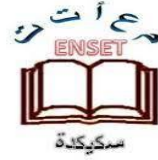




République algérienne démocratique et
populaire Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement
Technologique -Skikda-



Département de Technologie

Filière : Génie civil

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Professeur d'Enseignement
Secondaire Technique

Thème :

Étude expérimentale de l'effet de traitement aux déchets sur les
caractéristiques physiques et mécaniques des sols fins

Présenté par :

- Gamri Kheira
- Bendjazia Zahra

Encadrante : Dr. Dob Hanane

Jury de Soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Université	Rôle
Biskri Yasmina	MCA	ENSET-Skikda	Présidente
Dob Hanane	MCB	ENSET-Skikda	Encadrante
Moudjari Maroua	MCB	ENSET-Skikda	Examinatrice

Année universitaire 2023-2024

Remerciements

Au terme de cette étude, nous remercions ALLAH, le tout puissant, pour nous avoir donné le courage, la volonté et la patience sans lesquels ce travail n'aurait jamais vu le jour.

Ce travail de recherche n'aurait pas été possible sans le soutien et la participation de plusieurs personnes auxquelles nous souhaites également exprimer toute notre gratitude.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrante, Docteur Dob Hanane, pour ses précieux conseils et ses remarques pertinentes qui nous ont été d'une grande utilité, pour son dévouement, sa patience, sa générosité et sa disponibilité. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de notre plus profonde reconnaissance et de notre plus profond respect.

Nous remercions également les membres de jury Dr. Biskri Yasmina et Dr. Moudjari Maroua d'avoir accepté d'examiner et critiquer notre modeste travail et assister à notre soutenance.

Nous exprimons nos vifs remerciements à tous les enseignants du département de Génie civil, pour leurs aides, leurs encouragements et leurs conseils tout au long de notre cursus universitaire.

Nous n'oublierons jamais assez tous fonctionnaires et techniciens du laboratoire des travaux publics de l'Est (LTPE) pour leurs aides dans la réalisation des essais.

Enfin, nos remerciements s'adressent à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail, fruit de plusieurs années d'études, de travail, d'échecs et de réussites :

A mes exemples éternels, mon soutien moral et source de joie et de bonheur :

- *Merci ma très chère mère **Fatima** qui s'est toujours sacrifiée pour mon éducation Et qui m'a entourée de son amour et de son affection, ainsi qu'à mon très cher père **Saad** qu'est à l'origine de ce qui je suis, merci ne suffit pas pour vos efforts, mais merci pour tout. A ma grand-mère **Kheira**.*

QUE DIEU LES PROTEGE

- *A mes chères adorables sœurs que j'aime beaucoup : **Djahida, Soumia, Safia**, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.*
- *A ce que Dieu a fortifié mes bras mon cher et unique frère : **Mohamed Amin**.*
- *A notre chère petite-fille **Sirine**.*
- *A mes chères amis et copines : **Razika, Zahra , Aicha, Chaima, Yasmina**.*
- *A toute la famille : **Gamri, Saad, Azzaoui**.*
- *A toute la promotion de 5ème année PEST (2019-2024).*

Enfin, je manifeste beaucoup de gratitude pour tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Kheira

Dédicace

En signe d'amour, reconnaissance & de remerciement, Je dédie ce modeste travail

*A ma chère mère **Zarga** et mon cher père **Mokhtar** qui ont été les plus grands soutiens pour moi dans tout au long de mon éducation*

QUE DIEU LEUR ACCORDE UNE LONGUE VIE

A mes chères sœurs qui sont la source de soutien moral

Fatima, Ahlem et Nesrine.

*A mon cher grand frère : **Mohamed**, qui n'a pas cessé de m'aider et sa femme **Afef.***

*A mes chères petits frère : **Abderazak et Rayan** que je les aime beaucoup.*

A mes chères enfants de mes sœurs et mon frère chacun en son nom que dieu les protège

*A ma chère amie et binôme : **Kheira, et** ma chère copine **Razika.***

*A toute ma famille : **Bendjazia.***

A toute la promotion de 5ème année PEST (2019-2024).

Enfin, je manifeste beaucoup de gratitude pour tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Zahra

Résumé

Les ouvrages utilisent le sol comme un élément essentiel de l'infrastructure pour transférer la charge totale de l'ouvrage vers une couche de sol suffisamment stable et résistante. Les sols fins, contiennent des proportions importantes d'argile et de limon, qui influent sur ses propriétés géotechniques intrinsèques. Ces sols présentant une plasticité élevée et une faible capacité de portance.

Il est donc nécessaire d'améliorer ces sols pour les rendre adaptés à la construction. De nombreuses études ont été menées sur les phénomènes liés à ce type de sol. Le traitement des sols est souvent utilisé pour augmenter leur résistance et réduire leur compressibilité, ainsi que pour réduire leur sensibilité aux variations de la teneur en eau, notamment dans le cas des sols fins. La stabilisation est une technique qui permet d'améliorer la portance et le comportement hydraulique d'un sol.

Les déchets sont générés et accumulés dans d'énormes volumes, ce qui augmente le risque sur l'environnement. L'objectif principal de cette étude est d'étudier la possibilité d'utiliser le marc de café et les déchets de céramique pour stabiliser les sols argileux.

Dans notre recherche, l'argile colletée de la région de El Hadaik Wilaya de Skikda est connue par son aspect déformable et son caractère gonflant. Les marcs de café ont été incorporées en différents pourcentages : 0.5% ; 02% et 04%, cependant les déchets de céramique sont ajoutés en trois pourcentages : 05% ; 10% et 15% par rapport la masse totale de l'argile. Le programme expérimental entrepris consiste à l'étude de l'effet de ces ajouts sur les caractéristiques mécaniques et physiques de cette argile.

Les résultats des travaux expérimentaux menés pour étudier les performances de l'argile amélioré par ces deux additifs montrent que : L'addition de marc de café et le déchet de céramique engendre une augmentation de la portance de l'argile, et aboutit aussi à une augmentation significative de l'indice CBR, et donne des résultats tout à fait satisfaisants en réduisant considérablement le phénomène de gonflement.

Mots-clés : Sol fin, traitement, stabilisation, marc de café, déchet de céramique, gonflement.

الملخص

تستخدم الهياكل التربة كعنصر أساسي في البنية التحتية لنقل الحمل الإجمالي للهيكل إلى طبقة تربة مستقرة ومقاومة بدرجة كافية. تحتوي التربة الناعمة على نسب كبيرة من الطين والطيني، مما يؤثر على خصائصها الجيوتقنية الجوهرية. تتميز هذه التربة بمرونة عالية وقدرة تحمل منخفضة.

ولذلك فمن الضروري تحسين هذه التربة لجعلها صالحة للبناء. وقد أجريت العديد من الدراسات على الظواهر المرتبطة بهذا النوع من التربة. غالبًا ما تستخدم معالجة التربة لزيادة قوتها وتقليل قابليتها للانضغاط، وكذلك لتقليل حساسيتها للتغيرات في محتوى الماء، خاصة في حالة التربة الناعمة. التثبيت هو تقنية تعمل على تحسين القدرة على التحمل والسلوك الهيدروليكي للتربة.

يتم إنتاج وتراكم المخلفات بكميات كبيرة، مما يزيد من المخاطر على البيئة. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو دراسة إمكانية استخدام تفل القهوة ومخلفات السيراميك لتثبيت التربة الطينية.

في بحثنا، فإن الطين المجموع من منطقة الحدائق بولاية سكيكدة معروف بمظهره المشوه وطبيعته المنتفخة. تم دمج تفل القهوة بنسب مختلفة: 0.5%؛ 02% و 04%، إلا أن مخلفات السيراميك تضاف بثلاث نسب: 05%؛ 10% و 15%، نسبة إلى الكتلة الكلية للطين. ويتكون البرنامج التجريبي من دراسة تأثير هذه الإضافات على الخصائص الميكانيكية والفيزيائية لهذا الطين.

أظهرت نتائج الأعمال التجريبية التي أجريت لدراسة أداء الطين المحسن بواسطة هاتين الإضافتين أن: إضافة تفل القهوة ومخلفات السيراميك يؤدي إلى زيادة في قدرة تحمل الطين، كما يؤدي إلى زيادة كبيرة في مؤشر CBR، ويعطي نتائج مرضية تماما عن طريق الحد بشكل كبير من ظاهرة التورم

الكلمات المفتاحية: التربة الناعمة، المعالجة، التثبيت، تفل القهوة، مخلفات السيراميك، التورم.

Abstract

The structures use the soil as an essential element of the infrastructure to transfer the total load of the structure to a sufficiently stable and resistant soil layer. Fine soils contain significant proportions of clay and silt, which influence its intrinsic geotechnical properties. These soils exhibit high plasticity and low bearing capacity.

It is therefore necessary to improve these soils to make them suitable for construction. Numerous studies have been carried out on the phenomena linked to this type of soil. Soil treatment is often used to increase their strength and reduce their compressibility, as well as to reduce their sensitivity to variations in water content, particularly in the case of fine soils. Stabilization is a technique that improves the load-bearing capacity and hydraulic behavior of a soil.

waste are generated and accumulated in huge volumes, which increases the risk to the environment. The main objective of this study is to investigate the possibility of using coffee grounds and ceramic waste to stabilize clay soils.

In our research, the glued clay from the region of El Hadaik Wilaya of Skikda is known for its deformable appearance and its swelling character. The coffee grounds were incorporated in different percentages : 0.5%; 02% and 04%, however ceramic waste is added in three percentages: 05%; 10% and 15% relative to the total mass of the clay. The experimental program undertaken consists of studying the effect of these additions on the mechanical and physical characteristics of this clay.

The results of experimental work carried out to study the performance of clay improved by these two additives show that: The addition of coffee grounds and ceramic waste causes an increase in the bearing capacity of the clay, and also results in a significant increase in the CBR index, and gives completely satisfactory results by considerably reducing the swelling phenomenon.

Keywords : Fine soil, treatment, stabilization, coffee grounds, ceramic waste, swelling.

TABLE DE MATIERE

REMERCIEMENTS	
DEDICACE	
RESUME.	
TABLE DES MATIERES	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
NOTATIONS ET ABREVIATIONS	
INTRODUCTION GENERALE.....	01
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ARGILES	
I.1. Introduction.....	02
I.2. Origine	02
I.3. Structure et minéralogie des argiles	03
I.3.1. Les couches tétraédriques (T)	04
I.3.2. Les couches octaédriques (O)	04
I.4. Classification des argiles	05
I.5. Les principaux types de minéraux argileux	06
I.5.1. La kaolinite	06
I.5.2. Les Smectites	07
I.5.3. L'illite	08
I.5.4. Les Chlorites	09
I.6. La structure microscopique	10
I.6.1. La structure floculée.....	10
I.6.2. La structure dispersée.....	10
I.7. Les relations entre les minéraux argileux et l'eau	11
I.8. Différents types d'eau	11
I.8.2. Eau capillaire	11
I.8.3. Eau liée ou adsorbée	11
I.9. Les forces entre les minéraux d'argile	12
I.9.1. Force de répulsion	12
I.9.2. Force d'attraction.....	12
I.9.3. L'équilibre des forces.....	12
I.10. Domaines d'utilisation des argiles	12
I.11. Caractéristiques minéralogiques des argiles	13
I.11.1. La surface spécifique (Ss)	13
I.11.2. La capacité d'échange cationique (CEC)	13
I.11.3. La plasticité.....	14
I.11.4. La densité de charge spécifique (s)	14
I.11.5. Propriétés colloïdales	14
I.11.6. Adsorption	14
I.11.7 Degré d'hydratation	14
I.12. Les caractéristiques physiques des argiles	14
I.13. Les principaux problèmes des sols argileux	15
I.13.1. Le gonflement	15
I.13.1.2. Mécanismes de gonflement	15

TABLE DE MATIERE

I.13.1.3. Types de gonflement	16
I.13.1.4. Les principales causes du gonflement.....	16
I.13.1.5. Facteurs affectant le gonflement	18
I.13.2. Phénomène de glissement.....	18
I.13.2.1. Types des glissements de terrain	19
I.13.2.2. Classification du glissement de terrain.....	20
I.13.3. Phénomène de tassement	20
I.13.4. Phénomène de dégradation des sols	21
I.13.4.1. Types de dégradation.....	21
I.13.5. Phénomène d'Effondrement	21
I.14. Conclusion	22

CHAPITRE II : TRAITEMENT DES SOLS

II.1. Introduction	23
II.1.1. Amélioration des Sols	23
II.1.2. Stabilisation des Sols.....	23
II.2. Objectifs du traitement	23
II.3. Type de traitement de sol	23
II.3.1. Traitement mécanique	24
II.3.1.1. Compactage	24
II.3.1.2. Colonnes ballastées	27
II.3.1.3. Inclusion rigide	28
II.3.1.4 Tirants d'ancrages	29
II.3.1.5. Terre armée	30
II.3.1.6. Le clouage du sol	30
II.3.2. Traitement hydrodynamique.....	31
II.3.2.1. Pré-chargement	31
II.3.3. Traitement thermique	32
II.3.3.1. Cuisson.....	32
II.3.3.2. Congélation	32
II.3.4. Traitement chimique	32
II.3.4.1. Traitement par l'ajout de fibre	33
II.3.4.2. Utilisation de la chaux	36
II.3.4.3. Utilisation de ciment	39
II.3.4.4. Utilisation des déchets	42
II.4. Conclusion	45

CHAPITRE III : ESSAIS ET MATERIAUX UTILISES

III.1. Introduction	46
III.2. Sols naturels	46
III.2.1. Lieu de prélèvement.....	46
III.2.2. Essais d'identification du sol	47
III.2.2.1. Analyse granulométrique (NF P 94-056 et NFP 94-057)	47
III.2.2.2. Limites d'ATTERBERG (NF P 94-051).....	48
III.2.2.3. L'essai Proctor (NF P 94-093).....	52

TABLE DE MATIERE

III.2.2.4. Essai CBR après immersion (NF P94-078).....	54
III.3. Les ajouts utilisés	56
III.3.1. Marc de café, un substituant intéressant	56
III.3.1.1. Les principaux pays producteurs et consommateurs du café	57
III.3.1.2. Propriétés du marc de café	58
III.3.1.3. Domaines de valorisation du marc de café.....	60
III.3.1.4. Préparation de marc de café.....	60
III.3.2. Déchets de céramiques.....	60
III.3.2.1. Céramique.....	61
III.3.2.3. Préparation des déchets céramiques	63
III.3. Conclusion.....	63
CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS	
IV.1. Introduction	65
IV.2. Le choix des ajouts utilisées	65
IV.3. Préparation de mélange	65
IV.4. Essais Proctor (NF P 94-093)	66
IV.4.1. Présentation des résultats du mélange (A+MC).....	66
IV.4.2. Présentation des résultats du mélange (A+DC)	69
IV.5. Essai CBR après immersion (NF P94-078).....	72
IV.5.1. Présentation des résultats du mélange (A+MC).....	72
IV.5.2. Présentation des résultats du mélange (A+ DC)	75
IV.6. Conclusion	81
CONCLUSION GENERALE	82
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXE	

LISTE DES FIGURES

Figure.I.1 : Processus de formation de l'argile	02
Figure.I.2 : Les constituants généraux de l'argile.....	03
Figure.I.3 : Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile.....	03
Figure.I.4 : Couche tétraédrique	04
Figure.I.5 : Couche octaédrique.....	04
Figure.I.6 : Représentation polyédrale d'un feuillet	05
Figure.I.7 : Structure d'une Kaolinite.....	07
Figure.I.8 : Photographie au MEB d'une Kaolinite	07
Figure.I.9 : Schéma de la structure de la montmorillonite.....	08
Figure.I.10 : Structure de la montmorillonite	08
Figure.I.11 : Schéma de la particule de montmorillonite.....	08
Figure.I.12 : Schéma de la structure de l'illite.....	09
Figure.I.13 : Structure d'un feuillet illite.....	09
Figure.I.14 : Représentation schématique de la structure de chlorite	09
Figure.I.15 : Représentation schématique de la structure de chlorite	11
Figure.I.16 : Mécanisme de gonflement des argiles par hydratation	15
Figure.I.17 : Courbe du gonflement en fonction du temps	16
Figure.I.18 : Phénomène osmotique idéal.....	17
Figure.I.19 : Glissement de terrain	19
Figure.I.20 : Types de glissements	19
Figure.I.21 : (A) : Tassement uniforme, (B) : Tassement différentiel.....	20
Figure.I.22 : Phénomène d'Effondrement.....	22
Figure.I.23 : Schéma expliquant la différence entre affaissement minier et effondrement	22
Figure.II.1 : Type de traitement de sol.....	24
Figure.II.2 : Compactage dynamique profond.....	25
Figure.II.3 : Compactage de surface	26
Figure.II.4 : Vibro compactage.	26
Figure.II.5 : Aiguille vibrante	27
Figure.II.6 : Méthode de réalisation des colonnes ballastées.	28
Figure.II.7 : Différents composants de fondations complète sur des inclusions rigide	28

LISTE DES FIGURES

Figure.II.8 : Semelle avec/sans matelas de répartition	28
Figure.II.9 : Principe de réalisation les inclusions rigides	29
Figure.II.10 : Principe de réalisation les tirants d'ancrages.....	29
Figure.II.11 : Principe de réalisation de terre armée.	30
Figure.II.12 : Le clouage de sol	31
Figure.II.13 : Traitement par pré-chargement.....	31
Figure.II.14 : Congélation du sol	32
Figure.II.15 : Classification des fibres.....	33
Figure.II.16 : Effet des fibres sur la contrainte de cisaillement	35
Figure.II.17 : Courbes oedométriques typiques _effet de fibres.....	35
Figure.II.18 : Chantier de traitement du sol a la chaux.....	36
Figure.II.19 : Effet des ajouts sur l'angle de frottement	37
Figure.II.20 : Effet des ajouts sur la cohésion	37
Figure.II.21 : Résistances au cisaillement maximales avant et après traitement ($\sigma=100$).....	38
Figure.II.22 : Résistances au cisaillement maximales avant et après traitement ($\sigma=200$).....	38
Figure.II.23 : Résistance au cisaillement maximales avant et après traitement ($\sigma=300$)	39
Figure.II.24 : Chantier de traitement du sol au ciment.	40
Figure.II.25 : La courbe de la limite de liquidité en fonction de % ciment	40
Figure.II.26 : La courbe de limite de plasticité en fonction de % ciment.....	40
Figure.II.27 : La courbe de l'indice de plasticité en fonction de dosage ciment	41
Figure.II.28 : Variations d'IPI en fonction de % de ciment.	41
Figure.II.29 : Variations d'IPI en fonction de % de ciment après 7 jours	41
Figure.II.30 : Les limites d'Atterberg du sol étudié à différents pourcentages en chaux et en PDRB	42
Figure.II.31 : L'évolution de l'Indice de plasticité du sol étudié à différents pourcentages en chaux et en PDRB.....	42
Figure.II.32 : Relation entre la densité sèche et la teneur en eau.....	43
Figure.II.33 : Histogrammes de la résistance de compression des sols En fonction des pourcentages en chaux et PDBR à 7 jours et 14 jours.....	43
Figure.II.34 : La variation de la teneur en eau en fonction du pourcentage d'ajout.....	44
Figure.II.35 : La variation de la masse volumique sèche eau en fonction du pourcentage d'ajout	44

LISTE DES FIGURES

Figure.II.36. La contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale (ajout de 6% de caoutchouc).....	44
Figure.II.37 : La contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal à 1, 2, et 3 bar (ajout de 6% de caoutchouc)	44
Figure.III.1 : Localisation de la zone d'étude	46
Figure.III.2 : Appareillage d'essai Analyse granulométrique.....	47
Figure.III.3 : La courbe d'analyse granulométrique.....	48
Figure.III.4 : Explication de limite d'Atterberg	49
Figure.III.5 : Représentation des limites d'Atterberg	49
Figure.III.6 : Appareillage de l'essai de limites d'Atterberg	50
Figure.III.7 : Abaque de Casagrande	51
Figure.III.8 : Appareillage d'essai Proctor	52
Figure.III.9 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (sol sans ajout)	54
Figure.III.10 : Appareillage d'essai CBR après immersion.....	55
Figure.III.11 : Variation de l'enfoncement en fonction de la force (sol sans ajout)	56
Figure.III.12 : La poudre de marc de café	57
Figure.III.13 : Distribution géographique de la production et de la consommation mondiale du café (Mmt : million de tonnes métriques).....	57
Figure. III.14 : Différentes étapes d'élaboration des céramiques	63
Figure.III.15 : Préparation des déchets de céramique	63
Figure.IV.1 : Préparation du Mélange (A+MC) et (A+DC).....	65
Figure.IV.2 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (A+0.5%M C)	66
Figure.IV.3 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (A+02%MC)	66
Figure.IV.4 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (A+04%MC)	67
Figure.IV.5 : Influence du marc de café sur la courbe de compactage.....	68
Figure.IV.6 : (a) : Influence du marc de café sur $W_{opt}\%$, (b) : Influence du marc de café sur γ_{dmax} (t/m^3).....	68
Figure.IV.7 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (A+05%DC)	69

LISTE DES FIGURES

Figure.IV.8 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (A+10%DC)	69
Figure.IV.9 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (A+15%DC)	70
Figure.IV.10 : Influence du déchet de céramique sur la courbe de compactage	71
Figure.IV.11 : (a) : Influence du déchet de céramique sur $W_{opt}\%$, (b) : Influence du déchets de céramique sur γ_{dmax} (t/m ³)	71
Figure.IV.12 : Variation d'enfoncement en fonction de la force (100%A)	72
Figure.IV.13 : Variation d'enfoncement en fonction de la force (A +0.5% MC)	72
Figure.IV.14 : Variation d'enfoncement en fonction de la force (A +2% MC)	73
Figure.IV.15 : Variation d'enfoncement en fonction de la force (A +4% MC)	73
Figure.IV.16 : Variation d'enfoncement en fonction de la force (A +%MC)	73
Figure.IV.17 : Variation de l'indice CBR en fonction de la teneur en marc de café	74
Figure.IV.18 : Variation de taux de gonflement en fonction de la teneur en marc de café	74
Figure.IV.19 : Influence d'addition de marc de café sur la teneur en eau après immersion	75
Figure.IV.20 : Variation d'enfoncement en fonction de la force (A +05%DC)	76
Figure.IV.21 : Variation d'enfoncement en fonction de la force (A + 10% DC)	76
Figure.IV.22 : Variation d'enfoncement en fonction de la force (A +15% DC)	76
Figure.IV.23 : Variation d'enfoncement en fonction de la force (A +%DC)	77
Figure.IV.24 : Influence d'addition de déchet de céramique sur l'indice CBR d'argile étudié	77
Figure.IV.25 : Influence d'addition de déchets de céramique sur le taux de gonflement	78
Figure.IV.26 : Variation de la teneur en eau après immersion en fonction de teneur en déchet de céramique	79
Figure.IV.27 : Résultat essai Proctor (différent pourcentage de déchet de céramique et marc de café)	80
Figure.IV.28 : Résultat essai CBR (différent pourcentage de déchet de céramique et marc de café)	80

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.I.1 : Classification des phyllosilicates.....	06
Tableau.I.2 : Caractéristiques de la structure des principaux minéraux argileux.....	10
Tableau.I.3 : Caractéristiques des argiles	13
Tableau.I.4 : Caractéristiques physiques générales des argiles	15
Tableau.I.5 : Classification selon la profondeur de la surface de glissement.....	20
Tableau.I.6 : Classification de glissement de terrain selon l'activité	20
Tableau.II.1 . Effet des fibres pp sur les indices de compression et de gonflement	36
Tableau.III.1 : Résultat d'essai analyse granulométrique	48
Tableau.III.2 : Classification de sol selon l'indice de plasticité.....	51
Tableau.III.3 : Résultat de l'essai limite d'Atterberg	51
Tableau.III.4 : Résultat d'essai Proctor (sol sans ajout).....	53
Tableau.III.5 : Résultat obtenu après l'écrasement de l'échantillon du sol sans ajout	55
Tableau.III.6 : Caractéristiques physiques du marc de café en fonction de l'humidité	58
Tableau.III.7 : Composition élémentaire du marc de café	59
Tableau.III.8 : Les principaux composés du marc de café.....	59
Tableau.III.9 : Composition des principaux minéraux du marc de café	59
Tableau.III.10 : Activité radicalaire du marc de café.....	60
Tableau.III.11 : Energie des liaisons de quelques matériaux.....	61
Tableau.III.12 : Valeur de température de fusion (T_f) de quelques céramiques	62
Tableau.IV.1 : Variation de caractéristiques de compactage pour le mélange (A+%MC).....	67
Tableau.IV.2 : Variation de caractéristiques de compactage pour le mélange (A+%DC).....	70
Tableau.IV.3 : Résultats obtenus de l'essai CBR pour le mélange (A+ MC%).....	74
Tableau.IV.4 : Variation de gonflement en fonction de pourcentage de marc de café.....	74
Tableau.IV.5 : Variation de la teneur en eau après immersion pour le mélange (A + MC%).....	75
Tableau.IV.6 : Résultats obtenus de l'essai CBR pour le mélange (A + DC%).....	77
Tableau.IV.7 : Variation de gonflement en fonction de pourcentage de céramique.....	78
Tableau.IV.8 : Variation de la teneur en eau après immersion en fonction de teneur en déchet de céramique	78
Tableau.IV.9 : Synthèse des résultats d'essai Proctor et CBR	79

NOTATION ET ABREVIATION

Liste d'abréviation

MC : marc de café

DC : déchet de céramique

A : argile

CBR : California Bearing Ratio

$\Delta h/h_0$: Déformation relative au gonflement

S_s : surface spécifique

CEC : capacité d'échange cationique

S_{ad} : Succion d'adsorption

PP : polypropylène

C_c : indice de compression

C_g : indice de gonflement

LHF : Laitier de haut fourneau granulé

IPI : Indice portant immédiat

W₁ : Limite de liquidité

W_p : Limite de plasticité

W_s : Limite de retrait

IP : Indice de plasticité

I_L : Indice de liquidité

I_C : Indice de consistance

PDBR : Poudre de brique rouge

LTPE : laboratoire de travaux public de l'est

NOTATION ET ABREVIATION

Liste de notation

σ : contrainte normale

γ_h : Poids volumique humide

γ : Poids volumique sec

γ_{sat} : Poids volumique saturé

γ' : Poids volumique déjaugé

G_s : Densité relative

η : Porosité

e : Indice des vides

W : Teneur en eau

ϕ : l'angle de frottement

W_{opt} : Teneur en eau optimale

γ_{dmax} : Densité sèche maximale

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans le domaine de génie civil, on détermine le sol comme un matériaux constitué par des particules minérales, L'argile est l'une des différentes particules minérales qui forment le sol, une ressource précieuse avec une grande variété d'utilisation et aujourd'hui l'utilisation de cette matière est plus en plus développé surtout dans le domaine des travaux publics et du bâtiment.

Malgré ces nombreuse applications, l'argile présente aussi des défis significatifs. Ses propriétés de rétraction et de gonflement et leur nature plastique lorsqu'il est humide et de leur dureté lorsqu'il est sec pose des problèmes pour les infrastructures bâties sur des sol argileux. Des efforts considérables ont été déployés par les chercheurs pour développer des solutions efficaces à ces problèmes.

Les techniques de traitement actuelles offrent la possibilité de valoriser et de développer des matériaux locaux à faible cout et économique, par ailleurs elles permettent également d'améliorer certaines propriétés mécaniques et physique de sol.

Cette étude a pour objectif, d'étudier l'influence de marc de café et le déchet de céramique, sur les caractéristiques physiques et mécaniques d'une argile. Pour atteindre le but visé, le travail sera divisé en quatre chapitres y compris une introduction générale et une conclusion générale. Des essais sur les matériaux utilisés (argile, marc de café, céramique) sont également réalisés au niveau du laboratoire des travaux publics de l'Est (L.T.P.E) Skikda.

Le contenu de ce mémoire, est présenté comme suit :

- ❖ Une introduction générale (problématique et objectif de la recherche).
- Le premier chapitre, il s'agit d'une étude bibliographique qui consiste à décrire les sols argileux et ses principaux types de minéraux, y compris [la kaolinite, les smectites, l'illite, les chlorites] et aussi ses caractéristiques minéralogiques et physiques. Ensuite, on a présenté les principaux problèmes des sols argileux [gonflement, glissement, tassement ...].
- Dans le deuxième chapitre, " Traitements des sols ", nous avons introduit un ensemble des techniques de traitement des sols
- Dans le troisième chapitre, " Essai et matériaux utilisées ", on présente la géologie de la zone d'étude et l'identification des matériaux utilisés avec une série d'essais géotechniques tels que les essais de limite d'Atterberg, l'analyse granulométrique et les différents essais mécaniques (Proctor, CBR).
- Le dernier chapitre, présente les résultats et leurs interprétations d'études expérimentales menées au niveau du laboratoire (L.T.P.E) Skikda.
- ❖ A la fin, on présentera une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus pour cette étude

**CHAPITRE I : ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE SUR
LES ARGILES**

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ARGILES

I.1. Introduction

Les argiles, constituantes essentielles des sols résultent souvent de la décomposition des roches, occupent une place cruciale dans le domaine du génie civil. Leur composition chimique, structure cristalline et propriétés physiques et mécaniques varient considérablement. Leur comportement complexe sous contraintes mécaniques influence directement la stabilité des fondations, des tranchées, des remblais et d'autres ouvrages. Comprendre les propriétés géotechniques des argiles devient ainsi impératif pour concevoir des infrastructures durables et résilientes.

Ce chapitre retrace l'histoire de l'argile, décrit sa formation, sa structure et en ressort ses propriétés. Il recueille les différents types d'argiles, leurs indications, utilisations possibles et ses principaux problèmes.

I.2. Origine

L'argile naît du mouvement constant du sol. Ils se présentent selon trois processus principaux de formation qui peuvent être juxtaposés. Le premier concerne la simple rupture des roches due à l'érosion (Figure.I.1.). De nombreux phénomènes caractérisent l'érosion des sols. La pluie, le vent, la glace, le dégel, les vagues et bien d'autres phénomènes sont responsables de la formation de l'argile.

Le deuxième processus est appelé néoformation. Cela correspond à la formation de minéraux. Les matériaux transportés par l'eau du sol s'organiseront pour former des structures minérales par liaison. Le troisième mécanisme correspond aux processus de transformation minérale qui évoluent par dégradation des ions minéraux argileux (perte de l'équilibre des sols) ou par sédimentation (accumulation dans les cours d'eau due à un transport excessif d'eau). [Villiers.F.2008]

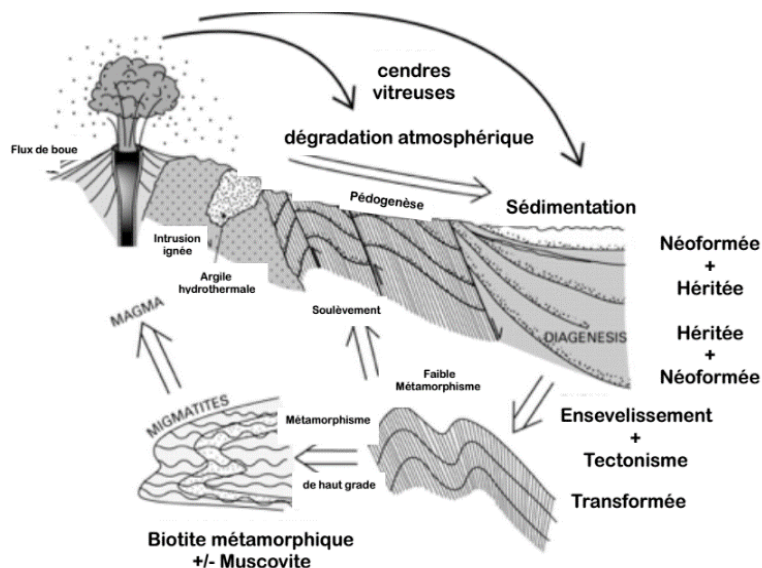


Figure.I.1. Processus de formation de l'argile. [Villiers.F.2008]

L'argile, composant principal du sol, est formée de particules fines ($<2 \mu\text{m}$). Ils sont très sensibles à la présence d'eau. Ce type de sol est collant, compressible, très difficile à manipuler et compacter, et parfois gonfle. Ils ont une mauvaise perméabilité, en général les charges qu'elle peut supporter sont de loin inférieures à celles que supportent le gravier et le sable. (Figure.I.2.)

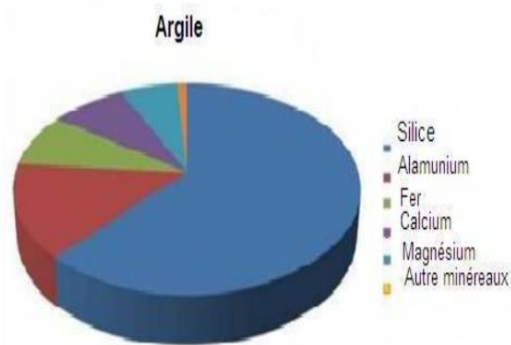


Figure.I.2. Les constituants généraux de l'argile [Yamoun.M.2021]

I.3. Structure et minéralogie des argiles

La structure initiale des sols argileux se forme, en règle générale, lors de la sédimentation en milieu aqueux des produits de l'altération des massifs rocheux contenant des quantités importantes de petites particules de minéraux secondaires (Figure.I.3.). Par la suite, des processus lents et variés de diagenèse peuvent modifier sensiblement la structure initiale de ces argiles. La combinaison de particules isolées et d'agrégats conduit à la formation d'un système structurel, c'est-à-dire une disposition ordonnée des particules et agrégats dans le sol indépendant de l'influence des parties gazeuses ou liquides du sol, qui se forme dans les processus de sédimentation, de diagenèse et de post-genèse. [Degoute.G et al.2005].

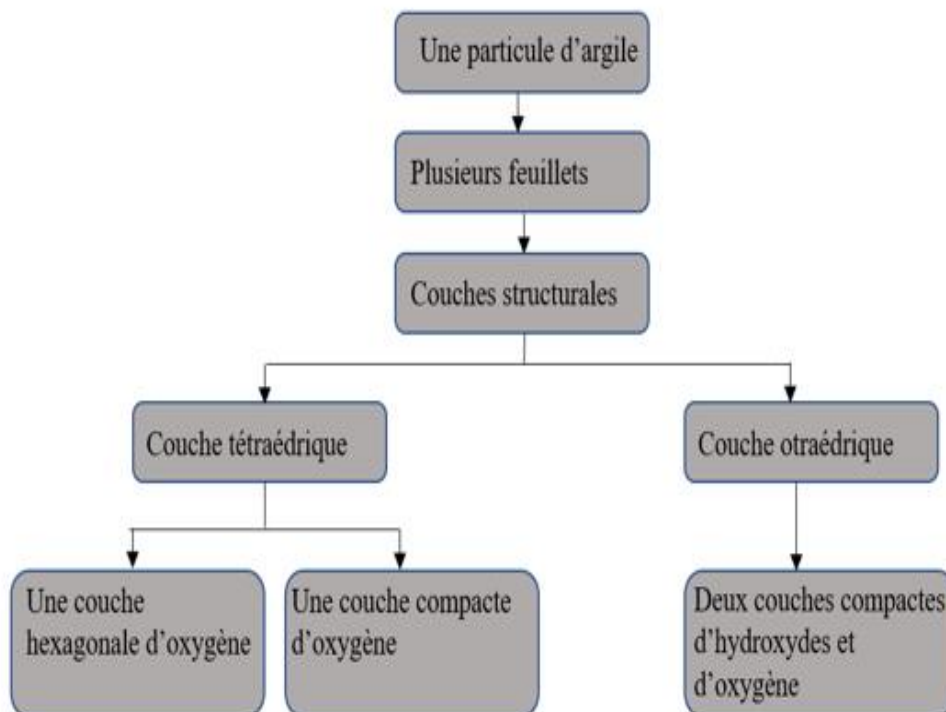


Figure.I.3. Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile [Yamoun.M.2021]

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ARGILES

- 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 ;
- 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. [Livet.M.1990] ;
- Les feuillets : lorsque plusieurs éléments sont assemblés entre eux, ils créent des feuillets élémentaires tétraédriques et octaédriques reliés entre eux par des liaisons covalentes.

I.3.1. Les couches tétraédriques (T) : sont composés d'un atome de silicium au centre relié à quatre atomes d'oxygène aux sommets, les trois formant la base (O_b) sont partagés avec les tétraèdres contigus alors que l'oxygène au sommet dit apical (O_a) est partagé avec un octaèdre (Figure.I.4.). [Nouioua.K et al.2020]

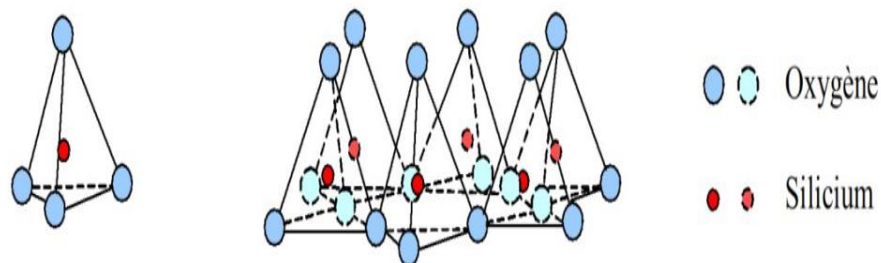


Figure.I.4. Couche tétraédrique [Grim.R.1959]

I.3.2. Les couches octaédriques (O) : dont l'adjonction constitue la couche octaédrique, comportent un cation au centre qui peut être l'aluminium et/ou le magnésium et/ou le fer, ... et des atomes d'oxygène ou d'hydroxyle ou de fluorure aux sommets (Figure.I.5.). [Nouioua.K et al.2020]

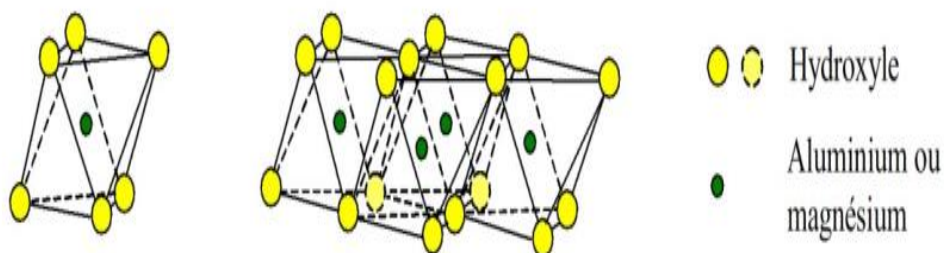


Figure.I.5. Couche octaédrique [Grim.R.1959]

Lorsque deux cavités sur trois de la couche octaédrique sont occupées par Al^{3+} (ou un autre ion métallique trivalent) la structure est dénommée **diocatédrrique**.

Dans le cas où la totalité des cavités de la cavité octaédrique est occupée par des ions métallique bivalents, la structure est dite **trioctatédrrique**. (Figure.I.6.)

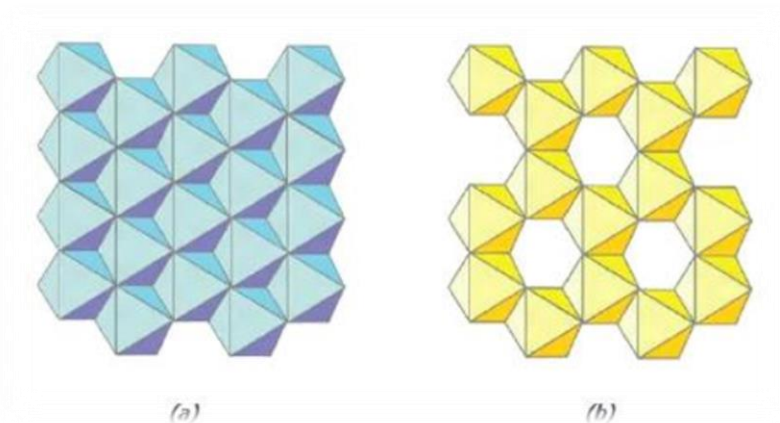


Figure.I.6. Représentation polyédrale d'un feuillet :
(a) :Trioctaédrique (b) : Dioctaédrique[Yamoun.M.2021]

I.4. Classification des argiles

Les travaux de l'AIPEA (International Clay Research Association, 1966-1972) et ultérieurs (Pédro, 1994) ont permis d'élaborer des critères de classification (Tableau.I.1) basés sur l'utilisation de :

- Type de feuille 2 :1 ou 1 :1 ;
- Coût total par feuille ;
- Nature des cations sous les feuilles.

L'argile a différentes classifications, la plus classique se base sur l'épaisseur et la structure des couches, nous les divisons en 4 groupes :

- ❖ **Minéraux à 7 Å :** Cette couche est constituée de couches tétraédriques et octaédriques. Il est décrit comme T :O ou type 1 :1
- ❖ **Minéraux de 10 Å :** Cette couche est constituée de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Décrit comme type T :O : T ou 2 :1 ;
- ❖ **Minéraux 14 Å :** feuillets composés d'une alternance de feuillets T :O :T et de couches octaédriques interlobaires ;
- ❖ **Minéraux interstratifiés :** L'épaisseur du feuillet est variable. Ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes ci-dessus.
 - Irrégulière : la sudoite (chlorite – montmorillonite) ;
 - Régulière : bravaisite (illite – montmorillonite). [Yamoun.M.2021]
- ❖ La valeur de la charge permanente du feuillet a servi de critère pour établir une classification des phyllosilicates 2 (Tableau.I.1).

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ARGILES

Tableau.I.1. Classification des phyllosilicates, [Caillère.1959], complété par [Mitchell.1993]

Nature de feuillet	Nature de cotation inter foliaires	Groupe	Nature de la couche octaédrique	Exemples
1 :1	Pas de cations où Seulement de l'eau	Kaolinite	Diocatédrigue	Kaolinite, Halloysite, nacrite, dickite
2 :1	Pas de cations	Pyrophyllites	Diocatédrigue	Talc
	Cations hydratés et échangeables	Smectites	Diocatédrigue	Montmorillonite, nontronite, beidellite, saponite
		Vermiculites	Diocatédrigue	Vermiculite diocatédrigue à Triocatédrigue
	Cations monovalents non -hydratés	Micas	Diocatédrigue	Muscovite, Illite, Paragonite, biotite
	Cations divalents Non-hydratés	Micas dur	Diocatédrigue	Margarite, clintonite
	Hydroxyles	Chlorites	Diocatédrigue	Donbassite, sudoite, Clinochore
2 :1 fibré	/	Palygorskites, Sépiolites	Diocatédrigue	Sépiolite, Palygorskite

La capacité de gonflement des argiles est influencée par les arrangements et la composition minéralogique de ces feuillets. De même, le gonflement est contrôlé par l'intensité des liaisons interfeuillets qui peuvent se casser lors de l'hydratation et modifier par la suite la micro texture de l'argile. [Wakim.j.2005]

I.5. Les principaux types de minéraux argileux

Ce sont les minéraux phylliteux halloysite, kaolinite, montmorillonite, illite et bravaisite, la glauconite, les smectites, les interstratifiés comme les vermiculites, les minéraux fibreux tels que les attapulgites ou les sépiolites, enfin les chlorites et les micas, ces dernières en très petits morceaux souvent.

I.5.1. La kaolinite

La kaolinite, l'halloysite, la kaolinite et la nacre sont des minéraux à deux couches. Une couche tétraédrique avec un noyau en silicium et une couche octaédrique avec un noyau en aluminium. La formule chimique structurale est $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{H}_2\text{O})_2$. L'équidistance inter foliaire est de 7 Å.

Les particules de kaolinite sont de grandes plaques hexagonales rigides d'une épaisseur de quelques dizaines à cent nanomètres et d'une extension latérale (dimension latérale / épaisseur) de quelques centaines à mille nanomètres. Les feuilles sont empilées dans l'ordre et en contact les unes avec les autres. Théoriquement, il n'y a pas d'eau interfoliaire dans cette argile. (Figure.I.7,8.)

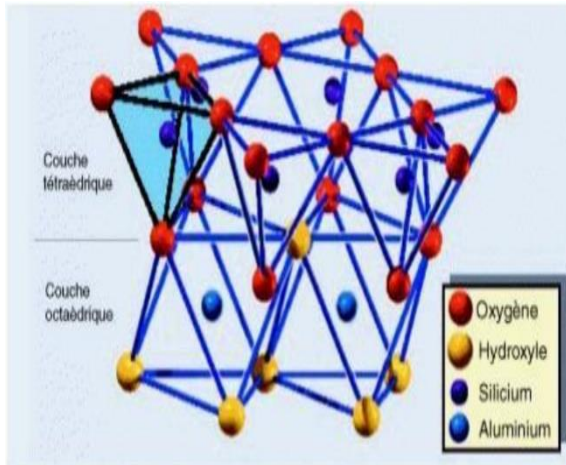


Figure.I.7. Structure d'une Kaolinite
[Ali ahmed.R.2020]

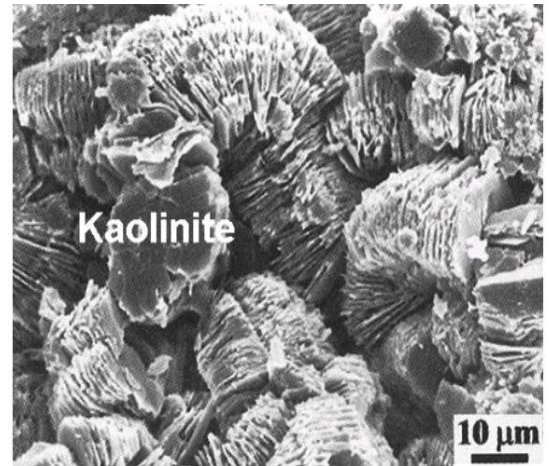


Figure.I.8. Photographie au MEB d'une Kaolinite [Yamoun.M.2021]

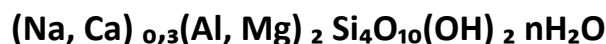
Le kaolin est considéré comme [Murray.H.H.2007] :

- Un minéral non gonflant ;
- Des globules élémentaires se présentent sous formes de plaquettes hexagonales ;
- Ph neutre ou basique ;
- Un bon pouvoir couvrant (utilisation comme pigment) ;
- Plastique, faiblement réfractaire et peu conducteur de chaleur et d'électricité.

I.5.2. Les Smectites

La Montmorillonite, la Beidellite, Nontronite, la Hectonite, la Saponite et la Sauconite sont des argiles dites potentiellement très gonflantes. Le représentant le plus important de cette famille des minéraux est la montmorillonite.

Le terme de montmorillonite a été proposé par Damour et Salvétat (1847) d'après le nom de la ville de Montmorillon (Vienne, France). La montmorillonite se compose comme suit : une couche octaédrique comprise entre deux couches tétraédriques. Les tétraèdres de la couche tétraédrique sont occupés par le silicium, et l'aluminium de la couche octaédrique est remplacé partiellement par le magnésium. L'empilement des feuillets est désordonné ; chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent et a une extension latérale extrêmement grande par rapport à son épaisseur qui est d'environ 9.6 Å. Ce désordre est la constitution des faces inférieures et supérieures de ce type d'argile, ne permettent pas le développement d'une liaison hydrogène entre les feuillets, ce qui facilite leur écartement et l'absorption des molécules variées (eau, cations ou molécules organiques) au niveau de l'espace interfoliaire qui s'écarte. De ce fait, parvient la sensibilité de ces argiles à l'eau qui se glisse entre ces feuillets en quantité variable et donne à la périodicité de l'empilement une valeur également variable souvent voisine de 14 Å. Ceci crée un déficit de charge compensé par des ions, situés entre les feuillets et qui sont changeables et fréquemment représentés dans la nature par Na et Ca (Figure.I.9-11.). [Medjnoun.A.2014]



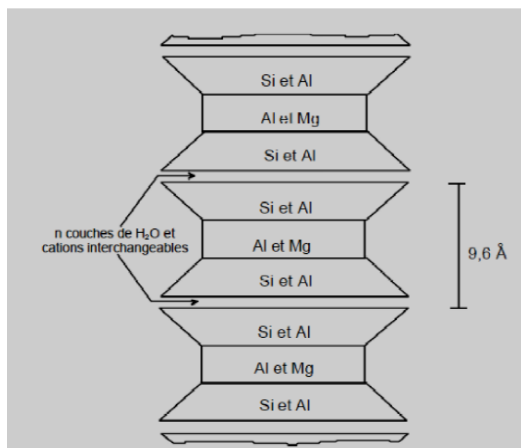


Figure.I.9. Schéma de la structure de la montmorillonite [Ali ahmed.R.2020]

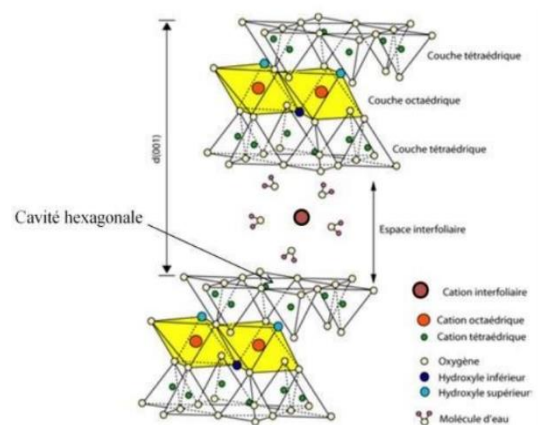


Figure.I.10. Structure de la montmorillonite [Ait amrane.T.2018]

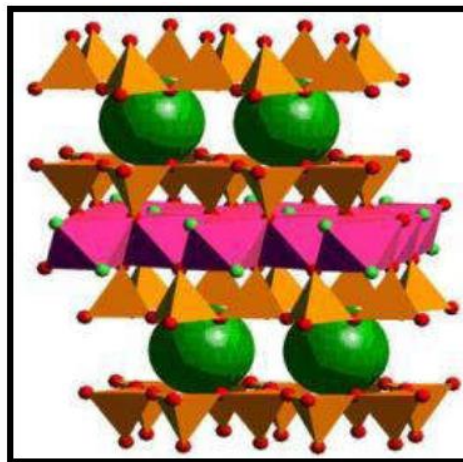


Figure.I.11. Schéma de la particule de montmorillonite [Cheniti.A.2015]

I.5.3. L'illite

Illite, le mot illite, a été décrit pour la première fois en 1937 et est originaire de l'Illinois, aux États-Unis. L'illite est composée de trois couches de phyllosilicates, une couche d'aluminium (Al) entourée de deux couches de silicates (Si). L'illite est le minéral argileux le plus répandu dans la nature. Ce sont des argiles dites potentiellement gonflantes. La liaison entre les couches n'est pas aussi forte que la kaolinite. (Figure.I.12,13.)

La formule structurale est variable selon le model suivant : avec $0.5 < x < 0.75$



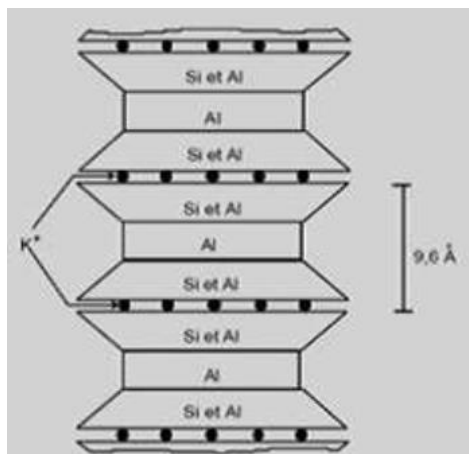


Figure.I.12. Schéma de la structure de l'illite. [Medjnoun.A.2014]

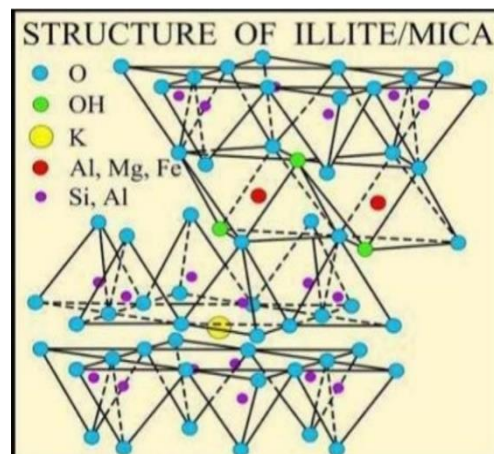


Figure.I.13. Structure d'un feuillet illite [Yamoun.M.2021]

I.5.4. Les Chlorites

Le chlorite est un minéral alumina-silicaté de fer ou de magnésium, généralement de couleur verdâtre voisin du mica par sa structure et ses propriétés physico-chimiques. Les chlorites sont produits par diverses réactions minérales, dont la décomposition du mica noir. Il s'agit d'une structure type 2:1 ou T-O-T dont l'espace inter foliaire contient une couche composée de magnésium (Mg^{2+}) et d'ions hydrogène (OH). L'Aluminium (Al^{3+}) est remplacé localement par le fer (Fe^{2+}). La liaison inter foliaire est de ce fait, affaiblie, ce qui permet une infiltration d'eau. Les chlorites existent parfois souvent dans les roches magmatiques. Elles sont également rencontrées dans les roches sédimentaires (Figure.I.14.). [Vincent.R et al.2013]

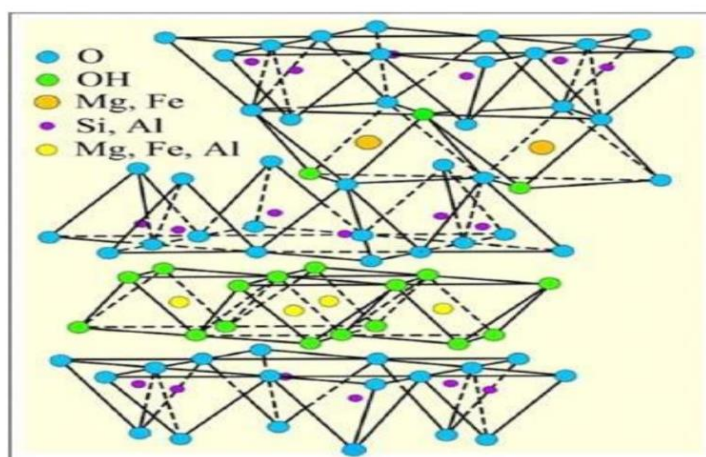


Figure.I.14. Représentation schématique de la structure de chlorite [El hachmi.A.2013]

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ARGILES

Tableau.I.2. Caractéristiques de la structure des principaux minéraux argileux [Grim.R.1962].

Minéraux argileux	Type et qualité des liens entre les couches élémentaires	Substitutions isomorphes	Activité électrochimique	Gonflements
Kaolinite	Liens d'hydrogène parmi les plus forts chez les minéraux argileux	Peu nombreuses	Une des faibles chez les minéraux argileux	Assez faible
Illite	Liens assurés par des atomes de potassium (K), moins forts que ceux de la kaolinite, mais plus fort que ceux de la montmorillonite	Plus nombreuse que celles de kaolinite, mais moins nombreuse que celles de la montmorillonite	Supérieure que celles de la kaolinite, mais inférieure que celles de la montmorillonite	Faible à moyens
Montmorillonite	Liens assurés par des molécules d'eau, parmi les plus faibles chez les minéraux argileux	Très nombreuses	Une des plus fortes chez les minéraux argileux	important

I.6. La structure microscopique [Grunberger.D.1995]

Le domaine aide à comprendre, de façon générale, le comportement des argiles. D'après ce qu'on a pu observer, le domaine peut adopter l'une des structures microscopiques suivantes : la structure floculée, la structure dispersée et la structure combinée.

I.6.1. La structure floculée

On rencontre la structure floculée dans les milieux sédimentaires riches en impuretés inorganiques et organique, comme l'eau de mer. Ces impuretés, qui jouent le rôle d'agent floculant, favorisent le regroupement des particules d'argile en flocon. Sa résistance au cisaillement peut atteindre des valeurs assez grandes, car les liens entre les particules sont forts. (Figure.I.15.(a))

I.6.2. La structure dispersée

La structure dispersée est un arrangement de particules d'argile parallèles, normalement orientés à l'horizontale. A l'occasion, la structure dispersée est présente dans des dépôts d'argile qui se sont formés dans un milieu de sédimentation très pauvre en agents floculent, comme l'eau douce dans des lacs. Elle peut aussi résulter du remaniement d'une structure floculée. (Figure.I.15.(b))

I.7. Les relations entre les minéraux argileux et l'eau

En considérant la nature électrique des feuillets ou bien la présence de cations compensateurs, des interactions différentes de celles généralement observées dans les milieux poreux vont pouvoir faire leur apparition.

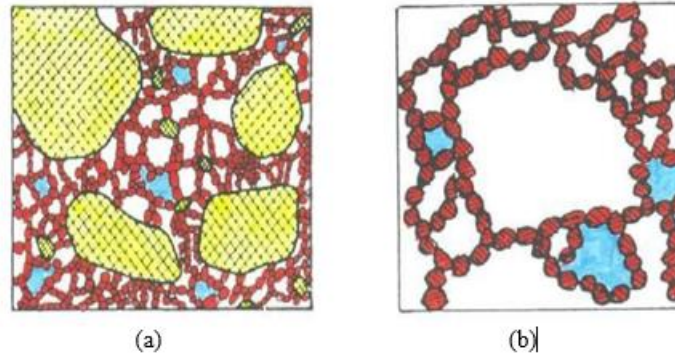


Figure.I.15. Différentes structures d'argiles [Grunberger.D.1995]
(a). Structure floculée (b). Structure dispersée

I.8. Différents types d'eau [Mahamedi.A et al.2013]

Nous distinguons fréquemment trois types d'eau dans les argiles : l'eau libre, l'eau capillaire et l'eau adsorbée ou liée. L'importance des effets produits par ces types d'eau est liée à la nature chimique (présence de cations), à la fraction volumique (ou porosité) de l'argile elle-même directement liée à la taille de l'espace poral, au degré de compacité et au degré de saturation, et enfin à la nature minéralogique des argiles.

I.8.1. Eau libre

Comme pour tous les sols humides, on retrouve de l'eau libre dans les argiles. Celle-ci se trouve principalement dans les espaces inter agrégats et éventuellement dans l'espace inter particulaire (loin des surfaces externes des particules). Cette eau est libre de circuler facilement dans le milieu ; elle s'évapore complètement lorsque le sol est porté et maintenu à une température d'environ 105°C et son écoulement peut se produire par un gradient de charge hydraulique décrit par la loi de Darcy.

I.8.2. Eau capillaire

Dans le cas des argiles non saturées, cette eau est retenue sous forme de ménisques au voisinage des points de contact entre les grains par des forces capillaires, créant ainsi entre ces derniers des forces d'attraction. Son écoulement est produit par un gradient de succion à l'échelle de pore et traduit par une loi de Darcy généralisée.

I.8.3. Eau liée ou adsorbée

Contrairement aux milieux granulaires, les milieux argileux se distinguent par l'existence, autour de chaque particule, d'une couche semi-solide d'eau adsorbée dont les propriétés sont complètement différentes de celle de l'eau libre. En effet, la molécule d'eau, à cause de sa dissymétrie, agit comme un dipôle électrique (le centre de gravité des charges négatives est différent de celui des charges positives), sa propriété dépend de sa position dans le système eau-particules solides, du fait des

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ARGILES

phénomènes d'interactions eau-argile. À l'intérieur de la couche adsorbée, près de la particule solide, la densité de l'eau adsorbée dépasse celle de l'eau libre.

Elle a des propriétés voisines d'un solide ; puis, en allant vers la limite de la couche, elle présente celle d'un liquide de moins en moins visqueux pour tendre enfin vers les propriétés de l'eau normale à la frontière eau libre-eau adsorbée, avec une densité finale égale à celle de l'eau libre ; Les molécules d'eau de la couche adsorbée peuvent se mouvoir facilement le long de la surface du minéral et difficilement en sens perpendiculaire. Pour une argile donnée, l'augmentation de la valence des cations (par changement de cations) ou de leur concentration dans le liquide interstitiel se traduit par une réduction de l'épaisseur de cette couche. Elle dépend aussi de la constante diélectrique ainsi que de la température. L'épaisseur de la couche adsorbée varie entre une couche de molécules d'eau et plusieurs dizaines de molécules d'eau Elle ne peut être évacuée qu'à température élevée (entre 90 et 300 °C).

I.9. Les forces entre les minéraux d'argile [Bekhti.M.2019]

Les feuillets sont soumis à trois forces dont deux de nature répulsive et l'autre attractive du type Van der Waals. La résultante des forces, qui est de nature répulsive, diminue avec l'augmentation de la distance interfoliaire, autrement dit avec le gonflement.

I.9.1. Force de répulsion

Les forces de répulsion sont dues généralement à l'énergie d'hydratation des feuillets et des cations compensateurs, à l'interaction des doubles couches ioniques associés à des feuillets voisins et à la pression osmotique.

I.9.2. Force d'attraction

La force de Van der Waals est de nature attractive. Elle génère une énergie d'attraction qui est inversement proportionnelle à la distance qui sépare les deux feuillets.

I.9.3. L'équilibre des forces

Les forces d'attraction et de répulsion s'opposent continuellement et finissent par atteindre un état d'équilibre. Lorsqu'un échantillon de sol est prélevé dans un dépôt d'argile, les contraintes de compression dues au poids du sol disparaissent, ce qui diminue les forces d'attraction.

Le volume de l'échantillon augmente alors jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint entre les forces d'attraction et de répulsion. [Cheniti.A.2015]

1.10. Domaines d'utilisation des argiles

Les argiles employées dans les différentes fabrications énumérées ci-dessus sont très variables en nature et en composition. Elles sont constituées par une fraction argileuse et une fraction non argileuse (quartz, feldspaths, minéraux lourds, oxydes de fer et d'alumine, matières organiques). Les principaux gisements d'argiles sont soit autochtones, soit allochtones. Les différentes variétés peuvent avoir les utilisations suivantes :

- Les kaolins (kaolinite et halloysite), en céramique, charges notamment pour le papier, le caoutchouc... et couchage du papier, réfractaires ;
- Les argiles à tuiles et briques, en poterie, produits réfractaires ;

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ARGILES

- Les argiles réfractaires et à poterie, en poterie et produits réfractaires, également en briqueterie, comme charges (peintures, insecticides), boues de forages, en chimie et comme abrasifs artificiels ;
- Les bentonites, en fonderie, bouletage des minerais pour les insecticides et les fongicides, en filtration, boues de forages, chimie, adsorbants ;
- Les terres à foulon, pour les insecticides et les fongicides, la filtration, la chimie, les boues de forage, l'adsorption. [Cheniti.A.2015]

I.11. Caractéristiques minéralogiques des argiles

I.11.1. La surface spécifique (S_s)

La dimension d'une particule est exprimée par de nombreux auteurs par le concept de surface Spécifique Ce concept est défini comme étant le rapport entre la surface (S) de l'ensemble des grains solides constituant l'échantillon et son poids.

La taille fine des argiles possède une grande surface spécifique qui dépend de la nature du minéral argileux, la surface des minéraux argileux est supérieure à celles des minéraux de même taille mais de forme différent [Velde.B.1995]

$$S_s = \frac{S}{P}$$

I.11.2. La capacité d'échange cationique (CEC)

Les minéraux argileux ont la propriété d'interagir avec les cations ou les anions. L'échange des ions se fait autour de la surface extérieure de l'unité structurale. Les cations échangeables les plus connus sont le calcium (Ca⁺⁺), le magnésium (Mg⁺⁺), le potassium (K⁺), le nitrate (NH) et le sodium (Na⁺). La Mesure de la capacité d'une argile à échanger des cations est exprimée en Milli équivalent par 100 grammes d'argiles et varie dans le même sens que la densité de charge surfacique. Do pour les argiles ayant une valeur élevée de CEC, elles ont tendance à peu gonfler, et cela à surfaces spécifiques égales. [Wakim.j.2005]

Tableau.I.3. Caractéristiques des argiles [Grim.R.1962].

Argile	type	Nombre des feuillets par particule	Diamètre d'une particule(μm)	Epaisseur d'une particule (μm)	Surface spécifique(m ² /g)	C.E.C (meq/100g)
Kaolonite	1 ;1	100 - 200	0.1 – 4	1 – 10	10 – 20	3 - 15
Illite	2 ;1	1 - 10	0.1 – 1	0.003-0.001	65 - 100	10 - 40
Montmorillonite	2 ;1	1	0.1	0.001	700 - 840	80 - 150

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ARGILES

I.11.3. La plasticité

Elle est liée à la présence des feuillets dont les déplacements possibles les uns sur les autres ont pour conséquence la malléabilité de l'argile (la propriété d'un matériau à être déformé à chaud et à froid par un choc ou pression, en conservant la nouvelle forme acquise). [Yamoun.M.2021]

I.11.4. La densité de charge spécifique (s)

Est égale au rapport entre la capacité d'échange cationique CEC et la surface spécifique S de la particule argileuse.

$$\sigma \left(\frac{\text{meq}}{\text{m}^2} \right) = \frac{\text{cec}}{\text{s}}$$

Deux types de charge existent dans les milieux argileux : Une charge permanente ou liée aux substitutions ioniques (Al^{3+} pour Si^{4+} dans la couche tétraédrique ; Mg^{2+} ou Fe^{2+} pour Al^{3+} dans la couche octaédrique), une charge de surface aux réactions chimiques qui se produisent à la surface spécifique renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux. L'augmentation de la densité de charge spécifique réduit le gonflement ou augmentation entraîne l'attraction des ions, ce qui va provoquer une condensation de la double couche, donc une diminution de son épaisseur.

Aussi, plus cette concentration est élevée, plus la couche est mince ou comprimée donc induit une diminution de gonflement. [Wakim.j.2005]

I.11.5. Propriétés colloïdales

Cette propriété est d'une grande importance pour les procédés de purification des argiles. Elle est liée à la présence de charges négatives à la surface de chaque grain d'argile. Le caractère colloïdal se traduit par le recouvrement de chaque grain d'argile par une double couche d'ions hydrosoluble de charges opposées. [Amirouche.L.2011]

I.11.6. Adsorption

L'adsorption est l'une des méthodes de séparation les plus efficaces pour enlever le dilué polluants ; et elle fournit les itinéraires pour la régénération, le rétablissement et la réutilisation du matériel adsorbant [Kumar.P et al.2011]

La technologie d'adsorption est considérée comme une technologie plus efficace et la plus prouvée ayant l'application potentielle dans l'eau et le traitement des eaux résiduaires (L'adsorption sur argile à fait l'objet de plusieurs travaux) .

I.11.7 Degré d'hydratation

Certains minéraux argileux ont la capacité d'incorporer dans leur structure des molécules d'eau. Cette eau modifie la dimension de l'espace interfoliaire en provoquant son gonflement. [Nouioua.K et al.2020]

I.12. Les caractéristiques physiques des argiles

L'argile en particulier a fait l'objet de nombreux travaux de recherche sur sa nature minéralogique. La différenciation entre les différents types d'argile est établie dans le (Tableau I.4.).

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ARGILES

Tableau I.4. Caractéristiques physiques générales des argiles [Yamoun.M.2021].

Caractéristique Physique	Notation	Valeur Moyenne	Unité
Poids volumique humide	γ_h	16 - 22	KN/m ³
Poids volumique sec	γ	10 - 20	KN/m ³
Poids volumique saturé	γ_{sat}	19 - 22	KN/m ³
Poids volumique déjaugé	γ'	9 - 12	KN/m ³
Densité relative	G_s	2.60 - 286	/
Porosité	η	0.20 – 0.80	/
Indice des vides	e	0.3 - 1	/
Teneur en eau	w	10 - 20	%

I.13. Les principaux problèmes des sols argileux

I.13.1. Le gonflement

En général, le gonflement des sols se caractérise par des mouvements de terrains différentiels de petite amplitude ; provoqués par des variations de volume de certain sol argileux lorsque leur teneur en eau se modifie.

I.13.1.2. Mécanismes de gonflement

Les matériaux susceptibles de gonfler sous l'action de l'eau sont les sols argileux naturels, les marnes, les roches argileuses et les roches composées d'anhydrite. Le processus de gonflement inter particulaire met en jeu séparément ou de façon combinée des phénomènes physico-chimiques et mécaniques variés. Il dépend aussi de la texture du matériau, c'est-à-dire de l'organisation des plaquettes entre elles, comme on le montrera dans la suite. [Mekki.L.2006]

Le processus de gonflement des sols argileux est contrôlé par plusieurs mécanismes superposés à différentes échelles et s'exprime de manière différée à l'échelle macroscopique. La cinétique du gonflement, c'est-à-dire la relation existante entre la déformation et le temps, est en générale très lente et dépend de la nature et de l'état du sol et du niveau de chargement (Figure.I.16). [Yamoun.M.2021]

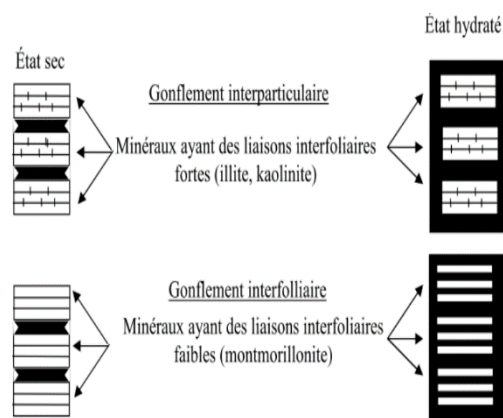


Figure.I.16. Mécanisme de gonflement des argiles par hydratation [Yamoun.M.2021]

I.13.1.3. Types de gonflement

En effet, deux types de gonflement peuvent se produire au sein des matériaux argileux :

❖ Le gonflement interfoliaire

Résulte de la cassure des faibles liaisons entre les feuillets des particules d'argile, et permettent l'acquisition d'eau au sein de la structure des particules. Ce gonflement est assez rapide et son amplitude est très notable.

❖ Le gonflement interparticulaire

Résulte de l'apport d'eau supplémentaire qui écarte les plaquettes (assemblage de feuillets) les unes des autres. Cette réaction est lente et peut durer des années même lorsque la succion devient nulle. Le gonflement interparticulaire a une ampleur assez limitée et affecte toutes les argiles contrairement au gonflement interfoliaire.

- La (Figure I.17.) représente la variation relative de la hauteur d'échantillon en fonction du logarithme du temps, dans laquelle on distingue les deux phases du gonflement
- Gonflement primaire : qui débute très tôt sa finalité est caractérisée par un point d'inflexion où on remarque le changement d'allure de la courbe.
- Gonflement secondaire : qui est caractérisé par la partie linéaire de la courbe. [Mansouri.F et al.2017]

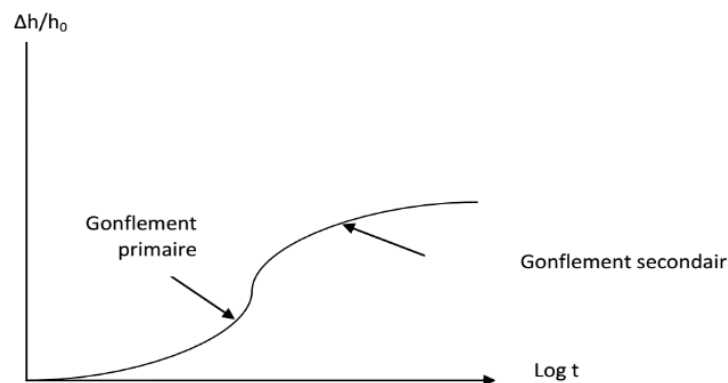


Figure I.17. Courbe du gonflement en fonction du temps [Hafsi et al.2015]

I.13.1.4. Les principales causes du gonflement

Les quatre principaux phénomènes expliquant les causes du gonflement sont :

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

a. Hydratation par capillarité

La capillarité est une caractéristique des matériaux non saturés de faible porosité. Elle se traduit par une extension dans la phase liquide lors de la saturation ou par une contraction lors de la désaturation. La saturation des matériaux fins après une phase de drainage peut entraîner le piégeage de l'air par l'eau à l'intérieur du réseau poreux. Ce mécanisme peut engendrer la compression de l'air responsable

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ARGILES

de la dégradation ou de la fragmentation des matériaux argileux. La capillarité dépend du phénomène d'adsorption, le film d'eau adsorbé diminue l'espace poreux et modifie par la suite la capillarité. [Belabbaci.2014]

b. Hydratation par adsorption

L'adsorption de l'eau par des solides met en jeu des forces (suction) de nature électrostatique : il se forme des zones électriquement chargées à la surface des minéraux (en particulier pour les argiles). Les éléments physiques engendrant cette suction d'adsorption S_{ad} sont :

- La liaison hydrogène entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène ;
- Les hydroxydes situés à la surface des feuillets argileux ;
- L'eau nécessaire à l'hydratation des cations attirés par les défauts de charge du feuillet ;
- L'eau attirée par l'attraction osmotique créée par la concentration de cations au voisinage du feuillet ;
- L'attraction électrique du pôle positif du dipôle que forme la molécule d'eau ;
- Les forces d'attraction de Van der Waals.

Toutes ces forces concourent à l'attraction de l'eau avec une intensité décroissant très rapidement avec la distance. Ces forces se traduisent localement par des pressions d'eau très négative. [Medjnoun.A.2015]

c. Hydratation par osmose

Lorsqu'une solution saline est séparée de l'eau pure par une membrane semi-perméable idéale (permettant uniquement le passage des molécules d'eau mais non des substances dissoutes), l'eau pure a alors tendance à traverser la membrane pour diminuer la concentration de la solution. Ce phénomène est appelé osmose. La pression qu'il faut appliquer pour empêcher l'arrivée de l'eau dans la solution saline est nommée la pression osmotique (Figure.I.18.). [Yamoun.M.2021]

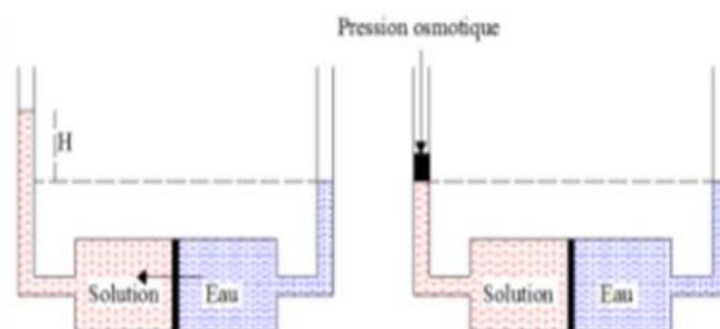


Figure I.18. Phénomène osmotique idéal [Yamoun.M.2021]

Si la concentration de l'eau libre est inférieure à la concentration de l'eau de la double couche, ils résultent alors une migration des molécules d'eau des pores larges vers les particules argileuses, entraînant l'augmentation de la distance inter feuillet. Par contre, il en résulte une pression osmotique d'attraction entraînant la contraction du matériau argileux. Le phénomène d'hydratation par osmose permet d'expliquer le fait que lorsque la salinité de la solution d'hydratation augmente, le matériau argileux gonfle moins. [Belabbaci.2014]

d. Transformations chimiques

Les trois transformations chimiques sont : [Belabbaci.2014]

- La transformation de l'anhydrite en gypse ;
- L'oxydation de la pyrite ;
- La dissolution des carbonates dans l'eau.

I.13.1.5. Facteurs affectant le gonflement

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

- Les facteurs intrinsèques
- Les facteurs externes.

a. Facteurs intrinsèques

Ce sont des facteurs propres à la microstructure du sol, Parmi ces facteurs, on peut citer :
L'influence de la composition minéralogique ;

- L'influence du type de cations compensateur ;
- L'influence de la capacité d'échange en cations (CEC) ;
- L'influence de la surface spécifique ;
- L'influence de la structure du sol ;
- L'influence la quantité de minéraux non argileux. [Mansouri.F et al.2017]

b. Facteurs externes

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

- Conditions de compactage (statique ou dynamique) ;
- Influence de l'énergie de compactage ;
- Influence de la teneur en eau initiale ;
- Influence de la densité sèche ;
- Influence de l'effet d'échelle ;
- Influence du régime de contraintes ;
- Influence du frottement latéral ;
- Influence de la température ;
- Influence des Cycles retrait-gonflement ;
- Influence de la durée des essais ;
- Influence de l'épaisseur. [Mansouri.F et al.2017]

I.13.2. Phénomène de glissement

Les glissements de terrain sont des mouvements qui ont un effet sur les versants naturels et les pentes, qui sont également affectées par les mouvements terrestres(Figure.I.19.). Ils peuvent causer des graves dommages aux bâtiments et aux constructions, avec des conséquences économiques importantes, et peuvent également causer des victimes, selon les circonstances. Les catastrophes naturelles comme les fortes pluies, l'érosion des berges, les tremblements de terre, les travaux de

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ARGILES

terrassement ou la déforestation sont quelques-uns des événements naturels qui se produisent à la suite d'actions humaines. Comme on le sait, les mouvements de terrain sont très variés, par leur nature (glissements de terrains, éboulements rocheux, coulées de boues, effondrements de vides souterrains, affaissements, gonflement ou retrait des sols ...)

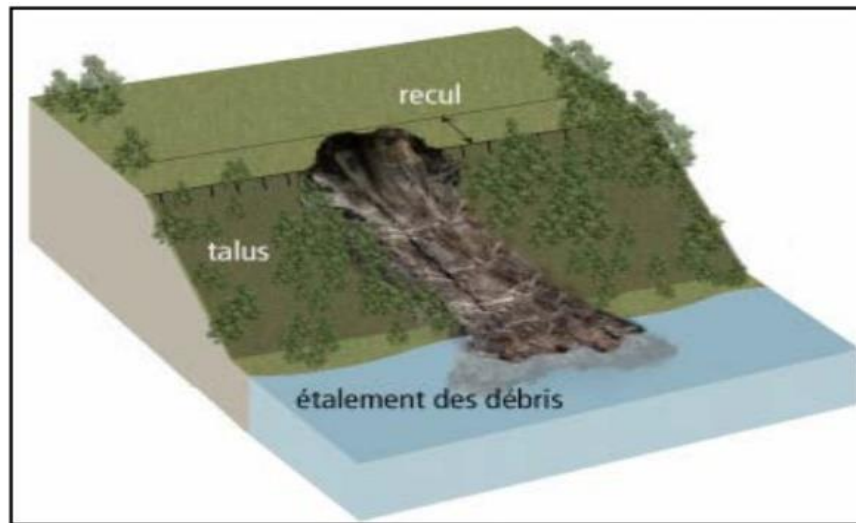


Figure I.19. Glissement de terrain [Harkati.M.2019]

Un glissement de terrain peut avoir comme conséquence ce qui suit :

- Décollement, fissuration des dallages intérieurs et extérieurs ;
- Fissures profondes sur les maisons individuelles ;
- Déformation des routes et clôtures penchées ;
- Déformation des réseaux enterrés.

I.13.2.1. Types des glissements de terrain

Selon la forme de la surface de rupture, on peut distinguer trois types principaux de glissements (Figure.I.20.).

a. Glissement plan

Il produit quand une surface topographique pouvant guider une rupture plane, où la surface de glissement est plane, il s'agit souvent du toit d'une couche de mauvaise résistance. [Harkati.M.2019]

b. Glissement circulaire (rotationnel)

Lors d'un glissement circulaire, la masse du sol se déplace vers l'aval le long d'une surface de rupture circulaire. Habituellement, les glissements de type circulaire sont de faible volume et le déplacement des matériaux est limité. [Harkati.M.2019]

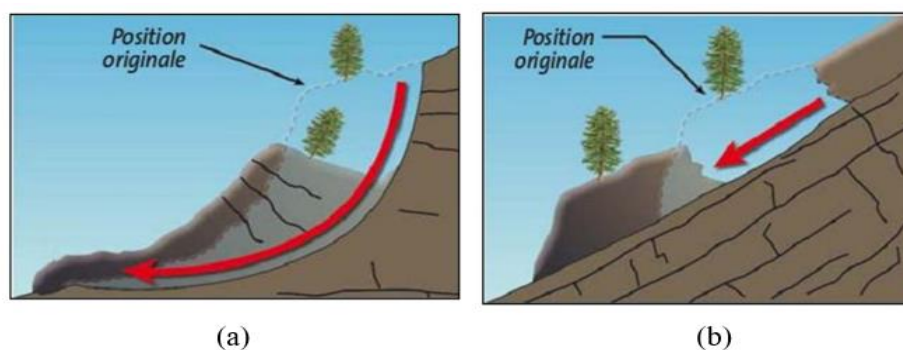


Figure.I.20. Types des glissements : (a) : Glissement circulaire. (b) : Glissement plan [Harkati.M.2019]

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ARGILES

I.13.2.2. Classification du glissement de terrain

Les glissements de terrain peuvent être classés en fonction de la profondeur de leur surface de glissement et de la vitesse moyenne du mouvement (Tableau.I.5,6.).

Tableau.I.5. Classification selon la profondeur de la surface de glissement [Chiheb.M.2018]

Glissement	Surface du glissement
Superficiel	0 – 2
Semi-profond	2 – 10
Profond	10 – 30
Très profond	>30

Tableau.I.6. Classification de glissement de terrain selon l'activité [Chiheb.M,2018]

Glissement	Vitesse du glissement
Sub-stabilité, très lent	0 – 2 cm/an
Peu active, lent	2 – 10 cm/an
Active (ou lent avec une phase rapide)	> 10 cm/an

I.13.3. Phénomène de tassement

Les sols argileux peuvent se modifier en fonction des variations d'eau du terrain. Lors des périodes de sécheresse, le manque d'eau entraîne un tassement irrégulier du sol en surface. Il s'agit de la diminution de volume de certains sols très compressibles tels que les argiles) sous l'effet de charges appliquées et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par sur exploitation. [Alonso.E et al.1987]

Les tassements peuvent être uniformes ou différents d'un point à l'autre selon la nature du sol en place. (Figure.I.21.)

- **Le tassement uniforme :** les tassements uniformément repartis affectent peu la structure les mouvements qui en résultent peuvent cependant endommager les services et accessoires tels les conduites d'eau et les passages souterrains.
- **Le tassement différentiel :** c'est le mouvement de descente inégal du sol. Par conséquent, cela peut entraîner un désalignement de la maçonnerie, comme des fissures. Il s'agit d'une cause grave de désordre et, dans la plupart des cas, irrémédiable.

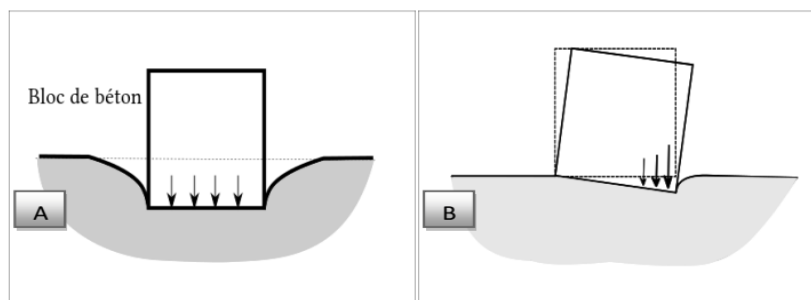


Figure.I.21. (A) : Tassement uniforme, (B) : Tassement différentiel [Yamoun.M.2021]

I.13.4. Phénomène de dégradation des sols

La dégradation du sol se réfère à la détérioration de la qualité du sol, souvent causée par des activités humaines telles que l'agriculture intensive, la déforestation, l'urbanisation non durable ou la surexploitation des ressources naturelles. Cela peut entraîner une diminution de la fertilité du sol, une perte de biodiversité et des problèmes environnementaux plus vastes.

I.13.4.1. Types de dégradation

a. Dégradation physique

Elle entraîne une dégradation des propriétés physiques du sol comme l'aptitude à la pénétration racinaire, la perméabilité et l'aération. La formation des croûtes empêche l'infiltration de l'eau et accélère l'écoulement superficiel. La germination et la levée sont rendues plus difficiles. Les faibles indices d'infiltration diminuent la capacité de rétention d'eau et favorisent ainsi l'apparition de situations de stress hydrique. [Tidjani.2004]

b. Dégradation biologique

Il est certain que la pédofaune constitue un indicateur important de la fertilité du sol. Les organismes du sol dépendent eux-mêmes d'une bonne structure du sol. La majorité des formes de préparation du sol influence de manière significative la quantité et la décomposition de la pédofaune.

c. Dégradation chimique

Une série de processus pédologiques et chimiques entraînent une réduction de la productivité des sols. La réduction des réserves de nutriments des plantes est particulièrement préoccupante du point de vue d'une utilisation agricole durable des sols. Cela signifie que grâce à la restauration de la minéralisation, la teneur en éléments nutritifs du sol diminuera rapidement. La salinisation entraîne moins d'eau disponible pour les plantes. Cela peut également avoir un effet toxique sur les cultures, provoquant une augmentation de l'alcalinité du sol, modifiant dans certains cas la structure et réduisant la capacité d'infiltration. Le manque de matière organique signifie que la capacité du sol à retenir les nutriments devient trop faible et que le lessivage augmente considérablement. Par conséquent, des valeurs très faibles de capacité potentielle d'échange cationique sont plus préjudiciables que des carences en nutriments spécifiques.

I.13.5. Phénomène d'Effondrement

Le phénomène d'effondrement indique une réduction considérable du volume due à une augmentation du degré de saturation du sol partiellement saturé, avec ou sans chargement supplémentaire.

Ce phénomène est généralement connu comme étant un phénomène typique des sols non saturés qui intervient par infiltration d'eau dans un sol compact sous contrainte et permet de générer un accroissement de la densité du sol par effondrement de sa structure et aussi caractériser les loëss c'est-à-dire les sols naturels non saturés (Figure.I.22,23.).

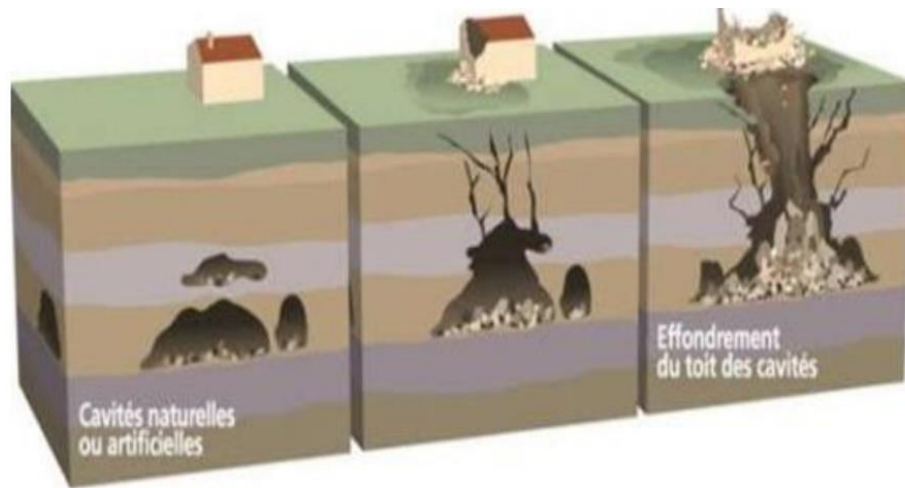


Figure.I.22. Phénomène d'Effondrement [Djebari.Z.2022]

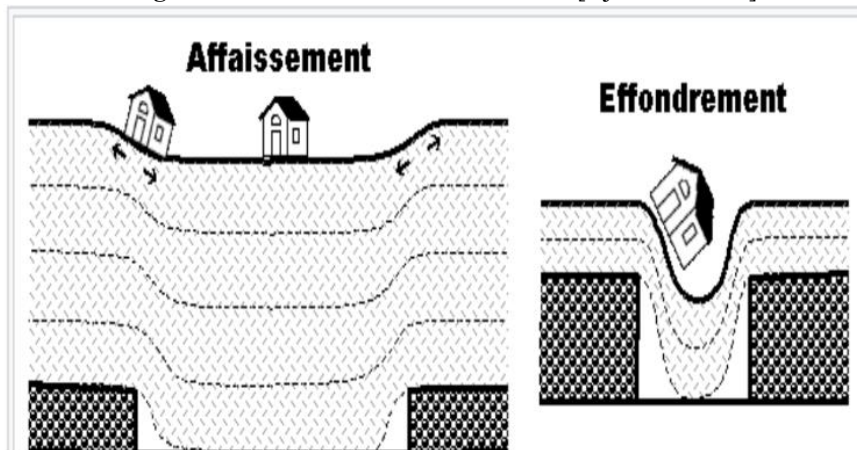


Figure.I.23. Schéma expliquant la différence entre affaissement minier et effondrement [Djebari.Z.2022]

I.14. Conclusion

Les matériaux argileux sont souvent des combinaisons naturelles complexes de minéraux avec une taille des grains, des propriétés physiques et des propriétés mécaniques très variable. Certains ouvrages de génie civil nécessitant une portance élevée et une stabilité à long terme ne bénéficient pas de la faible capacité portante des sols fins et des argiles en particulier, en plus des problèmes qu'ils engendrent tels que le gonflement, glissement et le tassement. Ces problèmes peuvent être résolus par des solutions existant, telles que :

- ❖ Le remplacement du sol par un matériau adéquat ;
- ❖ Le changement du site de l'ouvrage ;
- ❖ L'amélioration de la qualité du sol par le traitement.

Dans le chapitre suivant sont représentées les différentes techniques du traitement des argiles

CHAPITRE II :

TRAITEMENTS DES SOLS

CHAPITRE II : TRAITEMENTS DES SOLS

II.1. Introduction

Les méthodes de traitement des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20ème siècle. Le traitement des sols est souvent opéré pour augmenter leur résistance, pour réduire ou augmenter leur perméabilité ainsi que pour diminuer leur compressibilité. Il est aussi utilisé pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau.

Le traitement de sol est une technique économique qui permet de rendre apte à l'usage des matériaux qui ne l'étaient pas. La technique s'inscrit ainsi dans la démarche environnementale du Développement Durable en préservant les ressources naturelles des produits de carrières, et en valorisant les matériaux du site par leur réutilisation. Pas de transport de matériaux. Ces méthodes de traitement ont connu, depuis une vingtaine d'années, un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets.

Concernant ce traitement on peut spécifier [Zur.A et al .1973] :

II.1.1. Amélioration des Sols

Elle est appliquée aux sols ayant une grande plasticité (limon, argile), afin d'améliorer leurs caractéristiques géotechniques : facilité de mise en œuvre et de compactage, portance et résistance au poinçonnement. Ceci se traduit par une meilleure praticabilité pour le trafic de chantier.

II.1.2. Stabilisation des Sols

Elle a pour objectif la réalisation des couches de fondations de qualité dont les caractéristiques mécaniques ont été considérablement rehaussées, ce qui donne une plus grande portance et une meilleure distribution des charges. En outre, ces couches acquièrent ainsi une meilleure résistance à l'érosion et au gel, augmentant dès lors sensiblement leur durabilité.

II.2. Objectifs du traitement

- ❖ Possibilité d'éviter le décapage des sols existants et leur substitution par des sols d'apport.
- ❖ L'amélioration des caractéristiques géotechniques de façon durable.
- ❖ Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre les particules.
- ❖ Possibilités de préserver l'écosystème et de ne plus avoir besoin de parcourir de nouveaux gisements naturels.
- ❖ Limiter la sensibilité des sols aux variations hygrométrique saisonnières. La réalisation de ces objectifs est incontestablement dépendante de la technique de traitement adoptée et des procédures de sa mise en œuvre pour atteindre le niveau de performance recherché. [Senadla.S et al.2021]

II.3. Type de traitement de sol

Les différents types de traitement sont présentés dans la (Figure.II.1.).

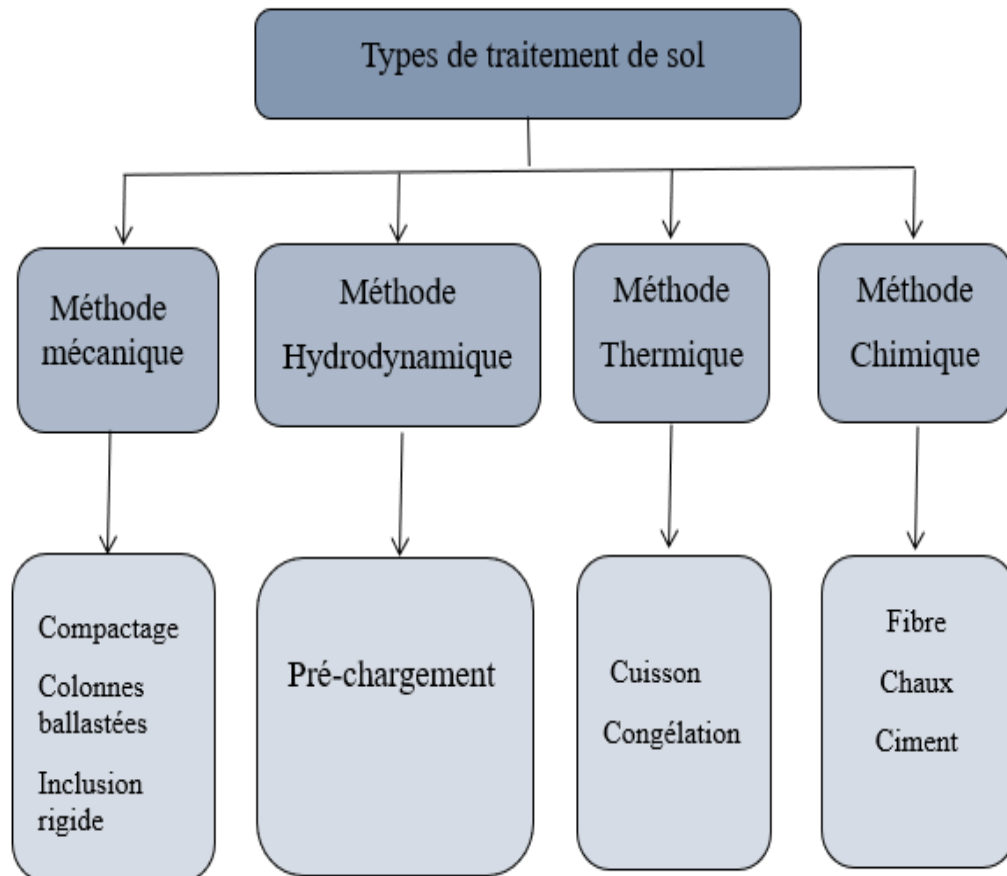


Figure.II.1. Type de traitement de sol

II.3.1. Traitement mécanique

II.3.1.1. Compactage

Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques qui conduisent à accroître la densité en place d'un sol. Cette action augmente la capacité du sol, resserre la texture du matériau réduit les possibilités de déformation du terrain et améliore sa capacité portante. [Hafsi.A.1998]

La densification du sol peut conduire à :

- ✓ Modification de la granulométrie ;
- ✓ Modification de la teneur en eau ;
- ✓ Réduction ou élimination des risques de tassement ;
- ✓ Augmentation de la résistance du sol et la stabilité du talus ;
- ✓ Amélioration de la capacité portante ;
- ✓ Limitation des variations de volume causées par gel, gonflement et retrait.

Il y a trois types de compactage :

- Compactage Dynamique ;
- Compactage de surface ;
- Vibro-Compactage.

CHAPITRE II : TRAITEMENTS DES SOLS

a. Compactage dynamique

Cette technique a été pratiquée en premier lieu par L.Ménard au début des années 70 Gambin et Col (1981), elle est recommandée pour stabiliser et densifier les sols pulvérulents situés aussi bien hors nappe que sous nappe phréatique ainsi que pour la densification des sols affaissables à structure macroporeuse (loess en ex URSS).

Le tassement profond dynamique est une technique au sol importante d'amélioration, capable de rendre une large variété de sols faibles compactés par l'augmentation de la capacité portante, la réduction des tassements et du potentiel de liquéfaction. L'amélioration a pour conséquence la portance accrue. De cette façon des conditions de sol sur beaucoup d'emplacements marginaux peuvent être améliorées au point où des bases peu profondes peuvent être employées sans recours à l'excavation ou à l'empilage profond. Tandis que le Principe du tassement profond dynamique est depuis l'antiquité considérable, c'est seulement ces 15 dernières années que la technique a été sérieusement appliquée à grande échelle à la solution des problèmes pour l'amélioration au sol (Figure.II.2).

Avec le compactage dynamique, la terre est soumise au damage extérieur répété employant un acier lourd et un poids concret. Typiquement le bourreur pèse entre 5 et 20 tonnes, chutant dans l'automne libre des tailles jusqu'à 25 mètres, pour Bergado et Col (1996) jusqu'à 40 mètres. Le bourreur est lâché un nombre d'ensemble de fois sur un modèle de grille au-dessus de l'emplacement de former un passage. Deux à cinq passes au-dessus d'un emplacement, dépendant du type de sol et la condition, peut être exigée.[Ghazal.R.2016]



Figure.II.2. Compactage dynamique profond. [Oudni.S.2018]

b. Compactage de surface

Le compactage de surface est un procédé de densification des sols en place [Lawton.2004]. Ce procédé menée à une diminution des vides du sol par des moyens mécaniques aboutissant ainsi à une augmentation de la densité et de la résistance ainsi qu'une réduction de la compressibilité. L'application des charges sur le sol à compacter par le biais de certains rouleaux de compactage statiques ou vibratoires induisent une densification dans le sol qui sera proportionnelle à l'énergie

CHAPITRE II : TRAITEMENTS DES SOLS

mécanique appliquée. Le compactage de surface peut être accompli sur différents types de site (Figure.II.3.).



Figure.II.3. Compactage de surface cas d'un projet de chemin de fer [Tiaret.Algerie.2017]

c. Vibro compactage

A Fin des années trente, le vibro-compactage est mis au point. Il permet de compacter localement ou en masse des sols à faible cohésion (sable, graviers, cailloux), qu'ils soient déjà présents ou qu'ils aient été remblayés au-dessus ou en dessous de la nappe phréatique (Figure.II.4.). On peut utiliser cette méthode à des profondeurs dépassant 50 mètres. L'objectif est de renforcer la densité des sols pulvérulents sablo-graveleux en utilisant des vibrations. Ces mouvements, produits par un instrument, se répandent d'un grain à l'autre et conduisent à une réorganisation optimale du volume initialement occupé. En réduisant la porosité du matériau, il est possible d'améliorer considérablement sa résistance au poids. On appelle cette technique la vibrocompaction. ou vibroflotation, est utilisée principalement dans les sols granulaires, notamment les sables propres et les sables limoneux contenant moins de 20 % de fines. Grâce à l'application de vibrations, un phénomène localisé de liquéfaction se produit en raison de l'augmentation des pressions interstitielles, provoquant la liquéfaction des particules du sol. En conséquence, les particules se repositionnent dans un état plus compact et plus dense.



Figure.II.4. Vibro compactage. [Menard France]

CHAPITRE II : TRAITEMENTS DES SOLS

II.3.1.2. Colonnes ballastées

Les colonnes ballastées sont des colonnes composées de matériaux granulaires sans cohésion, qui sont injectés dans le sol à l'aide d'une aiguille vibrante (Figure II.5.). Elles sont principalement utilisées dans les sols fins (comme l'argile, le limon et le sable fin) qui présentent une cohésion C_u supérieure à 20 kPa. Elles sont installées par refoulement dans le sol et compactées par passes successives. En particulier, aucun liant n'est présent à la hauteur de ces colonnes. Les quadrillages peuvent être réguliers ou variables, en rangées, en groupes ou même isolés. Leur évaluation tient compte du type de construction, de la nature des charges, des tassements absolus et différentiels, ainsi que de la nature du sol à traiter.

L'objectif de toute installation de colonnes ballastées est de donner au sol de nouvelles caractéristiques mécaniques sous l'ouvrage à construire, de manière à ce que les différents éléments d'infrastructure de celui-ci (semelles isolées ou filantes, radier, dallages, ouvrage en terre...) aient un comportement prévisible, justifiable et conforme aux règlements et tolérances appliqués à la structure de l'ouvrage et à son utilisation (Figure.II.6.).

Le traitement d'un sol par colonnes ballastées conjugue les actions suivantes :

- Augmenter la capacité portante du sol ;
- Diminuer les tassements totaux et différentiels ;
- Diminuer le temps de consolidation par création d'éléments drainant ;
- Diminuer les risques induits par les phénomènes de liquéfaction lors des séismes.

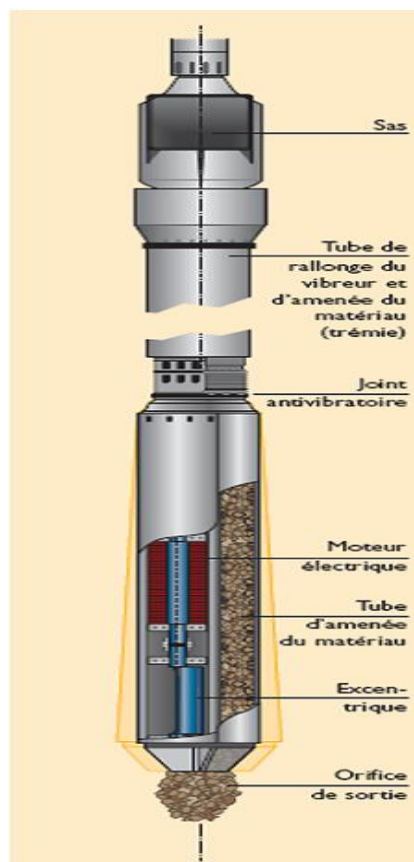


Figure.II.5. Aiguille vibrante [Krummenacher.A.2006]

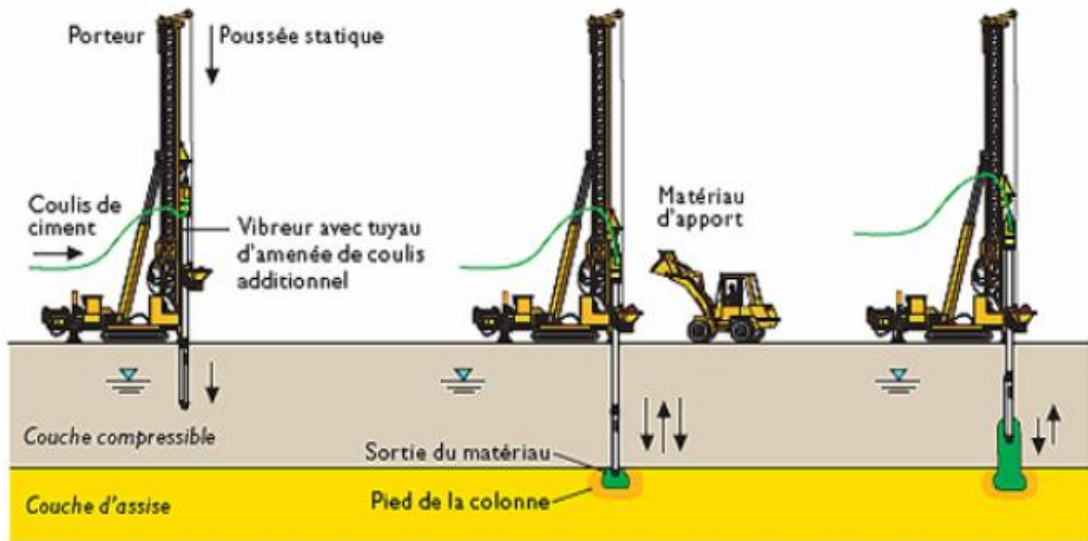


Figure.II.6. Méthode de réalisation des colonnes ballastées. [Krummenacher.A.2006]

II.3.1.3. Inclusion rigide

Les inclusions rigides sont une méthode de renforcement de sol très efficace en termes de réduction de tassement. Cette méthode consiste en la mise en place d'une maille régulière d'éléments verticaux de forte rigidité (dans la plupart des cas des éléments circulaires en béton ou mortier). Après renforcement du sol, l'ouvrage à construire est fondé de manière superficielle (prévoir néanmoins un raidissement des semelles en l'absence de matelas) et les travaux de génie civil peuvent commencer sans délai d'attente. La compressibilité initiale du sol et le tassement objectif admissible sont les données d'entrée de la conception qui permet de déterminer la densité du renforcement de sol (Figure.II.7,8.).

Les inclusions rigides peuvent être utilisées dans tous les secteurs de la construction. Elles sont utilisées sous les semelles, radiers, dallages et remblais avec ou sans matelas. L'espacement, la profondeur et le diamètre des inclusions rigides seront définis pour obtenir le résultat de tassement objectif. [Keller- France]

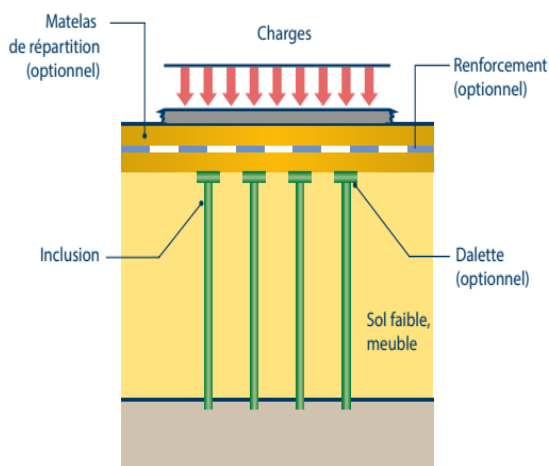


Figure.II.7. Différents composants de fondations complètes sur des inclusions rigides [Keller- France]

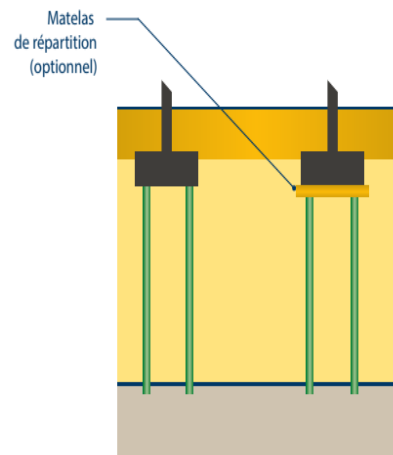


Figure.II.8. Semelle avec/sans matelas de répartition

CHAPITRE II : TRAITEMENTS DES SOLS

Le traitement d'un sol inclusions rigides conjugue les actions suivantes (Figure.II.9.) :

- Méthode reconnue pour réduire les tassements et augmenter la capacité portante des sols très compressibles, même pour les charges élevées ;
- Peut être utilisée avec ou sans matelas de répartition ;
- Quasiment pas de déblais ;
- Peut être utilisée dans tous les domaines de la construction et dans la majorité des types de sols ;
- Permet de commencer les travaux de construction rapidement.

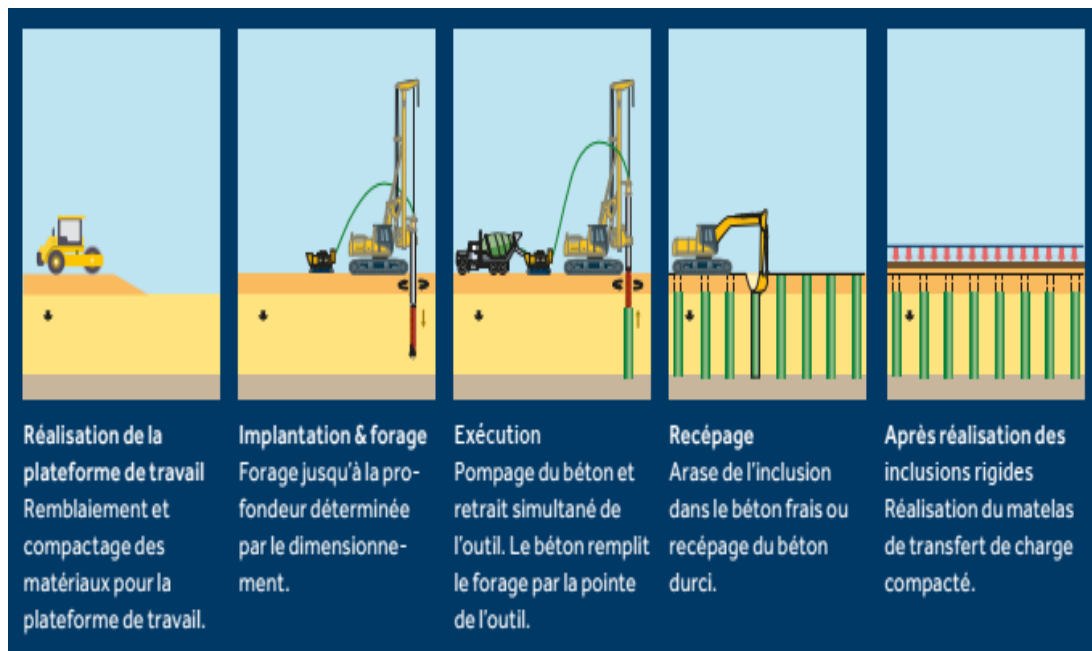


Figure.II.9. Principe de réalisation des inclusions rigides [Keller- France].

II.3.1.4. Tirants d'ancrages

Le principe de ce traitement est de diminuer les forces actives du glissement et d'augmenter les contraintes normales réelles sur la surface de rupture du glissement (Figure.II.10.). Afin d'accomplir cela, des tirants composés de câbles d'acier multi torons sont fixés dans le terrain stable situé sous la surface de rupture, puis un effort de traction est appliqué en tête. Il est possible de répartir cet effort sur la surface du terrain en utilisant des plaques ou de petits massifs en béton armé. Les tirants sont souvent associés à un mur ou à des longrines.

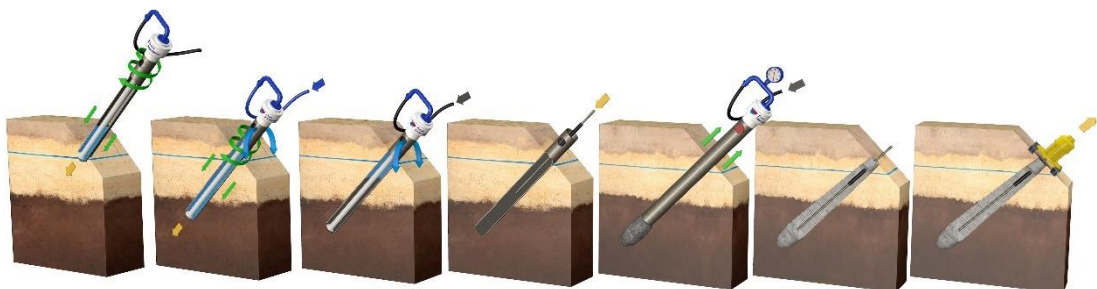


Figure.II.10. Principe de réalisation des tirants d'ancrages [Guefaïfia.L et al.2020]

CHAPITRE II : TRAITEMENTS DES SOLS

II.3.1.5. Terre armée

La terre armée est formée en combinant un sol pulvérulent de type sable avec des lits d'armatures métalliques. Cette combinaison entraîne une traction due au frottement entre le sol et les armatures, ce qui permet de créer un massif mécaniquement plus efficace (Figure.II.11.). Ce type de massif est équipé d'un parement en béton modulaire dont l'élément de base est connu sous le nom d'écaille. Les écailles sont connectées aux supports qui sont composés de lanières métalliques. La terre armée, en raison de ses caractéristiques techniques et économiques, ainsi que de sa simplicité d'utilisation, est un matériau qui se positionne naturellement dans les domaines de la géotechnique.

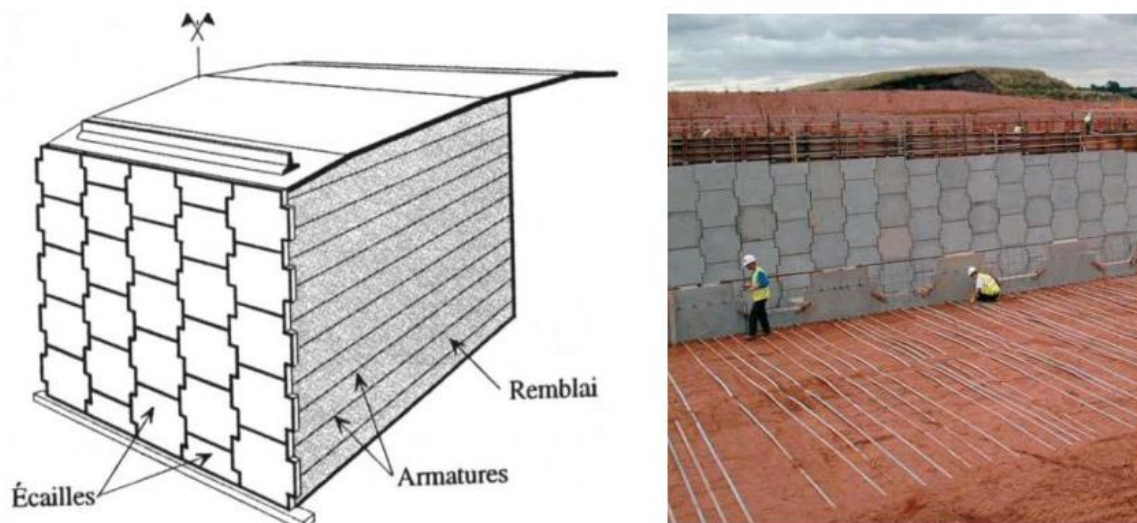


Figure.II.11. Principe de réalisation de terre armée. [Lamia.G.Hiba.B.2020]

II.3.1.6. Le clouage du sol

C'est une technique de renforcement des sols in situ, en y installant dans le terrain à l'aide des inclusions (appelées aussi clous ou armatures), rigides et passives, éléments linéaires travaillant à la traction et au cisaillement, qui ont pour effet de limiter les déformations du sol. Ces éléments (barres, cornières, tubes, etc.) peuvent être soit mis en place par fonçage ou battage, soit mis en place dans des forages et scellés par un coulis.

Lorsque cette technique est utilisée pour des ouvrages de soutènement, les barres sont généralement horizontales et l'effort principal est la traction. Au contraire, quand cette technique est utilisée pour la stabilisation des pentes, les barres sont généralement verticales et les efforts principaux sont la flexion et le cisaillement.

Dans un massif renforcé, on qualifie d'active la zone qui se déforme et de résistante, la partie rigide. Les mouvements du sol peuvent être très faibles ou étendus, la zone active peut rester stable ou, au contraire, s'effondrer suivant la nature et la qualité du renforcement. Les clous augmentent la cohésion du sol, ainsi que sa résistance à la traction et au cisaillement, et sont mis en place (par frottement) dans la zone résistante.

La surface qui sépare les deux parties est la surface de rupture potentielle. Le lieu géométrique des points de traction maximale T_{max} permet de séparer le massif soutenu en deux zones (Figure.II.12.). [Guefaïfia.L et al.2020]



Figure.II.12. Le clouage de sol [Mohamed.H.2011]

II.3.2. Traitement hydrodynamique

II.3.2.1 Pré-chargement

Le pré-chargement est une technique couramment utilisée pour améliorer les sols compressibles. Il s'agit de surcharger le terrain pour qu'il se tasse progressivement. Le processus de pré-chargement des sols suit les mêmes principes que pour les sols fins ou grenus (Figure.II.13.). Le pré-chargement (généralement effectué par un remblai) est la méthode la plus simple pour améliorer la résistance au cisaillement à court terme lorsqu'il s'agit de construire sur un sol saturé à faible portance et (ou) relativement compressible. Lorsqu'il s'agit de construire des remblais de grande hauteur (>6m) sur une argile molle très compressible, il est nécessaire de procéder à un pré-chargement par étapes afin d'éviter la rupture par poinçonnement du sol.

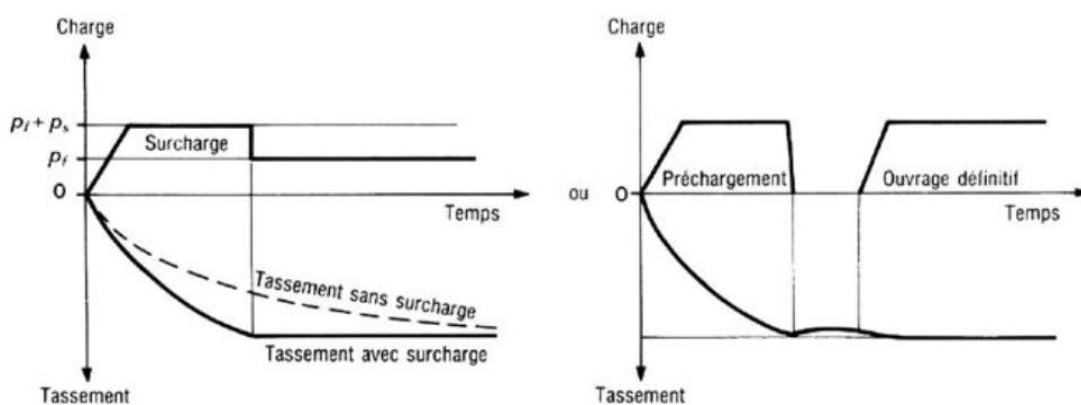


Figure.II.13. Traitement par pré-chargement [Bell.1993]

CHAPITRE II : TRAITEMENTS DES SOLS

II.3.3. Traitement thermique

II.3.3.1. Cuisson

Destinée aux ouvrages importants, d'après le guide technique LCPC/SETR (2000), cette méthode de traitement a été procurée pour la première fois par Ostasheven 1934. Consiste à soumettre le sol à un réchauffement contrôlé, on injecte dans le sol pendant plusieurs jours de l'air ou du gaz chauffé entre 200 et 800C°, ce qui fait fondre le squelette du sol et les contacts entre les particules sont soudés.

Le sol devient presque insensible aux phénomènes de gonflement et de retrait. Cependant le coût du transport et de mise en place des unités mobiles de traitement peut être très lourd et n'est rentable, en terme strictement financier, que lorsque les quantités de sol à traiter sont importantes. [Ghazal.R.2016]

II.3.3.2. Congélation

Cette technique consiste à congeler temporairement les sols aquifères afin de les stabiliser et permettre l'excavation de puits profonds. La congélation de l'eau présente dans les pores du sol crée un matériau aux propriétés améliorées, tant que la congélation est maintenue. Ce procédé rend également le sol imperméable, facilitant ainsi les travaux de terrassement ou de construction sous la nappe phréatique. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé. Elle rend le sol étanche et résistant (Figure.II.14.).



Figure.II.14. Congélation du sol. [Majdi.A.2017]

II.3.4 Traitement chimique

La stabilisation chimique est une technique intéressante pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des argiles. Aujourd'hui, une variété de produits et de technologies sont devenus une pratique courante dans les projets de génie civil à grande échelle à travers le monde.

II.3.4.1. Traitement par l'ajout de fibre

Les fibres de renfort confèrent aux composites leurs caractéristiques mécaniques comme la rigidité, la résistance à la rupture et la dureté. Elles peuvent améliorer aussi certaines de leurs propriétés physiques telles que le comportement thermique, la résistance à l'abrasion. Les qualités recherchées des fibres sont leurs caractéristiques mécaniques élevées, leur masse volumique faible, la facilité de leur mise en œuvre et leur faible coût.

Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle ou artificielle), leur forme (droite, ondulée, aiguille), leur dimension (macro ou microfibrilles) et leurs propriétés mécaniques. [Mohammed.R.2017]

A. Type de fibres

On retrouve sur le marché plusieurs types de fibres (Figure.II.15.), elles peuvent être classées par familles, un choix approprié du type de fibre à utiliser est essentiel. Chaque type de fibre possède des caractéristiques particulières qui les rendent apte à servir à une utilisation plutôt qu'à une autre. Ainsi l'adoption d'une fibre influencera les facteurs suivants :

- Densité,
- Résistance tension et en compression,
- Résistance aux impacts et à la fatigue,
- Module d'élasticité,
- Conductivités thermique et électrique,
- Stabilité dimensionnelle,
- Résistance aux conditions environnementales. [Ben younes.F et al.2021]

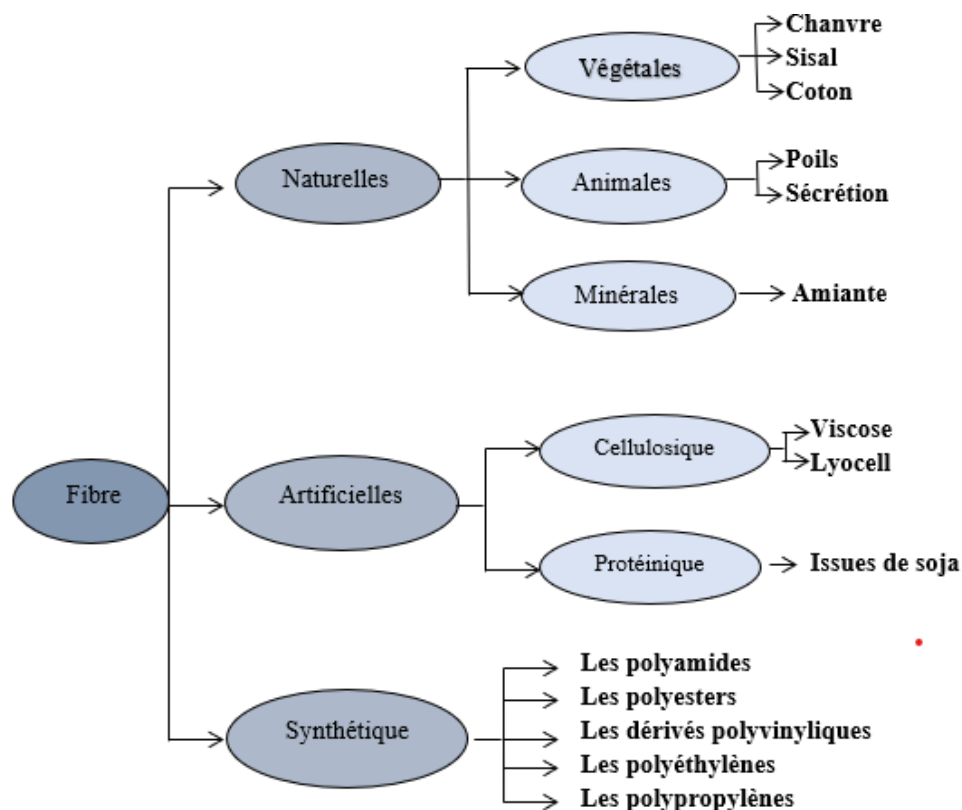


Figure.II.15. Classification des fibres

CHAPITRE II : TRAITEMENTS DES SOLS

-Les fibres naturelles

En général, on classifie les fibres naturelles en fonction de leur origine : animale, végétale et minérale. Les fibres végétales sont principalement composées de cellulose et ont des caractéristiques mécaniques plus élevées que celles d'origine animale. La laine et la soie, par exemple, sont couramment employées dans le secteur du textile. Les fibres provenant des plantes peuvent être divisées en sous-familles en fonction de leur origine ; Fruits, graines, écorce, feuilles, bois, tiges ou canne.

-Les fibres végétales

Les fibres végétales : elles se subdivisent elles-mêmes selon leur provenance. On peut donc citer les fibres libériennes qui sont extraites de tiges de plantes (chanvre, lin, ramie, jute), les fibres dures qui sont extraites de feuilles, de troncs ou d'écorces de fruits (sisal, chanvre de manille, noix de coco), et les fibres qui proviennent des poils séminaux de graines (coton, kapok).

-Les fibres animales

La fibre la plus importante et la plus utilisée est la fibre de laine connue pour ses qualités de bon isolant thermique, son pouvoir absorbant élevé (16-18%) et son élasticité importante (45%). Les fibres animales sont classées selon leur provenance, on note essentiellement :

- Poils : la laine (obtenue par la tonte de moutons), alpaga, angora, chameau, cachemire, ...
- Sécrétions : soie (Bombyx Mori), soie sauvage, fils d'araignée ;

-Les fibres minérales

L'amiante est la seule fibre minérale naturelle. Elle a attiré l'attention des industriels pour sa résistance à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques et pour son pouvoir absorbant. Elle a été utilisée dans diverses installations industrielles et même en construction avant de l'interdire progressivement à cause des risques cancérogènes qu'elle présente. [Ferhat.I.2020]

-Les fibres artificielles

Les fibres textiles artificielles sont fabriquées à partir de matières existantes dans la nature qui sont transformées chimiquement afin d'obtenir une "pâte" filable au travers d'une filière. Dans l'habillement, les fibres artificielles sont principalement d'origine cellulosique (viscose, lyocell, modal, cupro...) et parfois d'origine protéinique (issues du soja, de la caséine de lait...). [Karine, S.2019]

-Les fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont fabriquées avec des polymères de synthèse obtenus à partir de substances ou de composés fournis par l'industrie pétrochimique. Elles ont fait leurs apparitions au début de 20ème siècle, après la réussite de la fibre de Viscose, depuis lors, un grand nombre de fibres synthétiques ont été mises au point, elles possèdent chacune des propriétés qui répondent à un type particulier d'application. Ces fibres, tout comme les fibres artificielles, sont obtenues par filage. Elles suscitent l'intérêt de beaucoup d'industriels pour leur faible coût, leur disponibilité et leur indépendance des saisons et surtout la possibilité de les adapter et modifier leurs propriétés, par contre, elles sont très critiquées quant à leur comportement vis-à-vis de l'environnement que ce soit pendant le processus de fabrication ou après leur utilisation et les difficultés de leur recyclage.

CHAPITRE II : TRAITEMENTS DES SOLS

Les principales catégories de fibres synthétiques commercialisées sont :

- Les polyamides (Nylons) ;
 - Les polyester ;
 - Les dérivés polyvinyliques ;
 - Les polyoléfines : les polyéthylènes et les polypropylènes : sont d'une importance croissante et leur production s'élève maintenant à environ 8% de toutes les fibres synthétiques. [Taalah, B.2014]
- D'après l'étude de [Rachida.B et al.2021] sur une argile de la wilaya de M'sila traité par une fibre de polypropylène, les pourcentages utilisés sont (0.3%,0.6%,0.9% et 1.2%).

L'introduction des fibres de polypropylènes améliore considérablement la résistance au cisaillement, en effet la cohésion augmente d'une façon très remarquable de 140, 31 à 276,53 kPa lorsque les fibres PP sont ajoutées avec une teneur de 1,2% ce qui représente une augmentation de l'ordre de 97,08%. Il est aussi clair que l'angle de frottement de l'argile augmente par l'inclusion des fibres. L'angle de frottement change de 16,38 à 29,21 pour le taux d'incorporation (1,2%) ce qui donne une augmentation de l'ordre de 78,3% (Figure.II.16,17).

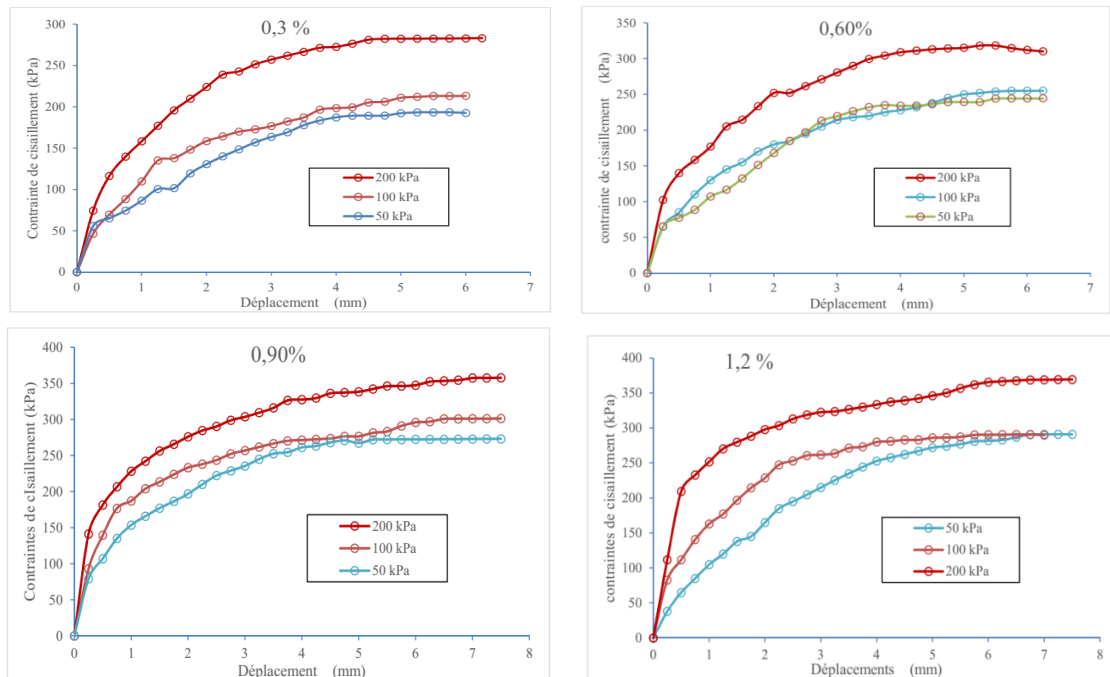


Figure.II.16. Effet des fibres sur la contrainte de cisaillement [Rachida.B et al.2021]

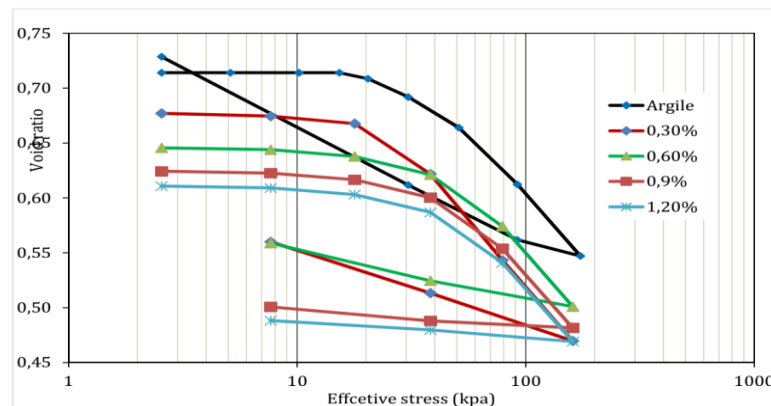


Figure.II.17. Courbes oedométriques typiques _ effet de fibres [Rachida.B et al.2021]

CHAPITRE II : TRAITEMENTS DES SOLS

L'augmentation du pourcentage de fibres dans l'argile réduit significativement son aspect déformable et en conséquence diminue son caractère gonflant ce qui est avantageux pour les ouvrages géotechniques (Tableau.II.1.).

Tableau.II.1. Effet des fibres pp sur les indices de compression et de gonflement

FIBRE%	Cc	Cg
Sol Naturel	0.234	0.1072
Argile +0.3% de fibres PP	0.207	0,069
Argile +0.6% de fibres PP	0.193	0.037
Argile +0.9% de fibres PP	0.1904	0.0102
Argile +1.2% de fibres PP	0.1869	0.0169

II.3.4.2. Utilisation de la chaux

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de la chaux pour stabiliser les argiles a connu beaucoup de succès. En effet, plusieurs études ont démontré que les propriétés mécaniques d'un sol traité à la chaux peuvent être modifiées de façon permanente. Dans certains cas par exemple, un sol stabilisé à la chaux fournit une performance structurelle équivalente à celle d'une fondation en gravier naturel ou en concassé (Figure.II.18.). [Bell.1978]

Généralement, la chaux vive est plus efficace que la chaux hydratée pour l'amélioration des sols. La chaux est plus efficace aux sols argileux que les sols granulaires. Par conséquent, les sols présentant des indices de plasticité au-delà de 10 sont les plus ciblés par ce procédé.



Figure.II.18. Chantier de traitement du sol a la chaux. [Ben younes.F et al.2021]

- D'après l'étude de [Lamia.G et al.2020] sur un marne argileux de la wilaya de Guelma traité par un mélange de (la chaux + et le laitier de haut fourneau granulé) et (la chaux + la poudre de

CHAPITRE II : TRAITEMENTS DES SOLS

verre), les pourcentages utilisés de ces matériaux dans le traitement sont :5% et 10% (Figure.II.19-23.).

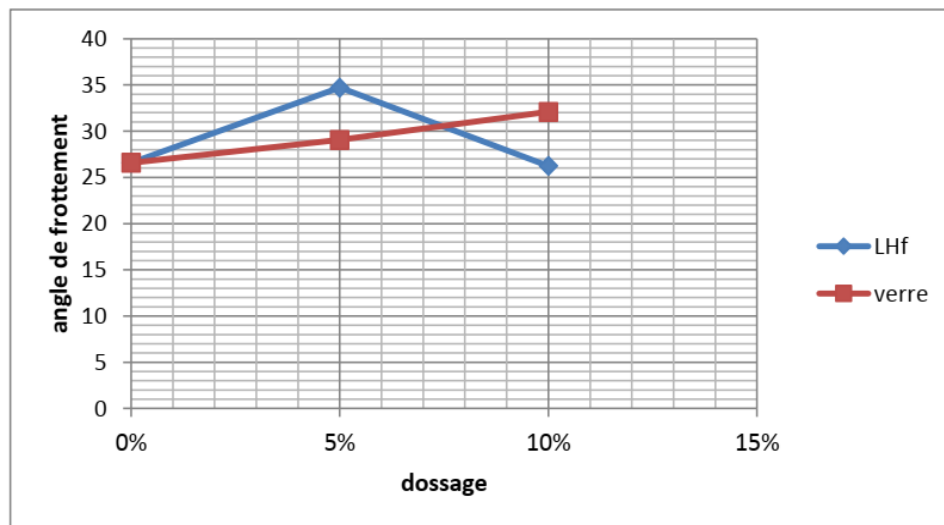


Figure.II.19. Effet des ajouts sur l'angle de frottement [Lamia.G et al.2020]

Pour le traitement verre+chaux, l'angle de frottement suit une tendance croissante en fonction de l'augmentation du dosage. En revanche, il y a une augmentation à 5% puis une diminution à 10% de ϕ pour le traitement LHF+chaux. Cela peut être expliqué par l'effet inverse du surdosage en laitier de haut fourneau (LHF) sur la prise et le durcissement du mélange avec le sol.

En comparant les deux types de traitement (verre et LHF), on voit que le traitement LHF+chaux à 5% de dosage a donné la valeur maximale de 34,7°. Cette valeur dépasse la valeur obtenue pour le traitement verre+chaux d'environ 19%. Cet écart est inversé à 10% au profit du traitement verre+chaux pour atteindre la valeur d'environ 22,5%.

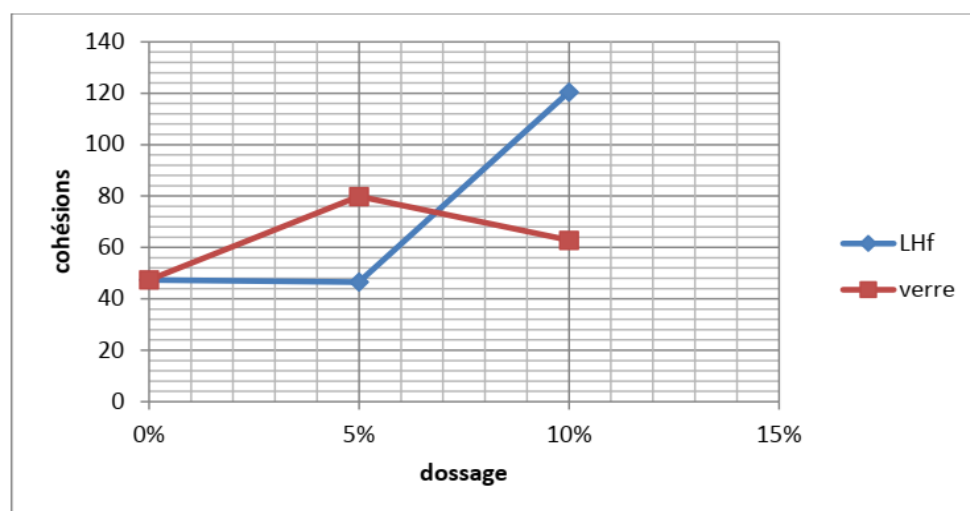


Figure.II.20. Effet des ajouts sur la cohésion [Lamia.G et al.2020]

Pour le mélange verre+chaux, la cohésion augmente jusqu'à la valeur maximale 79,8kPa pour le dosage 5% puis elle diminue jusqu'à la valeur de 62,8kPa pour le dosage 10%.

Par contre pour le mélange LHF+chaux, la cohésion reste quasi-stable à 5% puis elle augmente jusqu'à la valeur maximale de 120,5kPa pour le dosage 10%. L'augmentation est due, à priori, à la

CHAPITRE II : TRAITEMENTS DES SOLS

réaction pouzzolanique du laitier qui a été activé avec la chaux ce qui augmente la liaison entre les particules de sol et augmenter en conséquence sa cohésion.

A partir de la figure précédent, la comparaison entre les deux produits de traitement pour de dosage de 5% montre qu'il y a un écart important de **71.6 %** entre la cohésion obtenue par traitement au LHF comparativement à celle obtenue par traitement à la poudre de verre.

D'autre part et pour le dosage de 10%, l'activation du laitier avec la chaux a donné des valeurs plus élevées qu'avec l'addition du verre activé par la chaux. On remarque qu'il y'a un écart de **92%** entre le verre et le laitier donc l'amélioration par le LHF est mieux pour ce dosage.

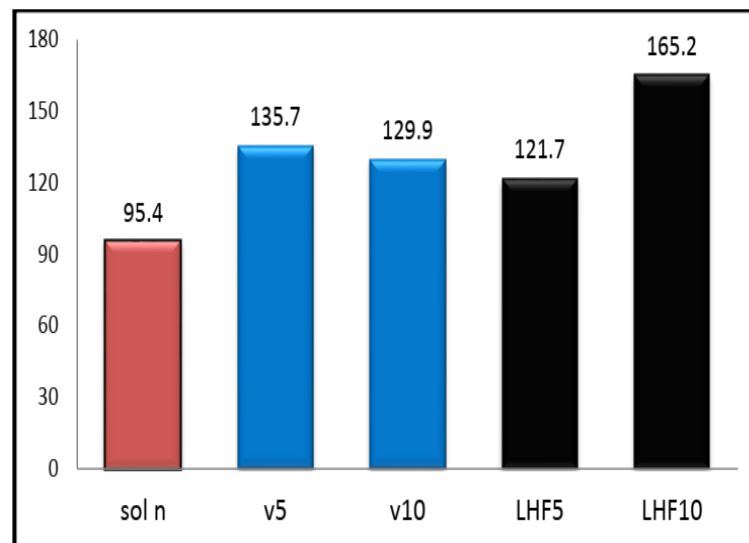


Figure.II.21. Résistances au cisaillement maximales avant et après traitement ($\sigma=100$) [Lamia.G et al.2020]

Pour une contrainte normale ($\sigma=100$ kPa), il y a un écart d'environ **11%** entre le verre et le laitier dans la résistance au cisaillement pour le dosage **5%** pour lequel l'ajout de laitier présente des valeurs plus faibles par rapport au verre. Par contre pour le dosage **10%**, on constate que les valeurs du laitier sont plus élevées par rapport au verre avec un écart d'environ **27%**.

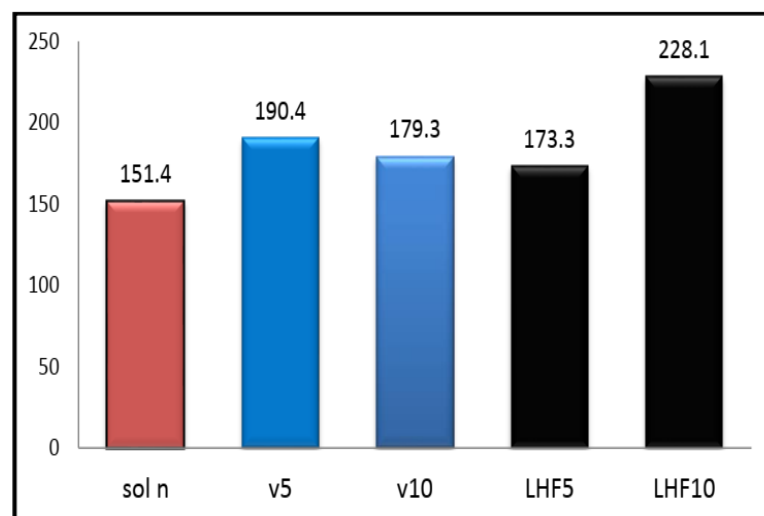


Figure.II.22. Résistances au cisaillement maximales avant et après traitement ($\sigma=200$) [Lamia.G et al.2020]

CHAPITRE II : TRAITEMENTS DES SOLS

Pour la contrainte normale ($\sigma=200$ kPa) et pour dosage de 5%, on a noté que la valeur de la résistance au cisaillement de verre est plus élevée par rapport à celle du laitier où l'écart est d'environ 10% entre les deux produits. Pour le dosage de 10%, les résultats montrent que l'amélioration due à l'ajout de LHF est meilleure avec un écart d'environ 27%.

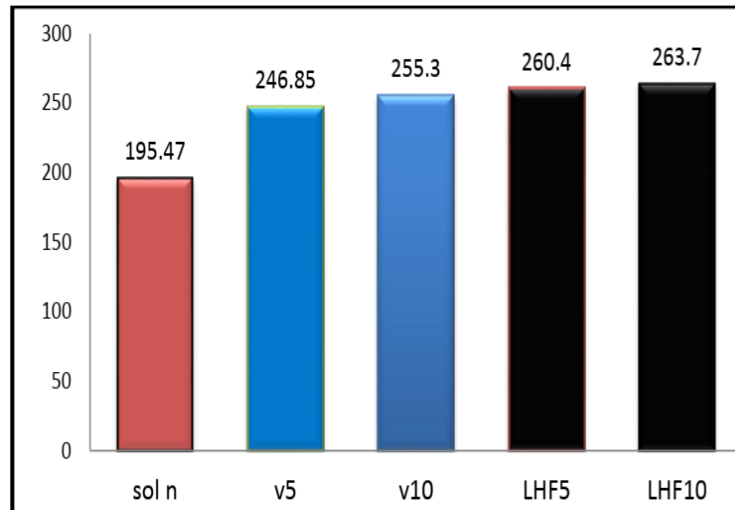


Figure.II.23. Résistance au cisaillement maximales avant et après traitement ($\sigma=300$) [Lamia.G et al.2020]

Pour une contrainte normale ($\sigma=300$ kPa) on remarque que les valeurs de la résistance après le traitement sont très proche pour les différents dosages et cela pour les deux produits des traitements. Seulement celle la valeur de laitier semble être plus élevée que la valeur de verre.

Il y a une tendance à l'augmentation de la résistance de cisaillement pour les trois contraintes appliquées dans le traitement pour le laitier. On remarque aussi une augmentation de la résistance en fonction de l'augmentation du dosage de 0% à 10%. Les résultats montrent également l'effet positif de l'augmentation du dosage sur la résistance du cisaillement.

Pour les différentes contraintes appliquées une augmentation des résistances au cisaillement maximales après le traitement par le verre en fonction de l'augmentation du dosage jusqu'à 5% et puis une diminution pour les contraintes normales $\sigma=100$ kPa et $\sigma=200$ kPa et une augmentation pour la contrainte $\sigma=300$ kPa pour le dosage de 10%.

II.3.4.3. Utilisation de ciment

Le ciment Portland est un autre produit envisageable pour la stabilisation de certaines catégories de sols utilisés pour les routes et les revêtements de pistes d'aéroports (Figure.II.24.). Alors qu'il existe plusieurs similarités entre la chaux et le ciment Portland comme stabilisants, le ciment Portland fournit en plus la chaux et la source de silice.

Lorsque le ciment Portland est mélangé à l'eau, l'initiation de l'hydratation occasionne une augmentation rapide de la concentration de calcium dans le sol. A mesure que les ions de calcium sont libérés, ils deviennent disponibles pour stabiliser l'argile. [Haroun.D et al.2018]



Figure.II.24. Chantier de traitement du sol au ciment. [Douakha.H et al.2018]

- D'après la recherche de [Rafika.B et al.2018] sur un sol argileux de la wilaya de Jijel traitée par des différents pourcentages de ciment (2%, 3% et 4%) (Figure.II.25-29.). Elles ont trouvé que l'addition du ciment dans les sols argileux a un effet considérable sur son comportement physique : il a été constaté une diminution des limites d'Atterberg et l'indice de plasticité ; c'est-à-dire, à court terme l'argile est passée d'un état déformable, collant à un état rigide, frottant, friable plus facile à travailler « diminution de sa sensibilité à l'eau » 2% d'addition est suffisante.

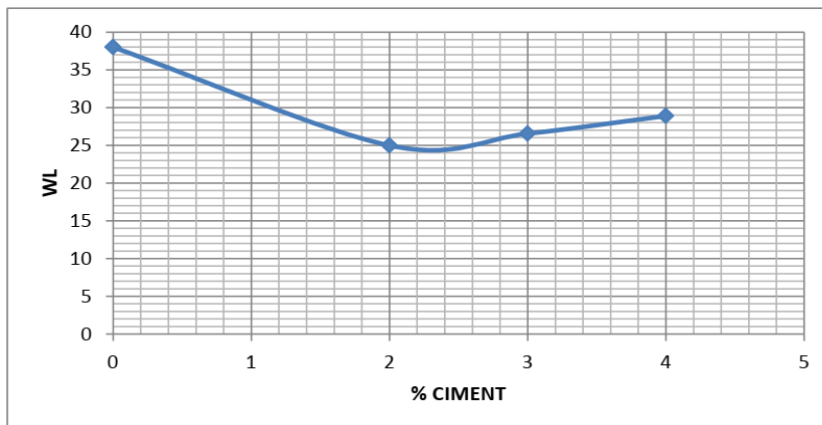


Figure.II.25. La courbe de la limite de liquidité en fonction de % ciment [Rafika.B et al.2018]

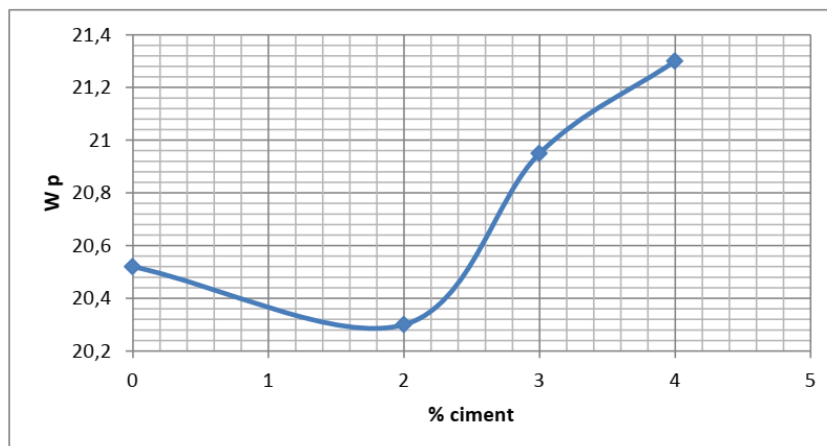


Figure.II.26. La courbe de limite de plasticité en fonction de % ciment [Rafika.B et al.2018].

CHAPITRE II : TRAITEMENTS DES SOLS

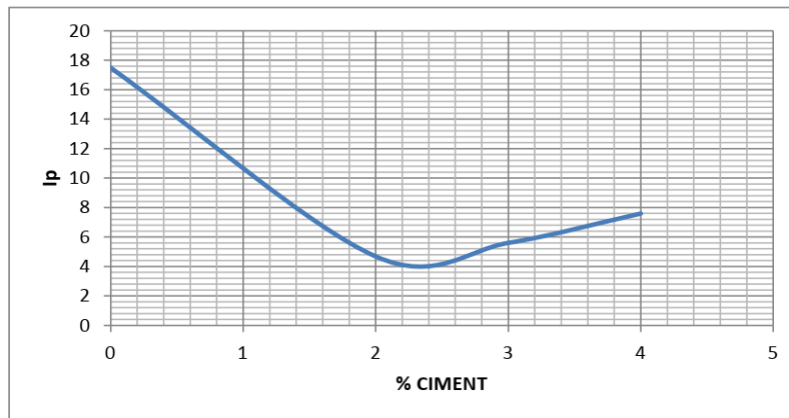


Figure.II.27. La courbe de l'indice de plasticité en fonction de dosage ciment [Rafika.B et al.2018]

Les comportements mécaniques sont aussi influencés par l'ajout de ciment :

- Après 7 jours du traitement, l'ajout du ciment apporte une amélioration dans la portance d'argile par l'augmentation importante de son IPI (augmentation de 404% pour 3% d'addition).
- À long terme, l'addition de 4% du ciment donne une chute dans la portance de mélange par rapport aux autres ajouts, c'est-à-dire le traitement dans ce cas s'arrête à 3%.

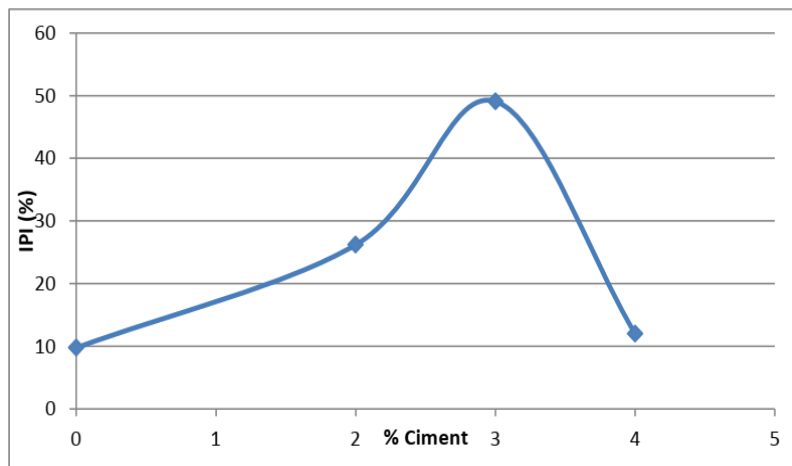


Figure.II.28. Variations d'IPI en fonction de % de ciment. [Rafika.B et al.2018]

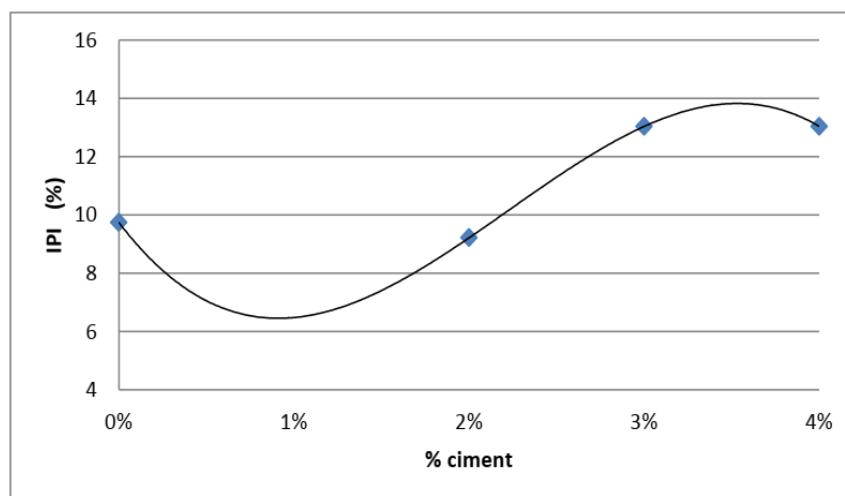


Figure.II.29. Variations d'IPI en fonction de % de ciment après 7 jours [Rafika.B et al.2018]

II.3.4.4. Utilisation des déchets

A. Déchet de brique rouge

D'après la recherche de [Zahia.G et al.2022] sur un sol argileux de la wilaya de Guelma traité par les déchets de brique rouge et la chaux avec ces pourcentages (3%, 6%, 9% et 12%) (Figure.II.30-33.). Elles ont trouvé qu'il y a une diminution de la limite de liquidité avec l'ajout de la quantité de poudre du déchet de brique rouge. La limite de plasticité a augmenté légèrement pour les différents pourcentages de PDBR.

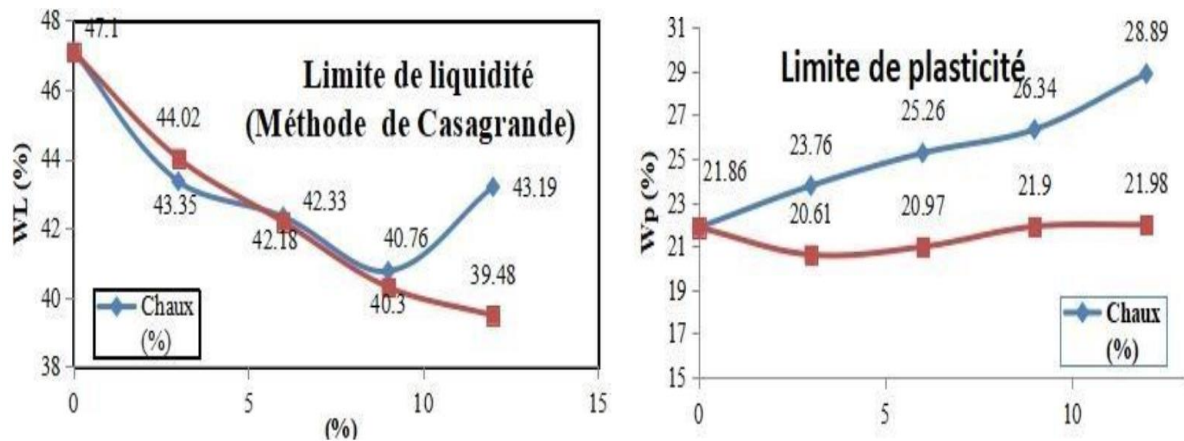


Figure.II.30. Les limites d'Atterberg du sol étudié à différents pourcentages en chaux et en PDBR [Zahia.G et al.2022]

L'indice de plasticité I_p diminue fortement avec la quantité de la PDBR ajoutée puis diminue plus faiblement avant de se stabiliser pour des pourcentages plus élevés.

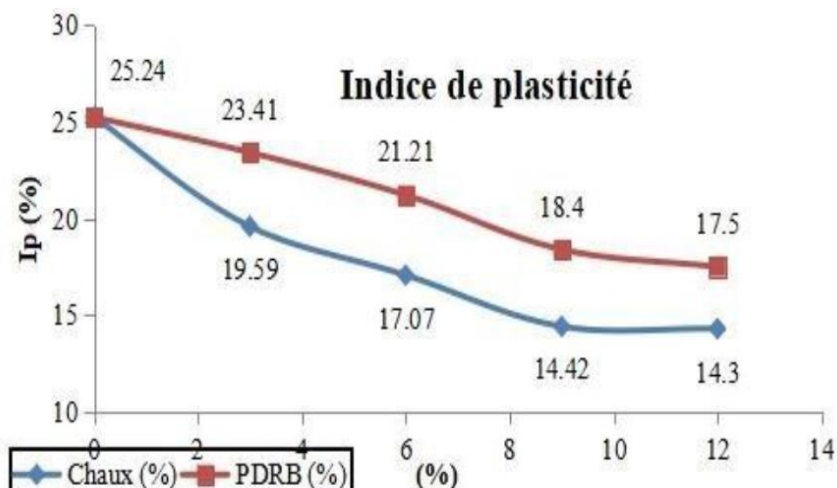


Figure.II.31. L'évolution de l'Indice de plasticité du sol étudié à différents pourcentages en chaux et en PDBR. [Zahia.G et al.2022]

La poudre de brique rouge augmente la densité et la teneur en eau mais jusqu'à un certain point (à 12%) lorsque de grandes quantités de poudre de brique sont ajoutées, les valeurs de densité et de teneur en eau commencent à diminuer.

CHAPITRE II : TRAITEMENTS DES SOLS

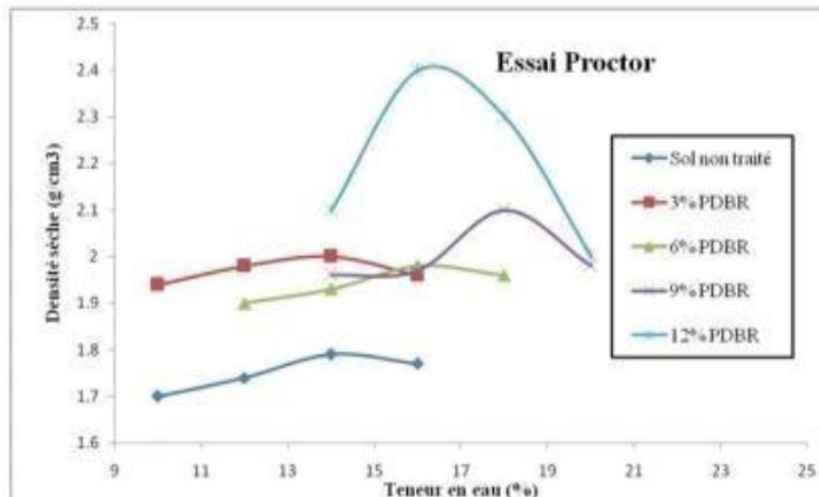


Figure.II.32. Relation entre la densité sèche et la teneur en eau. [Zahia.G et al.2022]

L'ajout de 3% PDBR augmente les valeurs de la résistance à la compression en comparaison avec le sol non traité après 7 et 14 jours mais pour les autres pourcentages on peut dire que plus on augmente le pourcentage de la PDBR dans le mélange et plus on obtient une résistance plus faible en comparaison avec le sol non traité.

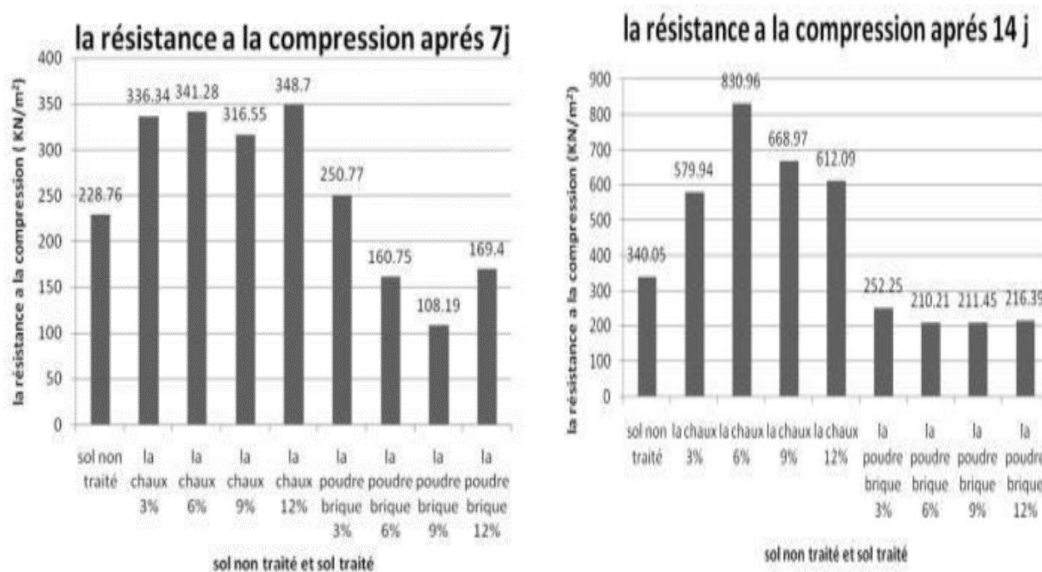


Figure.II.33. Histogrammes de la résistance de compression des sols En fonction des pourcentages en chaux et PDBR à 7 jours et 14 jours. [Zahia.G et al.2022]

B. Les pneus usés

D'après l'étude de [Morad.Y.2021] sur un sol fin de la wilaya de Tizi Ouzou. Se sol est traité par des granulats de caoutchouc des pneus usés en différents dosages (2%, 4% et 6%) (Figure.II.34-37.).

Il se trouve que les valeurs des teneurs en eau optimales diminuent et les densités sèches maximales augmentent, avec l'augmentation du dosage en déchet de pneu. Cela est interprété par l'agglomération des particules d'argile qui provoque la visualisation des vides, donc la teneur en eau optimum augmente pour les remplir.

CHAPITRE II : TRAITEMENTS DES SOLS

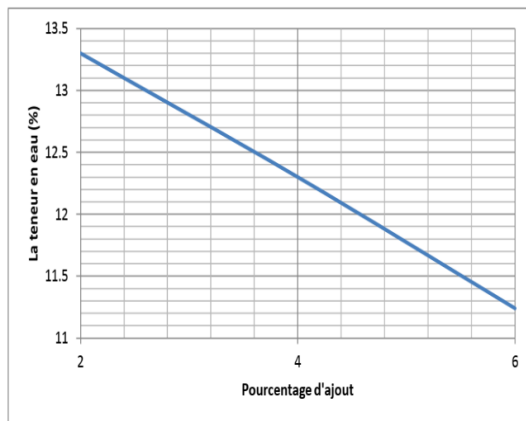


Figure.II.34. La variation de la teneur en eau en fonction du pourcentage d'ajout [Morad.Y.2021]

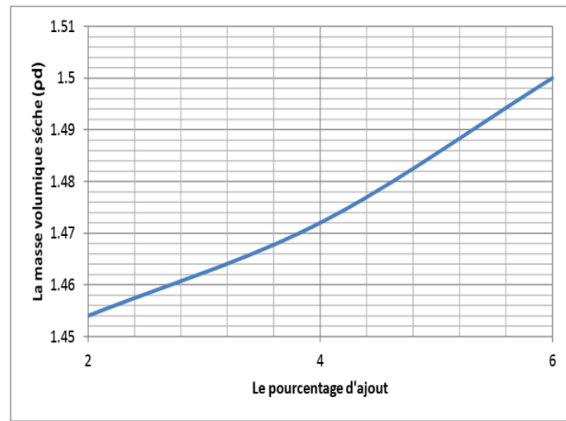


Figure.II.35. La variation de la masse volumique sèche eau en fonction du pourcentage d'ajout[Morad.Y.2021]

Une augmentation de l'angle de frottement interne et une diminution de la cohésion après chaque augmentation du pourcentage d'ajout, ce qui a permis le passage d'un état cohérent vers un état granulaire, et par la suite une augmentation de la résistance. Le meilleur résultat a été obtenu à 6% d'ajout de granulats de caoutchouc avec un une cohésion de 26 Kpa et un angle de frottement interne de 59.39°.

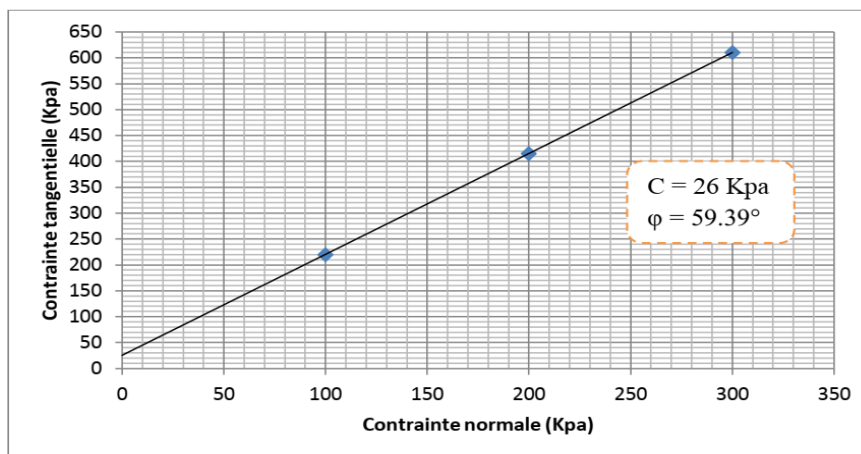


Figure.II.36. La contrainte de cisailment en fonction de la contrainte normale (ajout de 6% de caoutchouc) [Morad.Y.2021]

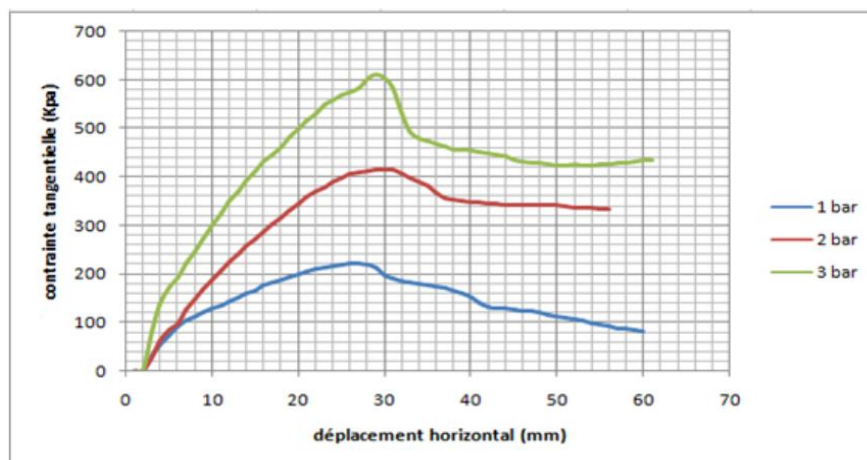


Figure.II.37. La contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal à 1, 2, et 3 bar (ajout de 6% de caoutchouc)[Morad.Y.2021]

II.4. Conclusion

Il est nécessaire de redéfinir les caractéristiques géologiques à chaque fois pour choisir le traitement à privilégier et le dosage à appliquer, car la composition des sols est très variable.

Actuellement, de nombreuses recherches sont en cours pour élargir la gamme de sols pouvant être traités par un grand nombre de chercheurs. De nombreuses techniques et dispositifs ont été développés afin de déterminer l'effet de l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol fin. Plusieurs facteurs tels que les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser et les conditions environnementales influencent le choix des techniques de stabilisation les plus utilisées.

CHAPITRE III : ESSAIS ET MATERIAUX UTILISES

CHAPITRE III : ESSAIS ET MATERIAUX UTILISES

III.1. Introduction

Quel que soit l'utilisation envisagée d'un sol, il est de règle d'effectuer initialement l'identification de sols concernés. Cette procédure permet de déterminer les paramètres mécaniques et physiques de sol et surtout d'effectuer une classification des matériaux rencontrés.

Par conséquent, ce chapitre présente l'identification des matériaux utilisés (argile, marc de café, déchet de céramique) avec une série d'essais géotechniques tels que les essais de limite d'Atterberg, l'analyse granulométrique et les différents essais mécaniques (Proctor, CBR) ainsi que le mode opératoire de chaque essai effectué en se référant à la norme en vigueur. L'étude expérimentale a été réalisée au sein du laboratoire : LTPE à Skikda.

III.2. Sols naturels

III.2.1. Lieu de prélèvement

Le sol utilisé dans cette étude a été prélevé de (4-6) m profondeur, de la ville de El Hadaik wilaya de Skikda (Algérie) (Figure.III.1), les coordonnées géographiques du site d'étude sont (36°49'35"N 6°53'16"E), afin de réaliser le projet d'un centre d'analyse physio-chimique situé à l'Université 20 Aout 1955.

Après extraction, le sol a été placé dans des sacs en plastique, transporté au laboratoire après cela il a été placé à l'étuve à 50°C durant 24h. Après séchage, le sol a été ensuite concassé, broyé et tamiser à un tamis de 5 mm de diamètre.



Figure.III.1. Localisation de la zone d'étude [Google Earth]

III.2.2. Essais d'identification du sol

Les sols sont identifiés par des tests de laboratoire simples. Ces essais d'identification permettent de classer les sols et d'évaluer leurs comportements mécaniques, afin de comprendre comment ces matériaux peuvent être utilisés dans la construction, que ce soit dans le domaine de la construction routière ou dans la fabrication des matériaux de construction. Il existe de nombreuses classifications dans le domaine du génie civil. Ainsi un sol peut être identifié selon :

- Sa granulométrie ;
- Sa teneur en matières organiques ;

CHAPITRE III : ESSAIS ET MATERIAUX UTILISES

- Sa plasticité.

III.2.2.1. Analyse granulométrique (NF P 94-056 et NFP 94-057)

L'analyse granulométrique consiste à évaluer et à analyser les particules en fonction de leur taille, de leur forme, de leur surface, de leur porosité et d'autres caractéristiques physiques. Elle permet d'identifier les différents types de matériaux ou de particules présents dans un échantillon et d'évaluer leur interaction entre eux.

De cette manière, l'analyse granulométrique peut servir à évaluer les taux de sédimentation et à distinguer les différentes tailles de particules avant de les étudier ultérieurement.

a. But de l'essai

Cette analyse étudie la répartition des grains constituant un sol donné selon leur taille. Elle s'effectue à l'aide d'un tamisage mécanique pour les grains dont la taille est supérieure à 0.1mm. Pour les grains de taille inférieure, l'essai de sédimentation est plus approprié.

b. Appareillage de l'essai

- Tamis de différentes mailles : ils sont utilisés pour séparer les différentes fractions de particule en fonction de leur taille
- Agitateur mécanique : il est utilisé pour agiter les particules à travers les tamis afin de faciliter le processus de séparation
- **Balance précise** : il est utilisé pour peser les fractions de particules collectées sur chaque tamis (Figure.III.2.).



Figure.III.2. Appareillage d'essai Analyse granulométrique

c. Mode d'opérateur

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis (Tableau.III.1.), emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. Les résultats de cette analyse

CHAPITRE III : ESSAIS ET MATERIAUX UTILISES

sont présentés sous forme d'une courbe granulométrique ayant en ordonnées les tamisats cumulés et en abscisses les diamètres équivalents (Figure.III.3.).

Tableau.III.1. Résultat d'essai analyse granulométrique

Analyse granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisât (%)	Diamètre équivalent(μm)	Tamisât (%)
10.00	100.00	56.00	81.00
5.00	99.00	40.00	78.00
2.00	97.00	28.00	75.00
1.00	94.00	18.00	72.00
0.40	91.00	13.00	69.00
0.20	85.00	9.00	67.00
0.10	82.00	6.00	64.00
0.08	81.00	4.00	61.00
		2.60	58.00
		1.00	56.00

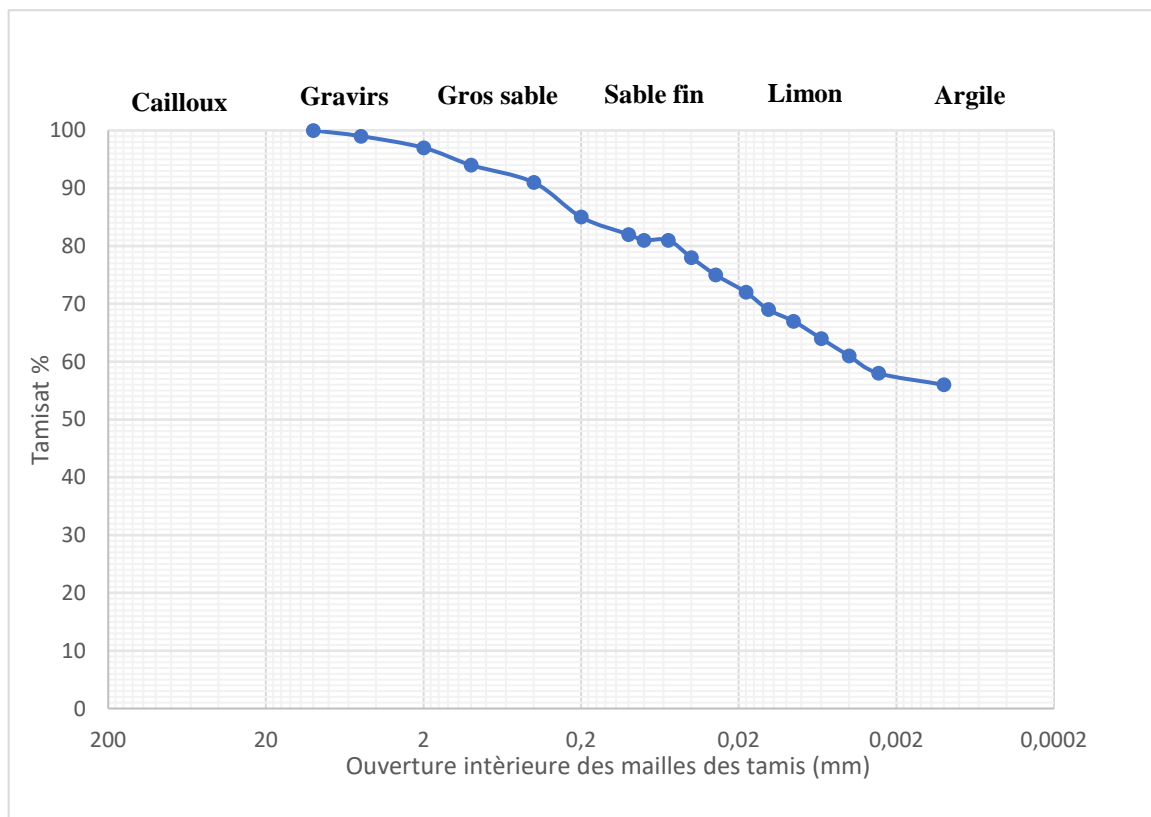


Figure.III.3. La courbe d'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique des échantillons testés montre que le sol est constitué d'argile limoneuse légèrement sableuse à sableuse.

III.2.2.2. Limites d'ATTERBERG (NF P 94-051)

Les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol (fraction passant au tamis de 0,4 mm), car ce sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance

CHAPITRE III : ESSAIS ET MATERIAUX UTILISES

du sol. L'essai consiste donc à faire varier la teneur en eau (w) de cette fraction de sol et en observer sa consistance.

Selon la teneur en eau, le sol se comportera comme un solide, un matériau plastique (capable de se déformer beaucoup sans casser) ou un liquide.

A l'état liquide, les grains sont indépendants les uns des autres, leurs mouvements relatifs sont aisés.

A l'état plastique, les grains se sont rapprochés et ont mis en commun leurs couches adsorbées si bien qu'ils sont reliés par les chaînes de molécules d'eau qui s'accroche à leurs deux extrémités sur chaque grain. Lorsqu'il y a mouvement, les grains restent attachés les uns aux autres, sans s'éloigner.

A l'état solide en fin, les grains sont encore plus près les uns des autres, ils arrivent même au contact en quelques points, en chassant l'eau adsorbée. Les frottements internes sont alors importants (Figure.III.4,5.).

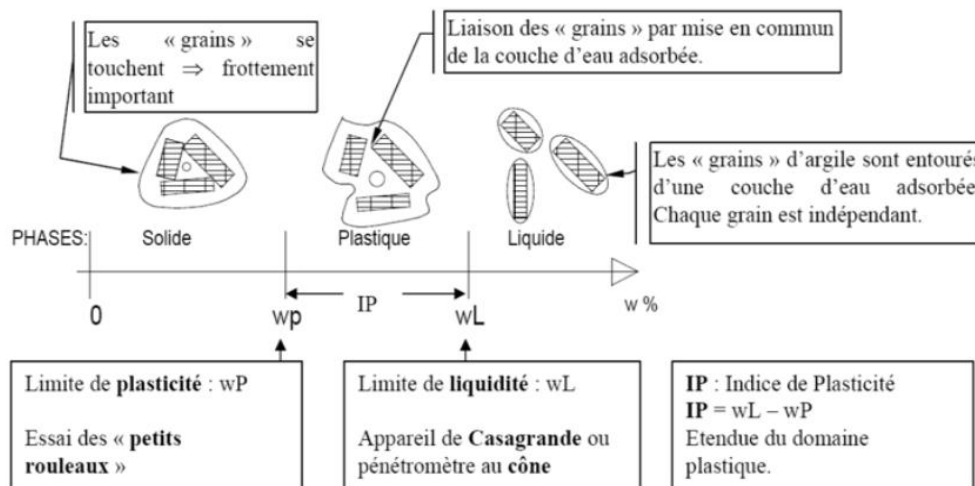


Figure.III.4. Explication de limite d'Atterberg

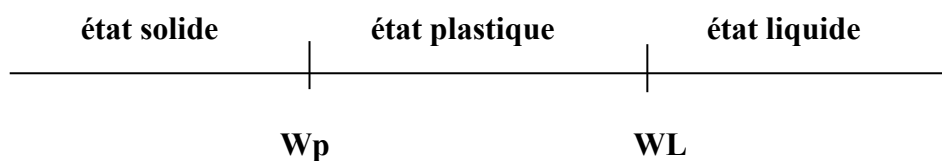


Figure.III.5. Représentation des limites d'Atterberg

- **Limite de liquidité W_L** : Teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique.

- **Limite de plasticité W_p** : est définie comme la teneur en eau d'un sol qui a perdu sa plasticité et se fissure en se déformant lorsqu'il est soumis à de faibles charges. Cette limite sépare l'état plastique de l'état semi-solide. En générale elle ne dépasse pas 40%.

- **La limite de retrait W_s** : sépare, dans le domaine solide, l'état du solide avec variation du volume et l'état du solide sans variation du volume. Ces limites sont désignées sous le nom de limites d'Atterberg. La connaissance de ces limites est importante pour l'exécution de travaux de terrassements (fouille, tranchée, ...). En particulier, si le matériau doit être utilisé après remaniement (remblais, barrage en terre, ...), leur détermination revêt une importance considérable.

CHAPITRE III : ESSAIS ET MATERIAUX UTILISES

- **Indice de plasticité I_p** : Différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique, il s'exprime par la relation (Tableau.III.2.). :

$$I_p = W_L - W_p$$

- **Indice de liquidité I_L** : Le rapport entre la teneur en eau naturelle moins limite de plasticité et l'indice de plasticité il s'exprime par la relation :

$$I_L = \frac{W_p - W_n}{w_L - w_p}$$

- **Indice de consistance I_C** : Le rapport entre limite de liquidité moins la teneur en eau naturelle et l'indice de plasticité il s'exprime par la relation :

$$I_C = \frac{w_L - W_n}{w_L - w_p}$$

a. But de l'essai

Déterminer la limite de liquidité W_L et la limite de plasticité W_P qui sont des teneuses en eau pondérales, caractéristiques du sol (Tableau.III.3.). Ces résultats permettent de prévoir le comportement des sols sous l'action des variations de teneur en eau. (Figure.III.7.).

b. Appareillage de l'essai

- Appareille de Casa grande ;
- Marteau de Casa grande ;
- Spatule ;
- Balance ;
- Plaque de verre (Figure.III.6.).



Figure.III.6. Appareillage de l'essai de limites d'Atterberg

CHAPITRE III : ESSAIS ET MATERIAUX UTILISES

c. Mode d'opérateur

- ❖ **Limite de liquidité W_L** : On mélange un échantillon de sol avec une quantité d'eau et former une pâte homogène, cette dernière est placée dans une coupelle de 100 mm de diamètre, on trace sur la pâte une rainure normalisée avec un outil spécial en forme de **v**. En applique une série des chocs à la coupelle à l'aide d'une dame, on observe en fin d'expérience le contact des deux lèvres de la rainure. La limite de liquidité est la teneur en eau en % qui correspond à une fermeture en 25 chocs.
- ❖ **Limite de plasticité W_p** : On mélange l'échantillon avec des quantités variables d'eau, on façonne avec la pâte un rouleau de 6 mm de diamètre pour une centaine de millimètres de longueur. Puis on atteint 3 mm de diamètre en le roulant (souvent avec les doigts), après 5 à 10 aller-retour maximum. La limite de plasticité est la teneur en eau en % du rouleau qui se fissure et se brise lorsqu'il atteint un diamètre de 3 mm.

Tableau.III.2. Classification de sol selon l'indice de plasticité

Indice de plasticité I_p	Etat du sol
0-5	Non plastique
5-15	Peu plastique
15-40	Plastique
>40	Très plastique

Tableau.III.3. Résultat de l'essai limite d'Atterberg

W_L (%)	W_p (%)	I_p (%)	Classification
51.22%	25.22%	26%	At

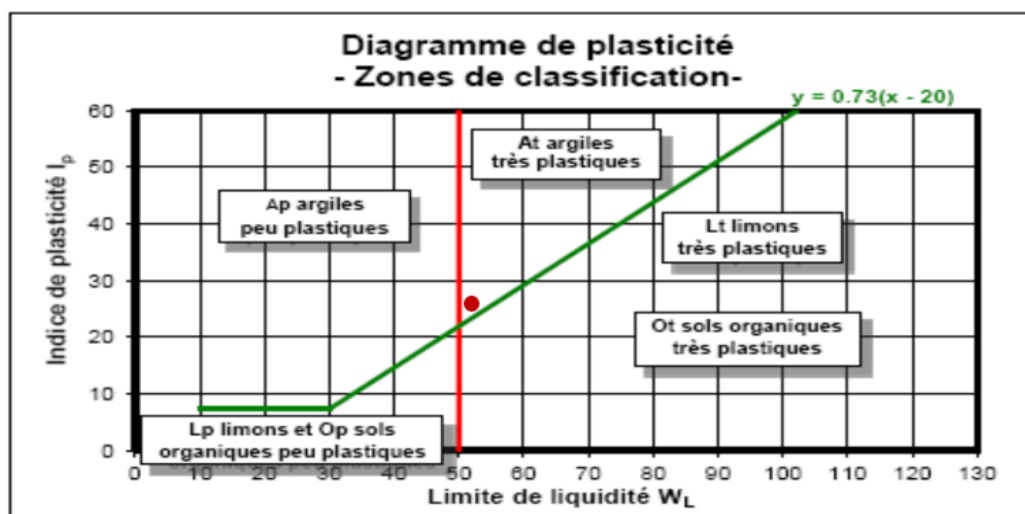


Figure.III.7. Abaque de Casagrande

CHAPITRE III : ESSAIS ET MATERIAUX UTILISES

Les couples de valeurs limite de liquidité-Indice de plasticité, classent les sols testés dans la catégorie des argiles peu plastique et très plastiques

III.2.2.3. L'essai Proctor (NF P 94-093)

Le principe du test consiste à humidifier le sol plusieurs teneurs en humidité et compacté selon un procédé et énergie traditionnels. Pour chaque compte tenu de la valeur de la teneur en humidité, nous déterminons la densité sèche du sol, on établit la courbe de changement de densité cela dépend de la teneur en humidité. D'une manière générale, cette courbe est appelée courbe Proctor restitue la valeur maximale de la masse volumique sèche, obtenez une valeur teneur en humidité spécifique. Voici ces 2 valeurs c'est ce qu'on appelle la caractéristique de compactage après avoir testé Proctor normal ou Proctor modifié fini.

- ✓ **L'essai Proctor normal** est réalisé avec la dame normale (petite dame), quel que soit le moule.
- ✓ **L'essai Proctor modifié** est réalisé avec la dame modifiée (grande dame), quel que soit le moule.

a. But de l'essai

L'essai Proctor permet de déterminer la teneur en eau optimale W_{opm} d'un sol pour laquelle le compactage conduit à une masse volumique sèche γ_a (ou un poids volumique) maximum.

b. Appareillage de l'essai

- Moule Proctor avec embase et hausse Ou moule CBR avec embase et hausse ;
- Dame Proctor normal Ou dame Proctor modifié ;
- Règle à araser ;
- Balance de portée supérieure à 3 kg ;
- Eprouvette graduée et burette d'eau pour humidifier le sol ;
- Four ;
- Balance de précision ;
- Petits récipients pour mesurer la teneur en eau à postériori (Figure.III.8).



Figure.III.8. Appareillage d'essai Proctor

CHAPITRE III : ESSAIS ET MATERIAUX UTILISES

c. Mode d'opérateur

- Préparation de l'échantillon de sol (6kg) après le séchage dans le four ;
- Préparation de moule Proctor (on graisse l'intérieur de moule et on place une plaque de base propre et plane dans le moule) ;
- On pèse le moule vide ;
- On ajoute un pourcentage d'eau et on mélange avec l'échantillon de sol ;
- On divise l'échantillon de sol en trois portions pour essai Proctor normal et cinq portions pour essai Proctor modifié ;
- On met une portion de sol dans le moule et on compacte le en utilisant une dame (25 coups pour essai Proctor normal et 55 coups pour essai Proctor modifié), on répète le processus avec tous les portions ;
- Après le compactage on pèse le moule ;
- On répète l'essai au moins sur trois échantillons du sol chacun d'eux a un pourcentage d'eau, et on calcule la teneur en eau $W\%$ et la densité sèche γ_d de chaque échantillon ;
- D'après les résultats obtenus on trace la courbe de Proctor en représentant la densité sèche en fonction de la teneur en eau et identifier la densité maximale obtenue γ_{dmax} avec la teneur en eau optimale W_{opt} .

Tableau.III.4. Résultat d'essai Proctor (sol sans ajout)

Echantillon n° : sans ajout	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Eau additive %	10%	12%	14%
Masse de moule et sol humide (g)	15215	15860	16100
Masse de moule (g)	12168	12140	12396
Masse de sol humide(g)	3468	3720	3704
Volume de moule (cm ³)	2275		
Masse volumique humide (t/m ³)	1.52	1.63	1.62
Densité sèche γ_d (t/m ³)	1.32	1.43	1.37
Teneur en eau %	14.35	16.22	18.20

Les valeurs de la densité sèche sont comprises entre 1.32 t/m³ et 1.43 t/m³ ; celles des teneurs en eau sont variables entre 14.35% et 18.20%, caractérisant un sol peu dense à dense, ayant un caractère faiblement humide. (Figure.III.9.)

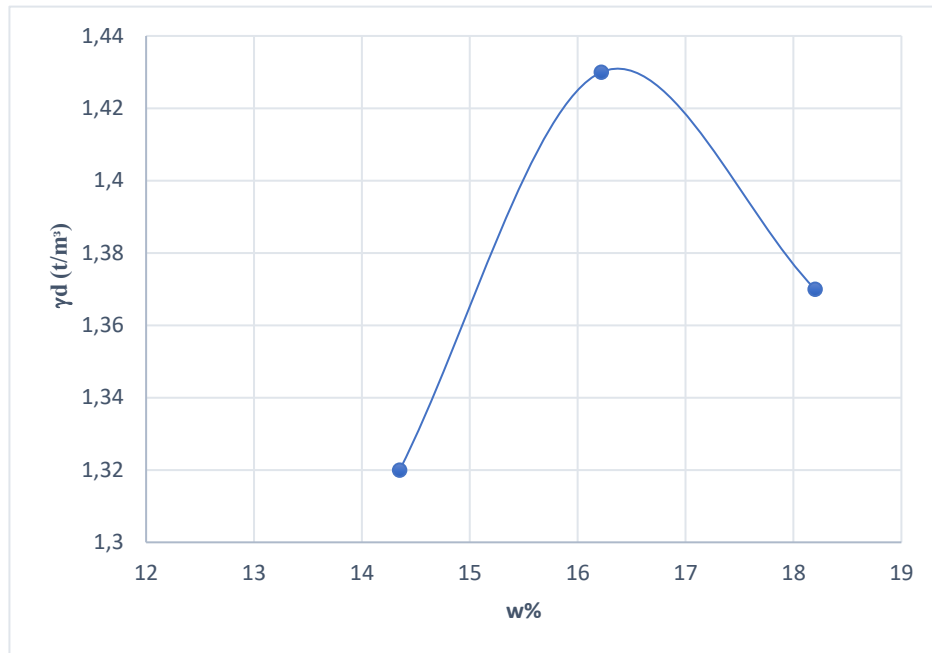


Figure.III.9. Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (sol sans ajout)

III.2.2.4. Essai CBR après immersion (NF P94-078)

Le principe de l'essai CBR est exécuté sur des échantillons compactés avec une teneur en humidité optimale, obtenus à partir de l'essai de compactage Proctor. Il mesure la résistance à l'effort tranchant d'un sol et le gonflement de sol lorsqu'il immergé dans l'eau pendant 4 jours.

a. But de l'essai

- ✓ Déterminer la capacité portante du sol compacté en estimant sa résistance au cisaillement par poinçonnage en fonction de son état, de sa densité et de son humidité, ainsi que de la charge appliquée ;
- ✓ Il mesure la résistance du sol au cisaillement dans des conditions d'humidité et de densité contrôlées et de niveaux de compactage variables, permettant d'obtenir un pourcentage du rapport de capacité portante ;
- ✓ Déterminer le pourcentage de gonflement de sol.

b. Appareillage de l'essai

- Moule Proctor contient l'échantillon de sol ;
- Compateur + Tête ;
- Appareille CBR (Figure.III.10.).



Figure.III.10. Appareillage d'essai CBR après immersion

c. Mode d'opérateur

-Après avoir terminé le processus de compactage de trois échantillons de sol chacun ayant un pourcentage d'eau spécifique, et après avoir déterminé l'échantillon qui contient la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale, on le prépare pour le mettre dans un réservoir d'eau - L'échantillon est immergé dans l'eau pendant quatre jours, en tenant compte du fait que la surface de l'eau libre est plus haute que la surface de l'échantillon, et on prend également soin de surveiller la valeur de gonflement qui se produit dans l'échantillon pendant l'immersion ;

-Après quatre jours on retire le moule avec son contenu du bassin d'immersion et on place le moule sur une table à l'air pour éliminer l'excès d'eau ;

-Après 15 minutes on place le moule dans l'appareil CBR, la valeur de charge appliquée sur l'échantillon doit être fixe, on note les résultats obtenus dans un tableau et on calcule l'indice CBR et la valeur de gonflement.

Tableau.III.5. Résultat obtenu après l'écrasement de l'échantillon du sol sans ajout

Enfoncement (mm)	0.062	0.068	0.073	0.102	0.127	0.146
Force (KN)	1.25	2.00	2.50	5.00	7.50	10.00

Calcul de l'indice portant :

$$\text{IP à 2,5} = \frac{100 F_{2.5}}{13.35} = 0,546$$

$$\text{IP à 5} = \frac{100 F_5}{19.93} = 0,511$$

Avec :

$F_{2.5}$ est l'effort de pénétration correspondant à un enfoncement de 2,5 mm, exprimé en (KN)

CHAPITRE III : ESSAIS ET MATERIAUX UTILISES

F_5 est l'effort de pénétration correspondant à un enfoncement de 5 mm, exprimé en KN

-L'indice CBR = max (IP à 2,5 ; IP à 5) =0,546

-Valeur de gonflement = 5.70%

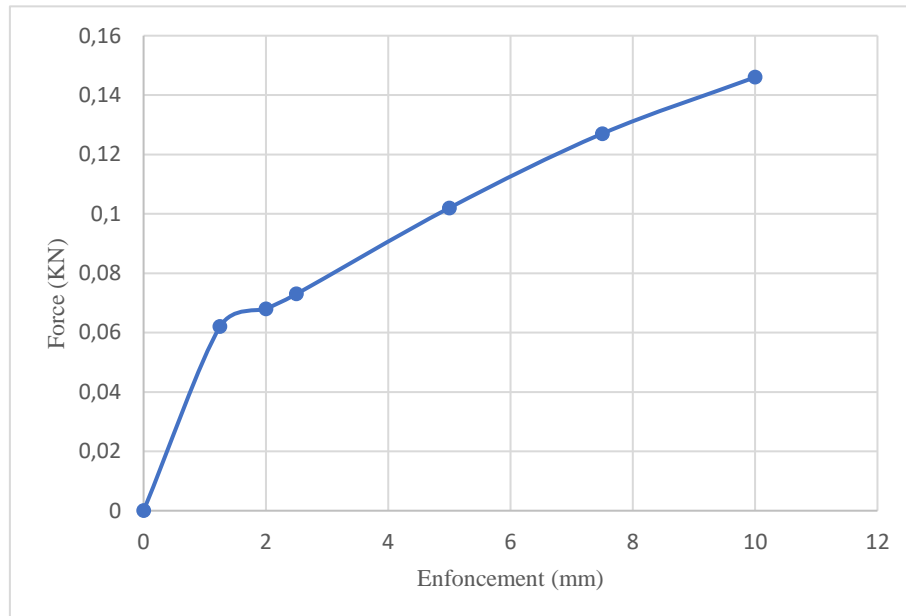


Figure.III.11. Variation de l'enfoncement en fonction de la force (sol sans ajout)

III.3. Les ajouts utilisés

L'économie circulaire ou de " **blue economy** ", concept inventé par un entrepreneur belge, (**Gunther**), qui repose sur une question toute simple : qu'est-ce qu'un déchet ? C'est un truc qu'on jette à la poubelle, me direz-vous. C'est surtout quelque chose dont personne ne veut. Dès lors qu'un déchet a une valeur financière, dès lors que quelqu'un est prêt à payer pour l'obtenir, ce n'est plus un déchet. Il faut donc transformer les déchets en ressource pour s'autoriser à rêver d'une société sans aucun déchet. Recycler pas uniquement pour la planète, mais aussi pour créer de la richesse et des emplois. [Zouli.S.2019]

III.3.1. Marc de café, un substituant intéressant

Les marcs de café sont des matières organiques lignocellulosiques valorisables qui pourraient être utilisés comme adsorbants sous leur forme brute ou après activation.

Le café est considéré comme la matière première la plus commercialisée dans le monde, après le pétrole et devant le charbon, la viande, le blé et le sucre, est une boisson puissante à base de graines de caféier, et est généralement psychoactif. Le caféier est un arbre qui a besoin des températures élevées, sa culture est donc limitée aux pays tropicaux. Sa culture a connu un développement important dans des plantations produisant pour les marchés d'exportation.

Le marc de café, également connu sous le nom de « déchets de café », c'est un résidu lignocellulosique produit en traitant la poudre de café avec de la vapeur ou de l'eau (Figure.III.12.).



Figure.III.12. La poudre de marc de café [Zouli.S.2019]

III.3.1.1. Les principaux pays producteurs et consommateurs de café

Le café est cultivé dans quelques 80 pays du sud, mais les 3 plus gros producteurs totalisent près de 40% de la production mondiale et plus de la moitié des exportations. Le Brésil est constaté comme le premier producteur. Ils ont une influence importante sur les cours mondiaux du café. Ainsi les deux autres poids lourds du marché sont la Colombie et le Vietnam, qui représentent chacun plus de 10% de la production mondiale. La consommation mondiale du café augmente dans les pays importateurs comme l'Asie et Océanie (Turquie et le Japon). Ainsi on mentionne l'Amérique du Nord (les États-Unis). La consommation en Europe est plus modeste. Le même taux de consommation pour l'Amérique du Sud, tandis que l'Amérique centrale et le Mexique. Enfin, la consommation de café en Afrique a dépassé la tendance mondiale (I.C.O, 2011) (Figure.III.14.).

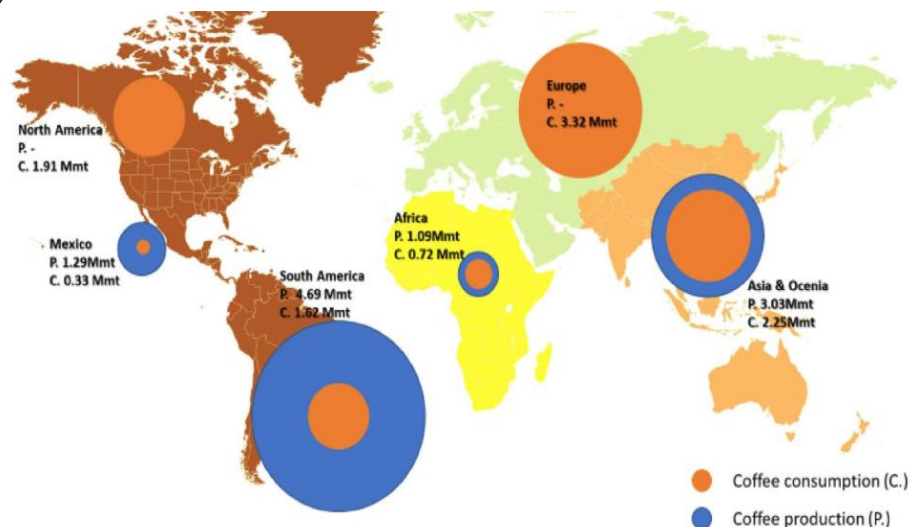


Figure.III.13. Distribution géographique de la production et de la consommation mondiale du café (Mmt : million de tonnes métriques). [BATTISTA et al.2020]

III.3.1.2. Propriétés du marc de café

Il possède plusieurs propriétés, soit physiques, chimiques et également bioactives (Tableau.III.6-10).

a. Propriétés physiques du marc de café

Le diamètre des grains de marc de café séchés varie entre 50 et 100 μm pour le marc de café commercial. Cependant, ce diamètre augmente avec le taux d'humidité. En effet, lorsque le marc de café devient de plus en plus humide, l'adhésion entre les grains augmente et ces derniers forment des agglomérats de plus grande taille. L'angle de talus quant à lui reste le même, peu importe le taux d'humidité du marc de café. L'angle de talus est une donnée utile pour déterminer les superficies nécessaires des aires d'entreposage du marc de café après l'avoir récupéré. La densité apparente du marc de café est environ de 0,42 g/cm^3 et la densité réelle est d'environ 1,16 (g/cm^3).

En ce qui concerne leur porosité, les grains de marc de café ne possèdent pas de micropores. En général, la porosité est de 0,63, peu importe le taux d'humidité et la taille des pores, est d'environ 10 μm . Toutefois, cette porosité peut être augmentée si nécessaire en diminuant la cristallinité du marc de café en dégradant sa matrice cellulose-lignine. Enfin, la surface des grains est de charge négative [Shen et al.2013]. Le tableau III.6 présente ces différentes données en fonction du taux d'humidité.

Tableau.III.6. Caractéristiques physiques du marc de café en fonction de l'humidité [Silva et al.2012]

Humidité (%)	Angle de talus (°)	Densité apparente (g/cm^3)	Densité réelle (g/cm^3)	Diamètre (μm)	Porosité
0,00	s.d.	s.d.	1,20	50-100	s.d.
15,2	38,7	0,43	1,16	583	0,63
17,7	37,8	0,43	1,16	617	0,63
43,1	37,7	0,41	1,11	880	0,63

b. Propriétés chimiques du marc de café

Le carbone est l'élément majoritaire du marc de café. Le tableau 2 présente la composition élémentaire du marc de café.

La composition du marc de café est essentiellement faite de polysaccharides, de lipides, de protéines, de polyphénols et de minéraux [Zamora et al.2015]. Le (Tableau.III.7.) présente la proportion des principaux composés retrouvés dans le marc de café.

CHAPITRE III : ESSAIS ET MATERIAUX UTILISES

Tableau.III.7. Composition élémentaire du marc de café [Limousy et al.2013]

Éléments	Quantités
Carbone (C)	49,7 %
Hydrogène (H)	s.d.
Azote (N)	2,3 %
Oxygène (O)	s.d.
Ratio H/C	s.d.
C/N	22

Tableau.III.8. Les principaux composés du marc de café [Limousy et al.2013]

Éléments	Quantités
Glucides	45,3 %
Lipides	9,3-16,2 %
Protéines	14 %
Minéraux	6800 mg/kg de matière sèche
Polyphénols	13-18 mg acide gallique éq

Les minéraux sont aussi présents dans le marc de café. Ceux-ci sont en plus grande quantité dans le marc de café à espresso, que dans le marc de café filtre. Le (Tableau III.9.) détaille les principaux minéraux du marc de café.

Tableau.III.9. Composition des principaux minéraux du marc de café [Mussatto et al.2011]

Minéraux	Quantités (mg/kg)
Potassium	8824 ± 4662
Phosphore	1534 ± 503
Magnésium	2201 ± 1341
Calcium	349 ± 122
Fer	46 ± 21
Manganèse	27 ± 10
Cuivre	25 ± 12

c. Propriétés bioactives du marc de café

Le marc de café possède des propriétés bioactives qui sont à considérer. Comme le montre le tableau III.10, le marc de café possède une activité anti-radicalaire semblable selon l'espèce de café

Tableau III.10. Activité radicalaire du marc de café [Bravo et al.2012]

Concentration	200 ppm	100 ppm	50 ppm
Marc de café arabica	89,2 ± 4,5	87,9 ± 4,1	86,9 ± 5,0
Marc de café robusta	84,3 ± 5,9	83,8 ± 5,1	82,0 ± 5,0

III.3.1.3. Domaines de valorisation du marc de café

De multiples voies de valorisation et d'utilisations sont possibles avec le marc de café. Parmi celles-ci se retrouvent les productions d'éthanol, de biodiesel, de combustibles pour les fours industriels et de granules de combustion pour les fours résidentiels. Le marc de café peut aussi être utilisé comme 17 substrats pour la culture de micro-organismes, comme compost, peut être utilisé dans l'industrie alimentaire, dans la production de biomatériaux, dans la production de charbon actif, dans le traitement des eaux usées des industries et de l'eau potable, etc. Pour toutes les voies de valorisation qui sont discutées, l'utilisation du marc de café arabica ou robusta est possible, aucune distinction n'a été faite par les études. [Kessoum.A et al.2021]

III.3.1.4. Préparation de marc de café

Le marc de café est un résidu de café, c'est-à-dire la matière organique restant après la préparation du café dans les cafés. La quantité utilisée dans cette expérience était d'environ 1 kg collecté dans les cafés. Puis elle a été placée sur un chiffon propre au soleil pour sécher, elle a été conservée pendant cinq jours jusqu'à ce qu'ils soient complètement secs.

III.3.2. Déchets de céramiques

Les déchets de construction et de démolition contribuent le plus fort pourcentage de déchets dans le monde. De plus, les matériaux céramiques, qui comprennent les murs de briques, les carreaux de céramique et tous les autres produits céramiques, contribuent le plus fort pourcentage de déchets [Juan.A et al.2012]. L'option actuelle d'élimination pour ce type de déchets est la mise en décharge.

Les déchets céramiques peuvent être séparés en deux catégories en fonction de la source des matières premières. Le premier concerne tous les déchets cuits générés par les usines de céramique structurelle qui n'utilisent que des pâtes rouges pour fabriquer leurs produits, tels que : les briques, les blocs et les tuiles. Le second concerne tous les déchets cuits produits dans la céramique de grès, tels que les murs, les carrelages et les appareils sanitaires. Ces producteurs utilisent des pâtes rouges et blanches, néanmoins, l'utilisation de la pâte blanche est plus fréquente et beaucoup plus élevée en volume. Dans chaque catégorie, les déchets céramiques cuits ont été classés en fonction du processus de production.

III.3.2.1. Céramique

Le terme céramique a pour origine le mot grec «keramikos», qui fait référence à la poterie et à la « terre brûlée ».Le céramique échelonne souvent des objets rustiques comme les argiles les briques et les tuiles mais il signifie plus généralement un solide qui n'est ni un métal ni un polymère. Une céramique est un matériau solide de synthèse qui nécessite souvent des traitements thermiques pour son élaboration. La plupart des céramiques modernes sont préparées à partir de poudres consolidées (mises en forme) et densifiées par un traitement thermique (le frittage). La plupart des céramiques sont des matériaux poly-cristallins, c'est-à-dire comportant un grand nombre de microcristaux bien ordonnés (grains) reliés entre eux par des joints de grains (Figure.III.14.).

a. Leur Utilisation

Les produits céramiques destinés aux revêtements des surfaces forment un assemblage désigné par le terme classique de "carrelage ". Il faut tout de suite distinguer deux utilisations distinctes : le carrelage des sols, le carrelage des murs. L'un et l'autre proviennent d'un assemblage de carreaux ou d'éléments similaires, mais les matériaux et les produits utilisés sont parfois très différents, et il faut savoir les reconnaître. [Hamla.W et al.2017]

b. Propriétés générales des céramiques

❖ Liaisons chimiques

Ces liaisons assurent la cohésion du matériau et jouent un rôle principal dans la détermination des certaines propriétés physiques et dans la classification des céramiques (Tableau.III.11.). Elles sont forte à cause de sa nature covalentes, ionique et peut être mixte. [Philibert.J.1985]

Tableau.III.11. Energie des liaisons de quelques matériaux [Haussonne.F.1996]

Liaison	Si-C	Si-Si	SI-O	B-N	C-C
Energie (ev)	3.38	2.30	4.60	4.55	3.60

❖ Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques sont extrêmement importantes tant pour la fabrication que pour les applications de ces matériaux. Ils sont généralement fragiles car l'effort nécessaire pour la fracture est inférieur à l'effort demandé pour la déformation.

On suppose donc avec une très bonne approximation, que leur comportement est élastiquejusqu'à la rupture et à cause de ces fortes liaisons les céramiques possèdent des grandes valeurs de coefficients d'élasticité en comparaisons avec les métaux, les caractéristiques qui rendent fragiles les céramiques sont en même temps celles qui leur confèrent les propriétés désirées de dureté, réfractarité et résistance chimique. [Aliprandi.1979]

CHAPITRE III : ESSAIS ET MATERIAUX UTILISES

❖ Propriétés thermiques

▪ Température de fusion

Les céramiques possèdent une température de fusion très élevée qui peut dépasser 2000 °C à cause de ses liaisons chimiques qui sont fortes (Tableau.III.12.).

Tableau.III.12. Valeur de température de fusion (T_f) de quelques céramiques [Philibert.J.1985]

Oxydes	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	TiN	SiO ₂
T_f (°C)	2070	2640	2625	2950	1700

❖ Conductibilité thermique

En général, les céramiques sont considérées comme des isolants thermiques à cause de l'absence totale des électrons libres et la nature des liaisons chimiques, la conductibilité dépend de la composition chimique de l'état d'agrégation et de la température, elle dépend aussi considérablement de la forme, de la grosseur, de l'orientation et de la répartition des pores.

Des considérations purement théoriques, il résulte que tandis que dans les substances vitreuses la conductibilité thermique croît avec la température mais dans les corps cristallins au contraire elle est inversement proportionnelle à la température.

❖ Propriétés électroniques

Les céramiques contiennent trois catégories des matériaux, isolants, semi-conducteurs et autres conducteurs mais en général la plupart des céramiques sont des isolants et leurs conductivités sont faibles par rapport aux métaux à cause de la nature des liaisons et l'absence des électrons libres. [Philibert.J.1985]

❖ Propriétés optiques

La couleur est l'une des propriétés optiques les plus importantes qui permet aux céramiques d'être utilisées dans diverses applications tels que les pigments dans les matériaux produits et utilisés à basse températures.

La couleur résulte de l'absorption des proches longueurs d'onde des radiations à l'intérieur de la région visible. Elle peut être due aussi à la non stoechiométrie dans la structure, certains ions peuvent être de couleurs différentes dues à leur position dans la structure atomique et des ions adjacents.

L'ion Cr⁺³ produit une couleur dans le Cr₂O₃ et les couleurs émeraude et rouge respectivement dans le spinelle et le rubis.

c. Classification des céramiques

Les céramiques sont classées selon les qualités suivantes :

- Terre cuite : Briques, tuiles, poteries, conduits de fumée, tuyau de drainage, etc. ;
- Faïence : équipement sanitaire, vaisselle, carreaux, etc. ;
- Grès : Carreaux de sol, appareil de chimie, équipement sanitaire, etc. ;
- Porcelaine : Vaisselle, appareil de chimie, isolateur électrique, etc. ;

CHAPITRE III : ESSAIS ET MATERIAUX UTILISES

- Produits réfractaires : application dans l'industrie thermique, etc. ;
- Céramiques techniques : Semi-conducteur, outils de coupe, pièces chaudes de moteurs.

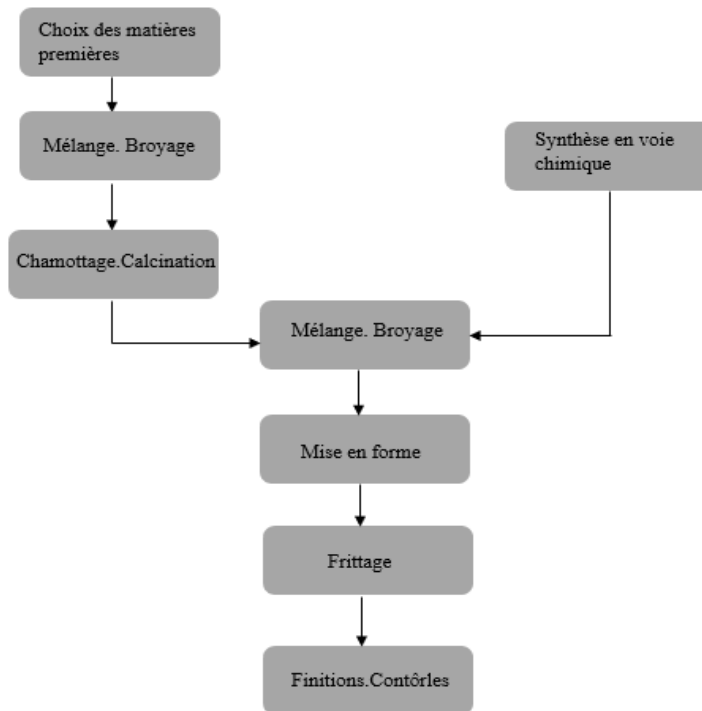


Figure.III.14. Différentes étapes d'élaboration des céramiques [Haussonne.F.1996]

III.3.2.3. Préparation des déchets céramiques

La céramique utilisée pour les expériences effectuées au niveau de laboratoire ; se présente se forme d'un déchet qui nous allons broyer et tamiser par le tamis numéro 5 mm.



Figure.III.15. Préparation des déchets de céramique

III.3. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans cette étude, Il s'agit de l'argile et des ajouts : marc de café et déchet de céramique.

- Le but de ce chapitre est de déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques du sol a étudié. D'après les résultats des analyses granulométriques, le sol d'EL Hadaik est constitué de

CHAPITRE III : ESSAIS ET MATERIAUX UTILISES

81% d'éléments inférieurs à 80 μm , ce qui confirme que c'est une argile limoneuse légèrement sableuse à sableuse.

- Les essais des limites d'Atterberg, l'essai Proctor et l'essai CBR ont classé le sol étudié comme argile très plastique et gonflant. Sa teneur en eau naturelle est 16.22% et sa densité sèche maximale est 1.43 (t/m^3).
- Les résultats des différents essais réalisés seront présentés et discutés dans le chapitre suivant (chapitre IV).

**CHAPITRE IV :
RESULTATS ET
INTERPRETATIONS**

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1. Introduction

Ce chapitre présente les différents résultats obtenus lors des essais conduits en laboratoire des travaux publics de l'Est (L.T.P.E) Skikda, sur l'argile de El Hadaik, Skikda selon le mode opératoire résumé dans le chapitre III. Le premier essai était l'essai de compactage (Proctor) afin de déterminer la variation de la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale avec les différents pourcentages des ajouts (marc de café, déchet de céramique). Le deuxième essai est l'essai de CBR après immersion a pour but d'étudier l'influence de traitement utilisé sur l'indice CBR et le gonflement. Ces résultats sont représentés sous forme des tableaux et des courbes.

IV.2. Le choix des ajouts utilisées

Le choix des ajouts utilisées marc de café (MC) et déchet de céramique (DC) dépend de plusieurs paramètres tels que :

- Avantages économiques : faible coût, renouvelable, biodégradable ;
- La disponibilité des ajouts à utiliser ;
- Les avantages environnementaux : limiter les quantités de déchet de la céramique ; marc de café jeté chaque année, et protégé les espaces de la pollution qui influent sur la santé des habitants.

IV.3. Préparation de mélange

Dans cette étude, l'argile collectée de la région de El Hadaik wilaya de Skikda est traitée par deux ajouts : le marc de café et les déchets de céramiques.

La méthode utilisée pour la préparation des mélanges (argile + marc de café, argile + déchet de céramique) est simple, elle nécessite un matériel de laboratoire approprié (bacs, petite pelle, étuve, balance électrique, tamis 5 mm) (Figure.IV.1.).

En divisant le sol à des quantités égales dont le poids. Le malaxage fait par couche, le mélange est mis dans un bac puis malaxé avec l'eau manuellement jusqu'à ce que le mélange devienne homogène. [Mellal.2009]



Figure.IV.1. Préparation du Mélange (A+MC) et (A+DC)

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.4. Essais Proctor (NF P 94-093)

IV.4.1. Présentation des résultats du mélange (A+MC)

Les paramètres de compactage ont été déterminée à (L.T.P.E) Skikda, selon le mode opératoire résumé dans le chapitre III, pour l'argile non traitée ainsi que l'argile traitée à des pourcentages de 0.5%,02% et 04% de marc de café. [Yassmine.R et al.2022]

- La courbe de compactage est obtenue à partir des données lors de l'essai Proctor sur le mélange (A+0.5%MC). A partir de la figure.IV.2, on peut déduire une densité sèche maximale de 1.48 t/m³ qui correspondent à une teneur en eau de 16.03%.

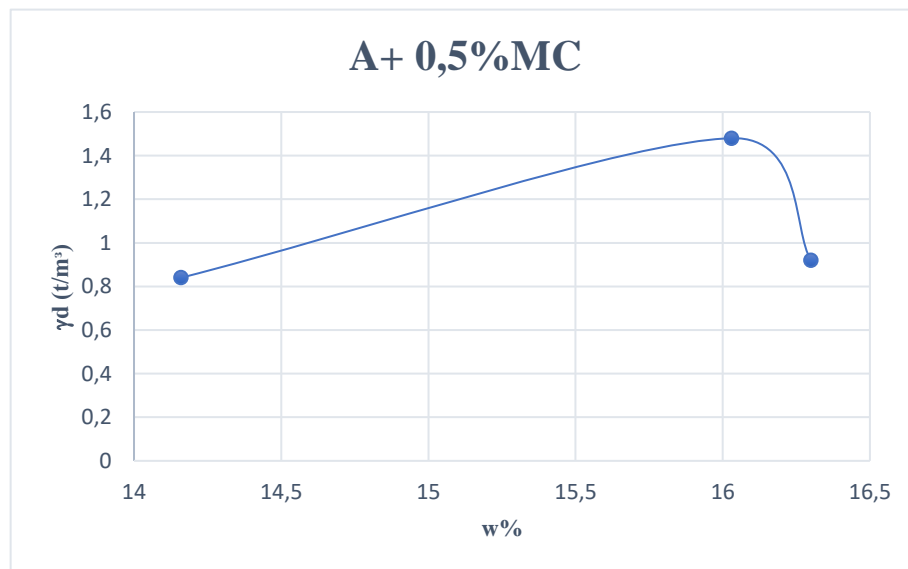


Figure.IV.2. Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (A+0.5%MC)

- La courbe de compactage est obtenue à partir des données lors de l'essai Proctor sur le mélange (A+02%MC). A partir de la figure.IV.3, on peut avoir les paramètres fondamentaux de cet essai, qui sont la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale respectivement (17.07%,1.46 t/m³)).

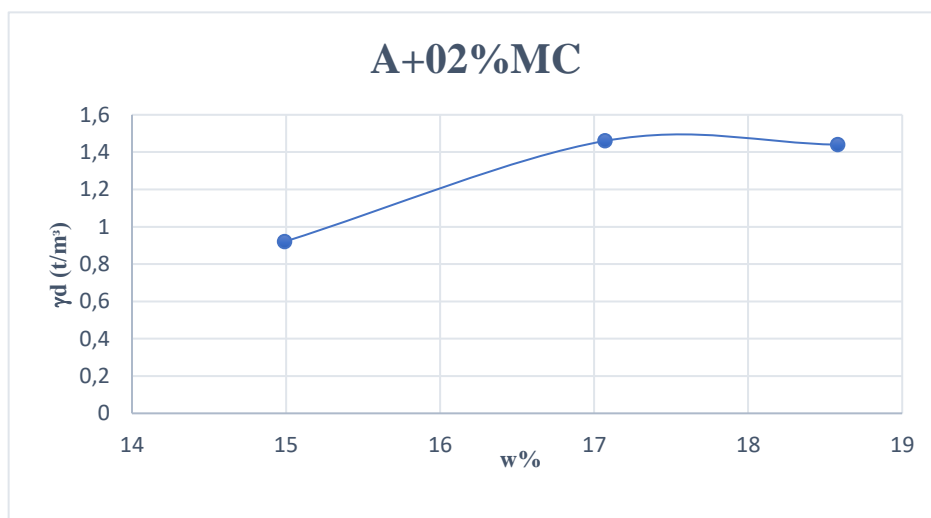


Figure.IV.3. Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (A+02%MC)

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

- A partir de la figure.IV.4, on peut déduire la densité sèche maximale $1.42 \text{ (t/m}^3\text{)}$ qui correspondant à une teneur en eau de 18.17% . La courbe de compactage est obtenue à partir des données lors de l'essai sur le mélange (A+04%MC).

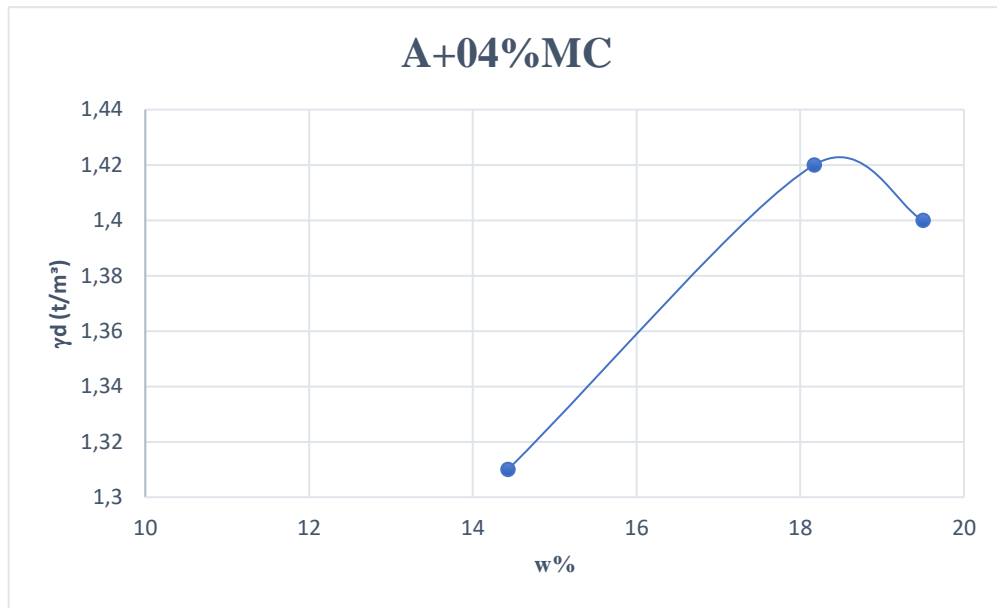


Figure.IV.4. Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (A+04%MC)

Les résultats expérimentaux concernant les caractéristiques de compactage Proctor sont présentés dans le tableau.IV.1.

Tableau.IV.1. Variation de caractéristiques de compactage pour le mélange (A+%MC)

Désignation	Caractéristiques de compactage	
	Teneur en eau optimale $W_{opt}\%$	Densité sèche maximale γ_d (t/m^3)
100%A	16.22	1.43
A+0.5%MC	16.03	1.48
A+02%MC	17.07	1.46
A+04%MC	18.17	1.42

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

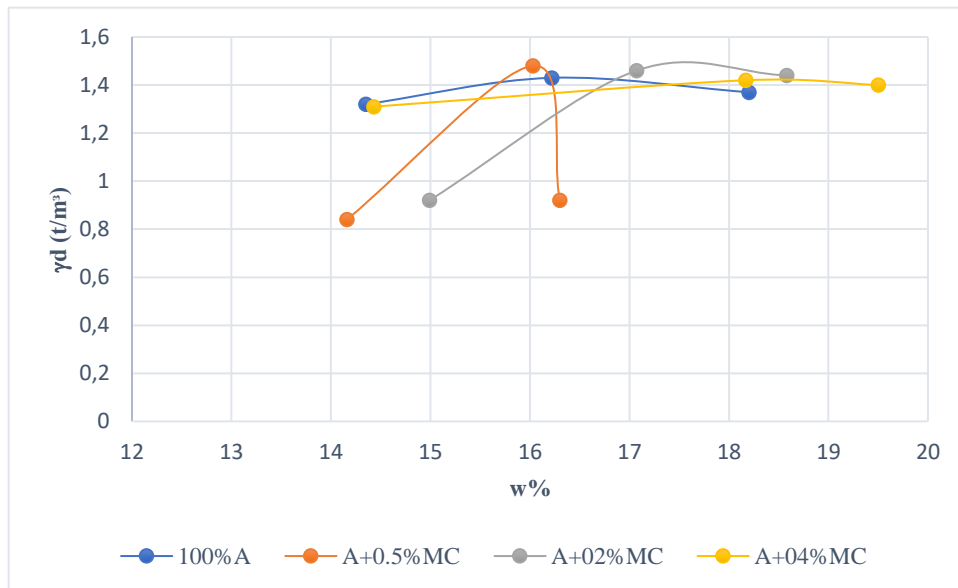


Figure.IV.5. Influence du marc de café sur la courbe de compactage.

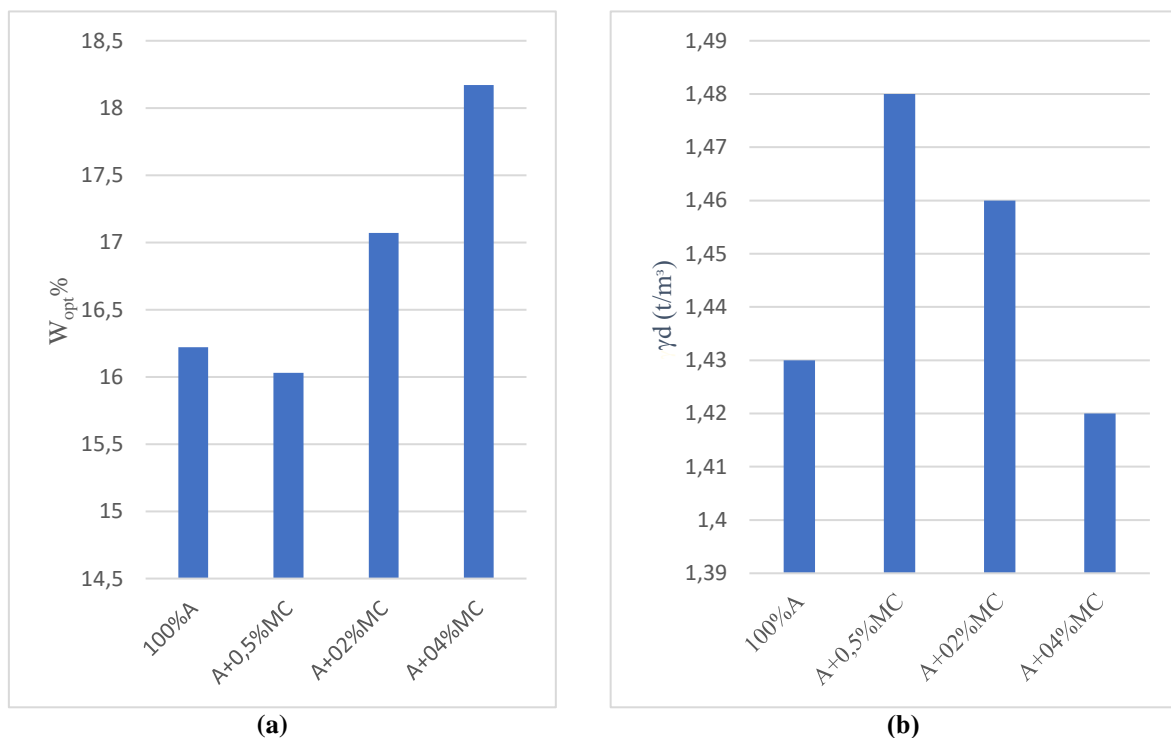


Figure.IV.6. (a) : Influence du marc de café sur $W_{opt}\%$, (b) : Influence du marc de café sur γ_{dmax} (t/m^3)

La Figure.IV.6 indique une augmentation de la densité sèche maximale initial de $1.43 t/m^3$ à $1.48 t/m^3$ avec une réduction de la teneur en eau initial de 16.22% à 16.03% , cette réduction peut être influée par l'effet chimique et physique de l'ajout de marc de café ajouté, ou la porosité dans le sol diminue à cause de l'hydratation du marc de café ce qui engendre un échantillon de sol plus dense.

L'augmentation du taux de 0.5% à 4% du teneur en marc de café provoque une réduction la densité sèche maximale respectivement de $1.48 t/m^3$ à $1.42 t/m^3$. Mais fait augmenter la teneur en eau optimale de 16.03% jusqu' à 18.17% , un comportement similaire a été observé par différents chercheurs qui ont réalisés le même essai avec d'autres ajouts Koliyas.S 2005 , Al Rawas.A.A 2006, Ansary.M.A 2006 Kavak.A 2007 , Khatlab.S.A.A 2008.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Cela est interprété par l'agglomération des particules d'argile qui provoque la visualisation des vides, donc teneur en eau optimum augmente pour les remplir, et par cela il est permis d'accroître la portance du sol en diminuant les pores.

IV.4.2. Présentation des résultats du mélange (A+DC)

Les paramètres de compactage ont été déterminée pour l'argile traitée à des pourcentages de 05% ;10% et 15%. [Hamla.W et al.2017]

- La courbe de compactage est obtenue à partir des données lors de l'essai Proctor sur le mélange (A+05%DC). A partir de la figure.IV.7 on peut avoir les paramètres fondamentaux de cet essai, qui sont la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale respectivement (13.74%,1.71 (t/m³)).

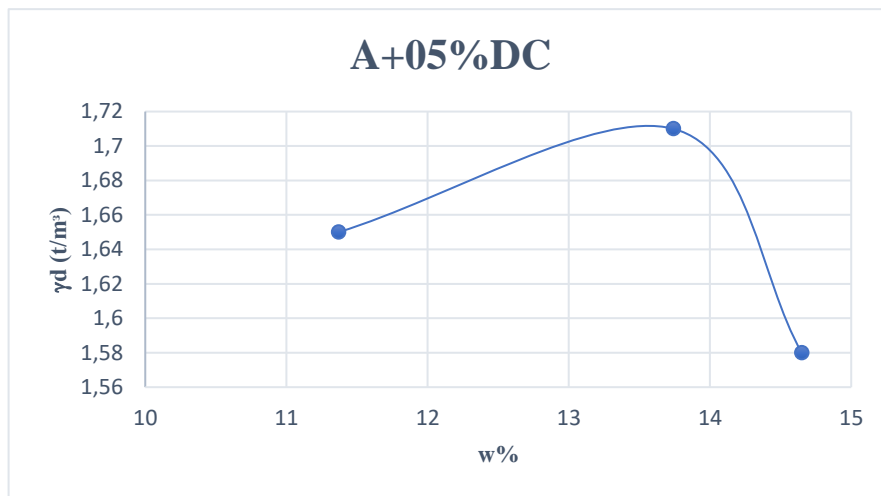


Figure.IV.7. Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (A+05%DC)

- A partir de la figure.IV.8, on peut déduire la densité sèche maximale 1.61 (t/m³) qui correspondant à une teneur en eau de 9.64%. La courbe de compactage est obtenue à partir des données lors de l'essai sur le mélange (A+10%DC).

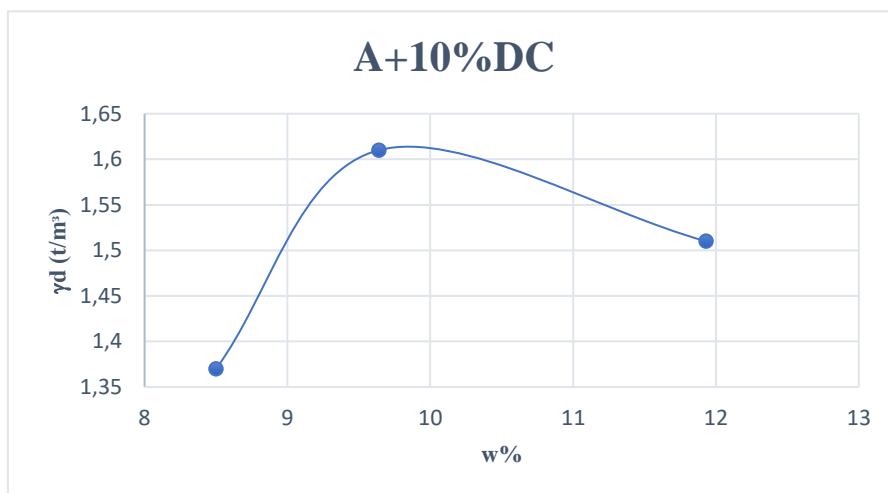


Figure.IV.8. Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (A+10%DC)

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

- La courbe de compactage est obtenue à partir des données lors de l'essai Proctor sur le mélange (A+15%DC). A partir de la figure.IV.9, on peut déduire une densité sèche maximale de 1.68 (t/m^3) qui correspond à une teneur en eau de 14.50%

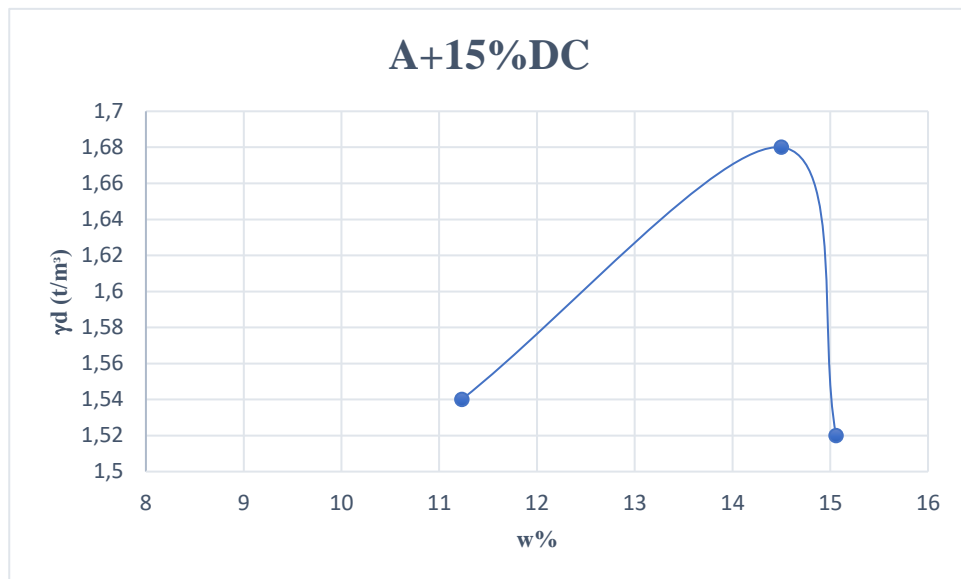


Figure.IV.9. Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (A+15%DC)

Tableau.IV.2. Variation de caractéristiques de compactage pour le mélange (A+%DC)

Désignation	Caractéristiques de compactage	
	Teneur en eau optimale $W_{opt}\%$	Densité sèche maximale γ_d (t/m^3)
100%A	16.22	1.43
A+05%DC	13.74	1.71
A+10%DC	9.64	1.61
A+15%DC	14.50	1.68

Les résultats obtenus (Figure.IV.10.) ont montré que l'addition de différents teneurs en déchet de céramiques augmente la densité sèche max γ_{dmax} , en réduise la teneur en eau optimale $W_{opt}\%$.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

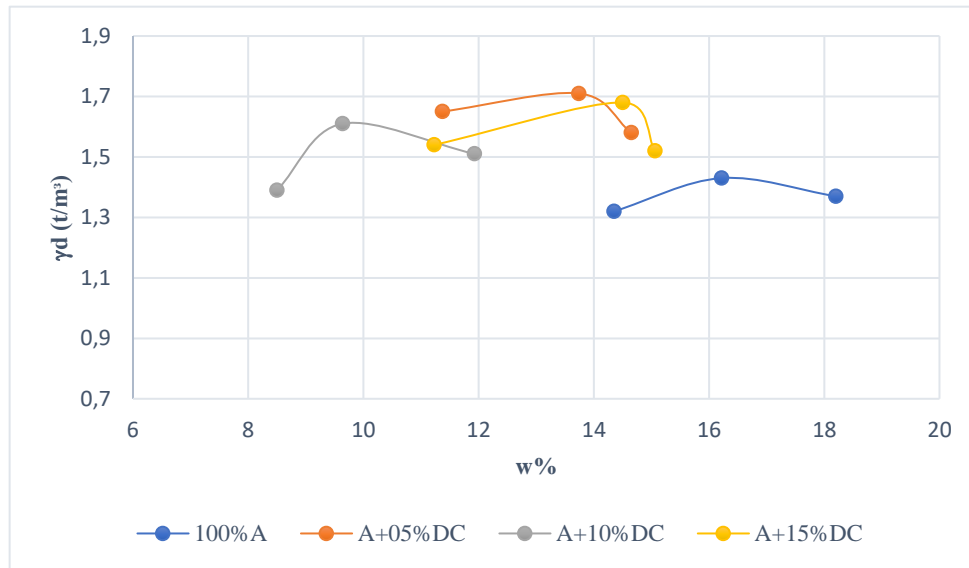


Figure.IV.10. Influence du déchet de céramique sur la courbe de compactage.

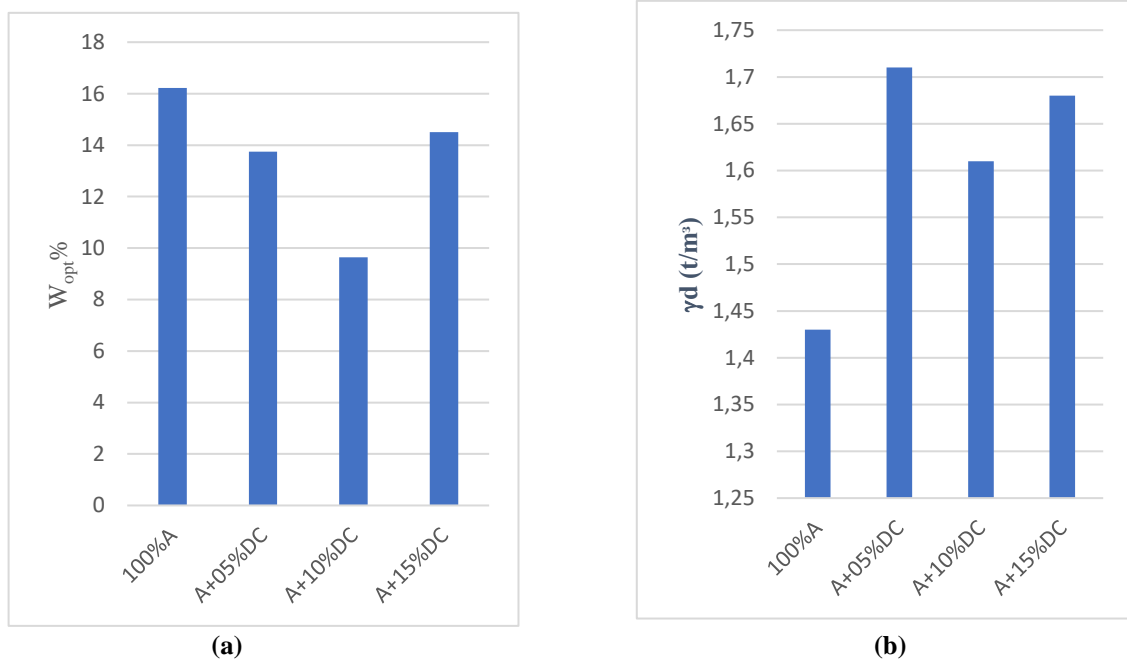


Figure.IV.11. (a) : Influence du déchet de céramique sur $W_{opt}\%$, (b) : Influence du déchet de céramique γ_{dmax} (t/m^3)

D'après la figure.IV.11, on constate que l'accroissement du pourcentage de céramique de 0% à 15% conduit à une augmentation de la densité sèche maximale respectivement de $1.43(t/m^3)$ à $1.68(t/m^3)$, et aussi conduit à une diminution de la teneur en eau optimale respectivement de 16.22% à 14.50%.

Ce comportement est semblable à un sol fin traité avec du ciment. Généralement, la stabilisation du sol argileux par l'addition de céramique a montré une diminution de la teneur en eau optimale et une augmentation de la densité sèche maximale [Hamla.W et al.2017]. Plusieurs chercheurs ont révélé que le changement de la densité sèche maximale se produit en raison de la dimension des particules et des densités spécifiques du sol et des ajouts. [Guedouda et al, 2008 ; Loufi et al, 2012 ; Bahia et al. 2012 ; Ashir Kumar Bera,2011].

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.5. Essai CBR après immersion (NF P94-078)

IV.5.1. Présentation des résultats du mélange (A+MC)

L'indice CBR a été déterminé à (L.T.P.E) Skikda, selon le mode opératoire résumé dans le chapitre III, pour l'argile non traitée ainsi que l'argile traitée à des pourcentages de 0.5%,2%,4% de marc de café. [Yassmine.R et al.2022]

- Le test CBR de sol non traité a permis la construction de courbe de la figure.IV.12 à partir des données, montre une valeur d'indice CBR de 0.546 et un gonflement de 5.70%.

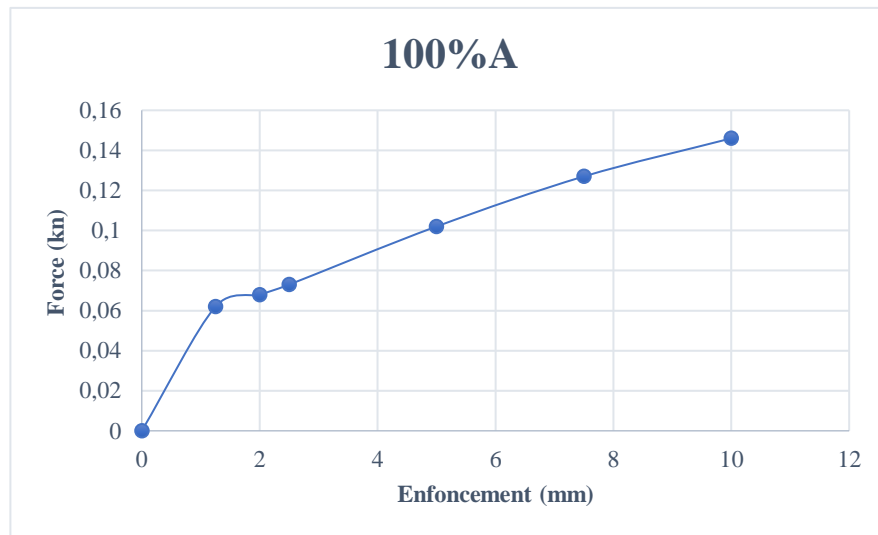


Figure.IV.12. Variation d'enfoncement en fonction de la force (100%A)

- A partir des données obtenues lors du test CBR après immersion sur le mélange (A+ 0.5% MC), permis de tracer la courbe illustrée ci-dessous (Figure.IV.13), cette dernière montre une valeur d'indice CBR de 0.516 et un gonflement de 5.27%.

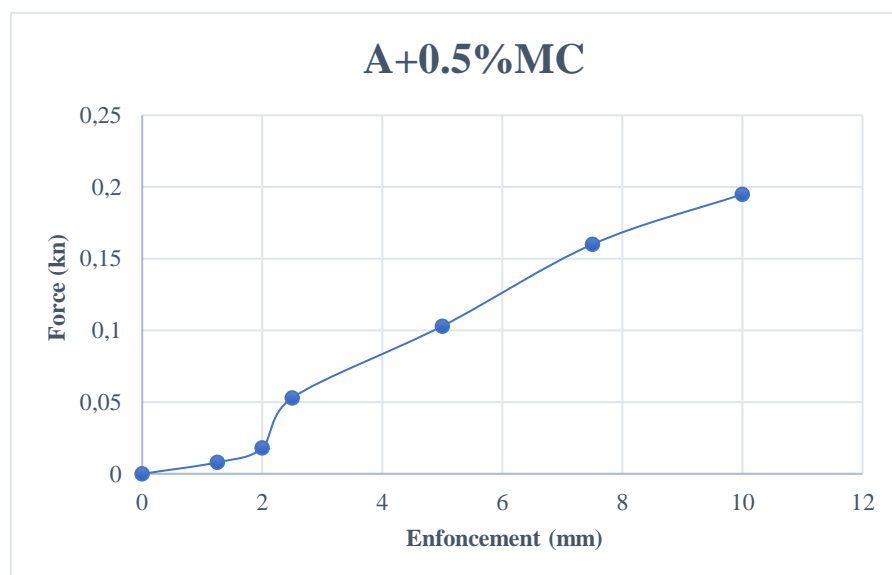


Figure.IV.13. Variation d'enfoncement en fonction de la force (A +0.5% MC)

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

- La figure.IV.14 montre une valeur d'indice CBR estimée à 1.168 et correspond à une valeur de gonflement de 5.68%, ces résultats obtenus pour le mélange de (A +02% MC) à partir du test CBR après immersion.

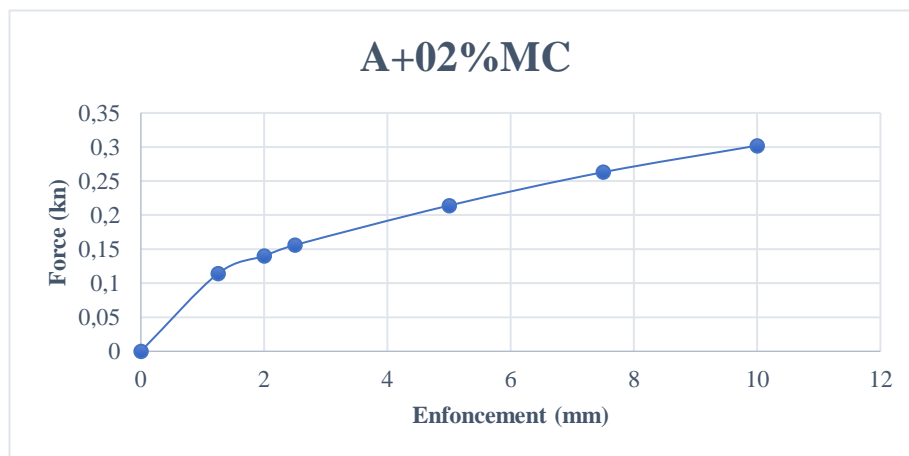


Figure.IV.14. Variation d'enfoncement en fonction de la force (A +02% MC)

- La figure.IV.15 représentant la variation de l'enfoncement en fonction de la force, pour le mélange (A+ 4% MC), cette courbe montre une valeur d'indice CBR de 0.846 et une valeur de gonflement de 4.80 %, elle a été tracée à partir des données obtenu l'essai CBR après immersion.

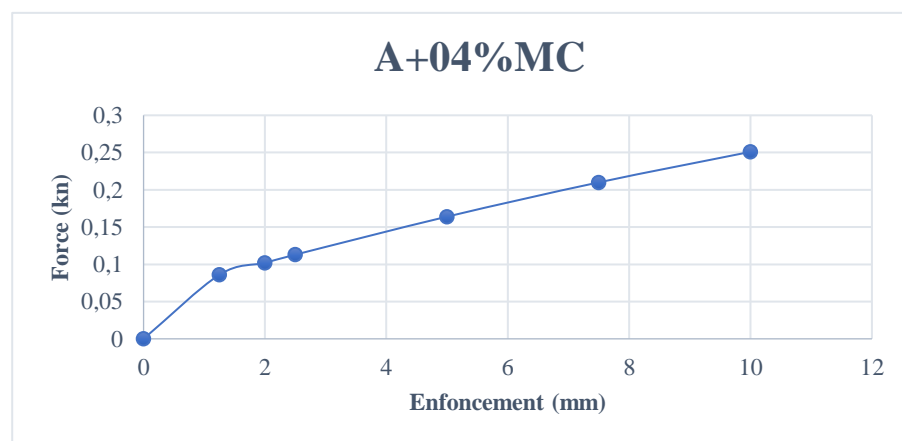


Figure.IV.15. Variation d'enfoncement en fonction de la force (A +04% MC)

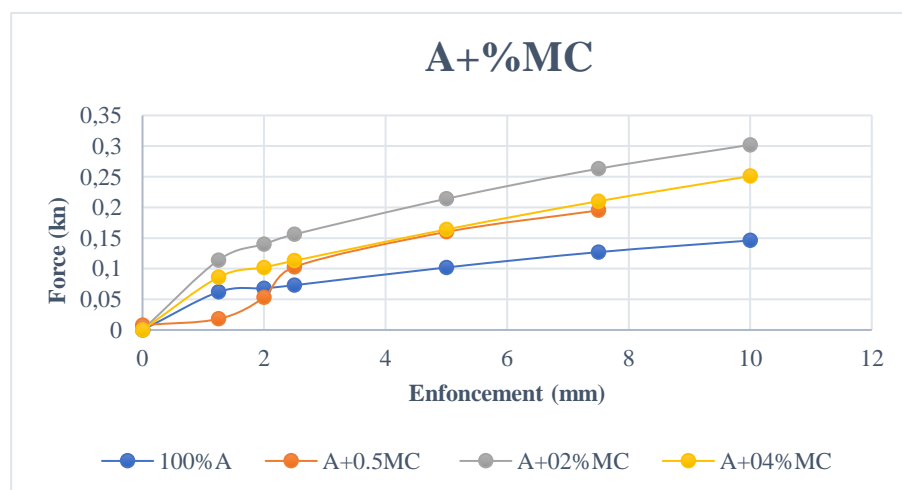


Figure.IV.16. Variation d'enfoncement en fonction de la force (A +%MC)

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Tableau.IV.3. Résultats obtenus de l'essai CBR pour le mélange (A+ MC%)

Désignation	100%A	A +0.5% MC	A +02% MC	A +04% MC
Valeur de l'indice CBR	0.546	0.516	1.168	0.846

A partir des résultats résumés dans le tableau.IV.3 on a élaboré l'histogramme ci-dessous la (Figure.IV.17.) illustrant les variations de l'indice CBR en fonction de la teneur en marc de café.

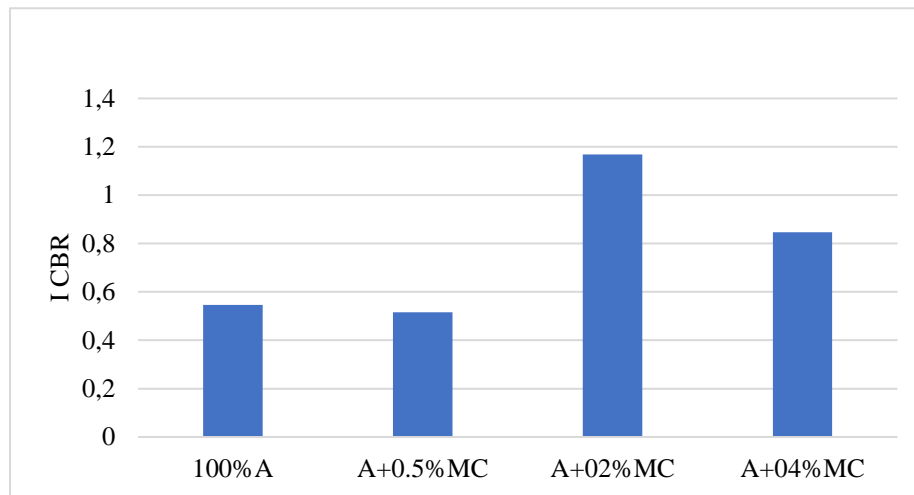


Figure.IV.17. Variation de l'indice CBR en fonction de la teneur en marc de café

On observe qu'avec l'augmentation de taux de 0 à 04% du teneur en marc de café provoque une augmentation de l'indice CBR respectivement de 0.546 jusqu'à 0.846. La valeur de l'indice CBR maximale obtenu pour le sol est à 02% de teneur en marc de café, cette valeur est égale à 1.168.

Tableau.IV.4. Variation de gonflement en fonction de pourcentage de marc de café.

Désignation	100%A	A +0.5% MC	A +02% MC	A +04% MC
Taux de gonflement %	5.70	5.27	5.68	4.80

Les résultats obtenus lors l'essai CBR après immersion résumé dans le tableau.IV.4 a permis de tracer l'histogramme ci-dessous la (Figure.IV.18.) qui montre la variation de gonflement en fonction d'augmentation de la teneur en marc de café.

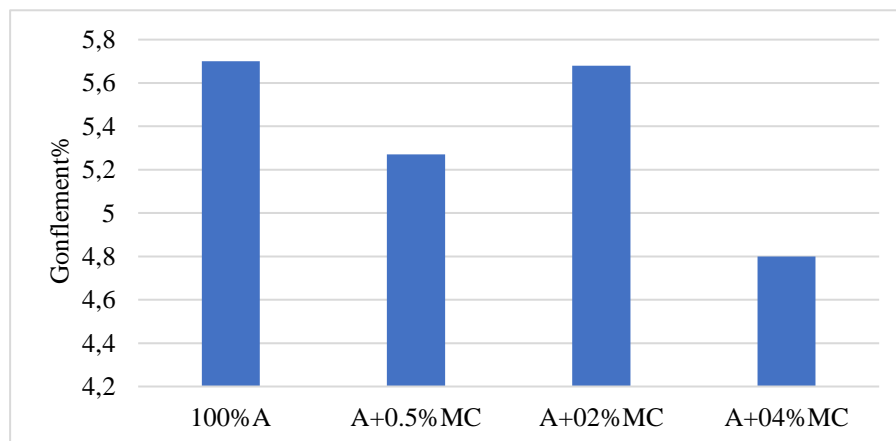


Figure.IV.18. Variation de taux de gonflement en fonction de la teneur en marc de café

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

On observe une augmentation du taux de marc de café de 0 à 04% qui provoque une diminution de gonflement respectivement de 5.70 jusqu'à 4.80, ce qui indique l'effet positif de marc de café sur les caractéristiques de gonflement.

Le gonflement peut s'expliquer par le fait que la texture du mélange, avec la diminution des fines et l'ajout d'une proportion du marc de café, contribue à la réduction du gonflement et du retrait du mélange. Cette texture confère une meilleure résistance à l'argile.

Tableau.IV.5. Variation de la teneur en eau après immersion pour le mélange (A + MC%)

Désignation	100%A	A +0.5% MC	A +02% MC	A +04% MC
W% (après immersion)	33.72	29.195	28.7	33.55

L'histogramme ci-dessous (Figure.IV.19.) représente l'influence d'addition de marc de café sur la teneur en eau après immersion, il est obtenu d'après les données de tableau .IV.5.

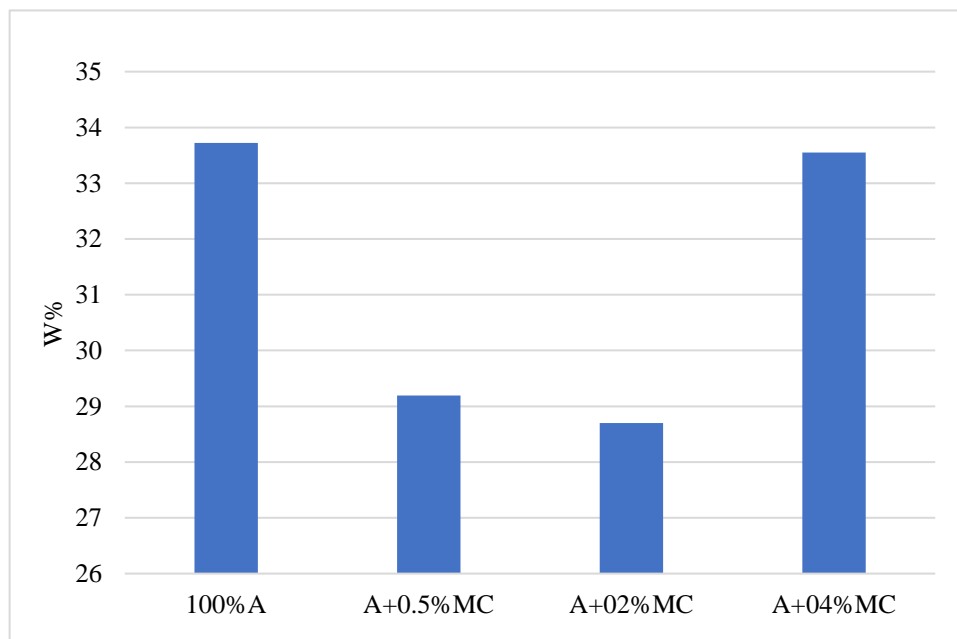


Figure.IV.19. Influence d'addition de marc de café sur la teneur en eau après immersion

L'histogramme illustre une diminution de la teneur en eau après immersion pour le mélange (A+ MC%) par rapport le sol naturel.

IV.5.2. Présentation des résultats du mélange (A+ DC)

D'après le mode d'opérateur résumé dans le chapitre III d'essai CBR après immersion on a déterminé l'indice CBR et le taux de gonflement pour le sol nat traité et le sol traité avec des différent pourcentages de déchet de céramique 05%, 10% et 15%.

Le test CBR de mélange (A+ 05 DC%) a permis de construire la figure.IV.20 à partir des données, cette dernière représente les valeurs fondamentales de cet essai de 1.250 d'indice CBR et un gonflement de 1.18%.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

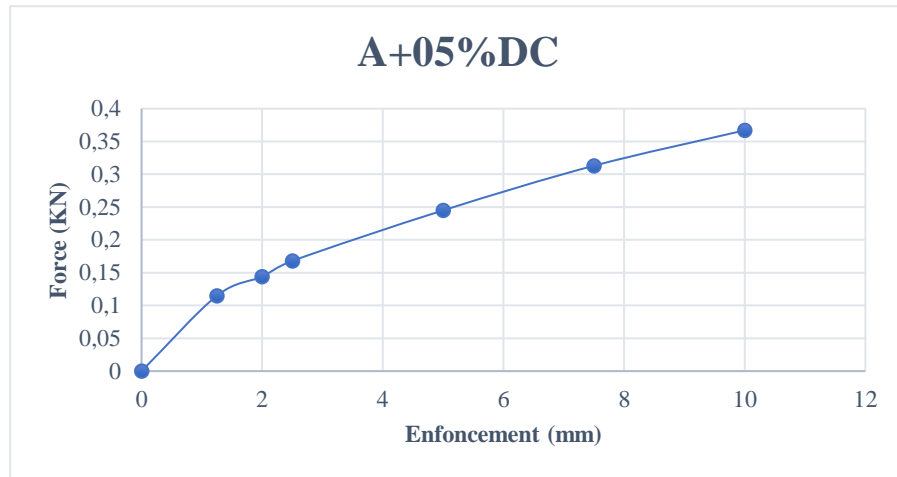


Figure.IV.20. Variation d'enfoncement en fonction de la force (A +05%DC)

La figure.IV.21 représentant la variation de l'enfoncement en fonction de la force, cette courbe montre une valeur d'indice CBR de 1.310 et une valeur de gonflement de 1.22%, tracée à partir des données obtenues lors de l'essai CBR après immersion pour le mélange (A+ 10%DC).

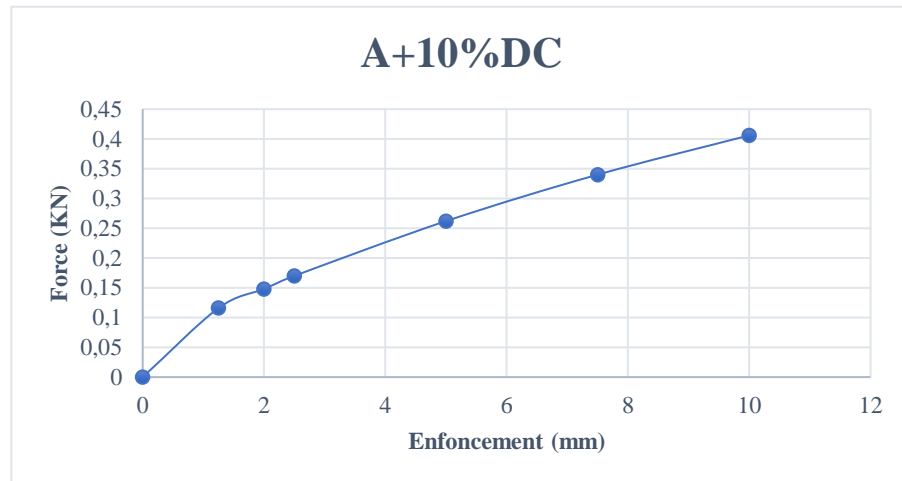


Figure.IV.21. Variation d'enfoncement en fonction de la force (A + 10% DC)

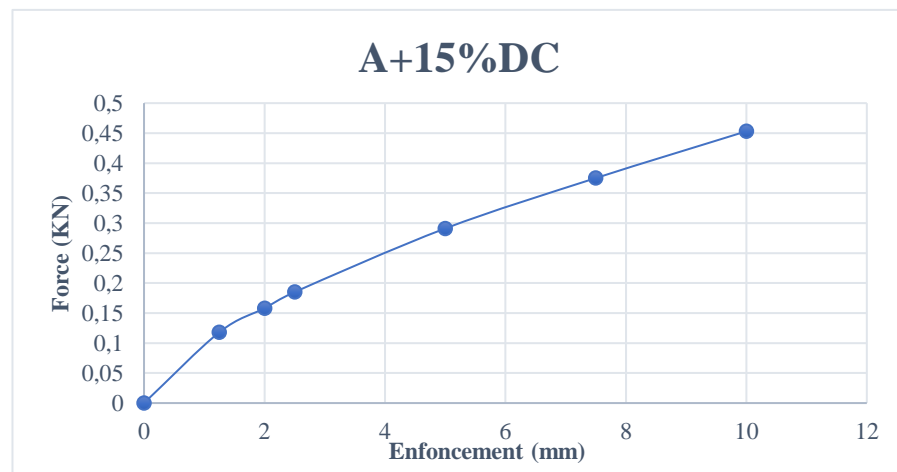


Figure.IV.22. Variation d'enfoncement en fonction de la force (A +15% DC)

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

A partir des données obtenues lors du test CBR après immersion sur le mélange (A+ 15% MC), permis de tracer la courbe illustrée ci-dessous (Figure.IV.22.), cette dernière montre une valeur d'indice CBR de 1.460 et un gonflement de 1.291%.

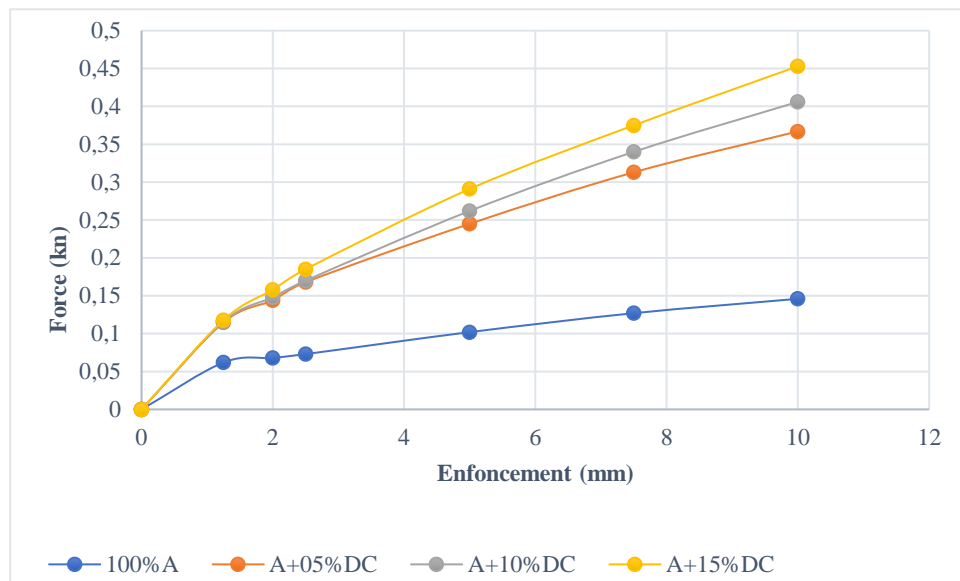


Figure.IV.23. Variation d'enfoncement en fonction de la force (A +%DC)

Tableau.IV.6. Résultats obtenus de l'essai CBR pour le mélange (A + DC%)

Désignation	100% A	A +05% DC	A +10% DC	A +15% DC
Valeur de l'indice CBR	0.546	1.25	1.31	1.46

Le tableau.IV.6, résume les résultats obtenus lors l'essai CBR après immersion pour le mélange (A + DC%) ces résultats permis à tracer l'histogramme indiqué ci-dessous (Figure.IV.24.) qui illustre l'influence d'addition de déchet de céramique sur l'indice CBR de l'argile étudiée.

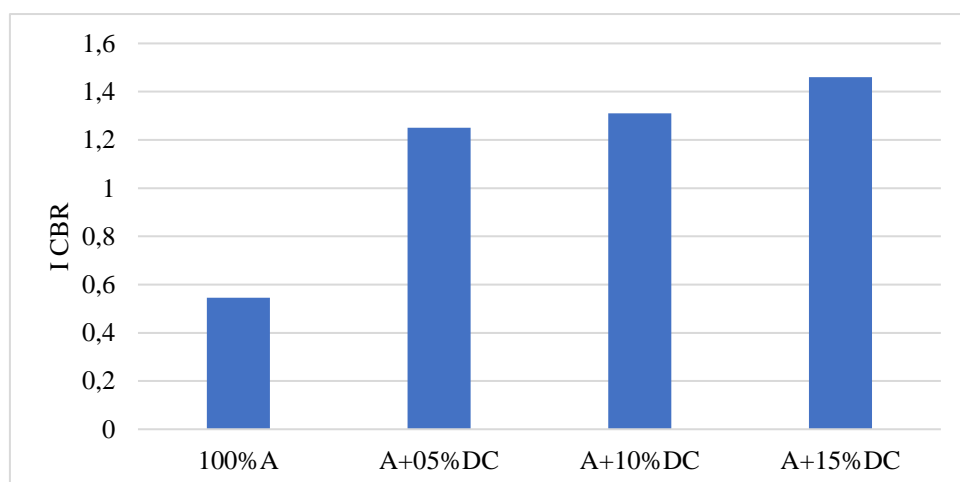


Figure.IV.24. Influence d'addition de déchet de céramique sur l'indice CBR d'argile étudiée

Le déchet de céramique influé positivement sur le résultat CBR, on montre qu'il y a une tendance générale d'augmenter des valeurs de CBR de 0.546 à 1.460 avec l'augmentation de taux de déchet de 0% à 15%.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

L'amélioration de la portance du sol traitée (augmentation de CBR) est justifiée par la diminution du volume des vides dans le sol qui est due à la bonne distribution des particules du sol avec les particules de céramique.

Tableau.IV.7. Variation de gonflement en fonction de pourcentage de céramique

Désignation	100% A	A +05% DC	A +10% DC	A +15% DC
Taux de gonflement %	5.7	1.18	1.22	1.291

Les résultats obtenus lors l'essai CBR après immersion résumé dans le tableau.IV.7 a permis de tracer l'histogramme ci-dessous (Figure.IV.25.) qui montre la variation de gonflement en fonction d'augmentation de la teneur en déchet de céramique.

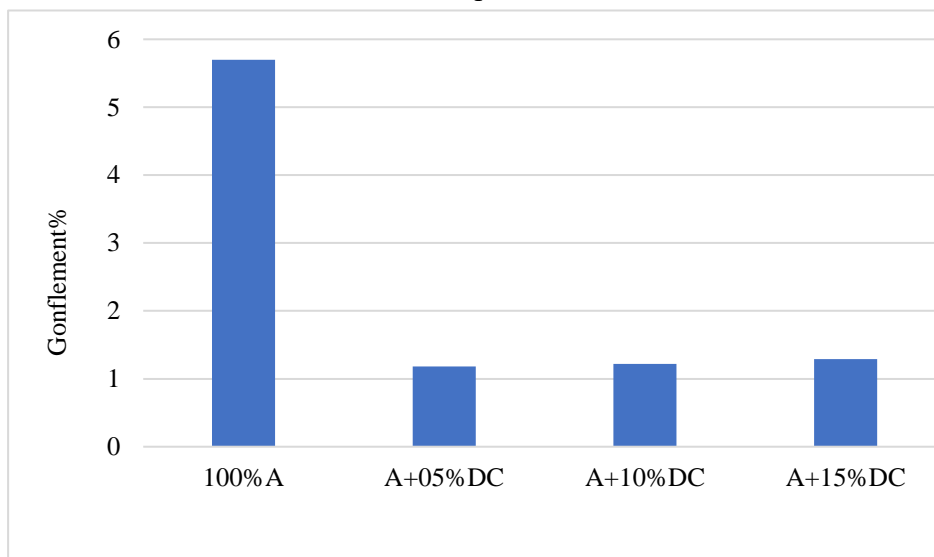


Figure.IV.25. Influence d'addition de déchets de céramique sur le taux de gonflement

La figure.IV.25. illustre la variation de gonflement du sol en fonction de la teneur en céramique. Les résultats obtenus montrent que les valeurs de gonflement diminuent considérablement

L'accroissement du pourcentage de céramique de 0 % à 15 % conduit à une diminution de gonflement respectivement de 5.70 % à 1.291%.

Tableau.IV.8. Variation de la teneur en eau après immersion en fonction de teneur en déchet de céramique

Désignation	100%A	A +05% DC	A +10% DC	A +15% DC
W% (après immersion)	33.72	23.08	24.56	24,68

D'après les données résumées dans le tableau.IV.8 on a obtenu l'histogramme illustrer ci-dessous qui montre l'influence d'addition des déchet de céramique sur la teneur en eau après immersion.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

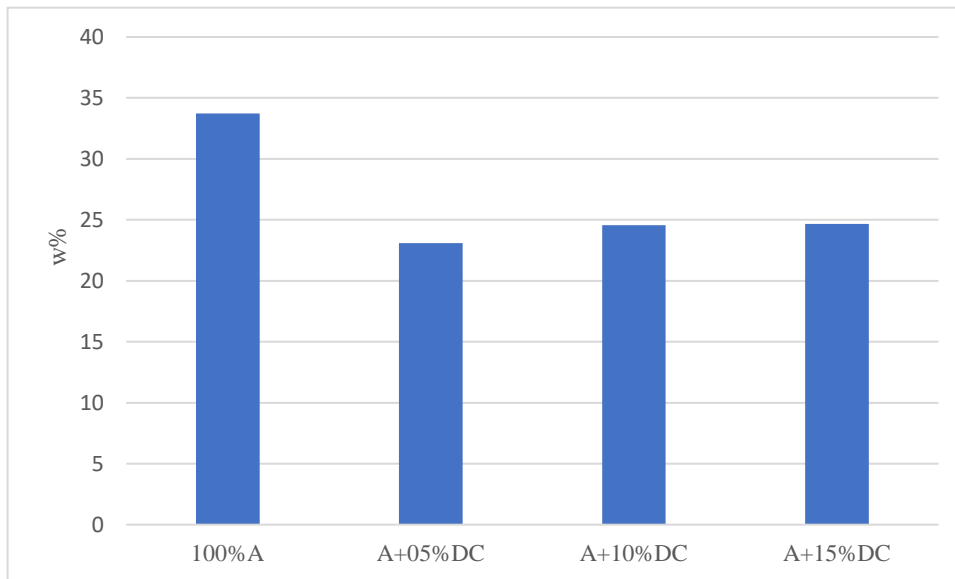


Figure.IV.26. Variation de la teneur en eau après immersion en fonction de teneur en déchet de céramique

- D'après l'histogramme de la figure IV.26, on observe une diminution de la teneur en eau après immersion avec l'addition des déchets de céramique

Le tableau.IV.9, résume tous les résultats obtenus d'après les essais de laboratoire qui consiste l'essai Proctor et l'essai CBR après immersion, ces résultats permis de construire les histogrammes illustrer ci-dessous pour les mélanges (A+MC%) et (A+DC%).

Tableau.IV.9. Synthèse des résultats d'essai Proctor et CBR

Ajout	γ_{dmax} (t/m ³)	W _{opt} %	ICBR	Gonflement%	W% (après immersion)
0%	1.43	16.22	0.546	5.70	33.72
MC 0.5%	1.48	16.03	0.516	5.27	29.195
MC 02%	1.46	17.07	1.168	5.68	28.70
MC 04%	1.42	18.17	0.846	4.80	33.55
Céramique 05%	1.71	13.74	1.250	1.18	23.08
Céramique 10%	1.61	9.64	1.310	1.22	24.56
Céramique 15%	1.68	14.50	1.460	1.291	24.68

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

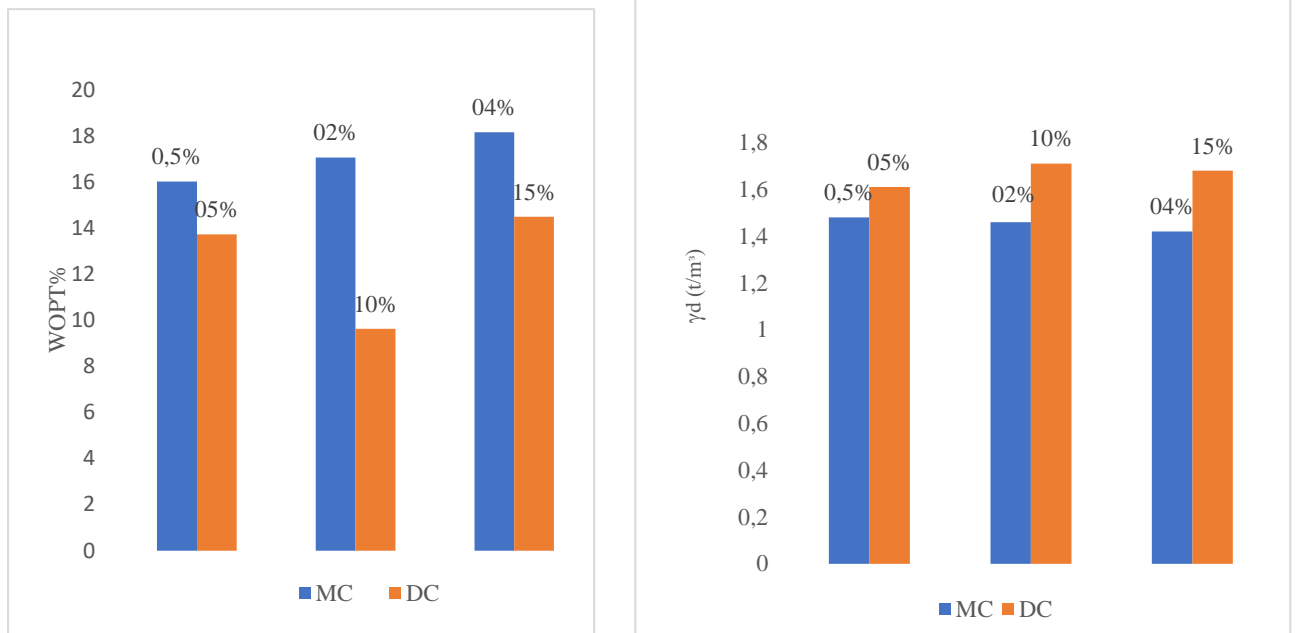


Figure.IV.27. Résultat essai Proctor (différent pourcentage de déchet de céramique et marc de café)

- D'après la figure IV.27, on remarque que les valeurs de teneur en eau optimale de (argile + marc de café) sont supérieures aux valeurs de teneur en eau optimale de mélange (argile + déchet de céramique), contrairement aux valeurs de la densité sèche maximale.

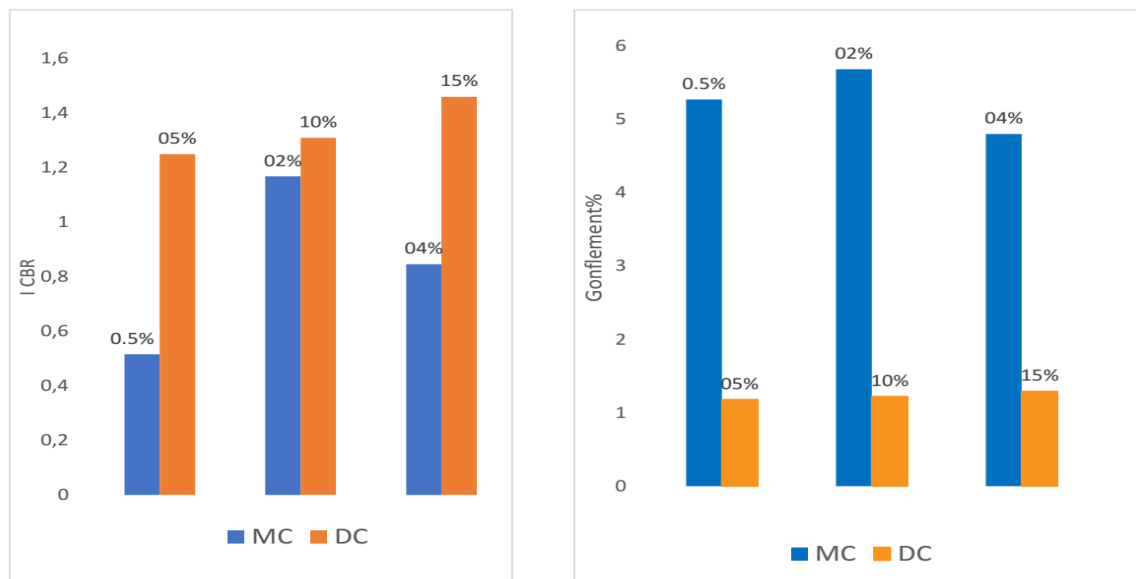


Figure.IV.28. Résultat essai CBR (différent pourcentage de déchet de céramique et marc de café)

- D'après la figure IV.28, on remarque que les valeurs d'indices CBR de (argile + déchet de céramique) sont supérieures aux valeurs de l'indice CBR (argile + marc de café), contrairement aux valeurs de gonflement.

IV.6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier la possibilité d'améliorer les propriétés mécaniques d'argile de la région El Hadaik, en incorporant deux types d'ajouts (marc de café et déchet de céramique).

Les résultats de cette étude expérimentale nous ont permis de dégager les principales conclusions suivantes :

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

- ✓ La stabilisation de sol argileux par l'addition de marc de café provoque une diminution de la densité sèche maximale tous en augmentant la teneur en eau optimale
- ✓ En fonction de pourcentage de déchet de céramique, une augmentation de la densité sèche maximale a été observé avec une réduction de la teneur en eau initial.
- ✓ L'addition de marc de café et déchet de céramique provoque une augmentation de l'indice CBR avec une réduction de gonflement.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le traitement des sols argileux a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour avoir des solutions qui minimisent le phénomène de gonflement.

Le choix des techniques de traitement les plus utilisées dépend de plusieurs paramètres tels que : les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à étudier l'effet de marc de café et les déchets de céramique, sur les propriétés mécaniques et physiques d'un sol argileux.

La démarche expérimentale a été effectuée dans laboratoire des travaux publics de l'Est (L.T.P.E) Skikda, comprenant une série d'essais mécanique et physique (Analyse granulométrique, limite d'Atterberg, Proctor et CBR).

Les principales conclusions qui l'on peut tirer à partir de cette étude sont :

- Les essais d'identification a permis de classer le sol de la région de El Hadaik de la Wilaya de Skikda comme une argile limoneuse légèrement sableuse à sableuse, très plastique et gonflant. Sa teneur en eau naturelle est 16.22% et sa densité sèche maximale est 1.43 t/m³.
- L'addition de marc de café provoque une augmentation de la densité sèche maximale initial de 1.43 t/m³ à 1.48 t/m³ avec une réduction de la teneur en eau initial de 16.22% à 16.03%, cette réduction peut être influée par l'effet chimique et physique de l'ajout de marc de café ajouté, ou la porosité dans le sol diminue à cause de l'hydratation du liant ce qui engendre un échantillon de sol plus dense.
- L'augmentation du taux de 0.5% à 4% du teneur en marc de café provoque une réduction la densité sèche maximale. Mais fait augmenter la teneur en eau optimale, un comportement similaire a été observé par différents chercheurs qui ont réalisés le même essai avec d'autres ajouts Koliass 2005 , Al Rawas.A.A 2006, Ansary.M.A 2006 Kavak.A 2007 , Khattab.S.A.A 2008.Cela est interprété par l'agglomération des particules d'argile qui provoque la visualisation des vides, donc la teneur en eau optimum augmente pour les remplir, et par cela il est permis d'accroître la portance du sol en diminuant les pores.
- L'augmentation de taux de 0% à 04% du teneur en marc de café provoque une augmentation de l'indice CBR. Ainsi le traitement du sol avec 02% de marc de café permet la meilleure amélioration sur la caractéristique du la portance de CBR.
- L'augmentation du taux de 0% à 04% de marc de café provoque une diminution de gonflement respectivement de 5.70% jusqu'à 4.80%, ce qui indique l'effet positif de marc de café sur les caractéristiques de gonflement.
- L'addition des déchets de céramique conjointement à l'argile influé sur les caractéristiques de compactage. Il augmente de la densité sèche maximale avec une réduction de la teneur en eau initial. Plusieurs chercheurs ont révélé que le changement de la densité sèche maximale se produit en raison de la dimension des particules et des densités spécifiques des ajouts. [Guedouda et al, 2008 ; Loufi et al, 2012 ; Bahia et al. 2012 ; Ashir Kumar Bera,2011].
- L'augmentation de taux de 05% à 10% de déchet de céramique provoque une augmentation de l'indice CBR. Ainsi le traitement du sol avec 15% de déchet de céramique permet la meilleure amélioration sur la caractéristique du la portance de CBR.
- L'augmentation de la teneur en déchet de céramique a un impact positif sur le gonflement, où nous avons constaté une diminution notable du taux de gonflement.

CONCLUSION GENERALE

- Les valeurs de la densité sèche maximale de mélange (A+DC) sont supérieures aux valeurs la densité sèche maximale de mélange (A+MC), contrairement aux valeurs de la teneur en eau optimale. Aussi les indices CBR de mélange (A+DC) sont supérieures des indices CBR (A+MC), contrairement aux taux de gonflement.

D'après les résultats obtenus on peut dire que l'incorporation de déchet de céramique a eu un effet bénéfique sur les propriétés d'argile étudiée.

Perspectives

- Utilisation d'autre pourcentage de ces déchets et faire un mélange entre les deux ajouts et comparer les résultats ;
- Réalisation de l'essai Triaxiale et l'essai de cisaillement ;
- Étude de la durabilité de sol traité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ali AHMED.R. Étude du phénomène retrait-gonflement des argiles, Mémoire de Magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.2020.

Ait AMRANE.T. Caractérisation de la stabilisation par des plastiques recyclés des sols argileux eaux essais de cisaillement, Mémoire de Magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.2018.

AMIROUCHE.L. Étude 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 Tizi-Ouzou.2011.

ALONSO.E, GENS.A et HIGHT.D.W. Special Problem soils. General Report. Proceedings of the Ninth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Dublin.1987.

ALIPRANDI.G. Matériaux réfractaires et céramiques techniques. Ed. Septima .P.109.1979.

BEKHTI.M. L'étude de stabilisation des argiles gonflantes par ajout de granulats de caoutchouc des pneus usagés. Thèse de doctorat en génie civil (option : Géotechnique et Matériaux). Université DJILALI Liabès.2019.

BELABBACI.Z. Stabilisation Des sols gonflants. Thèse de doctorat Lmd. Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen.2014.

BATTISTA.A. Low-Dimensional Continuous Attractors in Recurrent Neural Networks from Statistical Physics to Computational Neuroscience. Thèse de Doctorat. Université Paris sciences et lettres .2020.

BEN YOUNES.F, BOUZIDI.R. Amélioration des propriétés géotechniques d'une argile par l'ajout des fibres de polypropylène. Mémoire de Master. Université Mohamed Boudiaf.2021.

BRAVO. J, JUANIZ. I, MONENTE .C, CAEMMERER.C, KROH DE PENNA.L.W, M.P et CID.C. Evaluation of spent coffee obtained from the most common coffee makers as a source of hydrophilic bioactive compounds. Journal of agricultural and food chemistry.Vol.60: 12565-12573.2013.

CAILLÈRE, Complété par MITCHELL. La classification des argiles, XXème congrès Géol. Internat. Mexico. P. 1-8.1993.

CHENITIA.A. Étude Des Caractéristiques Mécaniques D'une Argile Naturelle Expansive. Mémoire de Master. Université Mohamed Boudiaf - M'sila.2016.

CHIHEB.M, GRIOU.S. Analyse de la stabilité de la pente en utilisant la modélisation numérique: application au glissement de terrain du centre hospitalier universitaire « ISAAD Hassani » Beni Messous Alger . Mémoire de Master .2018.

DALI-YOUCHEF.Z, BOUABDASSELEM.H et BETTAHAR.N. Élimination des composés organiques par des argiles locales. Comptes Rendus Chimie. 9(10). 1295-1300.2006.

DEGOUTE.G, et ROYET.P. Aide mémoire de mécanique des sol. Edition Engref.2005.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DJEBARI.Z.** Étude sur les problèmes et stabilisations des sols instables. Mémoire de Master. Université Larbi Ben M'Hidi – Oum El Bouaghi.2022.
- DOUAKHA.H, MOHAMEDATNI.H.** Amélioration des sols. Mémoire de Master. Université 8 Mai 1945 de Guelma.2018.
- EL HACHMI.A.** Argile et minéraux argileux : propriétés physico-chimiques et propriétés et propriétés colloïdales. Mémoire Online.2013.
- GRIM R.E.CLAY.** Mineralogy in relation to the Engineering properties of clay materials. Mc Craw Hill. P.204-277.1962.
- GRUNBERGER.D.** Étude expérimentale de l'évolution des microstructures et des propriétés physiques et mécaniques des argiles au cours de la compaction. Thèse université de Montpellier ii. Sciences et techniques du Languedoc.1995.
- GHADJETTI.Z, ZAIDI.S.** Traitement des sols argileux par la chaux et la poudre du déchet de brique rouge. Université 8 Mai 1945 de Guelma.2022.
- HARKATI.M.** Étude paramétrique de la stabilité des talus à l'aide des codes numériques. Mémoire de Magister. Université Kasdi Merbah Ouargla.2019.
- HAFSLA.** Théorie de la Double Couche et Gonflement des Argiles Non Saturées. Revue Scientifique. Algérie Equipement.1998.
- GHAZAL.R.** Traitement d'un sol affaissable par de forte teneur en eau de chets d'aluminiums. Mémoire de Master. Université Mohamed Boudiaf.M'sila.2016.
- HAUSSONNE.F.JM, Juan .A.C. Medina. M. Ignacio Guerra, J. M. Morán, P. J. Aguado, M. I. Sánchez de Rojas M. Frías and O. Rodríguez.** Céramique pour composants électronique "Re-Use of Ceramic Wastes in Construction".1996.
- HAMLA.W, CHETBANI.Y.** Amélioration de la stabilité du sol dans les projets de construction routière par les déchets de céramiques et les liants hydrauliques. Mémoire de Master. Université Mohamed El Bachir El Ibrahim. Bordj Bou Arreridj.2017.
- JEAN MARIE.F, HAUSSONN.** Céramiques pour composants électroniques technique de l'ingénieur ; Traité Electronique ; E 1820.2012.
- KUMAR.P.S, ABHINAYA.R.V, LASHMI.K.G, ARTHI.V, PAVITHERA.R,SATHYASELV-ABALA.V et SIVANESAN.S.** Adsorption of methylene blue dye from aqueous solution by agricultural waste: Equilibrium, thermodynamics, kinetics, mechanism and process design.Colloid journal. 73(5). 651-661.2011.
- KELLER.F.** Brochure technique inclusion rigide.2019.
- KARINE.S.** The fiber lab episode 1 : Les Fibres Chimiques. La Fédération de la Maille de la Lingerie et du Balnéaire.2019.
- KESSOUMA, LOUGLITI RANDA.A.** Valorisation des déchets de café dans différents domaines. Mémoire de Master. Université Ziane Achour.Djelfa.2021.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- LIVET.M.** Sols argileux gonflants-site expérimentale de Waza-Maltman. Lyon : Laboratoire Régional des ponts et chaussées de Clermont-Ferrand.1990.
- LIMOUSY.L, JEGUIRIM.M, DUTOURNIÉ.P, KRAIEM.N, LAJILI.M. et SAID.R.** Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. Fuel.Vol. 107. 323-329.2013.
- MEKKI.L.** Méthodologie d'études et techniques d'identification des paramètres de comportement des sols fins soumis à des cycles de sécheresse prolongée (application aux argiles expansives de M'Sila). Mémoire de Magister. Université de M'Sila.2006.
- MANSOURI.F et MOHAMEDLAMIN.F.** Amélioration, Stabilisation et renforcement d'argile d'Adrar. Mémoire de Magister. Université Ahmed Draia Adrar .2018.
- MAHAMEDI. A. KHEMISSA M.** Étude de l'évolutivité d'une argile expansive traitée aux liants hydrauliques. Communication à la 3ème Conférence Maghrébine en Ingénierie Géotechnique (3^{ème} CMIG13). Alger.2013.
- MUSSATTO.S.I, CARNEIRO.L.M., ASILVA. J.P, ROBERTO.I.C et TEIXEIRA.J.A.** A study on chemical constituents and sugars extraction from spent coffee grounds. Carbohydrate Polymers.Vol. 83.2011.
- MURRAY.H.H.** Applied claymineralogy. Occurences, processing and application of kaolins, bentonite, palygorskite-sepiolite, and common clays, Developments in Clay Science, Elsevier, Amsterdam.2007.
- MEDJNOUN.A.** Analyse, caractérisation, prévision et modélisation du comportement des argiles gonflantes. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.2015.
- MELLAL.F.** Étude du comportement physicochimique et mécanique d'un remblai routier marneux amélioré par la chaux éteinte Cas de l'autoroute Est-Ouest tronçon Oued Fodda /Khemis Miliana, Mémoire de Magister. Université Hassiba Ben-Bouali.Chlef.2009.
- NOUIOUA.K, BELAADA.H et DAHMOUNE.K.** Élaboration et Caractérisation d'un Matériau Inorganique (destiné à la Préparation des Matériaux Composites), Mémoire de Magister. Université Mohamed Boudiaf M'sila.2021.
- PHILIBERT.J.** Recueil de Communication Deuxième Séminaire Des Sciences Desmatériaux. Université de Constantine. P.2-16.1985.
- SENADLA.S, SAGHIOUR.Z.** Étude de l'évolutivité d'une argile expansive traitée au ciment Matine et fortement compactée. Mémoire de Master. Université Mohamed Boudiaf M'sila.2021.
- SHEN.K, GONDAL.M.A.** Removal of hazardous Rhodamine dye from water by adsorption onto exhausted coffee ground. Journal of Saudi Chemical Society.2013.
- SILVA.M.A, NEBRA.S.A, MACHADO.M.J.M et SANCHEZ.C.G.** The use of biomass residues in the brazilian soluble coffee industry. Biomass and bioenergy. Vol.14. P. 457-467.2012.
- TAALLAH.B.** Étude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres. Thèse de doctorat. Université de Biskra.2014.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- TIDJANI IDRSSA. S.** Mémoire ING d'état I.N.F.S.A Mostaganem contribution des Zine. H.1996.
Étude de crédibilité des pluies des sols dans le tell oranais.P.63et 64.2004.
- VILLIERS.F.** Argiles : histoire d'avenir, éditions Récréateurs, dépôt légal. P.16.2008.
- VINCENT.R, TREMBLAY.D.** Mécanique des sols (théorie et pratique).2013.
- VELDE.B.** Origin and mineralogy of clays. Clays and the environment. Springer. P.8-41.1995.
- YAMOUN.M.** Comportement mécanique d'une argile sous l'effet d'ajout des granulats de pneus usés. Mémoire de fin d'étude. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.2021.
- YASSMINE.R, SDARA.A.M.** Effet de marc du café sur la germination et la croissance du blé dur (Triticum durum Desf). Mémoire de Master. Université Ziane Achour – Djelfa.2022.
- ZAMORA.A.J, PASTORIZA.S et HENARES. J.A.R.** Revalorization of coffee by products. Prebiotic, antimicrobialand antioxidant properties. LWT - Food Science and Technology.Vol.61:12-18.2015.
- ZUR.A, WISEMAN.G.** A study of collapse phenomena of an undisturbed. Proc of the Inter conf on soil mech and found. Eng. Vol 2.2. P. 225-269 .1973.
- ZOULIS.** Approche d'étude sur les perspectives de la valorisation du marc de café. Mémoire de Master. Université des Frères Mentouri.Constantine.2019.
- (NF P 94-057/1992)** Analyse granulométrique.
- (NF P 94-056/1992)** Analyse sédimentométrique.
- (NF P94-051/1993)** Détermination des Limites d'Atterberg.
- (NF94-093/1999)** Le Compactage : Proctor normal-Proctor modifié.
- (NF P 94-078/1997)** Indice CBR après immersion –Indice CBR immédiat-Indice

ANNEXES

ANNEX –A- Essais d'identification de sol

➤ **Résultats de l'essai Analyse granulométrique.**

Analyse granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisât (%)	Diamètre équivalent(μm)	Tamisât (%)
10.00	100.00	56.00	81.00
5.00	99.00	40.00	78.00
2.00	97.00	28.00	75.00
1.00	94.00	18.00	72.00
0.40	91.00	13.00	69.00
0.20	85.00	9.00	67.00
0.10	82.00	6.00	64.00
0.08	81.00	4.00	61.00
		2.60	58.00
		1.00	56.00

➤ **Résultats de l'essai Limite d'Atterberg**

WL(%)	WP(%)	IP(%)	Classification
51.22%	25.22%	26%	At

ANNEX –B- Essais Proctor

➤ **Argile traitée à 0% d'ajout (sol naturel)**

Echantillon n° : sons ajout	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Eau additive %	10%	12%	14%
Masse de moule et sol humide (g)	15215	15860	16100
Masse de moule (g)	12168	12140	12396
Masse de sol humide(g)	3468	3720	3704
Volume de moule (cm^3)	2275		
Masse volumique humide (t/m^3)	1.52	1.63	1.62
Densité sèche γ_d (t/m^3)	1.32	1.43	1.37
Teneur en eau %	14.35	16.22	18.20

ANNEXES

➤ Argile traitée à 0.5% de marc de café

Echantillon n° : MC 0.5%	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Eau ajouté (%)	10%	12%	14%
Poids total humide (g)	14386	16089	14612
Poids moule vide (g)	12171	12164	12171
Poids sol humide (g)	2215	3925	2441
Volume du moule (cm ³)	2275		
Masse volumique humide (t/m ³)	0.97	1.725	1.072
γ_d (t/m ³)	0.84	1.48	0.92
Teneur en eau (%)	14.16	16.03	16.30

➤ Argile traitée à 02% de marc de café

Echantillon n° : MC 02%	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Eau ajouté (%)	10%	12%	14%
Poids total humide (g)	14595	16090	14820
Poids moule vide (g)	12171	12180	11012
Poids sol humide (g)	2424	3910	3808
Volume du moule (cm ³)	2275		
Masse volumique humide (t/m ³)	1.06	1.71	1.67
γ_d (t/m ³)	0.92	1.46	1.44
Teneur en eau (%)	14.99	17.07	18.58

ANNEXES

➤ Argile traitée à 04% de marc de café

Echantillon n° : MC04%	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Eau ajouté (%)	12%	14%	16%	18%
Poids total humide (g)	15587	15787	14837	16270
Poids moule vide (g)	12171	12217	11013	12171
Poids sol humide (g)	3416	3570	3824	4099
Volume du moule (cm ³)	2275			
Masse volumique humide (t/m ³)	1.50	1.56	1.68	1.8
γ_d (t/m ³)	1.31	1.33	1.42	1.40
Teneur en eau (%)	14.43	16.52	18.17	19.50

➤ Argile traitée à 05% de déchet de céramique

Echantillon n° : Céramique 05%	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Eau ajouté (%)	12%	14%	16%
Poids total humide (g)	16410	16571	16388
Poids moule vide (g)	12223	12145	12236
Poids sol humide (g)	4187	4426	4152
Volume du moule (cm ³)	2275		
Masse volumique humide (t/m ³)	1.84	1.94	1.82
γ_d (t/m ³)	1.65	1.71	1.58
Teneur en eau (%)	11.37	13.74	14.65

ANNEXES

➤ Argile traitée à 10% de déchet de céramique

Echantillon n° : Céramique 10%	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Eau ajouté (%)	08%	10%	12%
Poids total humide (g)	15965	16065	16000
Poids moule vide (g)	12010	12037	12140
Poids sol humide (g)	3450	4028	3860
Volume du moule (cm ³)	2275		
Masse volumique humide (t/m ³)	1.51	1.77	1.69
γ_d (t/m ³)	1.39	1.61	1.51
Teneur en eau (%)	8.50	9.64	11.93

➤ Argile traitée à 15% de déchet de céramique

Echantillon n° : Céramique 15%	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Eau ajouté (%)	10%	12%	14%
Poids total humide (g)	16050	16581	16163
Poids moule vide (g)	12135	12186	12145
Poids sol humide (g)	3915	4395	4018
Volume du moule (cm ³)	2275		
Masse volumique humide (t/m ³)	1.72	1.93	1.76
γ_d (t/m ³)	1.54	1.68	1.52
Teneur en eau (%)	11.23	14.50	15.06

ANNEXES

ANNEX –C- Essais CBR après immersion

➤ Argile traitée à 0% d'ajout

Enfoncement (mm)	0	1.25	2	2.5	5	7.5	10
Force (KN)	0	0.062	0.068	0.073	0.102	0.127	0.146

➤ Argile traitée à 0.5% de marc de café

Enfoncement (mm)	0	1.25	2	2.5	5	7.5	10
Force (KN)	0	0.008	0.018	0.053	0.103	0.16	0.195

➤ Argile traitée à 02% de marc de café

Enfoncement (mm)	0	1.25	2	2.5	5	7.5	10
Force (KN)	0	0.114	0.14	0.156	0.214	0.263	0.302

➤ Argile traitée à 04% de déchet de céramique

Enfoncement (mm)	0	1.25	2	2.5	5	7.5	10
Force (KN)	0	0.086	0.102	0.113	0.164	0.21	0.251

➤ Argile traitée à 05% de déchet de céramique

Enfoncement (mm)	0	1.25	2	2.5	5	7.5	10
Force (KN)	0	0.115	0.144	0.168	0.245	0.313	0.367

➤ Argile traitée à 10% de déchet de céramique

Enfoncement (mm)	0	1.25	2	2.5	5	7.5	10
Force (KN)	0	0.116	0.148	0.17	0.262	0.34	0.406

ANNEXES

➤ Argile traitée à 15% de déchet de céramique

Enfoncement (mm)	0	1.25	2	2.5	5	7.5	10
Force (KN)	0	0.118	0.158	0.185	0.291	0.375	0.453