

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



Faculté : TECHNOLOGIE
Département : GENIE CIVIL
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
Filière : GENIE CIVIL
Spécialité : GEOTECHNIQUES

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Influence du CKD et les fibres du palmier sur les caractéristiques des sols fins

Présenté par : *SIDI HAIBALLA YAGHOUB*

Encadrant : *Mme Zemouli Samira* Grade : *MCB* Université : *Badji mokhtar Annaba*

Jury de Soutenance :

KEBAILI BACHIR	MCA	Université d'ANNABA	Président
ZEMOULI SAMIRA	MCB	Université d'ANNABA	Encadrant
HACENE CHAOUCHA ABD EL MADJID	PROFESSEUR	Université d'ANNABA	Examineur
KEFFAF TAREK	MAA	Université d'ANNABA	2eme Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

REMERCIEMENTS

*Je remercie en premier lieu ALLAH qui m'a donné
le courage et la volonté.*

*J'adresse mes vifs remerciements à mon encadrant
Mme Zemouli Samira. Pour m'avoir constamment
guidé tout long de ce projet et pour ces conseils
précieux.*

*Je tiens à remercier tout les jurys, et professeurs qui nous ont enrichis
de connaissances et tout le département de génie civil*



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à La mémoire de mon cher père mon soutien.

À la plus belle créature que Dieu a créé sur terre, À ma mère !

*À mon prof de math Mr Hafadh, a les dames khedaje et lematt, À
Mr Bemba*

A mes chers frères

À mes sœurs la Doctorante WISSAM INAL, Bouchra Askri et LAERDJ NOUR,

À Toutes ma famille,

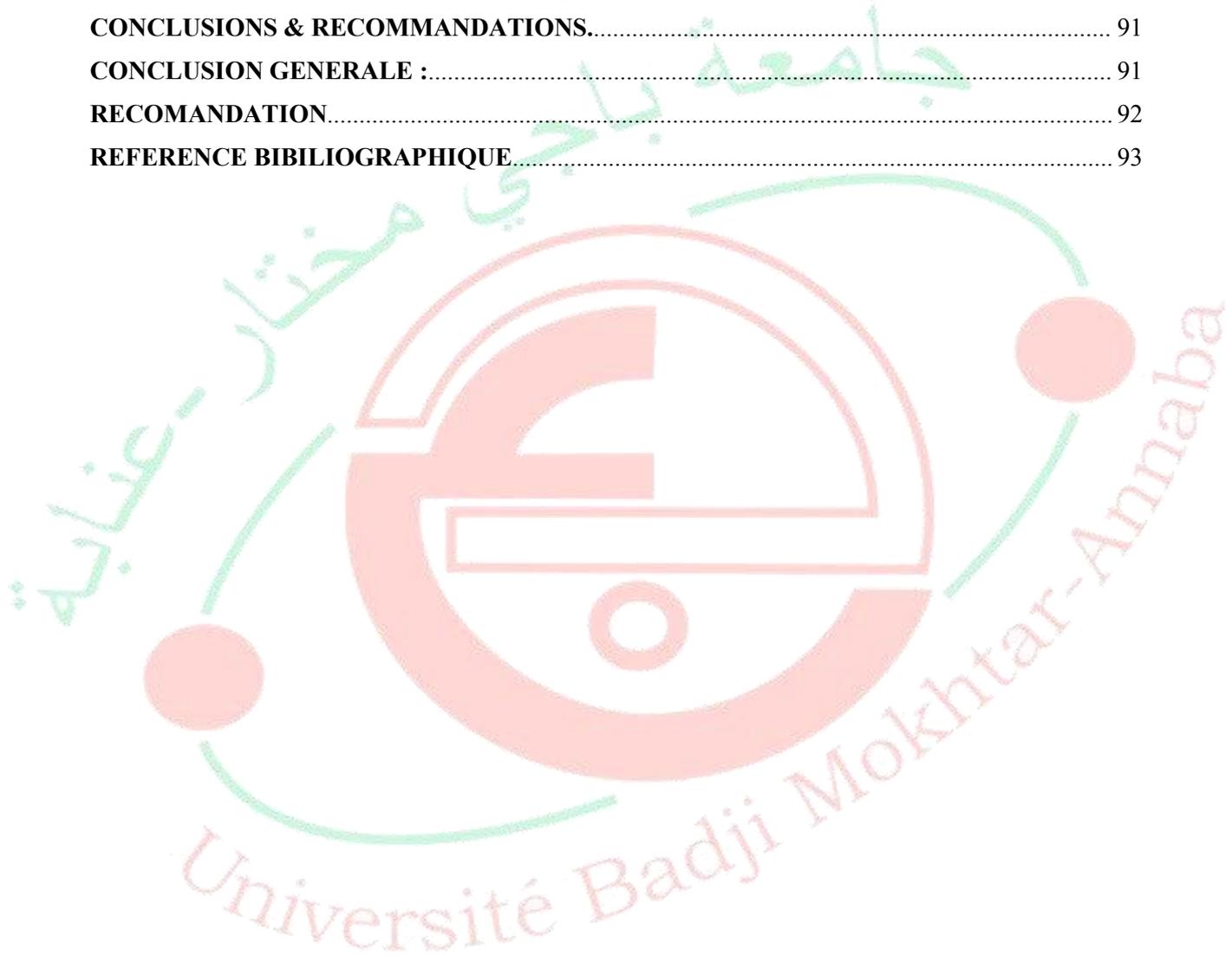
A mes amis et mes collègues



TABLE DE MATIERE

ملخص	6
RESUME	8
ABSTRACT	7
NOTATIONS	9
LISTE DES FIGURES	10
LISTE DES TABLEAUX	12
INTRODUCTION GENERALE	14
Chapitre1.....	16
Partie1 : les argiles.....	16
1-1-Introduction :.....	16
1-2-Minéralogie des sols argileux.....	16
1-2-1-Les minéraux.....	16
1-2-2-Les argiles :.....	17
- Définition des argiles.....	17
1-2-3-LES TYPES DES ARGILES :	19
1-3-LA MATIERE ORGANIQUE.....	21
1-4-L'interaction eau-argile: [8].....	21
1-5-Propriétés mécaniques et caractéristiques des argiles[9].....	22
Partie2 :.....	24
STABILISATION DES SOLS :.....	24
2.1-Liants organiques.[8].....	24
2.2-Les liants hydrauliques.....	24
2.3-Travaux antécédents.....	26
CHPITRE 2 : MATERIAUX ET PROCEDURES D'ESSAIS	51
3.1.INTRODUCTION.....	51
3.2.MATERIAUX.....	51
LES MATERIAUX STABILISATEURS.....	51
Poussiere four du ciment	51
..... 51	
FIBRES DE PALMIER DATTIER.....	53
SOL UTILISE :.....	54

EQUIPEMENTS ET PROCEDURES D'ESSAIS	63
Chapitre3 : ESSAIS ET INTERPRETATIONS	688
5.1 INTRODUCTION	688
5.2 INFLUENCE DU CKD LE PH DU SOL	688
5.3 INFLUENCE DU CKD SUR LA DENSITE SPECIFIQUE DU SOL	699
5.4 INFLUENCE du CKD sur les caractéristiques de compactage :	70
5.5 Influence du CKD sur la compression simple	75
5.6 Influence du CKD et des Fibres de palmier sur la compression simple	788
CONCLUSIONS & RECOMMANDATIONS	91
CONCLUSION GENERALE :	91
RECOMANDATION	92
REFERENCE BIBILIOGRAPHIQUE	93



عنوان الرسالة :تأثير غبار فور الاسمنت والألياف النباتية على خصائص التربة الدقيقة

ملخص

بناء الأساسات لمشاريع خطية طويلة الأمد كميات كبيرة من الردم التي يجب أن تفي بمتطلبات الجودة المحددة. لسوء الحظ ، ليس من الممكن دائماً العثور على مواد ذات جودة عالية محلياً ، مما يجعل من الضروري معالجة المواد المحلية ، غالباً التربة الناعمة ، لجعلها قابلة للاستخدام في البناء.

الحل الفعال والمستدام هو استخدام النفايات الصناعية لتحسين خصائص التربة ذات المشاكل. هذه الطريقة لها عدة مزايا: فهي مفيدة ، وتساهم في حماية البيئة والطبيعة. الهدف من هذه الدراسة هو تحسين الخصائص الجيوتقنية للطين (تربة مقطوعة (في ديدوش مراد (ولاية قسنطينة) باستخدام منتج ثانوي محلي. ؛ غبار قمائن الأسمنت (CKD) HDJAR SOUD وألياف النخيل لتحسين قدرتها على التحمل . تتيح هذه الدراسة التجريبية تقليل تكاليف البناء عن طريق استعادة النفايات من صناعة الأسمنت لتحقيق الاستقرار في تربة التأخير الطبيعي . النتائج التي تم الحصول عليها من الاختبارات التي أجريت على طين ديدوش إي مراد الممزوج مع CKD بنسب مختلفة (5٪ ، 10٪ ، 15٪ ، 20٪ و 25٪) ثم المرتبطة بألياف النخيل تشير إلى أن إضافة CKD يحسن قابلية التشغيل ، ومعايير الضغط وقوة هذه التربة .بالإضافة إلى ذلك ، يكون التحسن أكثر أهمية عندما يتم خلط CKD بألياف النخيل.

الكلمات الرئيسية - OMC - MDD :مقاومة الضغط غير المحصور - CKD - ألياف النخيل.

Title of the thesis: Influence of CKD and vegetable fibers on characteristics of fine soils

SUMMARY

The construction of foundations for long-lasting linear projects requires large quantities of fill that must meet specific quality requirements. Unfortunately, it is not always possible to find good quality materials locally, which makes it necessary to process local materials, often fine soils, to make them usable in construction.

and sustainable solution is to use industrial waste to improve the properties of problematic soils. This method has several advantages: it is profitable, contributes to the protection of the environment and nature. The objective of this study is therefore to improve the geotechnical characteristics of the clay (a cut soil) of Didouch e Mourad (Wilaya of Constantine) using a local by-product ; cement kiln dust (CKD) HDJAR SOUD and palm fiber to further improve its bearing capacity . This experimental study makes it possible to reduce construction costs by recovering waste from the cement industry to stabilize a natural soil of delays . the results obtained from tests carried out on Didouch e Mourad clay mixed with CKD at different percentages (5%; 10%; 15%; 20% and 25%) then associated with palm fiber indicate that the addition of CKD improves workability, compaction parameters , and strength of this soil. Additionally, the improvement is more significant when CKD is mixed with palm fiber.

Keywords: MDD -OMC - Resistance to unconfined compression -CKD -Palm fiber.

Titre du mémoire :Influence du CKD et les fibres végétales sur les caractéristiques des sols fins

RESUME

La construction des fondations pour des projets linéaires durables nécessite d'importantes quantités de remblai qui doivent répondre à des exigences de qualité spécifiques. Malheureusement, il n'est pas toujours possible de trouver sur place des matériaux de bonne qualité, ce qui rend nécessaire le traitement des matériaux locaux, souvent des sols fins, pour les rendre utilisables dans la construction.

Une solution efficace et durable consiste à utiliser des déchets industriels pour améliorer les propriétés des sols problématiques. Cette méthode présente plusieurs avantages : elle est rentable, contribue à la protection de l'environnement et de la nature. L'objectif de cette étude est donc d'améliorer les caractéristiques géotechniques de l'argile (un sol de déblai) de Didouche Mourad (Wilaya de Constantine) en utilisant un sous produit local ; la poussière du four du ciment (CKD) du HDJAR SOUD et la fibre du palmier pour améliorer encore sa capacité portante . Cette étude expérimentale permet de réduire les coûts de construction en valorisant les déchets de l'industrie du ciment pour stabiliser un sol de déblais naturel . les résultats obtenus des essais réalisés sur l'argile Didouche Mourad mélangée avec du CKD à différents pourcentages soit (5% ;10%;15%;20% et 25%) puis associé avec la fibre du palmier indiquent que l'ajout de CKD améliore la maniabilité, les paramètres de compactage, et la résistance de ce sol. De plus, l'amélioration est plus significative lorsque le CKD est mélangé à la fibre du palmier.

Mots clés: MDD -OMC - Resistance à la compression non confinée -CKD -Fibre de palmier.

NOTATIONS

Symboles

Définitions

<i>C°</i>	<i>Degree Celsius</i>
<i>CHS</i>	<i>complexe hors sphère</i>
<i>CSI</i>	<i>complexe de sphère interne</i>
<i>FF</i>	<i>assemblages face-à-face des cristallites (face to face)</i>
<i>EF</i>	<i>assemblages côté à face des cristallites (edge to face)</i>
<i>EE</i>	<i>assemblages côté à côté des cristallites (edge to edge)</i>
<i>ASTM</i>	<i>American Society of Testing and Materials</i>
<i>C-A-H</i>	<i>Calcium Aluminate Hydrate</i>
<i>C-S-H</i>	<i>Calcium Silicate Hydrate</i>
<i>C-A-S-H</i>	<i>Calcium Alumino Silicate Hydrate</i>
<i>HT</i>	<i>Hydrotalcite</i>
<i>IP</i>	<i>Indice de Plasticité</i>
<i>LL</i>	<i>Limite de Liquidité</i>
<i>LP</i>	<i>Limite de Plasticité</i>
<i>MDD</i>	<i>Densité Sèche Maximale (Maximum Dry Density)</i>
<i>MEB</i>	<i>Microscopie à Balayage Electronique</i>
<i>O</i>	<i>Octaède</i>
<i>OMC</i>	<i>Teneur en Eau Optimale (Optimum Moisture Content)</i>
<i>PH</i>	<i>Potentiel Hydrogène-Log₁₀(H⁺ concentration)</i>
<i>T°</i>	<i>Temperature</i>
<i>T</i>	<i>Tétraédre</i>

TO	<i>couche tétraédrique T et couche octaédrique O</i>
TOT	<i>couche octaédrique O entourée de deux couches tétraédriques T</i>
USCS	<i>Classification universelle</i>

RN : Les notations utilisées dans cette thèse sont des notations universelles de géotechnique et fondations comme recommandées par la conférence Internationales de Tokyo en 1988.

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1: Représentation la Structure minéralogique des agriles. [3].....	188
Figure 1-2: Représentation le plan de la couche tétraédrique de silicate (Si).....	188
Figure 1-3: Représentation le plan de la couche octaédrique d'aluminium (Al^{+3}).....	199
Figure 1-4 Représentation structurale d'un minéral argileux de type T-O (Poppe et al., 2001). Et structure particulière de la Kaolinite (Morel R. 1996).....	20
Figure 1-5 Représentation structurale d'un minéral argileux de type T-O-T (Pope et al, 2001) et structure d'illite (Morel R. 1996).....	20
Figure 1-6 Représentation la structure de La montmorillonite (Smectites) (Morel R. 1996).....	21
Figure 1.7. OMC et MDD à différents pourcentages de CKD (Anil kumar et AK Singh 2017).....	288
Figure 1.8. Limite de liquidité, limite de plastique et indice de plasticité à différents pourcentages de CKD (Anil kumar et AK Singh 2017).....	288
Figure 1.9 . UCS du sol à différents pourcentages de CKD (Anil kumar et AK Singh 2017).....	299
Figure 2.0. Variation CBR non trempée et trempée du mélange sol-CKD (Anil kumar et AK Singh 2017).....	299
Figure 2.1. Coefficient de perméabilité avec différents pourcentages de CKD (Anil kumar et AK Singh 2017).....	300
Figure 2.2. Variation de la densité sèche maximale du sol de coton noir avec une teneur en poussière de four à ciment.....	31
Figure 2.3. Variation de la teneur en humidité optimale d'un sol de coton noir avec une teneur en poussière de four à ciment.....	31
Figure 2.4. Variation de la résistance à la compression non confinée d'un sol de coton noir avec une teneur en poussière de four à ciment.....	32
Figure 2.5. Variation du rapport portant californien non trempé et trempé du sol de coton noir avec la teneur en poussière de four à ciment.....	32
Figure 2.6. Variation de la résistance à la perte de résistance du sol de coton noir avec une teneur en poussière de four à ciment.....	33
Figure 2.7. Effet du stabilisateur sur la limite d'Atterberg.....	34
Figure 2.8. Effet du stabilisateur sur le gonflement libre.....	35

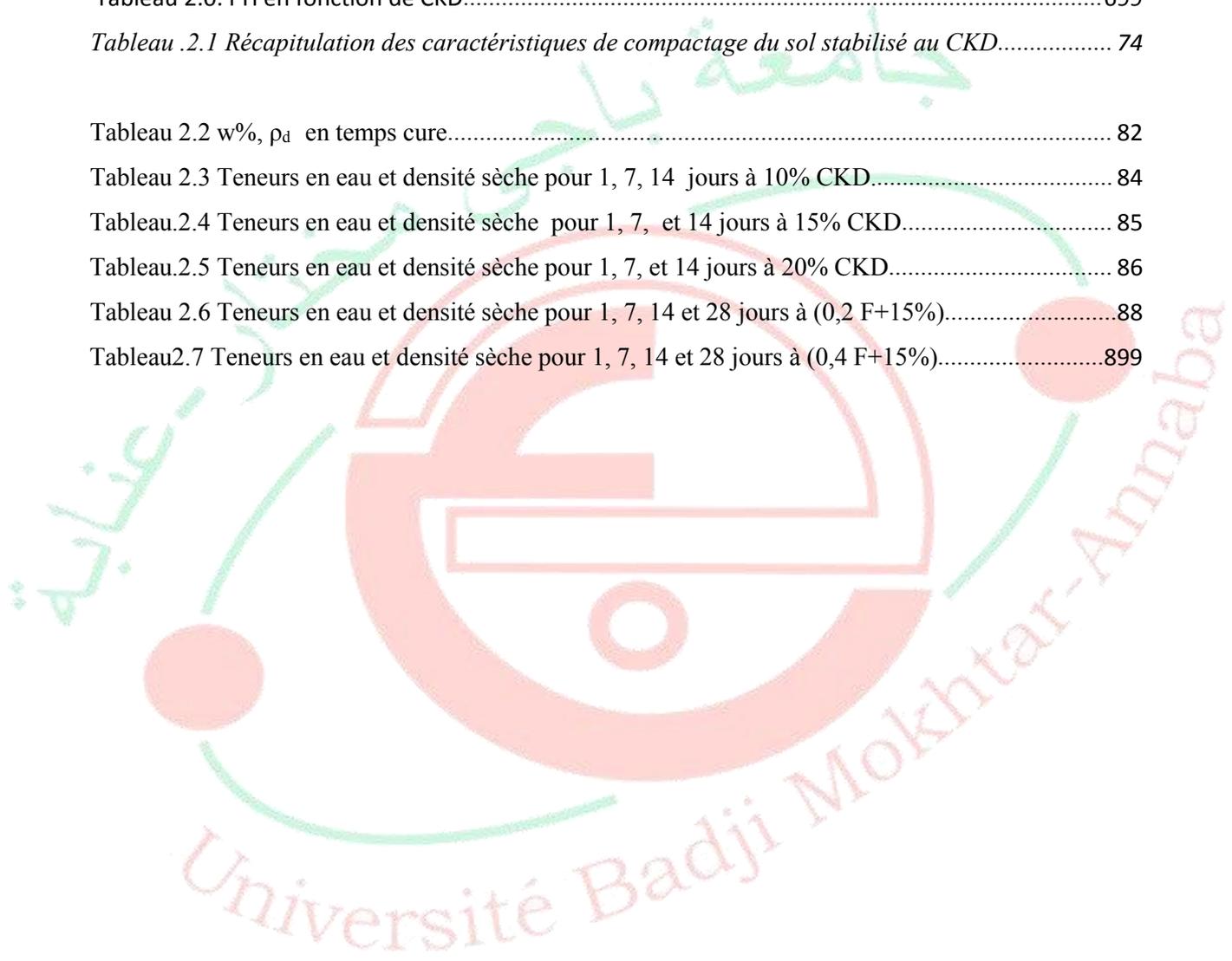
Figure 2.9. Effet du stabilisateur sur le compactage.....	35
Illustration 3.0 . La valeur du pH du mélange sol-CKD pour les sols A et B.....	36
Figure 3.1. Limites d'Atterberg en pourcentage versus CKD pour les sols A et B.....	37
Figure 3.2. Le MDD et l'OMC pour les sols non traités A et B.....	37
Figure 3.3. MDD et OMC pour le mélange sol A/CKD.....	38
Figure 3.4. MDD et OMC pour le mélange sol B/CKD.....	38
Figure 3.5. Poussière de four à ciment obtenue à partir d'analyses XRF.....	39
Figure 3.6. Modification de la valeur du pH due à l'ajout de CKD.....	40
Figure 3.7. Effet de l'additif CKD sur les limites d'Atterberg.....	40
Figure 3.8. Effet de l'additif CKD sur la siccité maximale.....	41
Figure 3.9. Effet de l'additif CKD sur le California Bearing Ratio (CBR).....	42
Figure 4.0. Effet de l'additif CKD sur le potentiel de gonflement.....	42
Figure 4.1. PH du sol] mélanges CKD pour les sols 1, 2 et 3.....	43
Figure 4.2. Teneur en humidité optimale par rapport à la teneur en CKD pour les sols 1, 2 et 3.....	44
Figure 4.3. Résistance à la compression non confinée par rapport au temps de durcissement pour les sols 1, 2 et 3. Les chiffres en haut à gauche du graphique indiquent le numéro du sol.	45
Figure 4.4. Symboles de limites de liquide solides et symboles de limites de plastique ouvertes. Contre. Teneur en CKD pour le sol 1 cercles, l'huile 2 triangles et le sol 3. Carrés.....	46
Figure 4.5. Indice de plasticité en fonction de la teneur en CKD pour les sols 1, 2 et 3.....	46
Figure 4.6 : impact de la teneur en fibres de palmier.....	488
Figure 4.7 relation entre les stress et la deformation.....	499
Figure 4.8 .poussière du four ciment passant au tamis 0,08 mm.....	52
Figure.5.0 Observation au microscope à balayage de fibre de palmier dattier (a) coupe transversale et (b) surface extérieure.....	54
<i>Figure 5.1 : Analyse Minéralogiques de l'Argile BENZEKRI.....</i>	56
<i>Figure 5.2 Courbe granulométrique du sol artificiel constitué.....</i>	58
<i>Figure 5.3 Limite de liquidité du sol non traité (0% CKD).....</i>	60
Figure 5.5 : courbe de compactage sol naturel.....	62
Figure 5.6 : Humidificateur.....	64
Figure 5.7 : PH mètre (<i>Méthode Eades & Grim</i>).....	65
Figure 5.8: Dames, moule CBR et Proctor, Extracteur manuel pour essai de compactage.....	66
<i>Figure 5.9: Presse mécanique Beta Test model YIM108C.....</i>	67
Figure 6.0 : Evolution du PH du sol traité du sol traité en fonction % CKD.....	69
Figure 6.1 Evolution de la Densité Spécifique en fonction du % CKD.....	70
<i>Figure 6.2 Courbe de compactage du sol traité à 0% CKD.....</i>	71
<i>Figure 6.3 Courbe de compactage du sol traité à 5% CKD</i>	71
<i>Figure 6.4 Courbe de compactage du sol traité à 10% CKD.....</i>	72

Figure 6.5 Courbe de compactage du sol traité à 15% CKD.....	72
Figure 6.6 Courbe de compactage du sol traité à 20% CKD.....	73
Figure 6.7 Courbe de compactage du sol traité à 25% CKD.....	73
Figure 6.8 Influence du CKD sur les caractéristiques de compactage.....	75
Figure .6.9 Influence du CKD sur la résistance à la compression simple à près 1 jour de prise.....	76
Figure.7.0 Influence du CKD sur la résistance à la compression simple à près 7 jours de prise.....	76
Figure.7.1 Influence du CKD sur la résistance à la compression simple à près 14 jours de prise.....	77
Figure.7.2 Influence du CKD sur la résistance à la compression simple à près 28 jours de prise.....	77
Figure 7.3 : Influence de l'ajout du % CKD et le temps de cure sur la résistance a la compression ..	788
Figure 7.4 Influence d'ajout du CKD et la fibre du palmier sur la résistance à la compression du sol pour 1 jour de cure	79
Figure 7.5 Influence d'ajout du CKD et la fibre du palmier sur la résistance à la compression du sol pour 7jour de cure	80
Figure 7.6 Influence d'ajout du CKD et la fibre du palmier sur la résistance à la compression du sol pour 14 jour de cure	80
Figure 7.7 Influence d'ajout du CKD et la fibre du palmier sur la résistance à la compression du sol pour 28 jour de cure	81
Figure 7.8 : Influence de l'ajout du (CKD+ fibres de palmier)et le temps de cure sur la résistance à la compression du sol.....	82
Figure 7.5 : fiabilité à w% ,5% CKD en temps cure.....	83
Figure. 7.6 : fiabilité a la densité ,5% CKD en temps cure.....	83
Figure.7.7 Teneurs en eau pour 1, 7, et 14 jours à 10% CKD.....	84
Figure.7.8 Densité pour 1, 7, et 14 jours à 10% CKD.....	84
Figure.7.9 Teneurs en eau pour 1, 7, et 14 jours à 15% CKD.....	85
Figure.8.0 Densité pour 1, 7, et 14 jours à 15% CKD.....	86
Figure.8.1 Teneurs en eau pour 1, 7, et 14 jours à 20% CKD.....	87
Figure.8.2 Densité sèche pour 1, 7, 14, et 28 jours à 20% CKD.....	87
Figure.8. 3Teneurs en eau pour 1, 7, 14 et 28 jours à (15% CKD+0,2F).....	89
Figure.8.4densité sèche pour 1, 7, 14 et 28 jours à(0,2F+ 15%CKD).....	89
Figure.8. 5Teneurs en eau pour 1, 7, 14 et 28 jours à (15% CKD+0,4F).....	90
Figure.8.6 densité sèche pour 1, 7, 14 et 28 jours à (15% CKD+0,4F).....	90

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Résultats des tests de laboratoire (Anil kumar et AK Singh 2017).....	27
Tableau 1.2. Composition chimique de CKD.....	34

<i>Tableau 1.3 Proportions d'éléments chimiques du CKD.....</i>	<i>52</i>
Tableau 1.5 : Caractéristiques des fibres des palmier utilisées.....	53
<i>Tableau 1.6 : Composition chimique du treillis en fibre de palmier dattier</i>	<i>54</i>
Tableau 1.7.composition chimique de sol utilisé.....	55
Tableau 1.8 Analyse Minéralogique - Argile BENZEKRI.....	56
Tableau 1.9 Classification des sols en fonction de leur Teneur en Matière Organique.....	57
Tableau 1.9 Limites d'Atterberg.....	61
Tableau 2.0: PH en fonction de CKD.....	699
<i>Tableau .2.1 Récapitulation des caractéristiques de compactage du sol stabilisé au CKD.....</i>	<i>74</i>
Tableau 2.2 w%, ρ_d en temps cure.....	82
Tableau 2.3 Teneurs en eau et densité sèche pour 1, 7, 14 jours à 10% CKD.....	84
Tableau.2.4 Teneurs en eau et densité sèche pour 1, 7, et 14 jours à 15% CKD.....	85
Tableau.2.5 Teneurs en eau et densité sèche pour 1, 7, et 14 jours à 20% CKD.....	86
Tableau 2.6 Teneurs en eau et densité sèche pour 1, 7, 14 et 28 jours à (0,2 F+15%).....	88
Tableau2.7 Teneurs en eau et densité sèche pour 1, 7, 14 et 28 jours à (0,4 F+15%).....	899



INTRODUCTION

La construction des fondations des projets linéaires durables exige des quantités énormes de remblai qui doivent satisfaire des conditions spécifiques de qualité. Ces matériaux de bonne qualité très souhaités ne sont pas toujours disponibles sur place sur chantiers. Les ingénieurs lors de la réalisation des projets sont dès fois confrontés à la disponibilité des sols sur site souvent non conformes aux normes de construction. . De nombreux ouvrages construits sur ces sols argileux ont montrés des signes de fatigue et dégradation généralement sous forme d'apparition de fissures au niveau de la superstructure. Certaines dégradations ont conduit à la perte totale de ces ouvrages.

La meilleure méthode à utiliser est généralement déterminée par des considérations économiques, à titre d'exemple il est moins cher de stabiliser un sol sur site en utilisant des additifs relativement coûteux plutôt que de creuser et excaver le matériaux inadéquats puis le remplacer par un remblai de bonne qualité importé

la stabilisation chimique du sol est un procédé utilisé pour améliorer les propriétés d'un sol en modifiant sa composition chimique. Il s'agit d'une technique couramment utilisée dans le domaine de la géotechnique et de la construction pour renforcer les sols et les rendre plus adaptés à un usage spécifique.

Lorsqu'un sol présente des caractéristiques défavorables, telles qu'une faible résistance, une mauvaise plasticité ou une sensibilité à l'eau, la stabilisation chimique peut être utilisée pour améliorer ces propriétés. Elle implique l'ajout de substances chimiques, les traitements par liants hydrauliques (chaux, ciment, cendres volantes, CKD) les traitements organiques (huiles, goudrons, bitumes, résines naturelles ,fibre palmier ,polymères...).

Dans le but de valoriser les sols de déblais on a utilisé dans cette étude un sol provenant du site situé sur l'autoroute est-ouest dans la commune de Didouche Mourad, c'est un sol de déblai (argile) de caractéristiques géotechnique .

L'objectif de cette étude est d'identifier et de caractériser cette l'argile puis améliorer ses caractéristiques géotechniques en utilisant le CKD est récupérée par les filtres électrostatiques du four de ciment de cimenterie de HADJAR ESSOUD A SKIKDA et le FIBRE DE PALMIER de palmier dattier utilisées dans cette étude proviennent de palmiers de les régions (Est algérien) Cette argile améliorée sera exploité dans les constructions linéaires et résoudre ainsi un problème environnemental dû aux énormes dépôts d'argile sur site.et minimiser le prix de revient du projet en transportant le bon sol très couteux .

Les travaux de recherche dans cette mémoire sont présentés sous forme de 4 chapitres :

Le premier chapitre : PARTIE 1 présente une revue bibliographique sur les argiles et leurs minéraux, la définition des argiles, la microstructure, l'interaction avec l'eau, les propriétés mécaniques

PARTIE 2 : Sur la stabilisation des argiles chimique et en particulier sur les propriétés physiques et mécaniques des sols fins problèmes plus les travaux de recherche antérieurs les plus récents conduits un peu partout dans le monde.

Le Deuxième chapitre c'est l'étude expérimentale en laboratoire dans ce chapitre on explique le mode opératoire des essais que nous avons effectué que ce soit des essais de caractérisation du sol vue que le sol utilisé dans cette recherche est méconnu : (Analyses Chimiques, Analyse du pH, Teneur en Matière Organique, Poids Spécifique (Gs), Analyse Granulométrique, Limites d'Atterberg, , essai de Compactage - Proctor Normal, essai de cisaillement direct.

Le troisième chapitre analyses et les discussions des résultats des différents essais expérimentaux conduits à savoir l'influence du sur le pH du sol, , le gravite spécifique (Gs), les caractéristiques de compactage, la résistance à la compression.

Dans le quatrième chapitre résume toutes les conclusions des résultats et interprétations obtenus avec des recommandations pour des recherches futures.



Partie 1 : les argiles

1-1-Introduction :

Ce chapitre est une recherche bibliographique s'appuie sur les doucement publiés et ce chapitre est destiné à décrire la complexité du sol et de ses constituants et à faire le point sur les connaissances relatives aux mécanismes de stabilisation des sols essentiellement le traitements chimiques et l'introduction des fibres dans le but d'améliorer les caractéristiques du sol..

Nous nous attacherons à présenter les actions des agents stabilisants avec les sols conduisant à un traitement réussi. Dans le cas de perturbations dues à divers composés des sols tels que : les phyllosilicate (argiles et micas), le soufre, l'azote, le phosphore et les matières organiques.

1-2-Minéralogie des sols argileux.

1-2-1-Les minéraux.

Les sols sont constitués de particules de minéraux regroupées en agrégats. Ces minéraux sont stables ou en train d'évoluer dans les conditions thermo barométriques et climatiques de la surface de la terre. Généralement y sont rencontrés [1] :

- Le quartz.
- Les argiles.
- Les feldspaths (potassiques et plagioclases).
- Les micas.
- Les carbonates (calcite et dolomite).
- Les oxydes et hydroxydes métalliques dont l'hématite, la goethite et la limonite pour le fer.

Ces minéraux se présentent généralement dans les sols sous forme [1] :

- De grains polygonaux plus ou moins réguliers dont la taille se situe entre quelques microns et quelques millimètres.
- De lamelles pour les argiles dont la plus grande dimension ne dépasse pas quelques microns.
- D'agrégats correspondant à des fragments de roches. Leurs formes résultent de la morphologie des minéraux les constituants.

Les propriétés physiques et mécaniques du sol dépendent de la nature des assemblages minéraux. Ainsi les minéraux granulaires (quartz, carbonates) n'ont pas de cohésion propre. Seules les argiles présentent une cohésion, qui résulte d'interactions spécifiques avec l'eau. [1]

1-2-2-Les argiles :

- Définition des argiles.

L'argile se définit comme une terre grasse et molle contenant un ensemble de particules fines (de taille inférieure à 2 μm) constituée essentiellement de minéraux à structure en feuillets. L'argile présente une plasticité à l'état humide et durcit par séchage ou par chauffage.

Les particules d'argile résultent des mécanismes de désintégration chimique ou mécanique des roches. Ces minéraux argileux appartiennent en majorité au groupe des phyllosilicates. Une matière première argileuse naturelle renferme aussi des minéraux non argileux, dits accessoires, et/ou de la matière organique.

Un feuillet d'argile est formé par l'association des couches tétraédriques (T) à base de tétraèdres siliciques (SiO_4) et de couches octaédriques (O) aluminiques et/ou magnésiques [2].

- Structure minéralogique des argiles.

- Minéraux argileux.

Les minéraux argileux sont généralement de silicates d'aluminium mais parfois de silicates de magnésium dont la structure feuilletée permet de les ranger dans la famille de phyllosilicate. [3]

La figure 1 explicite la terminologie utilisée pour définir la structure des argiles. On distingue quatre niveaux d'organisation :

- **Les plans** : sont constitués par les atomes.
- **Les couches** : association de deux plans d'atomes d'oxygène et/ou d'hydroxyle formant des couches de tétraèdre ou des couches d'octaèdre.
- **Les feuillets** : correspondent à des combinaisons des couches.

- **L'espace inter foliaire** : c'est le vide séparant deux feuillets de même structure, il peut être occupé par des cations (éventuellement hydratés).
- **Le cristal** : résulte de l'empilement de plusieurs couches.[3]

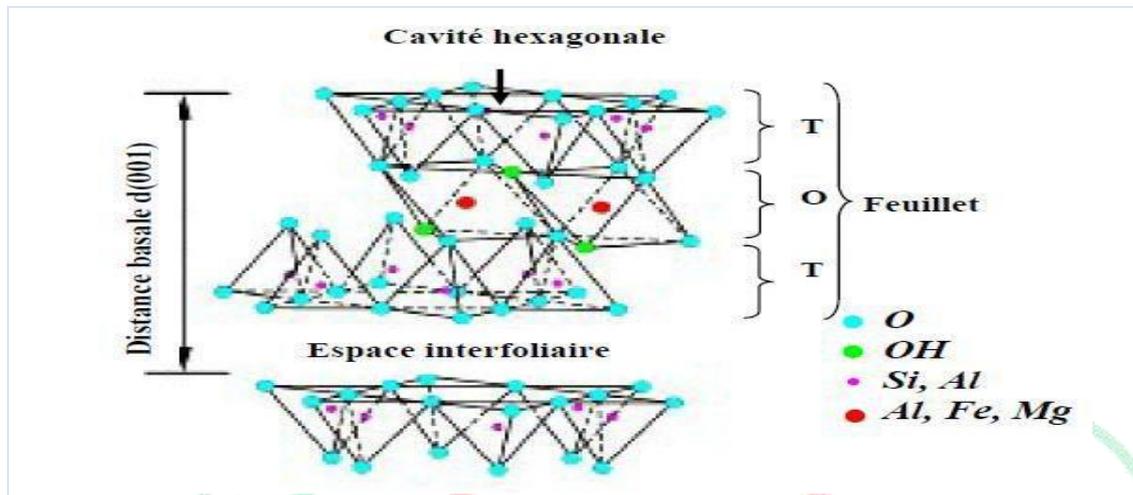


Figure 1-1:Représentation la Structure minéralogique des agriles. [3]

La couche du tétraèdre de silice.

Dans l'élément tétraédrique, l'ion central est la silice (S^{+4}) qui est entouré par 4 ions d'oxygène (O^{-2}) (figure 2). Les tétraèdres sont liés ensemble par leurs bases en partageant un ion d'oxygène entre deux tétraèdres pour former une couche tétraédrique. La formule générale de cet ensemble est $[(Si_2O_5)^{-2}]$. [3]

Le plan de tétraèdres, noté T, est composé de tétraèdres d'atomes d'oxygène autour de chaque atome noté Z. [4].

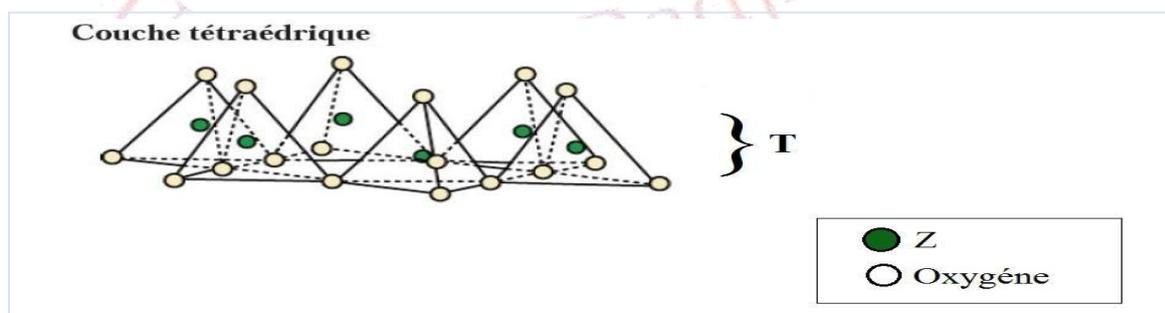


Figure 1-2:Représentation le plan de la couche tétraédrique de silicate (Si).

La couche d'octaèdre d'aluminium.

Dans l'élément octaédrique, l'ion central est soit un ion d'aluminium (Al^{+3}), soit un ion de magnésium (Mg^{+3}). Ces derniers sont entourés par six ions d'hydroxyde (OH^-) (figure 3).

Les unités octaédriques sont liées ensemble de telle sorte que chaque groupement fonctionnel (OH^-) est partagé entre 3 unités octaédriques. [4]

Le plan d'octaèdres, noté O : est formé par des atomes d'oxygène et des groupements hydroxyles autour de chaque atome noté M.[4]

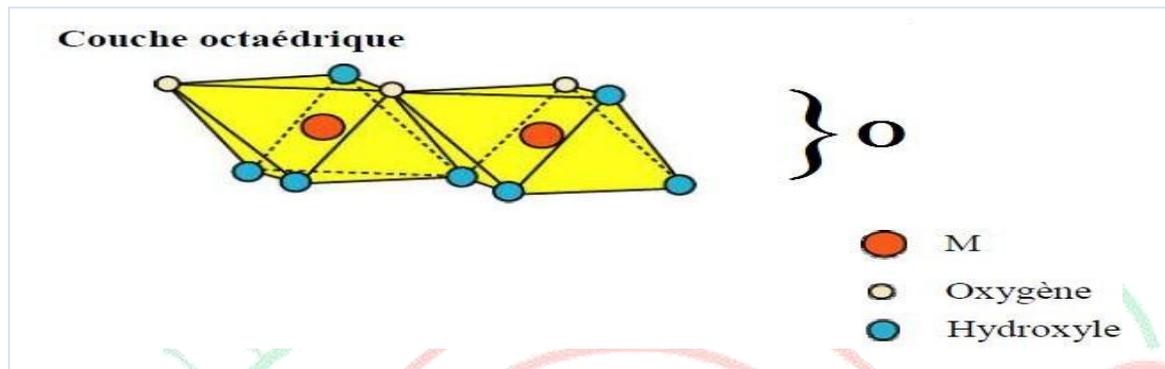


Figure 1-3: Représentation le plan de la couche octaédrique d'aluminium (Al^{+3}) ou magnésium (Mg^{+3}).

1-2-3-LES TYPES DES ARGILES :

La Kaolinite (type de feuillet T-O) : $(Si_4O_{10}) Al_4 (OH)_8$.

Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique l'équidistance caractéristique est d'environ $7,1 \text{ \AA}$, Ce type correspond le groupe de la kaolinite. [5]

Le contact se fait entre un plan contenant les ions hydroxyles OH^- de l'octaèdre, et celui contenant les ions d'oxygène O^{2-} du tétraèdre. [6]

Dans ce cas, les liaisons interfoliaires résultent de l'effet, compose de liaisons hydrogène et de forces d'attraction moléculaire, ce qui se traduit par un lien assez fort. Ainsi une particule de kaolinite sera constituée, par exemple, de quelques centaines de feuillets et pourra avoir une épaisseur de quelques dizaines de micromètres. Ces particules sont stables et leur structure élémentaire n'est pas affectée par la présence d'eau. [8]

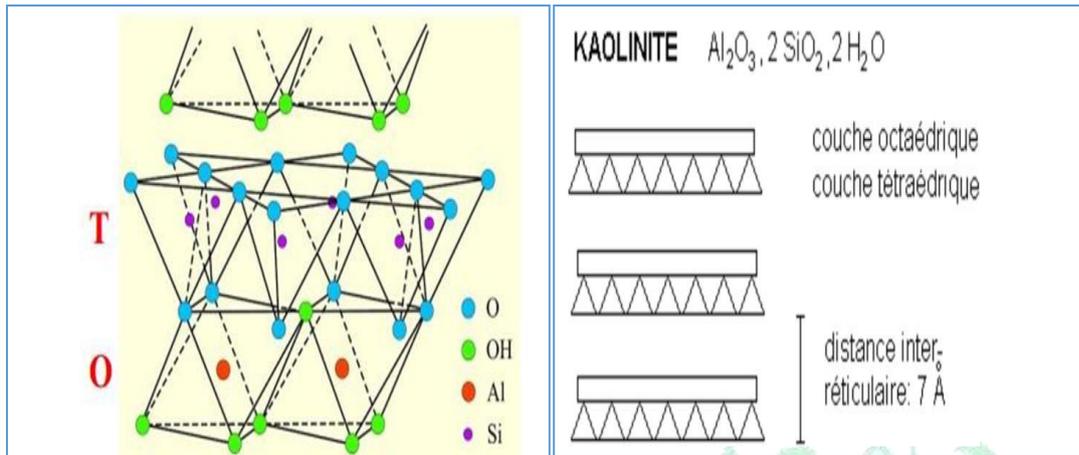


Figure 1-4 Représentation structurale d'un minéral argileux de type T-O (Poppe et al., 2001).
Et structure particulière de la Kaolinite (Morel R. 1996).

L'illite (type de feuillet T-O-T) (K, H₂O) 2 Si₈ (Al, Fe, Mg) 4,6 O₂₀ (OH)⁴. [6]

Ce feuillet élémentaire est composé d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. Dans les couches de silice, un ion Si⁺⁴ sur quatre est remplacé par un ion Al⁺³. Le déficit de charge qui en résulte est compensé par les ions potassium K⁺ qui assurent des liaisons assez fortes entre les feuillets. La particule d'illite comportera, par exemple, une dizaine de feuillets et pourra avoir une épaisseur de quelques centièmes de micromètres.

L'espace créé à l'intérieur du feuillet de silice est occupé par un ion K⁺ qui, par sa présence, induit un lien fort entre les couches.

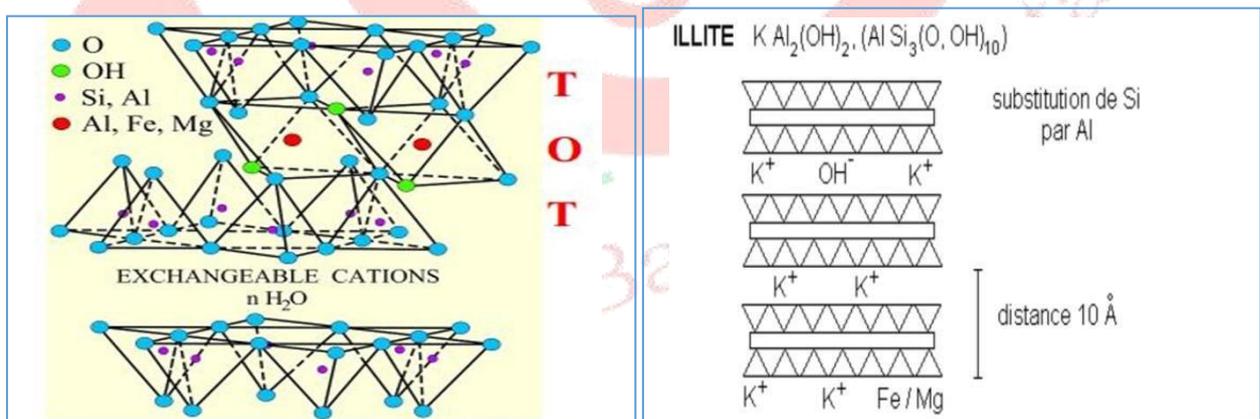


Figure 1-5 Représentation structurale d'un minéral argileux de type T-O-T (Pope et al, 2001)
et structure d'illite (Morel R. 1996).

La montmorillonite (Smectites) (OH) 4 Si8 (Al+310/3, Mg2/3) O20, n H2O. [6]

Le feuillet élémentaire est composé, comme pour l'illite, d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. Un ion Al^{3+} est remplacé par un ion Mg^{2+} dans les couches d'alumine. Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des ions Ca^{2+} (montmorillonite calcique) ou par des ions Na^{+} (montmorillonite sodique). La valence des ions sodium étant plus faible que celles des ions calcium, c'est la montmorillonite sodique qui aura la plus grande surface spécifique. Les liaisons entre feuillets étant très faibles, ces argiles sont très sensibles à la teneur en eau et ont un fort potentiel de gonflement. L'épaisseur d'une particule de montmorillonite peut- être très faible puisque, contrairement aux autres argiles, on peut isoler un feuillet élémentaire. La montmorillonite fait partie de la famille générale des smectites définies comme argiles gonflantes.

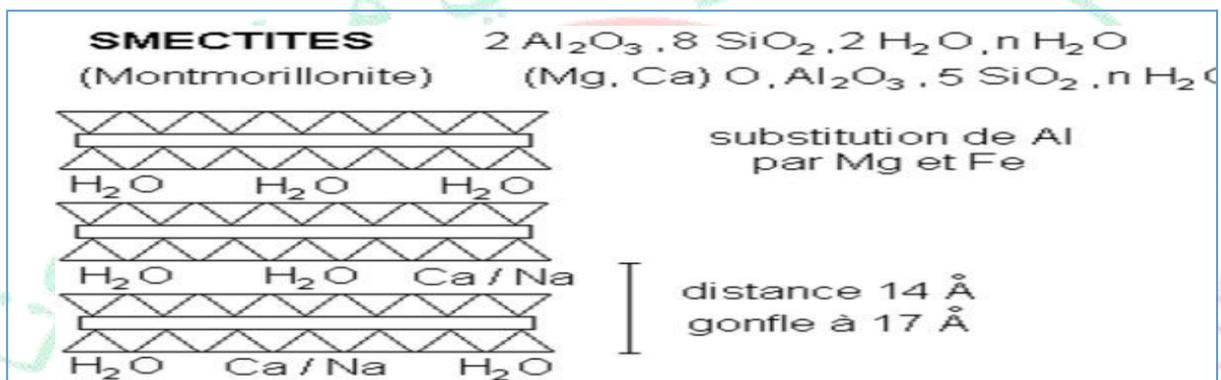


Figure 1-6 Représentation la structure de La montmorillonite (Smectites) (Morel R. 1996).

1-3-LA MATIERE ORGANIQUE.

Dans les sols, le terme de matière organique regroupe tous les produits constitués de molécules carbonées. Cette matière organique peut avoir deux origines : une origine récente liée au développement d'un sol pédologique ou une origine ancienne dont la formation est associée à la genèse de la roche [1].

La matière organique a un rôle important dans le comportement des sols. Si la matière organique est un peu évoluée et abondante (tourbe fraîche) sa texture retient beaucoup d'eau et est très compressible. [7]

1-4-L'interaction eau-argile: [8]

Selon la force des liens unissant les feuillets d'argiles, ceux-ci autorisent ou non l'arrivée d'eau dans l'espace inter foliaire. Comme déjà vu, avec la classification des argiles, que chez certaines argiles (kaolinites, illites), l'eau ne peut s'engager entre les feuillets. Ces

argiles sont faiblement gonflantes. En revanche, dans les smectites, la faible liaison entre feuillets fait que chaque espace interfeuillelet peut s'hydrater ; les smectites font partie des argiles dites « gonflantes ». L'amplitude du gonflement dépend de l'état initial, bien sûr, et des contraintes appliquées, néanmoins la prise d'eau peut être telle que le matériau voit son volume multiplié par vingt. Ainsi, dans certaines argiles, l'eau peut littéralement s'engouffrer dans l'espace interfeuillelet. Les feuillets s'écartent, et la liaison entre deux feuillets parallèles doit alors être assurée différemment, par exemple grâce à des liens transverses (associations EF ou EE). Il en résulte une réorganisation complète de la matrice solide (Tessier, 1978, cités par Jérôme Gaombalet, 2004). Cette réorganisation est sans doute le premier des deux points essentiels permettant de distinguer le gonflement des argiles gonflantes du gonflement d'un autre matériau poreux. Le deuxième fait essentiel du gonflement est que l'interaction eau-argile est liée aux ions présents dans l'eau. Les cations présents en solution sont attirés vers les surfaces des feuillets d'argiles chargées négativement ; ils sont par ailleurs repoussés de ces surfaces par la force osmotique qui tend à uniformiser la concentration en cations dans la solution. Il résulte de ces deux effets opposés une certaine distribution des cations au voisinage des feuillets. De même, les anions, qui sont repoussés électro statiquement par les feuillets, mais repoussés vers ceux-ci par osmose, ont une distribution spatiale particulière au voisinage des feuillets. Il en résulte que la distribution des ions dans l'espace inter foliaire est en général différente de celle dans les gros pores, ce qui se traduit par une différence entre les pressions osmotiques « internes » et « externes » aux particules, et donc par des forces exercées sur les feuillets et qui tendent à les écarter. Cela permet de comprendre l'origine du gonflement des argiles. La différence entre les pressions osmotiques « internes » et « externes » aux particules est souvent appelée « pression de gonflement microscopique ».

1-5-Propriétés mécaniques et caractéristiques des argiles[9]

Les roches argileuses présentent toujours, à des degrés divers, les comportements suivants : plasticité, viscoplasticité, endommagement. Du moins les essais mettent-ils en évidence des déformations irréversibles et, par suite, des comportements souvent décrits par ces termes. Du point de vue du comportement à court terme, il est souvent difficile de juger s'il s'agit de plasticité ou d'endommagement. Les deux théories permettent en général de décrire les phénomènes observés, et le choix de l'une ou de l'autre dépend souvent de l'emploi à faire des lois ainsi mises en place. Ainsi, bien souvent, c'est la plasticité qui prime dans les lois utilisées au niveau des calculs d'ouvrages. Pour les argiles raides, il s'agit plutôt d'endommagement dans la mesure où :

- les essais rapides de laboratoire mettent généralement en évidence une augmentation de volume irréversible, signe pour les roches de l'apparition d'un endommagement diffus ;
- les déformations irréversibles s'accompagnent souvent d'une perte de résistance et des propriétés élastiques (mais tel n'est pas toujours le cas pour les argiles raides) ;
- des chargements plus marqués conduisent à la rupture, qualifiée plus facilement d'endommagement que de plasticité.

En fait, les mécanismes microscopiques qui se traduisent par les déformations irréversibles ne sont pas toujours bien compris pour les roches, et le choix de la bonne théorie à appliquer est délicat. Il est en général difficile de juger, entre plasticité et endommagement, quel phénomène est effectivement le bon. Ces phénomènes sont parfois couplés dans les modèles rhéologiques. Parfois aussi, l'endommagement est décrit en utilisant le formalisme de la plasticité. Par ailleurs, pratiquement toutes les roches argileuses présentent un comportement différé irréversible. Ce comportement est très marqué pour des argiles plastiques, nettement moins pour des argiles raides. Du fait de l'existence de déformations résiduelles après décharge, il ne s'agit pas (du moins pas seulement) de viscoélasticité, mais plutôt de viscoplasticité. Cette viscoplasticité ne doit pas non plus être confondue avec la consolidation ou le comportement différé lié à la dissipation de la pression interstielle.

Partie2 :

STABILISATION DES SOLS :

Une large variété des méthodes d'amélioration et de stabilisation des mauvais sols est actuellement utilisée et les techniques les plus appropriées sont d'habitude classées comme les méthodes mécaniques, hydromécaniques, thermiques et chimiques. Les méthodes thermiques concernent surtout la stabilisation par congélation ou par chauffage

Ce sont donc des méthodes d'amélioration temporaires, par contre les méthodes mécaniques et chimiques sont permanentes.

Le choix de l'une de ces méthodes dépend de plusieurs paramètres tels que. Elle se base sur l'utilisation de produits chimiques ou de liants afin d'augmenter la Concentration ionique de l'eau libre et de réduire les phénomènes d'échange indésirables. Ils sont deux types :

- Les liants organiques (goudrons, bitume, résine naturelle, polymère , fibre végétale).
- Les liants hydrauliques (ciment, CKD, Les liants hydrauliques routiers (LHR), Cendres volantes, pouzzolane).

2.1-Liants organiques.[8]

Les liants organiques sont des produits collants. Lors du malaxage, ils enrobent les Particules argileuses et donnent aux sols gonflants des propriétés d'hydrophobes. Ceci Entraîne une diminution de l'affinité du sol à l'eau et une modification de sa structure Microscopique [8].

2.2-Les liants hydrauliques

Les liants hydrauliques les plus utilisés pour stabiliser les sols ou renforcer les matériaux sont, le ciment, le laitier, la chaux, liants hydrauliques routiers (LHR) et les cendres volantes. Leur action résulte essentiellement de l'effet de prise et de la cristallisation de leurs constituants par hydratation. L'emploi de ces techniques s'est développé principalement en technique routière. Ces liants ont des réactions quelque peu différentes et exigent des conditions différentes pour se réaliser, cependant les effets de leur réaction sont fortement similaires [8].

matériau anhydre finement broyé qui, par simple mélange avec l'eau, développe des hydrates dont l'imbrication rigidifie le matériau granulaire non cohésif de départ en matériau cohésif présentant des propriétés mécaniques élevées. D'un point de vue minéralogique, le ciment peut être définie comme un mélange d'oxyde basique, CaO noté C, et d'oxydes acides ou amphotères comme SiO₂, noté S, AL₂O₃, noté A, ou Fe₂O₃, noté F, en notation cimentaire. [3] Il existe deux grandes familles de Ciments :

Les ciments Portland, constitués majoritairement de silice et de chaux et qui utilisée principalement dans les bétons de bâtiments et les ouvrages de génie civil ;

Les ciments alumineux qui se composent essentiellement d'alumine et de chaux. Ils ont développés au début du 20^{ème} siècle par Bied. En raison de leur résistance aux attaques chimiques, de leur prise rapide ou de l'absence de chaux, ils sont utilisés en génie civil pour la confection de sols industriels, d'ouvrage d'assainissements ou des mises en service rapides, et dans la réalisation de réfractaires monolithiques utilisés dans l'industrie sidérurgique ou verrière.

Le ciment portland est constitué principalement de clinker. Ce dernier est obtenue par mélange de matières premières naturelles de composition chimique adéquate .la préparation du cru consiste à mélanger de manière homogène du calcaire (80%) et des minéraux riches en silice et alumine (20%) :l'argile ou le kaolin .le cru et ensuite calciné à 1450°C pour former le clinker

Poussière de ciment (Klin Dust)

ciment Kiln Dust" (CKD) est l'acronyme anglais pour "poussière de four à ciment". Il s'agit d'un sous-produit généré lors de la production de ciment dans les usines de ciment, plus précisément lors de la combustion des matières premières dans le four à ciment pour produire du clinker.

Fibres végétales

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, comme dans l'ancienne Égypte, où la paille et l'argile étaient mélangés pour construire des murs. Au cours de la dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant auprès du monde universitaire que de diverses industries. Ceci dû à la variété et la multiplicité de leurs propriétés comme leur biodégradabilité et recyclabilité. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges.

Classification des fibres végétales. Les fibres se classifient selon leurs zones d'extraction en :
Les fibres de feuilles : Ce sont des fibres dures et rigides, elles entourent les feuilles pour les renforcer.

Les fibres de feuille les plus cultivées sont : la fibre de Sisal, d'Henequen et d'Abaca [6].

Les fibres de tiges : Ce sont des fibres qui donnent une bonne rigidité aux tiges des plantes.
Les fibres de tige les plus utilisées sont les fibres de jute, de lin et de chanvre [6].

Les fibres de bois : Ce sont des fibres courtes, efficace dans le renforcement des ciments. Elles proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. [6]
Les fibres de surface : Elles entourent la surface de la tige, le fruit ou les grains de la plante. Nous citons par exemple le coton et le coco.

Matériaux végétaux du palmier dattier Dans certains ouvrages le palmier est considéré comme une herbe géante. Sa hauteur varie de 20 à 30m, avec un tronc cylindrique (le stipe), portant une couronne de feuilles (les palmes). Les feuilles sont pennées, divisées avec une longueur de 4 à 7m. Il porte des inflorescences mâles ou femelles. Les fruits du palmier (dattes) sont portés par les grappes. Selon les données du ministère de l'Agriculture et du développement rural de l'Algérie ; il y a environ 18.4 millions de palmier dattier répartis sur une superficie de plus de 160 milles hectares. Bien que ce patrimoine soit reparti dans 17 wilayas (départements), il se concentre principalement dans les wilayas Sud- Est et Sud-Centre d'Algérie. La wilaya de Biskra est la première région d'Algérie en termes de nombre de palmiers dattiers avec 4,3 millions de palmiers. [6] La Figure 2.2 montre la répartition des palmiers dattiers de l'Algérie par wilaya en 2014.

2.3-Travaux antécédents

Plusieurs travaux de recherche ont été initiés un peu partout dans le monde afin d'étudier et élucider les mécanismes régissant la stabilisation et l'amélioration des caractéristiques physicochimiques et mécaniques des sols fins par Ciment Klin Dust et Fibres vegetales (fibres palmiers) Ci-dessous sont présentés et commentés les plus récents travaux antérieurs.

2.3.1- Anil Kumar et AKSingh 2017

L'objectif principal de cette recherche est d'améliorer l'ingénierie géotechnique des caractéristiques des sols pauvres avec l'ajout de poussière de four à ciment CKD du campus

BIT, Sindri, Dhanbad (INDE) pour améliorer les propriétés du sol de sable argileux à faible plasticité, le sol mélangé avec pourcentage différent de blinder de 0 à 30 % CKD. Les variations des propriétés obtenues lors de la conduite d'essais géotechniques dans des laboratoires tels que CBR, gonflement linéaire, limites d'Atterberg et compactage (essai Proctor) sur sol non traité et sol stabilisé ont été étudiées et comparées sur la base des résultats obtenus . Tout d'abord, les propriétés natives du sol telles que les caractéristiques de compactage, les limites d'Atterberg, la résistance à la compression, le CBR et la perméabilité ont été vérifiées puis comparées après l'ajout de CKD et sont présentées dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1. Résultats des tests de laboratoire (Anil kumar et AK Singh 2017)

CKD %	MOC %	MD D %	WL %	WP %	IP %	SCU (kg/cm ²)	Tremp é CBR %	Tremp é CBR %	Perméabilité K (cm/sec)
0	14.10	1,77	38.00	18.97	19.03	0,949	2,64	3.40	2 661 × 10 ⁻⁵
5	14h40	1,75	37,80	19,99	17.81	1 073	3,85	3,96	2.275x10 ⁻⁵
Dix	14.80	1,72	36,75	22.02	14.73	1 441	4h30	4.29	1.785x10 ⁻⁵
15	15h20	1,70	35.25	22.60	12.65	1 816	5.02	4,98	1.644x10 ⁻⁵
20	15.50	1,69	35.02	24.36	10.66	2.383	5.54	5.27	1.392x10 ⁻⁵
25	15,90	1,67	34,78	25,73	9.05	2.629	6.02	5,85	5.825x10 ⁻⁶
30	16h30	1,65	33,50	26h00	7,50	2.833	6,74	6.35	2.565x10 ⁻⁶

Essai de compactage

La variation du test de compactage est illustrée à la figure 1.7, la teneur en humidité optimale augmente et la densité sèche maximale diminue.

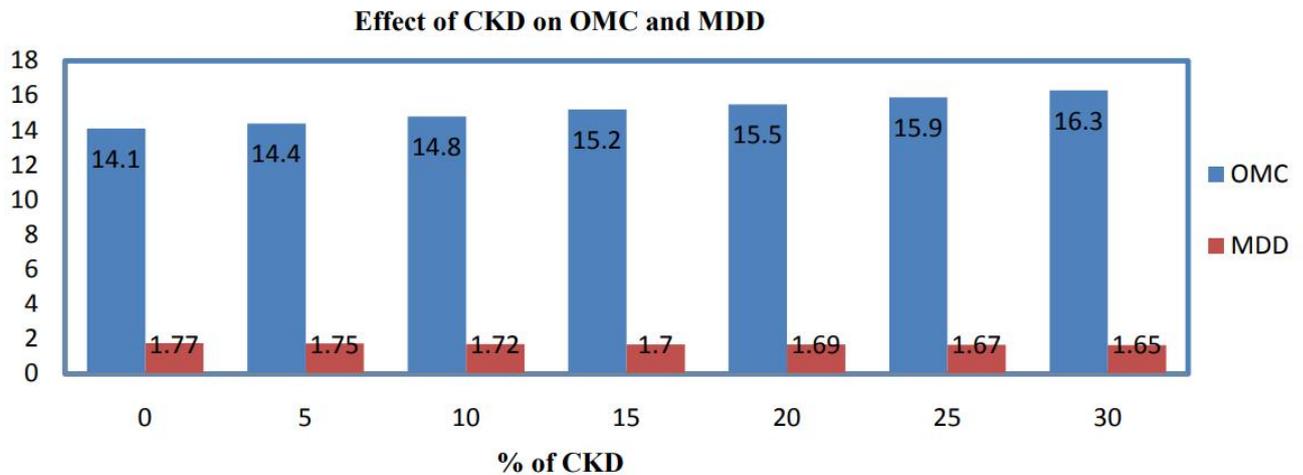


Figure 1.7. OMC et MDD à différents pourcentages de CKD (Anil kumar et AK Singh 2017)

La limite d'Atterberg

La variation des indices limites d'Atterberg avec la teneur en CKD est illustrée à la figure 1.8. La limite de liquidité et la limite de plastique ont augmenté avec la teneur en CKD, tandis que l'indice de plasticité a diminué avec la teneur en CKD.

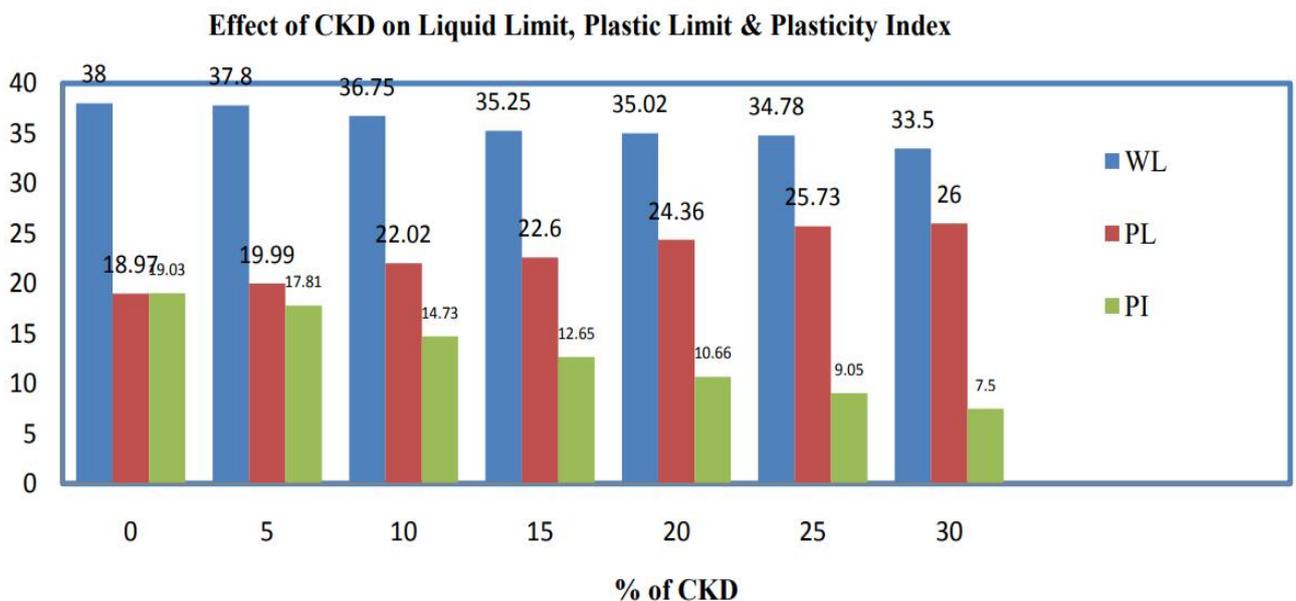


Figure 1.8. Limite de liquidité, limite de plastique et indice de plasticité à différents pourcentages de CKD (Anil kumar et AK Singh 2017)

Résultat du test de compression non confiné

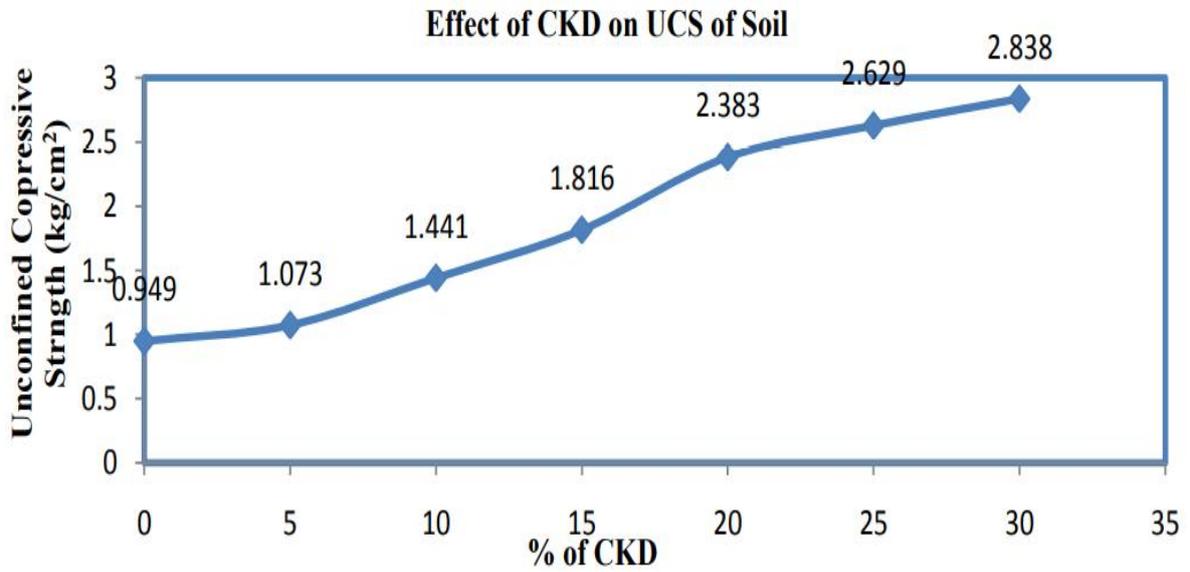


figure 1.9 . UCS du sol à différents pourcentages de CKD (Anil kumar et AK Singh 2017)

Résultat du test CBR

Comparison of Unsoaked and Soaked CBR

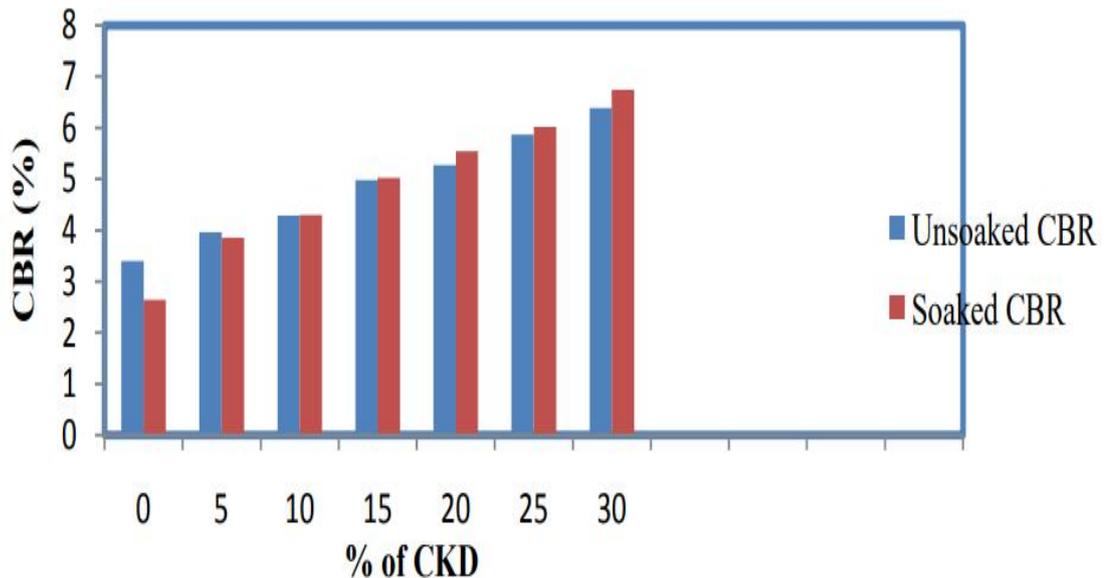


Figure 2.0. Variation CBR non trempée et trempée du mélange sol-CKD (Anil kumar et AK Singh 2017)

Résultat du test de perméabilité

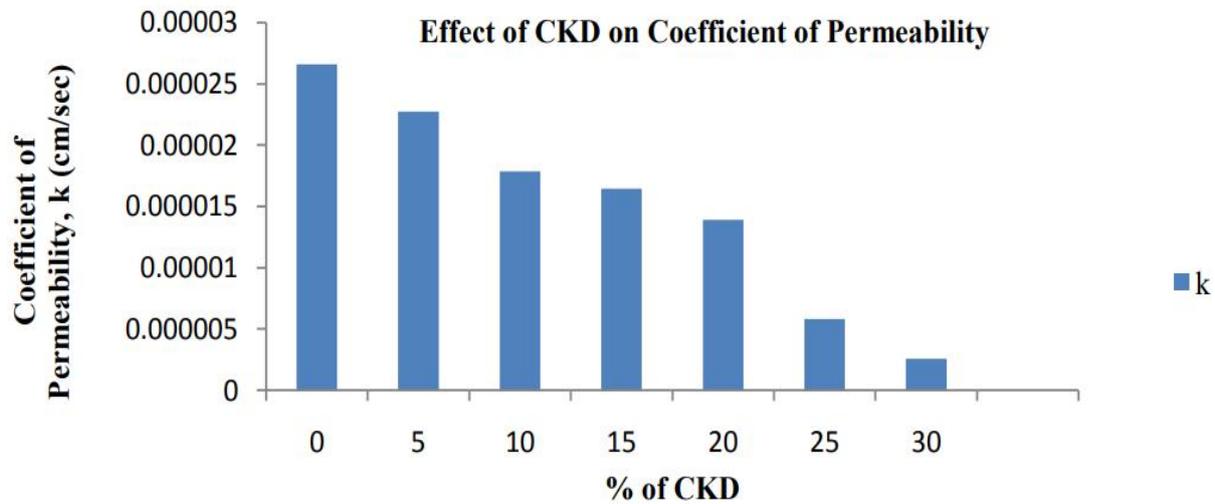


Figure 2.1. Coefficient de perméabilité avec différents pourcentages de CKD (Anil kumar et AK Singh 2017)

Les travaux de ce projet ont conclu que la CKD est potentiellement utile pour stabiliser le sol. Cependant, l'effet stabilisant est principalement fonction de la composition chimique, de la finesse et du niveau d'addition du CKD ainsi que du type de sol d'origine. CKD est un agent de stabilisation des sols efficace, basé sur les résultats observés et décrits dans cette thèse. Il est recommandé qu'il puisse être envisagé pour une utilisation dans la stabilisation des sols.

2.9.2-AB Salahudeen • AO Eberemu • KJ Osinubi (2014)

L'objectif de cette étude est de traiter un sol coûteux (coton noir) avec de la poussière de four à ciment CKD, un déchet obtenu de l'usine de ciment de Sokoto ; à Sokoto, au Nigeria, a été évaluée pour une utilisation comme matériau de construction de chaussée flexible, l'âme mélangée à 2 %, 4 %, 6 %, 8 % et 10 % de CKD. Des tests en laboratoire ont été effectués pour déterminer l'indice de plasticité, la teneur en humidité optimale, la densité sèche maximale, le CBR et la résistance à la perte de résistance pour le sol non traité et comparé au sol traité avec un pourcentage différent de poussière de four à ciment. Les figures ci-dessous présentent les résultats

Essai de compactage

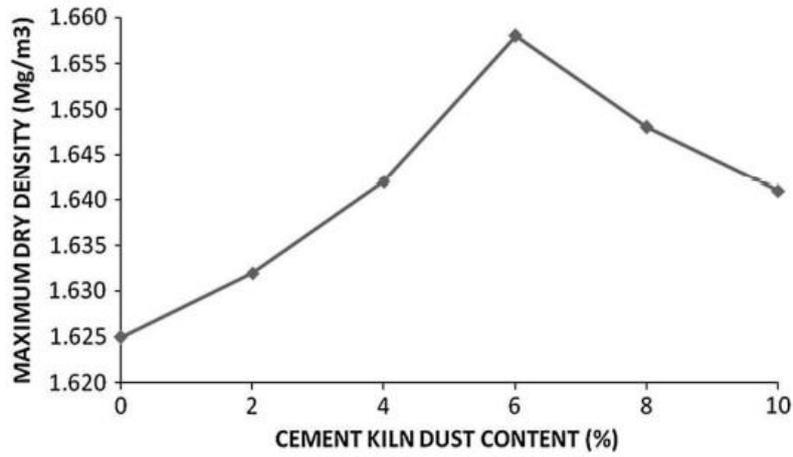


Figure 2.2. Variation de la densité sèche maximale du sol de coton noir avec une teneur en poussière de four à ciment

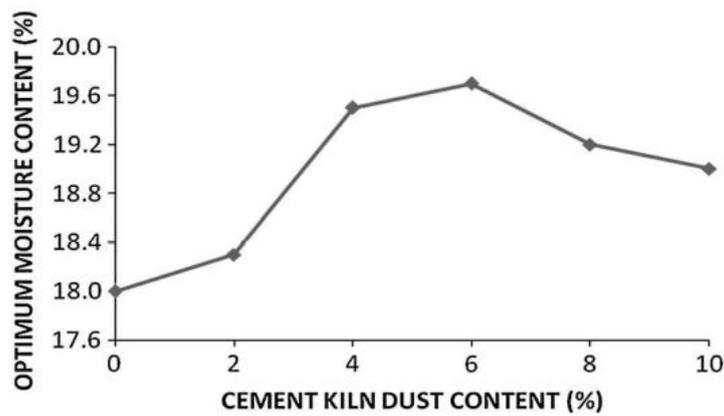


Figure 2.3. Variation de la teneur en humidité optimale d'un sol de coton noir avec une teneur en poussière de four à ciment

Résistance à la compression non confinée

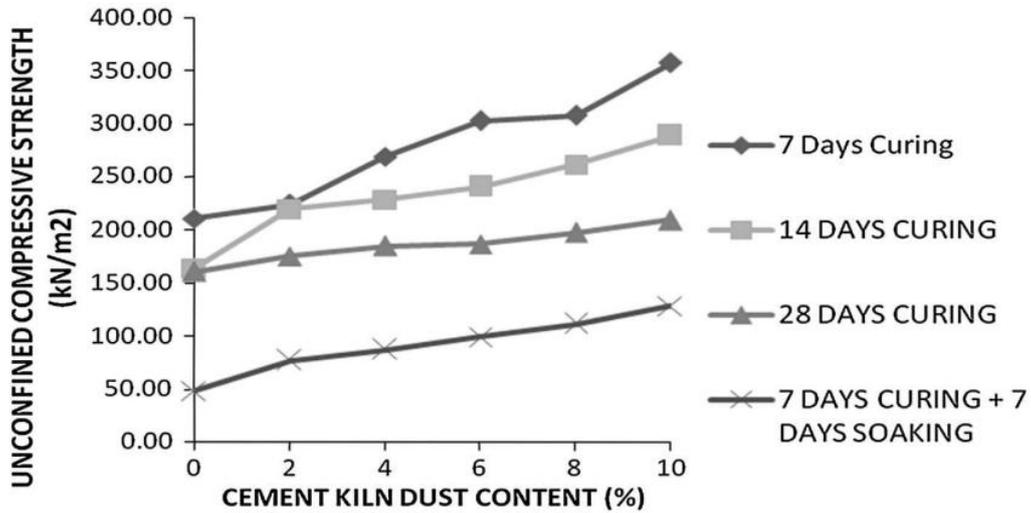


Figure 2.4. Variation de la résistance à la compression non confinée d'un sol de coton noir avec une teneur en poussière de four à ciment

Californie rapport de roulement

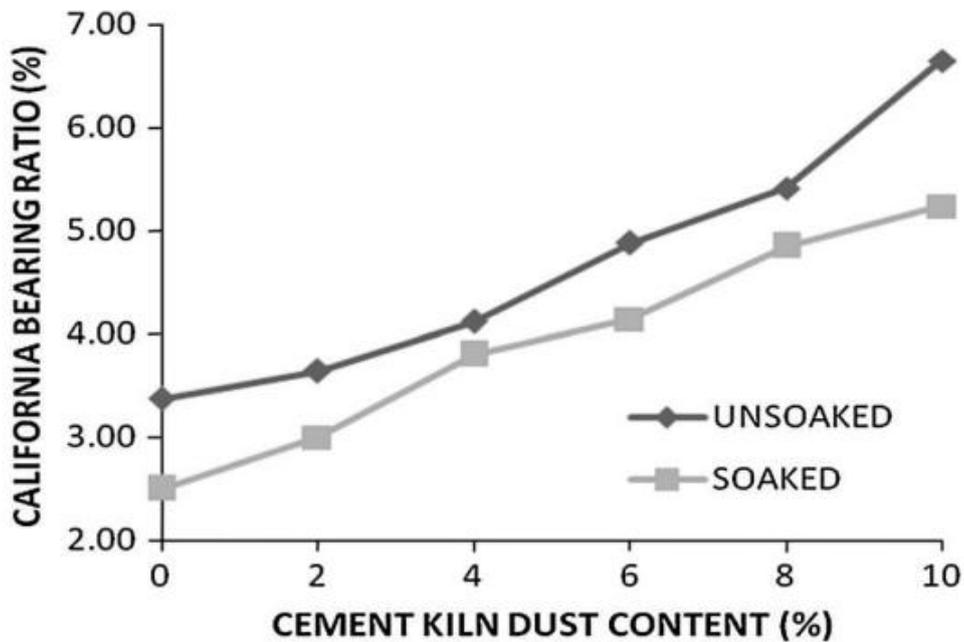


Figure 2.5. Variation du rapport portant californien non trempé et trempé du sol de coton noir avec la teneur en poussière de four à ciment

Résistance à la perte de force

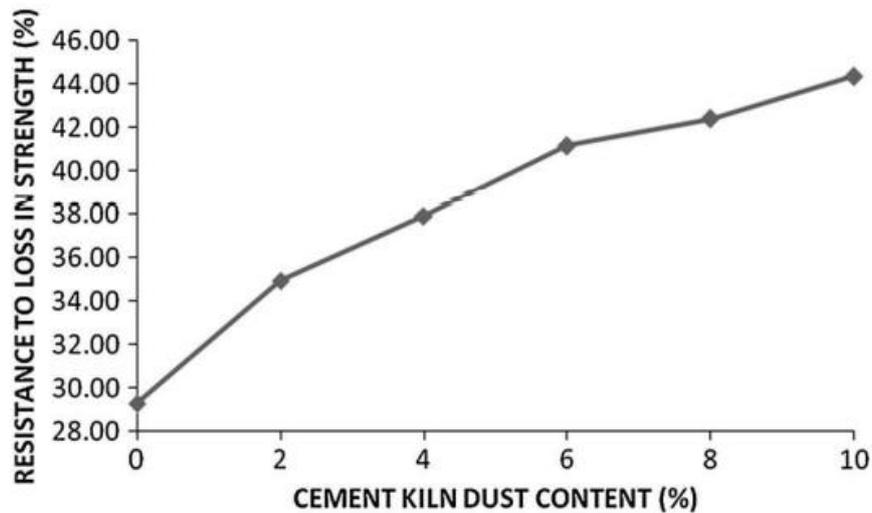


Figure 2.6. Variation de la résistance à la perte de résistance du sol de coton noir avec une teneur en poussière de four à ciment

Le sol de coton noir (sol expansif) se classe comme un sol A-7-6 (16) en utilisant le système de classification AASHTO et CL en utilisant l'USCS. Bien que les propriétés du sol naturel se soient améliorées, les valeurs maximales d'UCS, de CBR et de résistance à la perte de résistance de 357,07 kN /m² , 7 et 44,37 % enregistrées pour un sol traité avec une teneur en CKD de 10 % n'ont pas satisfait à l'exigence pour son utilisation comme sous- couche matériel. Les résultats de l'analyse élémentaire par microscopie/EDS des échantillons traités avec 0 et 10 % de CKD lorsqu'ils sont durcis pendant 7 et 28 jours montrent une réduction de la taille des particules avec une période de durcissement plus longue, comme observé pour les échantillons UCS. L'étude a montré que le CKD peut être utilisé de manière bénéfique pour améliorer le sous-sol des routes à faible trafic et dans la stabilisation des adjuvants lors de la construction de chaussées souples sur un sol expansif. Cependant, le CKD avec une LOI élevée doit être évité dans le traitement des sols gonflants.

2.9.3- EA Adeyanju et CA Okeke (2019)

Cette recherche a étudié la pertinence de la poussière de four à ciment (CKD) sur la stabilisation du sol argileux extrait le long d'un tronçon de route défaillant de Sango, Ota, Nigeria. Pour cette étude, il a été mélangé à un sol argileux dans des proportions variables de 7,5, 10, 12,5 et 15 %. Pour chaque combinaison, plusieurs tests géotechniques ont été effectués tels que la limite d'Atterberg, le compactage proctor, la houle libre et le CBR non imprégné. Le CKD a été collecté dans une usine de production de ciment à Ewekoro, dans

l'État d'Ogun, près d'un tronçon de route défaillant. la composition chimique de CKD est présentée dans le tableau 1.2

Tableau 1.2. Composition chimique de CKD.

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	S ₂ O ₃	lettre d'intention
Concentration %	16.93	4.27	62,8	2,57	2.03	0,34	0	1.22	7.05

Limite d'Atterberg

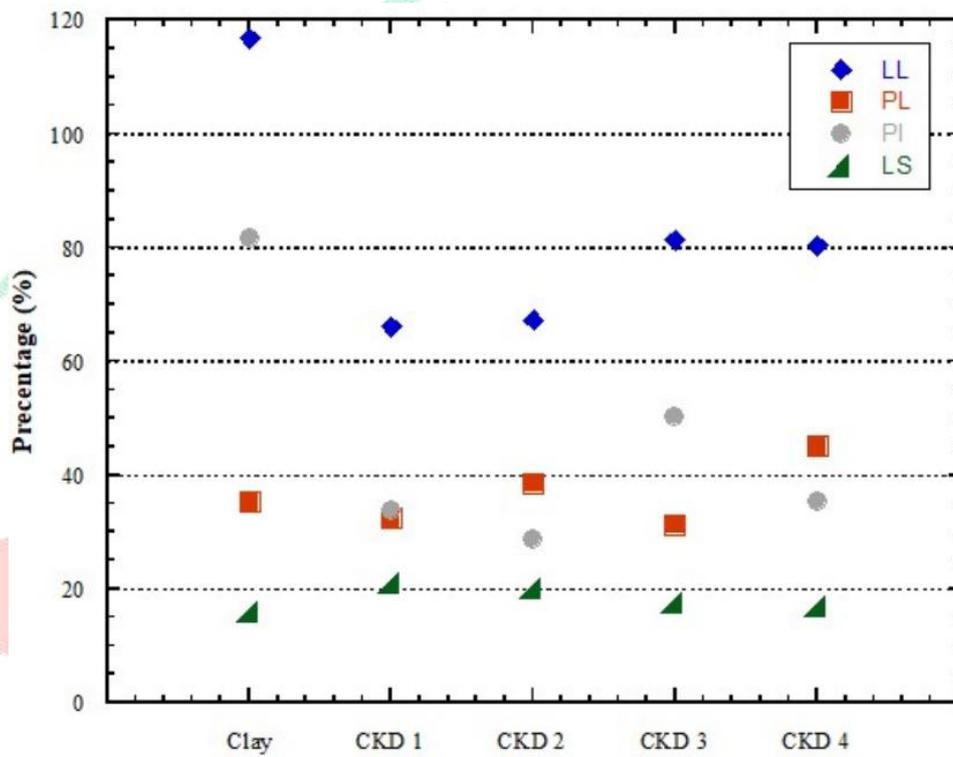


Figure 2.7. Effet du stabilisateur sur la limite d'Atterberg.

Potentiel de houle libre

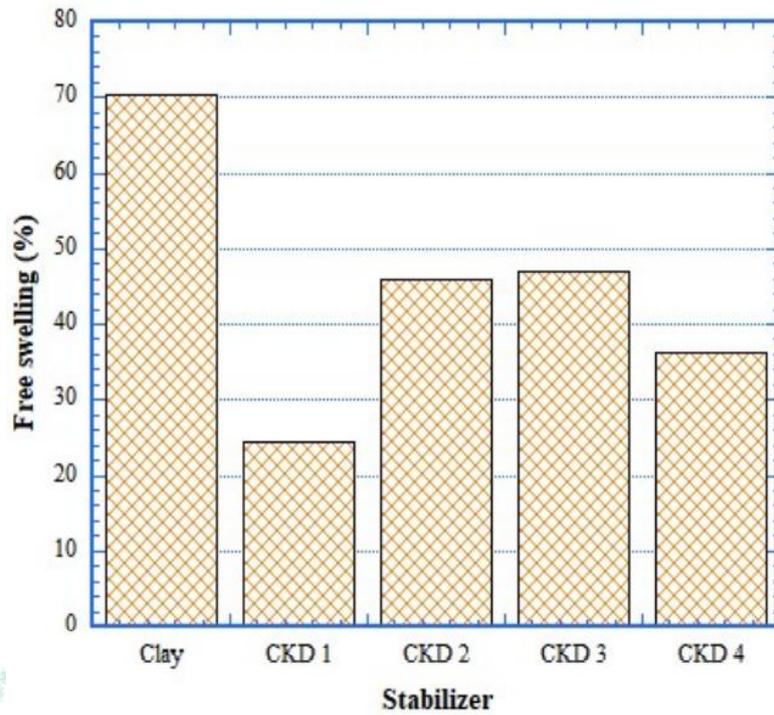


Figure 2.8. Effet du stabilisateur sur le gonflement libre.

Proctor compactage

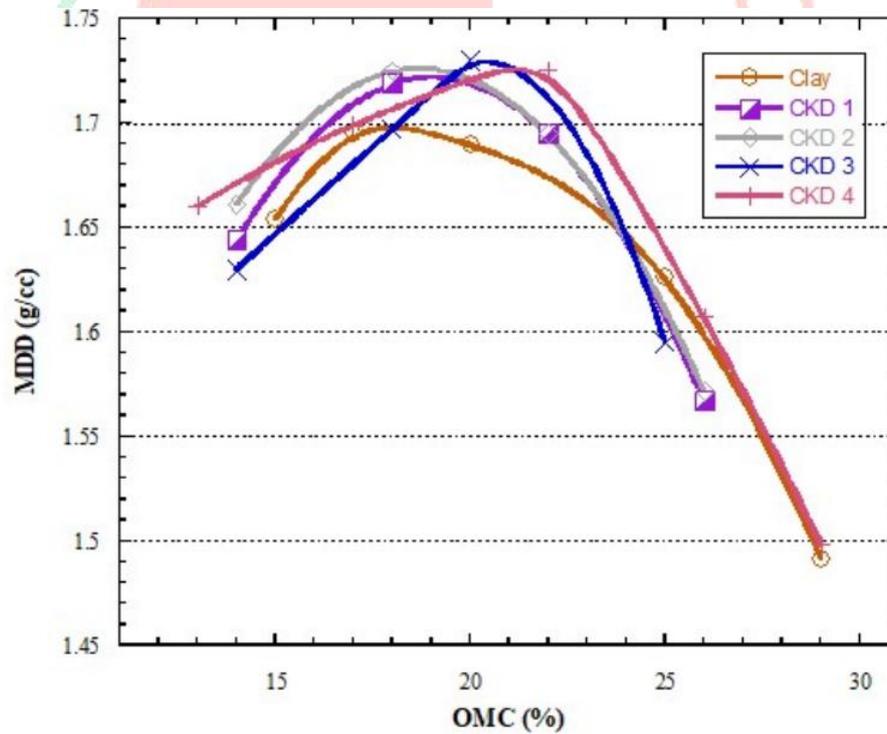


Figure 2.9. Effet du stabilisateur sur le compactage.

L'ajout de CKD réduit la plasticité due à l'augmentation de l'OMC et du MDD a été observée en raison des effets de remplissage, du développement de produits d'hydratation et de la

variation de la densité. Une réduction du gonflement libre d'un degré d'expansion moyen à faible a été observée lorsque le CKD a été ajouté en raison de la modification des minéraux argileux. Une amélioration de la résistance mécanique a été observée avec CKD à toutes les combinaisons, et une résistance accrue a été enregistrée à mesure que les jours de durcissement augmentaient en raison de la formation de produit d'hydratation. L'ajout de CKD à 10 % s'est avéré être le pourcentage optimal pour le CBR non trempé avec une amélioration de 1 792 % à 7 jours et de 3 638 % à 28 jours. Cependant, pour le CBR imbibé, l'ajout de 10 % conduit à une amélioration de 2 774 %. Bien que l'optimum pour le CBR trempé soit une amélioration de 15% à 2 915%, car plus de CKD dans le système a encouragé la formation de produit d'hydratation avec la disponibilité de plus d'humidité dans le mélange de sol. Cependant, en raison d'une légère différence dans l'amélioration imbibée de 15 % par rapport à 10 % et la performance optimale de 10 % dans des conditions non imbibées, l'optimum pour l'ajout de CKD est de 10 %. L'ajout de CKD améliore la maniabilité et réduit les coûts car l'épaisseur de chaussée requise est réduite .

2.9.3- AIM Ismail et ZL Belal (2015)

Le but de cette étude est l'amélioration des propriétés techniques de deux sols perturbés en utilisant CKD dans différents pourcentages (5, 10 et 20 %) de deux types de sols mous. La comparaison entre le naturel et le traité est illustrée dans les figures ci-dessous.

PH

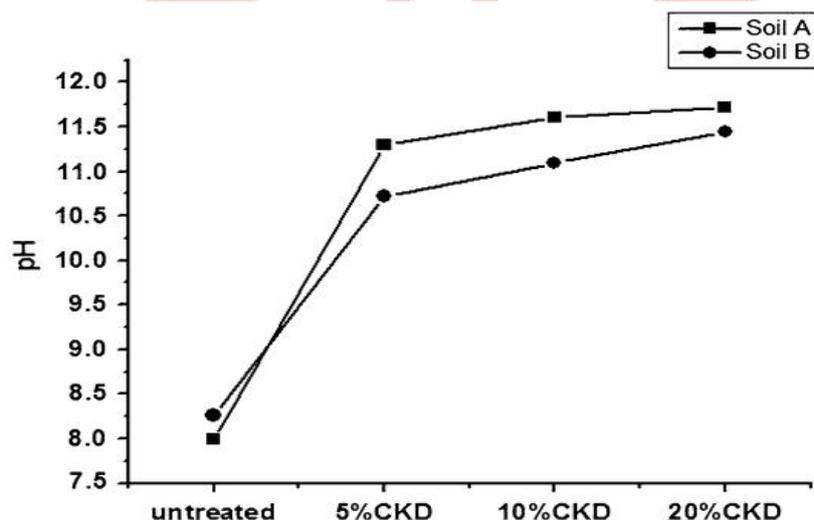


Illustration 3.0 . La valeur du pH du mélange sol-CKD pour les sols A et B

Limites d'Atterberg

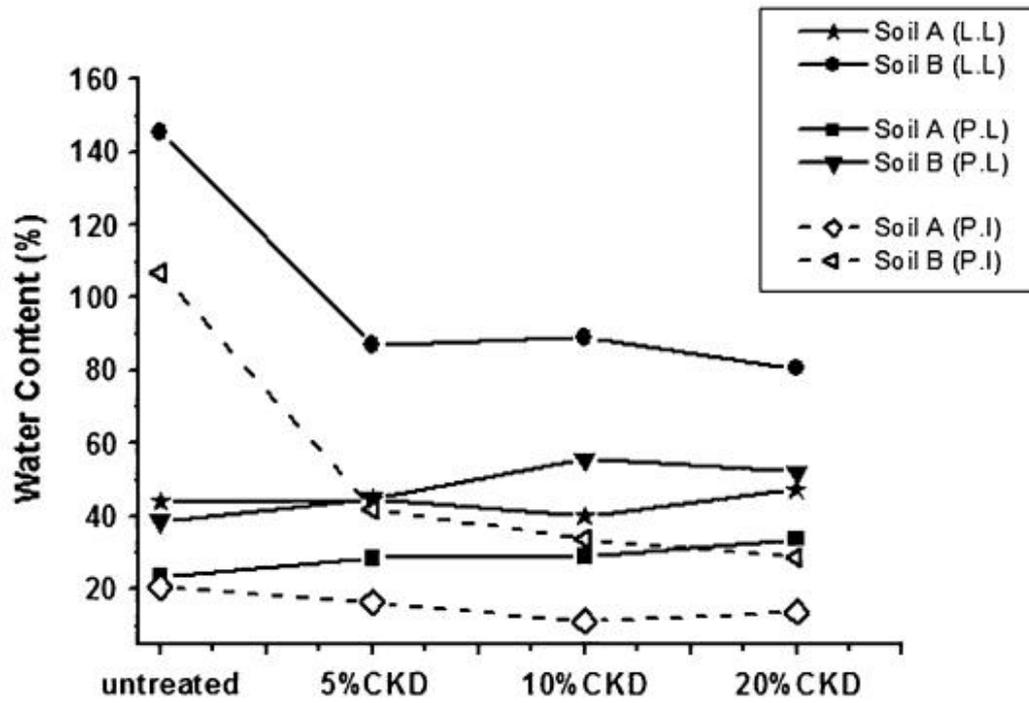


Figure 3.1. Limites d'Atterberg en pourcentage versus CKD pour les sols A et B

Essai de compactage

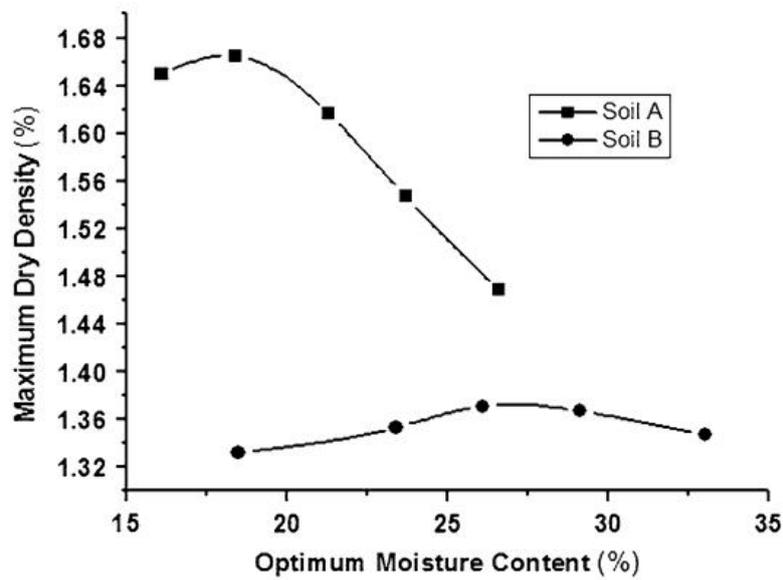


Figure 3.2. Le MDD et l'OMC pour les sols non traités A et B

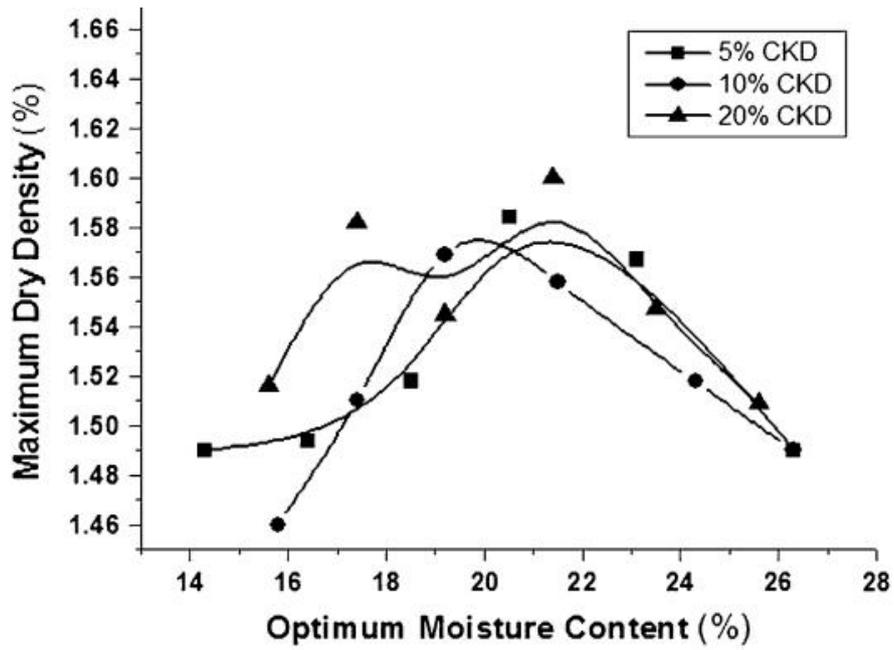


Figure 3.3. MDD et OMC pour le mélange sol A/CKD

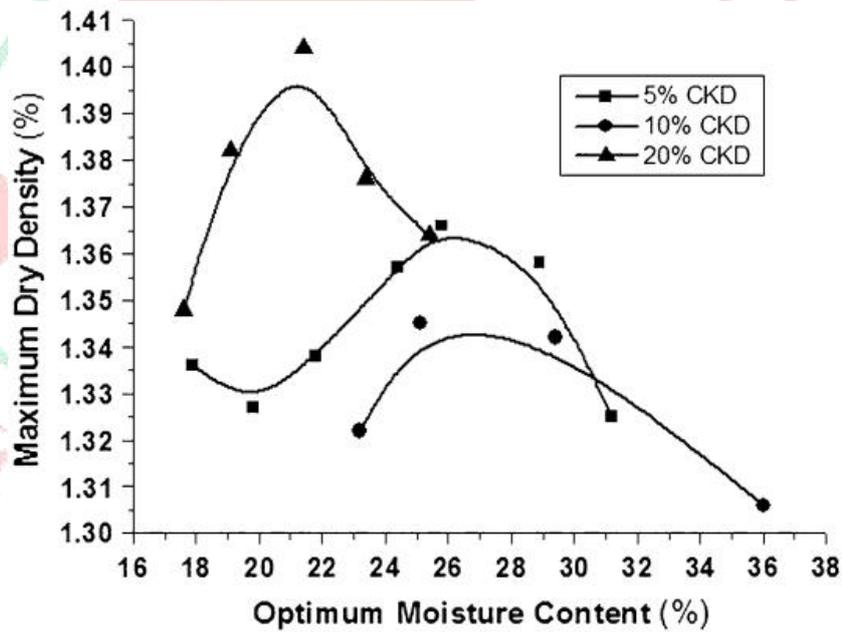


Figure 3.4. MDD et OMC pour le mélange sol B/CKD

Les principales conclusions tirées de cette étude sont l'augmentation des valeurs de pH et la diminution du PI dans les sols perturbés A et B avec l'ajout de CKD. Le MDD a diminué et l'OMC a augmenté avec l'augmentation du pourcentage de CKD dans le sol A. Dans le sol B,

le MDD et l'OMC ont diminué avec l'ajout de CKD. Dans le mélange sol-CKD, les valeurs limites de plastique étaient systématiquement suffisamment élevées pour abaisser l'IP pour les deux types de sols étudiés, confirmant que le CKD était utilisé pour la modification du sol. D'après les données obtenues à partir des deux types de sols, CKD a diminué l'IP soutenant que, CKD agit comme un stabilisateur dans l'amélioration des sols.

2.9.4- Abdulla A. Sharo , Fathi M. Shaqour et Jomana M. Ayyad (2021)

Dans cette étude, l'effet de l'ajout de zéolite naturelle, qui est un matériau pouzzolanique courant, sur un sol stabilisé avec de la poussière de four à ciment (CKD) est étudié . La teneur optimale en CKD a été déterminée en effectuant des tests sur un sol traité avec des pourcentages de CKD (0 %, 2 %, 4 %, 6 %, 8 %, 10 % et 12 %), puis le traitement optimal en CKD a été appliqué sur sol remplacé par différents pourcentages de zéolithe (1 %, 3 %, 5 %, 10 % et 15 %). Des tests de limites d'Atterberg, de gonflement, de portance californienne et de compression libre ont été effectués sur tous les échantillons pour évaluer les performances des additifs dans la stabilisation.

La zéolithe naturelle utilisée dans cette étude a été collectée dans la région d'AlAshqaf au nord de la Jordanie. La poussière de clinker de ciment (CKD) utilisée a été obtenue sous forme de grains très fins dans une cimenterie locale et utilisée telle quelle, sans autre traitement dans le programme de test. Ses caractéristiques générales ont été fournies par l'entreprise. La gravité spécifique est de 3,1 selon la norme ASTM D854 (2014), avec 85,3 % inférieure à 75 µm. La composition chimique du CKD utilisé est donnée dans la figure 3.5

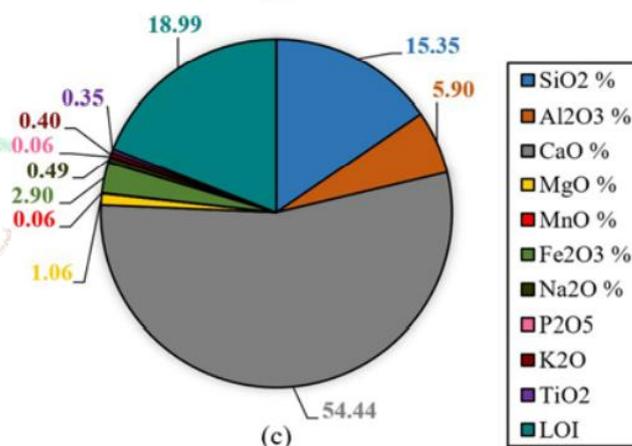


Figure 3.5. Poussière de four à ciment obtenue à partir d'analyses XRF

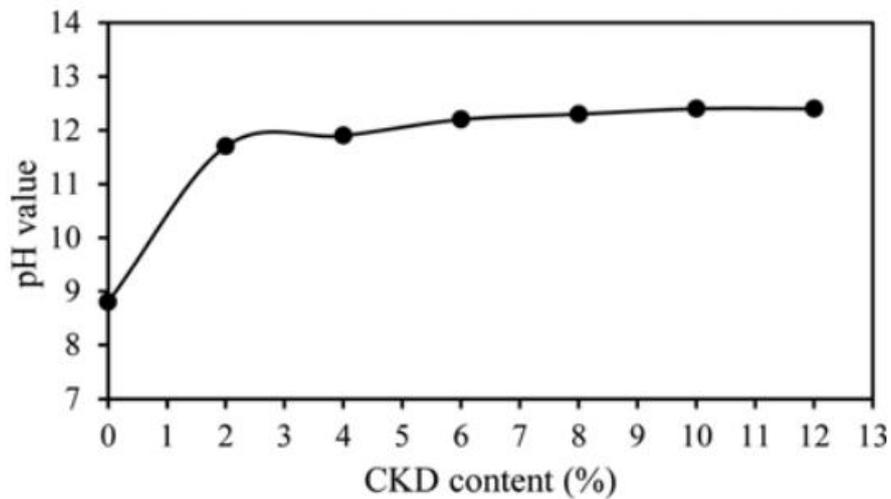


Figure 3.6. Modification de la valeur du pH due à l'ajout de CKD

Limites d'Atterberg

Les résultats des tests sur les limites d' Atterberg du sol à base avant et après l'ajout des stabilisants de CKD seul et du CKD combiné avec de la zéolithe naturelle. L'indice de plasticité du sol à base a montré une diminution de 65% en raison de l'ajout de 12% de CKD. Cela est dû à l'échange de cations où les ions calcium de CKD remplacent le magnésium et d'autres ions trouvés sur les surfaces des particules d'argile, ce qui conduit à une meilleure floculation agglomération entre les particules d'argile.

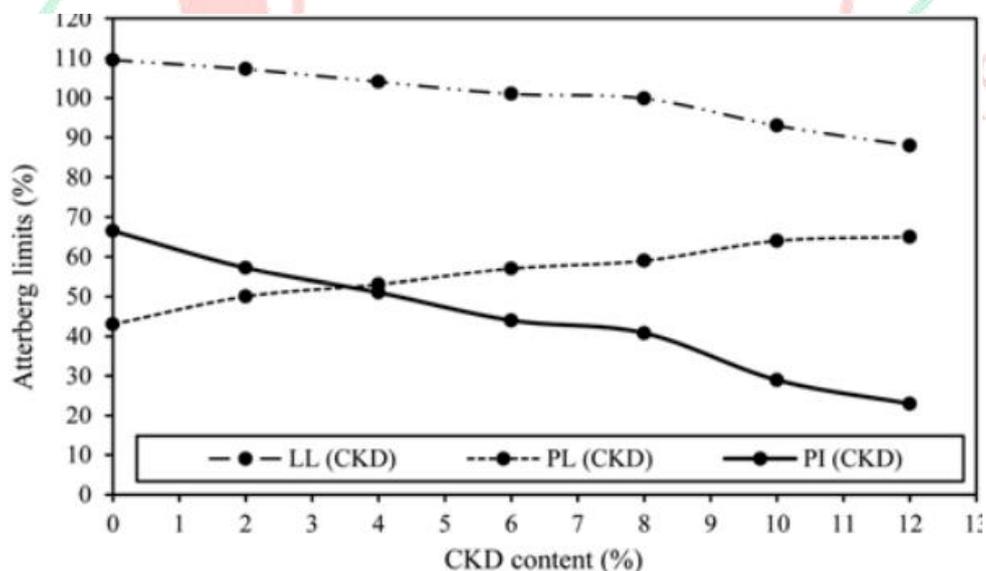


Figure 3.7. Effet de l'additif CKD sur les limites d'Atterberg

Caractéristiques de compactage

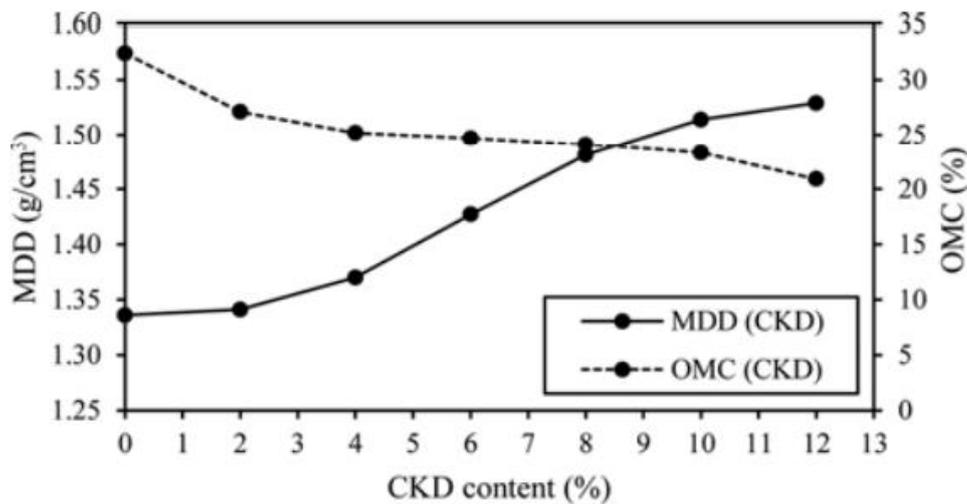


Figure 3.8. Effet de l'additif CKD sur la siccité maximale

Les résultats des tests de compactage ont indiqué une augmentation progressive de la densité sèche maximale (MDD) et une diminution de la teneur en humidité optimale (OMC), avec l'augmentation du pourcentage de CKD ajouté au sol de base, comme le montre la figure 38. Le taux d'augmentation de la MDD était plus faible entre 0 % à 4 % de CKD, puis plus élevé entre des pourcentages de 4 % à 8 % de CKD, puis ralenti de 8 % à 12 % de CKD qui a abouti à un MDD de 1,53 g/cm³, légèrement supérieur à celui dû à 10 % de MRC L'augmentation de la densité est due à la densité plus élevée du CKD ajouté. Cependant, les résultats ont montré une diminution progressive de la teneur en eau optimale (MOC), avec des pourcentages croissants de CKD ajoutés, passant de 32,5 % pour le sol à base à 20,9 % pour le sol à base mélangé à 12 % de CKD. L'augmentation du MDD et la diminution de l'OMC sont attribuées à l'augmentation des grains fins dans le mélange de sol en raison de l'ajout de CKD à grains plus fins au sol de base.

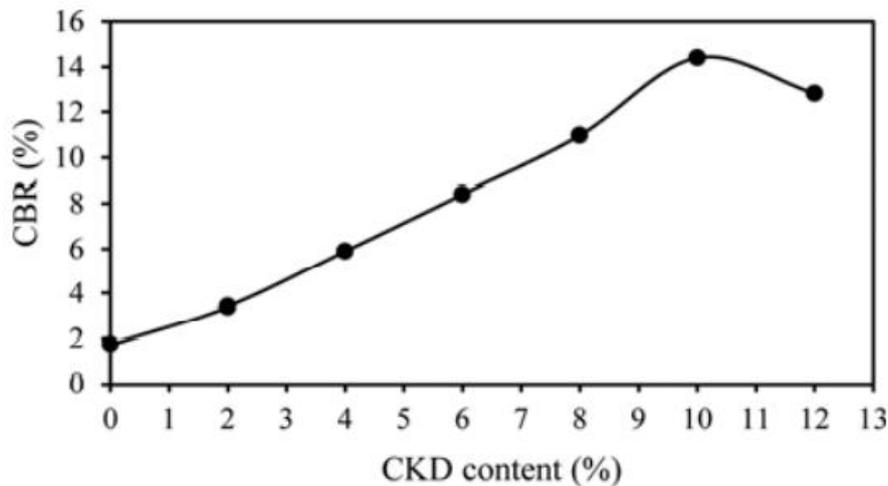


Figure 3.9. Effet de l'additif CKD sur le California Bearing Ratio (CBR)

Potentiel de houle

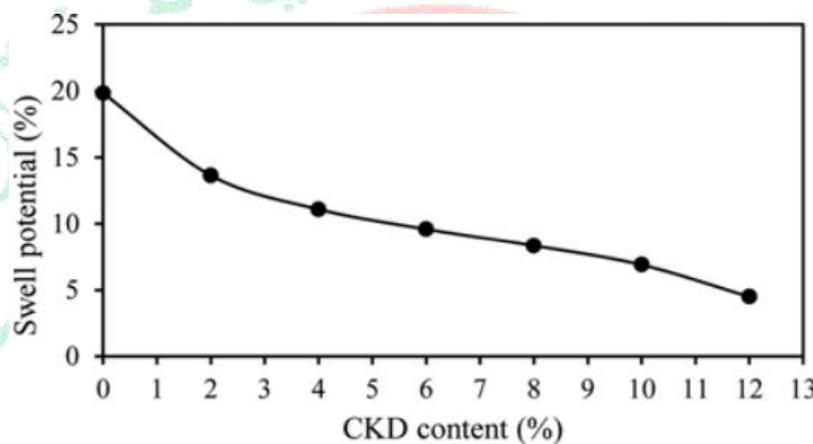


Figure 4.0. Effet de l'additif CKD sur le potentiel de gonflement

Présente l'effet de CKD sur le potentiel de gonflement. l'ajout de faibles pourcentages de CKD au sol (2%) provoque une baisse du pourcentage de gonflement d'environ 31%, après quoi, le taux de diminution du potentiel de gonflement avec l'ajout de CKD est devenu moindre. Il a été remarqué que la majeure partie de la réduction des pourcentages de gonflement se produisait dans les deux premières heures suivant l'ajout même de faibles pourcentages de CKD. Une réduction du potentiel de gonflement de 77 % a été enregistrée en raison de l'ajout de 12 % de CKD. Une telle réduction du potentiel de gonflement est attribuée à moins d'échange de cations à double couche avec l'existence de CKD.

En conclusion, CKD s'est avéré agir comme un agent stabilisant efficace qui a fondamentalement amélioré la résistance du sol expansif testé de 3 fois. L'ajout de 10% de CKD s'est avéré être un pourcentage optimal pour atteindre la résistance à la compression maximale dans les 28 jours suivant le durcissement. L'augmentation de l'UCS due à l'agent

stabilisant de CKD est fonction du temps de durcissement et du processus de durcissement. 3. CKD réduit l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement du sol expansif à base pour le rendre plus responsable à des fins de construction.

2.9.5- Gerald A. Miller et Shahriar Azadb (2000)

L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer l'efficacité de la poussière de four à ciment comme stabilisateur de sol aux USA, le CKD mélangé à trois types de sol dans des pourcentages différents. La comparaison entre les sols naturels et les sols mixtes-CKD est présentée dans les figures ci-dessous

Valeurs PH

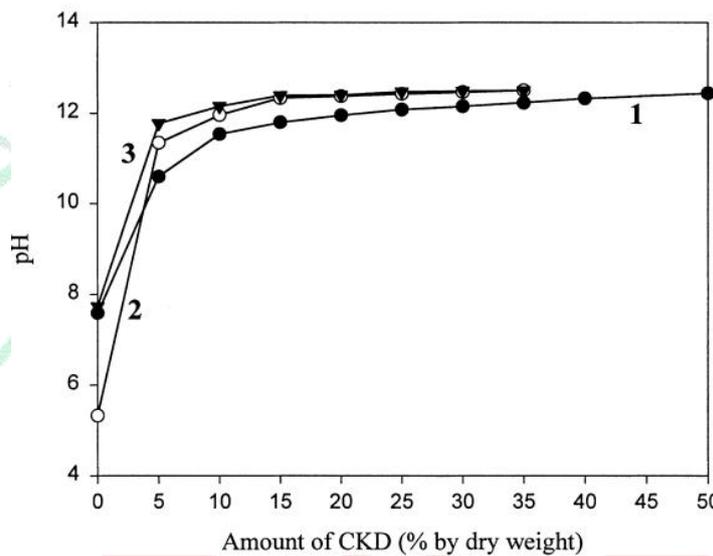


Figure 4.1. PH du sol] mélanges CKD pour les sols 1, 2 et 3.

Essai de compactage

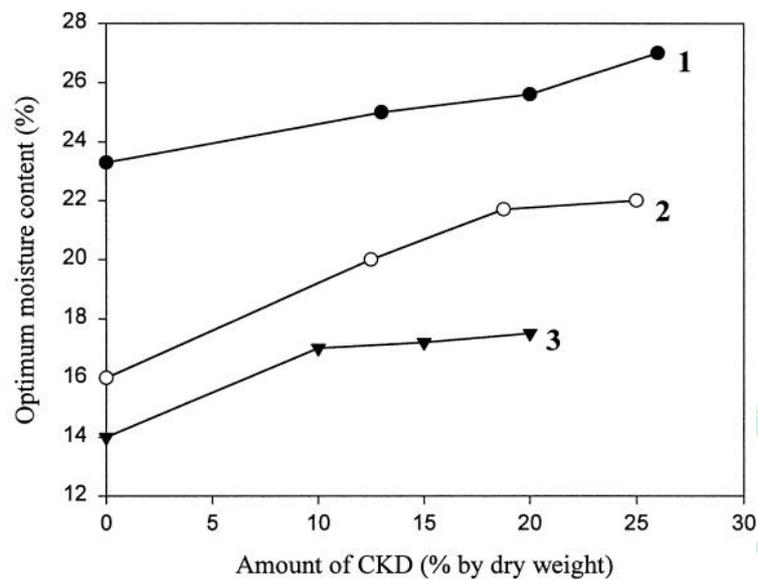


Figure 4.2. Teneur en humidité optimale par rapport à la teneur en CKD pour les sols 1, 2 et 3

Une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution du poids unitaire sec se sont produites à mesure que la teneur en CKD augmentait pour les trois sols. Pour l'étude actuelle, l'augmentation de la Wopt résulte apparemment de l'affinité du CKD pour l'eau, et le poids unitaire sec semble diminuer car l'agrégation des particules due au CKD entraîne des macropores plus grands dans le sol.

Essais de compression non confinée

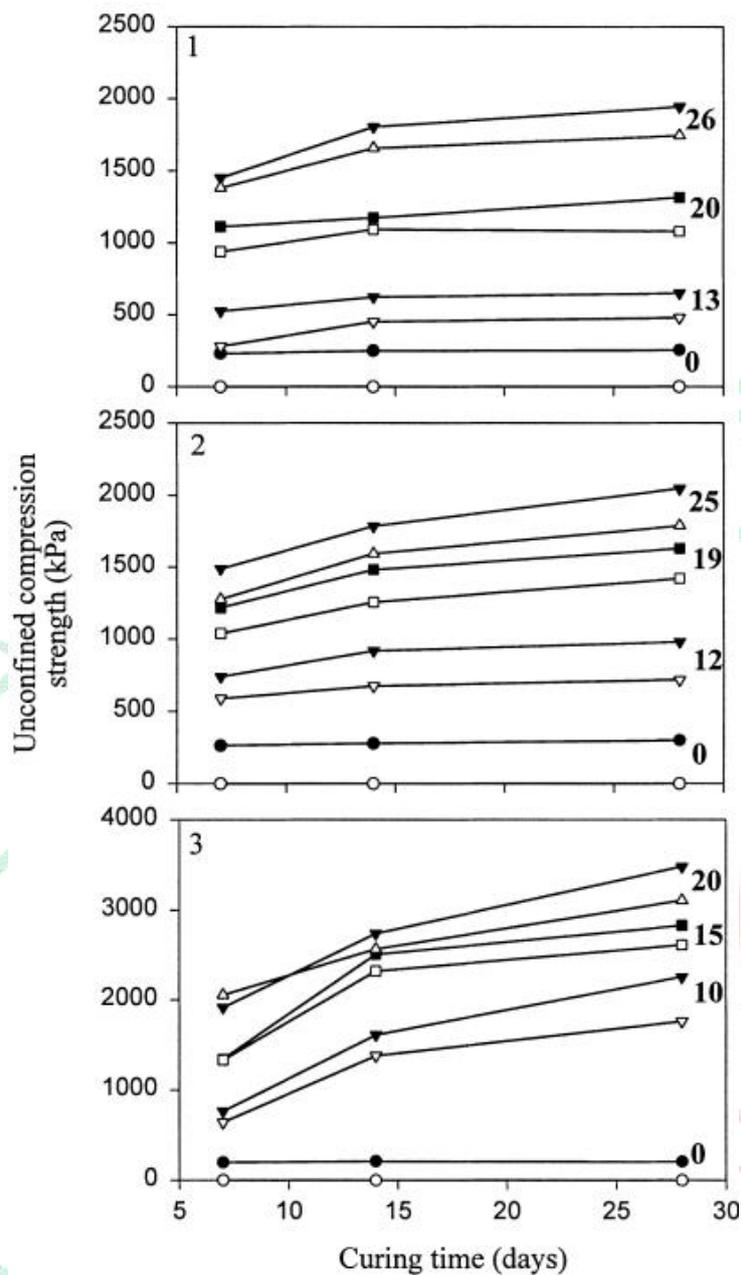


Figure 4.3. Résistance à la compression non confinée par rapport au temps de durcissement pour les sols 1, 2 et 3. Les chiffres en haut à gauche du graphique indiquent le numéro du sol. Les symboles ouverts représentent la force après immersion des échantillons pendant 48 h et les symboles pleins représentent la force non immergée. Les nombres à droite des courbes indiquent la teneur en CKD en pourcentage en poids ,

Les résistances à la compression non confinée des sols non traités étaient dans tous les cas inférieures à celles des sols traités. Pour les sols non traités, l'UCS n'a pas augmenté avec l'augmentation du temps après le moulage (temps de durcissement).

Limite d'Atterberg

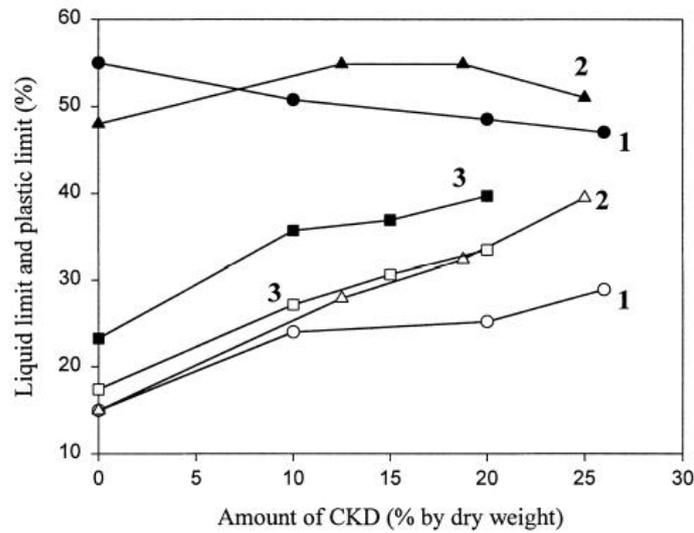


Figure 4.4. Symboles de limites de liquide solides et symboles de limites de plastique ouvertes. Contre. Teneur en CKD pour le sol 1 cercles, l'huile 2 triangles et le sol 3. Carrés.

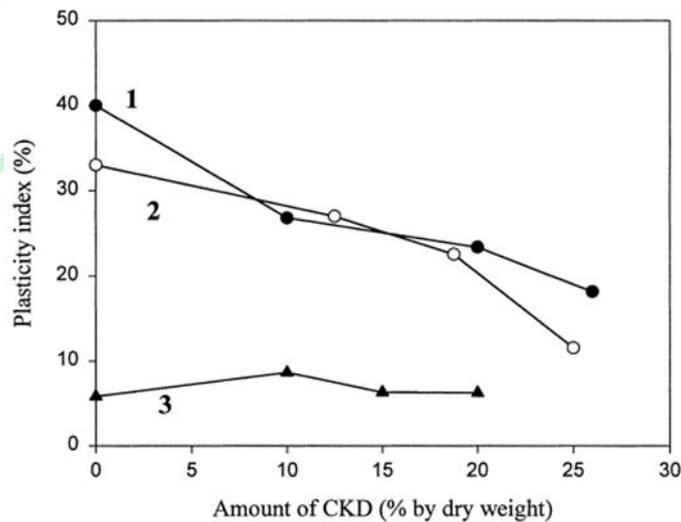


Figure 4.5. Indice de plasticité en fonction de la teneur en CKD pour les sols 1, 2 et 3

La limite plastique du complexe échangeur de cations du sol. On a observé que le LL augmentait ou diminuait en raison du traitement à la chaux en fonction de la nature du complexe échangeur de cations alors que le PL augmentait presque toujours de manière significative. Les argiles saturées en calcium ont tendance à présenter des augmentations de LL lorsqu'elles sont traitées avec de la chaux, tandis que les argiles avec des cations de valence inférieure tels que le sodium subiront un échange de cations significatif et une réduction significative de LL avec une teneur croissante en chaux. La différence de comportement LL présentée par les sols 1 et 2 de la figure 44 est probablement due à des

complexes échangeurs de cations différents dans chacun de ces sols. Pour le sol 3 à prédominance sans cohésion, l'ajout de CKD a entraîné une augmentation presque équivalente de LL et de PL qui résulte probablement de l'augmentation des fines de CKD et de l'affinité accrue pour l'eau qui l'accompagne.

Jili Qu* et Hao Zhu* (2020)

Cette étude est réalisée sur un sol argileux typique de Shanghai renforcé avec des fibres de palmier locales, considéré comme facilement accessible, avec une longueur et une teneur différentes. Plusieurs essais ont été réalisés dans cette étude afin de déterminer Les indices de performance (UCS, DR, SM, EAC, FP) du sol renforcé, qui sont les plus couramment utilisés dans l'étude géotechnique, la conception et la construction dans les projets de génie civil locaux, ils sont considérés comme des cibles d'évaluation.

Les principales conclusions tirées de cette étude sont résumées comme suit :

Dans l'ensemble, la fibre de palmier a un impact positif sur les sols mous. La résistance à la compression libre du sol argileux de Shanghai renforcé de fibres de pam locales augmente avec la teneur et la longueur des fibres jusqu'à l'apparition d'un point critique ($f_c = 0,4 \%$, $L = 15 \text{ mm}$).

La ductilité du sol renforcé est considérablement augmentée avec la teneur et la longueur de la fibre de palmier.

La capacité d'adsorption d'énergie est généralement augmentée avec la teneur et la longueur des fibres de palmier, qui est augmentée de 580 % pour les échantillons avec $f_c = 0,4 \%$ et $L = 15 \text{ mm}$ par rapport au sol non renforcé

La tendance du modèle de rupture est généralement passée d'une rupture fragile à une rupture ductile, qui apparaît sous la forme d'un seul plan de cisaillement diagonal, de multiples fissures à renflement au milieu des échantillons, indiquant l'augmentation de la ductilité après le renforcement.

Quelques résultats de cette étude sont représentés ci dessous montrant ainsi l'impact des fibres de palmier sur les caractéristiques et le comportement de l'argile étudiée:

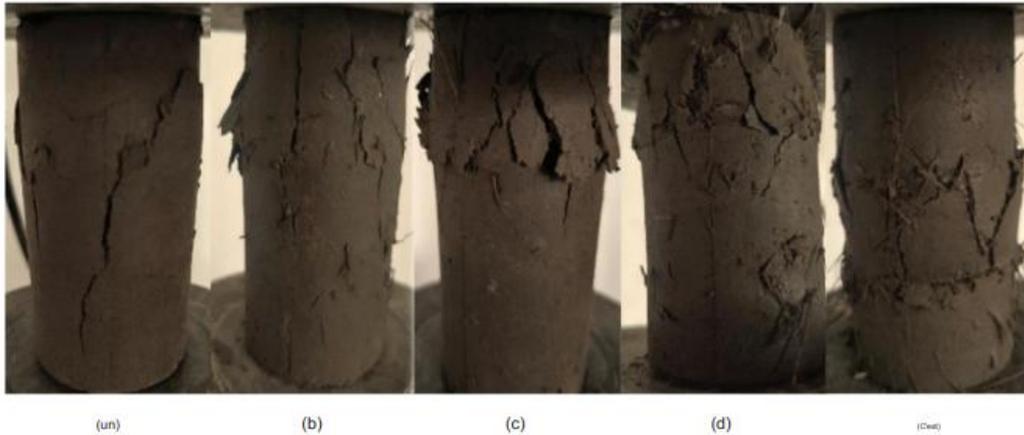


Figure 10 : Impact de la teneur en fibres de palmier sur les modèles de défaillance à OWC et MDD comme $L = 15$ mm de longueur de fibre : (a) $f_c = 0$, (b) $f_c = 0,1 \%$, (c) $f_c = 0,2 \%$, (d) $f_c = 0,4 \%$, (e) $f_c = 0,6 \%$

Fig 4.6 : impact de la teneur en fibres de palmier

La Fig. 4.6 montre les courbes contrainte-déformation d'échantillons pour différentes teneurs en fibres de palmier à OMC et MDD avec une longueur de fibre = 15 mm. Pour gagner de la place, les résultats pour les autres compositions n'ont pas été présentés. On peut voir sur la Fig. 4 que les contraintes maximales sont significativement augmentées pour les échantillons renforcés par rapport à ceux non renforcés et elles augmentent avec la teneur en fibre de palmier jusqu'à $f_c = 0,4 \%$. Par la suite, il diminue. Ce résultat suggère qu'il existe un point de contrainte axiale maximum pour la teneur en fibre de palmier qui est d'environ 0,4 %.

Une chute soudaine peut être observée après une contrainte maximale pour un échantillon non renforcé (témoin), ce qui indique une nature de déformation fragile. Mais avec l'ajout de fibre de palmier, cela se transforme en une déformation progressive, avec une tension de rupture accrue accompagnée d'une perte de résistance après le pic. La contrainte maximale de l'échantillon avec un contenu de 0,4 % et 15 mm de longueur est augmentée d'environ 80 % par rapport à l'échantillon non renforcé, avec une contrainte de rupture correspondante augmentée d'environ 146 %.

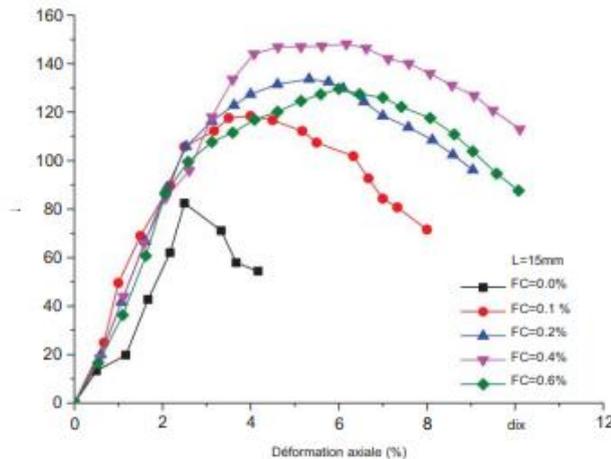


Figure 4 : Relation entre le stress et la déformation des échantillons pour différentes teneurs en fibres de palmier à OWC et MDD comme longueur de fibre = 15 mm

Fig 4.7 relation entre les stress et la deformation

La figure 4.7 montre les courbes de contrainte-déformation d'échantillons pour différentes longueurs de fibres de palmier à OWC et MDD avec une teneur en fibres de palmier $F_c = 0,4 \%$. On peut voir que les contraintes maximales augmentent généralement avec l'augmentation de la longueur de la fibre de palmier, lorsque la longueur = 15 mm, la contrainte est maximale ; où le taux d'augmentation est d'environ 80 % par rapport à celui des échantillons non renforcés. Les déformations axiales à la rupture sont également significativement augmentées par rapport à celles des échantillons non renforcés. Pour $L = 15$ mm, le taux d'augmentation de la déformation axiale de rupture est d'environ 146 % par rapport aux échantillons témoins. Cependant, la contrainte maximale et la déformation de rupture correspondante pour les échantillons renforcés augmentent progressivement avec l'augmentation de la longueur des fibres. Les résultats des tests montrent que comme le contenu et la longueur de la fibre de palmier sont de 0,4% et 15 mm de longueur, respectivement, la résistance maximale est atteinte avec la plus grande ductilité. La figure 4.8 montre la relation entre l'UCS et la teneur en fibres de palmier sous différentes longueurs.

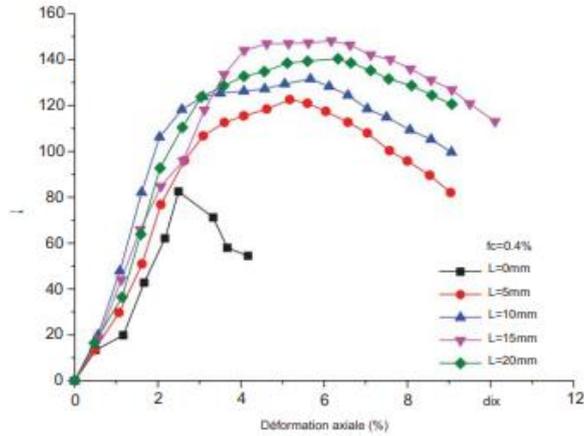


Figure 5 : Relation entre la contrainte et la déformation des échantillons pour différentes longueurs de fibre de palmier à OWC et MDD comme $F_c = 0,4 \%$

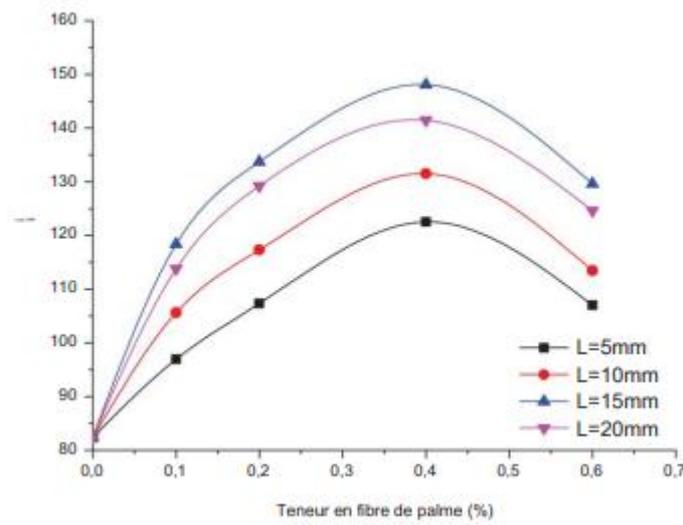


Figure 6 : Changement d'UCS avec une teneur en fibre de palmier sous différentes longueurs

CHAPITRE 2 : MATERIAUX ET PROCEDURES D'ESSAIS

3.1.INTRODUCTION

Dans ce chapitre les différents matériaux utilisés lors de ce travail de recherche ont été identifiés et caractérisés par une campagne d'essais. L'*argile* de provenance Didouche Mourad Wilaya de Constantine c'est un déblai en vue d'utilisation pour la construction des routes. a été identifiée par des analyses chimiques, minéralogiques puis caractérisée physiquement au laboratoire en déterminant la teneur en matière organique (*TMO*), la densité spécifique G_s , la granulométrie, les limites d'Atterberg. Les essais Proctor ainsi que l'essai de compression hydraulique ont été conduits pour la caractérisation mécanique. Le deuxième matériau analysé a été le CKD dont la composition chimique a été obtenue de l'usine même de provenance. Les différentes méthodes concernant chacun des essais utilisés sont aussi décrites et données à la fin du présent chapitre.

3.2.MATERIAUX

Les différents matériaux utilisés sont essentiellement L'ARGILE de DIDOUCH MOURAD WILAYA DE CONSTANTINE. Les stabilisateurs à savoir le FIBRE DE PALMIER dattier utilisées dans cette étude proviennent de palmiers de la régions OUARGLA (sud algérien) et le CKD est récupérée par les filtres électrostatiques du four de ciment de cimenterie de HADJAR ESSOUD A SKIKDA.

LES MATERIAUX STABILISATEURS

LA POUSSIÈRE DU CIMENT (CKD) est composée principalement de particules fines de matières premières calcinées, de cendres volantes, de calcaire et de résidus de combustibles. Il peut également contenir des traces de métaux lourds et d'autres substances chimiques provenant des matières premières et du combustible utilisées dans le processus de production du ciment. Le CKD peut également être valorisé dans certaines applications, notamment dans la fabrication de ciment, la construction routière, la stabilisation des sols et la production d'agrégats légers, sous réserve de respecter les réglementations environnementales locales, nationales et internationales. .



Fig. 4.8 .poussière du four ciment passant au tamis 0,08 mm

La poussière du ciment CKD utilisé dans la présente étude a pour composition chimique et caractéristiques physiques comme donnés par les tableaux 1.3 et 1.4

Tableau 1.3 Proportions d'éléments chimiques du CKD

<i>Eléments Chimiques</i>	<i>CKD</i>
SiO ₂	21.57
Al ₂ O ₃	5.87
Fe ₂ O ₃	3.32
CaO	66.17
MgO	1.51
SO ₃	0.36
K ₂ O	0.59
Na ₂ O	0.38

Tableau 1.4 Caractéristiques physiques du poussière du ciment CKD

<i>Caractéristiques</i>	<i>Valeurs</i>
<i>Poussière du ciment HAJAR ESSOUD</i>	
PH	12.56
Masse volumique absolue	3g/cm ³

FIBRES DE PALMIER DATTIER

Les fibres de palmier dattier utilisées dans cette étude proviennent de palmiers de la région de Ouargla (sud algérien), ce sont des fibres de surface de palmier dattier naturellement tissées. Elles sont formées par la superposition de trois plaques de treillis. Ils sont extraits du tronc du palmier sous forme de plaque. La préparation des fibres consiste à séparer les fibres superposées, et les couper à des longueurs désirée Fig.4.9. Les caractéristiques des fibres du dattier de palmier sont présentées dans le tableau 1.5. et 1.6 (D.Derdour et all (2023). [10]).



Fig. 4.9.fibre du palmier

Tableau 1.5 : Caractéristiques des fibres des palmier utilisées

Caractéristiques	unités	valeurs
Diametre	millimètres	0,40 - 0,50
Longueur	millimètres	/
Densité absolue	g/cm ³	1,58
Densité apparente	g/cm ³	0,28
Absorption d'eau en 5 min	%	60
Absorption d'eau en 24h	%	110,57
Résistance a la traction	Mpa	94,73

Tableau 1.6 : Composition chimique du treillis en fibre de palmier dattier [19]

<i>Compositions</i>	<i>Pourcentage %</i>
cellulose	32 - 35,8
hemicellulose	24,4 - 28,1
lignines	26,7 - 28,7
Cendes	7

L'observation au microscope électronique à balayage (SEM) de la section transversale d'une fibre de palmier dattier faite par D. Derdour et all [10].(Fig. 5.0) a montré une porosité élevée. En effet, il est constitué d'un ensemble de microfibrilles de forme tubulaire d'un diamètre moyen de 10 μm (Fig. 5.0.a), ce qui explique sa grande capacité d'absorption d'eau et une surface extérieure rugueuse (Fig. 5.0.b)

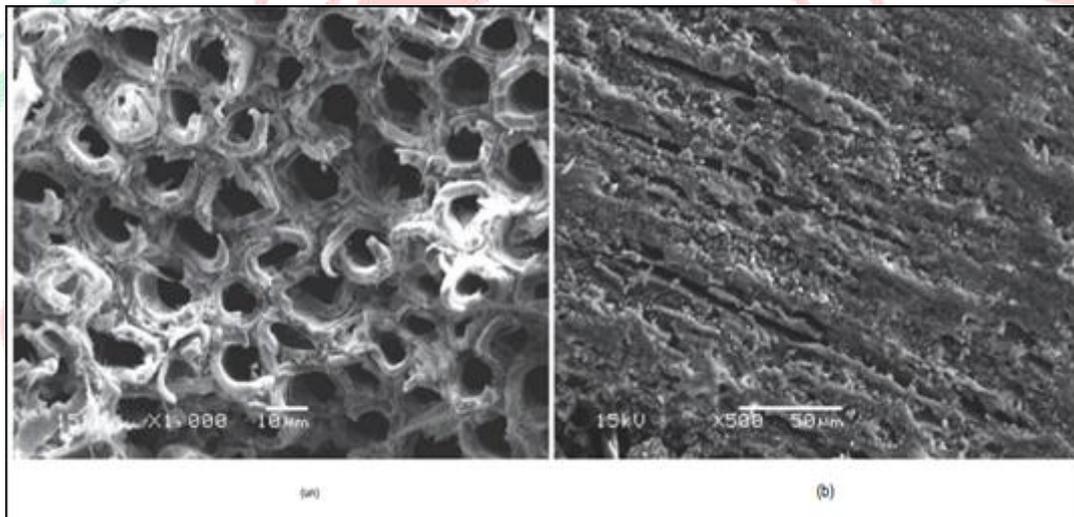


Fig.5.0 Observation au microscope à balayage de fibre de palmier dattier (a) coupe transversale et (b) surface extérieure

SOL UTILISE :

Le sol utilisé dans cette étude est un sol de déblais collectés de la région de Zighoud Youcef (Wilaya de Constantine). Dans le but de valoriser ce produit dans la construction routière une série des essais géotechnique a été élaborer afin d'identifier et caractérisé ce sol .

Analyses Chimiques.

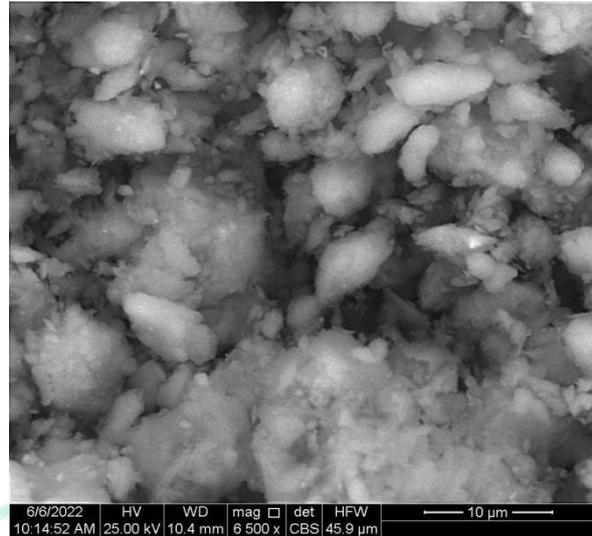
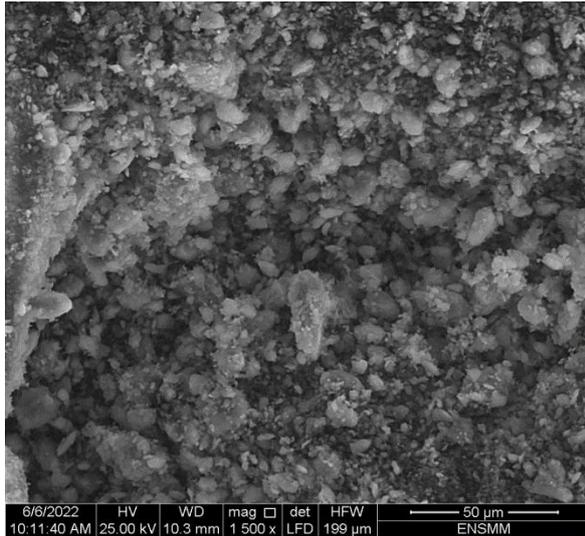
L'analyse chimique du sol a été effectuée à la Direction de Recherche Appliquée d'El Hadjar, selon les normes internationales par l'essai de fluorescence-x. Les résultats obtenus sont présentés sur le tableau

Tableau 1.7. composition chimique de sol utilisé

<i>Eléments</i>	<i>Moyenne%</i>
<i>Fer</i>	<i>28.843</i>
<i>CaO</i>	<i>1.827</i>
<i>SiO₂</i>	<i>66.779</i>
<i>MgO</i>	<i>1.003</i>
<i>Al₂O₃</i>	<i>22.626</i>
<i>MnO</i>	<i>0.055</i>
<i>ZnO</i>	<i>0.029</i>
<i>P₂O₅</i>	<i>0.189</i>
<i>IB</i>	<i>0.027</i>
<i>BM</i>	<i>155.797</i>
<i>Cr₂O₃</i>	<i>0.013</i>
<i>K₂O</i>	<i>5.324</i>
<i>Na₂O</i>	<i>0.001</i>
<i>SO₃</i>	<i>0.001</i>
<i>TiO₂</i>	<i>0.871</i>

Analyses minéralogiques :

L'analyse minéralogique a été effectuée au niveau de l'école nationale des mines par le microscope à balayage MEB QUANTA 250 les figures suivante représentent la microstructure du sol utilisé de DIDOUCH MOURAD indiquant une structure d'un sol argileux.



La figure suivante montre le spectre obtenu qui montre que le sol est riche en silicium ; et aluminium et le tableau 1.8 donne la composition minéralogique de ce matériau.

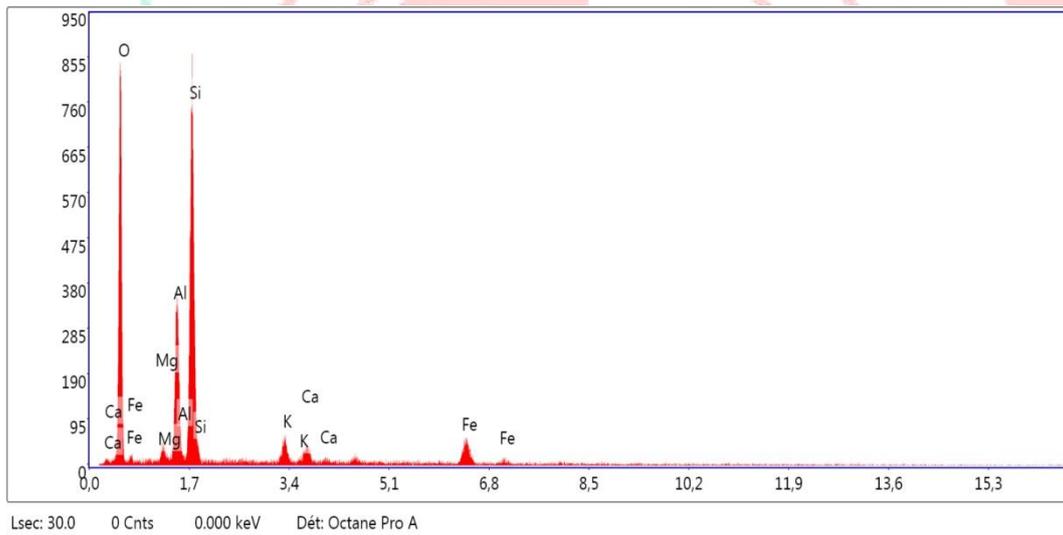


Figure 5.1 : Analyse Minéralogiques de l'Argile BENZEKRI

Tableau 1.8 Analyse Minéralogique - Argile BENZEKRI

Elément	% de masse	% atomique	Intensité	Erreur %
O	61.28	73.54	338.18	8.63
Mg	2.44	1.93	26.73	14.15

Al	11.36	8.08	188.72	9.44
Si	22.68	15.51	423.54	8.67
K	0.71	0.35	23.26	19.79
Ca	0.52	0.25	17.30	22.27
Fe	1.01	0.35	33.39	12.04

Teneur en Matière Organique :

La teneur en matière organique a été évaluée selon la méthode Standard ASTM D 2974-87 en brûlant une éprouvette de sol séchée à 60° Celsius dans un four à température 440°C durant toute une nuit. La perte du poids de l'échantillon divisé par le poids sec initial donne la valeur de la teneur en matière organique exprimée en pourcentage. Trois essais ont été effectués et la moyenne arithmétique des valeurs trouvées est de l'ordre de 1.66 % indiquant un **Sol inorganique** comme le montre le tableau 1.9

Tableau 1.9 Classification des sols en fonction de leur Teneur en Matière Organique

<i>Teneur en matière organique (%)</i>	<i>Désignation géotechnique</i>		
0-3	Sol inorganique		
3-10	Sol faiblement organique	FO	Vase
10-30	Sol moyen organique	M	Sol
		O	tourbeux
>30	Sol très organique	TO	Tourbe

Essai au bleu de Méthylène :

La détermination de la surface spécifique des fines a été déterminée par la relation de GAILLABAUD et CINOT (1982). Cette relation relie la surface spécifique à la valeur au bleu de méthylène selon l'équation : $S_{St} = 30 \times V_B (0/2 \mu m)$

L'essai au bleu de méthylène a été conduit selon la norme française NF-P94-068 au Laboratoire des Travaux Public de l'Est ANNABA. Une valeur au bleu de méthylène de $V_B = 7.66$ a été trouvée et a permis d'obtenir une surface spécifique de $229.8 m^2/g$.

Constituant des Grains Solides :

La densité spécifique exprime le rapport entre la masse d'un certain volume de matériau à la masse d'un même volume d'eau à la température de référence. Celle-ci a été obtenue au Laboratoire du département du Génie civil à une température d'eau de 20°C selon la norme ASTM D 854-98. Une moyenne arithmétique de trois essais avec une différence inférieure à 1% à montrer que $G_s = 2,76$.

Analyse du PH :

L'essai du pH a été conduit selon la norme ASTM-D 4972-95a en utilisant le pH mètre de marque HANNA instruments HI 931401 au laboratoire du département de chimie de l'université d'Annaba. Un pH de **10.2** a été obtenu supérieur à 7 indiquant ainsi que le sol constitué est de forme **basique**.

Analyse Granulométrique :

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions de grains de différentes tailles dans le sol.

L'essai de granulométrie par tamisage à voie humide a été effectué sur un échantillon d'argile imbibée dans l'eau pendant une journée avant la réalisation de l'essai. Cet essai a été effectué selon la norme ASTM C 136-96a,

Une fraction de passant du tamis N°200 (75µm) a été analysée par un essai de sédimentation selon la norme ASTM D 422-63. cet essai a été effectué au niveau du laboratoire ELTPEST Annaba

Les résultats sont exprimés sous forme d'une courbe granulométrique représentée sur la figure 5.2

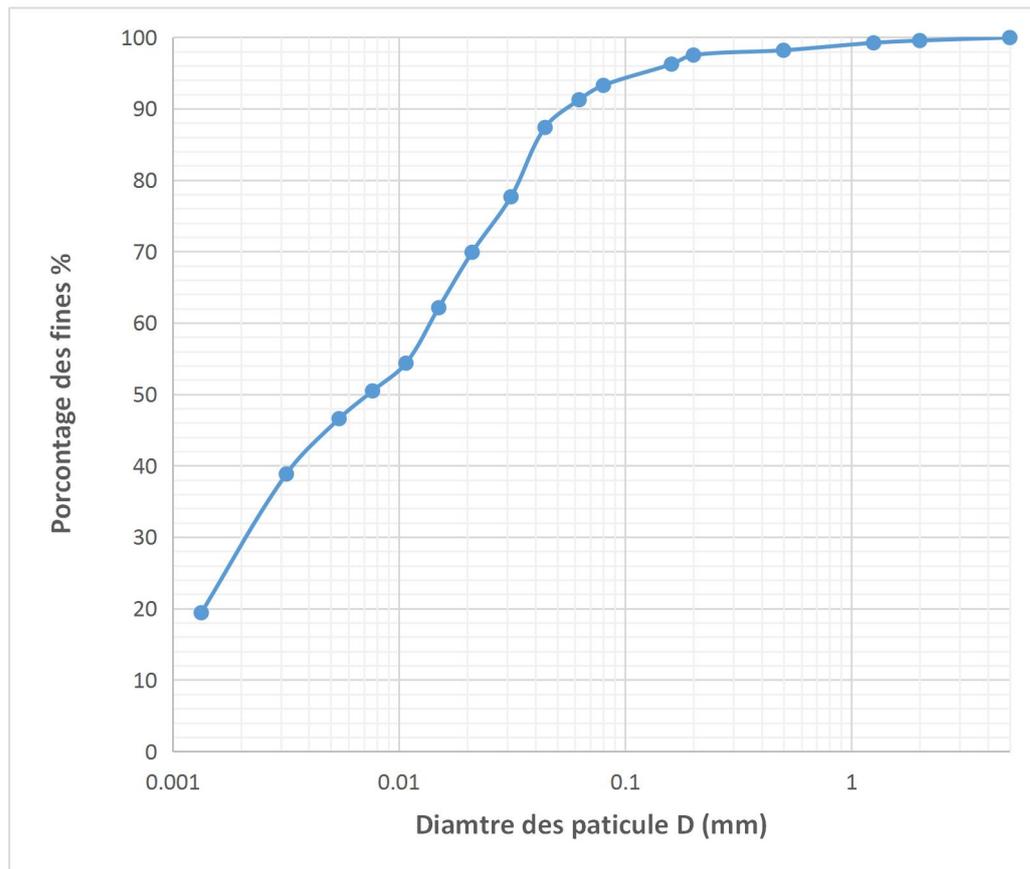


Figure 5.2 Courbe granulométrique du sol artificiel constitué

La courbe granulométrique de l'argile de BENZEKRI montre que :

- ✓ Le pourcentage des fines inférieures à $75\mu\text{m}$ est de 93% contenant une fraction d'argile de 30%.
- ✓ La courbe granulométrie est étalée et continue.

Limites d'Atterberg :

La consistance d'un sol peut varier dans de larges limites avec la quantité d'eau interstitielle que contiennent ses pores, ou l'épaisseur des couches d'eau absorbée qui enrobent ses grains. L'ingénieur agronome suédois ALBERT ATTERBERG a été le premier scientifique à définir les limites de consistance des sols à particules fines. Il a proposé initialement sept limites de consistance. Actuellement, uniquement deux de ces limites à savoir la limite de liquidité et la limite de plasticité sont couramment utilisées (une troisième

limite, appelée limite de retrait, est rarement utilisée). Les limites d'ATTERBERG sont des constantes physiques conventionnelles.

- *La limite de plasticité (PL)* est la teneur en eau qui marque le seuil entre le passage d'un sol de l'état semi solide à l'état plastique (flexible).
- *La limite de liquidité (LL)* est la teneur en eau qui marque le seuil entre l'état plastique et l'état liquide visqueux.
- *La limite de retrait (SL)* est la teneur en eau qui définit le seuil ou le volume de sol reste constant avec la réduction de la teneur en eau.

la limite de liquidité (LL) est la teneur en eau qui marque le seuil entre l'état plastique et l'état liquide visqueux. Elle est déterminée à la coupelle de CASAGRANDE par la méthode standard–ASTM-D 4318. Elle correspond à une fermeture d'environ 1cm pour un nombre de 25 coups. La figure 5.3 montre la limite de liquidité déterminée pour le sol artificiel constitué qui est de l'ordre de **42.73%%**.

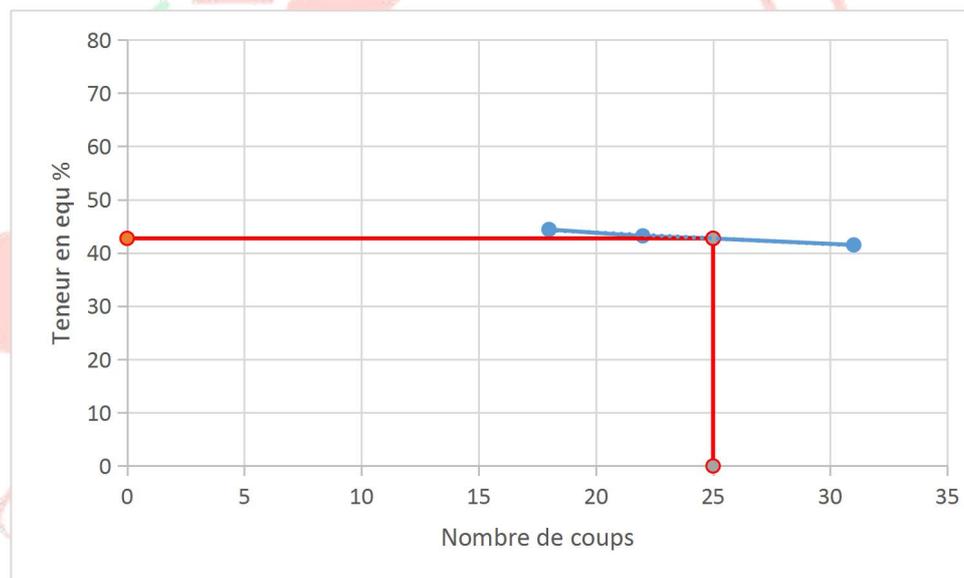


Figure 5.3 Limite de liquidité du sol non traité (0% CKD)

(LL=42.73%)

La Limite de plasticité (PL) est la teneur en eau qui marque le seuil entre le passage d'un sol de l'état semi solide à l'état plastique (flexible). Elle est déterminée par la méthode standard–

ASTM-D 4318 qui stipule la préparation d'un fuseau de 3.2mm de diamètre. La limite de plasticité correspond à la teneur en eau du fuseau qui se brise en morceau de 1 à 2cm de longueur.

Trois essais consécutifs ont été effectués et la moyenne arithmétique de leurs teneurs en eau a permis d'obtenir la limite de plasticité du sol, qui est de l'ordre de **18.6 %**

L'Indice de Plasticité est l'étendue du domaine plastique. Il est particulièrement important et donné par l'équation de Skempton.

$$IP = LL - LP = 24.1\%$$

La limite de liquidité et l'indice de plasticité du sol utilisés portés sur le diagramme de Casagrande se rencontrent en un point situé au-dessus de la ligne A. Ce qui signifie que le sol est classé comme **une argile peu plastique CL**

D'après la formule proposée par Skempton (1953) :

$$A_c = \frac{I_p (\%)}{\text{fraction d'argile} (\%)}$$

La valeur calculée de l'activité de l'argile BENZAKRI est de **0.98**. Cette valeur indique que l'activité de cette argile est **normale** et apte d'être stabilisée par le liant hydraulique (le laitier granulé broyé).

Tableau 1.9 Limites d'Atterberg.

W_L	58,48%
W_P	28,91%
I_P	29,57%

Essai Proctor :

Les essais Proctor peuvent être utilisés pour déterminer la relation existante entre la masse volumique sèche du sol et la teneur en eau lorsqu'un effort de compactage donné est appliqué. Ils donnent la teneur en eau optimale correspondante à la masse volumique sèche maximale pour un effort de compactage spécifié. Les essais ont été conduits selon la norme ASTM-D698-91 au laboratoire.

La courbe Proctor pour l'argile de DIDOUCH MOURAD présentée sur la figure a une forme pointue ce qui explique la sensibilité de l'argile à la teneur en eau. La valeur de la teneur en eau optimale est de 29,51% correspondante à une masse volumique sèche maximale de 1.42g/cm³.

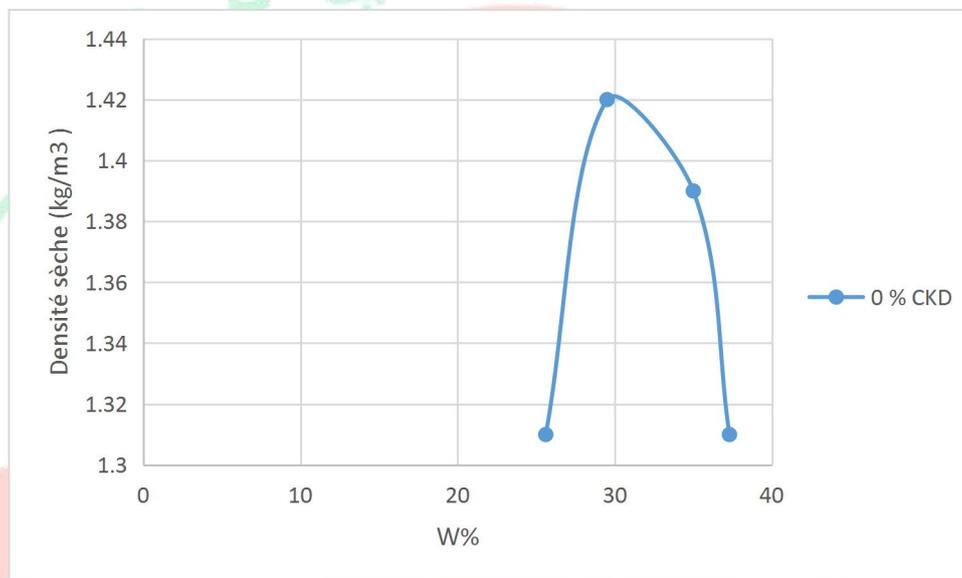


Figure 5.5 : courbe de compactage sol naturel.

Essai de Compression Simple.

La résistance à la compression simple du sol constitué est déterminée par l'essai de compression simple (UCST) selon la norme ASTM 2166-98a pour les conditions de masse volumique sèche maximale (MDD) et la teneur en eau optimale du Proctor modifié (OMC). Au cours, de ce programme de recherche pour la stabilisation du sol utilisant le CKD et le FIBRE PALMIER , la machine de compression universelle disponible au niveau du département de génie civil à l'université d'Annaba et le CKD est récupérée par les filtres électrostatiques du four de ciment de cimenterie de HADJAR ESSOUD A SKIKDA a été choisie pour effectuer les écrasements des éprouvettes de sol traitées et non traitées au . La

contrainte axiale q_u (kN/m^2) communément appelé UCS (Unconfined Compression Shear) à la rupture pour le sol sans traitement est de l'ordre de $495,89 kN/m^2$ La cohésion non drainée qui n'est autre que la moitié de la contrainte de compression simple est de kN/m^2 . Cet essai non drainée est effectué en moins de 15 minutes afin d'éviter toute dissipation d'excès de pression interstitielle et toute perte de teneur en eau.

EQUIPEMENTS ET PROCEDURES D'ESSAIS

Préparation des éprouvettes

Malaxage: La méthode standard ASTM D3551-90 a été utilisée pour préparer les mélanges sol-ajout pour la conduction des essais en laboratoire de plasticité, compactage, compression simple par écrasement. Une quantité suffisante d'argile séchée préalablement à l'étuve pendant quarante-huit heures à une température de $60^\circ C$ a été mélangée avec la quantité nécessaire de l'ajout à voie sec pendant une minute ou jusqu'à l'obtention d'une couleur uniforme indiquant l'homogénéité du mélange. La quantité nécessaire d'eau pour atteindre la teneur en eau fixée plus 1% (pour récupérer l'effet d'évaporation) est ajoutée doucement au mélange de sol plus les matériaux stabilisateurs ; bien malaxées jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène. le mélange de sol plus ajouts obtenu est ensuite conservé dans des sacs étanches pour éviter toute perte de teneur en eau.

Conservation: Le mélange dans des sachets étanches et conservés dans un humidificateur à une température de $23 \pm 1.7^\circ C$ et un taux d'humidité de 100%. Cette technique de conservation est utilisée soit pour **le temps de maturation** (*Mellowing Time*) nécessaire ou pour une **durée de conservation** (*Curing Time*) donnée.

Le Temps de Maturation (*Mellowing Time*) est la période du temps après malaxage du mélange (sol+ajouts+ H_2O) et son utilisation pour la confection des éprouvettes nécessaires à la détermination des caractéristiques des limites d'Atterberg et la conduction des différents essais mécaniques (Proctor, compression non confinée, gonflement linéaire etc...).

La Durée de Conservation (*Curing Time*) est le temps que nécessitent les éprouvettes de mélange préparées (sol, ajouts et eau distillée) et le début des essais pour mesurer les paramètres de résistance au cisaillement lors l'essai de Compression Simple (UCST).



Figure 5.6 : Humidificateur.

Essai de PH (Méthode Eades & Grim).

La méthode Eades et Grim adoptée par la norme ASTM D 6276 a été utilisée dans ce programme de recherche pour la détermination du pourcentage initiale de laitier granulé broyé des hauts fourneaux dans la stabilisation du sol fin artificiel constitué.

Une série d'échantillons de sol constitué a été préparé à différents pourcentages de laitier et passant par le tamis N° 40 (425 μm). La mesure du pH a été effectuée en injectant la cathode du pH mètre dans l'éprouvette de mélange émergé par l'eau distillée. La figure 5.7 présente les outils nécessaires à la conduite et la mesure des valeurs de pH du mélange sol fin/CKD.



Fig. 5.7 : PH mètre (Méthode Eades & Grim).

Essai de Compactage (Proctor Normal).

L'essai de compactage au laboratoire a pour but de déterminer la teneur en eau optimale OMC et la masse volumique sèche max MDD du sol artificiel constitué non traité et traité à des proportions de 5, 10, 15, 20 et 25% au laitier granulé broyé des hauts fourneaux seul ou activé. La méthode utilisée est celle du Proctor modifiée détaillée par la norme ASTM D 1557. Six éprouvettes de sol passant à travers le tamis N°4 (4.75mm) ont été préparées à des teneurs en eau ascendantes pour chaque proportion. Le malaxage des mélanges sol- CKD a été effectué en utilisant un malaxeur mécanique selon la méthode de la norme ASTM D3551-90 présentée ci-dessus. Le mélange a été conservé dans des sachets en plastique bien étanches et laissé dans l'humidificateur à une température contrôlée de $23 \pm 1.7^\circ\text{C}$ et un taux d'humidité vérifié de 100% pendant un temps de maturation de 24h comme recommandé dans le guide technique réalisé par Dallas Little (1999, 2000) de l'Association Nationale de la Chaux (NLA) aux Etats Unies. Ensuite, chaque sol traité ou non a été compacté dans un moule métallique Proctor de diamètre de 101.6mm et de volume de 947,38 cm³ en trois couches de sol d'épaisseurs égales (Figure 4.9). Chaque couche a été soumise à vingt-cinq coups, produisant chacun un effort de compactage de 2,700kN-m/m³, repartis uniformément sur la surface superficielle du matériau au moyen d'une dame de 4.54kg tombant d'une hauteur constante de

457mm. Après extraction Essai de Compactage (Proctor Normal).



Figure 5.8: Dames, moule CBR et Proctor, Extracteur manuel pour essai de compactage.

Essai de Compression Simple (UCST).

Les paramètres de compactage OMC et MDD correspondant aux différents proportions d'ajouts ont été utilisés dans la préparation des éprouvette de sol destinées aux essais de compression par écrasement en vue de déterminer la valeur de de Compression Simple (UCS). Deux séries d'essais ont été planifiées. La première porte sur l'influence de la proportion et du type de l'ajout hydraulique CKD (poussière de ciment) ou le CKD plus les fibres de palmier sur la valeur de la contrainte de compression simple à la rupture UCS du sol. La seconde série concerne l'influence du temps de cure sur cette même résistance. La préparation du matériau pour la confection des différentes éprouvette est la même que celle décrite auparavant.

Influence de la poussière du ciment CKD sur la Compression Simple : Le matériau est ensuite compacté en trois couches dans un moule Proctor de dimension 101mm de diamètre et 111mm de hauteur aux valeurs des paramètres de compactage OMC et MDD obtenues lors des essais de compactage relatif à chaque proportion d'ajout hydraulique c'est-à-dire 5, 10, 15, 20 et 25% de CKD. Les éprouvettes de sol traitées et non traitées sont ensuite protégée d'un

film en plastique transparent et mises dans des sacs étanches pour être conservées dans un humidificateur. Après 24h de conservation, l'écrasement des éprouvettes a été effectué sur une presse mécanique de type BetaTest model YIMC108C (Figure5. 9). Cette essai de compression simple non confiné (UCST) a été réalisé en un maximum de temps de 15minutes afin d'éviter toute dissipation de la pression interstitielle et échappement d'eau. L'essai a été effectué selon la norme ASTM D 5102-96.



Figure5.9: Presse mécanique Beta Test model YIM108C

Influence du Temps de Cure sur la Compression Simple : Une deuxième série d'essai de compression simple a été effectuée pour les pourcentages d'ajout de 5, 10, 15, 20 et 25% de CKD puis (15% de CKD plus 0.2% ;04% de fibre de palmier respectivement. Le paramètre étudié dans cette campagne d'essai étant l'effet du temps de conservation (*Curing Time*) sur la compression simple. Pour chaque temps de cure (1, 7, 14, et 28jours) .les éprouvettes ont été préparées et conservées dans l'humidificateur. Ces éprouvettes ont été écrasées par la suite pour déterminer la valeur de résistance à la compression simple UCS (Unconfining Compression Shear).

CHAPITRE3 : ESSAIS ET INTERPRETATIONS

5.1 INTRODUCTION

Le chapitre essais et interprétations présente les résultats des essais entrepris en laboratoire afin d'évaluer l'efficacité de l'ajout le CKD qui est récupérée par les filtres électrostatiques du four de ciment de la cimenterie de HADJAR SOUD (Skikda) et La FIBRE DU PALMIER dans la stabilisation d'un sol fin naturel représentatif des sols problématiques. Les sols à problèmes sont des matériaux largement répandus dans les zones arides et semi-arides en Algérie et en Afrique du nord en général mais aussi ils peuvent être trouvés un peu partout dans le monde comme les Etats Unis d'Amérique, l'Inde, l'Australie, l'Afrique du sud et pas mal de pays du Moyen Orient. L'influence de ce sous-produit industriel et les fibres Naturels sur les propriétés physiques et mécaniques du sol a été étudiée par la conduction de plusieurs essais géotechniques sur des éprouvettes de sol non traitées et traitées avec ces adjuvants . Les essais englobent la détermination de la densité spécifique, un paramètre utile pour le calcul des autres caractéristiques physiques de sol; la granulométrie par sédimentation pour pouvoir tracer la courbe de distribution des particules solides et déterminer la fraction de sol dominante; les essais de plasticité pour évaluer les limites d'Atterberg ; le compactage par la méthode Proctor Normal afin d'obtenir la teneur en eau optimale et la densité sèche max; l'essai de compression non confinée pour déterminer la résistance et sa variation en fonction du temps de cure.

5.2 INFLUENCE DU CKD LE PH DU SOL

L'influence du CKD sur le PH du sol :La première étape dans la stabilisation du sol naturel est la détermination de la proportion minimale de CKD requise pour l'amélioration de ses propriétés à long terme. La méthode Eades et Grim développée initialement pour la chaux a été utilisée pour évaluer cette valeur comme recommandé par Salvati (2004). Pour cela des essais au PH-mètre ont été conduit sur des éprouvettes de sol préparées préalablement et les résultats de l'influence de la proportion d'ajout du CKD sur le Potentiel Hydrogène corrigé à 25°celsius du sol fin sont présentés sur la figure 5.1. Celle-ci montre que le sol dans son état initial non traité présente un PH de **10,2** . L'ajout du CKD jusqu' à 5% en poids sec résulte en un accroissement progressif du PH pour atteindre une valeur de **12,03** . La tendance de la courbe représentant la variation du PH en fonction du pourcentage de CKD, Le Figure 6.0

représente les variations de PH en fonctions des pourcentages CKD (0%, 5%, 10%, 15%, 20% ,25%).

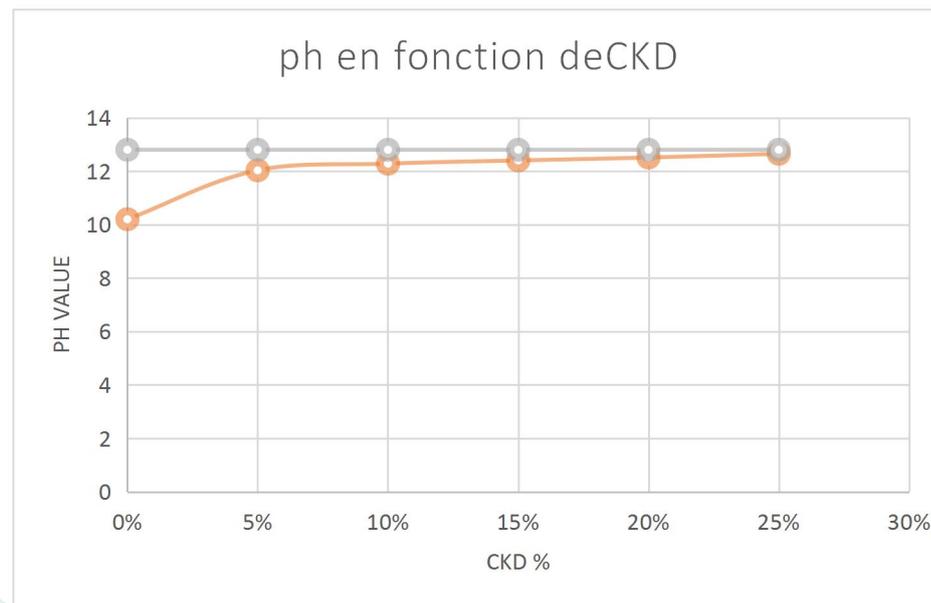


Figure 6.0 : Evolution du PH du sol traité du sol traité en fonction % CKD

CKD	PH
0%	10,2
5%	12,03
10%	12,28
15%	12,4
20%	12,51
25%	12,65

Tableau 2.0: PH en fonction de CKD

5.3 INFLUENCE DU CKD SUR LA DENSITE SPECIFIQUE DU SOL

La densité spécifique d'un sol est un paramètre important en mécanique des sols. Elle permet le calcul des autres propriétés physiques nécessaires à toute étude géotechnique. C'est pour cela que l'influence de l'ajout de CKD sur la densité des particules solides du sol fin a fait l'objet d'une étude. Les résultats obtenus pour une meilleure lisibilité sont présentés sous forme d'histogrammes dans la figure 6.1. Celle-ci montre clairement un accroissement du constituant des grains solides lorsque le pourcentage d'ajout du CKD . Le constituant des grains solides passe d'une valeur de **2,76** pour le sol fin non traitée à **3,13** pour 5% d'ajout, **3,16** pour 10%, **3,18** pour 15%, **3,19** pour 20% et **3,20** pour 25% de CKD seul.

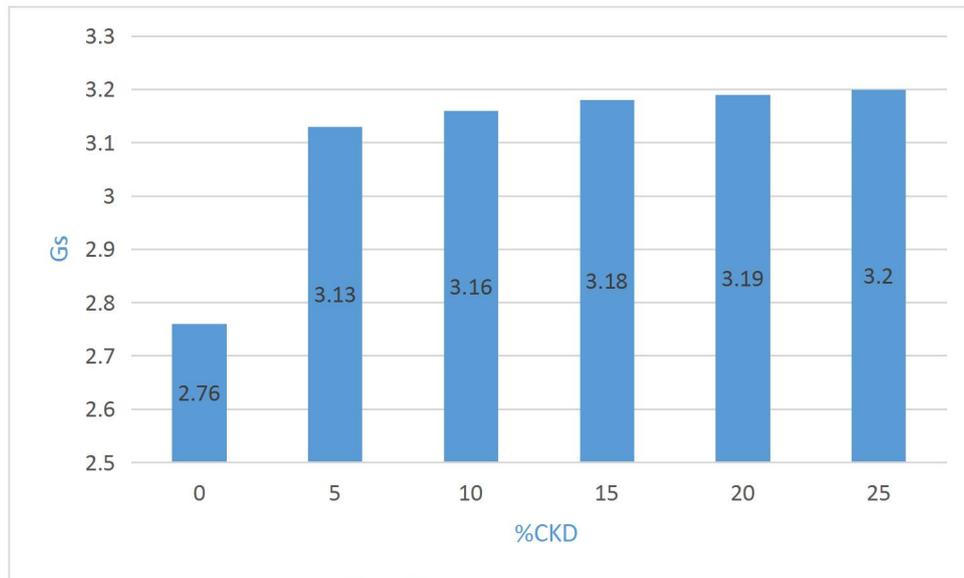


Figure 6.1 Evolution de la Densité Spécifique en fonction du % CKD.

5.4 INFLUENCE du CKD sur les caractéristiques de compactage :

Les résultats des essais de compactage par la méthode dite Proctor Normal pour les échantillons de sol non traités et traités uniquement au CKD sont données sous forme de courbes sur les figures 6.2 à 6.7 pour les proportions d'ajout de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% et 25% de liant hydraulique. Les valeurs des caractéristiques de compactage obtenues pour chacun des cas sont mentionnées au bas de chaque graphe correspondant par les abréviations universelles OMC (teneur en eau optimale) et MDD (densité sèche maximale).

Essais à 0% CKD :

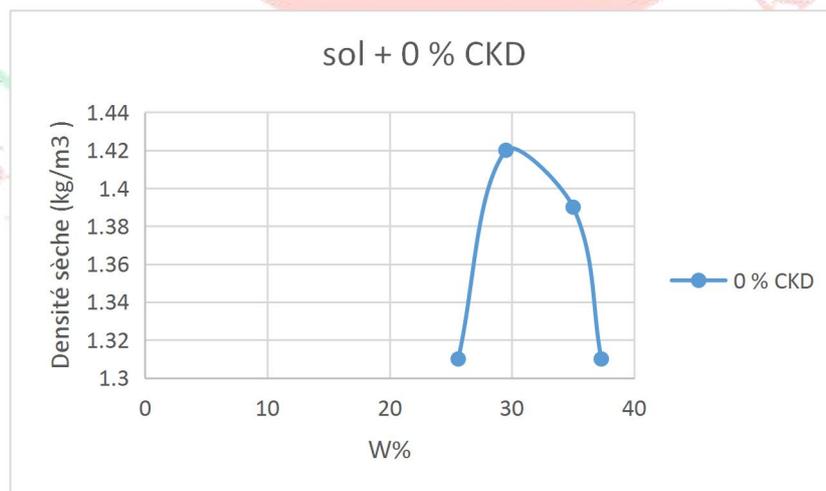


Figure 6.2 Courbe de compactage du sol traité à 0% CKD

(OMC=29,51%, MDD= 1.42g/cm³)

Essais a 5 % CKD:

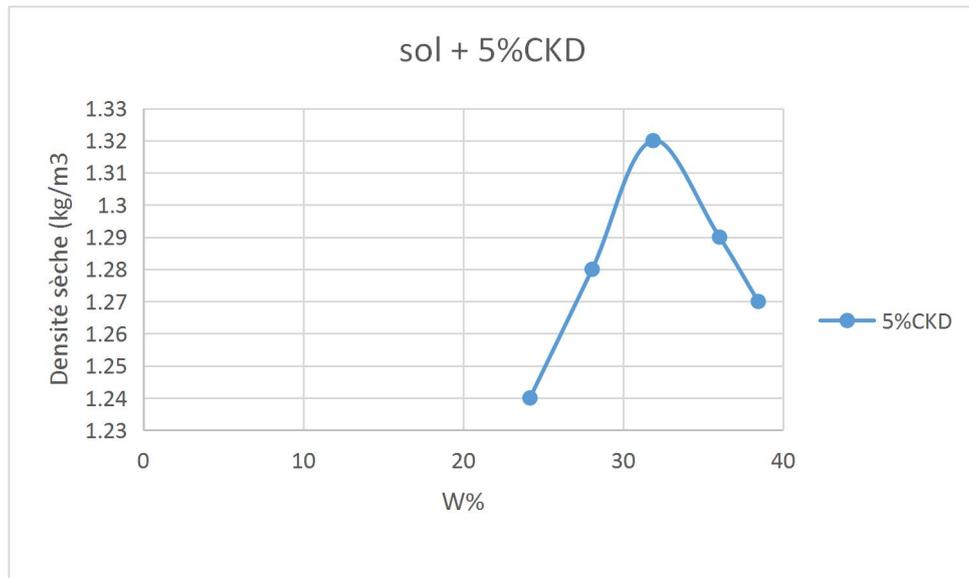


Figure 6.3 Courbe de compactage du sol traité à 5% CKD (OMC=31.88%, MDD= 1.32 g/cm³)

Essais à 10%CKD:

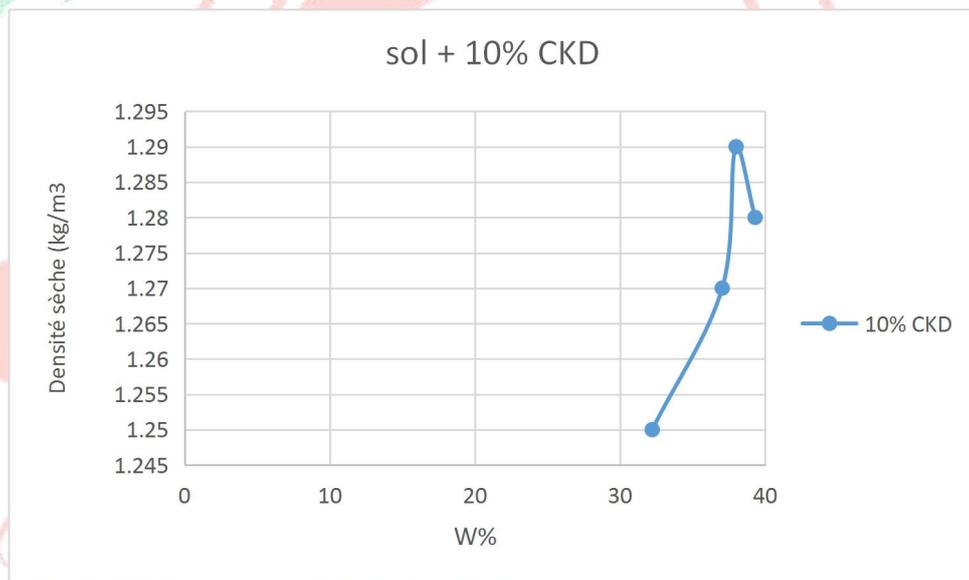


Figure 6.4 Courbe de compactage du sol traité à 10% CKD

(OMC=38%, MDD= 1.29 g/cm³)

Essais à 15%CKD:

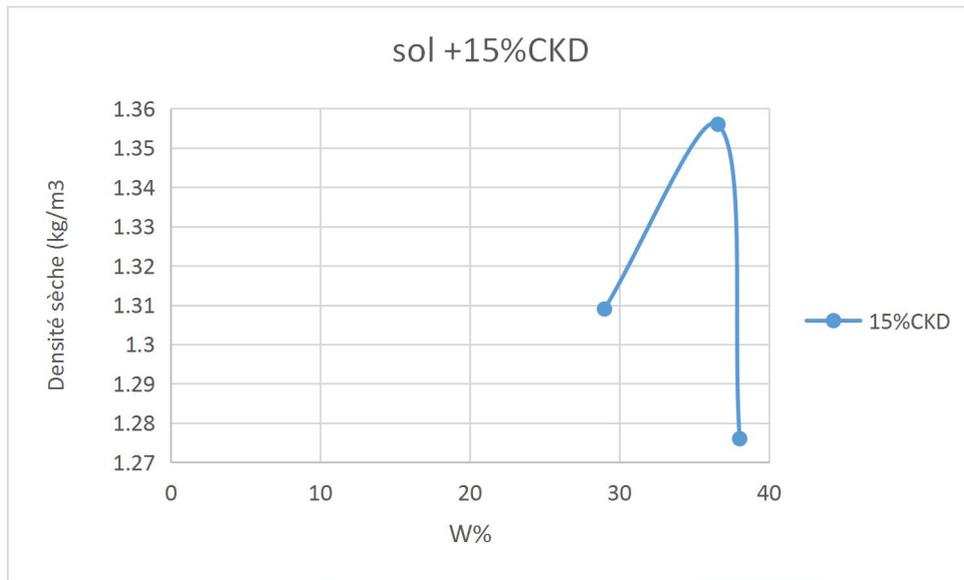


Figure 6.5 Courbe de compactage du sol traité à 15% CKD
 (OMC=36.58%, MDD= 1.36 g/m³)

Essais à 20%CKD:



Figure 6.6 Courbe de compactage du sol traité à 20% CKD
 (OMC=31.62%, MDD= 1.44g/cm³)

Essais à 25%CKD:

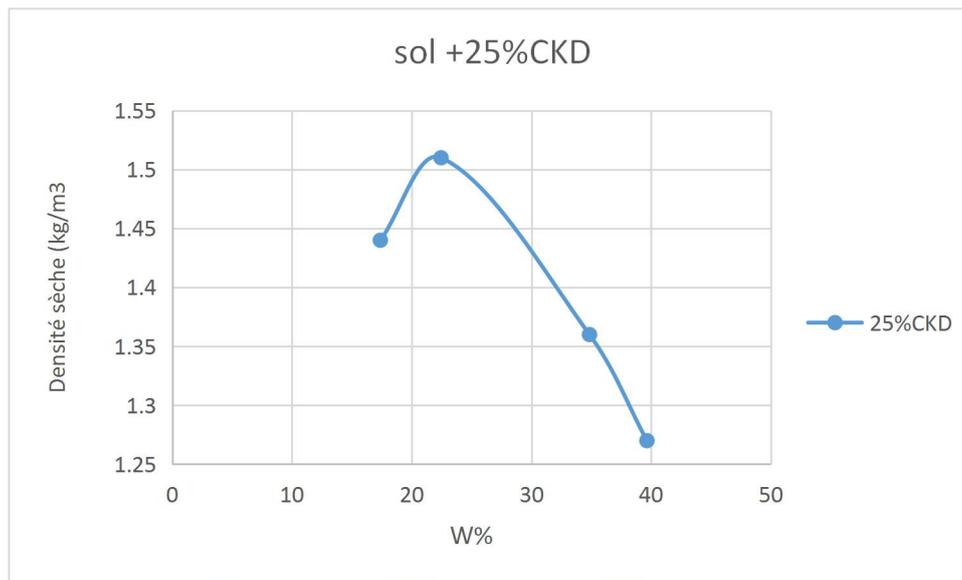


Figure 6.7 Courbe de compactage du sol traité à 25% CKD

(OMC=22.45%, MDD= 1.51g/cm³)

Tableau 2.1 Récapitulation des caractéristiques de compactage du sol stabilisé au CKD

CKD	OMC	MDD
0%	29.51%	1.42
5%	31.88%	1.32
10%	38%	1.29
15%	36.58%	1.36
20%	31.62%	1.44
25%	22.45%	1.51

Comparaison des courbes de compactage du sol traité au CKD:

L'analyse, des résultats compilés au tableau 2.1 est à la figure 6.8 présentant les courbes de compactage pour les proportions de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% et 25% d'additif utilisé, permet de conclure que l'augmentation de la quantité d'ajout du CKD seul dans la stabilisation du sol entraîne une Variation de la teneur en eau optimale et aussi pour la densité sèche maximale.

L'ajout du 5% et 10 % du CKD augmentent le teneur en eau et diminuent la densité sèche maximale, à 15% le teneur en eau prend une valeur de 36.58% et une densité sèche maximale de 1.36, en fin à 20% et 25% le teneur en eau diminue et atteint 31.62% et 22.45% et la densité sèche augmentent de 1.44 et 1.51 mais les valeurs de la densité sèche maximale obtenues sont toujours inférieures à la densité sèche maximale de l'argile naturel ainsi que la teneur en eau reste toujours supérieure à celle du sol naturel ce qui indique que le matériau traité sera plus facile à compacter efficacement, car acceptant plus d'humidité le rend moins sensible aux variations de teneur en eau. Des résultats similaires ont été observés par A. B. Salahudeen, A. O. Eberemu, K. J. Osinubi (2014) [17]

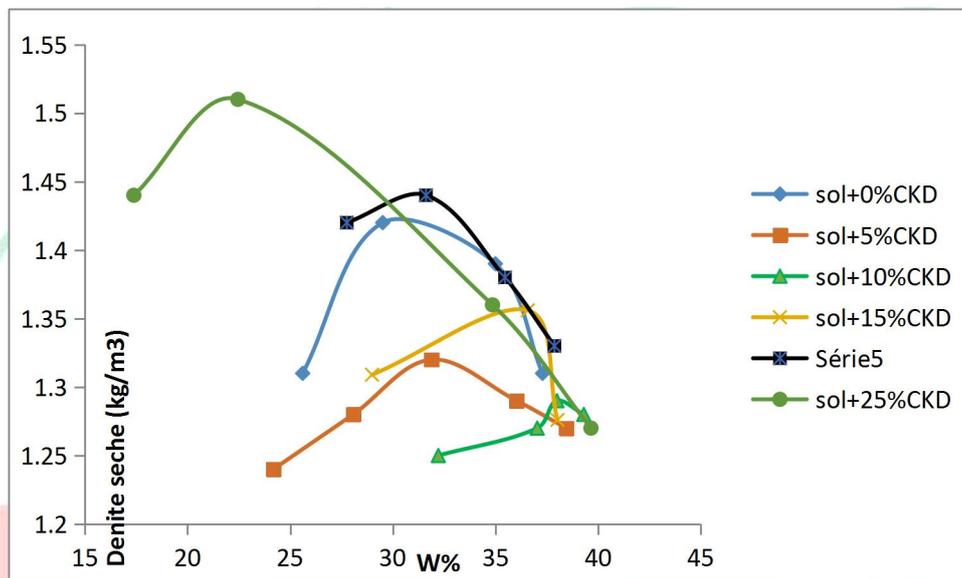


Figure 6.8 Influence du CKD sur les caractéristiques de compactage

5.5 Influence du CKD sur la compression simple

L'essai de compression simple est un essai très important pour déterminer la résistance à la compression non confinée du sol qui indique la portance des sols lors des constructions des ouvrages linéaires tels que les routes, les autoroutes, les pistes d'aérodromes et les lignes de chemins de fer. Elle nous permet de s'assurer que l'ouvrage ne subit pas des déformations excessives ou des ruptures par cisaillement local ou général occasionnant ainsi des dommages humains ou matériels importants durant la durée de leur vie.

L'influence de l'ajout de CKD sur la résistance à la compression simple a été étudiée pour les différents pourcentages (5%, 10%, 15%, 20%, et 25%) de CKD passant par le tamis 0,08 mm. Toutes les éprouvettes ont été préparées à la teneur en eau optimale OMC déterminée lors des essais de compactage ; un temps de maturation (Mellowing Time) de 1h a été donné aux échantillons pour assurer l'hydratation du CKD ainsi le processus de modification et après compactage ; une autre période de conservation (Curing Time) de 1 jour ; 7 jours ; 14 jours et 28 jours pour que le sol subisse une réaction pouzzolanique ce qui produit la stabilisation des échantillons traités. En effet, les histogrammes obtenus montrent l'amélioration de la compression simple avec l'augmentation du pourcentage de CKD. Cette amélioration semble être plus importante lorsque le temps de conservation est plus long. Pour les quatre temps de conservation étudiés, le sol passe d'une argile de consistance tendre (soft) à une argile moyennement tendre, raide, très raide et dure (hard) lorsque la période de conservation est plus longue. Ainsi, la résistance du sol traité à la poussière de ciment s'améliore dans le temps comme le montrent les figures 6.9 à 7.2. Des résultats similaires ont été observés par A. B. Salahudeen, A. O. Eberemu, K. J. Osinubi (2014) [17].

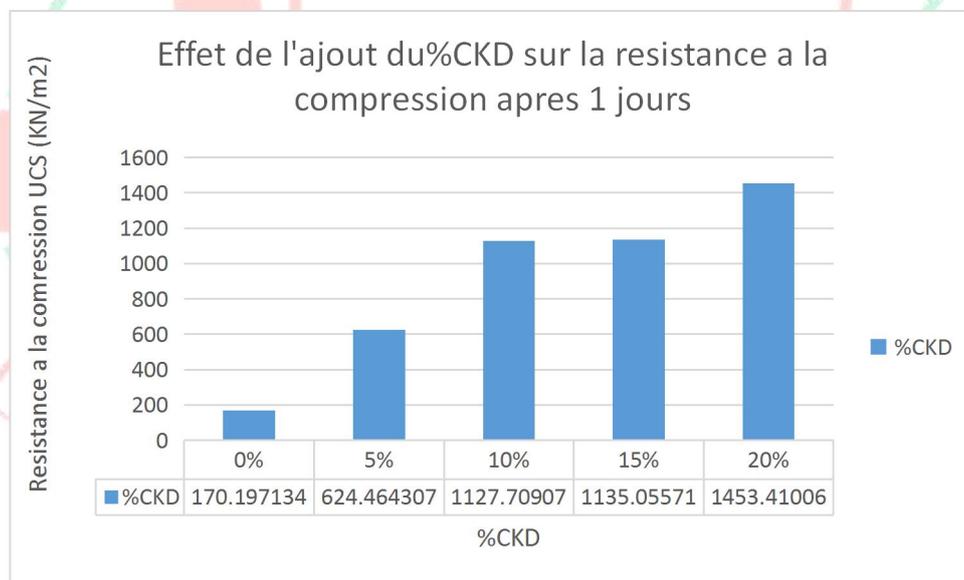


Fig.6.9 Influence du CKD sur la résistance à la compression simple à près 1 jour de prise

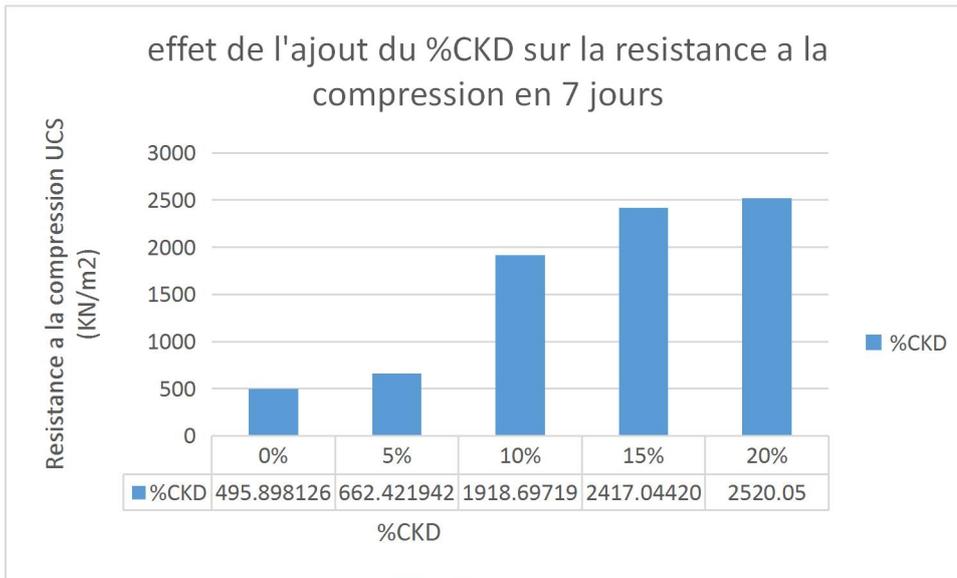


Fig.7.0 Influence du CKD sur la résistance à la compression simple à près 7 jours de prise

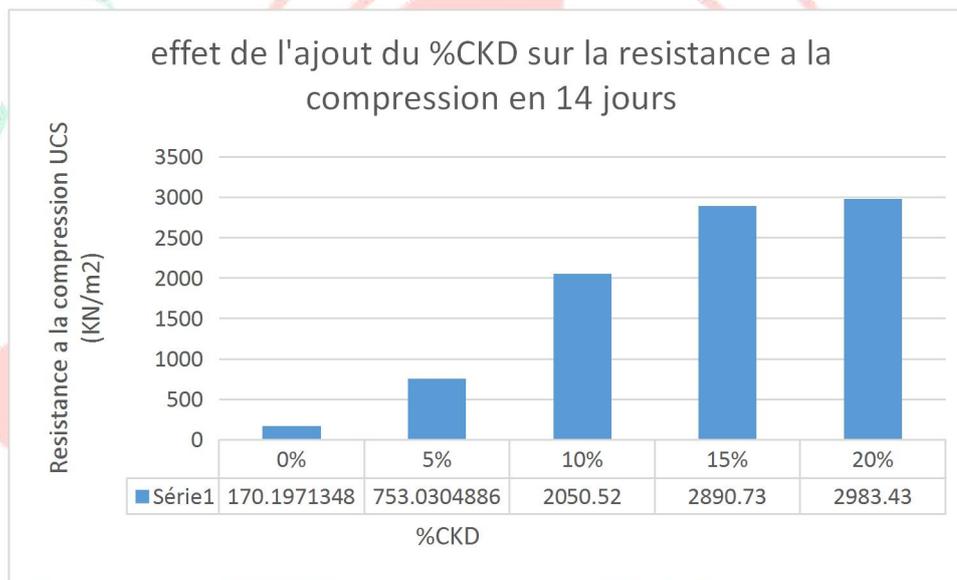


Fig.7.1 Influence du CKD sur la résistance à la compression simple à près 14 jours de prise

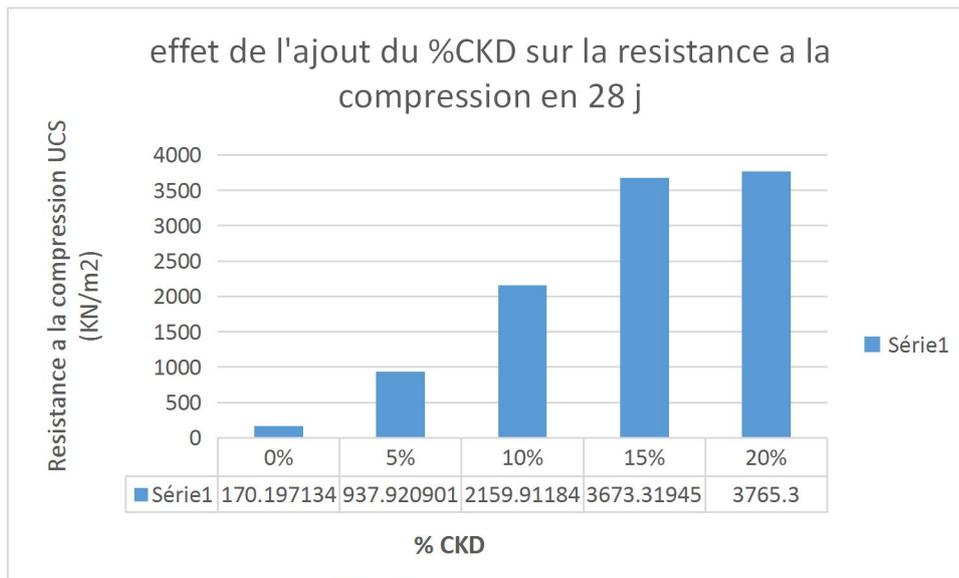


Fig.7.2 Influence du CKD sur la résistance à la compression simple à près 28 jours de prise

L'influence de temps de prise sur la résistance à la compression simple non confinée a été étudié en traçant les courbes de 1, 7, 14, et 28 jours de prise sur un repère orthonormé représentant la relation de la résistance en fonction du pourcentage d'ajout de CKD comme l'indique la figure 7.3 pour une éventuelle comparaison; cette dernière montre qu'avec l'augmentation du pourcentage d'ajout la résistance à la compression non confinée augmente. La variation de la résistance au cisaillement en fonction de la quantité d'additif semble être importante entre 5 et 15% mais ralentit légèrement lorsque la quantité d'ajout hydraulique est supérieure à 15%; Cela signifie que les particules de sol ont subi de nouveaux arrangements conduisant à une texture de sol serrée et des vides interstitiels réduits. En plus, le silicate de calcium et l'aluminate de calcium réactifs de l'additif une fois introduit dans un sol fin; Ils s'hydratent avec l'eau du sol pour former du silicate d'hydrate de calcium (CSH) et de l'aluminate d'hydrate de calcium (CAH), qui a leur tour provoquent des liaisons inter particules dans le processus de réaction pouzzolanique augmentant ainsi la résistance à la compression.

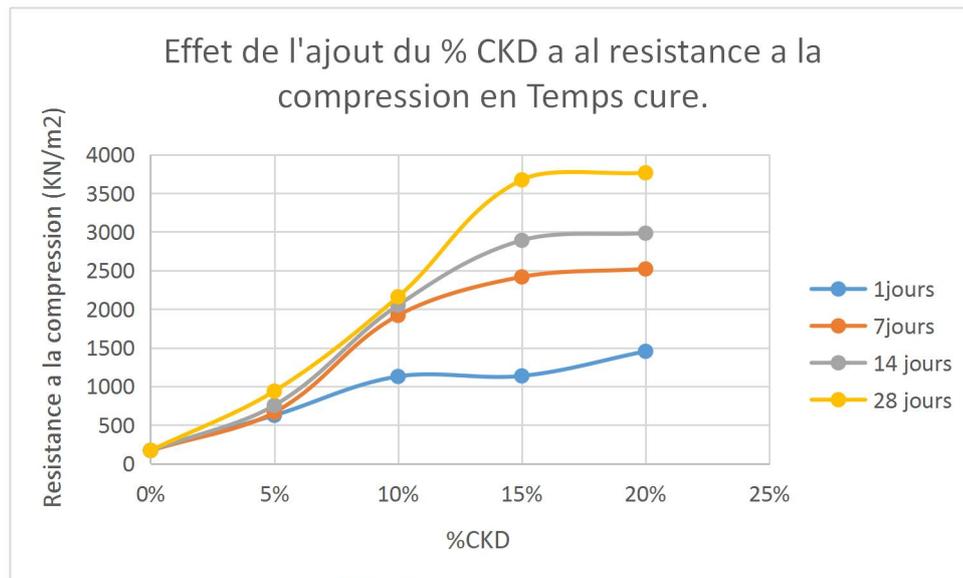


Figure 7.3 : Influence de l'ajout du % CKD et le temps de cure sur la résistance a la compression .

5.6 Influence du CKD et des Fibres de palmier sur la compression simple .

La fibre de palmier est l'un des matériaux favorables utilisés dans la stabilisation des sols meubles (sols de faible résistances) dans les projets d'ingénierie géotechnique ces dernières années en raison de sa nature de durabilité, inoffensif pour l'environnement, de la biodégradabilité, de la disponibilité et de la rentabilité ; obéit au contexte de l'appel généralisé du monde pour retourner à la nature et protéger l'environnement.

cette partie de l'étude vise à explorer les performances mécaniques du sol argileux de BENZEKRUI renforcé de fibres de palmier associée à la poussière du fours de ciment produite localement. Les histogrammes suivants représente L'influence de l'ajout CKD et la Fibre palmier sur la résistance à la compression simple de l'argile étudiée pour les pourcentages de (15% CKD + 0,2 fibre) et (15%CKD+ 0,4 fibre) pour les temps de cure 1 ,7, 14 et 28 jours . Toutes les éprouvettes ont été préparées à la teneur en eau optimale OMC du 15% CKD , déterminée lors des essais de compactage, les résultats obtenus montre que la résistance à la compression non confinée du sol augmente d'une manière significative pour tous les temps de cure étudiées ainsi la résistance au cisaillement non confinée augmente aussi ceci explique le passage de l'état de déformation du sol stabilisé de l'état fragile à un état de déformation ductile .

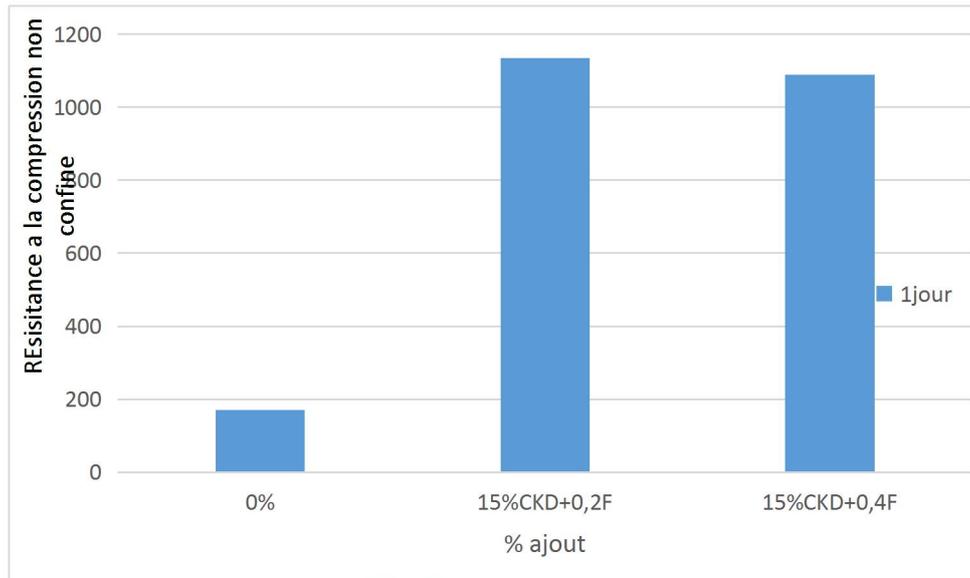


Figure 7.4 Influence d'ajout du CKD et la fibre du palmier sur la résistance à la compression du sol pour 1 jour de cure .

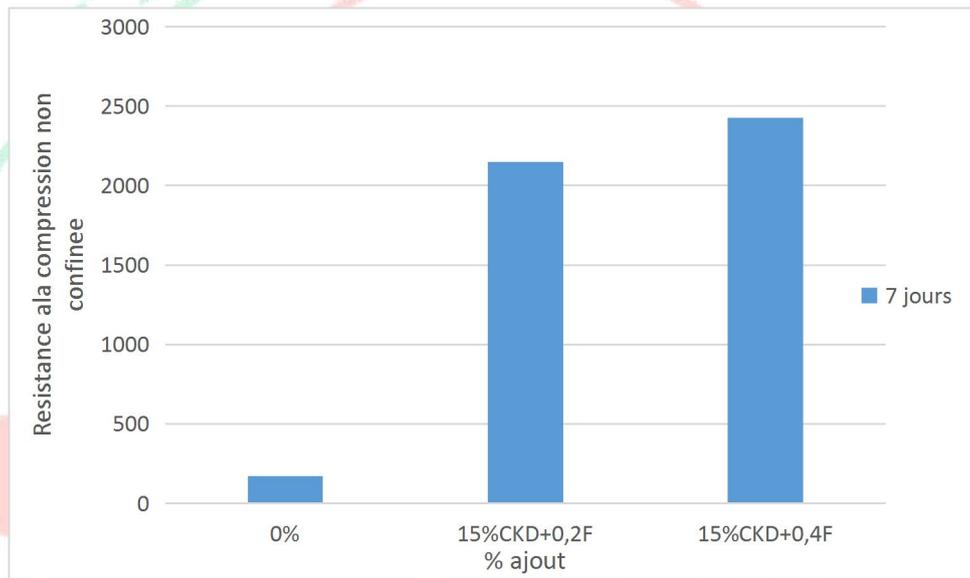


Figure 7.5 Influence d'ajout du CKD et la fibre du palmier sur la résistance à la compression du sol pour 7 jour de cure .

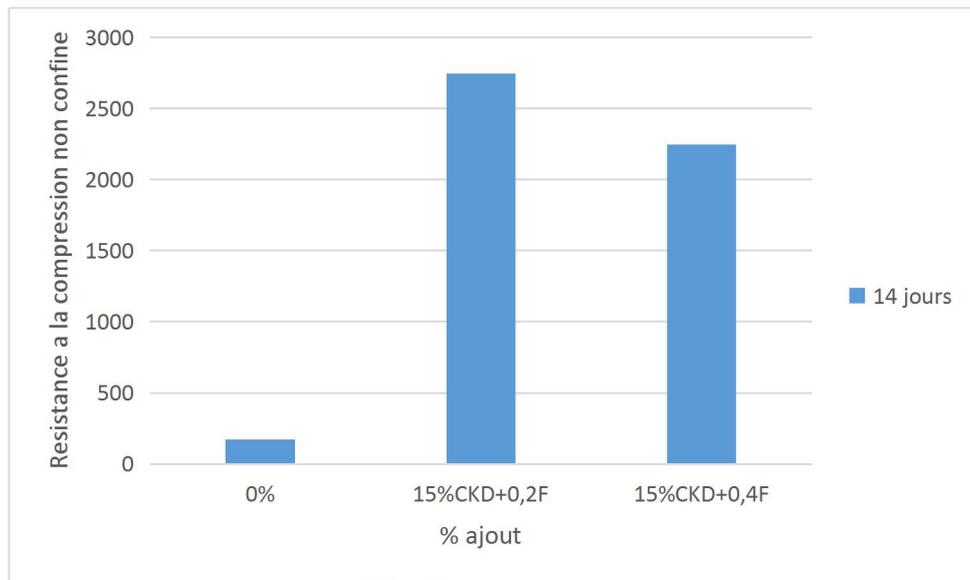


Figure 7.6 Influence d'ajout du CKD et la fibre du palmier sur la résistance à la compression du sol pour 14 jour de cure .

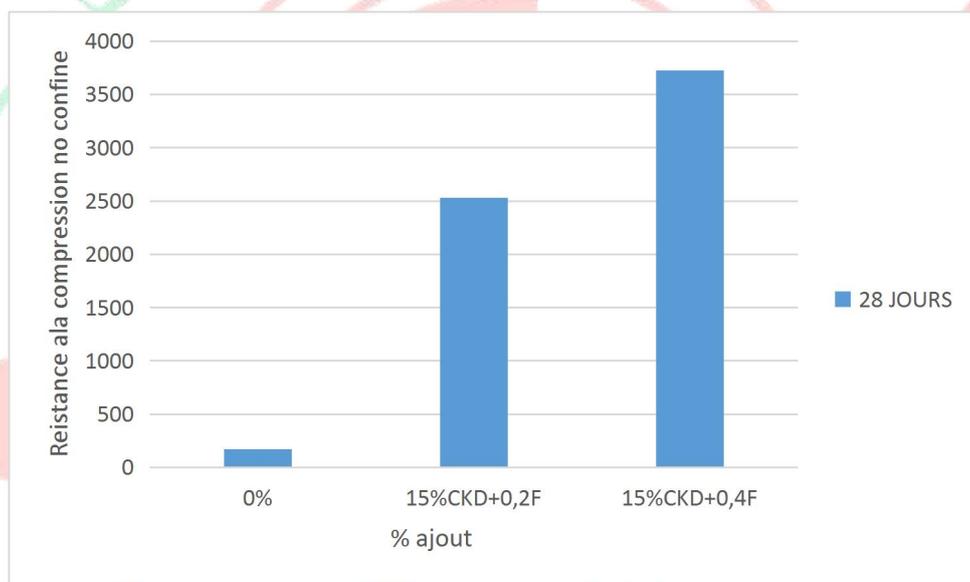


Figure 7.7 Influence d'ajout du CKD et la fibre du palmier sur la résistance à la compression du sol pour 28 jour de cure .

La figure suivante représente les histogrammes de comparaison de la résistance à la compression non confinée du sol non traité et traité avec de la poussière de ciment seul soit (Sol+15%CKD) puis associé au fibre de palmier (Sol+15%CKD+0.2%F) et (Sol+15%CKD+0.4%F). Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression du sol traité aux trois combinaisons d'ajouts cités auparavant augmente par rapport à celle du sol non traité et le temps de cure fait augmenter encore cette résistance. Mais on remarque aussi que la résistance à la compression du sol stabilisé avec (CKD+ fibre palmier) est inférieure à celle du sol stabilisé avec la poussière de ciment (CKD) seule ; cette diminution est probablement due au caractère d'absorption des fibres de palmier qui fait retarder la réaction de la poussière de ciment avec les minéraux argileux du sol qui se traduit par une légère diminution de la résistance du sol traité.

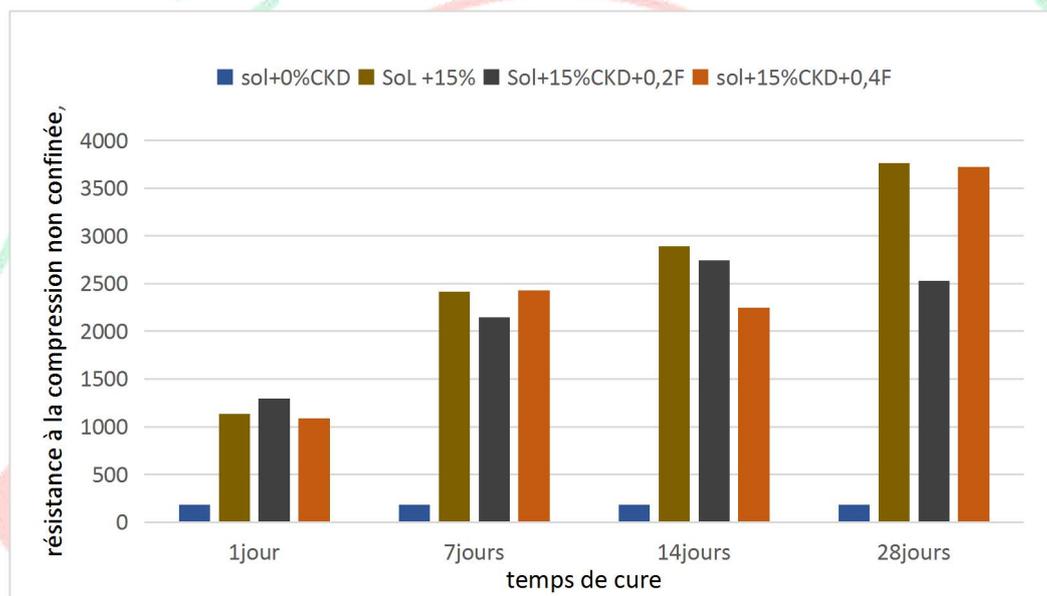


Figure 7.8 : Influence de l'ajout du (CKD+ fibres de palmier) et le temps de cure sur la résistance à la compression du sol

5.7 Fiabilité des résultats

Tous les essais de compression et de compactages ont été effectués selon les normes américaines ASTM comme indiqué dans le chapitre 2. La fiabilité des essais a été bien suivie le long de tout ce travail de recherche. Ainsi, il est nécessaire d'atteindre la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale obtenues lors des essais de compactage effectués.

Fiabilité à 5% CKD

Toutes les éprouvettes de sol préparées à 5% CKD puis compactées et laissées à la conservation pendant 1, 7, et 14 jours, doivent avoir la teneur en eau et la densité sèche proche des valeurs de teneur en eau optimale et de densité sèche maximale : **OMC = 31.88%** et **MDD = 1,32. kg/m³**.obtenus lors du compactage. Le tableau 2.2et les figures 7.5 et 7.6 montrent que les éprouvettes préparées pour L'essai de compression à la Tab.]2.2 ,Teneurs en eau et Densité sèche pour 1, 7,et 14 jours à 5% CKD.

Tableau 2.2 w%, ρ_d en temps cure

jours	W %	ρ_d
1	30,53	1,34
7	30,76	1,37
14	29,69	1,3

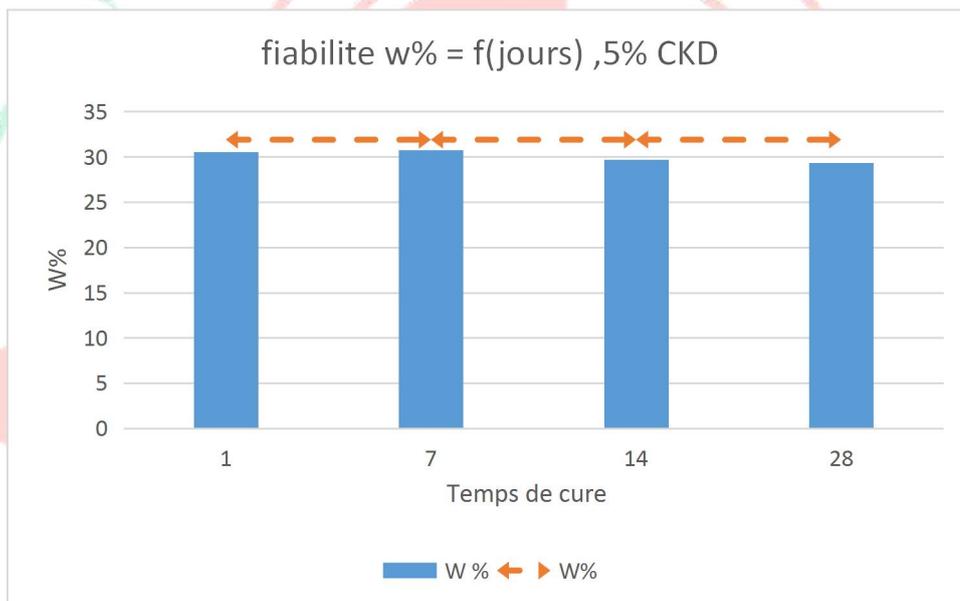


Figure 7.5 : fiabilité à w% ,5% CKD en temps cure.

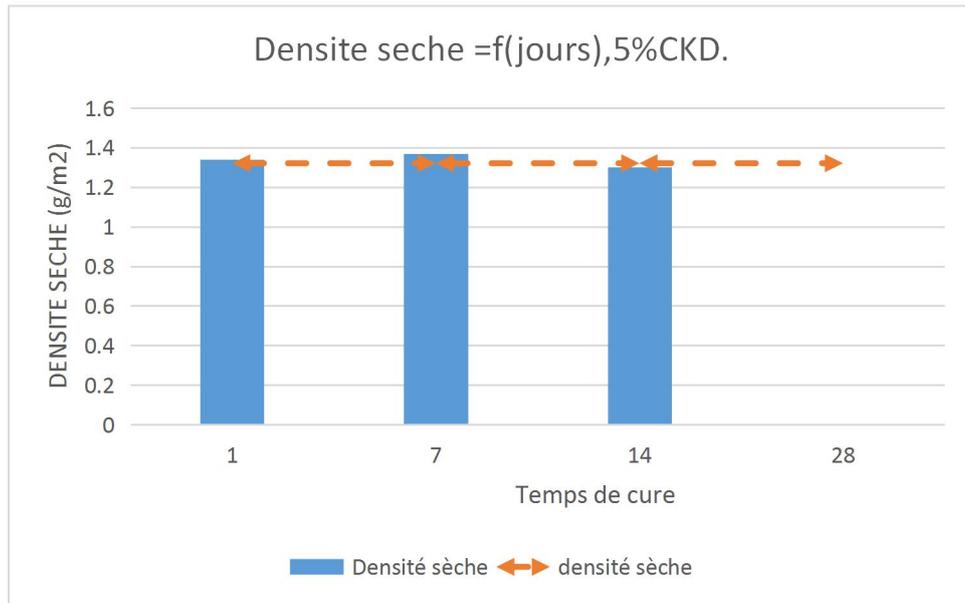


Fig. 7.6 : fiabilité a la densité ,5% CKD en temps cure.

Fiabilité à 10% CKD

Toutes les éprouvettes de sol préparées à 10% CKD puis compactées et laissées à la conservation pendant 1, 7, 14, et 28 jours, doivent avoir la teneur en eau et la densités sèches proche des valeurs de teneur en eau optimale et de densité sèche maximale : **OMC = 38%** et **MDD = 1,29kg/m³**.obtenus lors du compactage. Le tableau 2.3 et les figures 7.7 et 7.8montrent que les éprouvettes préparées pour l’essai à la compression simple approchent ces valeurs indiquées.

jours	W	ρ_d
1	34,68	1,3285
7	35,39	1,324
14	35,59	1,21

Tab 2.3 Teneurs en eau et densité sèche pour 1, 7, 14 jours à 10% CKD.

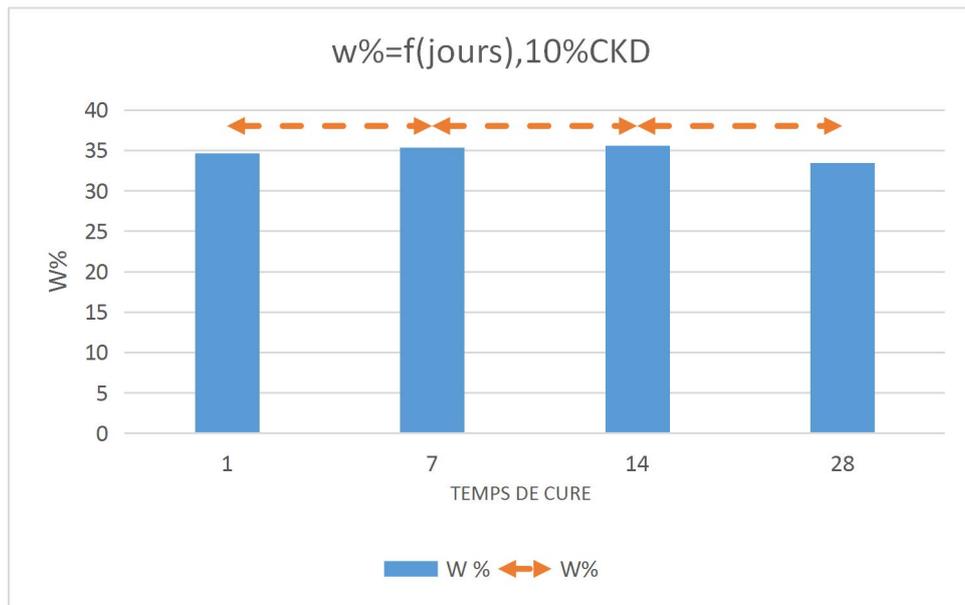


Fig.7.7 Teneurs en eau pour 1, 7, et 14 jours à 10% CKD.

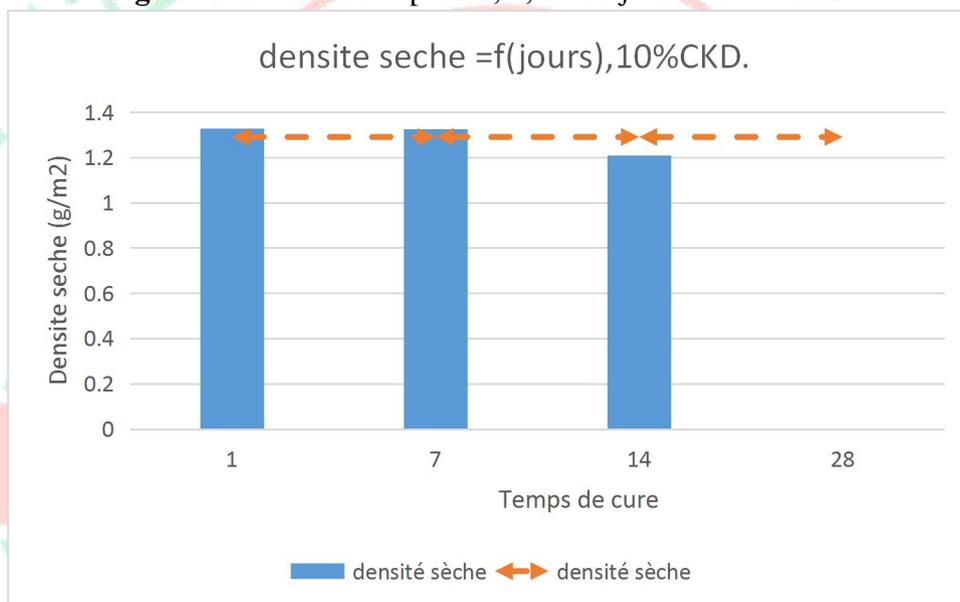


Fig.7.8 Densité pour 1, 7, et 14 jours à 10% CKD

Fiabilité à 15% CKD

Toutes les éprouvettes de sol préparées à 15% CKD puis compactées et laissées à la conservation pendant 1, 7, 14, et 28 jours, doivent avoir la teneur en eau et la densités sèches proche des valeurs de teneur en eau optimale et de densité sèche maximale : **OMC = 36,58%** et **MDD = 1,35 kg/m³**.obtenus lors du compactage. Le tableau 2.4 et les figures 7.9 et 8.0 montrent que les éprouvettes préparées pour l'Essai à la compression simple indique des valeurs acceptable.

jours	W	ρd
1	33,27	1,3413
7	28,56	1,42
14	31,42	1,37

Tab.2.4 Teneurs en eau et densité sèche pour 1, 7, et 14 jours à 15% CKD

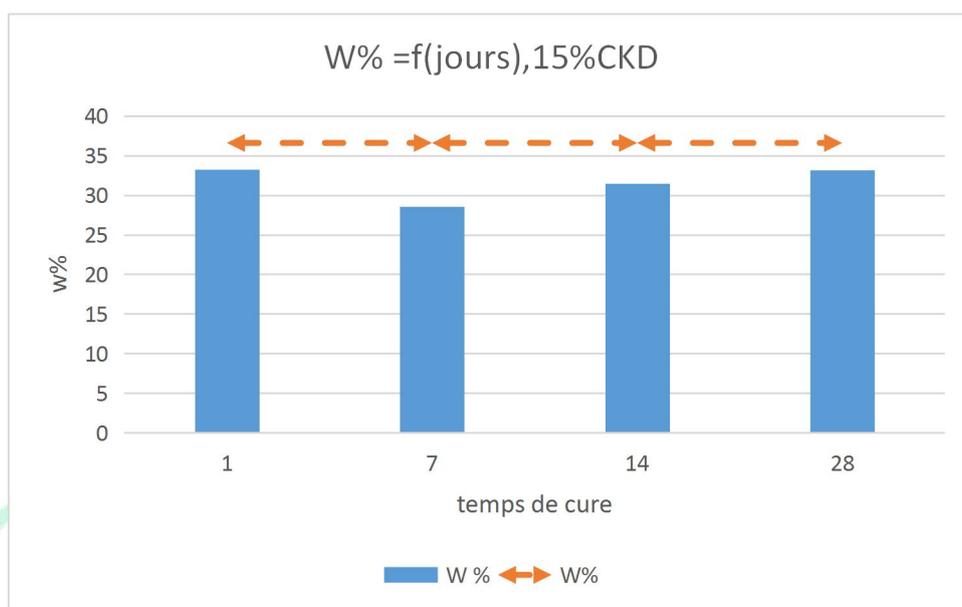


Fig.7.9 Teneurs en eau pour 1, 7, et 14 jours à 15% CKD

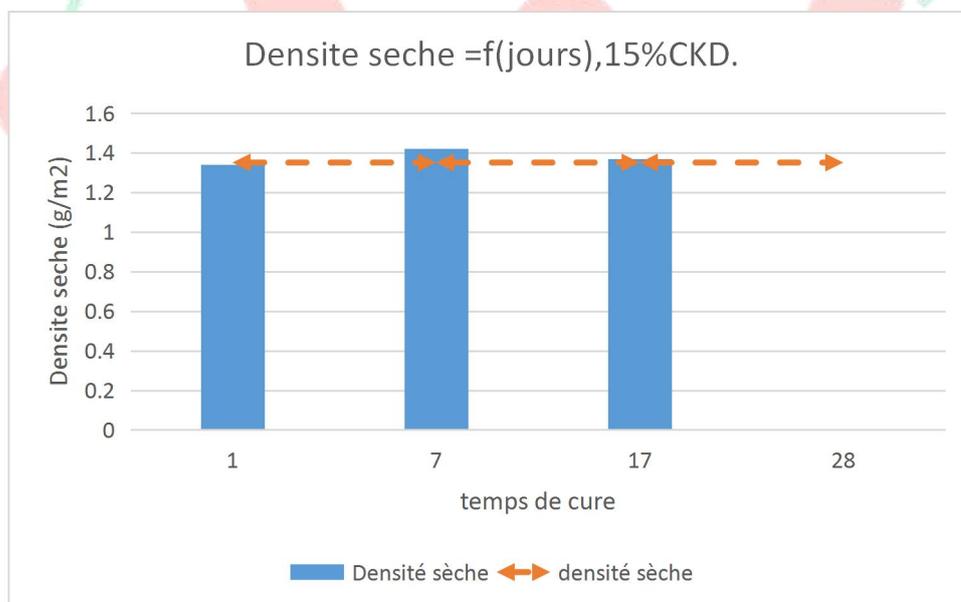


Fig.8.0 Densité pour 1, 7, et 14 jours à 15% CKD

Fiabilité à 20% CKD

Toutes les éprouvettes de sol préparées à 20% CKD puis compactées et laissées à la conservation pendant 1, 7, 14, et 28 jours, doivent avoir la teneur en eau et la densités sèches proche des valeurs de teneur en eau optimale et de densité sèche maximale : **OMC = 31,62%** et **MDD = 1,44kg/m³**.obtenus lors du compactage. Le tableau 2.5et les figures 8.1 et 8.2 montrent que les éprouvettes préparées pour L'essai à la compression simple approchent ces valeurs indiquées.

jours	W	pd
1	31,75	1,355
7	28,76	1,37
14	31,42	1,39

Tab.2.5 Teneurs en eau et densité sèche pour 1, 7, et 14 jours à 20% CKD

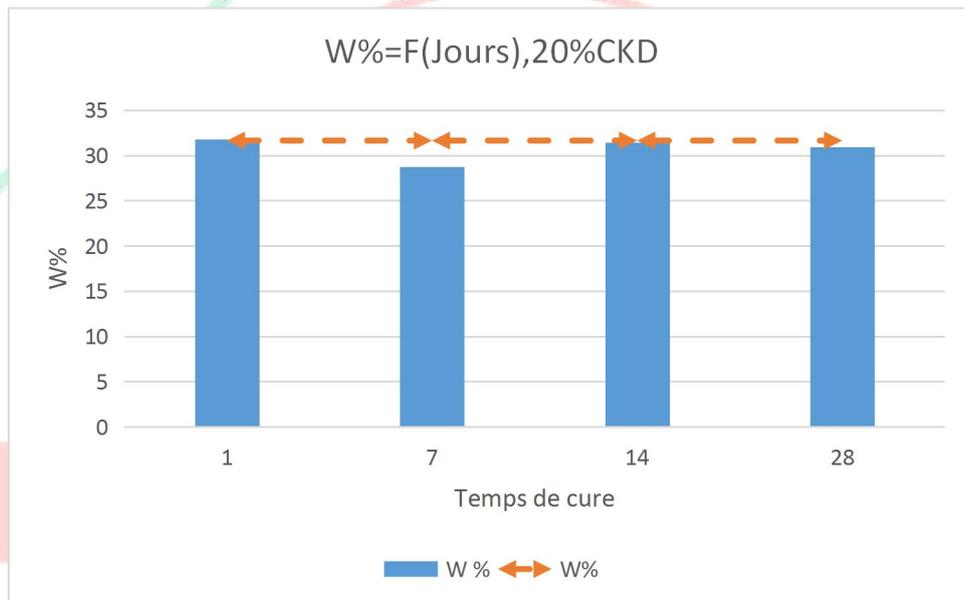


Fig.8.1 Teneurs en eau pour 1, 7, et 14 jours à 20% CKD

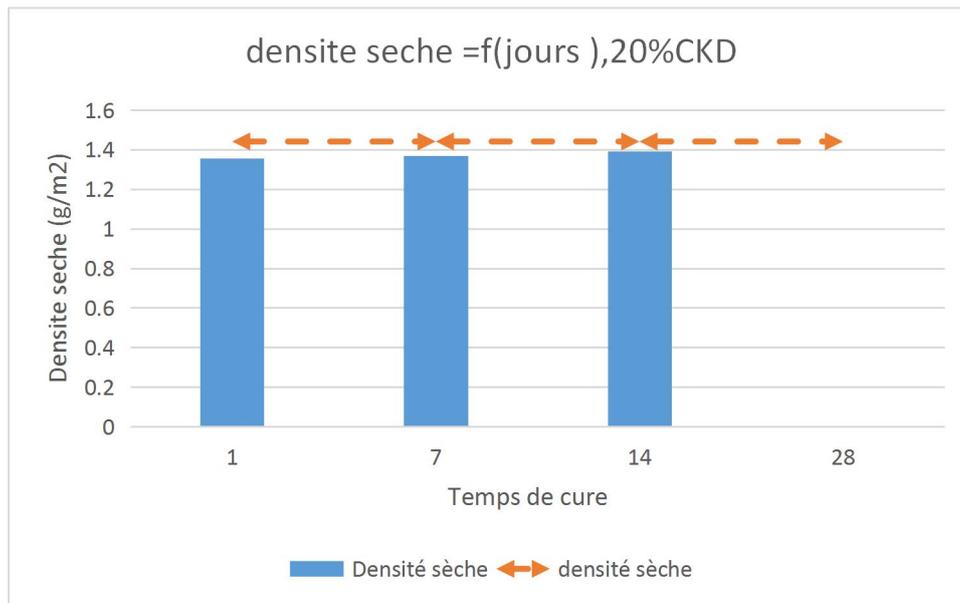


Fig.8.2 Densité sèche pour 1, 7, 14, et 28 jours à 20% CKD.

Fiabilité à (15% CKD+0,2 fibre)

Toutes les éprouvettes de sol préparées à (15% CKD+0,2 F) puis compactées et laissées à la conservation pendant 1, 7, 14, et 28 jours, doivent avoir la teneur en eau et la densités sèches proche des valeurs de teneur en eau optimale et de densité sèche maximale : **OMC = 36.58%** et **MDD = 1,35 kg/m³** obtenus lors du compactage. Le tableau 2.6 et les figures 8.3 et 8.4 montrent que les éprouvettes préparées pour l'Essai à la compression simple approchent ces valeurs indiquées.

Jours	W	ρd
1	34,95	1,29
7	36,05	1,31
14	32,46	1,39
28	31,87	1,39

Tab 2.6 Teneurs en eau et densité sèche pour 1, 7, 14 et 28 jours à (0,2 F+15%)

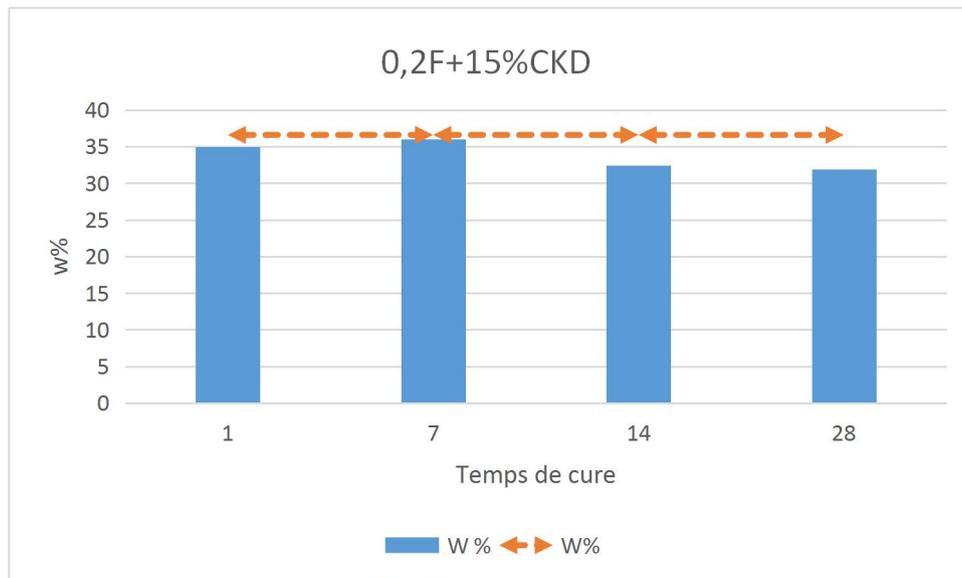


Fig.8.3 Teneurs en eau pour 1, 7, 14 et 28 jours à (15% CKD+0,2F)

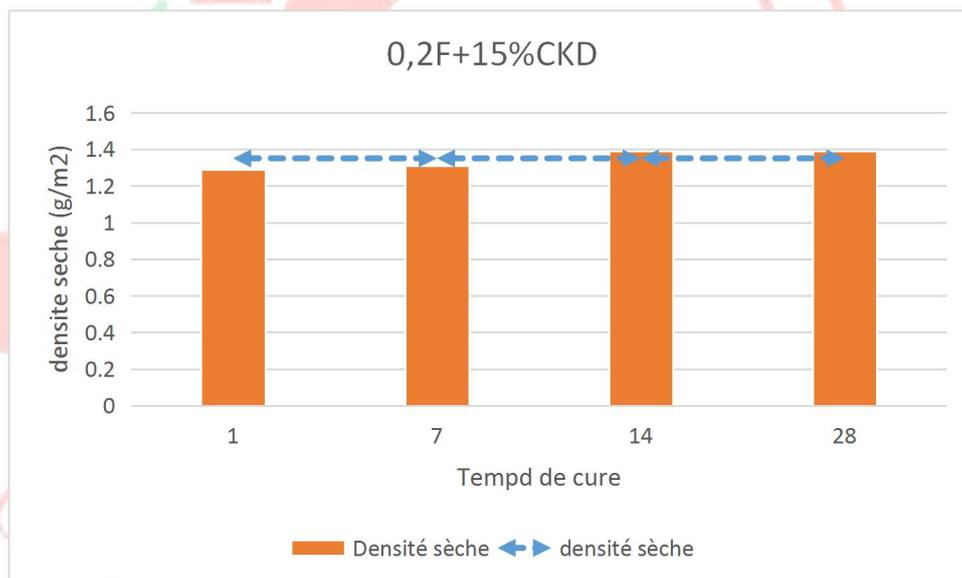


Fig.8.4 densité sèche pour 1, 7, 14 et 28 jours à (0,2F+ 15%CKD)

Fiabilité à (15% CKD+0,4 fibre)

Toutes les éprouvettes de sol préparées à (15% CKD+0,4 F) puis compactées et laissées à la conservation pendant 1, 7, 14, et 28 jours, doivent avoir la teneur en eau et la densités sèches proche des valeurs de teneur en eau optimale et de densité sèche maximale : **OMC = 36.58%**

et $MDD = 1,35 \text{ kg/m}^3$ obtenus lors du compactage. Le tableau 2.7 et les figures 8.5 et 8.6 montrent que les éprouvettes préparées pour l'Essai à la compression simple approchent ces valeurs indiquées

Jours	W	ρ_d
1	35,81	1,30
7	35,37	1,31
14	35,59	1,31
28	32,28	1,36

Tab2.7 Teneurs en eau et densité sèche pour 1, 7, 14 et 28 jours à (0,4 F+15%)

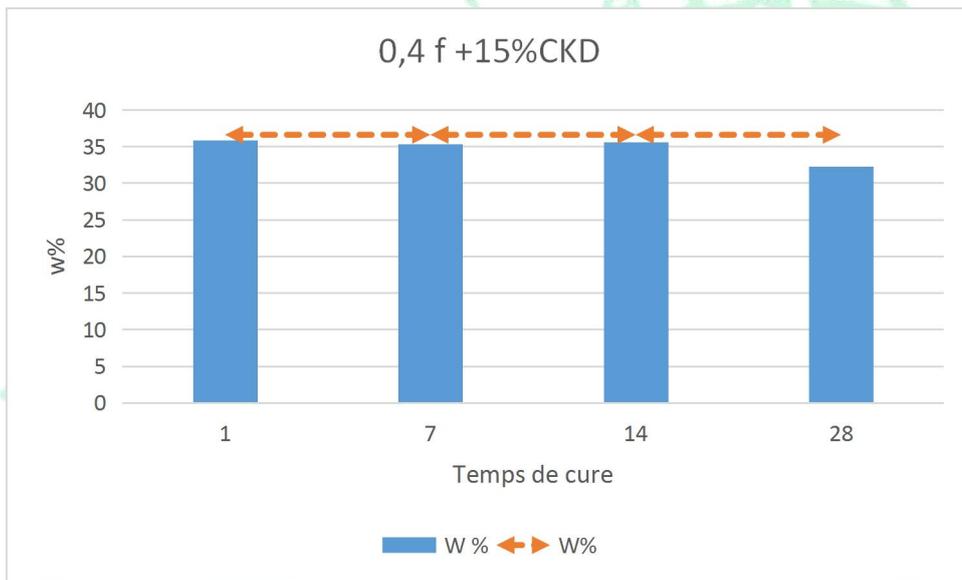


Fig.8.5 Teneurs en eau pour 1, 7, 14 et 28 jours à (15% CKD+0,4F)

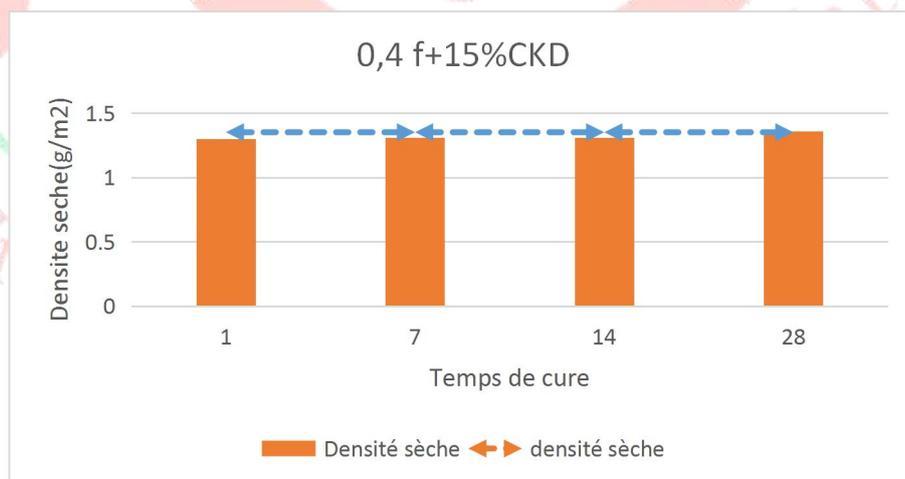


Fig.8.6 densité sèche pour 1, 7, 14 et 28 jours à (15% CKD+0,4F)

CONCLUSIONS & RECOMMANDATIONS.

Ce chapitre résume toutes les conclusions des résultats et interprétations obtenus et propose des recommandations.

CONCLUSION GENERALE :

- Les essais d'identifications et de caractérisations du sol étudié (Argile de Douar BENZEKRI Wilaya de Constantine) est un sol à matrice fine ; c'est une argile limoneuse inorganique ; la classification de ce sol selon l'USCS et l'abaque de Casagrande à partir des résultats des limites d'Atterberg obtenus par les essais réalisés au laboratoire indiquent que le sol étudié prend le symbole **CL** correspondant *a une argile inorganique de faible plasticité* .
- L'argile étudiée est d'une activité normale ce qui lui permet de réagir avec la poussière du ciment (CKD).
- L'argile BENZEKRI est de forme basique et après traitement à la poussière du ciment , la valeur du pH augmente au dessus de 12.03 et par conséquent le pourcentage initial recommandé pour le traitement est de 5% de CKD dont le taux de modification est basé sur cette valeur.
- Avec les augmentations de pourcentage de la poussière du four du ciment , la densité spécifique du sol fin augmente d'une manière significative .
- l'augmentation de la quantité d'ajout du CKD seul dans la stabilisation du sol entraîne une variation de la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. L'ajout du 5% à 10 % du CKD augmentent le teneur en eau et diminue la densité sèche maximale à 15% la teneur en eau prend une valeur de 36.58% et une densité sèche maximale de 1.36, à 20% et 25% le teneur en eau diminue et atteint 31.62% et 22.45% et la densité sèche augmentent de 1.44 et 1.51 mais les valeurs de la densités sèches maximales obtenus sont toujours inférieur à la densité sèche maximale de l'argile naturel ainsi que la teneur en eau reste toujours supérieure à celle du sol naturel ce qui indiquent que le matériau traité sera plus facile à compacter efficacement, car acceptant plus d'humidité le rend moins sensible .

- Le sol traité à la poussière du ciment seule entraîne une augmentation de la résistance à la compression du sol traité ce qui donne une meilleure résistance au cisaillement non confinée. Cette résistance s'améliore encore plus avec les augmentations de la quantité d'additif ajoutée et le temps de cure. cela veut dire que la poussière du ciment a amélioré la consistance de l'argile BENZEKRI.
- Le sol traité à la poussière du ciment associé à la fibre du palmier à savoir (15% CKD +0.2F) et (15%CKD+0.4F) a augmenté la résistance à la compression du sol traité d'une manière significative pour tous les temps de cure étudiées ainsi que la résistance au cisaillement non confinée mais cette résistance est inférieure à la valeur de la résistance à la compression du sol traité à 15% de la poussière du ciment ceci est du au caractère d'absorption d'eau des fibres de palmier qui va retarder la réaction du liant hydraulique avec les minéraux argileux du sol et entraînera cette légère diminution de la résistance à la compression non confinée.
- Sur la base des trouvailles mentionnées ci-dessus, la poussière du fours du ciment (CKD) peut être l'additif recommandé pour la stabilisation des sols fins. Un pourcentage d'ajout de 15% de de CKD est recommandé pour l'amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques du sol à particules fines. Au-delà de ce pourcentage d'additif, l'ajout de quantité supplémentaire de la poussière du ciment ne semble pas apporter grand choses à la résistance à la compression simple du sol stabilisé .
- La stabilisation chimique des sols fins est une méthode écologique et rentable puisque la poussière du fours du ciment de la cimenterie Hdjar Soud (Skikda) est disponible presque gratuitement.

RECOMANDATION

Pour une caractérisation plus complète et une meilleure compréhension du comportement de cette argile à faible portance dont les propriétés ont été améliorées par ajout de la poussière du four du ciment et les fibres palmier dattier il est recommandé de :

- Faire les essais de compression simple non confinée pour le sol stabilisé seulement avec la fibre palmier et comparer les valeurs de la résistance à la compression obtenues avec celles déjà déterminée du meme sol traité avec les ajouts cités dans ce travail.
- poursuivre les essais mécaniques tel que essais de cisaillement direct; l'essai Triaxial, CBR ..etc .
- Une étude minéralogique approfondie sur cette argile traitée à la poussière du ciment pour mieux comprendre les développements de la réaction pouzzolanique.
- Étude de la stabilisation à long terme.



REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] **Nicolas CABANE**, Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques, Thèse doctorat, Ecole Nationale Supérieures Mines De Saint-Etienne Génie Procédé France, 2005.
- [2] **Ismail KHAY**, Etude physico-chimique des interfaces chaux/chanvre/argile : Impact sur la rhéologie des mortiers et sur les propriétés mécaniques, thermiques et hydriques du matériau composite, Thèse Pour Obtenir Le Grade De Docteur, Université De Limoges Faculté des Sciences et Techniques, 2012.
- [3] **Choufa Nassima**, Epuration des eaux usées : l'élimination des micropolluants dans les eaux usées par un matériau argileux, Mémoire De Magister, Université Mohammed Chérif Messaadia Souk Ahras, Faculté Des Sciences Et De Technologie Département Des Sciences De La Matière, 2012-2013.
- [4] **Mathieu Gautier**, Interactions entre argile ammoniée et molécules organiques dans le contexte du stockage des déchets. Cas de molécules à courtes chaînes, Thèse pour obtenir le grade de docteur, Université d'Orléans Français, 2008.
- [5] **AMIROUCHE LEILA**, Etude du pouvoir de sorption du Cuivre (II) du Zinc (II) et des polyphénols par les bentonites sous l'effet des irradiations micro-ondes, Mémoire De Magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou Faculté Des Sciences Département De Chimie, 2011.
- [6] **Massinissa Koussaila SAADI**, Stabilisation des sols gonflants avec la chaux. Cas de la région de MILA, Université Larbi Ben Mhidi Oum El Bouaghi Faculté Des Sciences Et Sciences Appliquées Département De Génie Civil, 2016-2017.
- [7] **Natacha SERTIER**, Jean Charles BOURDEAU, Alain Assina, Amélioration Des Sol, Université De La Réunion, 2005-2006.
- [8] **Mounir MOUISSAT**, Etude et amélioration des propriétés de l'argile hamam debbagh par ajout de liants, Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar-Annaba Faculté Des Sciences De L'ingénieur Département De Génie Civil, 2010.
- [9] **Zemouli Samira**, Amélioration des propriétés géotechniques des argiles par l'utilisation de sous-produits industriels, Thèse pour obtenir le grade de docteur, Université Badji mokhtar annaba.
- [10] Effet des fibres de palmier dattier et de polypropylène sur les caractéristiques du béton autoplaçant : étude comparative Université Badji mokhtar annaba, 2023.
- [11] ASTM C204-07, Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus. American society of testing Materials.
- [12] ASTM D 422-90, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. American society of testing Materials.
- [13] ASTM D 854-00. Standard Test for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. American society of testing Materials.

- [14] ASTM D 4318. Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. American society of testing Materials.
- [15] ASTM D 1557. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (2,700 KN-m/m³). American society of testing Materials.
- [16] ASTM D 2166. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. American society of testing Materials.
- [17] A. B. Salahudeen. Assessment of Cement Kiln Dust Treated Expansive Soil for the Construction of Flexible Pavements. Département of Civil Engineering, Ahmadu Bello université, Zaria, Nigeria

