD sont meilleurs pour fournir un environnement interne confortable aux résidents car ils offrent le confort requis.

Références bibliographiques

- [1] **CRATerre. GATE.** Bloc de terre comprimée. Eléments de base. , Eschborn, Allemagne, 28 p, 1991.
- [2] **Rigassi V.** Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRATerre-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne, 104 p, 1995.
- [3] **Houben H, Rigassi V, Garnier P.** Blocs de terre comprimée : équipements de production. CRATerre, Bruxelles, Belgique, 149 p, 1996.
- [4] **Michot A.** Caractéristiques thermophysiques de matériaux à base d'argile : évolution avec des traitements thermiques jusqu'à 1400°C. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, 116 p, 2008.
- [5] **G. MILLOT.** Géologie des argiles, Tomel, Masson 1954.
- [6] **G. M. HERNANDEZ, Thèse de doctorat :** Etude Expérimentale de la sorption d'eau et du gonflement des argiles par Microscopie à Balayage Environnementale (ESEM) et l'analyse digital d'image. P 17(2002).
- [7] **[HOTLZ, et KOVASCS, 1991]** - "Introduction à la géotechnique", traduit par Jean Lafleur, Editions de L'Ecole Polytechnique de Montréal, 1991.
- [8] **Houben H, Guillaud H.** Traité de construction en terre. CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, 355 p, 2006.
- [9] **United Nations.** Earth Construction Technology. United Nations Centre for Human Settlements, Nairobi, Kenya, 200 p, 1992.
- [10] **Winterkorn HF.** Soil stabilization, Chapter 8 in "Foundation Engineering Handbook", Winterkorn, H.F. & Fang, H.-Y., Van Nostrand Reinhold Company, 750 pp, 1975.
- [11] **Symons WG.** Properties of Australian soils stabilized with cementitious binders. Structural Materials and Assemblies Group, University of South Australia The Levels, South Australia, 1999.
- [12] **Webb DJT.** Stabilised soil and the built environment. Renewable Energy, Vol. 5, N°. 5-8, 1066-1080, 1994.
- [13] **Akpokodje EG.** The stabilization of some arid zone soils with cement and lime. Quarterly Journal of Engineering Geology London, Vol. 18, 173-180, 1985.
- [14] **Ghoumari F.** Matériau en Terre Crue Compactée : Amélioration de sa Durabilité à l'Eau. Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France, 1989.

- [15] **Venuat M.** Le traitement des sols à la chaux et au ciment. Publié par l'auteur, 66 av. C. Perrière, 92320 Châtillon-sous-Bagneux, 459 p, 1980.
- [16] **Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F.** Construire en terre. Editions Alternatives et Parallèles, collection AnArchitecture, Paris, France, 265p, 1979.
- [17] **Verdyen J., Roisin V, Nuyens J.** Applications de la mécanique des sols", Dunod Ed. Paris, 1971.
- [18] **Moszkowicz P, Barna R.** Stabilisation - solidification des déchets. Techniques de l'ingénieur, Article G 2 080, Volume G. 04. 2001.
- [19] **TRAN N T.** Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière. Thèse de Doctorat de l'Université d'Artois, France, 2009.
- [20] **Bell FG.** Methods of treatment of unstable ground. Newnes-Butterworth, London, 1975.
- [21] **Jarrige JF.** Chronology of the Earlier Periods of the Greater Indus as seen from Mehrgrah, Pakistan. pp. 21-28 in South Asian Archaeology, ed. B. Alichin, Cambridge University Press, 1989.
- [22] **Le Roux A.** Contribution à l'étude du traitement à la chaux des matériaux argileux. Thèse de doctorat Université des Sciences d'Orsay ; 106 p, 1969.
- [23] **Houben H, Guillaud H.** Earth construction—a comprehensive guide. London: Intermediate Technology ; 1994.
- [24] **Honoré TUYISHIME,** Etude comparative des différentes techniques de stabilisation en géotechnique routière, mémoire de master en génie de l'eau et de l'environnement, **2015**
- [25] **Rahma Mebarkia, Mansour Bouzroua, Nasser chelouah** , study of effect of cement kiln dust on on the mechanical, Ehremal and durability properties of compressed earth bloks , construction and Building Materials 349(2022) 128707
- [26]: **BYFORS K.,** Influence of silica fume and flysh on chloride diffusion and PH values in cement paste. Cement and Concret Research, vol.17 (1), p.115-130, 1987.
- [27] : **TAYLOR, H. F. W.** Proposed structure for calcium silicate hydrate gel, Journal of Arnencan Ceramic Society, vol. 69, N°6, 464-467. 1986.
- [28] : **REGOURD, M.** L'hydratation du ciment Portland. " Le béton hydraulique "

[29] : **HARD, R. 1.** The kinetics of hydration of calcium sulfate hemihydrate : a critical comparison of the models in the literature. *Cement and Concrete Research*, vol. 21, N°25, p. 885-895. 1994.

[30]: **MANDER, J. E., SKALNY J.,** Calcium alkali sulfates in clinker. *Ceram. Bull.*, vol. 56, N°11, p. 987-990. 1977.

[31]: **FRIGIONE, G.,** Gypsum in cement in advances in cement Technology, S. N. Ghosh, ED., Pergamon Press Ltd., Oxford. 1983.

[32]: **SUZUKI, K., ITO, S., MSHMAWA, Y., SHINNO.** Effect of Na, K and Fe on the formation of a and p C₂S. *Cement concrete research*, Vol. 16, N°6, p. 885-892. 1986.

[33] : **REGOURD, M., CHROMY, S., HJORTH, L., MORTUREUX, B., CUMIER, A.,** Polymorphisme des solutions solides du sodium dans l'aluminate tricalcique, *Journal of Applied Crystallography*, vol. 6, N°5, p. 355-364. 1973.

[34] : **MEHTA, P. K.,** Stability of ettringite on heating. *Journal of American ceramic society*, vol. 55, N°1/2, p. 55-56. 1972.

[35] **M.O. Boffoue, K.C. Kouadio, C.H. Kouakou, A.A. Assande, A. Dauscher, B. Lenoir, E. Emeruwa,** Influence de la teneur en ciment sur les propriétés thermomécaniques des blocs d'argile comprimée et stabilisée, *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie* 11 (2) (2015) 35–43.

[36] **L. Zhang, A. Gustavsen, B.P. Jelle, L. Yang, T. Gao, Y. Wang,** Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks, *Constr. Build. Mater.* 151 (2017) 504–511.

NF P 94-050 : détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux, (1995).

N F. P94-051 : (1993) Reconnaissance et essai de détermination des limites d'atterberg.

NF P 94-056 : Analyse granulométrique ; méthode par tamisage à sec après lavage, (1996).

NF P 94-057 : analyse granulométrique des sols, méthode par Sédimentométrie, (1992).

NF, P. 94-068, Sols : Reconnaissance et essais, Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène (1998).

NF P 94-093 Norme française, paramètres optimaux de compactage (Proctor).

NF, P.94-071-1. Essai de cisaillement rectiligne à la boîte (Août 1994).

(NF P 94-090-1). Essai de Compressibilité à l'œdomètre

(NF P 94-074). NORME Française, Essai Triaxial (Octobre 1994).

(NF P 11-300). La classification GTR pour les sols A.