

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie civil

Option : Géotechnique

Présenté par :

HAOUALA MOHAMED

**Thème : Stabilisation D'un Sol Problématique Par La
Chaux Et La Poudre Du Déchet D'olives**

Sous la direction de : **Pr. Rouaiguia Ammar**

Juin 2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENT

*je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et
Miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir*

Ce Modeste travail.

En second lieu, je tiens à remercier mon encadreur Pr. Rouaiguia Ammar

Son précieux conseil et son aide durant toute la période

Du travail.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury

Pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma mémoire de fin d'étude en

Acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs

Propositions

Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et

Administratif de département génie civil.

Sans oublier les membres de LNHC Guelma

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont

Participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Dédicace

Je dédie ce mémoire ...

A mes chers parents

A ma femme et mes enfants Meryem et Zaid Abd Erahmane

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect

mon amour Éternel et ma

Considération pour les sacrifices que

vous avez consenti pour mon

Instruction et mon bien être.

Résumé

En raison de l'urbanisation rapide aggravée par la rareté des sols utiles et oblige les ingénieurs à améliorer les propriétés des sols problématiques pour supporter les charges transférées par l'infrastructure. L'amélioration des sols problématiques est la question centrale pour les grands projets en géotechnique, là où le bon sol se fait rare pour rendre ces sols problématique exploitables, il faut les améliorer en employant des techniques de stabilisation et bien que les oliviers soient répartis sur tous les continents 97% de la production mondiale d'huile d'olive est concentrée dans les pays du bassin méditerranéen : Espagne, Portugal, Italie, Turquie, Algérie, Tunisie et le Maroc.

Les déchets environnementaux causés par le développement technologique et industriel augmentent, tandis que les ressources naturelles et les zones d'élimination de ces déchets diminuent de jour en jour. Le recyclage et la réutilisation des déchets sont donc devenus cruciaux en termes de protection de l'environnement et d'économie.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier la possibilité d'améliorer le sol problématique par l'addition de la poudre des déchets d'olives et de la chaux en différents pourcentage et comparer les résultats entre les deux.

Les limites d'Atterberg, paramètres de compactage (Proctor normal), essais CBR, essais de résistance de compression (non confinée), sont déterminées pour le sol problématique et pour le sol avec différents pourcentages d'additifs.

Les résultats obtenus sur les échantillons provenant de la zone de hammam N'Bail (Guelma) sur une profondeur de 0.8 m ont permis de constater que la stabilisation par l'ajout de la poudre du déchet d'olive modifie les caractéristiques physico-chimiques du sol étudié en augmentant la résistance de compression et donne des résultats tout à fait satisfaisants en réduisant considérablement le phénomène de gonflement.

Mots clés :

Sol problématique, chaux, limites d'Atterberg, Proctor normal, poudre des déchets d'olives.

Abstract

Rapid urbanization aggravated by the scarcity of useful soils and forces engineers to improve the properties of problematic soils to support the loads transferred by the infrastructure. The improvement of problematic soils is the main issue for large geotechnical projects, where high soil quality is scarce to make these problematic soils exploitable, they must be improved by using stabilization techniques and although olive trees are spread over all continents with 97% of the world's olive oil production is concentrated in the countries of the Mediterranean basin: Spain, Portugal, Italy, Turkey, Algeria, Tunisia, and Morocco.

Environmental waste caused by technological and industrial development is increasing, while natural resources and waste disposal areas are decreasing day by day. The recycling and reuse of waste have therefore become crucial in terms of environmental protection and economy.

The main objective of this work is to investigate the possibility of improving the problematic soil by adding powder from olive waste and lime in different percentages and to compare the results between the two.

Atterberg limits, compaction parameters (normal Proctor), CBR tests, and compressive strength tests (unconfined), are determined for problematic soil and for soil with different percentages of additives.

The results obtained on samples from the N'Bail hammam area (Guelma) over a depth of 0.8 m showed that stabilization by the addition of olive waste powder modifies the physico-chemical characteristics of the soil studied by increasing the compressive strength and gives quite satisfactory results by considerably reducing the phenomenon of swelling.

Keywords:

Problematic soil, lime, Atterberg limits, normal Proctor, olive waste powder.

ملخص

يتفاجم التحضر السريع بسبب ندرة التربة المفيدة ويجبر المهندسين على تحسين خصائص التربة الإشكالية لدعم الأحمال التي تنقلها البنية التحتية. يعد تحسين التربة الإشكالية هو القضية الرئيسية للمشاريع الجيوتقنية الكبيرة، حيث تندر جودة التربة العالية لجعل هذه التربة الإشكالية قابلة للاستغلال، يجب تحسينها باستخدام تقنيات التثبيت وعلى الرغم من أن أشجار الزيتون منتشرة في جميع القارات حيث يتركز 97% من إنتاج زيت الزيتون في العالم في بلدان حوض البحر الأبيض المتوسط: إسبانيا والبرتغال وإيطاليا وتركيا والجزائر وتونس والمغرب.

تتزايد النفايات البيئية الناجمة عن التطور التكنولوجي والصناعي، بينما تتناقص الموارد الطبيعية ومناطق التخلص من النفايات يوما بعد يوم. لذلك أصبحت إعادة تدوير النفايات وإعادة استخدامها أمرا بالغ الأهمية من حيث حماية البيئة والاقتصاد.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو التحقيق في إمكانية تحسين التربة الإشكالية بإضافة مسحوق من نفايات الزيتون والجير بنسب مختلفة ومقارنة النتائج بين الاثنين.

حدود أتربيرج، معاملات الضغط (بروكتور العادي)، اختبارات CBR، واختبارات قوة الانضغاط (غير المحصورة)، يتم تحديدها للتربة الإشكالية وللتربة ذات النسب المئوية المختلفة من المواد المضافة.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها على عينات من منطقة حمام نبيل (قالمة) على عمق 8.0 متر أن التثبيت بإضافة مسحوق نفايات الزيتون يعدل الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة المدروسة عن طريق زيادة مقاومة الانضغاط ويعطي نتائج مرضية تماما من خلال الحد بشكل كبير من ظاهرة الانتفاخ.

الكلمات المفتاحية: إشكالية التربة، الجير، حدود أتربيرج، بروكتور العادي، مسحوق نفايات الزيتون.

Sommaire

Dédicaces	
Remerciements	
Résumé	
Sommaire	
Liste des Figures	
Liste des Tableaux	

	Page
Introduction Général.....	1
Chapitre 1 : Généralité sur les argiles	
1-1 -Définition des argiles	2
1-2 -les différents types d'argiles.....	3
1-2-1- classification selon la structure	3
A- La kaolinite	4
B- La montmorillonite	5
C- Les illites	6
E- La smectites	6
1-2-2- classification selon la couleur	7
A- verte	7
B- blanche	7
C- rose :	7
D- rouge	8
E-jaune	8
1-3- Structures des argileux	8
1-3-1 propriétés des argiles :	9
1-4- force entre les particules d'argile :	10
A- Force d'attractions :	10
B- Forces de répulsion :	11
1-5- Phénomènes de gonflement des argiles :	11
1-5-1 -Mécanisme de gonflement :	12
1-5-2- Description du phénomène de gonflement :	12
A - Le gonflement interfoliaire :	12
B - Le gonflement interarticulaire :.....	12

1-5-3- Facteurs affectant le gonflement :	13
A- Facteurs intrinsèques :	13
B- Facteurs externes :	13
I-6 -Conclusion :	14

Chapitre 02 : Stabilisation des sols gonflants.

Introduction :	15
2-1- Pourquoi spécifiquement les sols argileux :	15
2-2 -Description du phénomène de gonflement :	15
A-Selon Norrish :	15
A-1- le gonflement cristallin :	15
A-2 -le gonflement osmotique :	16
B-Selon Seed :	16
C-Selon Van olphan :	16
2-3- But de la stabilisation :	16
2-4- Différentes techniques de stabilisation :	16
2-4-1 -Stabilisation mécanique :	17
A- Compactage :	17
B- Drainage :	17
C- Substitution :	18
2-4-2 -Traitement thermique :	18
2-4-3 -Stabilisation chimique, (par additifs) :	18
A- Liants :	18
A-1- Liants hydrauliques :	18
A-2- Liants organiques :	18
2.4.3.1 Méthode d'utilisation de la chaux dans le traitement du sol	18
2.4.3.2 Technique d'injection	19
2.4.3.3 Traitement par ciment.....	20
2.4.3.4 Traitement mixte (chaux et ciment).....	20
2-5 Conclusion :	20

Chapitre 03 : Matériaux utilisés Et procédures d'essais

03-1- Introduction :	21
03-2 -Matériaux utilisés :	21
03-2-1- Sol argileux :	21
03-2-2-La chaux :	22
03-2-2-1-Les effets de la chaux dans la stabilisation des sols :	23
A- Assèchement du sol :	23
B- Modification du sol :	23
C- Stabilisation du sol :	23
03-2-3- La poudre de déchet d'olives :	24
A- déchet d'olives (Les grignons d'olive- ثقل الزيتون) :	24
B- la Poudre de déchet d'olives :	25
03-3- Programme des essais :	25
03-3-1- Teneur en eau :	25
3-3-2 -Analyse granulométrique par tamisage :	26
3-3-2-1- Principe de l'essai :	26
3.3.3- Analyse granulométrique par sédimentométrie :	27
03-3-4- Limitas d'Atterberg :	27
A- Limite de liquidité w_L :	28
B- Limite de plasticité w_p :	28
C- Indice de plasticité (I_p) :	29
D- Indice de consistance I_c :	30
03-3-5- Essai de bleu méthylène :	30
3-3-5-1 -Conduite de l'essai :	31
03-3-6 -Essai Proctor :	32
03-3-7- Essai C.B.R :	32
03-3-8 -Compression simple :	33
03-3-9- Essai de gonflement libre :	33
3-3-9-1 -Le mode opératoire consiste :	34
3-3-10 - Essai de l'œdomètre :	34

Chapitre 4 : résultats et discussion

4 -1 - Introduction :	36
4 -2 - Discussion du résultat des essais :	36
4 -2-1- Essai de limites d'Atterberg :	36
4 -2-1-1- Limite de plasticité :	36
4 -2-1-2 - Limite de liquidité :	39
4 -2-1-3 - Indice de plasticité (I _P) :	43
4.2.1.4 Indice de liquidité (IL) :	46
4 -2-1-4 - Indices de consistance (Consistency Index) , I _C :	47
4-2-2 - Essai au bleu de méthylène :	47
4 -2- 3 - Essai Proctor NF P94-093 :	49
4 -2-4 - Essais CBR :	58
4-2-5- Essai de compression simple non confinée :	69
4 -2-6 - Essai Gonflement libre :	71
4 2 -7 - Essai de l'œdomètre :	72
4-3 - Conclusion général :	85

Liste des tableaux

tableaux	PAGE
Chapitre 3	
Tableau 03.1. Résultat de l'analyse granulométrie	27
Chapitre 4	
Tableau 4.1 Valeurs des limites de plasticité des sols traités aux différents pourcentages en chaux.	37
Tableau 4.2 Valeurs des limites de plasticité des sols traités aux différents pourcentages en PDO.	37
Tableau 4.3 Valeurs des limites de plasticité des sols traités aux différents pourcentages en chaux et en PDO.	38
Tableau 4.4 Valeurs des limites de liquidité des sols traités aux différents pourcentages en chaux.	40
Tableau 4.5 Valeurs des limites de liquidité des sols traités aux différents pourcentages en PDO.	41
Tableau 4.6 Valeurs des limites de liquidité des sols traités aux différents pourcentages en chaux et en PDO.	42
Tableau 4.7 Valeurs des indices de plasticité des sols traités aux différents pourcentages en chaux.	44
Tableau 4.8 Valeurs des indices de plasticité des sols traités aux différents pourcentages en PDO.	44
Tableau 4.9 Valeurs des limites de liquidité des sols traités aux différents pourcentages en chaux et en PDO.	45
Tableau 4.10 Valeurs de VBS pour sol non traite et traite avec la chaux et la poudre du déchet d'olive.	48
Tableau 4.11 Variations de la densité sèche maximum et la teneur en eau optimum en Fonction des différents pourcentages en chaux.	54
Tableau 4.12 Variations de la densité sèche maximum et la teneur en eau optimum en Fonction des différents pourcentages en pdo.	58
Tableau 04.13 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité.	59
Tableau 04-14 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité avec 03 % chaux	60
Tableau 04-15 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité Avec 06 % chaux	61
Tableau 04-16 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité Avec 09 % chaux	62
Tableau 04-17 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité Avec 12 % chaux	63
Tableau 04-18 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité avec 03 % PDO	64
Tableau 04-19 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité avec 06 % PDO	65
Tableau 04-20 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité avec 09 % PDO	66
Tableau 04-21 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité avec 12 % PDO	67
Tableau 04-22 Valeurs de l'indice CBR en fonction du pourcentage d'additifs.	68
Tableau 04-23 Variation de la résistance à la compression après 01 jours.	70

Tableau 04-24 Les valeurs de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de la chaux.	71
Tableau 04-25 Les valeurs de potentiel de gonflement libre en fonction du pourcentage de la chaux	73
Tableau 04-26 Les valeurs de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de la PDO.	73
Tableau 04-27 Les valeurs de potentiel de gonflement libre en fonction du pourcentage de la PDO.	74

LISTE DES FIGURES

FIGURE	PAGE
Chapitre 1	
Fig. 1-1 : Représentations d'un sol argileux	3
Fig. 1-2 Classification selon la structure chimique	4
Fig.1-3 Photographies au microscope électronique à balayage des argiles (kaolinite), (MITCHELL, 1993).	5
Fig. 1-4 microscope électronique des argiles (La montmorillonite)	5
Fig. 1-5 Représentation schématique des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux (cas d'une illite).	6
Fig. 1-6 Surface des particules argileuses (smectite), interne et externe	7
Fig. 1-7 les différentes colères d'argiles	8
Fig. 1-8 Structure des argiles	9
Fig. 1-9 Les propriétés des particulières des minéraux argileux	10
Fig. 1-10 Phénomènes de Gonflement des Argiles	11
Fig. 1-11 Mécanisme De Gonflement d'argiles	12
Fig. 1-12 Description du Phénomènes de Gonflement	13
Chapitre 2	
Fig. 2-1 Stabilisation mécanique - Compactage	17
Fig. 2-3 Stabilisation par drainage.	17
Fig. 2-3 Traitement par malaxage	19
Fig. 2-4 Technique par injection pour les deux cas	19
Chapitre 3	
Fig. 3-1 la chaux	21
Fig. 3-2 la poudre de déchet d'olive	21
Fig. 3-3 sol argileux	22
Fig. 3-4 La chaux	22
Fig. 3-5 traitement du sol par la jette de la chaux	23
Fig. 3-6 Les grignons d'olive.	24
Fig. 3-7 La Poudre de déchet d'olives	25
Fig. 3-8 Le matériel utilisé pour déterminer la teneur en eau.	25
Fig. 3-9 Photos présentant le mode opératoire de l'essai de tamisage	26
Fig. 3-10 Photos présentant le mode opératoire de l'essai de sédimentométrie	27
Fig. 3-11 Courbe Granulométrique + Sédimentométrique de l'échantillon.	
Fig. 3-12 Comportement des sols fins avec la variation de la teneur en eau (w)	27
Fig. 3-13 Images présentant le mode opératoire de la limite de liquidité WL	28
Fig. 3-14 Images présentant le mode opératoire de la limite de plasticité Wp	29
Fig. 3-15 Classification des Sols en fonction de l'Abaque de Plasticité de Casagrande	29
Figure 3-16 matériel Essai de Bleu de Méthylène VBS	30
Fig. 3-17 Essai au bleu de méthylène- Vue du papier filtre et des tâches auréolées.	31
Fig. 3-18 Matériel Essai de Proctor	32
Fig. 3-19 Matériel pour l'Essai CBR	32
Fig. 3-20 Matériel Compression simple	33
Fig. 3-21 matériel pour essai Gonflement libre	34
Fig. 3-22 matériel pour essai œdométrique	35

Chapitre 4	PAGE
Fig. 4-1 détermination de la limite de plasticité.	36
Fig.4-2 l'évolution de la limite de plasticité du sol étudié à différents pourcentages en chaux.	37
Fig.4-3 l'évolution de la limite de plasticité du sol étudié à différents pourcentages en PDO.	37
Fig.4-4 l'évolution de la limite de plasticité du sol étudié à différents pourcentages en chaux et en PDO.	38
Fig.4-5 Cône Pénétration.	39
Fig.4-6 la coupelle de Casagrande pour la détermination de la limite de liquidité	39
Fig.4-7 l'évolution de la limite de liquidité du sol étudié à différents pourcentages en chaux.	40
Fig.4-8 l'évolution de la limite de liquidité du sol étudié à différents pourcentages en PDO.	41
Fig.4-9 l'évolution de la limite de liquidité du sol étudié à différents pourcentages en chaux et en PDO.	42
Fig.4-10 l'évolution de l'indice de plasticité du sol étudié à différents pourcentages en chaux.	43
Fig.4-11 l'évolution de l'indice de plasticité du sol étudié à différents pourcentages en PDO.	44
Fig.4-12 l'évolution de l'indice de plasticité du sol étudié à différents pourcentages en chaux et en PDO.	45
Fig. 4-13 l'état du test de Bleu de méthylène.	46
Fig. 4-14 Traitement du sol pour détermine les Valeurs de VBS pour sol non traité et traité avec la chaux et la poudre du déchet d'olive.	47
Fig. 4-15 Variation des VBS en fonction du sol non traité et traité (chaux et poudre du déchet d'olive).	48
Fig. 4-16 Etapes de l'essai Proctor.	48
Fig. 4-17 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol non traité.	49
Fig. 4-18 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol traité par 3% de la chaux.	50
Fig. 4-19 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol traité par 6 % de la chaux.	51
Fig. 4-20 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol traité par 9 % de la chaux.	51
Fig. 4-21 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol traité par 12 % de la chaux.	52
Fig. 4-22 Variations de la densité sèche maximum et la teneur en eau optimum en fonction des différents pourcentages chaux.	53
Fig. 4-23 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol traité par 03 % de la PDO.	54
Fig. 4-24 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol traité par 06 % de la PDO.	55
Fig. 4-25 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol traité par 09 % de la PDO.	55
Fig. 4-26 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol traité par 12 % de la PDO.	56

Fig. 4-27 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité et Sol traité avec des différents pourcentages (3%, 6%, 9%, 12%) de la PDO.	57
Fig. 4-28 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité.	59
Fig. 4-29 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité 03 % chaux.	60
Fig. 4-30 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité 06 % chaux.	61
Fig. 4-31 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité 09 % chaux.	62
Fig. 4-32 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité 12 % chaux.	63
Fig. 4-33 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité et Sol traité avec des différents pourcentages (3%, 6%, 9%, 12%) de la chaux.	63
Fig. 4-34 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité 03 % PDO.	64
Fig. 4-35 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité 06 % PDO.	65
Fig. 4-36 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité 09 % PDO.	66
Fig. 4-37 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité 12 % PDO .	67
Fig. 4-38 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité et Sol traité avec des différents pourcentages (3%, 6%, 9%, 12%) de la PDO.	68
Fig. 4-39 Préparation et rupture des éprouvettes traitées sous la compression simple La résistance à la compression simple notée RC (la contrainte maximale) est déterminée selon la formule suivante.	69
Fig. 4-40 Histogrammes de la résistance de compression des sols En fonction des pourcentages en chaux et PDO à 1 jours.	70
Fig. 4-41 Variations de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de la chaux.	72
Fig. 4-42 Variations du potentiel de gonflement en fonction du pourcentage de la chaux.	73
Fig. 4-43 Les valeurs de potentiel de gonflement libre en fonction du pourcentage de la PDO.	74
Fig. 4-44 Variations du potentiel de gonflement en fonction du pourcentage de la PDO.	75
Fig. 4-45 Courbe œdométrique sol naturel (sol non traité).	76
Fig. 4-46 Courbe œdométrique sol naturel +3 % chaux.	77
Fig. 4-47 Courbe œdométrique sol naturel + 6 % chaux.	78
Fig. 4-48 Courbe œdométrique sol naturel + 9% chaux.	79
Fig. 4-49 Courbe œdométrique sol naturel +12 % chaux.	80
Fig. 4-50 Courbe œdométrique sol naturel +3 % PDO.	81
Fig. 4-51 Courbe œdométrique sol naturel + 6 % PDO.	82
Fig. 4-52 Courbe œdométrique sol naturel + 9% PDO.	83
Fig. 4-53 Courbe œdométrique sol naturel + 12 % PDO.	84

Introduction Générale

Introduction Générale

La présence des sols gonflants dans plusieurs régions dans le monde a causée des endommagements aux superstructures souvent assez coûteuses. Plusieurs solutions sont proposées comme remèdes, parmi elles : la stabilisation chimique, mécanique ou physique.

La stabilisation des sols expansifs est une branche de recherche qui suscite de plus en plus d'intérêt. Devant les répercussions financières importantes de gonflement, il y a nécessité de définir un procédé de stabilisation efficace et économique.

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la stabilisation des sols gonflants par ajout des additifs et on cherche à travers ce travail expérimental pour mieux comprendre l'effet de cette procédure de stabilisation sur le potentiel de gonflement.

Dans la première étape de cette étude, nous avons mené une étude bibliographique sur le phénomène de gonflement. Par la suite, une caractérisation des matériaux utilisés a été réalisée basée sur les essais géotechniques standards, en plus, les analyses chimiques et minéralogiques. Dans la deuxième étape, nous avons étudié la performance d'un ajout de la chaux en premier lieu et en second lieu la poudre des déchets d'olives comme additif inerte sur la plasticité et les paramètres du compactage du sol. Parallèlement, on essaie de chercher l'effet de l'ajout de ces deux additifs sur l'amplitude du gonflement, nous avons constaté une diminution progressive du potentiel et de la pression de gonflement avec le pourcentage d'ajout de ces deux additifs.

Ce mémoire est composé de deux parties, la première partie, nous l'avons consacré à une étude bibliographique et la deuxième pour l'étude expérimentale. Il est structuré en quatre chapitres.

Le chapitre 1 consiste à décrire les argiles, en particulier les argiles gonflantes et leurs minéralogies. Le chapitre 2 présente les différentes techniques de stabilisation des sols gonflants.

Le chapitre 3 est consacré aux caractéristiques des matériaux utilisés (sol argileux, chaux, et la poudre du déchet d'olives) et les méthodes d'essais réalisés sur le traitement des sols argileux par addition de la chaux et de la poudre du déchet d'olives à des pourcentages de 3%, 6%, 9%, et 12%.

Le chapitre 4 présente les résultats expérimentaux obtenus ainsi que les interprétations et discussions tirées lors de cette étude.

Enfin, une conclusion générale qui rassemble les points importants tirés de ce travail.

Chapitre 01

Généralité sur les argiles

1.1. Définition des argiles

L'argile est une matière rocheuse naturelle à base de silicates ou d'aluminosilicates hydratés de structure lamellaire, provenant en général de l'altération de silicates à charpente tridimensionnelle, tels que les feldspaths.

Elle peut être une matière localement abondante, très diverse, traitée ou raffinée avant emploi, à la fois meuble ou plastique (souvent après addition d'eau) ou à pouvoir desséchant, absorbant ou dégraissant, voire à propriétés collantes ou encore réfractaires, pour servir par exemple autrefois selon des usages spécifiques, souvent anciens, au potier et au briquetier, au maçon et au peintre, au teinturier et au drapier, au verrier et à l'ouvrier céramiste.

En réalité, le terme issu du latin *argilla* peut s'appliquer au choix à un minéral argileux et à un ensemble de minéraux argileux, ainsi qu'à diverses roches composées pour l'essentiel de ces minéraux.

Dans un sens étendu, il s'agit aussi d'un sédiment composé de particules fines issues de l'altération de diverses roches (processus appelé argilisation), parfois des roches sédimentaires argileuses métamorphisées en schistes. C'est pourquoi le monde paysan conscient de cette matière divisée fondamentale pour le développement de la vie par sa rétention d'eau qualifiait d'argiles au sens générique les limons et les terres grasses ou dégraissantes, molles ou malléables suivant leur degré d'humidité, susceptibles de se durcir à sec en plaques qui se rétractent et fendillent au soleil ou bien de libérer au vent ou par grattage léger de fines poussières de cette matière devenue friable et cassable, de s'amollir à l'eau et de générer en milieux humides après tassements répétés des boues colorées plus ou moins liquides, plus ou moins salissantes, plus ou moins collantes

Il savait que l'adjonction d'argiles rend plus ou moins rapidement les terres imperméables, au contraire du sable fin perméable. Une terre argileuse peut être lourde et compacte, résistante et difficile au labour, se durcissant en croûtes épaisses parfois plus ou moins craquelées lors des sécheresses. (voir fig 1-1) [1]



Fig 1-1 : Représentations d'un sol argileux

1.2. Les différents types d'argiles

1.2.1. Classification selon la structure chimique

Les argiles font parties des silicates hydratés. Ceux-ci sont soit amorphes, soit cristallisés (cas des argiles).

Les cristaux sont regroupés en deux classes : phylliteux (roche métamorphique foliée) et semi-phylliteux.

Les chlorites sont les seules représentantes des semi-phylliteux, quant à eux, sont séparés selon que leurs feuillets soient continus ou discontinus. l'attapulgite ainsi que la sépiolite présentent des feuillets discontinus. les feuillets continus ont une structure simple ou complexe, la structure dite complexe voit ses feuillets se superposer selon 2 ou plusieurs équidistances apparentes ou réelles. aucune argile n'est recensée dans cette classe. les feuillets ayant un seul type d'équidistance apparente sont séparés en fonction de la constitution des feuillets. trois types de constitutions sont évoquées : T/O (ou 1/1) c'est-à-dire tétraédrique et octaédrique en référence à la maille élémentaire ; T/O/T (ou 2/1) ; T/O/T/O (ou 2/1/1) dont le talc. la caolinite fait partie des T/O, ses feuillets sont d'équidistance apparente stable de 7 angström.

Les argiles de type T/O/T ont une équidistance de 10 angströms, elles sont classées selon le nombre d'atomes de silicium par feuillet tétraédrique. la montmorillonite possède huit

Chapitre 1 : Généralité sur les argiles

atomes de silicium par feuillet et une équidistance apparente variable. la beidellite et la vermiculite ont également une équidistance apparente variable mais le nombre

D'atomes de silicium est inférieur à huit. tout comme ces deux dernières, l'illite contient par feuillet un nombre d'atomes de silicium inférieur à 8 mais une équidistance apparente stable .(voir fig 1-2)

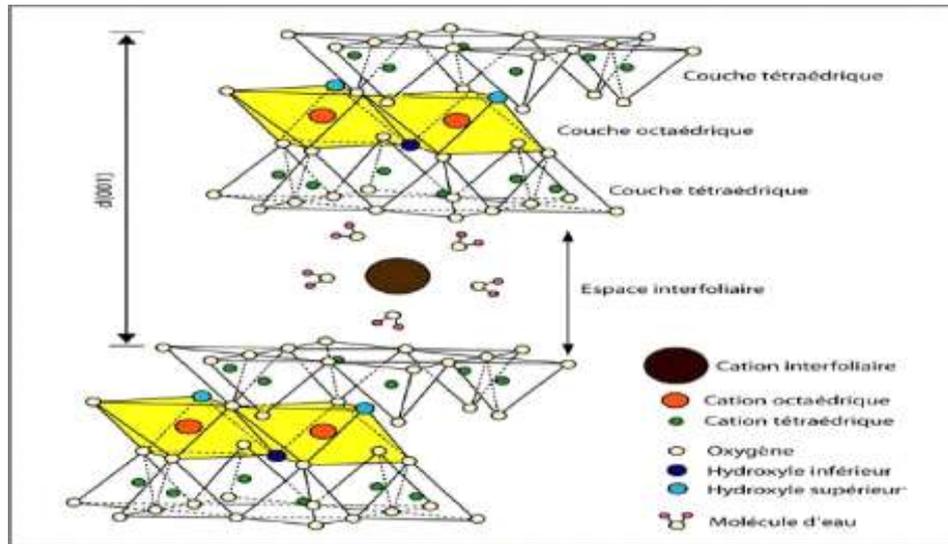


Fig 1-2 Classification selon la structure chimique

A- Kaolin

On appelle la roche kaolin et la minérale argileuse kaolinite. cette argile blanche douce, friable, réfractaire, contient autant d'aluminium que de silice riche en silice et peu concentrée en sels minéraux, elle est utilisée pour la fabrication de porcelaine et de céramique. C'est l'une des rares argiles inerte chimiquement.

Cette caractéristique vaut en fait un composant idéal pour le papier, en tant que liant dans les peintures, dans les plastiques, ainsi que dans les médicaments. (voir fig 1-3)

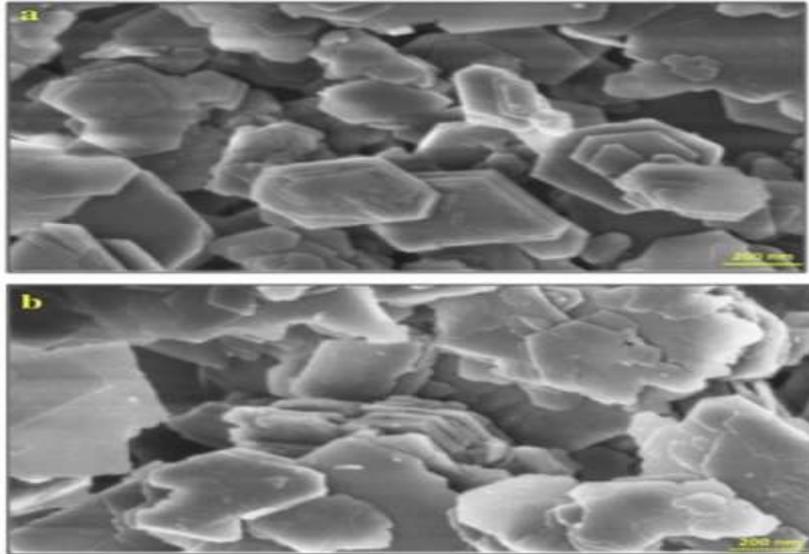


Fig 1-3. Photographies au microscope électronique à balayage des argiles (kaolinite),

B- La montmorillonite

Argile la plus communément récoltée, elle est généralement vendue verte mais peut-être trouvée sous d'autres coloris : gris, blanc, bleuté.

Son nom provient de sa ville d'origine, Montmorillon située dans la Vienne. elle détient une forte concentration en silice, en minéraux, dont de la potasse, des oxydes de magnésium, de fer, de manganèse, d'aluminium,Etc.

D'une rare pureté, l'argile Montmorillonite présente des qualités et des attraits supérieurs à n'importe quelle autre argile verte. Ceci explique que c'est l'argile la plus commune à la vente. (voir fig 1-4)

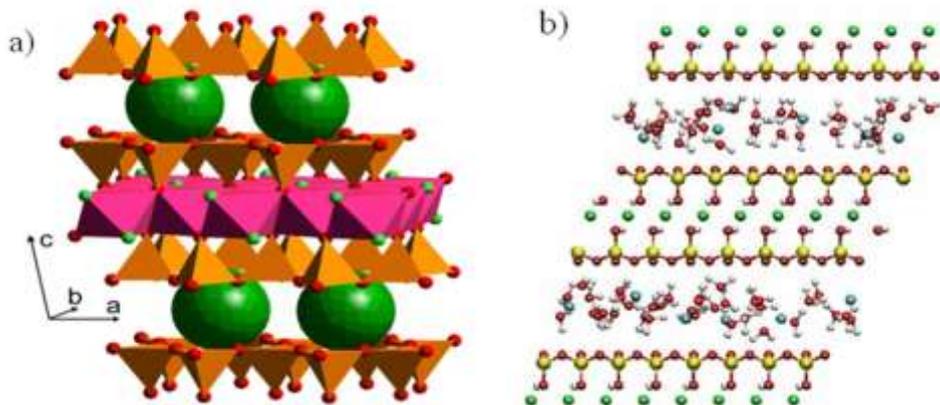


Fig 1-4 microscope électronique des argiles (La montmorillonite)

Chapitre 1 : Généralité sur les argiles

C - Illites

Son nom fait référence à l'Illinois, aux états-unis où elle a été étudiée. Sa composition est riche en calcium en fer et pauvre en magnésium. elle présente un bon pouvoir d'absorption environ 25 % de son poids et un faible pouvoir cette argile est retrouvée dans le nord de la France où elle est connue pour ces propriétés. Malgré sa composition, elle est tout de même de qualité inférieure à la montmorillonite. elle se révèle néanmoins avoir un pouvoir d'absorption important. On l'utilise en tant que cataplasme épais à appliquer sur les contusions diverses (entorse...), ou encore pour absorber des impuretés (déchets organiques, micro-organismes,). (voir fig 1-5)

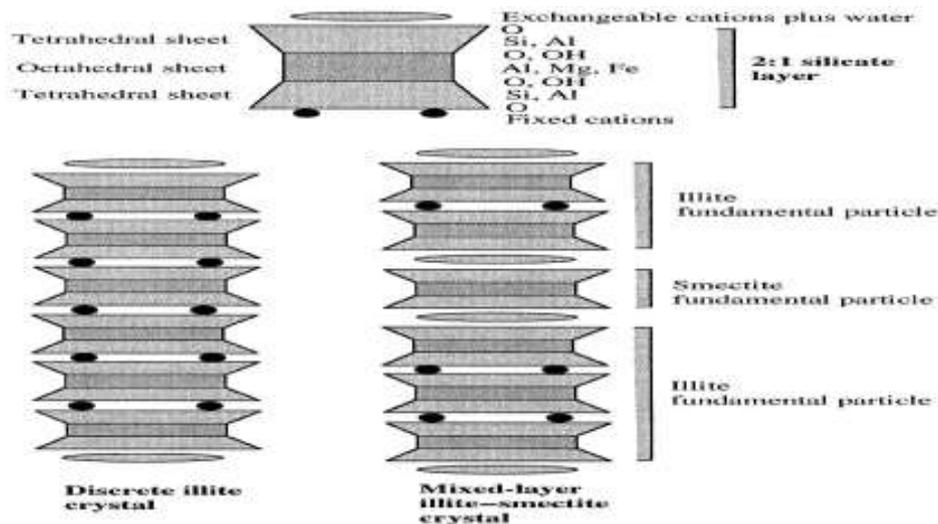


Fig 1-5 Représentation schématique des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux (cas d'une illite).

D- Smectites

Cette famille d'argile regroupe les montmorillonites, les bentonites, les saponites, les natronites les beidellites, ces différentes argiles sont connues pour leur capacité à piéger les molécules d'eau. elles sont appelées argiles gonflantes. sous l'action de l'eau, elles peuvent augmenter leur volume jusqu'à 30%. En piégeant l'eau elles fixent aussi des cations permettant les échanges par adsorption. elles prennent une texture de type gel, pouvant transporter des ions ou des molécules actives, cette propriété est à la base des technologies de pansements pour le tube digestif . (voir fig 1-6) [2]

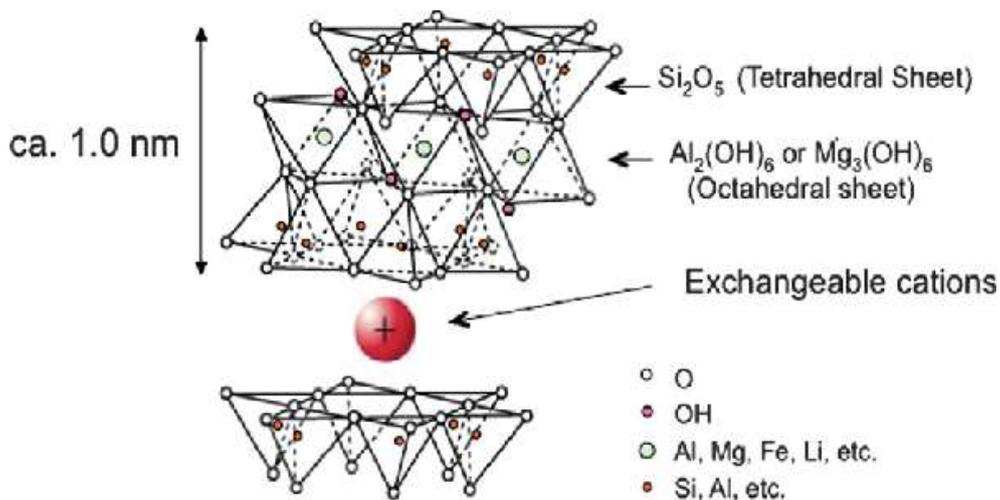


Fig 1-6 Surface des particules argileuses (smectite), interne et externe

1. 2. 2. Classification selon la couleur

Les argiles ne sont pas identifiées par leur couleur. une couleur peut être attribuée à plusieurs types d'argiles, la couleur verte par exemple est retrouvée chez la montmorillonite, l'illite ou encore le chlorite...etc. la variation de couleur constatée est fonction de la concentration en oxyde de fer (voir fig 1-7)

A- Verte

Les argiles vertes présentent une faible teneur en fer, ce sont généralement les montmorillonites, les illites et les smectites

B - Blanche

Ces argiles ne contiennent aucune substance colorée. leur formation n'a donc pas été perturbée, elle a été uniforme. On retrouve le plus souvent des kaolinites mais également des smectites

C - Rose

Ces roches argileuses ne sont pas retrouvées au naturel, telles quelles. Il s'agit d'un mélange d'argile rouge et d'argile blanche. ce mélange a pour but d'augmenter la concentration en oligo-éléments de l'argile blanche tout en diminuant la concentration en fer de l'argile rouge

Chapitre 1 : Généralité sur les argiles

D - Rouge

Généralement des illites, ces argiles sont riches en oxyde de fer très reminéralisantes, elles sont idéales en usage externe pour les peaux irritées, fatiguées ou ternes qu'elles adoucissent et purifient.

E - Jaune

Ces illites riches en oxyde de fer et magnésie vont apaiser de nombreuses douleurs (articulaires, musculaires) et tonifier la peau. appliquées en masques, la peau et les cheveux normaux l'apprécient tout Particulièrement.



Fig 1-7 les différentes colères d'argiles.

1.3. Structure des argiles

Les matériaux argileux sont constitués de petites particules dont la partie poreuse est partiellement ou en totalité occupée par une solution chimique. ces particules sont formées par l'association des feuilletts élémentaires et sont caractérisées par leur surface spécifique, leur capacité d'échange cationique et leur densité de charge surfacique deux éléments essentiels, le silicium et l'aluminium entourés d'oxygènes et d'hydroxyles, constituent le réseau cristallin fondamental.

Le silicium occupe le centre d'un tétraèdre et l'aluminium celui d'un octaèdre. L'accolement de plusieurs tétraèdres ou de plusieurs octaèdres constitue une couche correspondante.

Chapitre 1 : Généralité sur les argiles

La superposition des couches tétraédriques et octaédriques forme un feuillet élémentaire séparé souvent par un espace inter foliaire. Cet espace inter foliaire peut être vide, comme il peut renfermer des cations alcalins ou alcalino-terreux et des molécules d'eau. Ces cations peuvent quitter facilement l'espace inter foliaire et être remplacés par d'autres cations. (voir fig 1-8) [3]

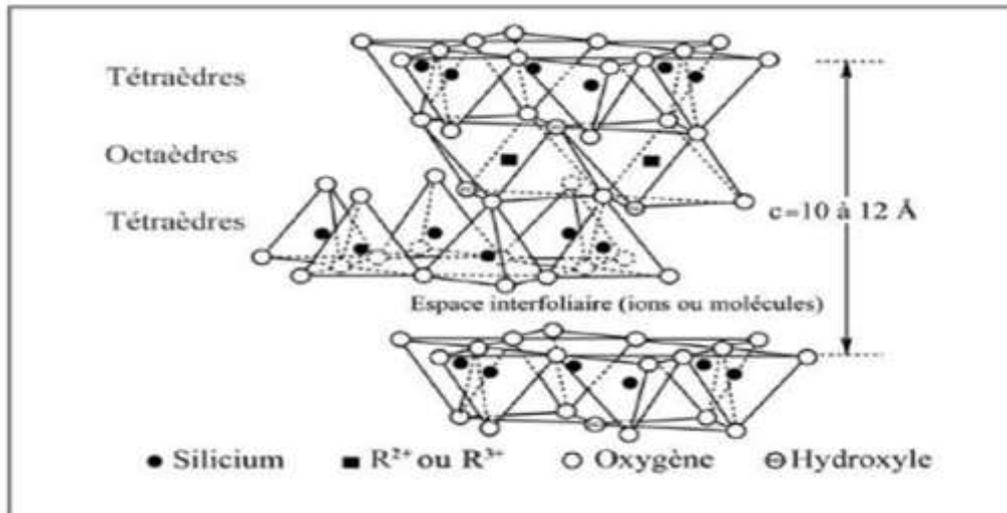


Fig 1-8 Structure des argiles.

1.3.1. Propriétés des argiles

Les propriétés bien particulières des minéraux argileux sont dues à la petite taille, la structure en feuillets et la charge négative des particules. elles forment avec l'eau des solutions colloïdales qui flocculent lorsque les charges de surface des particules sont neutralisées par des ions. ce phénomène est réversible : les particules retrouvent l'état dispersé lorsque les ions sont éliminés par rinçage. les argiles fixent l'eau par adsorption à leur surface et augmentent de volume par gonflement. elles constituent ainsi une réserve d'eau. l'argile sèche développe une tension de succion importante pour l'eau qui peut s'opposer à celle des racines des plantes. avec adjonction croissante d'eau, la tension de succion diminue, l'ensemble eau-argile devient plastique, puis visqueux et finalement les particules d'argile se dispersent dans l'eau en formant une solution colloïdale. l'argile imprégnée d'eau qui se dessèche se rétracte et se casse par des fentes de retrait.

Chapitre 1 : Généralité sur les argiles

Les argiles confèrent au sol sa structure et ses propriétés mécaniques. elles sont associées aux autres composants et constituent les complexes argilo-humiques, leur teneur peut atteindre 50%. Elles sont généralement à l'état floculé, généralement par l'action des ions Ca^{2+} et H^{+} , ce qui donne au sol ses qualités agronomiques : bonne aération entre les agrégats, retrait modéré à la dessiccation, bonne perméabilité à l'air et l'eau. En revanche, les sols dont les argiles sont dispersées, et non floculées, présentent des caractères défavorables à la culture : mauvais état structural, mauvaise circulation de l'air et de l'eau, retrait important à la dessiccation, forte adhérence aux outils travaillant le sol. (voir fig 1-9) [4]

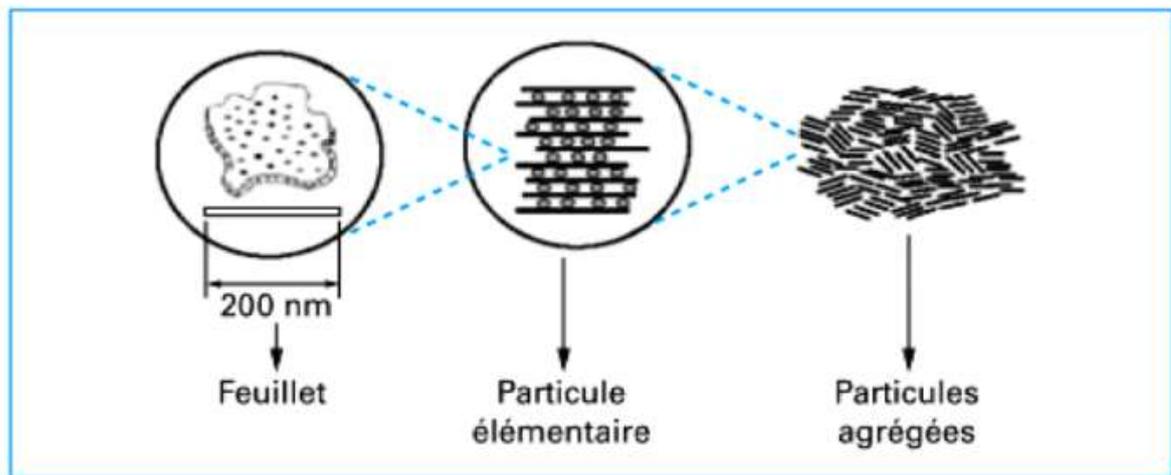


Fig 1-9 Les propriétés des particulières des minéraux argileux.

1.4. Force entre les particules d'argile

Les argiles sont principalement caractérisées par un déséquilibre électrique dû à une substitution isomorphe de cations dans la structure octaédrique des feuillets. Il en résulte alors la formation de la double couche diffusée due à la fixation des cations échangeables qui s'installent à la surface des feuillets du fait des forces électrostatiques qui sont les suivantes .

A- Forces d'attractions

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

B- Forces de répulsion

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

Ces deux forces décroissent rapidement avec la distance inter-particulaire. quant à la force de répulsion, elle diminue également avec l'augmentation de la concentration en électrolytes.

1.5. Phénomènes de Gonflement des Argiles

Le retrait-gonflement des argiles est lié aux variations de teneur en eau des terrains argileux ils gonflent avec l'humidité et se rétractent avec la sécheresse.

Ces variations de volume induisent des tassements plus ou moins uniformes et dont l'amplitude varie suivant la configuration et l'ampleur du phénomène. (voir fig 1-10)



Fig 1-10 Phénomènes de Gonflement des Argiles.

1.5.1. Mécanisme De Gonflement

Certaines argiles dont les liaisons interfeuillets sont très faibles, ont la propriété de fixer des molécules d'eau entre deux feuillets voisins, comme en généralement dans le cas des smectites. on remarque que l'eau pénètre à l'intérieur des particules et s'organise en couches monomoléculaires qui provoquent le gonflement. (voir fig 1-11)

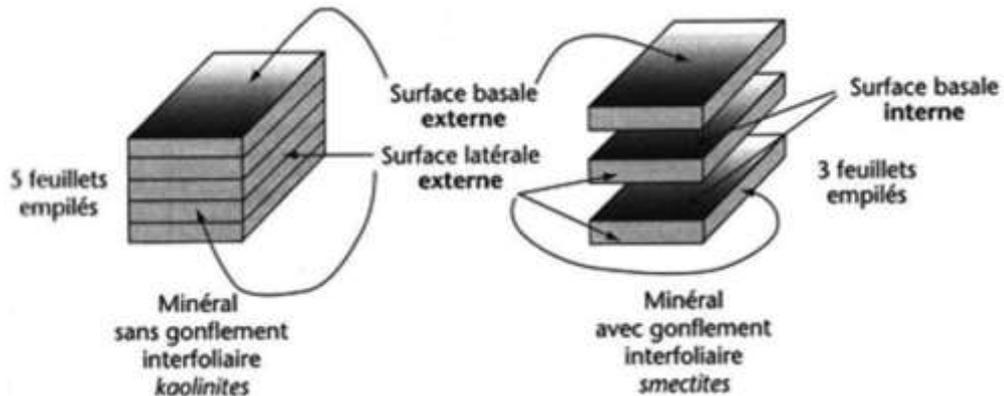


Fig 1-11 Mécanisme De Gonflement d'argiles .

1.5.2. Description du Phénomènes de Gonflement

L'analyse des travaux antérieurs montre qu'on a deux types de gonflements, un gonflement interfoliaire et un gonflement inter-particulaire. (voir fig 1-12)

A- Le gonflement interfoliaire : est assez rapide et son amplitude est importante.

B - Le gonflement inter-particulaire : résulte de l'apport d'eau supplémentaire avec une réaction lente et qui peut durer des années. le gonflement interarticulaire à une ampleur assez limitée et affecte toutes les argiles contrairement au gonflement interfoliaire.

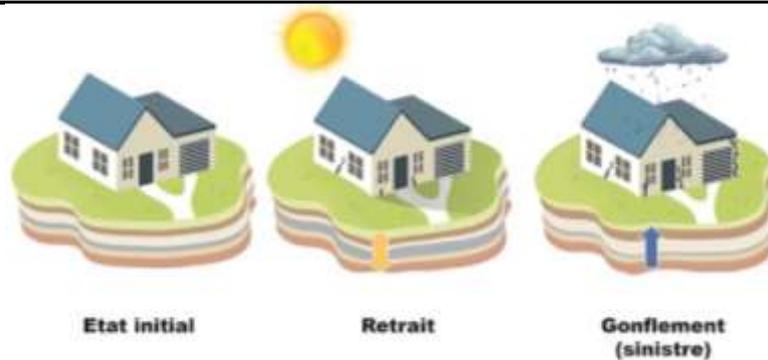


Fig 1-12 Description du Phénomènes de Gonflement

1.5.3. Facteurs affectant le gonflement

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

1.5.3.1. Facteurs intrinsèques

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

1.5.3.2. Facteurs externes

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

- * Les conditions de compactage (statique ou dynamique)
- * L'énergie de compactage
- * La teneur en eau initiale
- * La densité sèche
- * L'effet d'échelle
- * Le régime de contraintes
- * Le frottement latéral
- * Les cycles retrait-gonflement
- * La durée des essais et la température [5]

1.6. Conclusion

Le gonflement des sols argileux est un phénomène très complexe qui fait intervenir un grand nombre de paramètres intrinsèques et environnants. Il est principalement dû à la structure minéralogique des argiles.

Chapitre 02

Stabilisation des sols gonflants

2.1. Introduction

Le phénomène du gonflement a causé beaucoup d'endommagements et désordres à Travers le monde. Plusieurs solutions sont proposées comme remèdes, parmi elles :

la Stabilisation chimique, mécanique ou physique.

Afin de limiter les désordres dans les constructions, plusieurs études ont été faites sur ce phénomène, des solutions basées sur diverses techniques de stabilisations ont conduits à la réduction du potentiel de gonflement.

2.2. Pourquoi spécifiquement les sols argileux

Les caractéristiques de la structure interne des minéraux argileux expliquent leur Comportement face aux variations de teneur en eau :

- Ils présentent en effet une structure minéralogique « en feuillets », à la surface desquels les molécules d'eau peuvent s'adsorber sous l'effet de différents phénomènes physico-chimiques, et ce de façons d'autant plus marquées que les grains du sol, fines et aplaties, ont des surfaces développées très grandes. Il en résulte un gonflement, plus ou moins réversible, du matériau.

L'eau adsorbée assure les liaisons entre les grains et permet les modifications de structure du sol lors des variations de teneur en eau.

- Certains grains argileux peuvent eux-mêmes voir un changement de volume par Variation de la distance entre les feuillets argileux élémentaires, du fait d'échanges d'ions entre l'eau interstitielle et l'eau adsorbée. [5]

2.3. Description du phénomène de gonflement

Plusieurs auteurs ont expliqué le phénomène du gonflement de diverses manières :

A. Selon Norrish (1954) (Norrish, K., « The swelling of montmorillonite » Disc. Faraday Soc. 18, 120-134 (1954)).

Le gonflement se développe selon deux processus distincts

A.1. le gonflement cristallin dans le premier stade et le gonflement osmotique dans le deuxième stade Le gonflement cristallin dépend de l'énergie d'hydratation des cations inter couches. La distance entre les feuillets atteint à ce stade 30\AA , à ce niveau la double couche n'est pas encore complètement formée.

A.2. le gonflement osmotique est normal au plan des particules. Selon les mesures, le gonflement est proportionnel à la distance entre particules. cette dernière passe de 30Å à 130 Å et même plus, suite au gonflement.

B. Selon Seed (1961) .(« Prediction of swelling potential for compacted clays ». Journal of the soil Mechanics and foundations division, ASCE, vol.88, n° SM4, 1961, p.107-131).

Ils ont travaillé sur les argiles reconstituées, ils ont attribué le gonflement à deux phases, une phase mécanique et une phase physico-chimique. Ces auteurs ont observé que les échantillons d'argile reconstituée à la même densité par le compactage statique ont donné un gonflement approximativement le double de celui donné par les échantillons reconstitués par malaxage. Donc les différences dans le mode de préparation des échantillons résultent en des structures différentes (contribution des effets mécaniques). [5]

2.4. But de la stabilisation

La stabilisation de sol à pour un but de :

1. Réduire le volume des vides entre les particules solides (augmenter la compacité)
2. Colmater les vides que l'on peut supprimer
3. Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre particules (résistance mécanique)

[6]

2.5. Différentes techniques de stabilisation

Le géotechnicien s'intéresse aux sols dans la mesure où ceux-ci constituent l'élément principal du contexte dans lequel la stabilité d'un ouvrage sera conçue. Il doit envisager d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols d'assise pour augmenter leur capacité portante. Un grand nombre de procédés existent et diffèrent selon la nature du sol et le type de projet à exécuter. Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue : [7]

- La stabilisation mécanique
- Traitement thermique
- Stabilisation chimique (par additifs).

Le choix de l'une de ces méthodes dépend de plusieurs paramètres tels que les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération et la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

2.5.1. Stabilisation mécanique

A. Compactage

Le compactage du sol est une étape très importante de la stabilisation pour réduire la Porosité du sol à partir des caractéristiques optimales de compactage, qui sont déterminées par l'essai Proctor normal, modifié, ou compactage statique. (voir fig 2-1)



Fig 2-1 Stabilisation mécanique - Compactage

B. Drainage

C'est la technique la plus classique qui est mise en œuvre. Plusieurs procédés sont utilisés ; comme les tranchées drainant, drains de carton, drains de sables verticaux. (voir fig 2-2)



Fig 2-2 Stabilisation par drainage.

C. Substitution

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

2.5.2. Traitement thermique

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

2.5.3. Stabilisation chimique (par additifs).

Les propriétés d'un sol peuvent être modifiées par l'ajout de certains additifs.

A. Liants

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

A.1. Liants hydrauliques

Ce sont des produits d'origine minérale qui par réaction avec l'eau donnent des réseaux cristallins enchevêtrés ayant une bonne cohésion et pouvant aboutir à des jonctions avec le Squelette minéral.

A.2. Liants organiques

Ce sont des produits de type colle, c'est à dire des composés organiques susceptibles D'une bonne adhésion au squelette. [8]

2.5.4. Méthode d'utilisation de la chaux dans le traitement du sol

Le procédé d'ajout de la chaux par malaxage avec le sol est utilisable pour des profondeurs de traitement inférieure à 50 cm. La mise en œuvre est réalisée en période où le sol est sec ou peu humide. Le malaxage (voir Fig 2-3) peut s'effectuer avec répétition pour améliorer le résultat.



Fig 2-3 Traitement par malaxage

Le traitement par malaxage en place présente les avantages suivants :

- Homogénéité du mélange ;
- Réduction des émissions de poussière.

2.5.4.1 Technique d'injection

Le procédé de traitement par injection est utilisable en surface (cas a) ou en profondeur si le terrain est suffisamment meuble (cas b). L'injection en profondeur est souvent utilisée pour réduire la déformabilité du sous-sol. (voir fig 2-4) [9]

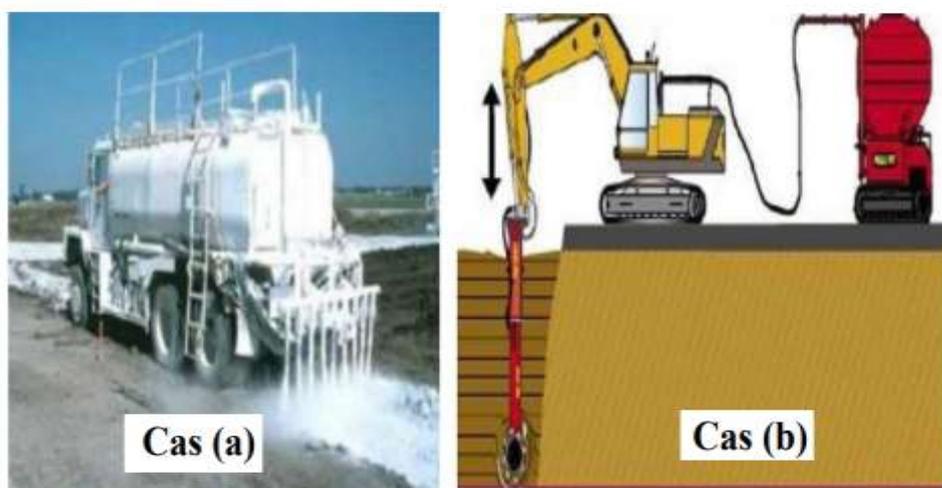


Fig 2-4 Technique par injection pour les deux cas.

2.5.4.2. Traitement par ciment

Le ciment est un additif qui peut être utilisé pour la stabilisation du sol dont il augmente la résistance, limite le retrait, diminue la plasticité et réduit le potentiel des variations de volume. le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques, qui sont

Chapitre 02 : Stabilisation des sols gonflants

a priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argiles, auxquels il apporte cohésion, résistance mécanique, stabilité à l'eau et au gel. la prise au ciment est plus rapide que celle de la chaux (qui évolue encore au bout d'un an), mais elle est stoppée par le gel.[10]

2.5.4.3. Traitement mixte (chaux et ciment)

Dans le cas où le sol est humide (on préconise la chaux) et peu argileux (on préconise le ciment), on utilise d'abord la chaux à faible et ensuite le ciment, ces liants ayant une action complémentaire.

Le traitement préalable à l'ajout du ciment conjointement avec la chaux aide à augmenter les propriétés mécaniques du sol traité. Généralement, le sol est traité dans un premier temps avec la chaux. En préparation à l'ajout du ciment. cette première étape permet d'assécher le sol par absorption et évaporation de l'eau et nécessite seulement une faible application de chaux de l'ordre de 1 %. ce processus de modification réduit considérablement l'indice de plasticité rendant le sol friable et donc plus maniable. l'ajout du ciment vient ensuite fournir au mélange les pouzzolanes nécessaires afin que le sol puisse gagner de la résistance mécanique dans le temps. les sols possédant un faible pourcentage d'argile, donc moins de silice et d'alumine, ont besoin de cet apport en ciment si les réactions pouzzolanique (stabilisation) sont désirées .[11]

2.6. Conclusion

Suite aux conséquences des sols expansifs sur les ouvrages géotechniques en surface et souterrains, plusieurs chercheurs se sont intéressés sur leur stabilisation. Les différentes recherches se sont orientées sur les ajouts qui minimisent le plus le potentiel et la pression de gonflement.

Un grand nombre de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour connaître l'influence de l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol argileux. Le choix des techniques de stabilisation 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.

Chapitre 03
Matériaux utilisés Et procédures
d'essais

3.1. Introduction

Plusieurs travaux ont été effectués sur l'utilisation de la chaux comme du stabilisant. Toutes ces études montrent que ces stabilisants ont des rôles positifs sur la réduction des paramètres de l'argile. (voir fig 3-1)

Dans cette étude, on a utilisé la poudre de déchet d'olives comme additif stabilisant, en examinant les effets de l'utilisation de ce dernier sur les paramètres de l'argile qui peuvent jouer des rôles positifs. (voir fig 3-2)



Fig. 3-1 la chaux



Fig. 3-2 la poudre de déchet d'olive

3.2. Matériaux utilisés

3.2.1. Sol argileux

Les échantillons de sol argileux dans cette étude ont été prélevés de la zone de hammam N'Bail (Guelma) sur une profondeur de 0.8 m

Les prélèvements d'échantillons effectués par une pelle à main pour garder l'homogénéité des sols à étudier. (voir fig 3-3)



Fig. 3-3 sol argileux

3.2.2. La chaux

La chaux est à la fois le liant minéral majeur de l'histoire de la construction (construction d'infrastructures routières, ferroviaires, aéroportuaires, etc.) et un des produits minéraux les plus utilisés depuis le début de l'ère industrielle.

Dans cette étude on a utilisé la chaux vive, c'est une poudre blanche constituée essentiellement d'oxydes de calcium (CaO), obtenue par pyrolyse du calcaire (voir fig 3-4)



Fig. 3-4 La chaux

3.2.2.1. Les effets de la chaux dans la stabilisation des sols

Les effets que peut avoir l'emploi de la chaux pour stabiliser les sols sont au nombre de trois. Et plus précisément, la chaux peut être utilisée dans les sols instables pour assécher, modifier ou stabiliser. (voir fig 3-5)



Fig. 3-5 traitement du sol par la jette de la chaux

A- Assèchement du sol

La chaux vive (oxyde de calcium) est hautement efficace pour l'assèchement de tout sol humide. Après son mélange avec la terre argileuse, la chaux vive absorbe l'eau à travers une réaction exothermique qui réduit significativement l'humidité du sol par hydratation et évaporation. La baisse d'humidité variera en fonction de la chaux ajoutée et des conditions ambiantes.

B- Modification du sol

En rajoutant de la chaux au sol, la répartition des charges à la surface des particules du sol argileux se modifie en donnant lieu à un échange ionique entre le Sodium (Na) du sol et le Calcium (Ca) de la Chaux. Ce processus se déclenche aussi immédiatement après l'ajout de la chaux. L'effet produit est que la terre perd sa faculté à retenir l'eau.

C- Stabilisation du sol

Dans ce cas, l'effet se produit plutôt à moyen terme et de manière graduelle. L'argile du sol (qui contient de la silice et de l'alumine) en contact avec la chaux est en mesure de former des silicates et des aluminates calciques hydratés. Cette réaction, dite "pouzzolanique", aboutit à une augmentation de la compression simple du sol ainsi qu'à une meilleure stabilité face au gel [12]

3.2.3. La Poudre de déchet d'olives

A- déchet d'olives (Les grignons d'olive- ثفل الزيتون)

Les grignons d'olive sont un sous-produit du processus d'extraction de l'huile d'olive composé des peaux, des résidus de la pulpe et des fragments des noyaux. (voir fig 3-6)

Les grignons sont les résidus solides résultant de l'extraction d'huile, alors que les résidus liquides sont dénommés margines.

Depuis les années 1990, où les exigences environnementales relatives aux rejets liquides à charge polluante non nulle ont pris de l'ampleur, les moulins à huile rejettent de moins en moins des margines, mais au contraire des grignons à teneur en eau plus élevée, appelés « grignons pâteux » ou « marginions » (contraction de margines et grignons, à l'instar de alperujo, contraction de alpechin et orujo en Espagne). Le terme « grignons » est cependant le seul utilisé dans les textes réglementaires, la seule différence entre les grignons classiques et les grignons pâteux étant la teneur en eau.



Fig. 3-6 Les grignons d'olive.

B- la Poudre de déchet d'olives

Nous l'obtenons après broyage des olives restantes, puis nous utilisons des tamis d'un certain diamètre jusqu'à ce que nous récupérions cette poudre. (voir fig 3-7)



Fig. 3-7 La Poudre de déchet d'olives

3.3. Les procédures d'étude

3.3.1. Teneur en eau w (NF P 94-050)

L'essai de la Teneur en eau consiste à déterminer la quantité d'eau existante dans le sol. Pour l'exécution de cet essai il nous faut : des tares, Balance et Etuve.sol. (voir fig 3-8)



Fig. 3.8 Le matériel utilisé pour déterminer la teneur en eau.

D'abord l'échantillon de matériau humide est pesé puis placé dans l'étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (correspondant alors à la masse du matériau sec).

La conduite de l'essai est présentée comme suit :

* Prélever un échantillon sol représentatif 90 à 100 g de sol argiles

*Placer le prélèvement dans une tare (récipient) de poids W1.

*Peser immédiatement, soit W2, Mettre à l'étuve à 105° - 110° c jusqu'à dessiccation complète et poids stable. Environ 24h. Peser l'échantillon sec immédiatement à la sortie de l'étuve, soit W3. En déduire la teneur en eau W de l'échantillon : $W (\%) = (W1 - W3) / (W3 - W2)$.

La teneur en eau du sol étudié est $w = 17.89 \%$.

3.3.2. Analyse granulométrique par tamisage

Le but de l'essai est de déterminer en poids de la distribution dimensionnelle les éléments des sols. Elle s'obtient par deux opérations successives et complémentaires :

A- le tamisage sous l'eauµ selon la norme NF P94-056, pour les particules de dimensions $\geq 80\mu\text{m}$ (0.08mm).

B- la sédimentométrie selon la norme NF P94-057, pour les particules de dimensions

3.3.2.1. Principe de l'essai

Selon la norme : NF P94-056, l'essai s'effectue sur une masse supérieure a 200 g ; dans notre cas ou le tamisage sec a fin de séparer les particules grossières des particules fines, et ça a l'aide d'une série de tamis de contrôle dont les dimensions des mailles vont en décroissants du tamis supérieur au tamis inférieur après avoir pesé chacun d'eux vides, on fait passer notre échantillon a travers la colonne et on pèse chaque tamis . [13] (voir fig 3-9)



Fig. 3-9 Photos présentant le mode opératoire de l'essai de tamisage

Tableau 3-1 Résultat de l'analyse granulométrique

tamis	6.5	5	4	3	2	1	0.08
refus %	00	00	2.74	5.33	7.91	10.67	21.50
passant%	100	100	97.26	94.67	92.09	89.33	78.50

3.3.3. Analyse granulométrique par sédimentométrie (Norme NF P94-057)

L'analyse granulométrique par sédimentation est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage d'un sol et qui peut être nécessaire à sa description et sa classification. (voir fig 3-10) [13]



Fig. 3-10 Photos présentant le mode opératoire de l'essai de sédimentométrie

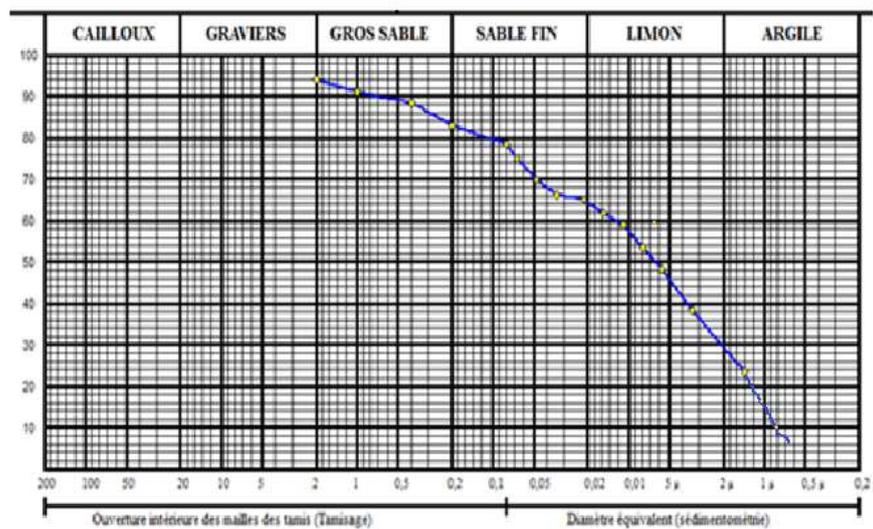


Fig 3-11 Courbe Granulométrique + Sédimentométrique de l'échantillon.

A partir de la figure 3-11 nous remarquons qu'on est en présence d'un sol fin puisque de 18 % et du limon 35% , argile 23% et du gros sable 23% .

La courbe granulométrie est étalée

3.3.4 .Limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Les limites d'Atterberg ont pour but de définir les états d'humidité correspondant aux limites entre ces trois états, l'état d'humidité du sol étant exprimé par sa teneur en eau. [14]

L'essai se fait sur une partie du matériau tamisé au tamis 0.40 mm. La teneur en eau d'un sol est le rapport entre le poids d'eau contenu dans un certain volume de sol et le poids des grains solides contenus dans le même volume. Elle s'exprime en [%] et a pour symbole W de l'anglais water = eau. Elle est déterminée conformément à la norme NFP94-051. (voir fig 3-11)

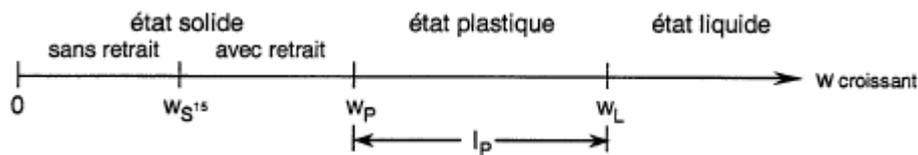


Fig. 3-12 Comportement des sols fins avec la variation de la teneur en eau (w)

La limite de liquidité W_L traduit le passage entre l'état liquide et plastique. La limite de plasticité W_P correspond au passage entre l'état plastique et l'état solide.

Ces caractéristiques sont reliées par l'indice de plasticité I_p qui s'exprime en % et est donné par la formule ci-après. $I_p = W_L - W_p$

A- Limite de liquidité W_L

La limite de liquidité est mesurée à la coupelle de Casagrande. (voir fig 3-12)
Par définition, la limite de liquidité W_L est la teneur en eau (exprimée en %) d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide (le sol est humide et déformable) et un état plastique qui correspond à une fermeture de 1cm pour un nombre de chocs N égale à 25. Si l'on étudie expérimentalement la relation qui lie le nombre de chocs N à la teneur en eau W , on constate que la courbe représentative de cette relation est une droite qui relie au moins 2 points; lorsque le nombre de chocs est compris entre 15 et 35 on prendra les valeurs de ces points on trace la droite. Pour ce même intervalle des valeurs de N , la formule approchée.

$$\text{Avec : } W_L = w \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121}$$



Fig. 3-13 Images présentant le mode opératoire de la limite de liquidité W_L

B - Limite de plasticité W_P

La limite de plasticité (W_P) est mesurée par la méthode au rouleau représente la teneur en eau du passage de l'état plastique à l'état solide. On mélange l'échantillon avec des quantités variables d'eau, on façonne avec la pâte un rouleau de 6 mm de diamètre pour une dizaine de mm de longueur. Puis on atteint 3mm de diamètre en le roulant (souvent avec les doigts), après 5 à 10 allers-retours 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, avec une hauteur de 30 mm environ. (voir fig 3-13)



Fig 3-14 Images présentant le mode opératoire de la limite de plasticité W_P .

C- Indice de plasticité (I_P)

Il donne l'étendue du domaine plastique $I_P = W_L - W_P$.

La plasticité d'un sol est appréciée par le couple (W_L , I_p) qui dépendent de la nature des minéraux argileux contenus dans le sol et de leur quantité. C'est ainsi que Casagrande a défini un diagramme dit "Abaque de plasticité de Casagrande" qui permet de classer les sols fins. Les sols peuvent se classer comme suit : (voir fig 3-14) [14]

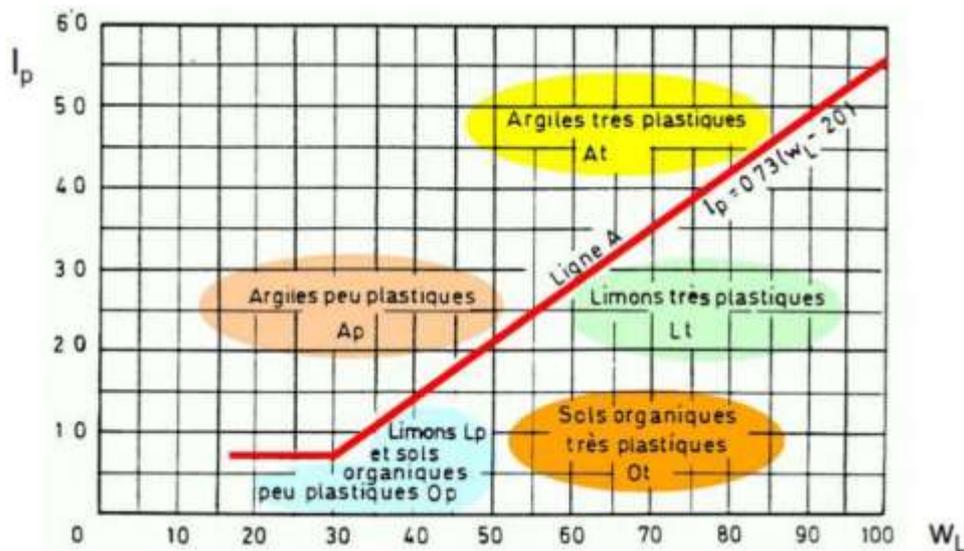


Fig 3-15 Classification des Sols en fonction de l'Abaque de Plasticité de Casagrande.

D- Indice de consistance I_c

Cet indice prend en considération la teneur en eau naturelle w d'un sol et les limite d'Atterberg permet de se faire une idée de l'état d'une argile qu'on peut caractériser par son indice de consistance :

$$I_c = \frac{W_L - W_{na}}{I_p}$$

3.3.5. Bleu de Méthylène Selon la Norme NF P 94-093

Il consiste à déterminer la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour saturer une suspension de sol dans de l'eau, soit, en d'autres termes, la quantité de bleu pouvant s'adsorber sur les particules du sol. On appelle cette quantité, la valeur au bleu, notée VBS et exprimée en grammes de bleu par grammes de sol, tel que montre l'équation :

Pour une solution 10 g/l de bleu de méthylène.

$$VBS = 0,01 \frac{V_{BM}}{m_{Sol}} \times 100$$

Chapitre 03 : Matériaux utilisés Et procédures d'essais

L'essai est effectué sur la fraction granulométrique 0/5mm du matériau, car ce sont principalement les éléments les plus fins (inférieurs à 2mm) qui contiennent la fraction argileuse. Celle-ci donne l'essentiel de la réaction au bleu de méthylène et exprime donc de manière quantifiée la sensibilité du sol à l'eau. Pour l'exécution de cet essai il faut utiliser le matériel suivant : Bicher, Éprouvette graduée, Agitateur, Papier filtre, Tige en verre, Chronomètre, Balance, et Tamis 5mm (voir fig 3-15)



Fig 3-16 matériel Essai de Bleu de Méthylène VBS.

Valeur du Bleu de Méthylène	Nature du sol
< 0.2	Sols sableux
0.2 – 2.5	Sols limoneux
2.5 - 6	Sols limoneux-argileux
6 - 8	Sols argileux
> 8	Sols tres argileux

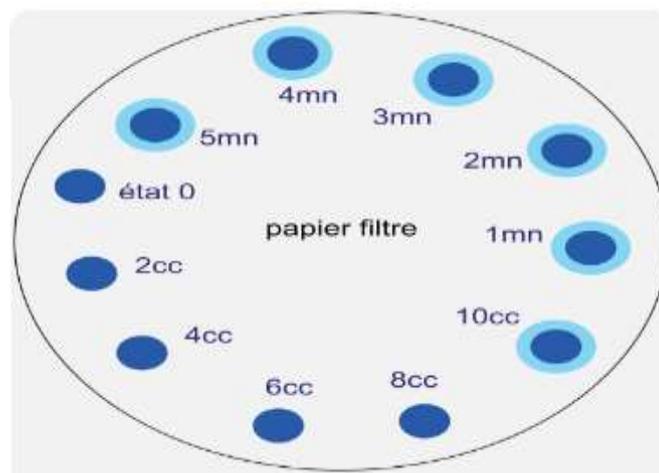


Fig 3-17 Essai au bleu de méthylène- Vue du papier filtre et des tâches auréolées.

3.3.5.1. Conduite de l'essai

On mélange 40g d'argile sèche et 500 ml l'eau distillée par l'agitateur. Le tout est maintenu en agitation permanente pendant 5 min et on fixe la vitesse de l'agitateur en 700 tour/min. ensuite on dégrader la vitesse de l'agitateur électrique jusqu'à 400 Tr/min pendant la durée de l'essai.

Le dosage consiste à injecter successivement des doses bien déterminées de bleu de méthylène dans la suspension de sol, jusqu' à atteindre la saturation des particules d'argile. On prélève une goutte de liquide dans le bêcher contenant le sol imbibé de bleu, et on dépose celle-ci sur le papier filtre (diamètre du dépôt compris entre 8 et 12 mm). Deux cas sont possibles :

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide incolore : le test est négatif.
- La goutte centrale bleue est entourée d'une auréole (zone humide teintée de bleu) : le test est positif. [15]

3.3.6 Essai Proctor Selon la Norme NF94-093

A pour but de déterminer, pour un compactage d'intensité donnée, la teneur en eau à laquelle doit être compacté un sol pour obtenir la densité sèche maximum.

La teneur en eau ainsi déterminée est appelée « teneur en eau optimum Proctor ». L'essai Proctor est réalisé pour déterminer les caractéristiques de compactage Proctor (optimum Proctor) du sol initial et des sols traités à la chaux au poudre du déchet d'olives.

Le mode opératoire est conforme à la norme NF P94-093. (voir fig 3-17) [16]



Fig 3-18 : Matériel Essai de Proctor.

3.3.7 Essai C.B.R (NF P 94 078)

L'essai CBR a pour but d'évaluer la portance du sol en estimant sa résistance au poinçonnement, afin de pouvoir dimensionner la chaussée et orienter les travaux de terrassements. (voir fig 3-18)



Fig 3-19 Matériel pour l'Essai CBR.

Le principe des essais de CBR est d'effectuer sur les échantillons compactés avec une teneur en humidité optimale, obtenus à partir de l'essai de compactage Proctor. L'expression qui définit le CBR est la suivante :

$$\text{CBR} = \left(\frac{P}{P_S} \right) \times 100$$

P = est la pression mesurée dans les sols du site [N / mm²]

P_S = est la pression pour atteindre la pénétration égale sur sol standard [N / mm²]. [16]

3.3.8 Compression simple non confinée : (l'EN 12390-4)

Essai de compression simple non confinée a pour but de déterminer la résistance à la compression simple R_c qui est définie comme la contrainte mesurée à la rupture. [16]

(voir fig 3-19)



Fig 3.20 Matériel Compression simple.

3.3.9 Essai de Gonflement libre

L'essai de gonflement libre a pour but de déterminer des caractéristiques de compressibilité d'un sol qui permettent d'estimer le tassement et gonflement d'un massif de sol.

L'essai est réalisé sous odomètre, il consiste à mesurer les variations de hauteur de trois échantillons soumis à des charges différentes, et mis en présence d'eau. (voir fig 3-20)

Il permet donc d'évaluer le comportement d'un sol argileux lors de son hydratation.



Fig 3-21 matériel pour essai Gonflement libre.

3.3.9.1. Le mode opératoire consiste

Découper un cylindre ayant 2 fois à 4 fois la hauteur de l'éprouvette et commencer à tailler.
- Il s'agit d'obtenir une éprouvette cylindrique aux dimensions du moule non perturbée par le découpage.

- Mise en place de l'éprouvette, saturation de l'éprouvette.
- Chargement et déchargement de l'éprouvette.
- Calculs et résultats (graphique, détermination des paramètres).

Remarque : Il est nécessaire de rappeler que les essais de cisaillement réalisés sont uniquement ceux qui ont donné le meilleur rendement dans l'essai de la compression.

3.3.10. Essai œdométrique : (P94-090-1)

L'essai de compression œdométrique est un essai fondamental et est une application directe de la théorie de la consolidation. il permet d'évaluer l'amplitude des tassements des ouvrages ainsi que leurs évolutions.

Il s'agit de l'essai de compressibilité par paliers, cet essai permet d'établir pour un

échantillon donné, deux types de courbes :

La courbe de compressibilité qui indique le tassement de l'échantillon en fonction du logarithme de la contrainte appliquée.

La courbe de compressibilité, qui indique le tassement de l'échantillon en fonction du temps sous l'application d'une contrainte constante.



Fig 3-22 matériel pour essai œdométrique.

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser aux paramètres oedométriques appropriés aux sols fins à caractère gonflant, et qui sont C_c et C_g

Le coefficient de gonflement C_g : qui est la pente de la courbe de déchargement.

L'indice de compressibilité C_c : qui est la pente de la tangente à la courbe de chargement, ce coefficient

Chapitre 4

Résultats Et Discussion

4.1 Introduction

Cette partie est consacrée à l'étude de la stabilisation du sol provenant de la région de hammam N'Bail, wilaya de Guelma. Deux additifs ont été utilisés dans cette étude :

La Chaux et la poudre des déchets d'olives.

Chaque additif est ajouté au sol avec différents pourcentage (3%, 6%, 9% ,12%). L'objectif principal de ce chapitre est donc d'interpréter et de discuter les résultats obtenus par les essais expérimentaux.

4.2. Discussion du résultat des essais

4.2.1. Essai de limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont les paramètres clés pour mesurer les teneurs en eau critiques d'un sol argileux. Pour chaque pourcentage en chaux et en poudre du déchet d'olives, nous avons effectué des mesures de limites d'Atterberg (limite de liquidité, limite de plasticité, et indice de plasticité).

4.2.1.1. Limite de plasticité

La limite de plasticité est obtenue lorsque simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint 3 mm, comme le montre la figure ci-dessous (voir fig 4.1).

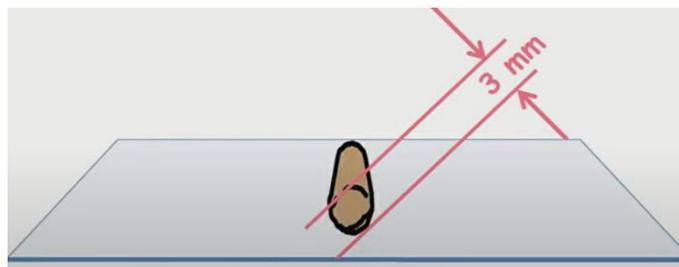


Fig. 4-1 détermination de la limite de plasticité.

Elle est définie comme le passage de l'état solide avec retrait à l'état plastique, notée ω_P .

La limite de plasticité du sol étudié à différents pourcentages de la chaux et de la poudre de déchets d'olives 3%, 6%, 9%, et 12%. On observe, que la limite de plasticité a augmenté pour les différents pourcentages de la chaux (additif) et le tableau 4.1 et la Figure 4.2 présentent l'évolution.

Chapitre 4 : résultats et discussion

Tableau 4.1 Valeurs des limites de plasticité des sols traités aux différents pourcentages en chaux.

Sol traité par la chaux	Sol non traité	3% Chaux	6% Chaux	9%	12% Chaux
Limite de plasticité, ω_p(%)	24.2	36.9	38.5	39.87	41.17

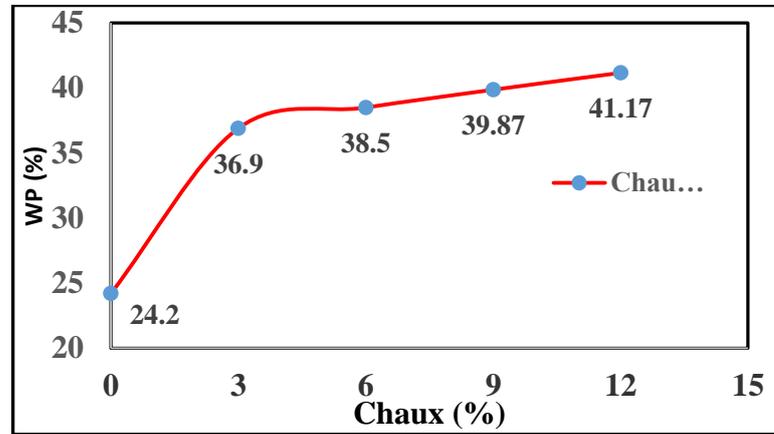


Fig.4-2 l'évolution de la limite de plasticité du sol étudié à différents pourcentages en chaux.

On observe également que la limite de plasticité a augmenté aussi pour les différents pourcentages de la poudre du déchet d'olive (PDO) comme le montre le tableau 4.2 et la Figure 4.3 qui présentent l'évolution de la limite de plasticité en fonction des pourcentages de cet additif.

Tableau 4.2 Valeurs des limites de plasticité des sols traités aux différents pourcentages en PDO.

Sol traité par la PDO	Sol non traité	3% PDO	6% PDO	9% PDO	12% PDO
Limite de plasticité, ω_p(%)	24.2	23.33	25.52	26.04	28.62

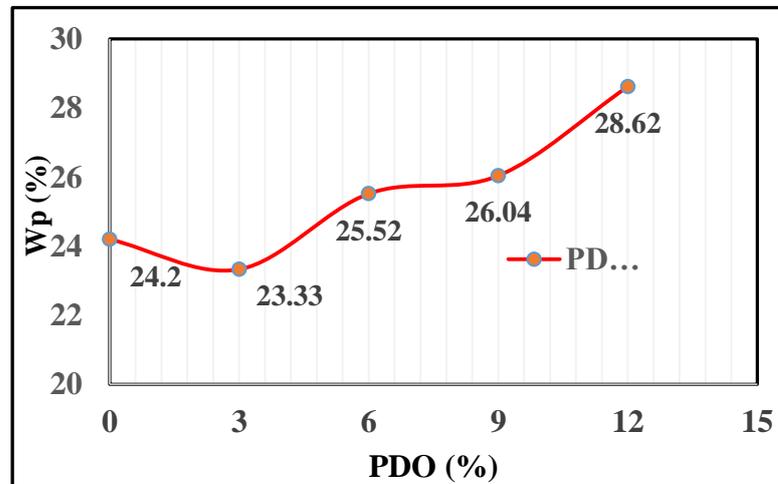


Fig.4-3 l'évolution de la limite de plasticité du sol étudié à différents pourcentages en PDO.

Chapitre 4 : résultats et discussion

Le Tableau 4.3 et la Figure 4.4 présentent l'évolution de la limite de plasticité du sol étudié à différents pourcentages en chaux et en PDO. On observe sur la figure 4.4 que la limite de plasticité a augmenté pour les différents pourcentages en chaux et en PDO. Cette augmentation de la limite de plasticité peut être expliquée par un changement significatif des propriétés du sol traité à court terme par ces additifs.

Tableau 4.3 Valeurs des limites de plasticité des sols traités aux différents pourcentages en chaux et en PDO.

Sol traité par la chaux	Sol non traité	3% Chaux	6% Chaux	9% Chaux	12% Chaux
Limite de plasticité, ω_p (%)	24.2	36.9	38.5	39.87	41.17
Sol traité par la PDO	Sol non traité	3% PDO	6% PDO	9% PDO	12% PDO
Limite de plasticité, ω_p (%)	24.2	23.33	25.52	26.04	28.62

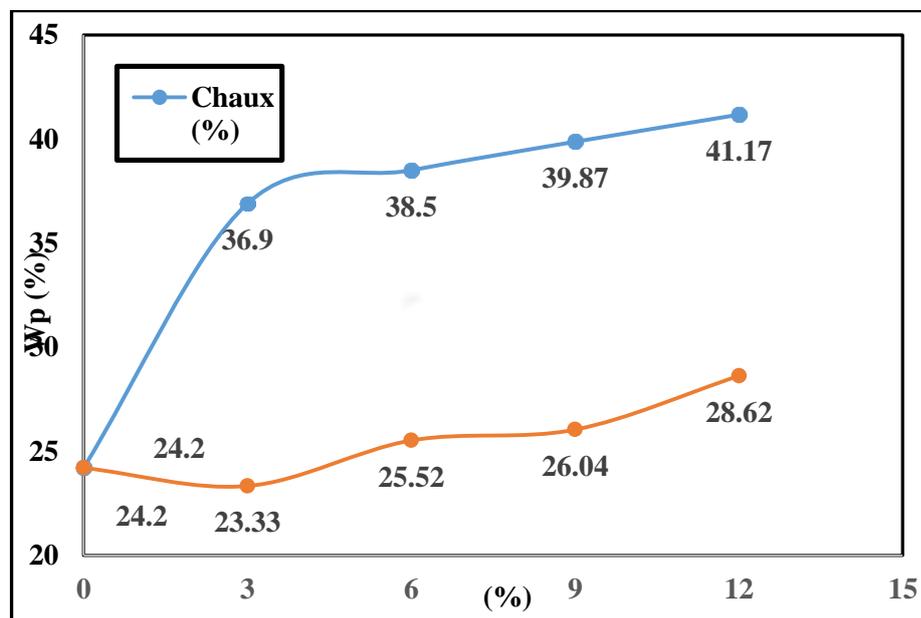


Fig.4-4 l'évolution de la limite de plasticité du sol étudié à différents pourcentages en chaux et en PDO.

4.2.1.2. Limite de liquidité

La limite de liquidité (ω_L) est la teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique.

Il existe deux méthodes pour la détermination de la limite de liquidité :

A- Cone Penetration Method (voir fig 4-5)

B- Casagrande Method (voir fig 4-6)



Fig.4-5 Cone Penetration

B- Méthode de la coupelle de Casagrande



Fig.4-6 la coupelle de Casagrande pour la détermination de la limite de liquidité

Chapitre 4 : résultats et discussion

On a utilisé la méthode de la coupelle de Casagrande pour la détermination de la limite de liquidité et pour présenter l'évolution de la limite de liquidité du sol étudié à différents pourcentages en chaux et en PDO. On observe que la limite de liquidité diminue fortement avec la quantité de la chaux ajoutée (3%, 6%, et 9% et 12%) et augmente avec la quantité de la PDO (3%, 6%, et 9% et 12%) .

On constate également qu'il y a une diminution de la limite de liquidité avec l'ajout de la quantité de la chaux et le tableau 4.4 et la Figure 4.7 présentent l'évolution de la limite de liquidité avec les pourcentages de la chaux.

Tableau 4-4 Valeurs des limites de liquidité des sols traités aux différents pourcentages en chaux.

Sol traité par la chaux	Sol non traité	3% Chaux	6% Chaux	9%	12% Chaux
Limite de plasticité, ω_L (%)	55.56	54.84	49.41	49.25	47.89

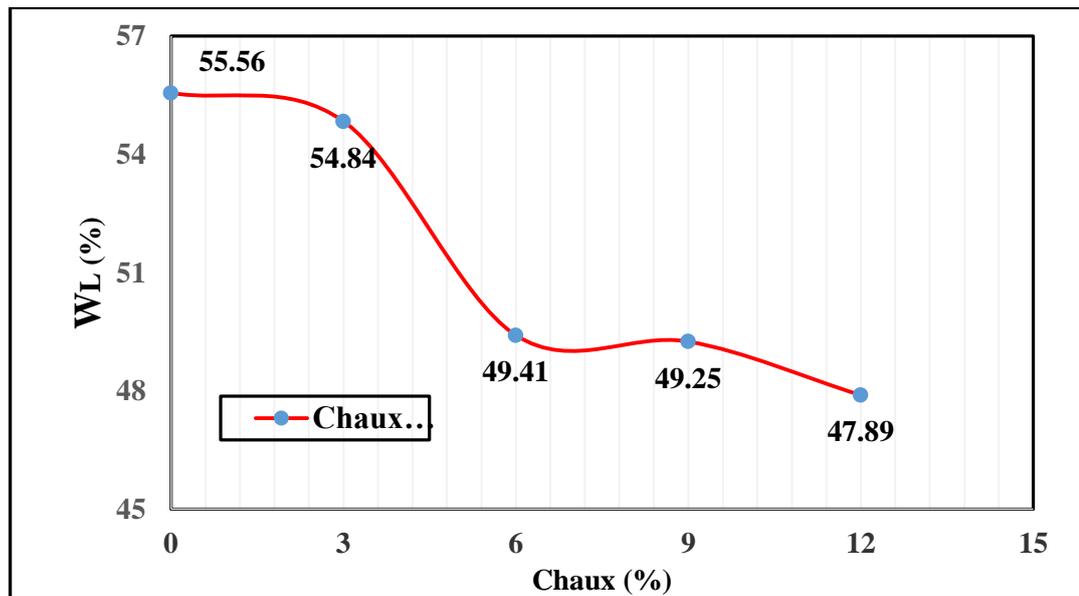


Fig.4-7 l'évolution de la limite de liquidité du sol étudié à différents pourcentages en chaux.

Chapitre 4 : résultats et discussion

On observe le contraire concernant la limite de liquidité qui a augmenté pour les différents pourcentages de la poudre du déchet d'olive (PDO) comme le montre le tableau 4.5 et la Figure 4.8 qui présentent l'évolution de la limite de liquidité en fonction des pourcentages de cet additif.

Tableau 4-5 Valeurs des limites de liquidité des sols traités aux différents pourcentages en PDO.

Sol traité par la PDO	Sol non traité	3% PDO	6% PDO	9% PDO	12% PDO
Limite de plasticité, ω_L (%)	55.56	55.75	58.62	59.98	61.58

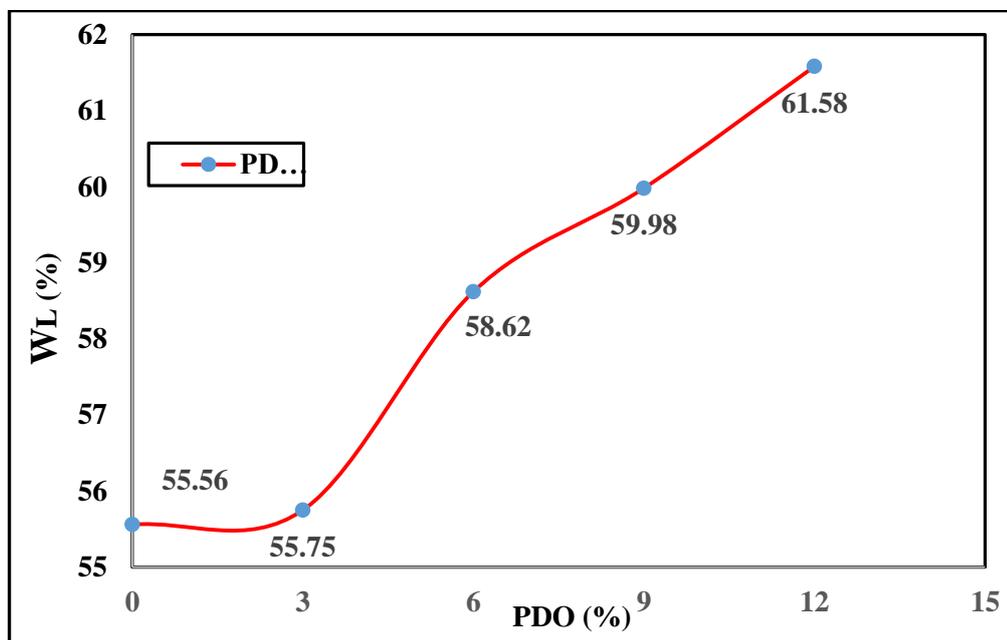


Fig.4-8 l'évolution de la limite de liquidité du sol étudié à différents pourcentages en PDO.

Le Tableau 4.6 et la Figure 4.9 présentent l'évolution de la limite de liquidité du sol étudié à différents pourcentages en chaux et en PDO. On observe sur la figure 4.9 que la limite de liquidité a diminué pour les différents pourcentages en chaux mais au contraire la limite de liquidité a augmenté pour le cas des pourcentages en PDO.

Cette augmentation de la limite de liquidité peut être expliquée par la réaction de la poudre du déchet d'olive avec l'eau qui influe sur l'augmentation de la limite de liquidité.

Chapitre 4 : résultats et discussion

Tableau 4-6 Valeurs des limites de liquidité des sols traités aux différents pourcentages en chaux et en PDO.

Sol traité par la chaux	Sol non traité	3% Chaux	6% Chaux	9% Chaux	12%
Limite de plasticité, ω_L	55.56	54.84	49.41	49.25	47.89
Sol traité par la PDO	Sol non traité	3% PDO	6% PDO	9% PDO	12% PDO
Limite de plasticité, ω_L	55.56	55.75	58.62	59.98	61.58

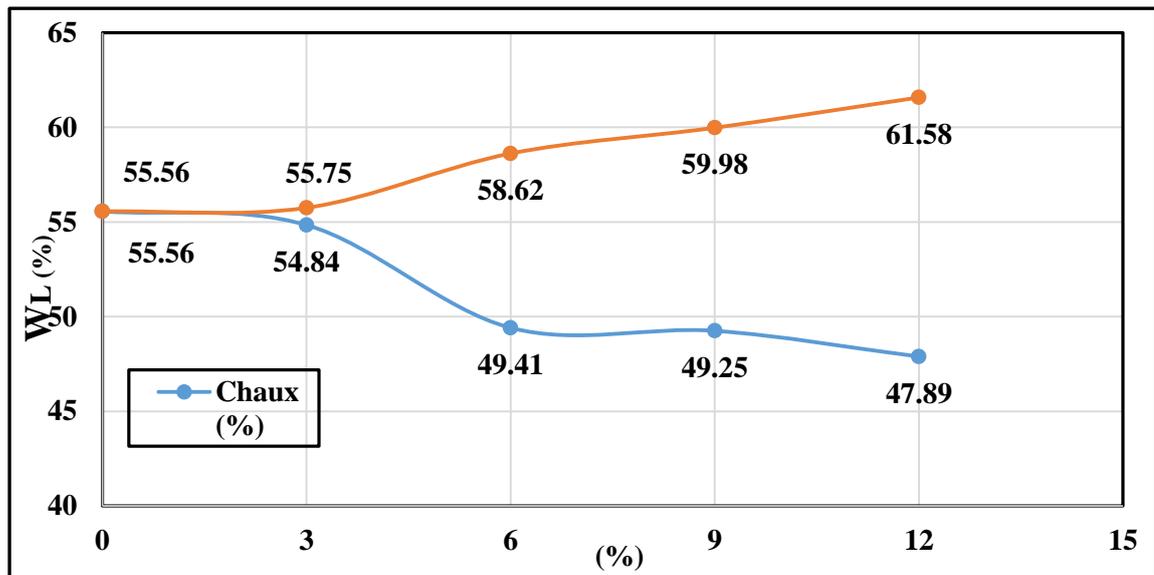


Fig.4-9 l'évolution de la limite de liquidité du sol étudié à différents pourcentages en chaux et en PDO.

4.2.1.3 Indice de plasticité (I_p)

L'indice de plasticité I_p , c'est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité. L'indice de plasticité mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. il s'exprime donc par la relation : $I_p = \omega_L - \omega_P$. L'indice de plasticité caractérise la largeur de la zone où le sol étudié a un comportement plastique.

$$I_p = \omega_L - \omega_P$$

$$I_p = 55.56 - 24.2 = 31.36$$

Burmister (1967) a proposé pour les sols la classification suivante en fonction de l'indice de plasticité, I_p

Chapitre 4 : résultats et discussion

I_p value	Description of plasticity
0	Non plastic (non plastique)
1 - 5	Très faiblement plastique (Very low Plastic)
5 - 10	Faiblement plastique (low Plastic)
10 - 20	Moyennement plastique (medium Plastic)
20 - 40	Plastique (plastic)
> 40	Très plastique (very plastic)

I_p=31.36 (sol plastique)

L'indice de plasticité du sol étudié à différents pourcentages d'additifs. On observe que l'indice de plasticité I_p diminue fortement avec la quantité de la chaux comme le montre le tableau 4.7 et la figure 4.10

Tableau 4-7 Valeurs des indices de plasticité des sols traités aux différents pourcentages en chaux.

Sol traité par la chaux	Sol non traité	3%	6%	9%	12%
L'indice de plasticité, I_p	31.36	17.94	10.91	9.38	6.72

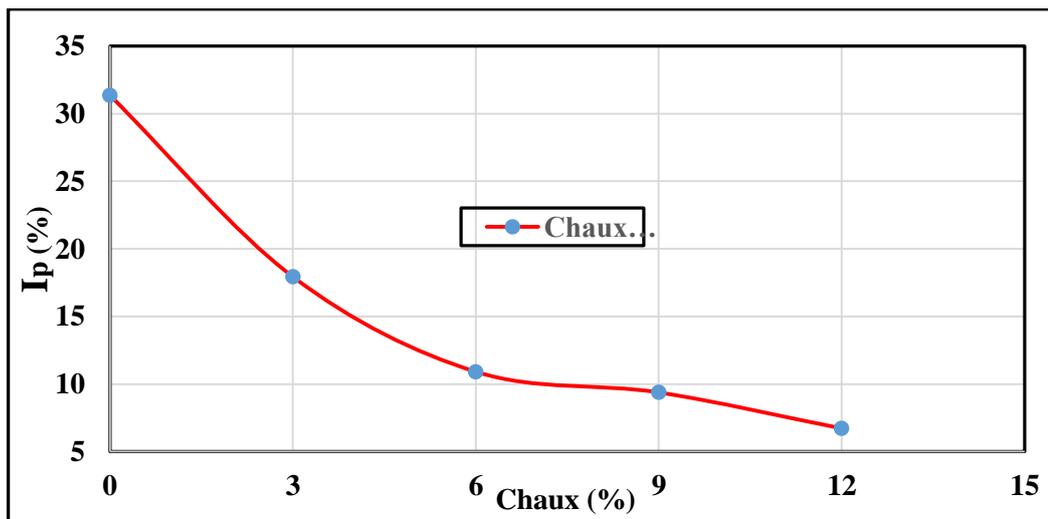


Fig.4-10 l'évolution de l'indice de plasticité du sol étudié à différents pourcentages en chaux.

Chapitre 4 : résultats et discussion

On observe le contraire concernant l'indice de plasticité qui a augmenté pour les différents pourcentages de la poudre du déchet d'olive (PDO) comme le montre le tableau 4.8 et la Figure 4.11 qui présentent l'évolution de l'indice de plasticité en fonction des pourcentages de cet additif.

Tableau 4.8 Valeurs des indices de plasticité des sols traités aux différents pourcentages en PDO.

Sol traité par la PDO	Sol non traité	3% PDO	6% PDO	9% PDO	12% PDO
L'indice de plasticité, I_p	31.36	32.42	33.10	33.94	32.96

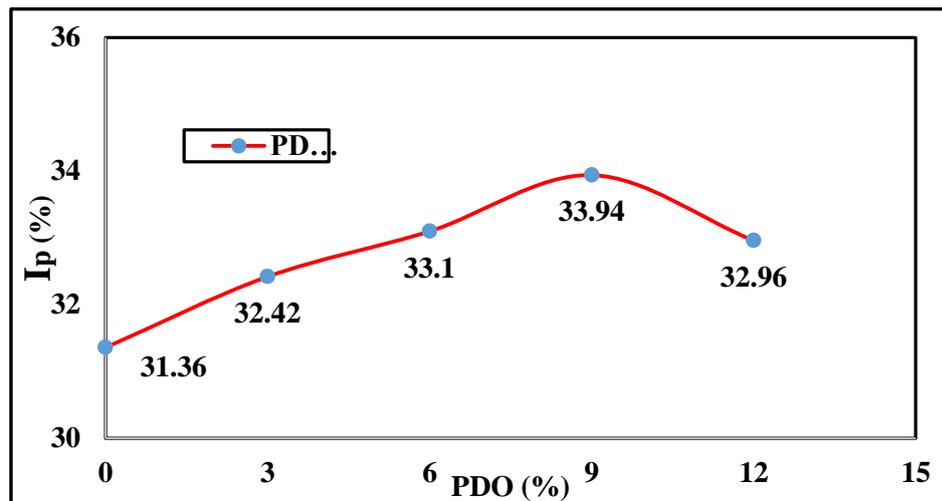


Fig.4-11 l'évolution de l'indice de plasticité du sol étudié à différents pourcentages en PDO.

Le tableau 4.9 et la figure 4.12 présentent l'évolution de l'indice de plasticité du sol étudié à différents pourcentages de la chaux et de la poudre du déchet d'olive. On observe que l'indice de plasticité I_p diminue fortement avec la quantité des pourcentages de la chaux ajoutée ensuite il se stabilise pour des pourcentages plus élevés.

En ce qui concerne l'ajout des pourcentages de la poudre du déchet d'olive, l'indice de plasticité augmente légèrement avec l'augmentation des pourcentages de la poudre du déchet d'olive avant de se stabiliser et diminue pour le pourcentage de 12%.

Tableau 4-9 Valeurs des limites de liquidité des sols traités aux différents pourcentages en chaux et en PDO.

Sol traité par la chaux	Sol non traité	3% Chaux	6% Chaux	9% Chaux	12%
L'indice de plasticité,	31.36	17.94	10.91	9.38	6.72
Sol traité par la PDO	Sol non traité	3% PDO	6% PDO	9% PDO	12% PDO
L'indice de plasticité,	31.36	32.42	33.10	33.94	32.96

Chapitre 4 : résultats et discussion

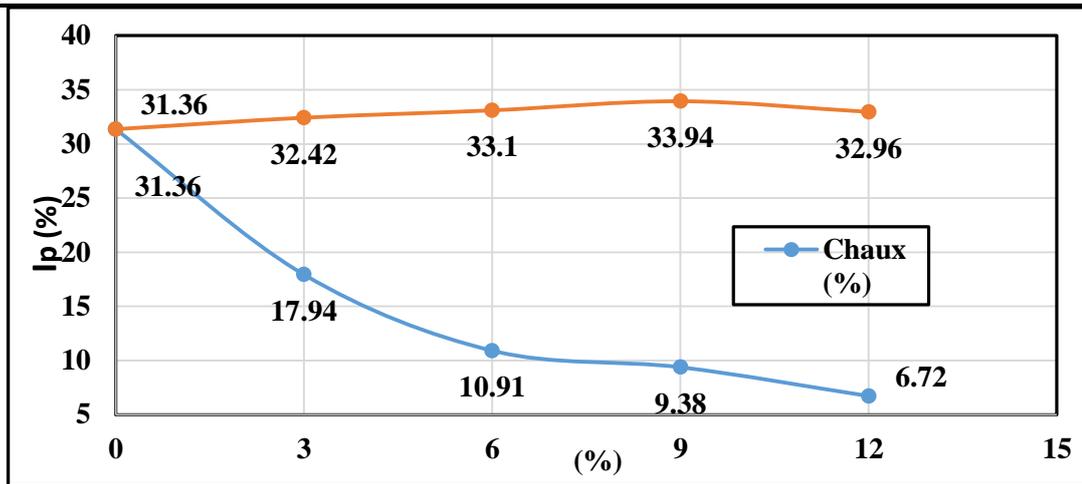


Fig.4-12 l'évolution de l'indice de plasticité du sol étudié à différents pourcentages en chaux et en PDO.

4.2.1.4 Indice de liquidité (I_L)

Il est défini comme le rapport entre la différence entre la teneur naturelle en eau du sol et sa limite plastique à son indice de plasticité.

$$I_L = \frac{\omega_N - \omega_P}{I_P}$$

$$I_L = 17.89 - 24.2 / 31.36 = -0.20 < 0 \text{ (état semi-solide)}$$

Resistance élevée, rupture fragile attendue

Valeurs de LI(I_L)	L'état	Description de la resistance
$LI < 0$	L'état semi-solid	Résistance élevée, rupture fragile attendue.
$0 < LI < 1$	L'état plastique	Résistance intermédiaire, le sol se déforme comme une matière plastique
$LI > 1$	L'état liquid	Résistance faible, le sol se déforme comme un fluide visqueux.

4.2.1.5 Induce de consistance (Consistency Index), I_C

$$I_C = \frac{\text{Limite de liquidité} - \text{teneur en eau naturelle}}{\text{Indice de plasticité}} ; I_C = \frac{W_L - \omega_N}{I_P} ; I_C = \frac{W_L - \omega_N}{W_L - W_P}$$

$$I_C = W_L - W_{na} / IP$$

$$I_C = (55.56 - 17.89) / 31.36 = 1.07$$

Chapitre 4 : résultats et discussion

Pour $W_L = \omega_N$	→	$I_C = 0$, résistance de cisaillement presque nulle.
Pour $W_P = \omega_N$	→	$I_C = 1$, légèrement rigide.
Pour $I_C > 1$	→	deviant plus rigide.
Pour $\omega_N > W_L$	→	I_C négatif, pas de résistance de cisaillement.

Indice de consistance I_C	Etat du sol
$I_C > 1$	Solide
$0 < I_C < 1$	Plastique
$I_C < 0$	Liquide

4.2.2 Essai au bleu de méthylène

L'essai est réalisé selon la norme (NF P 94-068) et consiste à déterminer la quantité du bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir d'une couche monomoléculaire de la surface des particules d'un matériau en suspension dans l'eau. La capacité d'adsorption du matériau est déterminée à l'aide du test de la tâche. Ce dernier consiste à former avec une goutte de la suspension sur papier filtre normalisé, une tâche qui est le dépôt de sol coloré en bleu, entouré d'une zone humide en général incolore.

L'excès du bleu se traduit par l'apparition dans cette zone d'une auréole d'un bleu clair. Le test est alors positif (voir fig 4.13)



Fig. 4-13 l'état du test de Bleu de méthylène.

Chapitre 4 : résultats et discussion

Les résultats de l'essai au bleu de méthylène pour sol non traité et sol traité, sol + la chaux pour les dosages (3%,6%, 9% et 12%) et le sol + la poudre du déchet d'olive pour les dosages (3%,6%, 9% et 12%) a été présentés sur la figure 4.14 et le Tableau 4.10



fig 4-14 Traitement du sol pour déterminez la Valeurs de VBS pour sol non traite et traite avec la chaux et la poudre du déchet d'olive.

Tableau 4.10 Valeurs de VBS pour sol non traite et traite avec la chaux et la poudre du déchet d'olive.

La chaux	Sol non traité	3%	6%	9%	12%
VBS	7.25	6.75	6.25	6.00	5.75
Type de sol	Sol argileux	Sol argileux	Sol argileux	Sol argileux	Sol limoneux argileux
La PDO	Sol non traité	3%	6%	9%	12%
VBS	7.25	8.00	8.25	8.50	8.75
Type de sol	Sol argileux	Sol très argileux	Sol très argileux	Sol très argileux	Sol très argileux

D'après les résultats du Tableau ci-dessus, on remarque que la chaux diminue l'argilosité du sol par contre, la poudre du déchets d'olives augmente l'argilosité cela influe sur la composition du mélange.

La variation des VBS en fonction du sol non traité et traité (chaux et poudre du déchet d'olive) est présentée à la figure 4.15.

Chapitre 4 : résultats et discussion

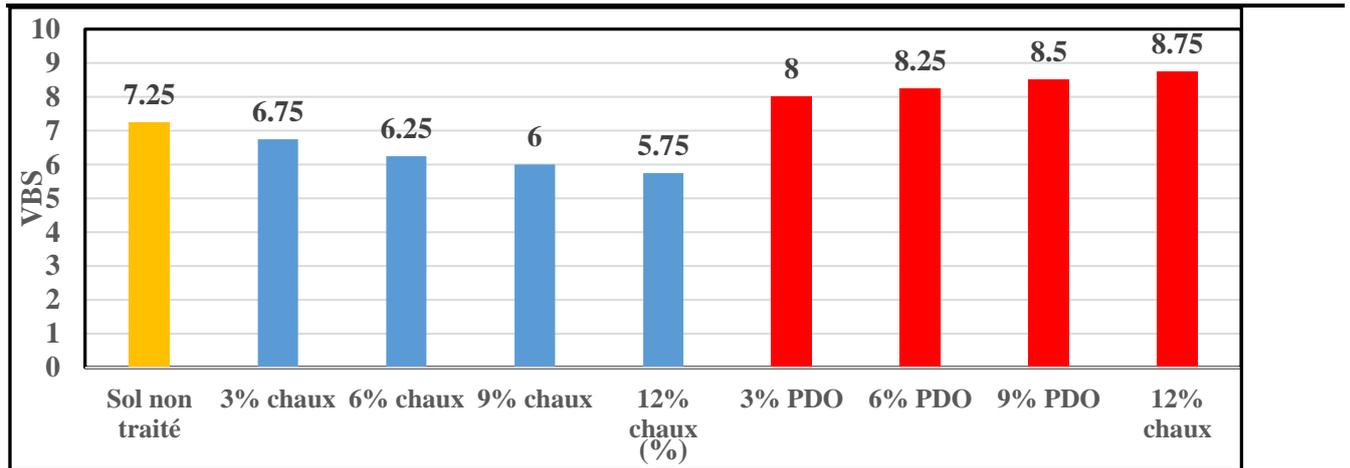


Fig. 4-15 Variation des VBS en fonction du sol non traité et traité (chaux et poudre du déchet d'olive).

4.2.3 Essai Proctor NF P94-093

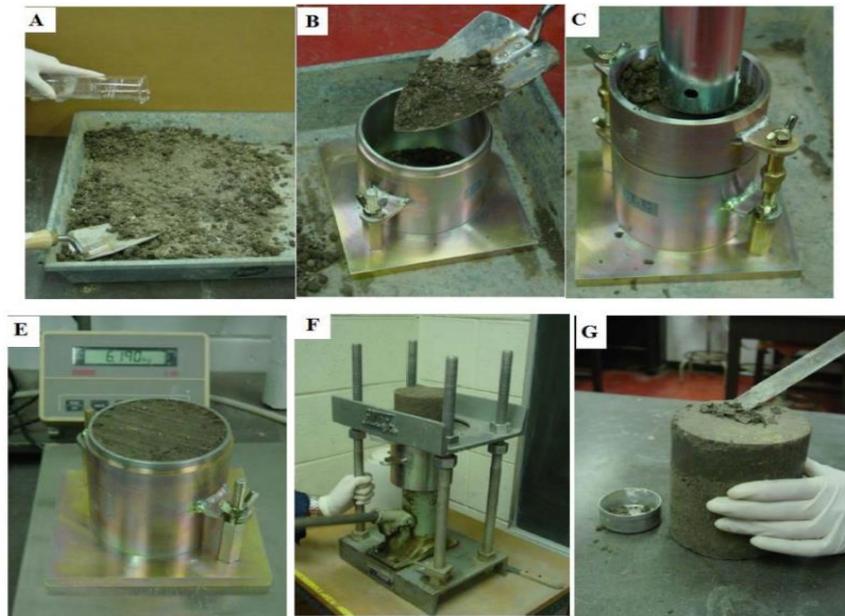


Fig. 4-16 Etapes de l'essai Proctor.

A pour but de déterminer, pour un compactage d'intensité donnée, la teneur en eau à laquelle doit être compacté un sol pour obtenir la densité sèche maximum.

L'essai est réalisé pour déterminer les caractéristiques de compactage d'un sol naturel et des sols traités à la chaux et à la poudre du déchet d'olives avec différents pourcentage (3%, 6%, 9% ,12%) pour chaque additif.

Chapitre 4 : résultats et discussion

Le mode opératoire est conforme à la norme NF P94-093 et les résultats comme suite.

La Figure 04-17 donne l'évolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol non traité .

4.2.3.1 Sol non traité

Sol naturel (sol non traité)	
ω (%)	γ_d (g/cm ³)
9.1	1.37
10.02	1.48
11.3	1.51
14.13	1.33

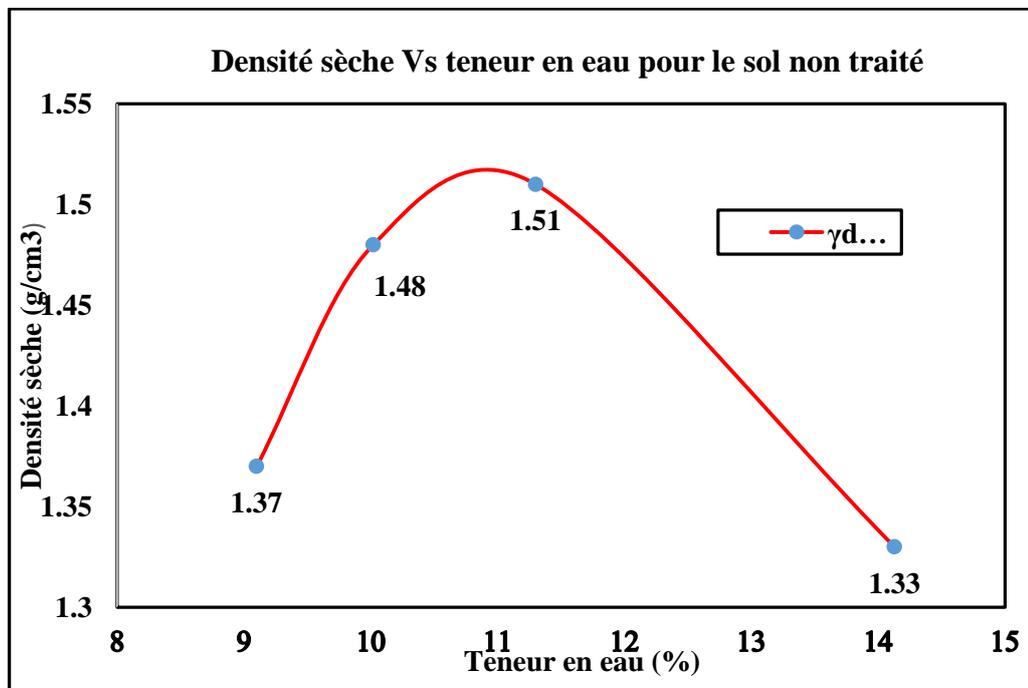


Fig. 4.17 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol non traité.

γ_{dmax} (g/cm ³)	1.51
w_{op} (%)	11.2

4.2.3.2 Sol traité par 3% de la chaux

Sol traité 03% chaux	
ω (%)	γ_d (g/cm ³)
5.9	1.53
8.04	1.58
12.05	1.66
13.81	1.52

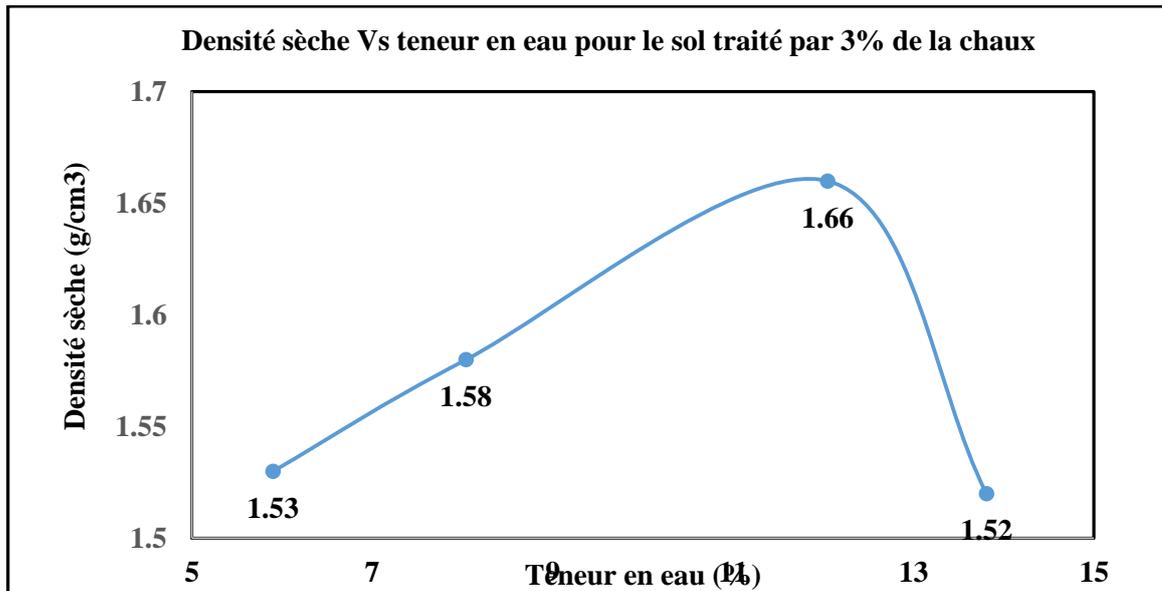


Fig. 4-18 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol traité par 3% de la chaux.

γ_{dmax} (g/cm ³)	1.66
w_{op} (%)	12

4.2.3.3 Sol traité par 6% de la chaux

Sol traité 06% chaux	
ω (%)	γ_d (g/cm ³)
5.18	13.01
6.61	13.08
9.61	1.55
11.89	1.54

Chapitre 4 : résultats et discussion

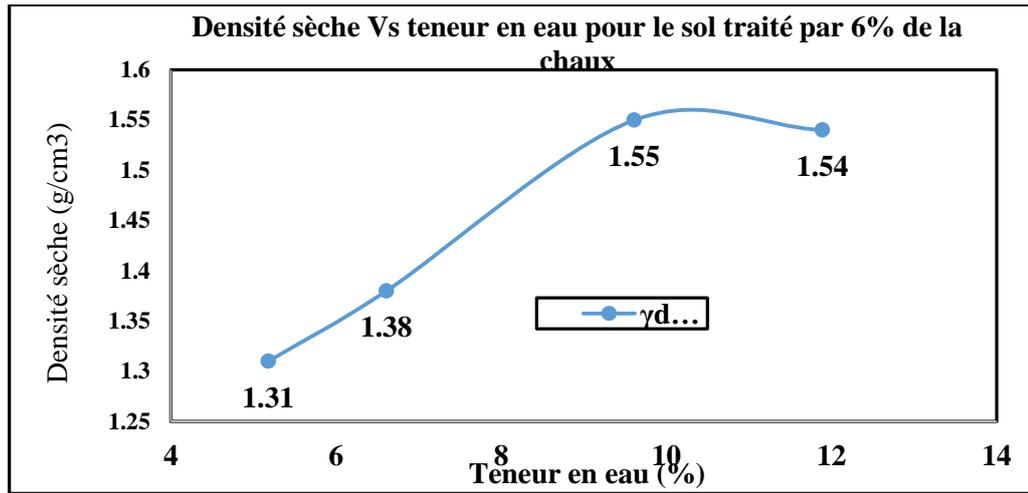


Fig. 4-19 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol traité par 6% de la chaux.

γ_{dmax} (g/cm ³)	1.55
w_{op} (%)	10.5

4.2.3.4 Sol traité par 9% de la chaux

Sol traité 09% chaux	
ω (%)	γ_d (g/cm ³)
6.4	1.52
10.89	1.55
12.6	1.56
13.9	1.53

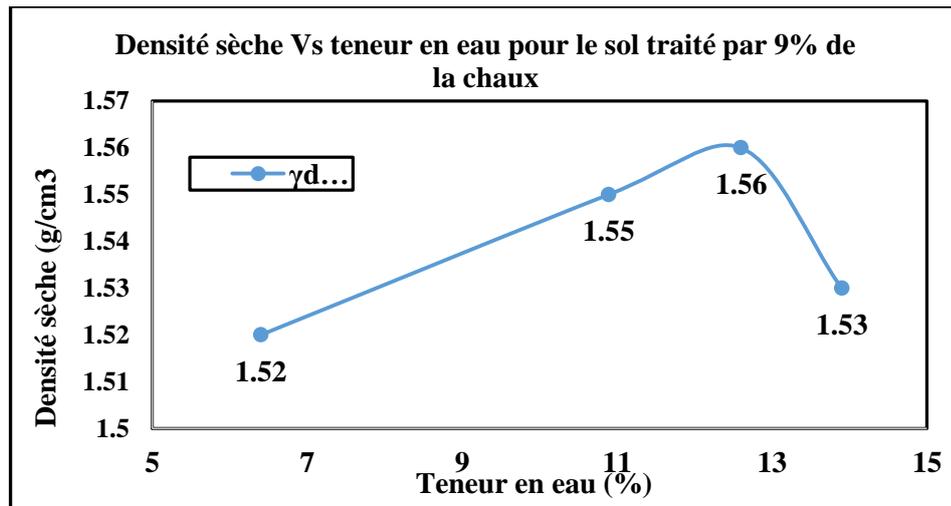


Fig. 4-20 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol traité par 9% de la chaux.

Chapitre 4 : résultats et discussion

γ_{dmax} (g/cm ³)	1.56
w_{op} (%)	12.3

4.2.3.5 Sol traité par 12% de la chaux

Sol traité 12% chaux	
ω (%)	γ_d (g/cm ³)
4.02	1.52
6.7	1.58
9.18	1.59
11.55	1.55

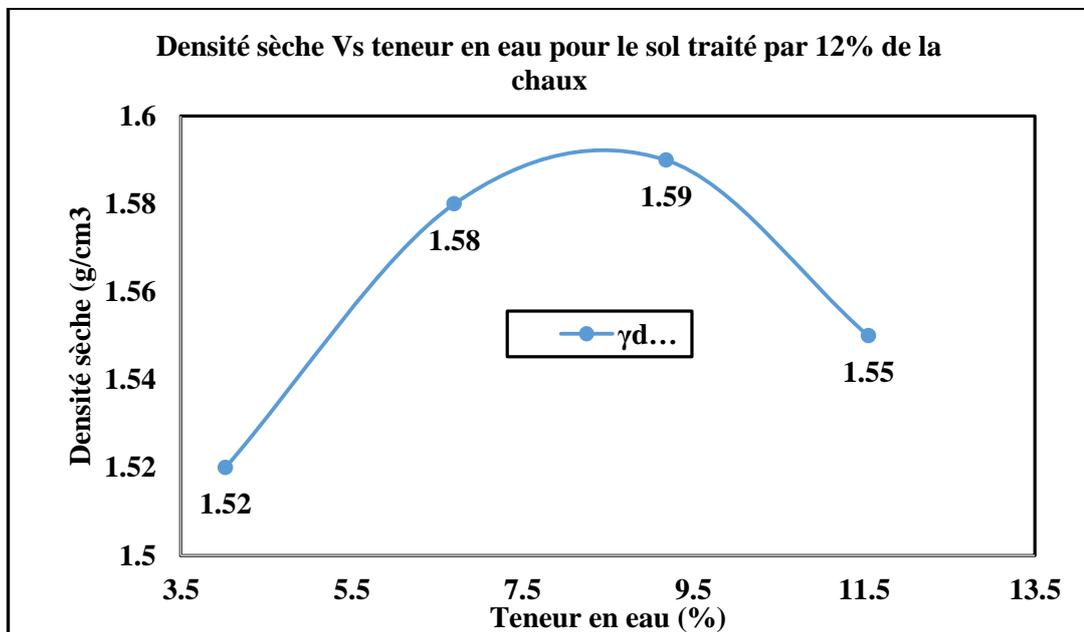


Fig. 4-21 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol traité par 12% de la chaux.

γ_{dmax} (g/cm ³)	1.59
w_{op} (%)	8.5

Chapitre 4 : résultats et discussion

4.2.3.6 Sol traité avec des différents pourcentages (3%, 6%, 9%, 12%) en chaux.

Le Tableau 4.11 présente les paramètres de compactage (la densité sèche maximum et la teneur en eau optimum) pour sol argileux non traité et sol traité avec différents pourcentages en chaux.

Tableau 4.11 Variations de la densité sèche maximum et la teneur en eau optimum en Fonction des différents pourcentages en chaux

	Paramètre de compactage	
	γ_{dmax} (g/cm ³)	W _{opm} (%)
Sol non traité	1.51	11.2
Sol + 3% chaux	1.66	12
Sol + 6% chaux	1.55	10.5
Sol + 9% chaux	1.56	12.3
Sol + 12% chaux	1.59	8.5

La Figure 4.22 donne l'évolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol non traité et sol traité aux différents pourcentages en chaux.

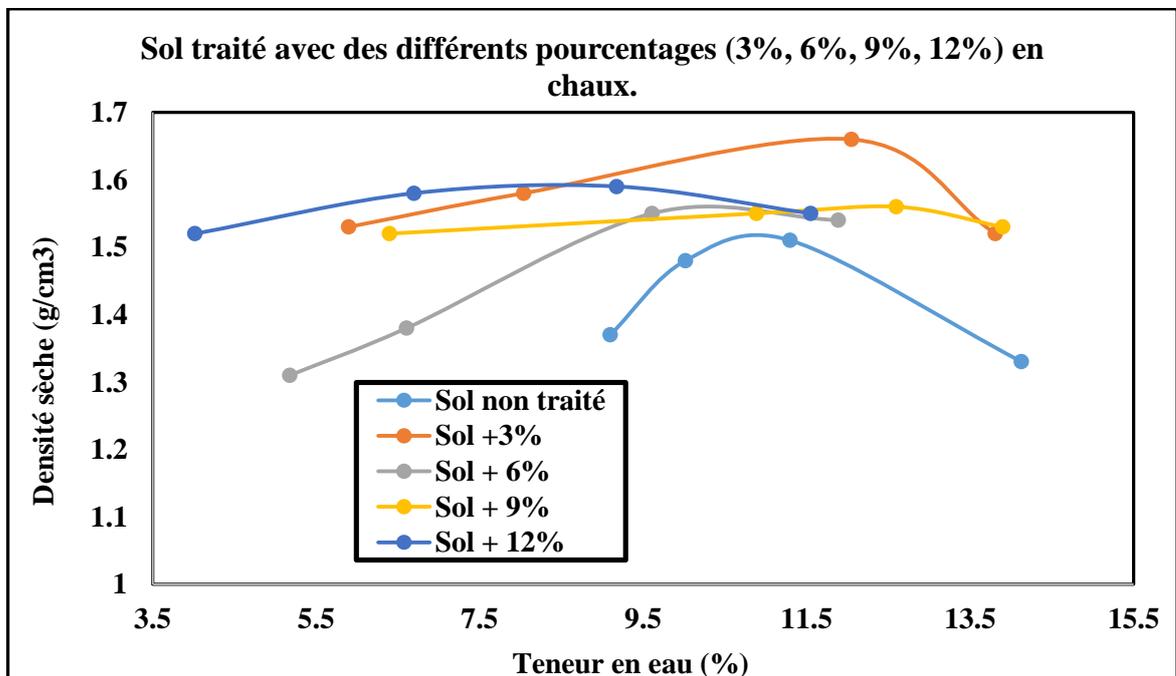


Fig. 4-22 Variations de la densité sèche maximum et la teneur en eau optimum en fonction des différents pourcentages chaux.

Chapitre 4 : résultats et discussion

On constate d'après les résultats présentés au tableau 4.11 et la figure 4.23 que la chaux fait augmenter le poids volumique sec maximal et il y a une augmentation de la teneur en eau optimale pour les pourcentages 3% et 9%.

4.2.3.7..Sol traité par 3% de la PDO.

Sol traité 03% pdo	
ω (%)	γ_d (g/cm ³)
5.02	1.52
6.68	1.54
8.74	1.59
14.1	1.57

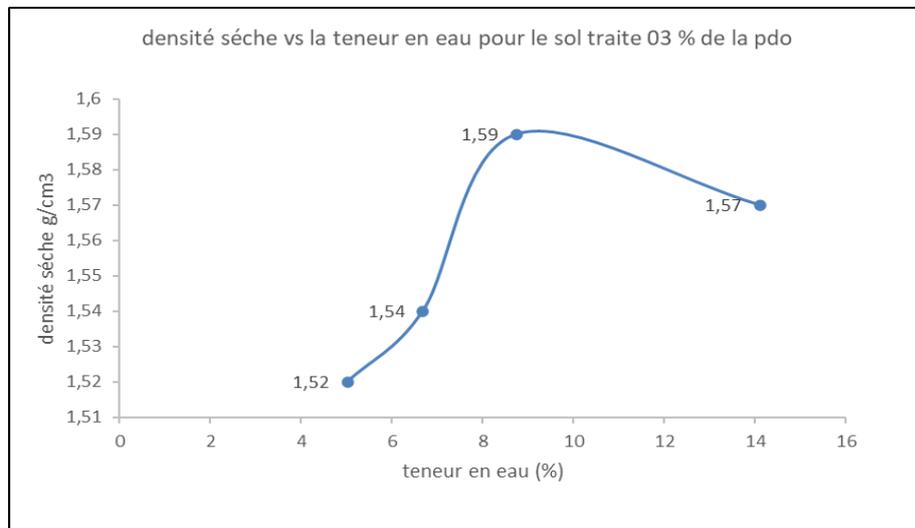


Fig. 4-23 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol traité par 3% de la PDO.

γ_{dmax} (g/cm ³)	1.59
w_{op} (%)	9.1

4.2.3.8. Sol traité par 6% de la PDO.

Sol traité 06% pdo	
ω (%)	γ_d (g/cm ³)
4.76	1.54
7.14	1.56
9.76	1.53
12.63	1.53

Chapitre 4 : résultats et discussion

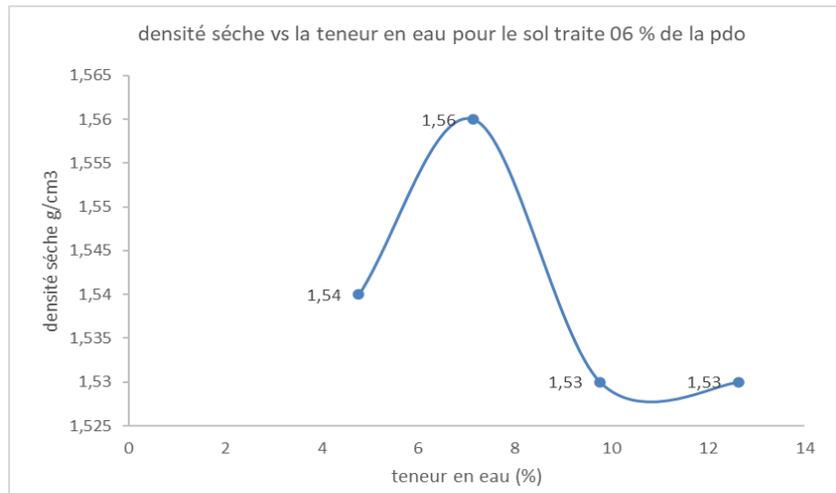


Fig. 4-24 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol traité par 6% de la PDO.

γ_{dmax}	1,56
wop	6,1

4.2.3.9. Sol traité par 9 % de la PDO.

Sol traité 09% PDO	
ω (%)	γ_d (g/cm ³)
7.21	1.42
8.87	1.44
13.12	1.46
14.92	1.45

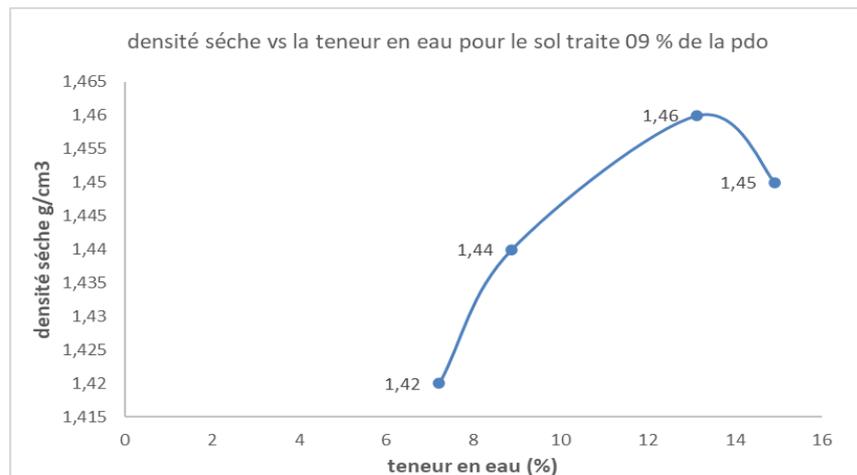


Fig. 4-25 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol traité par 9% de la PDO

Chapitre 4 : résultats et discussion

γ_{dmax}	1,46
wop	13,5

4.2.3.10. Sol traité par 12 % de la PDO.

Sol traité 09% PDO	
ω (%)	γ_d (g/cm ³)
6.34	1.48
8.6	1.52
11.7	1.45
14.6	1.44

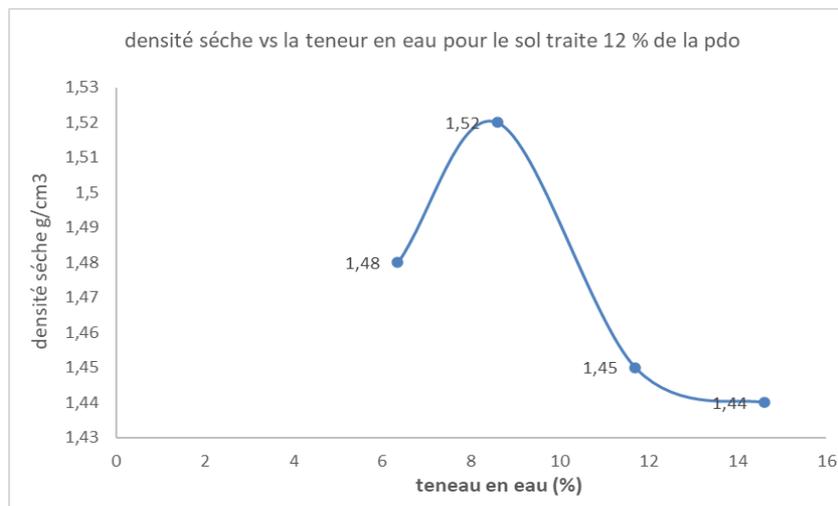


Fig. 4-26 Evolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol traité par 12 % de la PDO.

γ_{dmax}	1.52
wop	8.8

4.2.3.11. Sol traité avec des différents pourcentages (3%, 6%, 9%, 12%) en PDO.

Le Tableau 4.12 présente les paramètres de compactage (la densité sèche maximum et la teneur en eau optimum) pour sol argileux non traité et sol traité avec différents pourcentages en chaux.

Chapitre 4 : résultats et discussion

Tableau 4.12 Variations de la densité sèche maximum et la teneur en eau optimum en Fonction des différents pourcentages en PDO.

	Paramètre de compactage	
	γ_{dmax} (g/cm ³)	W _{opm} (%)
Sol non traité	1.51	11.2
Sol + 3% PDO	1.59	9.1
Sol + 6% PDO	1.56	6.1
Sol + 9% PDO	1.46	13.5
Sol + 12% PDO	1.52	8.8

La Figure 4.27 donne l'évolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour sol non traité et sol traité aux différents pourcentages en PDO

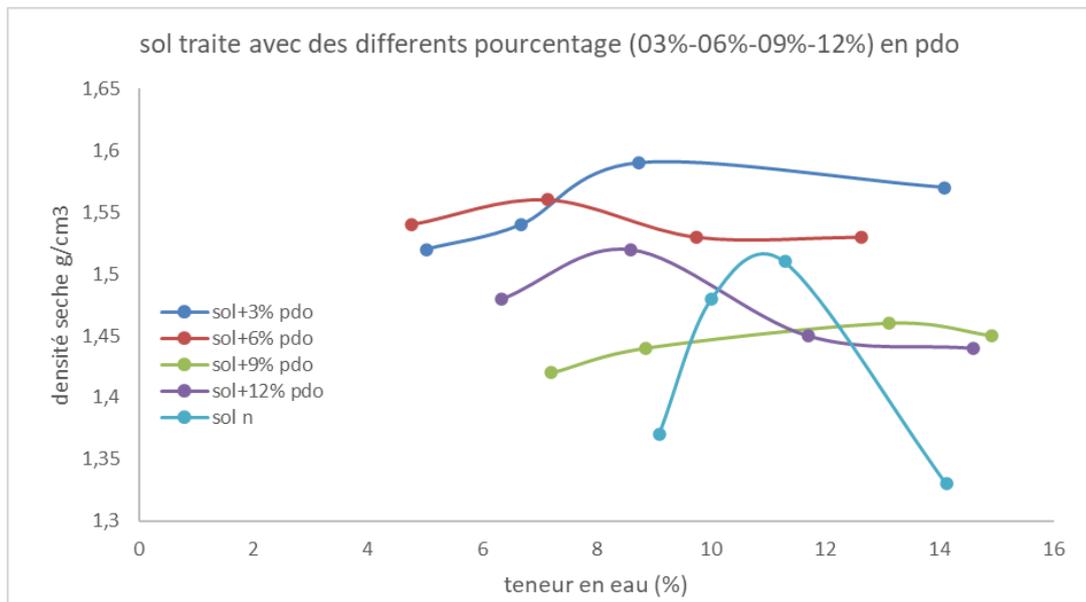


Fig. 4-27 Variations de la densité sèche maximum et la teneur en eau optimum en fonction des différents pourcentages PDO.

On constate d'après les résultats présentés au tableau 4.12 et la figure 4.27 que la PDO fait diminuer le poids volumique sec maximal et il y a une augmentation de la teneur en eau optimale pour les pourcentages 9%.

4.2.4. Essais CBR

L'essai de C.B.R est l'un des principaux essais routiers, il permet la détermination de l'indice C.B.R immédiat (C.B.R immédiat), c'est pour déterminer la portance du matériau sous les surcharges de la chaussée. La variation de l'indice C.B.R a été étudiée en fonction de la teneur en eau optimum et les différents pourcentages de la chaux et de la poudre du déchet d'olives. Les résultats obtenus seront représentés sous forme des tableaux et des courbes où les efforts de poinçonnement sont en fonction des enfoncements avec des différents pourcentages d'additifs (0%, 3%, 6%, 9%, 12%).

4.2.4.1. Sol non traité

Les valeurs de poinçonnement en fonction des enfoncements pour le sol non traité pressante comme suit :

Tableau 04.13 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité.

Sol naturel (sol non traité)		
Déplacements	Lecture	Force (kn)
0	0	0
1	42	1.080
1.5	54	1.389
2	65	1.672
2,5	75	1.929
3	84	2.161
4	99	2.547
5	112	2.88133089
7.5	135	3.47303277

Chapitre 4 : résultats et discussion

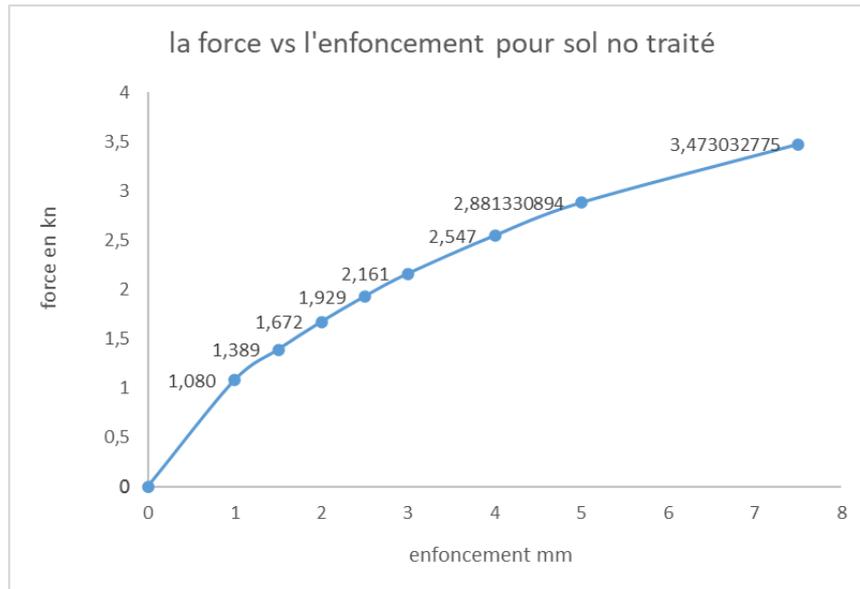


Fig. 04-28 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité

4.2.4.2. Sol traité avec pourcentages 3% chaux.

Les valeurs de poinçonnement en fonction des enfoncements pour le sol trait pressante comme suit :

Tableau 04-14 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité
Avec 03 % chaux

La chaux 3%		
Déplacements	Lecture	Force (kn)
0	0	0
1	48	1.235
1.5	60	1.544
2	72	1.852
2.5	83	2.135
3	93	2.393
4	106	2.727
5	132	3.395854268
7.5	173	4.450627185

Chapitre 4 : résultats et discussion

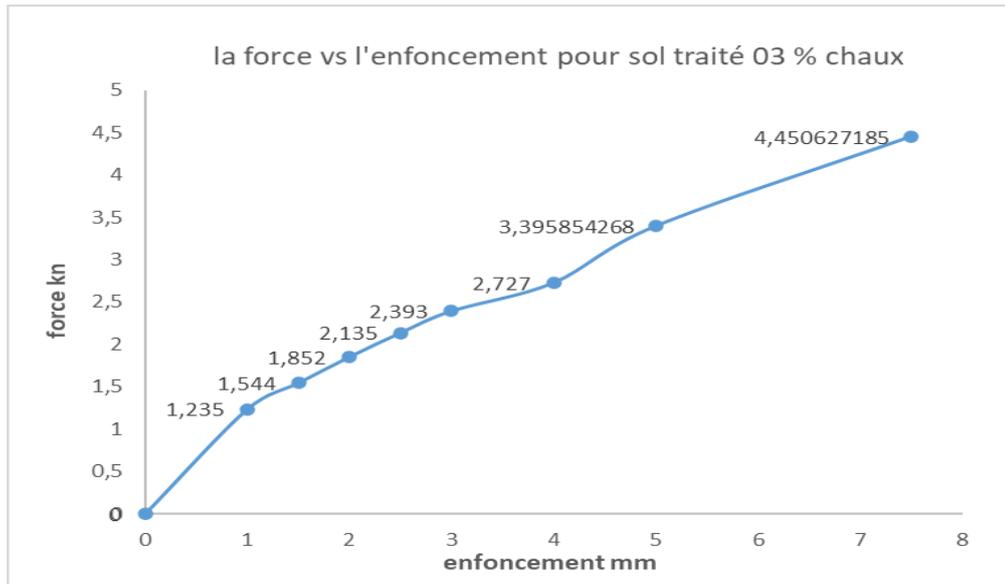


Fig. 04-29 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité 03 % chaux

4.2.4.3. Sol traité avec pourcentages 6 % chaux.

Tableau 04-15 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité

Avec 06 % chaux

La Chaux 6%		
Déplacement	Lecture	Force (kN)
0	0	0
1	58	1.492
1.5	72	1.852
2	84	2.161
2,5	94	2.418
3	104	2.676
4	122	3.139
5	132	3.39585427
7.5	161	4.14191316

Chapitre 4 : résultats et discussion

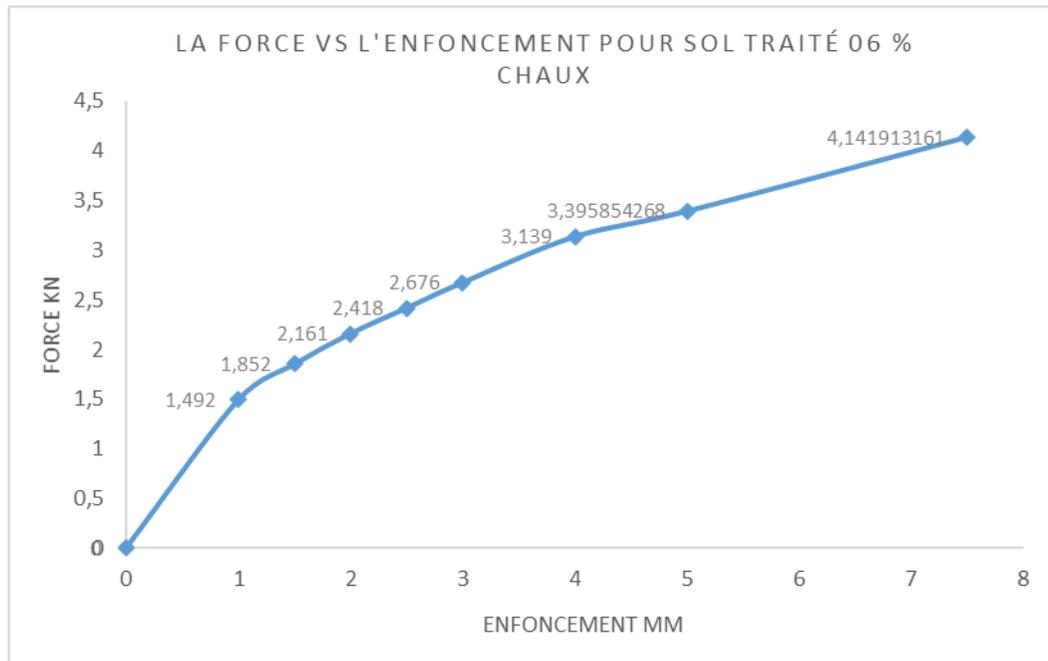


Fig. 04-30 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité 06 % chaux

4.2.4.5. Sol traité avec pourcentages 09 % chaux.

Tableau 04-16 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité Avec 09 % chaux

La Chaux 9 %		
Déplacements	Lecture	Force (kn)
0	0	0
1	62	1.595
1.5	77	1.981
2	91	2.341
2.5	104	2.676
3	115	2.959
4	138	3.550
5	158	4.06473465
7.5	197	5.06805523

Chapitre 4 : résultats et discussion

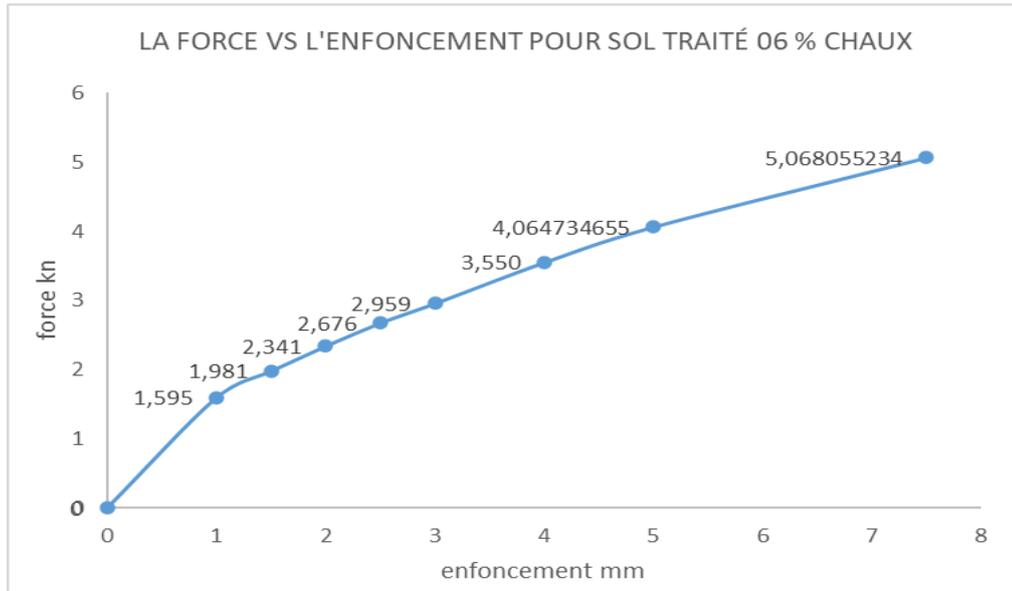


Fig. 04-31 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité 09 % chaux

4.2.4.6. Sol traité avec pourcentages 12 % chaux.

Tableau 04-17 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité Avec 12 % chaux

La chaux 12 %		
Déplacements	Lecture	Force (kn)
0	0	0
1	58	1.492
1.5	80	2.058
2	101	2.598
2.5	120	3.087
3	136	3.499
4	163	4.193
5	187	4.81079355
7.5	231	5.94274497

Chapitre 4 : résultats et discussion

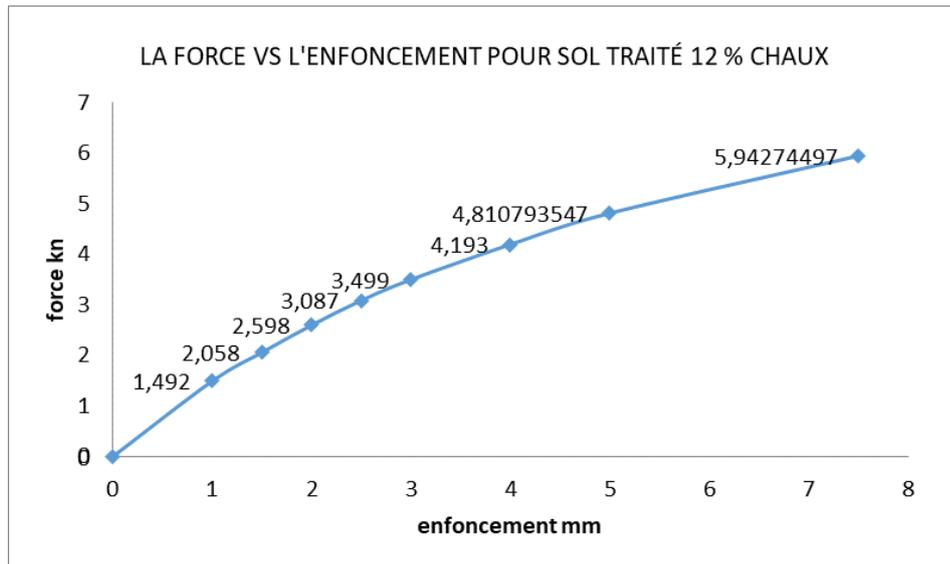


Fig. 04-32 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité 12 % chaux

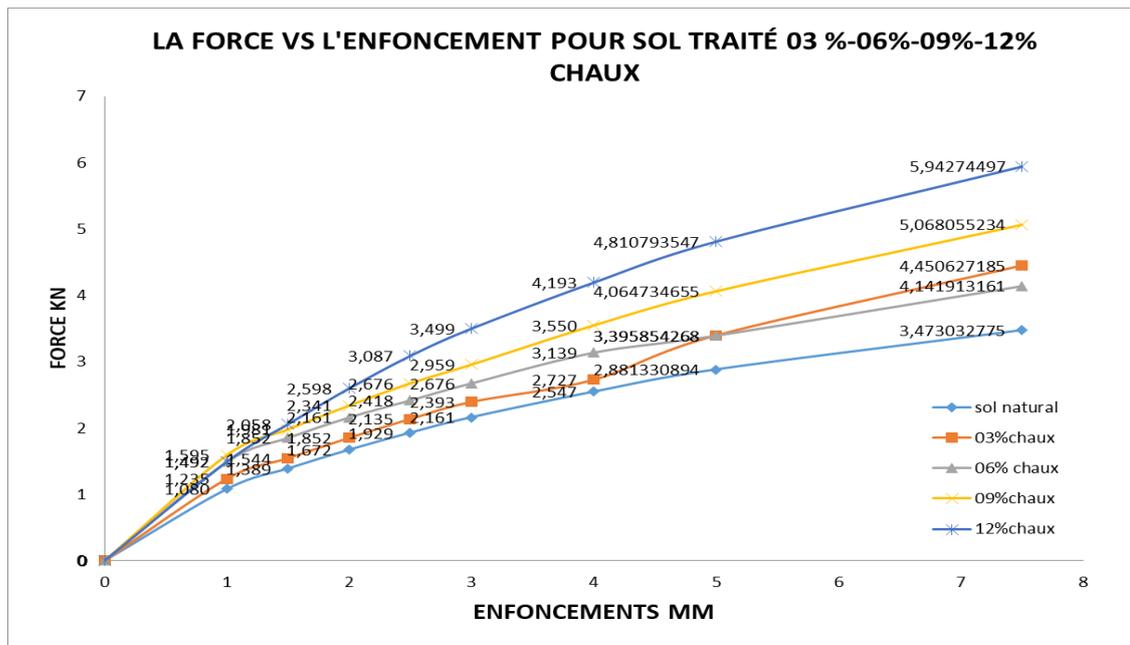


Fig. 04-33 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité et Sol traité avec des différents pourcentages (3%, 6%, 9%, 12%) de la chaux.

4.2.4.7. Sol traité avec pourcentages 3% PDO.

Les valeurs de poinçonnement en fonction des enfoncements pour le sol trait pressante comme suit :

Tableau 04-18 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité avec 03 % PDO

LA PDO 3%		
Déplacements	Lecture	Force (kn)
0	0	0
1	41	1.055
1.5	53	1.363
2	62	1.595
2.5	71	1.827
3	78	2.007
4	93	2.393
5	103	2.6498
7.5	128	3.2929

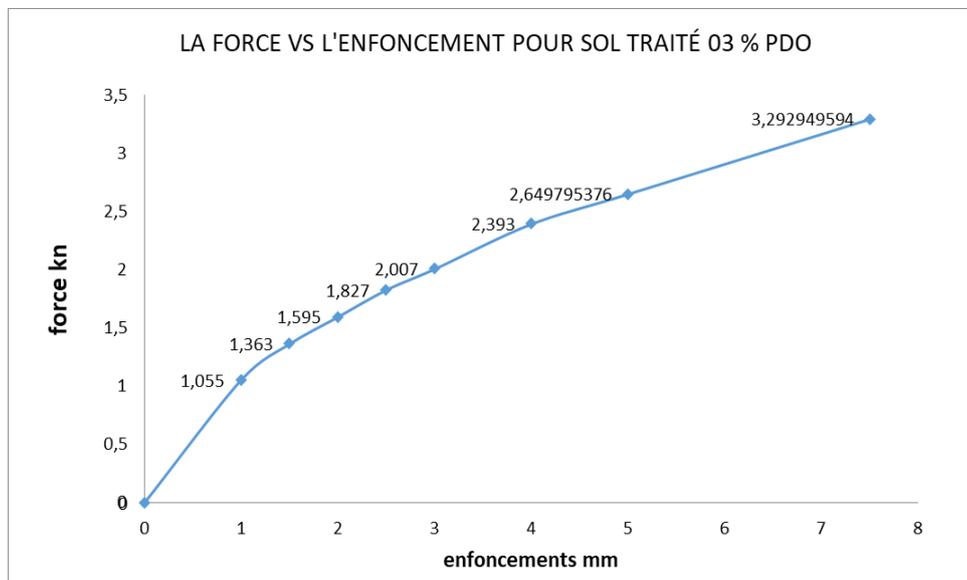


Fig 04-34 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité 03 % PDO

Chapitre 4 : résultats et discussion

4.2.4.8. Sol traité avec pourcentages 6 % PDO.

Tableau 04-19 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité
Avec 06 % PDO

LA PDO 6%		
Déplacements	Lecture	Force (kn)
0	0	0
1	29	0.746
1.5	36	0.926
2	44	1.132
2.5	52	1.338
3	62	1.595
4	78	2.007
5	101	2.598343039
7.5	141	3.627389787

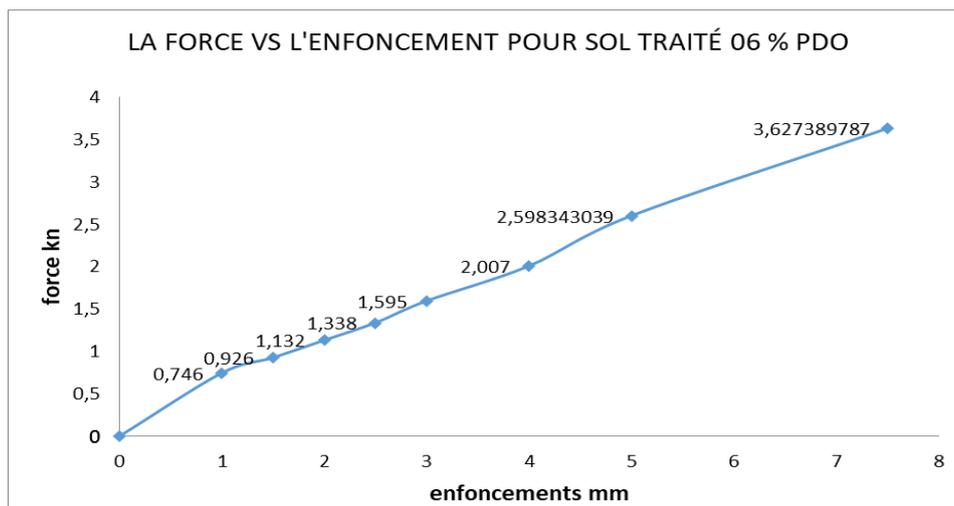


Fig. 04-35 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité 06 % PDO

Chapitre 4 : résultats et discussion

4.2.4.9. Sol traité avec pourcentages 09 % PDO.

Tableau 04-20 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité
Avec 09 % PDO

La PDO 9 %		
Déplacements	Lecture	Force (kn)
0	0	0
1	62	1.595
1.5	77	1.981
2	91	2.341
2.5	104	2.676
3	115	2.959
4	138	3.550
5	158	4.06473465
7.5	197	5.06805523

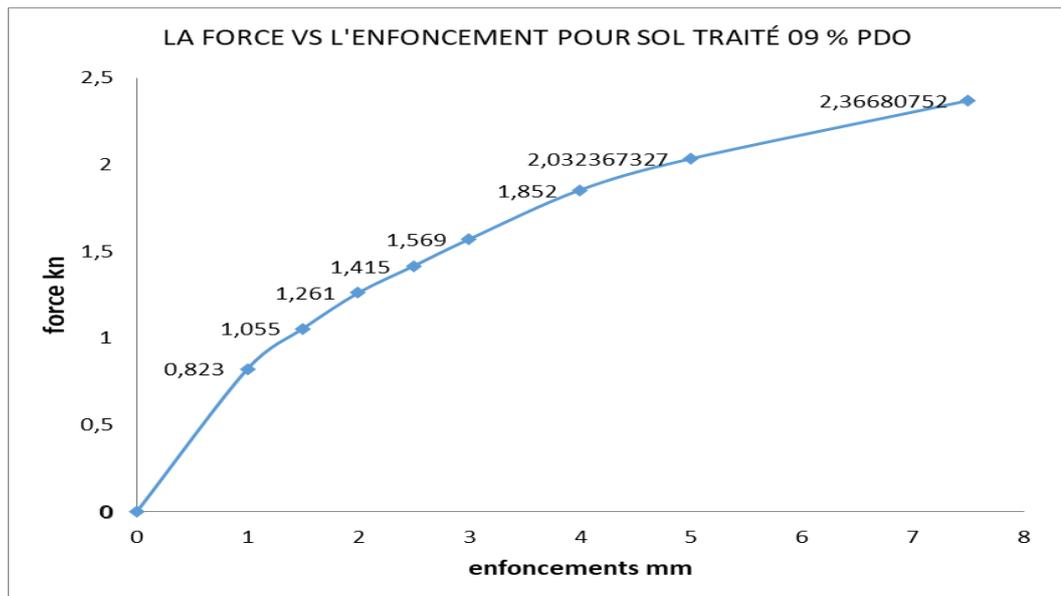


Fig. 04-36 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité 09 % PDO

Chapitre 4 : résultats et discussion

4.2.4.10. Sol traité avec pourcentages 12 % PDO.

Tableau 04-21 valeurs des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité
Avec 12 % PDO

LA PDO 12 %		
Déplacements	Lecture	Force (kn)
0	0	0
1	40	1.029
1.5	48	1.235
2	55	1.415
2.5	64	1.646
3	70	1.801
4	91	2.341
5	118	3.035687907
7.5	171	4.399174848

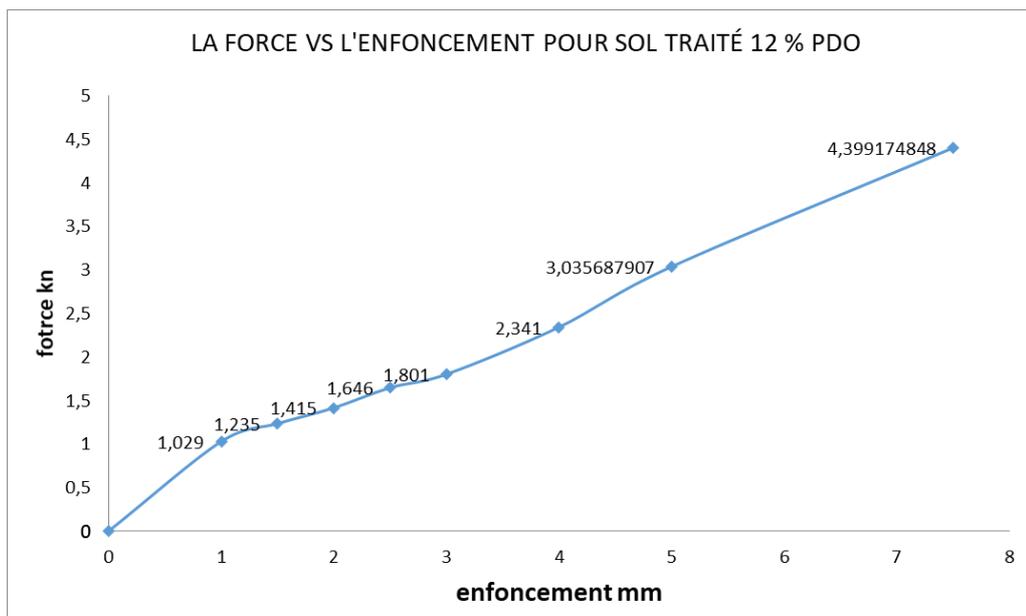


Fig. 04-37 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité 12 % PDO

Chapitre 4 : résultats et discussion

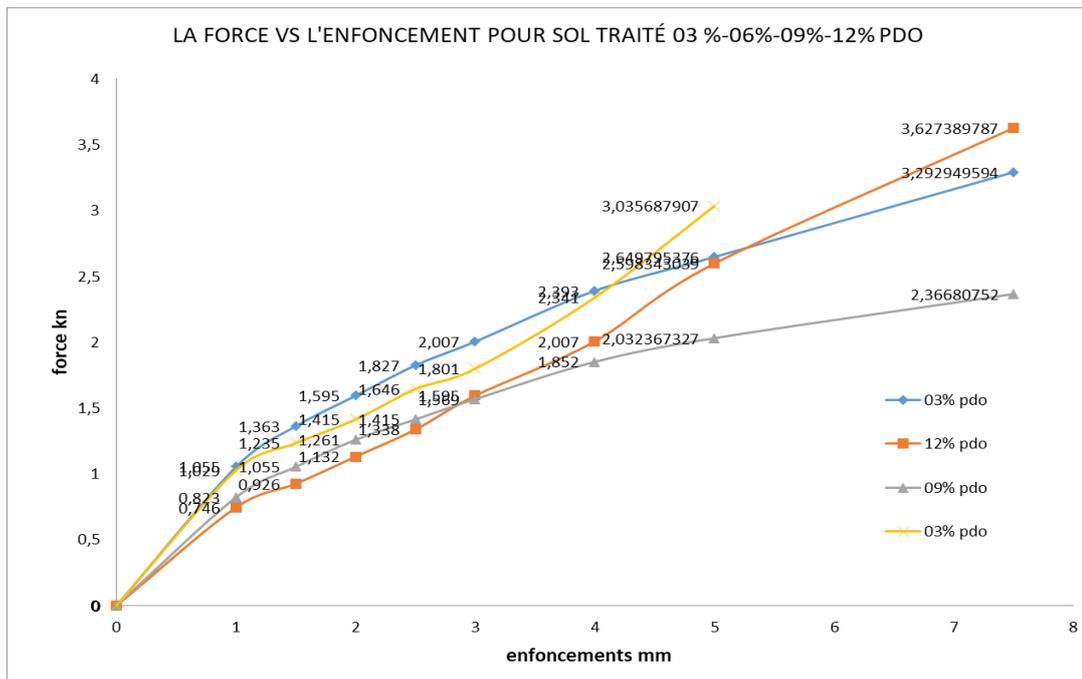


Fig 04-38 Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol non traité et Sol traité avec des différents pourcentages (3%, 6%, 9%, 12%) de la PDO.

4.2.4.11. Variations des efforts en fonction des enfoncements pour sol traité avec des différents pourcentages (3%, 6%, 9%, 12%) d'additifs

Tableau 04-22 Valeurs de l'indice CBR en fonction du pourcentage d'additifs.

Pourcentage	00%	03%	06%	09%	12%
2.5mm	1.92	2.13	2.41	2.67	3.08
05mm	2.88	3.39	3.39	4.06	4.81
Indice de CBR	2.88	3.39	3.39	4.06	4.81
Pourcentage	00%	03%	06%	09%	12%
2.5mm	1.92	1.82	1.33	1.41	1.64
05mm	2.88	2.65	2.59	2.03	3.03
Indice de CBR	2.88	2.65	2.59	2.03	3.03

Un ajout de 12% de chaux aboutit à une augmentation significative de 04.81 de son indice CBR, en comparaison au sol non traité, qui est de 02.88, On constate aussi que le traitement du sol à 3% -06% de pdo donne une valeur de l'indice de CBR proche de la valeur de l'indice CBR du sol non traité, en plus, on observe qu'à de 9% de PDO l'indice CBR diminue .

4.2.5 Essai de compression simple non confinée :

Les essais de compression simple ont été réalisés pour évaluer l'évolution au cours du temps de la résistance des sols traités ainsi que de l'influence de la quantité de chaux et la poudre de déchets de l'olive ajoutée sur le traitement pourcentage 3%, 6%, 9%, et 12%.

Le gain de résistance des sols traités est le critère primordial pour évaluer l'efficacité du traitement. Les échantillons ont été préparés à l'optimum Proctor de chaque traitement.

Elle met dans un moule cylindrique spécial de pour confectionner des éprouvettes. Surface 44.15cm diamètre 7.5. h=15

Les éprouvettes traitées sont soumises à une compression entre deux plateaux jusqu'à la rupture ont été mises sur un système de compression simple avec une vitesse de mise en charge statistique. La déformation et la force appliquée sur les éprouvettes au cours d'essai sont mesurées par des capteurs.(voir fig 4-39)



Fig. 04.39 Préparation et rupture des éprouvettes traitées sous la compression simple La résistance à la compression simple notée RC (la contrainte maximale) est déterminée selon la formule suivante :

$$R_s = F/S \text{ avec } S = \pi * D^2 / 4$$

F : La charge maximale appliquée au cours de l'essai (en KN)

D : diamètre de l'éprouvette mesurée avant essai (en m).

Chapitre 4 : résultats et discussion

et les valeurs de la résistance en compression simple des sols traités aux différents pourcentages de la chaux et de la pdo au cours de 1 jours après le compactage à l'optimum présente sur le tableau suivant

Tableau 04-23 Variation de la résistance à la compression après 01 jours.

Traitement par la chaux	Sol non traité	3%CHAUX	6%CHAUX	9%CHAUX	12%CHAUX
Rc (kN/m ²)	162.43	171.52	183.88	199.51	221.80
Traitement par la PDO	Sol non traité	3% DPO	6% DPO	9% DPO	12% DPO
Rc (kN/m ²)	162.43	166.22	169.25	173.44	181.79

La Figure 04.40 montre l'amélioration significative de la contrainte à la rupture en fonction de l'addition de la chaux et la PDO à 1 jours. On constate que l'apport de la chaux avec le sol argileux le rend plus résistant à la compression puisqu'on remarque que plus on augmente le pourcentage la chaux dans le mélange et plus on obtient une résistance un peu plus grande. On constate aussi que de la PDO avec le sol argileux le rend légèrement résistant à la compression puisqu'on remarque que le pourcentage de la PDO dans le mélange et on obtient une résistance moyenne.

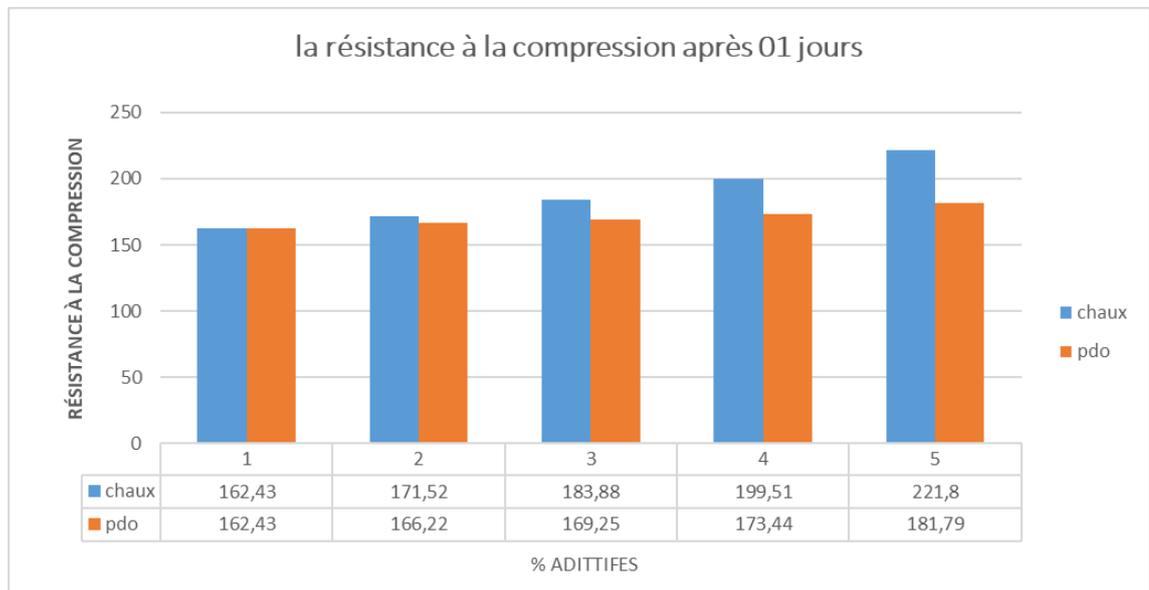


Fig 04-40 Histogrammes de la résistance de compression des sols En fonction des pourcentages en chaux et PDO à 1 jours.

4.2.6. Essai de Gonflement libre :

Le gonflement libre est mesuré à l'odomètre sur un échantillon soumis au seul poids du piston, mis en contact avec un réservoir d'eau à charge nulle. La variation de hauteur du piston est mesurée en fonction du temps jusqu'à ce qu'elle se stabilise.

La valeur finale du gonflement, après stabilisation, permet de calculer la variation relative de volume de l'échantillon, notée G, que l'on exprime en pourcentage.

Indice de gonflement (Cg) : Qui traduit l'importance de la déformation

De gonflement induit par un déchargement par rapport un état de contraintes donné.

$e = f(\log \sigma)$ obtenue en déchargement lors d'une essai œdométrique classique, il est Comparé à l'indice de compression (Cc).

Pression de gonflement : définie de plusieurs façons dont :

- La pression nécessaire pour maintenir un échantillon de sol à un volume constant Lorsque celui-ci est soumis à humidification.

- La pression nécessaire pour ramener un échantillon de sol, soumis à L'humidification et ayant complètement gonflé, à son volume avant gonflement.

Méthode de gonflement libre

Le potentiel de gonflement (ϵ_g) d'un élément de sol est la déformation maximale ($\Delta h/h$) que provoque l'imbibition de cet élément soumis à un état de contrainte nulle ou quasi-nulle jusqu'à sa saturation complète.

Sol non traité

$\Delta H : 1.55 \text{ mm}$ $h_0 : 19.26 \text{ mm}$

$\epsilon_g = \Delta H/H_0 * 100 = 1.55/19.26 * 100 = 8.04 \%$

La pression de gonflement P est calculée comme suit :

La masse = 50 kg

$F = mg = 50 * 9.81 = 0.4905 \text{ KN}$

La section $A = (\pi * D^2 / 4) = (3.14 * 0.075^2 / 4) = 0.0044156 \text{ m}^2$

$A = 0.0044156 \text{ m}^2$ et $h_0 = 19.26 \text{ mm}$

La pression $P = F/A = 0.4905/0.0044156 = 111.08 \text{ KN/m}^2$

Chapitre 4 : résultats et discussion

4.2.6. Essai de l'œdomètre

Appareil permettant de charger axialement une éprouvette de forme cylindrique placée dans un cylindre rigide {à déformation transversale nulle} et de mesurer sa variation ΔH de hauteur H . Les faces supérieure et inférieure de l'éprouvette, qui est généralement submergée, sont en contact avec des disques drainants. Contrainte de chargement σ : Contrainte moyenne totale σ obtenue en divisant l'effort axial N par l'aire de la section transversale de l'éprouvette cylindrique, identique à celle intérieure de l'œdomètre.

Le tableau .4.24. Présente les valeurs de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de la chaux, pour l'argile étudiée non traitée et traitée.

Tableau 04-24 Les valeurs de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de la chaux.

Nature du sol	Pression de gonflement (kN/m ²)
Sol non traité	690
3% Chaux	494
6% Chaux	388
9% Chaux	273
12% Chaux	222

La figure 04.41 Montre les variations de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de la chaux. La courbe montre un décroissement de la pression de gonflement en fonction de l'augmentation des pourcentages de la chaux jusqu'à un pourcentage de 12% qui correspond à la pression de gonflement de 222 kPa.

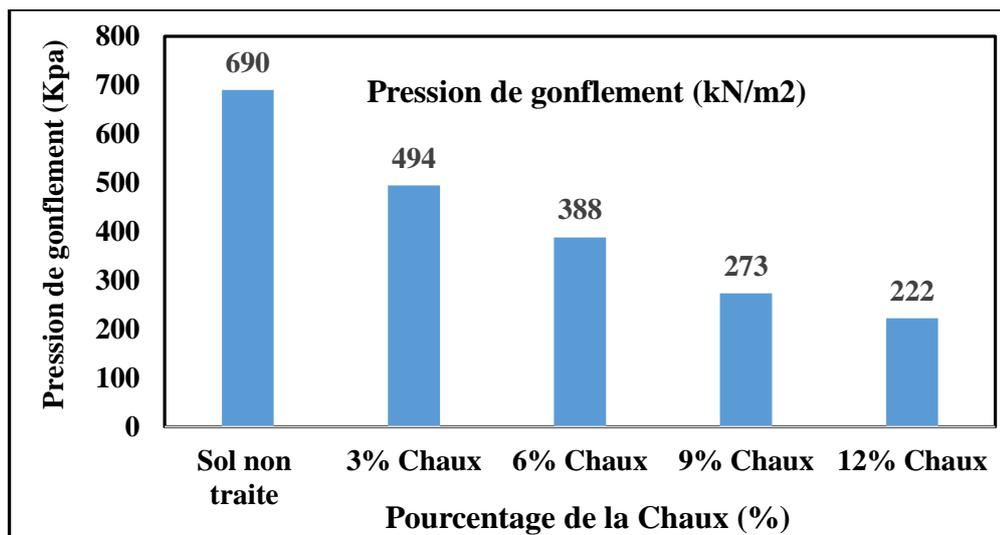


Fig 04-41 Variations de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de la chaux.

Chapitre 4 : résultats et discussion

Le tableau 04-25 Présente les valeurs du potentiel de gonflement libre en fonction du pourcentage de la chaux, pour l'argile étudié non traitée et traitée.

Tableau 04-25 Les valeurs de potentiel de gonflement libre en fonction du pourcentage de la chaux.

Nature du sol	Potentiel de gonflement (%)
Sol non traité	6.6
3% Chaux	1.78
6% Chaux	1.78
9% Chaux	6.83
12% Chaux	6.58

La figure 4-42 illustre les variations du potentiel de gonflement en fonction du pourcentage de la chaux. La courbe montre un décroissement du potentiel de gonflement pour les pourcentages 3% et 6% de la chaux, ensuite il y a une augmentation du potentiel de gonflement de 6.83% pour 9% de la chaux suivi par une petite diminution à 12% de la chaux qui correspond au potentiel de gonflement de 6.58%.

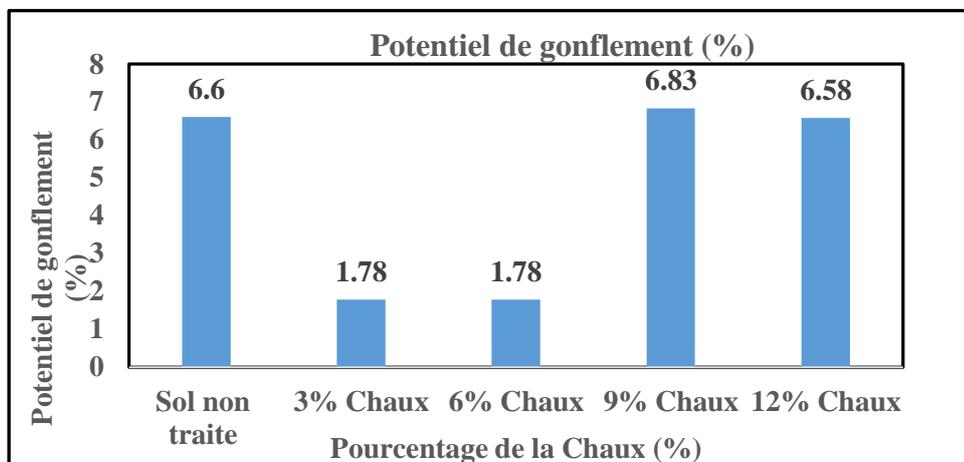


Fig 04-42 Variations du potentiel de gonflement en fonction du pourcentage de la chaux.

Le tableau 04-26 Présente les valeurs de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de la PDO, pour l'argile étudié non traitée et traitée.

Chapitre 4 : résultats et discussion

Tableau 04-26 Les valeurs de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de la PDO.

Nature du sol	Pression de gonflement (kN/m ²)
Sol non traité	690
3% PDO	52
6% PDO	68
9% PDO	103
12% PDO	230

La figure 04-43 montre les variations du potentiel de gonflement en fonction du pourcentage de la PDO. La courbe montre un accroissement de la pression de gonflement en fonction de l'augmentation des pourcentages de la PDO jusqu'à un pourcentage de 12% qui correspondant à la pression de gonflement de 230 kPa.

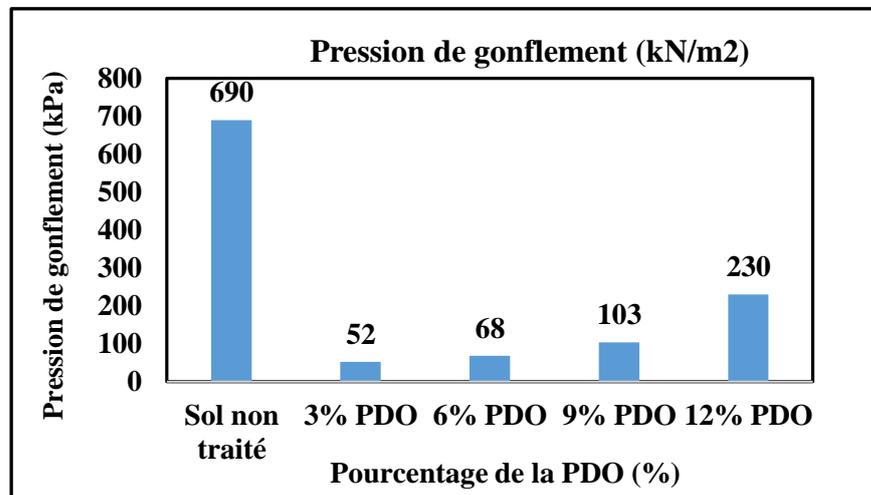


Fig04-43 Variations de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de la PDO.

Nature du sol	Potentiel de gonflement (%)
Sol non traité	6.6
3% PDO	6.68
6% PDO	5.99
9% PDO	5.8
12% PDO	8.8

La figure 04-44 présente les variations du potentiel de gonflement en fonction du pourcentage de la PDO. La courbe montre une légère diminution du potentiel de gonflement pour les pourcentages 6% et 9% de la PDO, ensuite il y a une augmentation du potentiel de gonflement de 8.8% pour 12% de la PDO.

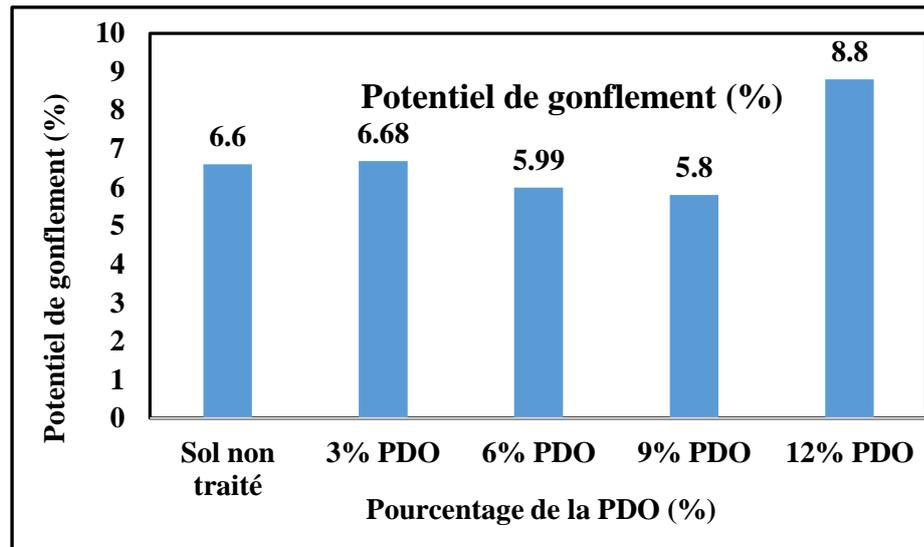
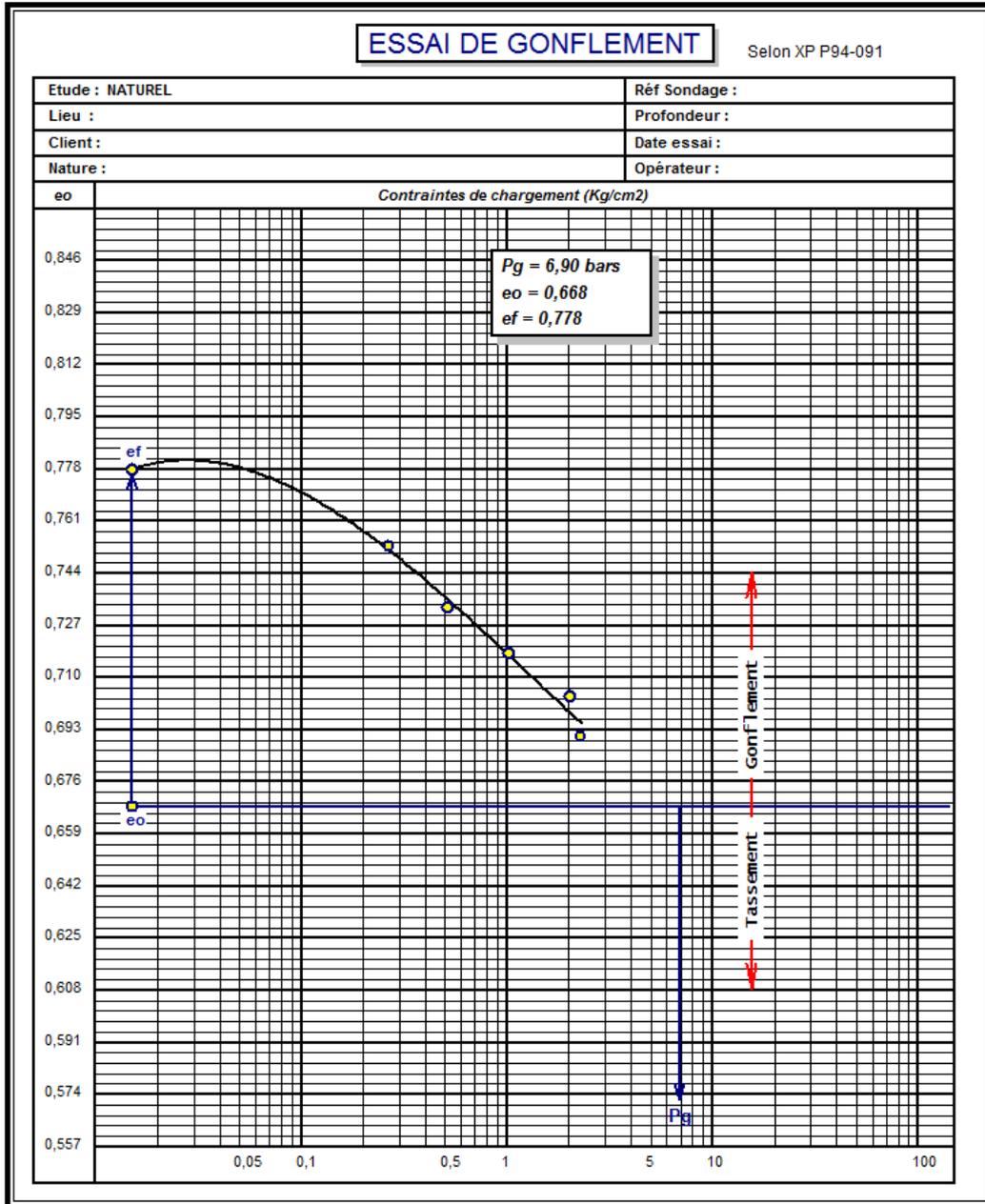


Fig 04-44 Variations du potentiel de gonflement en fonction du pourcentage de la PDO.

Chapitre 4 : résultats et discussion

Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction

Unité Oued Smar - TEL/FAX : 021.51.61.53 - TEL: 021.51.62.62 - 021.51.33.30



Programme «Soltests» - Email: georeal_02@yahoo.fr

Fig 4-45 Courbe œdométrique sol naturel (sol non traité).

Chapitre 4 : résultats et discussion

Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction

Unité Oued Smar - TEL/FAX : 021.51.61.53 - TEL: 021.51.62.62 - 021.51.33.30

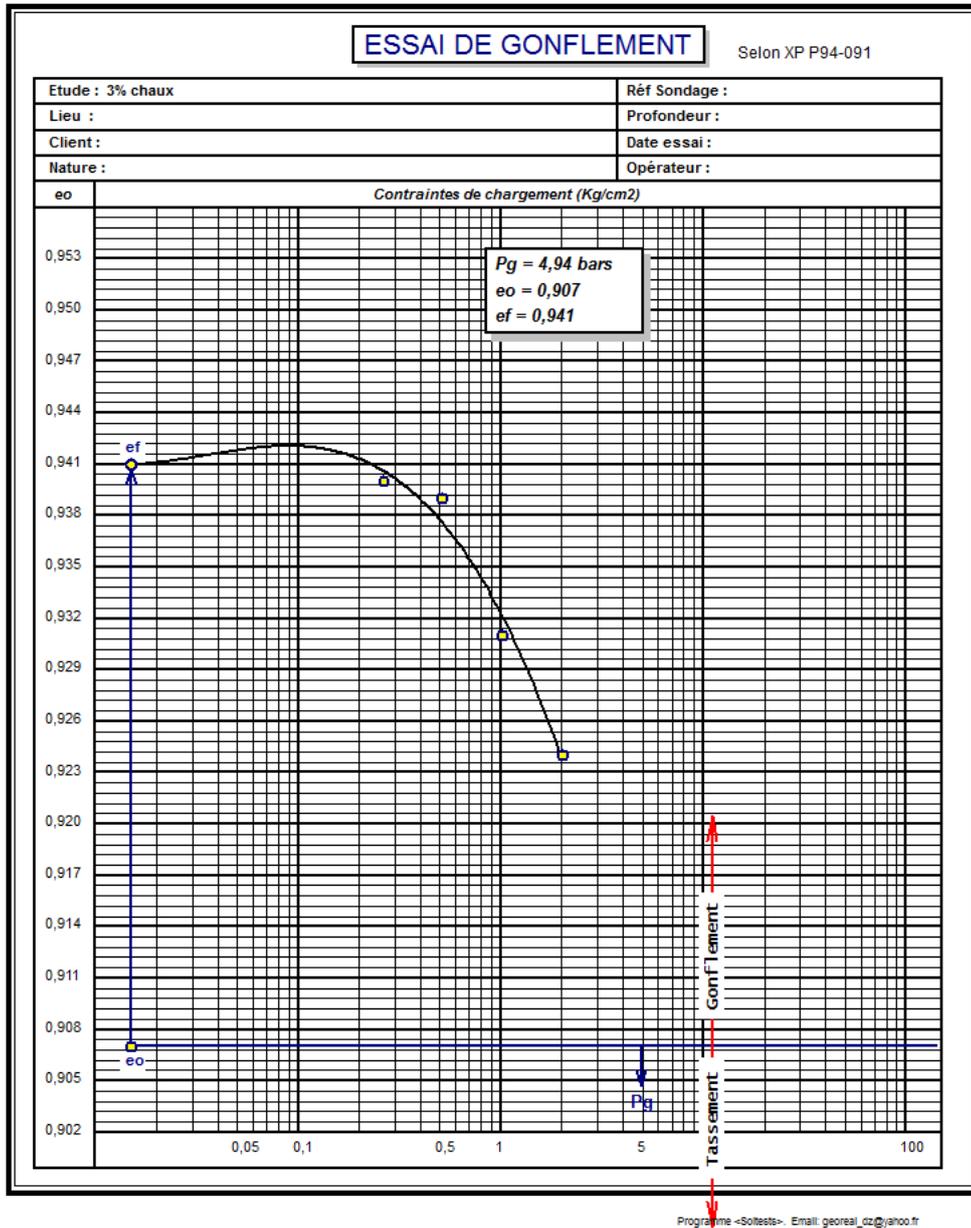
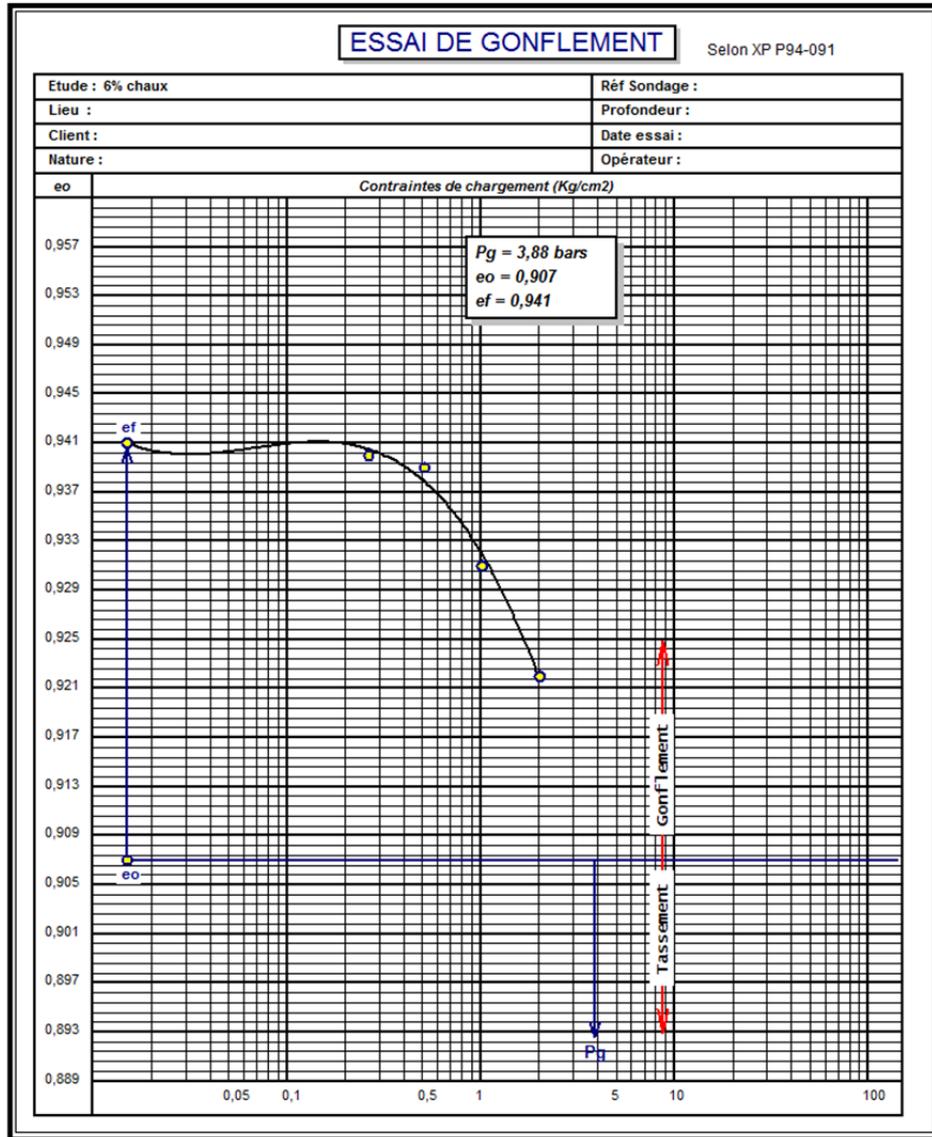


Fig 4-46 Courbe œdométrique sol naturelle+3% la chaux

Chapitre 4 : résultats et discussion

Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction

Unité Oued Smar - TEL/FAX : 021.51.61.53 - TEL: 021.51.62.62 - 021.51.33.30



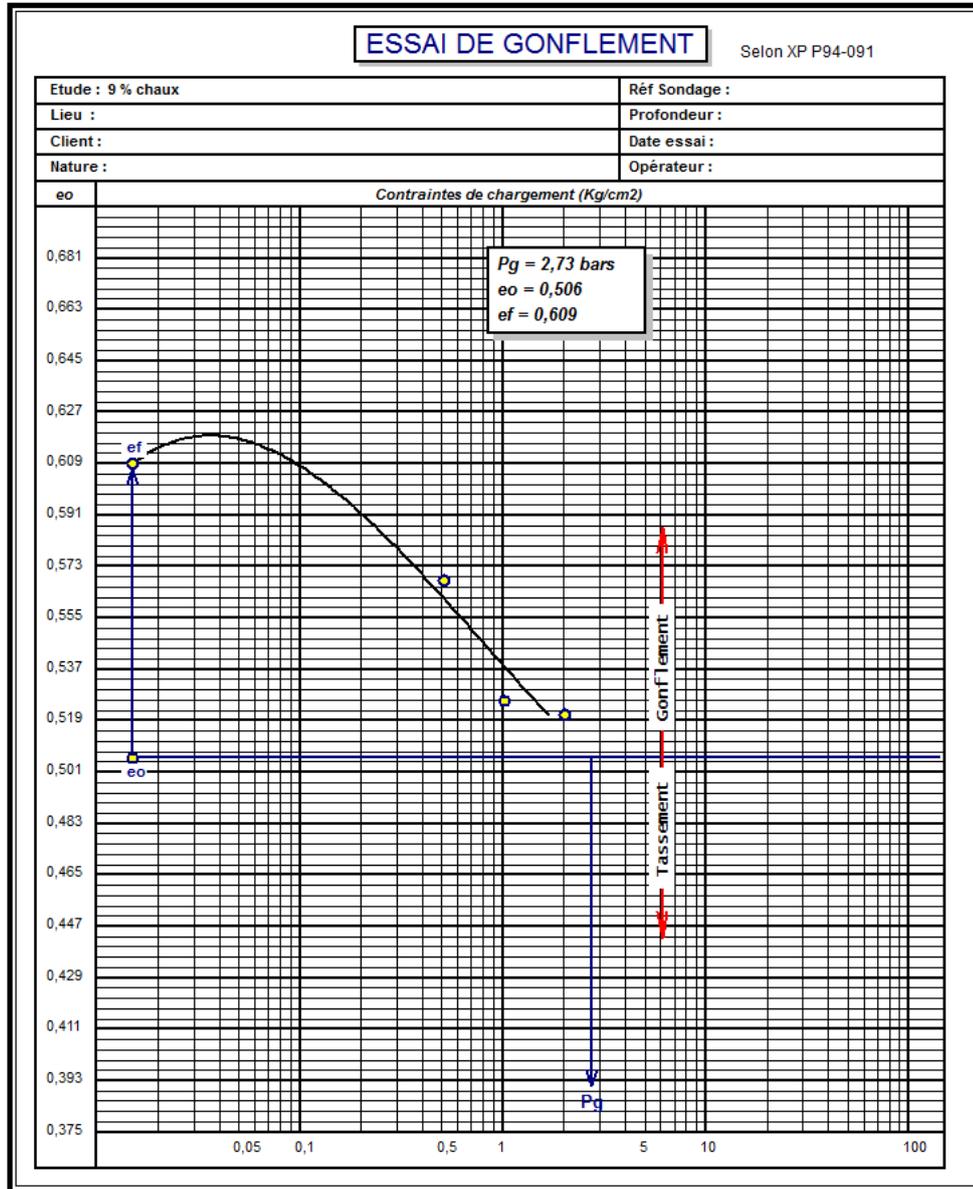
Programme «Soltests». Email: georeal_02@yahoo.fr

Fig 4-47 Courbe œdométrique sol naturelle+6 % la chaux

Chapitre 4 : résultats et discussion

Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction

Unité Oued Smar - TEL/FAX : 021.51.61.53 - TEL: 021.51.62.62 - 021.51.33.30



Programme <Soltests>. Email: georeal_02@yahoo.fr

Fig 4-48 Courbe œdométrique sol naturelle+9% la chaux

Chapitre 4 : résultats et discussion

Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction

Unité Oued Smar - TEL/FAX : 021.51.61.53 - TEL: 021.51.62.62 - 021.51.33.30

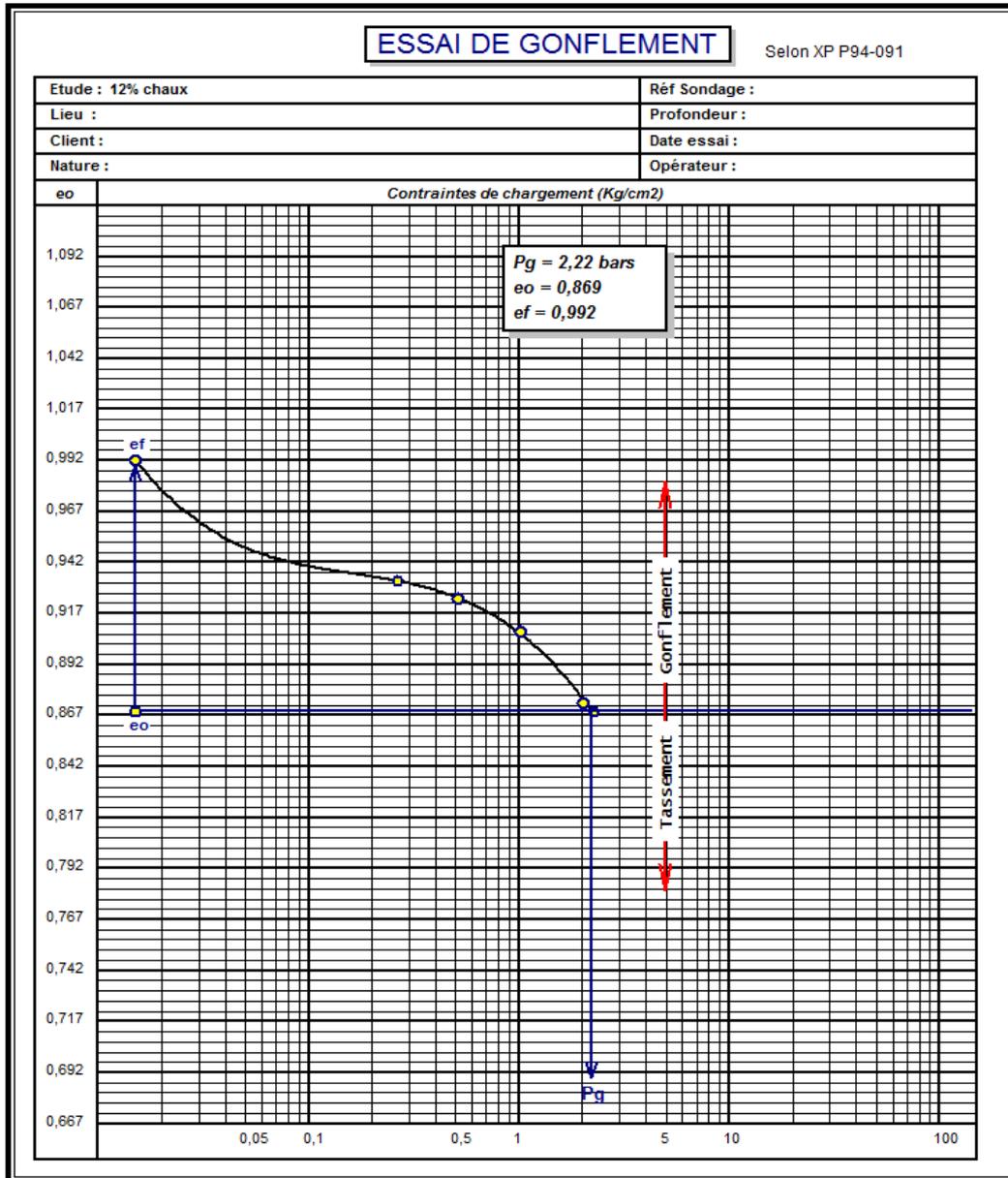


Fig 4-49 Courbe œdométrique sol naturelle+12 % la chaux

Chapitre 4 : résultats et discussion

Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction

Unité Oued Smar - TEL/FAX : 021.51.61.53 - TEL: 021.51.62.62 - 021.51.33.30

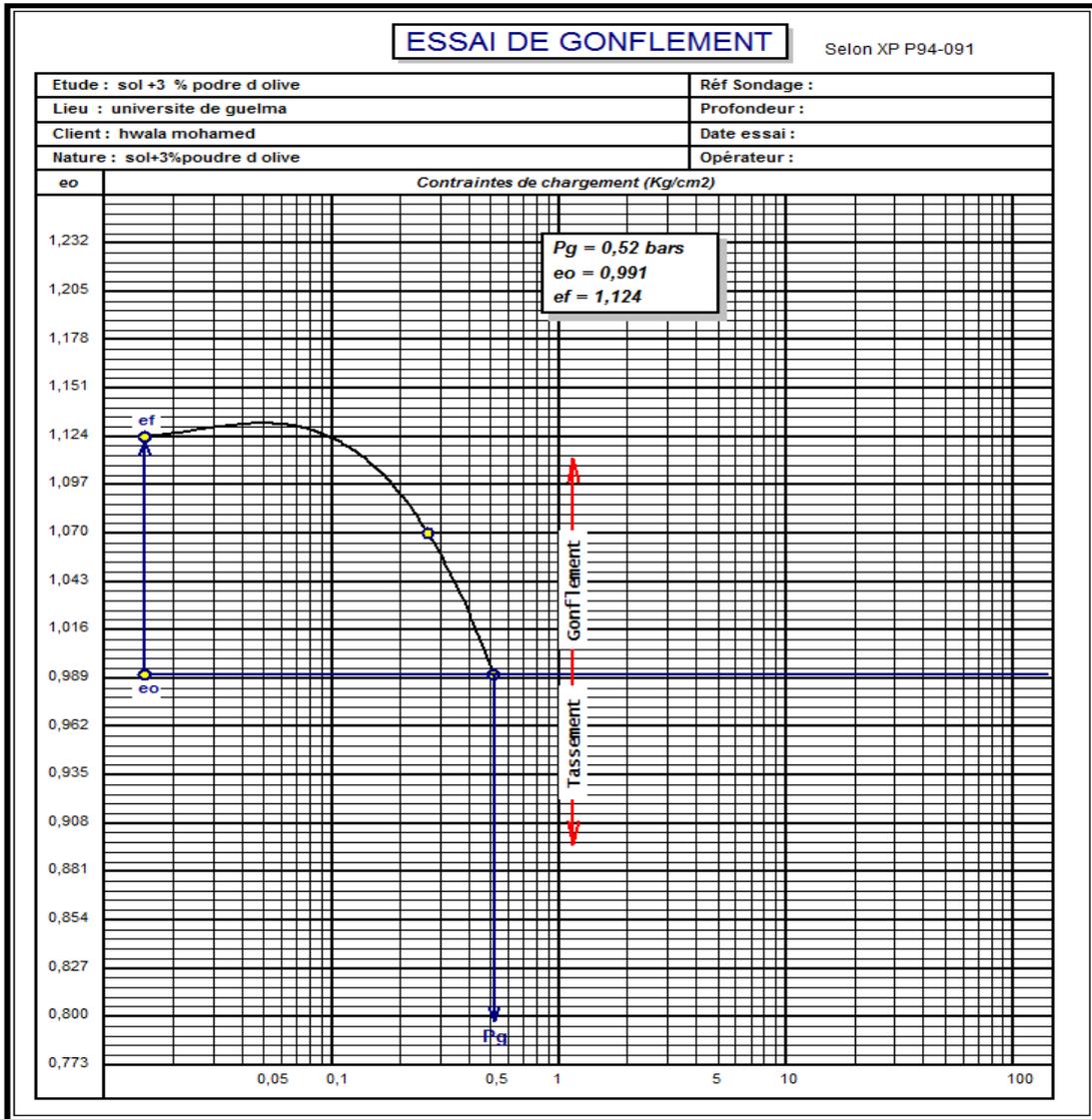
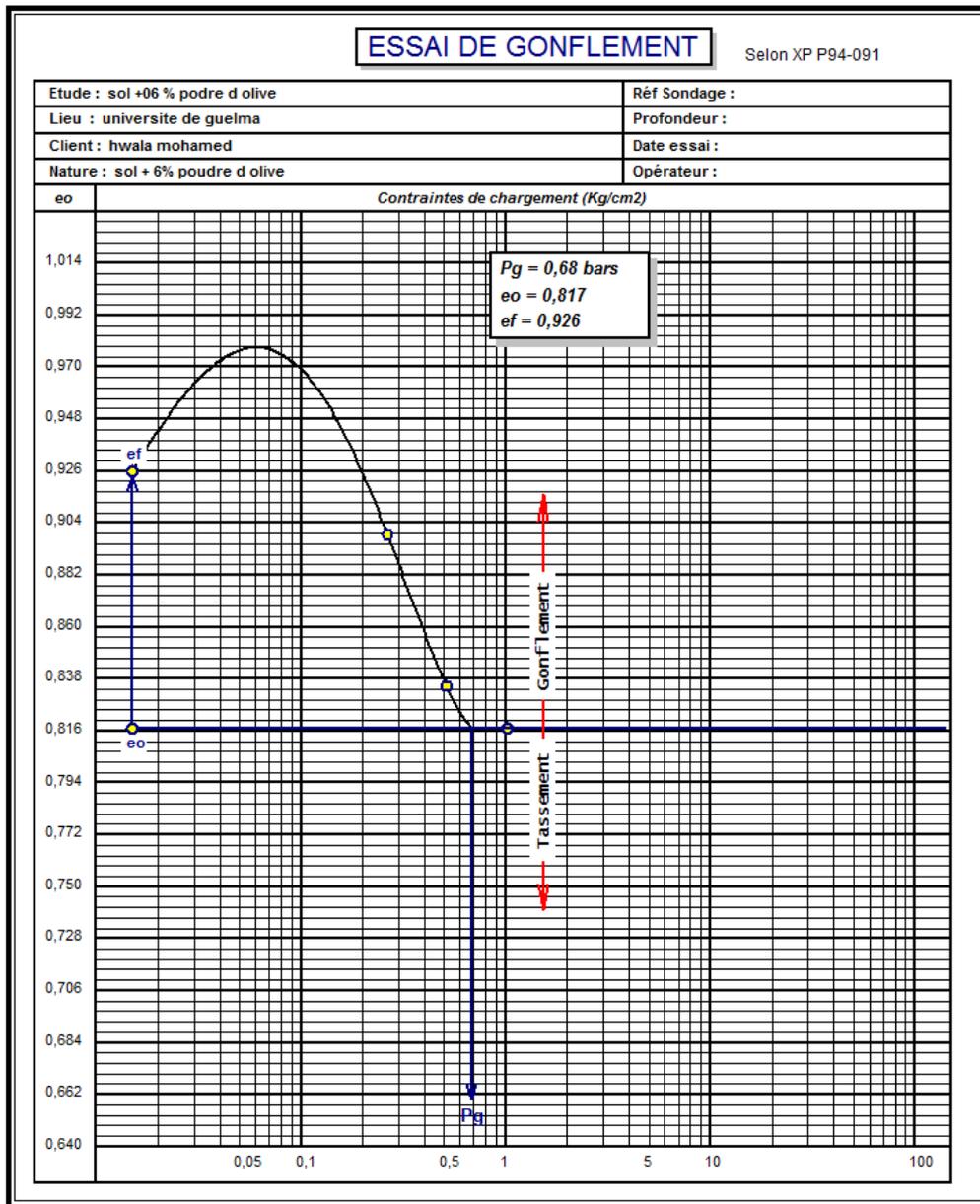


Fig 4-50 Courbe œdométrique sol naturelle+3% la PDO

Chapitre 4 : résultats et discussion

Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction

Unité Oued Smar - TEL/FAX : 021.51.61.53 - TEL: 021.51.62.62 - 021.51.33.30



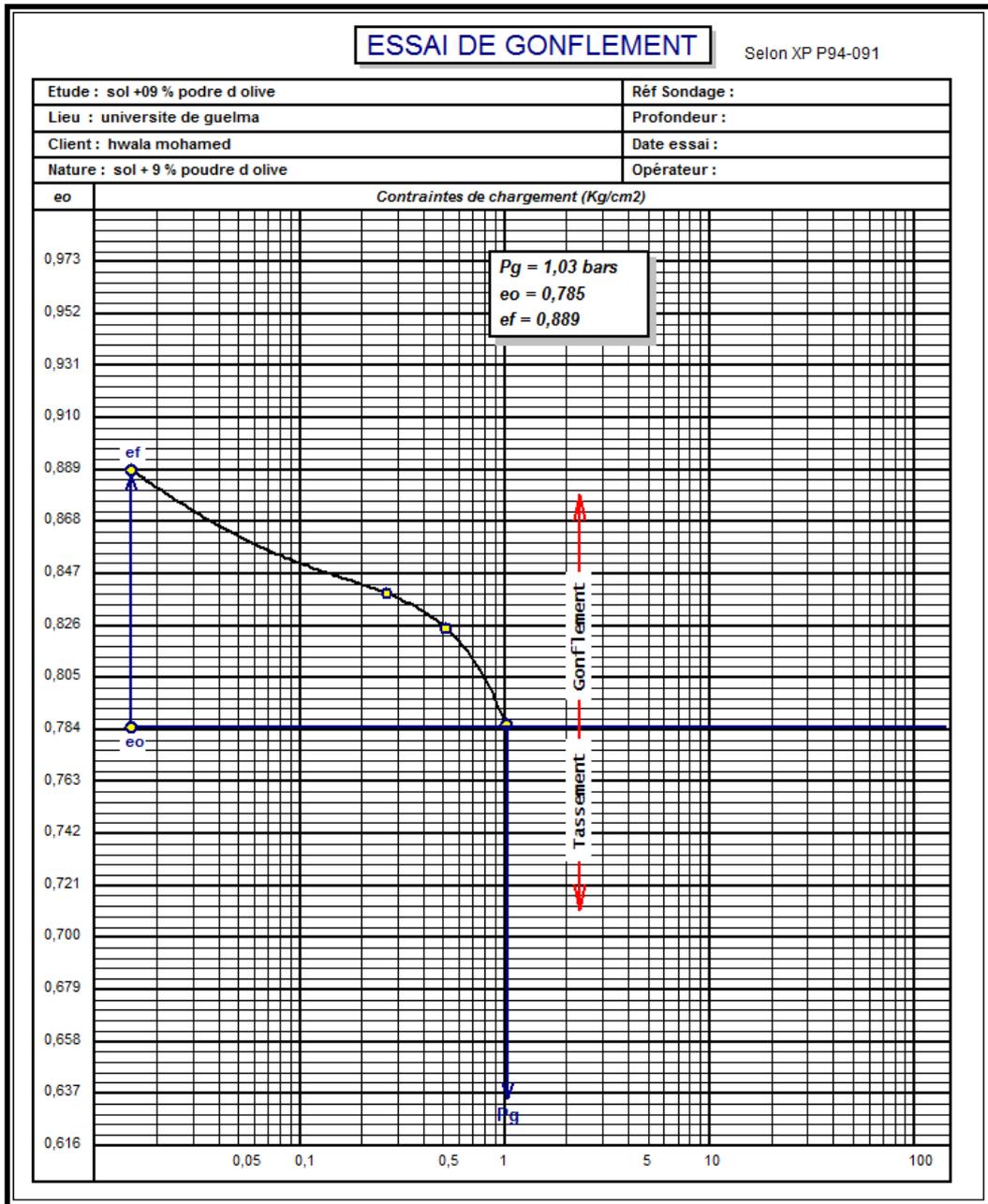
Programme <Soltests>. Email: georeal_cz@yahoo.fr

Fig 4-51 Courbe œdométrique sol naturelle+6% la PDO

Chapitre 4 : résultats et discussion

Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction

Unité Oued Smar - TEL/FAX : 021.51.61.53 - TEL: 021.51.62.62 - 021.51.33.30



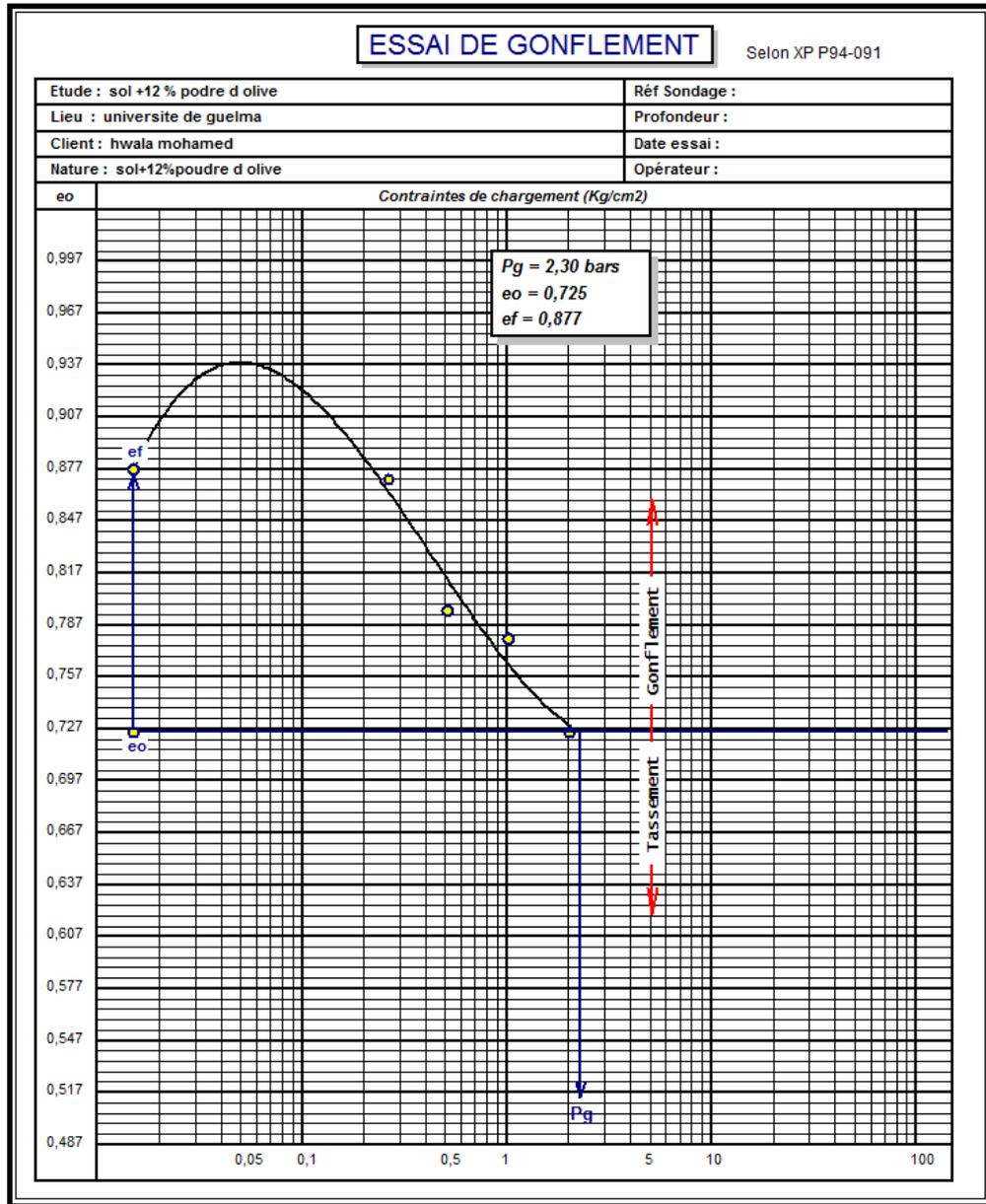
Programme -Soltests- Email: georeal_02@yahoo.fr

Fig 4-52 Courbe œdométrique sol naturelle+9% la PDO

Chapitre 4 : résultats et discussion

Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction

Unité Oued Smar - TEL/FAX : 021.51.61.53 - TEL: 021.51.62.62 - 021.51.33.30



Programme <Soltests>- Email: georeal_cz@yahoo.fr

Fig. 4-53 Courbe œdométrique sol naturelle + 12% la PDO.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La stabilisation 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 stabilisation 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.

Dans notre étude, on a mené un travail expérimental permettant la caractérisation des matériaux argileux locaux de la région hammam N'Bail wilaya de Guelma. Les résultats obtenus sur notre sol ont permis de constater que l'amélioration par l'ajout de chaux et de la poudre du déchet d'olives à des pourcentages de 3, 6, 9 et 12%, modifie les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques ainsi que la classification.

Sur la base des résultats obtenus sur l'argile et les additives utilisées et à la lumière des interprétations de ces résultats, plusieurs conclusions ont été faites :

- La limite de plasticité montre une augmentation remarquable pour les différents pourcentages en chaux. Par contre, il y a une légère augmentation pour les différents pourcentages PDO.
- On observe le contraire concernant la limite de liquidité qui a augmenté pour les différents pourcentages de la poudre du déchet d'olive (PDO) et diminue pour les différents pourcentages en chaux. L'indice de plasticité I_p diminue fortement avec les pourcentages de la chaux et avec une légère augmentation pour les pourcentages de la poudre du déchet d'olives.
- La chaux augmente légèrement la densité sèche et diminue la teneur en eau pour le pourcentage de 12% chaux, d'autre part la poudre du déchet d'olives augmente légèrement la densité sèche maximale et la teneur en eau diminue en général.

- Les valeurs de l'indice CBR augmentent avec l'augmentation des pourcentages de la chaux, on constate aussi que le traitement du sol à 3% et 6% de PDO donne une valeur de l'indice de CBR proche de la valeur de l'indice CBR du sol non traité, en plus, on observe qu'à de 9% de PDO, l'indice CBR diminue puis augmente à 12% PDO .
- On constate qu'il y a une amélioration significative de la résistance à la compression en fonction de l'addition de la chaux et la PDO. On constate que l'apport de la chaux avec le sol argileux le rend plus résistant à la compression que l'ajout de PDO.
- On remarque qu'il y a un décroissement de la pression de gonflement en fonction de l'augmentation des pourcentages de la chaux et de la PDO.
- Le potentiel de gonflement diminue pour les pourcentages 3% et 6% de la chaux, ensuite il y a une augmentation du potentiel de gonflement de 6.83% pour 9% de la chaux suivi par une petite diminution à 12% de la chaux qui correspond au potentiel de gonflement de 6.58%. Concernant le PDO, il y a une légère diminution du potentiel de gonflement pour les pourcentages 6% et 9% de la PDO, ensuite il y a une augmentation du potentiel de gonflement de 8.8% pour 12% de la PDO.

Le traitement des sols gonflants par l'ajout des pourcentages de la poudre de déchet d'olives peut résoudre partiellement le phénomène de gonflement des sols et cela peut être la solution pour stabiliser ces types de sols pour des raisons économiques, environnementaux et techniques.

Références bibliographiques

- 1-Argile — Wikipédia (wikipedia.org) (2023) .[1]
- 2-HERNOT François (2013) L'ARGILE, SON UTILISATION A L'OFFICINE. Mémoire POUR LE Diplôme d'État de Docteur en Pharmacie. Université ANGERS (Page 37) .[2]
- 3- Mémoire De Fin d'étude : Master En Génie Civil Option : Géotechnique (l'année 2017) Amélioration, Stabilisation et renforcement d'argile d'Adrar (Page 05).[3]
- 4- Analyse du phénomène de retrait gonflement des milieux argileux: impact environnemental et impact de la sécheresse sur le bâti page 09(université Politècnica de catalunya Escola de Barcelona Département 708-ETC) (l'année 2010) [4]
- 5- Mémoire De Fin d'étude Master En Génie Civil Option : Géotechnique (l'année 2017) Amélioration, Stabilisation et renforcement d'argile d'Adrar (Page 07-08-09). [5]
- 6- m.djaani 2011: stabilisation des sols gonflants de la region d'in-amenas par ajouts des liants hydrauliques (chaux et ciment) [6]
- 7-HAFSI, A., 1998. Théorie de la Double Couche et Gonflement des Argiles Non Saturées. Revue Scientifique, Algérie Equipement. [7]
- 8- Mémoire De Fin d'étude (l'année 2017) Amélioration, Stabilisation et renforcement d'argile d'Adrar (Page 11).[8]
- 9- boutouche.S (2018).stabilisation d'un sol argileux par traitement a la chaux et au ciment cas du site lotissement Mokadam.Master académique .université Tizi-ouzo page 28.[09]
- 10- ben younes.f et bouzidi.r. (2021).Amélioration des propriétés géotechniques d'une argile par l'ajout des fibres de polypropylène master académique .université M'sila page 23.[10]
- 11- boutouche.s (2018).stabilisation d'un sol argileux par traitement a la chaux et au ciment cas du site lotissement Mokadam.master académique .université Tizi-Ouzou page 32.[11]
- 12-Le retrait –gonflement des argiles (2007) (Etude Théorique de Phénomène de Gonflement et Leur Stabilisation),Page 20. [12]
- 13- Mémoire De Fin d'étude: Master En Génie Civil Option : Géotechnique (l'année 2017) Amélioration, Stabilisation et renforcement d'argile d'Adrar page 23-24 [13]
- 14- Mémoire De Fin d'étude: Master En Génie Civil Option : Géotechnique (l'année 2017) Amélioration, Stabilisation et renforcement d'argile page 19 [14]
- 15- Mémoire De Fin d'étude: Master En Génie Civil Option : Géotechnique (l'année 2019)
stabilisation des sols fin par ajout de sable page 34 [15]
- 16- Ghadjetti Zahia et Zaidi souaad nor el houda (2022). Traitement des sols argileux par la chaux et la poudre du déchet de brique rouge. Page 44 -45-51[16]