

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur

et de la Recherche scientifique

Université Hassiba Ben-Bouali -Chlef-

Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur

Département de Génie Civil



وزارة التعليم العلمي والبحث العلمي

جامعة حسية بن بوعلي - الشلف

كلية العلوم وعلوم المهندس

قسم الهندسة المدنية

Mémoire de Magister

En Génie Civil

Option : Construction

**Etude du comportement physicochimique et mécanique d'un remblai
routier marneux amélioré par la chaux éteinte
Cas de l'autoroute Est-Ouest tronçon Oued Fodda /Khemis Miliana**

Présenté par :

M^{elle}. Mellal Fatima

Date de Soutenance : 11/11/2009 à 11H.

Devant le jury composé de :

Président	A. KASSOUL	Maître de conférences	U.H.B.C
Directeur du Mémoire	B. LAMRI	Maître de conférences	U.H.B.C
Examineurs	Z. DERRICHE	Professeur	ENTP
	B. RICHA	Docteur	CTC
	S. NADJAI	Maître de conférences	U.H.B.C

Année Universitaire : 2008/2009

Avec la réduction de ressources en matériaux de qualité, de plus en plus les constructions de structures de génie civil sont réalisées sur le sol de faible résistance, ce qui mène à penser au développement de techniques de stabilisation de ce type de sol. La stabilisation à la chaux a été largement appliquée en pratique du génie civil comme des fondations. Avec l'ajout de la chaux aux sols, des réactions est établie avec les grains du sol qui mènent à l'amélioration des propriétés géotechniques du sol traité.

Une étude bibliographique à été faite sur les sols évolutifs ainsi que sur les différentes techniques de stabilisation des ces sols avec la présentation de quelques résultats des chercheurs.

Une méthodologie expérimentale a été développée permettant d'étudier le comportement physique et mécanique des mélanges traités par l'évaluation de l'influence d'une variété du pourcentages en chaux (C= 1, 2, 3 et 4%) sur les limites d'Atterberg, la valeur au bleu, la compactibilité, la portance, la compressibilité, le potentiel et la pression de gonflement, la résistance à la compression à 28 et à 90 jours, et la résistance au cisaillement à 7, 14 et 28 jours de cure du sol. Une augmentation continue en chaux de 1 à 4% implique une amélioration des paramètres physicomécaniques, ce qui signifie le bon comportement des mélanges traités.

La stabilisation de la matrice marne-chaux est due à des réactions chimiques entre les minéraux argileux dans le sol et la chaux hydratée (floculation et agglomération, réaction pozzolanique).

L'application du traitement à 2% de chaux de la marne a été exécutée au niveau du chantier, une série d'essais a été établie pour contrôler l'exécution et le compactage des couches du remblai. Les résultats obtenus sur chantier ont été confrontés avec les résultats trouvés au laboratoire.

Le traitement des sols à la chaux en place évite le transport et valorise les matériaux locaux, ce qui permet de stabiliser des sols à des coûts très intéressants avant la mise en place des couches superficielles des routes.

Mots clés :

Marne argileuse, traitement, chaux éteinte, compressibilité, gonflement, résistance.

With the reduction of resource quality materials, more and more construction of civil engineering structures are made on the ground with low resistance, which leads to believe the development of techniques to stabilize the soil type. The lime stabilization has been widely applied in civil engineering practice as foundations. With the addition of lime to the soil reaction is established with the grain of the soil leading to improved engineering properties of treated soil.

A literature review was made regarding changing the soil and on different techniques for stabilization of these soils with the presentation of some research results. An experimental methodology was developed to study the physical and mechanical behavior of mixtures treated by evaluating the influence of a variety of percentages of lime (C = 1, 2, 3 and 4%) on the limits of 'Atterberg, the value in blue, the compactibility, the bearing capacity, compressibility, and the potential inflation pressure, the compressive strength at 28 and 90 days, and the shear strength at 7, 14 and 28 days of soil treatment. A continuous increase in lime 1 to 4% implies an improvement of parameters physicomécaniques, which means the good behavior of mixtures treated.

The stabilization of marl-limestone matrix due to chemical reactions between clay minerals in soil and hydrated lime (flocculation and agglomeration, pozzolanic reaction). The application of treatment to 2% lime marl was performed at the site; a series of tests has been established to monitor implementation and compaction of the fill layers. The results obtained on site were confronted with the results found in the laboratory. The soil treatment with lime in place prevents the transport and promotes local materials, which helps stabilize soil at a very interesting before the introduction of layers of roads.

Keywords:

Marl clay treatment, hydrated lime, compressibility, swelling resistance.

Au nom d'Allah

A toute ma famille

A tous ceux qui me sont chers

REMERCEMENTS

Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur LAAMRI Belkacem, encadreur de mémoire, pour m'avoir guidée tout au long de ce travail. Je le remercie vivement pour sa disponibilité, pour ces conseils avisés et son aide précieuse pour la rédaction de ce mémoire.

Je ne saurais comment remercier Monsieur DJIBIRI Abed elouahab, directeur du pole T94 (entreprise Cosider TP) pour m'avoir accueillie au sein de son équipe et ainsi de m'avoir permis de suivre l'opération du traitement au niveau de son chantier d'autoroute, pour son aide scientifique. Par son expérience et sa compétence, il m'a transmis, pas à pas, sa passion pour cette investigation de recherche. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère gratitude.

Je remercie Monsieur CHAHBOUB Amar, responsable du laboratoire du pole T94 de Cosider, pour ses multiples conseils, son encouragement, je tiens à lui exprimer ma très sincère et respectueuse reconnaissance

Mes remerciements vont également à tous les membres du jury pour avoir apporté un grand intérêt à cette étude. Merci à madame et Messieurs: Z. DERRICHE B. RICHA S. NADJAI d'avoir examiné ce mémoire, au docteur A. KASSOUL pour avoir présidé ce jury.

Je tiens à remercier l'ensemble du personnel des laboratoires du pole T94 de l'entreprise de Cosider et du LNHO de Chlef pour le soutien matériel qui m'a été offert pour la réalisation de ce mémoire.

Table des matières

Introduction générale.	1
1ère PARTIE : Revue bibliographique sur les sols évolutifs	
Chapitre 1 : Caractéristiques et conséquences des sols évolutifs	
1.1. Introduction	4
1.2 Définition des sols évolutifs	4
1.2 .1 Les argiles.....	5
1.2 .2 Les limons	5
1.2.3 Les marnes.....	5
1.3 Définition des minéraux argileux	6
1.3.1. Les argiles du groupe de la kaolinite :.....	7
1.3.2. Les argiles du groupe des micas (Les illites) :.....	8
1.3.3.1. Différents stades du gonflement des smectites (La Montmorillonite)	9
1 .4. Désordres dus à l'utilisation des sols évolutifs dans les constructions de génie civil	10
1 .4 .2 Phénomène de gonflement	11
1 .4 .3 Tassements	11
1 .4 .4 Glissements.....	11
1 .4 .5 Conséquences	11
1 .4 .5.1 Cas des structures.....	11
1 .4 .5.2 Cas des chaussées	12
1.5 Conclusion	15
Chapitre 2 : Techniques de stabilisation des sols évolutifs	
2.1. Introduction.....	16
2.2. Stabilisation mécanique.....	17
2.2.1 Méthode de substitution.....	17
2.2.2 Méthode de compactage.....	17
2.2.3 Méthode de pré humidification.....	17
2.3. Stabilisation aux sables.....	17
2.4 Stabilisation avec des additifs	18

2.4.1 Les sels	18
2.4. 2 Les liants	20
2.4. 2.1 Liants organiques	21
2.4. 2.2 Liants hydrauliques	22
2.4. 2.2 .1 Stabilisation au ciment	22
2.4. 2.2 .2 Stabilisation aux cendres volantes	24
2.4. 2.2 .3 Stabilisation à la chaux.....	24
2 .5 Conclusion	36

2^{eme} Partie : comportements physico-chimiques et mécaniques des mélanges

Chapitre 3 : caractérisation et classification des matériaux utilisés

3.1 Introduction	38
3.2. Sol étudié	38
3.2.1 Prélèvement des échantillons	39
3.2.2 Propriétés chimiques	39
3.2.3 Propriétés physiques.....	40
3.2.3.1 Analyse granulo-sédimentométrique	40
3.2.3.2 Limites d'Atterberg.....	41
3.2.3. 3 Essai au bleu de méthylène (Vb)	42
3.2.3.4 Essai de dégradabilité et de fragmentabilité ...	42
3.2.4 Propriétés mécaniques	44
3.2.4.1 Essai Proctor normal et modifié	44
3.2.4.2 Portance	44
3.2.5 Interprétation des résultats et classification du sol....	45
3.2.5.1 Classification selon les approches empiriques	45
3.2.5.2 Classification du sol selon le GTR	48
3.3. Chaux utilisée	50
3.3.1 Introduction.....	50
3.3.2 Identification de la chaux utilisée.....	51
3.3.2.1 Définition	51
3.3.2.2 Spécification du produit.....	51
3.3.2.3 Caractéristiques physico-chimiques de la chaux éteinte	51
3 .4 Conclusion	53

Chapitre 4 : Comportement physique des mélanges (matériaux + chaux)

4 .1 Introduction.....	54
4.2 Préparation des mélanges	55
4.3 Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg	55
4.3.1. Résultats et interprétation.....	56
4.4. Effet de la chaux sur la valeur au bleu de méthylène.....	57
4.4.1. Résultats et interprétation.....	58
4 .5.Etude de la compactibilité des mélanges	58
4 .5.1.Compactage des mélanges:.....	59
4 .5.2.Résultats et interprétation.....	59
4 .6 Conclusion.....	62

Chapitre 5 : Comportement mécanique des mélanges (matériaux + chaux)

5.1 Introduction.....	63
5.2 Préparation des mélanges	63
5.3 Résistance à la compression des mélanges.....	64
5. 3.1 Reconstitution des éprouvettes	64
5.2.3 Résultats et interprétation.....	66
5.3 Etude de la portance.....	67
5.3.1 Mode opératoire.....	67
5.3.2 Résultats et interprétation.....	67
5.3 Etude de la compressibilité	68
5.3.1 Reconstitution des éprouvettes.....	68
5.3.2 Mode opératoire.....	69
5.3.2.1 Système de chargement	69
5.3.2.2 Détermination de l'indice de compressibilité (C_c) et l'indice de gonflement (C_g)	69
5.3. 3 Présentation des résultats et interprétations.....	70
5.4 Etude du potentiel de gonflement	72
5.4.1 Mode opératoire.....	73
5.4.2 Présentation et interprétation des résultats	73
5.5 Etude de la pression de gonflement.....	75

5.5.1 Mode opératoire.....	75
5.5.2 Interprétation et présentation des résultats.....	75
5.6 Paramètre du cisaillement direct	77
5.6.1 Reconstitution des éprouvettes	77
5.6.2 Mode opératoire.....	78
5.6.2 Présentation des résultats et interprétation.....	80
5.6.2.1 Relation contrainte - déformation.....	80
5.6.2.2 Paramètres de la résistance au cisaillement.....	83
5.7 Conclusion.....	85

Chapitre 6: Comportement chimique des mélanges (matériaux + chaux)

6.1 Introduction.....	86
6.2 Réaction à court terme	86
6.2.1 Echange cationique.....	86
6.2.2 Floculation et agglomération des particules d'argile.....	87
6.2.3 Carbonation de la chaux.....	87
6.2 Réaction à long terme.....	87
6.2.1 Réaction pozzolanique	87
6.3 Risque de formation d'ettringite et dethaumasite	89
6.4 Conclusion	93

3^{ème} Partie : Traitement sur chantier

Chapitre 7 : application du traitement à la chaux

7.1 Introduction.....	95
7.2 Raison d'application du traitement.....	96
7.2.1 Raison économique	96
7.2.2 Raison écologique.....	96
7.2.3 Raison technique.....	97
7.2.4 Conclusion.....	99
7.3 Application du traitement.....	99
7.3.1 Présentation du site de traitement.....	99
7.3.2 Exécution.....	100
7.3.2.2 Malaxage.....	101
7.3.2.3 Compactage.....	102

7 .3.2.4 Contrôle.....	103
7 .5 Conclusion.....	106
Conclusion générale.....	108
Références bibliographiques.....	111
Annexes " Résultats des essais"	118

C	Pourcentage en chaux (%)
c	Cohésion totale (MPa)
Cc	Indice de compression (%)
Cg	Indice de gonflement (%)
CBR	Indice de portance imbibé (%)
Dmax	Diamètre maximal des grains (mm)
e	Indice des vides
EV2	Module sous chargement à la plaque (bar)
G	Potentiel de gonflement (%)
ΔH	Tassement (mm)
H₀	Hauteur initiale de l'éprouvette (mm)
IPI	Indice de portance immédiat (%)
I_P	Indice de plasticité (%)
I_R	Indice de retrait (%)
Pg	Pression de gonflement (kPa)
RC	Résistance à la compression (MPa)
V_B	Valeur au bleu de méthylène (g /kg)
V	Vitesse de cisaillement (mm/min)
W	Teneur en eau (%)
WL	Limite de liquidité (%)
WP	Limite de plasticité (%)
WR	Limite de retrait (%)
Φ	Angle de frottement interne (°)
Pd	Masse volumique sèche (g/cm ³)
σ	Contrainte normale du cisaillement à la boîte (bars)
τ	Contrainte du cisaillement (bars)

- Photo N°1 :** fissures au niveau d'une structure de génie civil
- Photo N°2 :** laboratoire du contrôle de la qualité de la chaux éteinte à Saida 3
- Photo N°3 :** préparation des mélanges au laboratoire
- Photo N°4 :** Mélanges conservés dans les sacs hermétiques
- Photo N°5 :** Eprouvette de la résistance à la compression reconstituée
- Photo N°6 :** Eprouvettes oedométriques reconstituées
- Photo N°7 :** Eprouvette de cisaillement reconstituée
- Photo N°8 :** Site du traitement
- Photo N°9 :** épandage de la chaux sur le sol à traiter
- Photo N°10 :** Malaxage du sol avec la chaux
- Photo N°11 :** Compactage du sol traité
- Photo N°12 :** Stockage de la chaux

Tableau 3.1 :	composition chimique de la marne	40
Tableau 3.2 :	Caractéristique granulométrique de la marne	41
Tableau 3.3 :	présentation des valeurs des limites d’Atterberg	42
Tableau 3.4 :	présentation des valeurs au bleu de méthylène	42
Tableau 3.5 :	présentation des références de compactage	44
Tableau 3.6 :	présentation des valeurs des indices de portance	45
Tableau 3.7 :	Classification des sols en fonction de la limite de liquidité	46
Tableau 3.8 :	Classification des sols en fonction de l’indice de plasticité	46
Tableau 3.9 :	Classification des sols en fonction de la limite de retrait	47
Tableau 3.10 :	Classification des sols en fonction de l’indice de retrait	47
Tableau 3.11 :	Classification des sols en fonction de la valeur au bleu de méthylène	48
Tableau 3.12 :	Seuils retenus de dégradabilité et de fragmentabilité	48
Tableau 3.13 :	Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature	49
Tableau 3.14 :	Composition chimique de la chaux éteinte	52
Tableau 4.1 :	Les limites d’Atterberg et limite de retrait	56
Tableau 5.1 :	Classification des sols en fonction de l’indice de compressibilité	69
Tableau 6.1 :	Risque sulfatique en fonction du sulfate présente dans le sol	93

Figure 1.1 :	Structure de base des argiles	7
Figure 1.2 :	Structure de la kaolinite	8
Figure 1.3 :	Structure de l'illite	9
Figure 1.4 :	Structure de la montmorillonite	10
Figure 1.5 :	Apparition des premières fissures sur les accotements (fin de saison sèche)	13
Figure 1.6 :	Apparition des premières déformations et infiltration d'eau à travers les fissures (début de la saison des pluies)	13
Figure 1.7 :	chute de portance des zones saturées apparition des fissures longitudinales (fin de saison des pluies)	14
Figure 2.1 :	Variation du taux de gonflement de l'argile intacte de MANSOURAH en fonction du temps en présence de KCl	19
Figure 2.2 :	Variation du taux de gonflement de l'argile intacte de MANSOURAH en fonction du temps en présence de Na Cl	19
Figure 2.3 :	Variation du taux gonflement de l'argile intacte de MANSOURAH en fonction du temps en présence du CaCl ₂	20
Figure 2.4 :	Variation du taux de gonflement de l'argile intacte de MANSOURAH en fonction du temps en présence du (NH ₄) ₂ SO ₄	20
Figure 2.5 :	Variation du gonflement en fonction du temps (f = 0.25%)	22
Figure 2.6 :	Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage en ciment à différentes durées de cure	23
Figure 2.7 :	Variation de l'indice de plasticité avec l'ajout de chaux.	26
Figure 2.8 :	Variation des limites de consistance en fonction du temps pour 3 et 6% de chaux	27
Figure 2.9:	Evolution de la valeur au bleu de méthylène en fonction du pourcentage de chaux	28
Figure 2.10 :	Courbes Proctor de l'argile de Mila traitée à la chaux et non traitée	29
Figure 2.11 :	Evolution des caractéristiques de compactage en fonction du pourcentage de chaux	29
Figure 2.12 :	Valeurs de CBR imbibés et immédiats de la marne naturelle et stabilisée à différentes durées de cure	30
Figure 2.13 :	Effet du pourcentage en chaux Ca(OH) ₂ sur la résistance à la	31

	compression des sol I-II à différentes durées de cure	
Figure 2.14 :	Effet du pourcentage de chaux sur la résistance à la compression du sol renforcé par différents pourcentages en fibre	32
Figure 2.15 :	Cinétiques du gonflement des éprouvettes traitées à 3 et 6% de chaux pour différentes durées de cure	32
Figure 2.16 :	Evolution de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de chaux	33
Figure 2.17 :	La variation de potentiel de gonflement avec le nombre des cycles pour les sols (A, B et C) dans un état traité et non traité	34
Figure 2.18 :	La variation de la pression du gonflement avec le nombre des cycles pour les sols (A, B et C) dans un état traité et non traité	35
Figure 2.19 :	Effet d'ajout en fibres sur la cohésion des mélanges traités à la chaux après 28 jours	35
Figure 2.20 :	Effet d'ajout en fibres sur l'angle de frottement des mélanges traités à la chaux après 28 jours	36
Figure 3.1 :	coupe lithologique du sol	39
Figure 3.2 :	Position des différents sols dans le domaine géologique	45
Figure 4.1 :	Variation des indices de plasticité et de retrait pour les différents pourcentages de chaux	56
Figure 4.2 :	Variation des indices de plasticité et de retrait pour les différents pourcentages de chaux	57
Figure 4.3 :	Variation des valeurs au bleu pour les différents pourcentages de chaux	58
Figure 4.4 :	Variation des caractéristiques de compactage à l'OPN pour les différents pourcentages d'eau	59
Figure 4.5 :	Variation des caractéristiques de compactage à l'OPM pour les différents pourcentages d'eau	60
Figure 4.6 :	Variation de la densité sèche à l'OPN et l'OPM en fonction du pourcentage en chaux	61
Figure 4.7 :	Variation du teneur en eau à l'OPN et l'OPM en fonction du pourcentage en chaux	61
Figure 5.1 :	Système de double pistonage	65
Figure 5.2 :	Variation de la résistance à la compression en fonction de la durée de	66

	cure en fonction et le pourcentage en chaux additionné	
Figure 5.3 :	Variation de l'indice de portance IPI et du CBR en fonction de différents pourcentages de chaux	67
Figure 5.4 :	compressibilité oedométrique des mélanges (C= 0,1, 2, 3 et 4%)	71
Figure 5.5 :	Variation de l'indice de compressibilité en fonction du pourcentage en chaux additionnée	71
Figure 5.6 :	Variation de l'indice de gonflement en fonction du pourcentage en chaux additionnée	72
Figure 5.7 :	Courbe de gonflement pour les mélanges (C= 0,1, 2, 3 et 4)	74
Figure 5.8 :	Variation du potentiel de gonflement en fonction du pourcentage en chaux additionnée	74
Figure 5.9 :	Pression de gonflement des mélanges (C= 0,1, 2, 3 et 4)	76
Figure 5.10 :	Variation de la pression de gonflement en fonction du pourcentage en chaux additionnée	77
Figure 5.11 :	courbe contrainte -déformation	79
Figure 5.12 :	Droite intrinsèque du sol	79
Figure 5.13 :	Variation de la résistance au cisaillement des mélanges traités pour un cisaillement immédiat	80
Figure 5.14 :	Contrainte déformation pour une durée de cure de 7 jours	81
Figure 5.15 :	Contrainte déformation pour une durée de cure de 14 jours	82
Figure 5.16 :	Contrainte déformation pour une durée de cure de 28 jours	82
Figure 5.17 :	Variation de la cohésion en fonction du pourcentage en chaux additionné pour différentes durées de cure	83
Figure 5.18 :	Variation de l'angle de frottement en fonction du pourcentage en chaux additionné pour les différentes durées de cure	84
Figure 6.1 :	Mécanismes des réactions du sol et durcissement des agents	88
Figure 6.2 :	Mécanisme de réaction impliqué dans le développement de grains C3S-Pouzzolane	90
Figure 6.3 :	Schématisation du développement de la formation d'ettringite	91
Figure 7.1 :	Variation des paramètres physiques en fonction du pourcentage en chaux (0 et 2%).	97
Figure 7.2 :	Variation des paramètres mécaniques en fonction du pourcentage en	98

chaux (0 et 2%).

- Figure 7.3 :** Variation de la teneur en eau in situ en fonction de nombre de couches 104
- Figure 7.4 :** Variation de la densité sèche in situ en fonction de nombre de couches 105
- Figure 7.5 :** Variation du module de déformabilité en fonction de nombre de couches 106

INDRODUCTION GENERALE

La construction des chaussées sur un remblai évolutif ou médiocre est un des problèmes les plus communs de la construction des routes et d'autoroutes dans beaucoup de parties du monde. L'approche habituelle à la stabilisation des remblais est d'enlever le sol fin à faible résistance et de le remplacer par un sol plus durable et résistant. Le coût élevé de remplacement a conduit généralement les gestionnaires de routes et d'autoroutes à utiliser la technique de stabilisation des sols en place.

La durabilité naturelle du sol peut être améliorée par le processus de la stabilisation de sol en utilisant différents types de stabilisateurs (ciment, chaux, cendre volante). Le but est d'augmenter la résistance contre les forces destructives dans le temps par l'accroissement de la cohésion et la diminution du mouvement d'humidité dans le sol.

Le traitement des sols à la chaux est une technique aisée à mettre en oeuvre, économique et efficace. Elle permet de réutiliser les déblais issus des travaux de terrassement destinés à être rejetés, d'éviter de faire appel à des matériaux d'emprunt de qualité issus de carrières dont le transport implique la détérioration du réseau routier existant.

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement d'une marne argileuse traitée à la chaux éteinte pour la réemployer dans la réalisation d'un remblai routier.

Le travail s'attache à évaluer au laboratoire l'influence d'une variation du pourcentage en chaux sur les paramètres physiques et mécaniques du sol. Une application du traitement sur un remblai a été faite au niveaux de l'axe secondaire de l'autoroute Est-Ouest.

Ce mémoire est organisé en trois grandes parties :

La **première partie** consiste en une revue bibliographique, constituée de deux chapitres : le premier est consacré à la définition des sols évolutifs, les minéraux argileux ainsi que les désordres occasionnés par ces types de sols, au niveau des constructions de génie civil. Le deuxième chapitre concerne la présentation des principaux résultats établis par des chercheurs sur les diverses techniques de stabilisation des sols évolutifs.

La **deuxième partie** est consacrée à l'étude expérimentale au laboratoire des matériaux (marne et chaux). Elle est composée de quatre chapitres :

- Le chapitre 3 s'attarde sur l'identification et la classification des matériaux (marne et chaux). Nous présenterons les résultats d'un certain nombre d'essais fondamentaux (analyse chimique, granulométrie, limites d'Atterberg, valeur au bleu, compactage, portance)
- Le chapitre 4 porte sur la caractérisation du comportement physique des mélanges (marne+chaux) par l'étude de l'effet de la chaux sur les paramètres physiques du sol : les limite de consistance, valeur au bleu et la compactibilité.
- Le chapitre 5 s'attache à évaluer le comportement mécanique des mélanges à savoir la résistance à la compression, la portance, compressibilité à l'oedomètre, résistance au cisaillement, potentiel et pression de gonflement. L'objectif principal étant de déterminer l'évolution des caractéristiques mécaniques de la marne en fonction du pourcentage en chaux additionnée.
- Dans le chapitre 6, nous aborderons l'étude du comportement chimique des mélanges par une définition détaillée des différentes réactions chimiques entre les minéraux argileux et la chaux hydratée.

En fin, la **troisième partie**, comporte le chapitre 7 qui est consacré à l'application du traitement de la marne sur chantier avec un pourcentage de 2% de la chaux éteinte provenant de la région de Saida.

Le procédé de traitement ainsi que le contrôle d'exécution et de compactage sont établis selon les guides techniques du traitement (LCPC / Setra, Janvier 2000).

Notre travail s'achève par une conclusion générale et un ensemble de recommandations et perspectives.

1ère PARTIE :
Revue bibliographique
sur les sols évolutifs

CHAPITRE 1

CARACTERISTIQUES ET CONSEQUENCES DES SOLS EVOLUTIFS

1.1 Introduction

Les phénomènes d'évolution des caractéristiques géotechniques des sols argileux et marneux provoquent des tassements différentiels et des glissements qui se manifestent par des désordres affectant principalement les constructions de génie civil.

Selon des critères mécaniques, les variations de volume du sol ou des formations lithologiques affleurantes à sub-affleurantes sont dues, d'une part, à l'interaction eau/solide, aux échelles microscopiques et macroscopiques, et, d'autre part, à la modification de l'état de contrainte en présence d'eau. Ces variations peuvent s'exprimer soit par un gonflement (augmentation de volume), soit par un retrait (réduction de volume). Elles sont spécifiques à certains matériaux argileux, en particulier ceux appartenant au groupe des smectites (dont fait partie la montmorillonite).

Ce chapitre sera consacré à la définition des sols évolutifs ainsi qu'à la présentation des désordres dus à leur utilisation dans les constructions de génie civil.

1.2 Définition des sols évolutifs

On peut définir un matériau évolutif comme un matériau dont les propriétés physiques et mécaniques évoluent dans le temps. Les sols qui ont un caractère évolutif sont les sols fins (limons, argiles, marne) qui peuvent créer dans les ouvrages, des tassements, gonflements et glissements pendant leur durée de vie.

1.2 .1 Les argiles

Les argiles sont des roches sédimentaires à grains fins, de taille inférieure à 0,005 mm, contenant au moins 50 % de silicate d'alumine. Elles absorbent l'eau et forment une pâte imperméable (perméabilité inférieure à 0,2 mm/h), appelée couramment terre glaise, colorée par des oxydes de fer en ocre, rouge, vert.

Les argiles peuvent être gonflantes, notamment celles de la famille des Montmorillonites lorsqu'elles absorbent l'eau et, au contraire, diminuer de volume sous l'effet de la sécheresse, allant jusqu'à craqueler en surface et même sur une profondeur de 2 m à 4 m. Par ailleurs, sous l'effet d'une charge, par exemple celle d'une construction, une partie de l'eau absorbée contenue entre les grains d'argile est chassée, ce qui a pour conséquence de provoquer un tassement sensible du sol. Les argiles représentent en général une assise acceptable à médiocre lorsqu'elles sont recouvertes par d'autres couches de terrain. En revanche, elles sont dangereuses lorsqu'elles affleurent au niveau du sol, du fait de leur instabilité, se traduisant par des variations de volume et un fluage dans les terrains en pente.

D'autres types de sédiments à grains fins contiennent des argiles telles que les marnes, le loess.

1.2 .2 Les limons

Les limons, constitués de silt, de loess et de, possèdent un squelette siliceux à silicocalcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles ; la teneur en argile est variable. Ils sont peu perméables et constituent des terres de culture fertiles. Leur assise est médiocre et sont donc à éviter pour les fondations.

1.2 .3 Les marnes

Les marnes sont à la fois argileuses et calcaires. On considère, selon leur composition, trois grandes catégories :

- les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35 % de carbonate de calcium ;
- les marnes proprement dites et les calcaires marneux avec des taux respectivement de 35 à 65 % et 65 à 95 %.

Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de craqueler sur une certaine profondeur en cas de sécheresse. Les marnes ont souvent fait l'objet d'exploitation en carrières à ciel ouvert ou en souterrain pour donner respectivement : de la chaux avec les marnes argileuses ; de la chaux hydraulique avec les marnes proprement dites ; et du ciment avec les marnes calcaires ou calcaires marneux. Elles ont également été utilisées pour

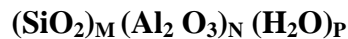
amender les terres des exploitations agricoles. D'une façon générale, les marnes sont une assise de fondations bonne à moyenne en l'absence de gypse. En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse, avec risque de formation de fontis.

Les marnes sont des roches relativement tendres, elles subissent une géodynamique très active à leur surface et leur fragilité les rend très vulnérables aux aléas de la nature et des hommes. Une combinaison de facteurs naturels et anthropiques a provoqué une érosion hydrique intense qui s'est manifestée par une dégradation des sols et une diminution importante de leur productivité. [52].

On peut conclure que l'évolution des sols fins est due à la présence des minéraux argileux dans les sols tels que : les marnes, les argiles....etc, qui manifestent une grande sensibilité à l'air (retrait, fissuration désagrégation progressive des couche de sol) et une forte affinité pour l'eau (avec les conséquences classiques de l'humidification : gonflement, déconsolidation, perte des caractéristique mécaniques) [33].

1.3 Définition des minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des silicates d'alumine hydratés provenant de la décomposition des feldspaths et des micas, leur formule chimique est de la forme :



Ils sont composés de particules de forme aplatie et de dimensions très petites (Inférieures à 2 μm), ceci leur confère une très grande surface spécifique.

Les éléments structuraux sont le tétraèdre de silice et l'octaèdre d'alumine où éventuellement Mg^{++} peut remplacer Al^{+++} .

Les particules d'argile sont formées d'un empilement de feuillets qui sont constitués par l'association de deux unités structurales de base (Figure 1.1) [27] :

a) Unité tétraédrique :

Elle est formée d'un tétraèdre au sommet duquel quatre ions d'oxygènes (O^{2-}) enserrent un ion de silicium (Si^{4+}), équidistant à chacun d'eux. Ces tétraèdres se combinent entre eux pour former une couche tétraédrique.

b) Unité octaédrique :

Elle est formée d'un octaèdre au centre duquel un ion d'aluminium (Al^{3+}) ou de magnésium (Mg^{2+}) est équidistant aux six hydroxyles (OH) des sommets.

Ces octaèdres se combinent pour former des couches planes dites couches octaédriques, et la liaison avec la couche tétraédrique se fait au niveau des oxygènes.

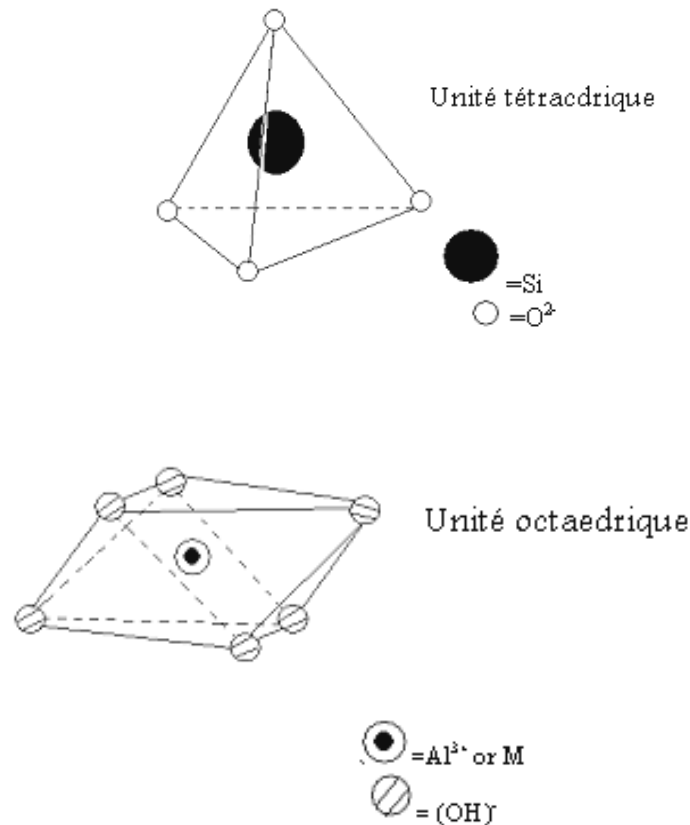


Figure 1.1 : Structure de base des argiles.

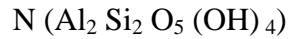
A partir de ces structures de base nous pouvons définir plusieurs familles d'argiles (La kaolinite, l'illites, la chlorite, la montmorillonite).

Précisons à présent les propriétés principales des trois grandes familles (ou groupes) d'argile.

1.3.1. Les argiles du groupe de la kaolinite :

Dans la kaolinite les couches d'octaèdres et les couches de tétraèdres sont parallèles, et s'intercalent de telle façon que les atomes supérieurs et inférieurs de chacune des couches appartiennent à un même plan. [35].

L'espacement de base entre les ions d'oxygène dans l'unité tétraédrique et les ions hydroxyles dans l'unité octaédrique est presque identique, de ce fait les couches tétraédriques et octaédriques peuvent s'associer et former ainsi le feuillet de kaolinite avec pour formule générale :



Notons que l'épaisseur du feuillet élémentaire est d'environ 7\AA mais les dimensions dans les deux autres directions sont infinies. La structure de la Kaolinite est donnée dans la figure 1 .2

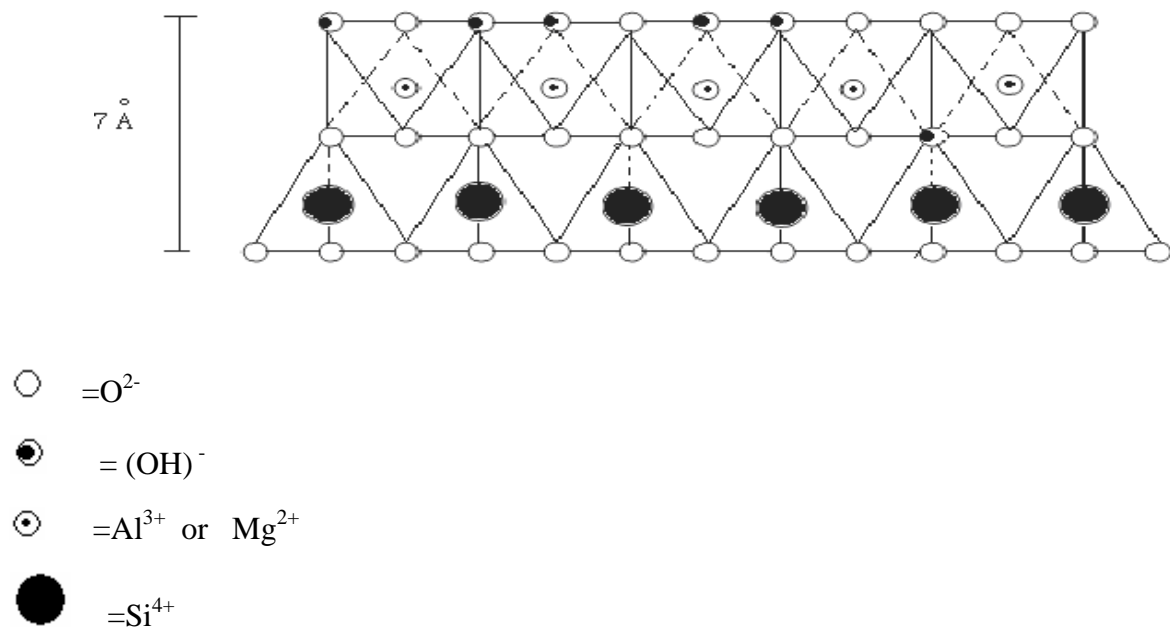


Figure 1 .2 : Structure de la kaolinite.

1.3.2. Les argiles du groupe des micas (les illites) :

La structure du feuillet est en forme de « sandwich », composée d'une couche octaédrique comprise entre deux couches tétraédriques [27].

L'illite est un des minéraux argileux du groupe des micas le plus répandu dans la nature. La structure de l'illite ressemble à celle de la montmorillonite. La différence provient de ce que l'aluminium remplace à 20 % le silicium dans les tétraèdres et que des atomes de potassium venant rétablir l'équilibre des charges rompu par le remplacement, assurent la liaison des couches tétraédriques et octaédriques. Cette liaison est suffisante pour empêcher l'eau de s'insérer à l'inter- couche et l'illite n'est pas donc une argile très gonflante [35].

Les illites sont des particules de dimensions plus petites que la kaolinite de diamètre équivalent moyen de 0,3 μm , et d'une épaisseur de 100Å. [27]

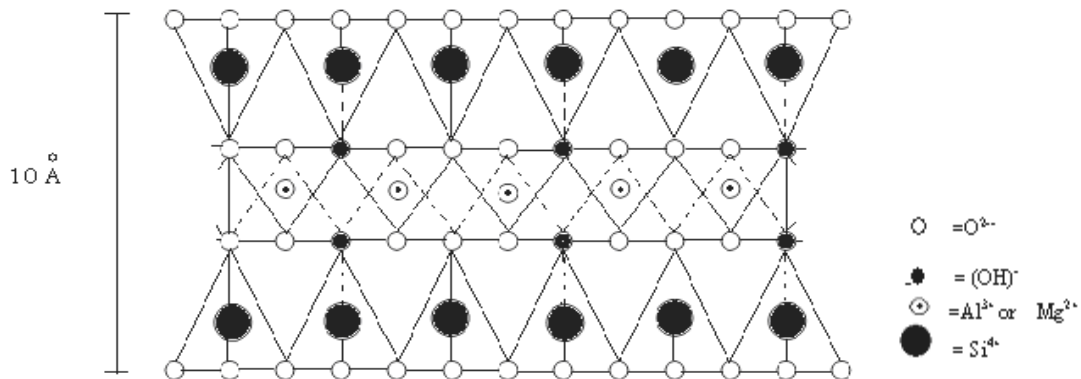


Figure 1. 3 : Structure d'illite

1.3.3. Les argiles du groupe des smectites (la Montmorillonite) :

Ce sont des argiles du même type que le mica (une couche octaédrique entre deux couches tétraédriques), mais les liaisons entre feuillets sont plus faibles.

Les substitutions isomorphiques sont principalement localisées en couches octaédriques.

Les smectites possèdent ainsi des propriétés de gonflement qui se produisent surtout en présence d'eau et peuvent provoquer la dissociation complète des feuillets.

Les smectites (par exemple la montmorillonite) se caractérisent par l'existence entre deux feuillets d'un certain nombre de couches d'eau contenant des cations échangeables (libres) généralement des cations sodiques et calciques, ce qui entraîne un écartement des feuillets variables suivant les conditions du milieu.

Dans la montmorillonite, il y a un remplacement partiel de l'aluminium des octaèdres par du magnésium (presque un sur six), le déficit de charge est compensé par des cations généralement Na^+ ou Ca^{++} situés entre les feuillets et qui sont échangeables (ou compensateurs), ainsi la montmorillonite peut se présenter par la formule suivante :



Les feuillets sont empilés l'un sur l'autre comme les feuilles d'un livre, [27].

Les montmorillonites sont des minéraux où les liaisons entre les feuillets sont affaiblies, si bien que de l'eau se glisse entre ces feuillets en quantité variable. C'est ce qui explique que les montmorillonites sont sujettes au gonflement.

Un sol contenant un pourcentage élevé de montmorillonite est susceptible de gonfler provoquant ainsi l'endommagement des fondations superficielles et des structures [35].

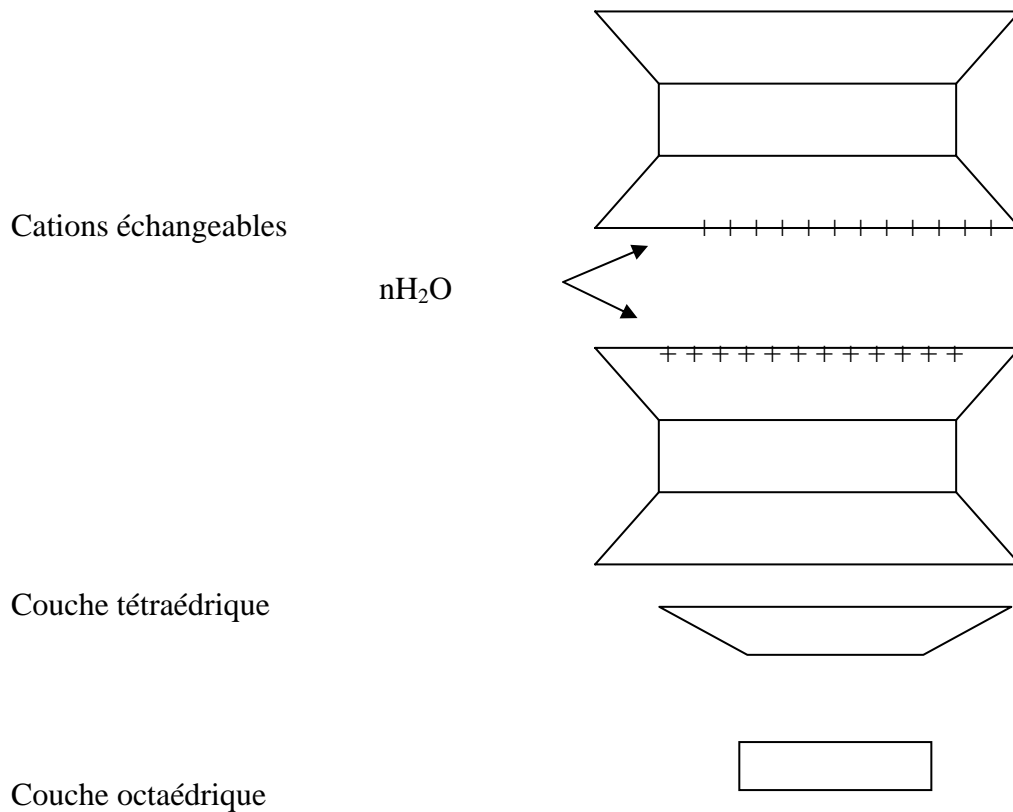


Figure 1. 4 : Structure de la montmorillonite.

1.4 Désordres occasionnés par l'utilisation des sols évolutifs dans les constructions de génie civil

1.4.1 Introduction

Dans de nombreux pays du monde, le gonflement est à l'origine de fréquents désordres des ouvrages légers. Aux Etats-Unis d'Amérique les dommages provoqués par le gonflement des sols présentent un coût supérieur à celui de toutes les catastrophes naturelles. En Algérie l'urbanisation de certains quartiers des villes et la construction des routes se heurtent aux problèmes que posent les phénomènes de gonflement, tassement, et de glissement.

1 .4 .2 Phénomène de gonflement

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

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

1 .4 .3 Tassements

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

1 .4 .4 Glissements

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

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

1 .4 .5 Conséquences enregistrées

Les désordres provoqués par le gonflement affectent généralement les constructions apportant de faible contrainte sur le sol support. La pathologie dépend du type d'ouvrage.

Les phénomènes de retrait et de gonflement de certains sols argileux ont été observés depuis longtemps dans les pays à climat aride et semi-aride où ils sont à l'origine de nombreux dégâts causés tant aux bâtiments qu'aux réseaux et voiries.

1 .4 .5.1 Cas des bâtiments

Pour les structures de génie civil on peut observer les désordres suivants :

- fissuration des structures

- distorsion des ouvertures
- rupture des canalisations
- décollement des bâtiments

La photo suivante représente des fissures au niveau d'une structure légère de génie civil



Photo N°1 : fissures au niveau d'une structure de génie civil

1 .4 .5.2 Cas des chaussées

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée [11]. Ce phénomène est causé par des variations de la teneur en eau du sous sol. Il peut être attribué au climat et à la surcharge. Les désordres subis par la chaussée se résument généralement à les fissures qui apparaissent à la fin de la saison sèche sur les accotements de la chaussée, en saison de pluie ces fissures permettent à l'eau de s'infiltrer plus facilement entraînant la saturation de ces zones et par conséquent leur gonflement, engendrant ainsi l'apparition de déformation à la surface de la chaussée (Fig. 1 .5 et 1 .6) puis l'apparition de fissures longitudinales qui peuvent être assimilées à la chute de la portance dans les zones latérales de la chaussée entraînant l'affaissement des bords, ces phénomènes sont accélérés par le flux routier. Ces désordres s'amplifient avec le début de la saison sèche (Fig. 1 .7).

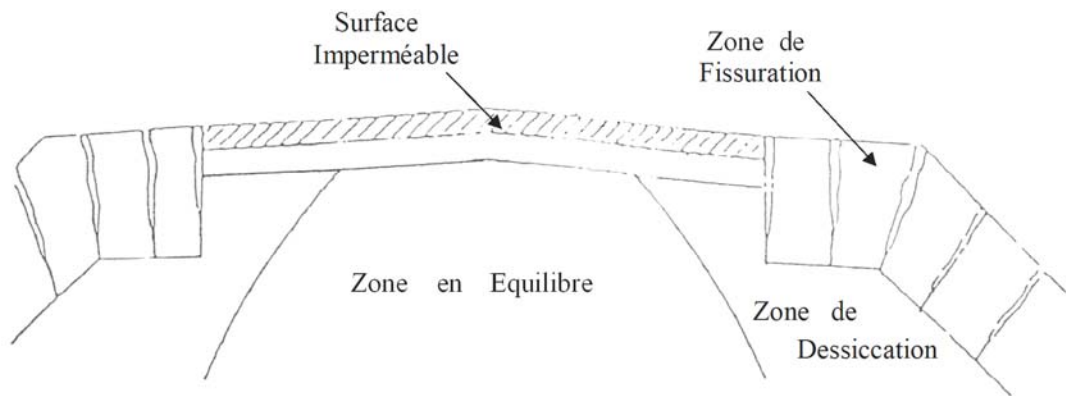


Figure 1. 5 : Apparition des premières fissures sur les accotements (fin de saison sèche)

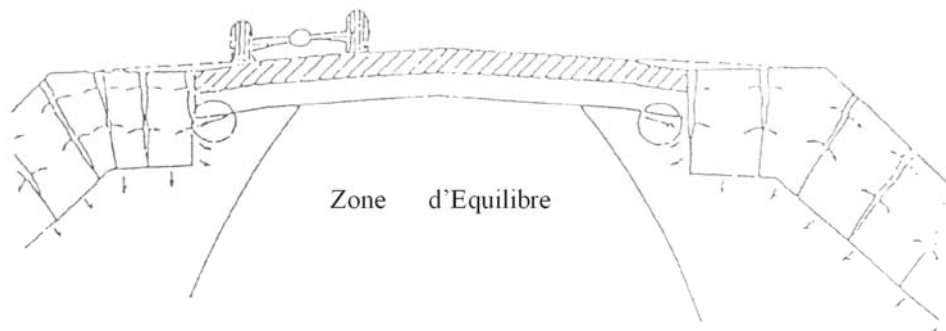


Figure 1. 6 : Apparition des premières déformations et infiltration d'eau à travers les fissures (début de la saison des pluies)

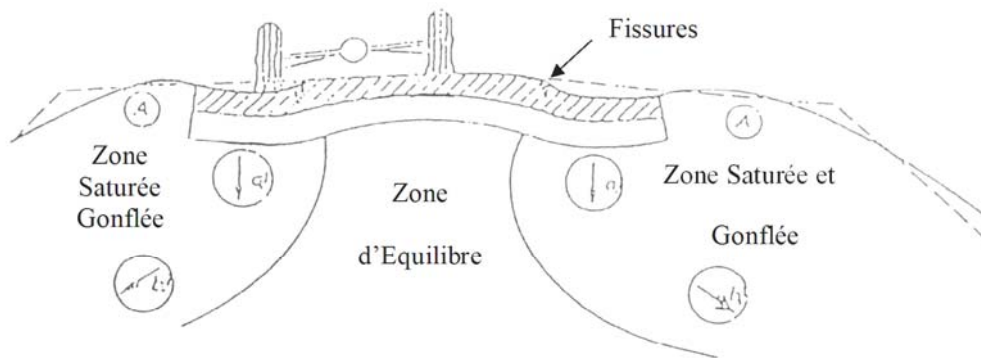


Figure 1. 7 : chute de portance des zones saturées apparition des fissures longitudinales (fin de saison des pluies)

L'expérience du remblai de la JORLE [15], en dehors de tout contexte de pathologie, est riche d'enseignements. En premier lieu, la construction d'un grand remblai routier avec des matériaux marneux évolutifs a été possible sans qu'il y ait de désordres gênants pour l'exploitation de la voie. Toutefois, il faut souligner que des fissures sont apparues à l'intérieur dans des zones de moindre hauteur du remblai. Ces désordres dans la partie basse confirment donc que la hauteur du remblai n'est pas un facteur essentiel ; alors que les circulations d'eau superficielles correspondent à un des facteurs principaux de désordre.

Les mesures de déformations verticales et horizontales montrent que les talus d'un remblai sont soumis à des cycles de gonflement et retrait, étroitement liés aux conditions hydriques, réversibles pour la composante verticale mais pratiquement irréversibles horizontalement. Ce mouvement correspond au phénomène de reptation des pentes. A proximité de la plate forme, le phénomène se traduit par une inflexion de l'accotement et < un élargissement > entre les certes du remblai ; ce mécanisme conduit à la formation de fissures longitudinales, accentuées par les différences de rigidité entre le corps du remblai et la structure de chaussée.

La partie altérée soumise à ces cycles voit ses caractéristiques mécaniques diminuer dans des proportions importantes et de façon quasiment irréversible ; cette évolution peut évidemment conduire à des glissements localisés dans le talus ; aggravés par la présence de fissures ouvertes qui facilitent la pénétration de l'eau.

1.5 Conclusion

Les désordres dans les ouvrages de génie civil tels les remblais routiers et les chaussées, les fondations et les structures, les canaux et les conduites se rencontrent ainsi couramment dans les terrains gonflants, les dégâts produits chaque année à travers le monde ont été évalués en cent mille millions de dollars. Ces dégâts surpassent ceux produits par l'effet combiné des tremblements de terre, ouragans et glissements de terre. Pour éviter le problème des sols gonflants, on dispose de différentes solutions parmi lesquelles on peut relever :

- Le changement de site.
- Le remplacement des sols gonflants par un matériau non gonflant.
- La protection du sol gonflant vis à vis des accès d'eau.
- La prévention du gonflement par un chargement approprié, et ainsi le calcul des structures de manière à ce qu'elles puissent supporter les pressions de gonflement susceptibles de se développer.
- La possibilité de variation de volume sous des conditions de chargement déterminé, les structures étant conçues alors, pour suivre les déplacements sans dommages.
- La mise en place de fondations profondes, développant leur capacité portante au delà de la zone active.
- et enfin la stabilisation du sol gonflant par un traitement approprié.

Cette dernière solution est étudiée par un grand nombre de chercheurs. Elle est présentée en détails dans le chapitre suivant, en mentionnant les résultats recherches dans le domaine.

TECHNIQUES DE STABILISATION DES SOLS EVOLUTIFS

2.1 Introduction

Le traitement des sols est souvent opéré pour augmenter leur résistance, pour réduire ou augmenter leur perméabilité ainsi que pour diminuer leur compressibilité. Il est, aussi utilisé pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau comme dans le cas des sols expansifs.

Concernant ce traitement on peut spécifier [14]:

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

La stabilisation des sols : elle a pour objectif la réalisation des couches de fondations de qualité dont les caractéristiques mécaniques ont été considérablement rehaussées, ce qui donne une plus grande portance et une meilleure distribution des charges. En outre, ces couches acquièrent ainsi une meilleure résistance à l'érosion et au gel, augmentant dès lors sensiblement leur durabilité. La stabilisation exige des pourcentages de 4 à 6 % de ciment ou d'une combinaison de ciment avec d'autres liants, tels que la chaux, les laitiers de haut-fourneau ou l'émulsion de bitume.

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue :

- La stabilisation mécanique.
- La stabilisation aux sables.
- La stabilisation chimique (par additifs).

2.2 Stabilisation mécanique :

Nous citerons trois méthodes de stabilisation mécanique:

2.2.1 Méthode de substitution :

Il s'agit de remplacer le sol évolutif par un sol non évolutif.

2.2.2 Méthode de compactage :

Elle consiste à baisser la densité en place du sol. Chen (1988), suggère pour les sols très expansifs, un compactage à faible densité [4].

L'argile expansive se développe très peu lorsqu'elle est compactée à une basse densité et une grande teneur en eau, contrairement à ce qui se produit pour un compactage à une grande densité et une faible teneur en eau : gonflement important.

2.2.3 Méthode de préhumidification :

Elle consiste à augmenter la teneur en eau du sol jusqu'à saturation, nous aurons donc le maximum de gonflement, Chen (1988) [4], cette méthode est basée sur les hypothèses suivantes :

- le sol permet un gonflement par humidification précédant la construction.
- Le mouvement de gonflement soit stabilisé lors de la construction réalisant ainsi un état de non soulèvement. Il faut donc compter sur la permanence de la teneur en eau artificiellement créée.

2.3 Stabilisation aux sables :

Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de l'ajout de sable sur le gonflement.

*Didier (1972), en étudiant un mélange de montmorillonite et de sable, a montré que 10% de sable suffisent à réduire la pression de gonflement d'environ 50%, cité par [35].

*Suratman (1985), a trouvé qu'un pourcentage de sable de 20% permet de réduire le gonflement libre de la montmorillonite seule de 42,3% à 26% cité par [35].

*Rao (1987), a montré que 40% de sable comme produit stabilisant ajouté à les argiles gonflantes de l'Inde connu sous le nom Black Cotton, a donné une valeur optimale de CBR et un accroissement de la résistance à la compression, de l'angle de frottement et de la cohésion, cité par [35].

*Aola (1987), a montré que l'ajout de sable à une argile gonflante (Nigeria Black Cotton) permet d'augmenter la densité sèche maximale, et diminuer la teneur en eau optimale, cité par [35].

*Bengara et al (2004), ont étudié l'évolution du potentiel de gonflement et sa pression par l'ajout du sable à différents pourcentages et granulométrie, ils ont remarqué une réduction importante du gonflement de cette argile. [9].

2.4 Stabilisation avec des additifs

Les additifs permettant d'améliorer les caractéristiques des sols sont classés en deux grandes familles : Les sels et les liants.

2.4.1 Les sels

Le principe de base est l'augmentation de la concentration ionique de l'eau libre et l'atténuation du phénomène d'échange. C'est une technique utilisée surtout dans les pays développés, en particulier aux Etats Unis.

De nombreux travaux de recherche ont été effectués en laboratoire en vue d'étudier l'influence des produits chimiques sur les propriétés des argiles.

Nous signalerons quelques exemples d'utilisation de ces produits servant à la stabilisation des sols argileux.

*Haxaire (1956) a étudié la fixation de plusieurs familles de molécules organiques sur la montmorillonite. Cette étude a permis de montrer que certaines molécules telles la guanidine et la benzidine, se fixent irréversiblement, en quantité supérieure à la capacité d'échange de base, sur la montmorillonite, cité par [32].

*Hazart et Wey (1965), ont étudié la cinétique du gonflement de montmorillonite en présence de l'éthylène glycol, au moyen de la diffraction X, et ont mis en évidence la formation du complexe argile-glycol en insistant sur le rôle important joué par le cation inter-foliaire, cité par [32].

*Dider (1972), s'est penché dans ses recherches sur l'influence des sels sur la pression du gonflement et le gonflement libre de la montmorillonite. Il a donné des relations exprimant

le gonflement en fonction du pourcentage théorique d'éléments inférieurs à 2μ et de l'indice de retrait de la montmorillonite pour divers fluides hydratants, cité par [11].

*Nabil et al, (2004), ont étudié l'effet des sels (KCl, NaCl, CaCl₂ et (NH₄)₂ SO₄) sur deux argiles, la première est une argile naturelle intacte extraite du site de Mansourah (Banlieue Ouest de la ville de Tlemcen) et la deuxième est une Bentonite de Maghnia (Située à 60 km à l'Ouest de Tlemcen). [1]

Les figures suivantes représentent l'amplitude du gonflement en fonction du temps de l'argile intacte de Mansourah à différentes concentrations des solutions salines utilisées. Ils ont montré que les sels minéraux ont une efficacité très forte sur le gonflement. Le KCl s'avère le sel ayant le plus d'effet sur le taux de gonflement est sur les limites d'Atterberg. Une concentration en KCl de 0.5 mol/l a permis de réduire de près de 70% le taux de gonflement d'une argile de la famille des montmorillonites.

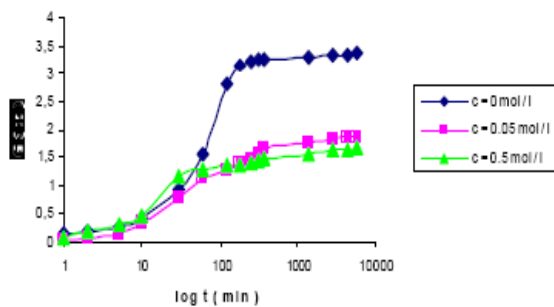


Figure 2.1 : Variation du taux gonflement de l'argile intacte de MANSOURAH en fonction du temps en présence du NaCl[1]

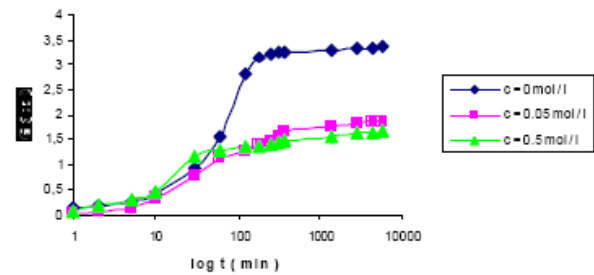


Figure 2.2: Variation du taux de gonflement de l'argile intacte de MANSOURAH en fonction du temps en présence du KCl [1]

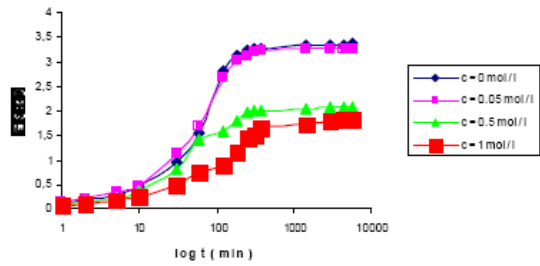


Figure 2. 3: Variation du gonflement en fonction du temps en présence du CaCl₂ de l'argile intacte de MANSOURAH [1]

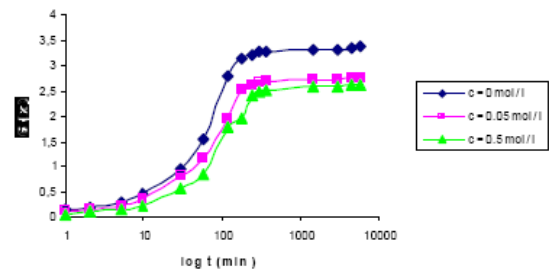
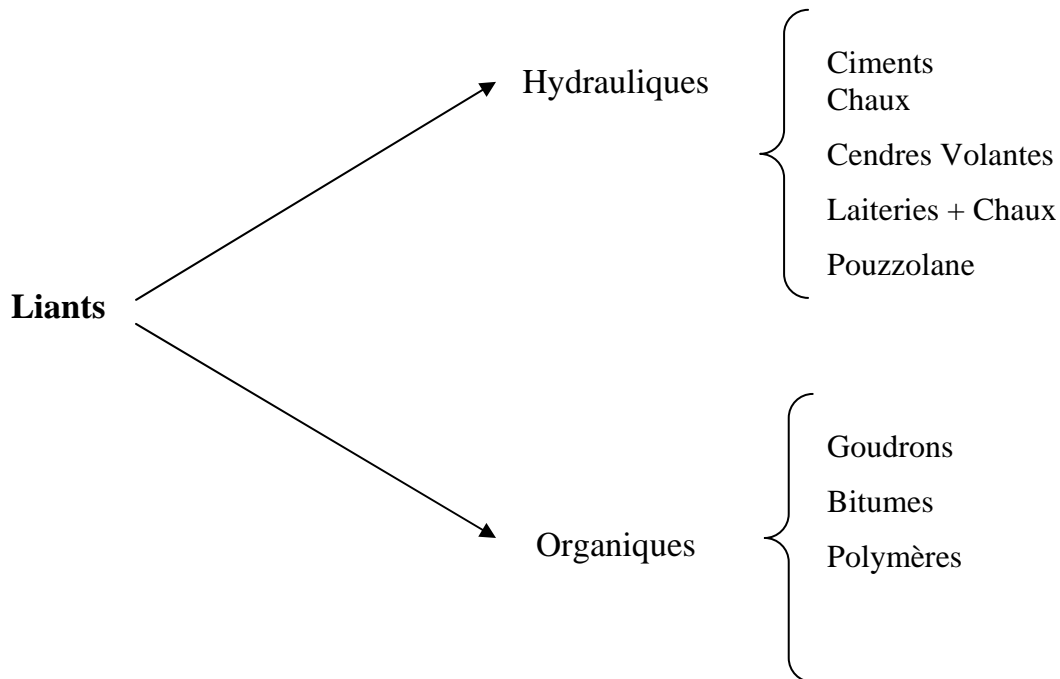


Figure 2.4: Variation du taux gonflement de l'argile intacte de Mansourah en fonction du temps en présence du (NH₄)₂SO₄ [1]

2.4. 2 Les liants

Les liants se divisent en deux grandes familles qui sont les liants hydrauliques et les liants organiques. les principaux liant existants dans l'industrie sont :



2.4. 2.1 Liants organiques

Ce sont des produits de type colle, c'est à dire des composés organiques susceptibles d'une bonne adhésion au squelette minéral. On en distingue deux sortes:

*Les mono-composants : composés d'un seul constituant à un caractère thermoplastique, ce sont par exemple les bitumes de pétrole, les goudrons et les brais de houille.

* Les bi-composants : composés de deux constituants qui sont mélangés au moment de la mise en œuvre. Le résultat est intermédiaire entre le collage thermoplastique des mono-composants et le scellement des liants hydrauliques, ce sont par exemple des polymères, des résines.

L'action de ces produits donne au sol des propriétés hydrophobes qui dépendent de l'enrobage des particules du sol par le liant. L'inconvénient majeur de ces liants organiques est leur biodégradabilité sous des climats tropicaux.

De nombreux chercheurs ont travaillé sur ce genre de traitement :

*Vessely et al (2002). ont montré que les inclusions de géosynthétiques sont efficaces sur la réduction du potentiel de gonflement des sols expansifs [61]

*Ikizler et al 2008, ont reporté que la réduction du potentiel et la pression de gonflement est le résultat de l'inclusion de polystyrène placé entre un sol expansive et un mur rigide. [31]

*Tang et al (2007), montrent que le renforcement par les fibres augmente la résistance à la compression et permet de réduire le potentiel de gonflement des argiles expansives. [55]

*Cai et al (2006), reportent que l'augmentation de contenu en fibre implique une réduction dans le potentiel de gonflement des argiles stabilisées à la chaux. [16]

* Viswanadham et al (2006), ont montré que les mélanges renforcés par les fibres engendrent une grande réduction du gonflement avec des faibles pourcentages (0.25%) et des petites ratios de 15 et 30 (Figure 2. 5). [62]

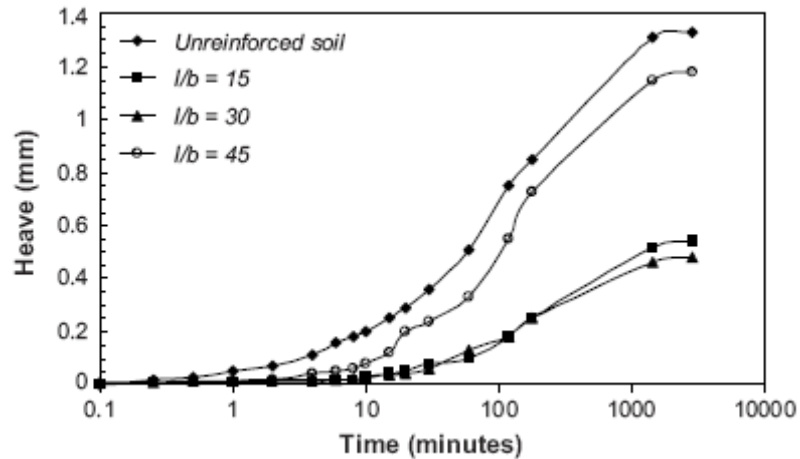


Figure 2. 5: Variation du gonflement en fonction du temps ($f = 0.25\%$). [62].

f continue de fibre dans le sol

l largeur de fibre

b longueur de fibre

2.4. 2.2 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. Ils sont tous à base de la chaux qui va réagir avec l'argile par échange cationique, floculation et agglomération, carbonatation et par réaction pouzzolanique. Ces réactions se traduisent par une amélioration immédiate des propriétés mécaniques du sol et une diminution de la sensibilité à l'eau par floculation et échange cationique.

2.4. 2.2 .1 Stabilisation au ciment :

Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques, qui sont à priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argiles, auxquels il apporte cohésion, résistance mécanique et stabilité à l'eau et au gel.

Le ciment rigidifie rapidement le sol de manière irréversible mais s'il y a rupture de l'horizon traité (action mécanique) il n'y a pas de nouvelle prise. Les constituants hydratés du ciment relient les grains de sable entre eux en formant des sortes de ponts nombreux et solides, d'où l'augmentation de la portance, de la résistance mécanique et de la résistance au gel. Les doses varient de 3,5 à 5 % du poids de sol sec à traiter. [12].

Dans les sols argileux, la réaction chimique sol-ciment est le responsable de son amélioration. Le processus d'hydratation du ciment produit les deux majeurs produits : les CSH et la chaux, l'interaction de cette chaux avec les minéraux argileux du sol joue un rôle essentiel en terme de processus de stabilisation sol- ciment. [49].

*D'après Léonarde, cité par [35], une argile très plastique traitée avec 10% de ciment acquière une résistance à la compression de plus de 3,5 bars.

*D'après Chen, Jones, cité par [35], le traitement de l'argile gonflante de Porterville de Californie avec 2 à 6% de ciment portland, présente une réduction considérable du potentiel de gonflement.

L'action de stabilisation par les ciments, est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau et des conditions de température. De plus, la présence de la chaux dans les ciments provoque des réactions d'échange. Les pourcentages utilisés varient de 2 à 6%. Le ciment est parmi les liants les plus fréquemment utilisés dans le traitement des sols de surface. [56].

*D'Après Haofeng et al (2009), la résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours, augmente au fur et à mesure que l'augmentation du pourcentage en ciment (figure 2. 6) [28]

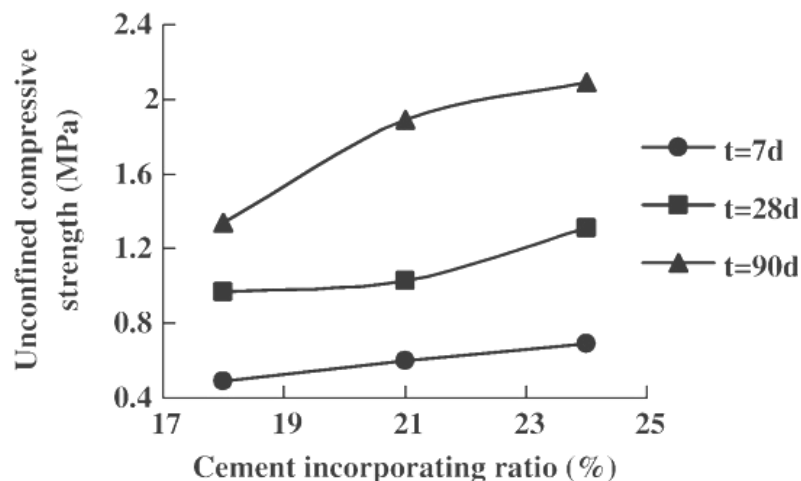


Figure 2. 6: Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage en ciment à différentes durées de cure [28]

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

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

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

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

Réaction pouzzolanique : la chaux libre libérée pendant l'hydratation réagit avec la silice ou l'alumine des particules d'argiles en présence de l'humidité pour former les agents de cimentation.

2.4. 2.2 .2 Stabilisation aux cendres volantes

Les cendres volantes sont un sous-produit des centrales thermiques qui brûlent le charbon en poudre. Elles sont considérées comme une pouzzolane artificielle et s'emploient comme telle, avec du ciment pour faire du béton ou dans le sol-ciment. Les cendres volantes ont été employées aussi avec de la chaux dans la stabilisation des sols. [38].

Zalihe Nalbantoglu, (2004) ; a étudié la stabilisation des argiles gonflantes par les cendres volantes. Les résultats d'essai en laboratoire sur ces sols indiquent que ces cendres volantes sont efficaces à l'amélioration de la texture et la plasticité des sols traités. Elles permettent de réduire l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement [42].

2.4. 2.2 .3 Stabilisation à la chaux

La stabilisation par ajout de la chaux est la technique de traitement des sols la plus répandue, elle concerne essentiellement les sols fins (argileux, limoneux et marneux)

L'utilisation de cette technique permet :

- D'éviter des volumes de terrassement importants dans le cas de substitution des sols médiocres.

- De donner aux sols argileux d'une manière assez rapide une bonne consistance pour des dosages compris entre 1% et 2%. Ceci montre aussi l'intérêt économique de ce procédé.

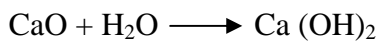
- De modifier les propriétés du sol.

Sachant qu'il y a deux types de chaux, vive et éteinte, le choix s'effectue en se basant sur les essais de laboratoire, les essais de chantier et sur le prix de revient.

a. Chaux vive

La chaux vive diminue la teneur en eau du sol via trois phénomènes distincts:

- L'hydratation de la chaux vive: une partie de l'eau «disparaît» via la réaction exotherme avec la chaux vive



- L'évaporation d'une partie de l'eau, provoquée par la chaleur dégagée par l'hydratation de la chaux vive.

- L'apport de matière sèche qui diminue le rapport de la masse d'eau à la masse de solide (teneur en eau).

La diminution attendue est de 1 % de teneur en eau par pourcentage de chaux vive introduite. Si les conditions atmosphériques sont bonnes, la teneur en eau peut diminuer encore plus sous les effets du malaxage et du vent.

b. Chaux éteinte

b .1 Action à court terme

La chaux éteinte diminue également la teneur en eau mais uniquement via l'apport de matière sèche dans le sol. La chaux influe sur les charges électriques se trouvant autour des particules d'argile et modifie ainsi les champs électriques entre ces particules. Ceci entraîne leur floculation, et des conséquences non négligeables sur les caractéristiques géotechniques du sol.

L'expérience a montré que suite à un traitement, certaines modifications se produisent sur les caractéristiques du sol.

Influence de la chaux sur la teneur en eau et les limites d'Atterberg

L'ajout de la chaux, permet de réduire la plasticité, le retrait et la sensibilité des sols par une augmentation immédiate de la limite de plasticité (w_p), la limite de retrait la limite (w_r), réduction de la valeur au bleu de méthylène, et une conservation de la valeur de la limite de liquidité (w_L). [9] [64].

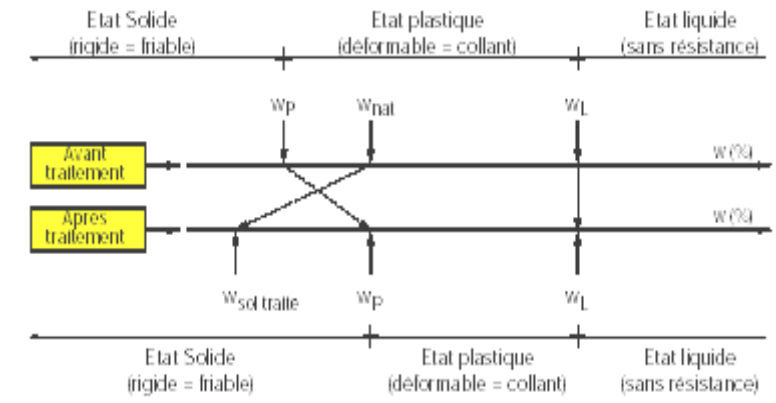


Figure 2. 7: Variation de l'indice de plasticité avec l'ajout de la chaux. [9].

La figure (2. 7) montre que les phénomènes combinés de la diminution de la teneur en eau naturelle du sol traité et de la diminution de l'indice de plasticité peuvent faire passer un sol de l'état plastique (déformable, collant -donc difficilement compactable) à l'état sec (rigide, frottant, friable - donc beaucoup plus facile à travailler).

Afès et Didier (1999), ont étudié l'influence de la chaux sur les limites d'Atterberg de l'argile gonflante de Mila, la figure 2. 8 illustre le chemin suivi par cette argile suite à un traitement à 3 et 6% de chaux pour des temps de cure de 7, 28, et 90 jours. Ils ont remarqués que l'argile qui est de plasticité moyenne voit, après traitement à la chaux, sa consistance évoluer vers un limon de faible plasticité. Cette évolution de la consistance liée au pourcentage de chaux et à la durée de la cure, se traduit par une diminution de l'indice de plasticité. [2]

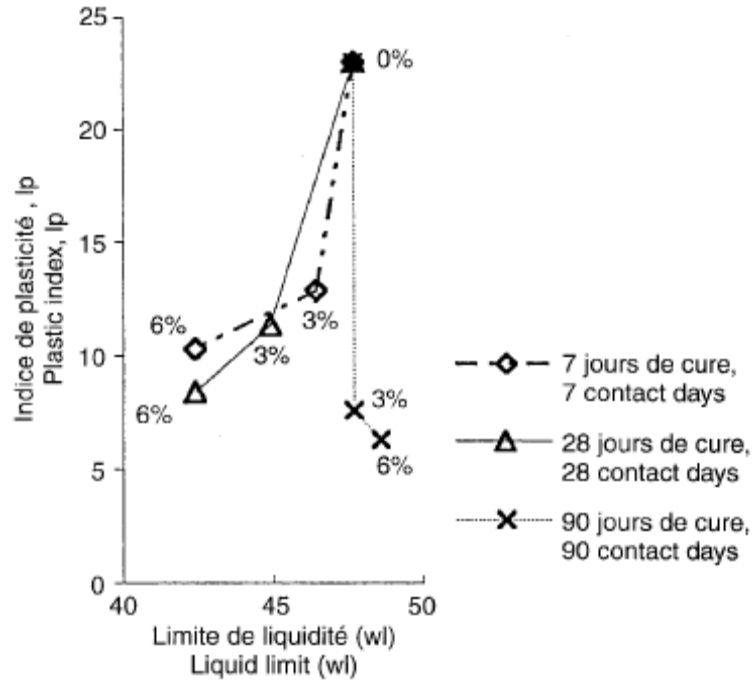


Figure 2. 8 : Variation des limites de consistance en fonction du temps pour 3 et 6% de chaux[2].

Influence de la chaux sur la valeur au bleu de méthylène

Afès et Didier (1999) [2], ont étudiée l'effet de la chaux sur la valeur au bleu de méthylène de l'argile gonflante de Mila, La Figure 2. 9 présente l'évolution de la valeur au bleu de méthylène en fonction de la quantité de chaux ajoutée, après 7, 28, et 90 jours. Ils ont remarqués une diminution continue de la valeur au bleu. Cette diminution est d'autant plus accentuée que la durée de la cure est lente.

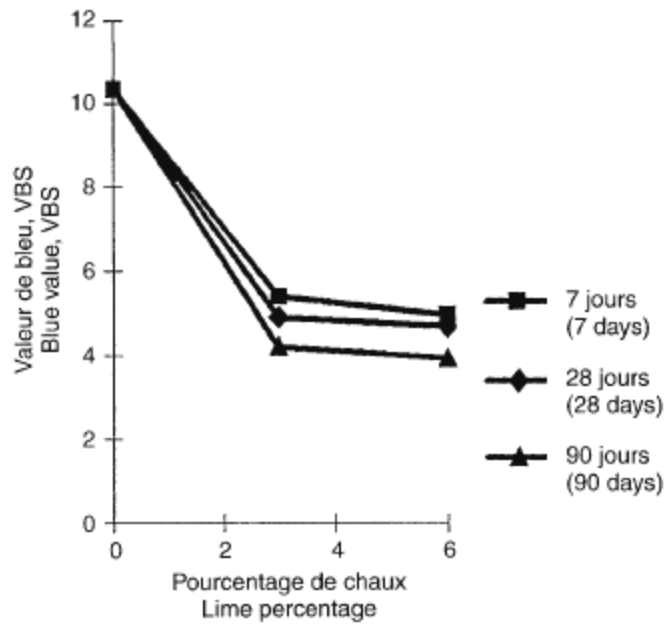


Figure 2. 9 : Evolution de la valeur au bleu de méthylène en fonction du pourcentage de chaux [2].

Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage

Afès et Didier (1999), Koliass et al (2005), ont montré que le traitement à la chaux réduit la valeur maximale de la masse volumique sèche et augmente la valeur de la teneur en eau optimale et implique un aplatissement des courbes Proctor du sol. [2], [36].

La Figure 2. 10 représente l'argile traitée à 3 et 6% de chaux et compactée à l'énergie Proctor normal 30 min après l'adjonction de chaux. La courbe Proctor obtenue s'aplatit au fur et mesure que le pourcentage de chaux augmente.

Ils ont vérifié que le traitement à la chaux conduit à une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche maximale (Figure 2. 11).

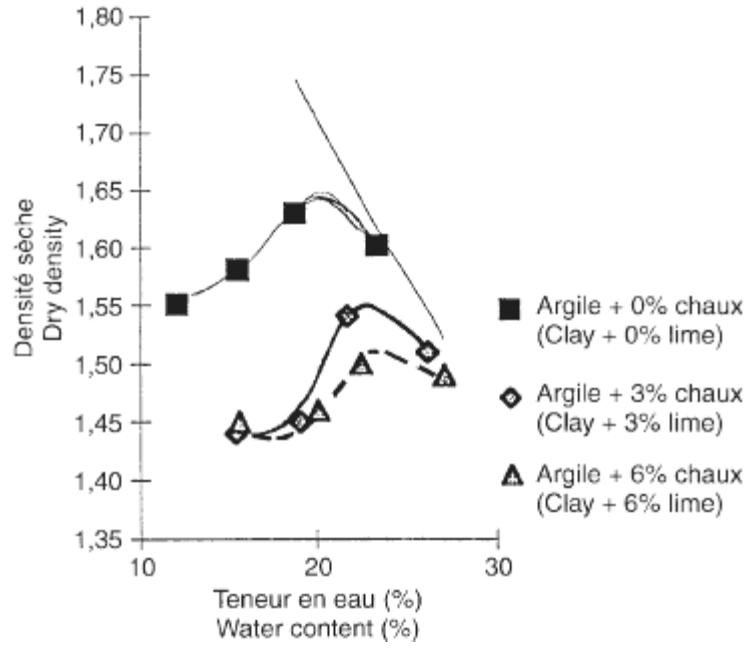


Figure 2. 10 : Courbe Proctor de l’argile de Mila traitée à la chaux et non traitée [2].

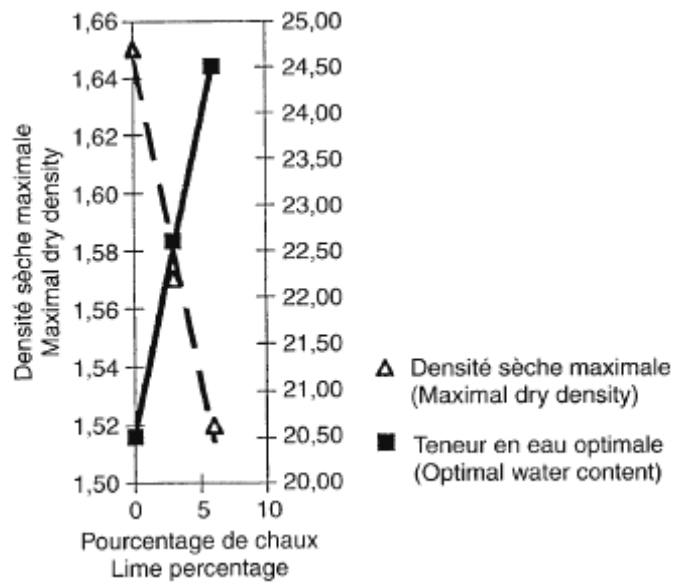


Figure 2. 11 : Evolution des caractéristiques de compactage en fonction du pourcentage de chaux [2].

b .2 Action à long terme

La stabilisation à long terme est due à une action pouzzolanique qui se produit par la mise en solution en milieu de pH élevé (supérieur à 12) de la silice, de l'alumine et des oxydes de fer présents dans les minéraux argileux sous des formes cristallisées plus ou moins altérées. Ces éléments en solution réagissent ensuite avec la chaux pour former des ferro-silico-aluminates de calcium insolubles qui précipitent et cristallisent en présence d'eau, créant ainsi des liaisons de même nature que celles produites avec les liants hydrauliques.

De nombreuses études ont montré que la stabilisation des sols argileux par la chaux transforme ces derniers en sols fermes et améliore leur résistance, leur perméabilité et stabilise leurs volumes après gonflement et retrait.

Influence de la chaux sur la portance

Alimi-Ichola et Didier (1990), cité par [35], ont travaillé sur deux types de sols gonflants du Maroc en vue de leur réutilisation dans le domaine routier. Ils remarquent qu'une teneur en chaux de moins de 6% suffit pour avoir de bons résultats vis à vis de la teneur à l'eau et de la portance.

Malhotra (1987) cité par [35] a étudié un mélange de chaux avec une argile gonflante de Bhopal (Inde) avec 4% seulement de chaux. Il observe une nette amélioration de la valeur du **C.B.R.**, elle passe de 1,95 à 0% de chaux et de 43.8 à 4% de chaux.

Raymond et Ouhadi, (2006) ont étudié l'effet de la chaux sur le paramètre de portance CBR [49]. La figure 2. 12, montre que l'addition de pourcentage élevé de chaux augmente la valeur du CBR de la marne stabilisée donc une augmentation de la portance.

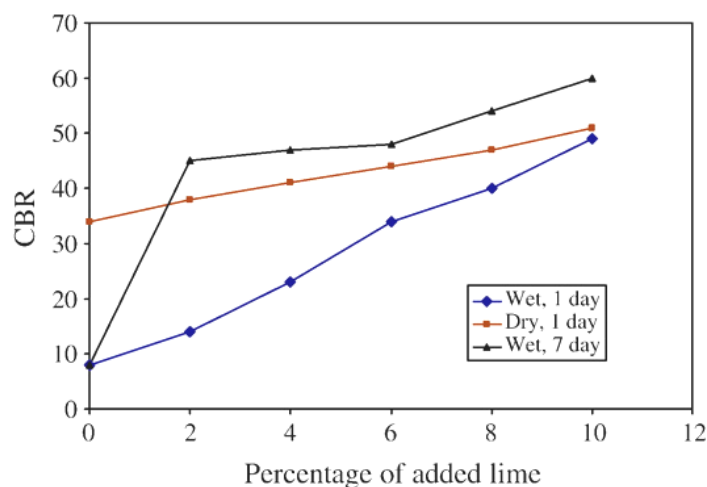


Figure 2. 12 : Valeurs de CBR imbibés et immédiats de la marne naturelle et stabilisée à différentes durées de cure. [49].

Influence de la chaux sur la résistance à la compression

Rao et son équipe (1987), cité par [35], ont étudié le mélange de chaux et d'argile gonflante de l'Inde. Ils notent une bonne amélioration de la résistance à la compression, avec 12% de chaux $R_C = 16,8$ bars, alors qu'elle était de 1,77 bars à 0% de chaux.

Kolias et al (2005) ont étudié l'effet de la chaux hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sur la résistance à la compression des deux argiles pour différentes durées de cure, ils ont conclu que l'augmentation du pourcentage en chaux de 0,92 à 3,66 % augmente la résistance à la compression (figure 2. 13). [36]

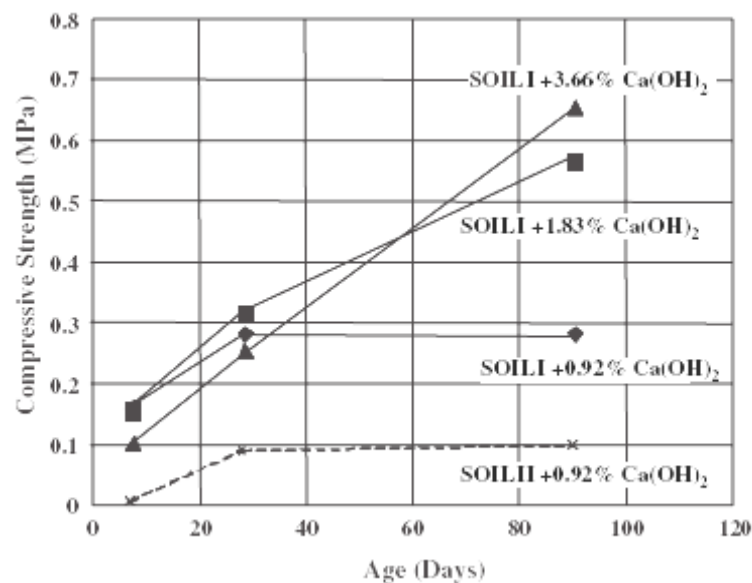


Figure 2. 13 : Effet du pourcentage en chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sur la résistance à la compression des sol I-II à différents duré de cure. [36]

Yi et al (2006) ont montré que l'augmentation du pourcentage en chaux de 2 à 5% donne une augmentation importante de la résistance à la compression, mais l'addition de la chaux de plus que 5% donne un effet inverse sur l'amélioration de la résistance à la compression (figure 2. 14). [63],

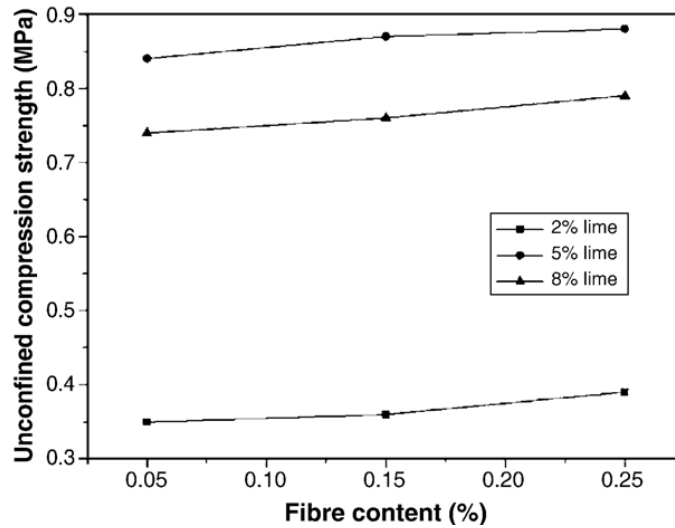


Figure 2. 14: Effet du pourcentage de chaux sur la résistance à la compression du sol renforcé par différents pourcentages en fibre [63]

Influence de la chaux sur le gonflement

Afès et Didier (1999) ont étudié l'influence de la chaux sur les paramètres du gonflement (potentiel et pression de gonflement) de l'argile gonflante de Mila.

La figure 2. 15, montre que le pourcentage de chaux introduit diminue le potentiel de gonflement final pour un même temps de cure quel que soit le pourcentage additionné. [2]

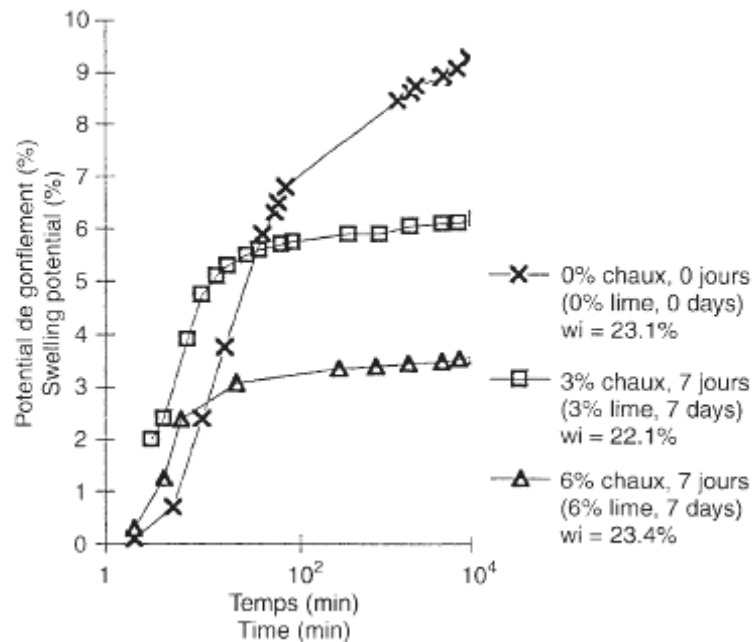


Figure 2. 15: Cinétiques du potentiel de gonflement des éprouvettes traitées à 3 et 6% de chaux pour différentes durées de cure [2]

La Figure 2. 16, montre l'évolution de la pression de gonflement finale en fonction du pourcentage de chaux pour des périodes de conservation de 7 à 90 jours. On remarque que la pression de gonflement finale obtenue sur des éprouvettes traitées diminue au fur et à mesure que le temps de conservation augmente. Ainsi pour 6% de chaux à 90 jours nous obtenons une pression de gonflement pratiquement nulle donc une inhibition totale du gonflement.

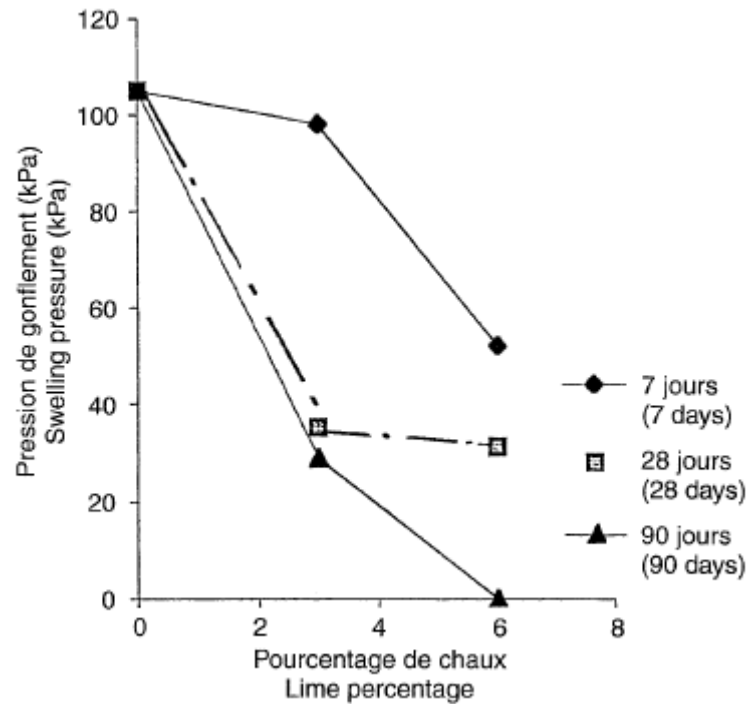


Fig. 13

Figure 2. 16: Evolution de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de chaux [2]

Yucel et al, (2005) ont étudié, l'impact du cyclique de mouillage et du séchage sur le comportement des sols argileux gonflants (A, B et C) en présence de la chaux. [64]

Le sol A est composé de 70% de bentonite et de 30% de kaolinite,

Le sol B est constitué de 30% de bentonite et de 70% de kaolinite,

Le sol C est un sol argileux de plasticité moyennement élevée. Il s'agit de l'argile de Turkmen.

Les figures suivantes représentent les résultats des potentiels de gonflement et du pression de gonflement pour les mêmes sols et même pourcentage de chaux 3% et 6%.

Les résultats de la pression et du potentiel de gonflement ont montré que l'effet initial du sol, bénéficiaire de la stabilisation à la chaux a été perdu après le premier cycle et le potentiel de gonflement a augmenté aux cycles suivants. D'autre part, le potentiel de gonflement et la pression de gonflement du sol non traité ont commencé à diminuer après le premier cycle qui est due à la formation des minéraux expansifs telles que l'étringite et la thaumasite. L'équilibre a été atteint après le quatrième cycle.

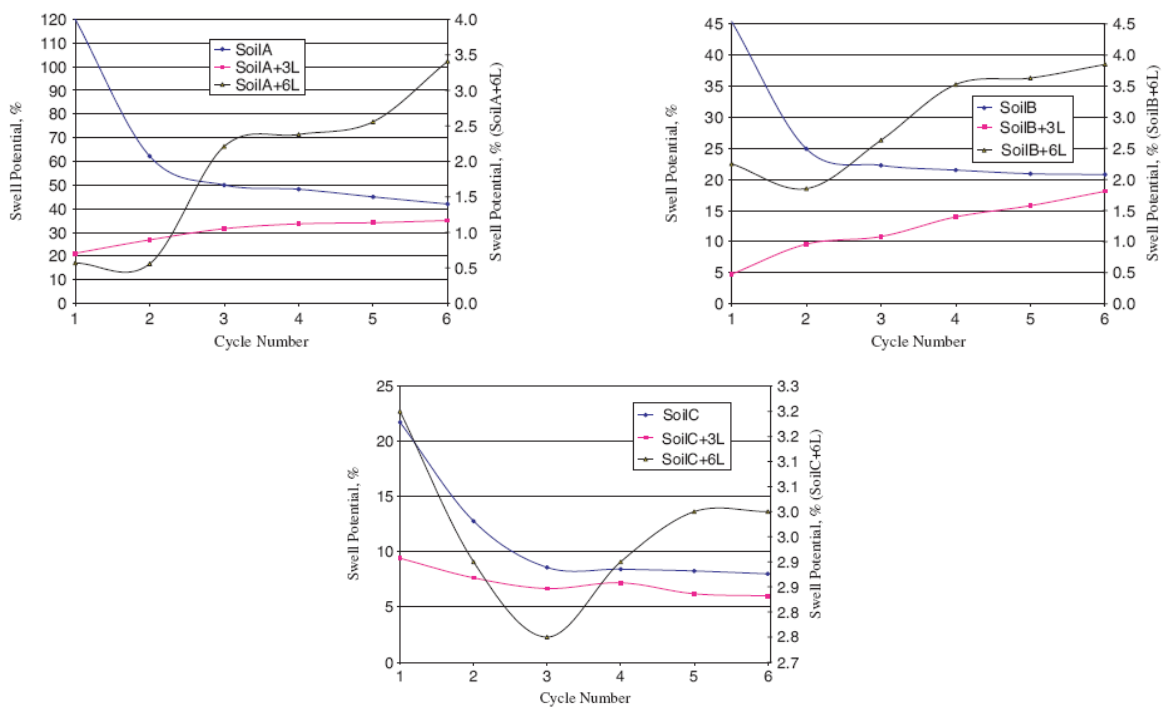
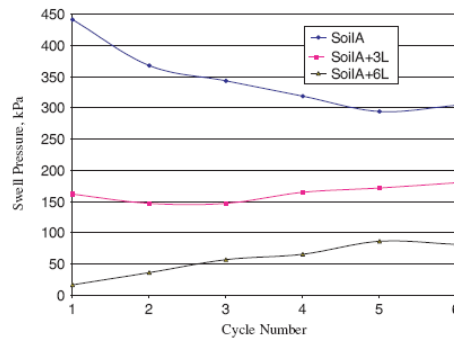


Figure 2.17: La variation de potentiel du gonflement avec le nombre des cycles pour les sols (A , B et C) dans un état traité et non traité . [64].



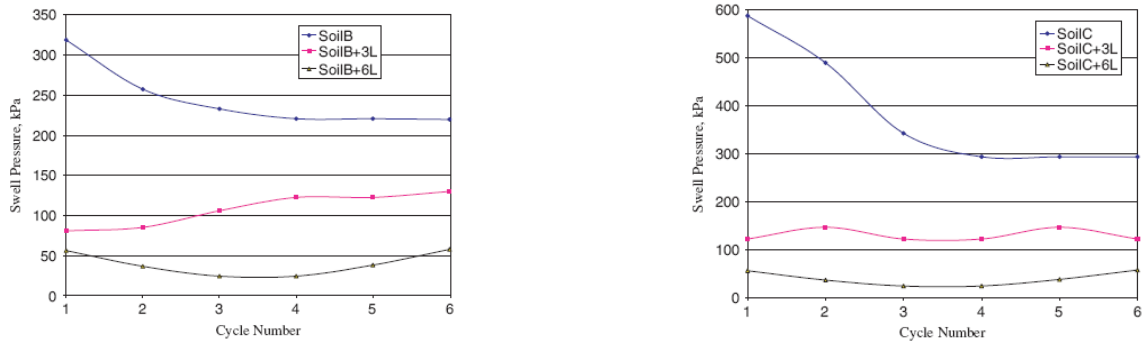


Figure 2.18: La variation de la pression du gonflement avec le nombre des cycles pour les sols (A, B et C) dans un état traité et non traité. [64].

Influence de la chaux sur les paramètres de la résistance au cisaillement

Deneele (2008) confirme que l’addition de la chaux à un sol argileux implique une modification de son angle de frottement interne et sa résistance au cisaillement, il a remarqué une augmentation de ces paramètres avec l’augmentation du pourcentage en chaux additionnée. [19]

Yi et al (2006) ont étudié l’influence des fibres sur les paramètres de cisaillement (cohésion et angle de frottement) des mélanges traités à la chaux (figures 2.19 et 2.20), ils ont montré que l’augmentation du pourcentage en fibre et en chaux augmente ces paramètres jusqu’à un seuil de chaux de 5%. [63]

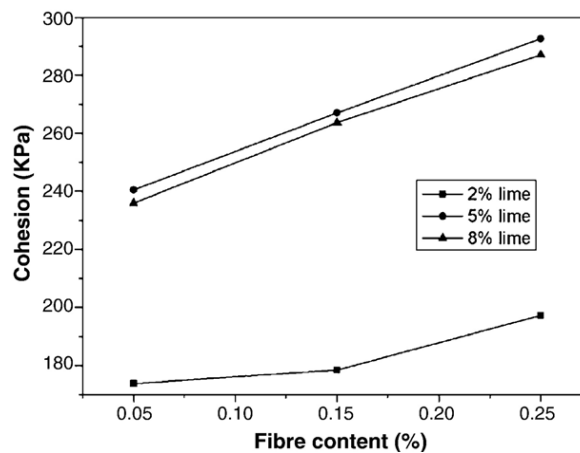


Figure 2.19: Effet de continu en fibre sur la cohésion des mélanges traités à la chaux après 28 jours [63]

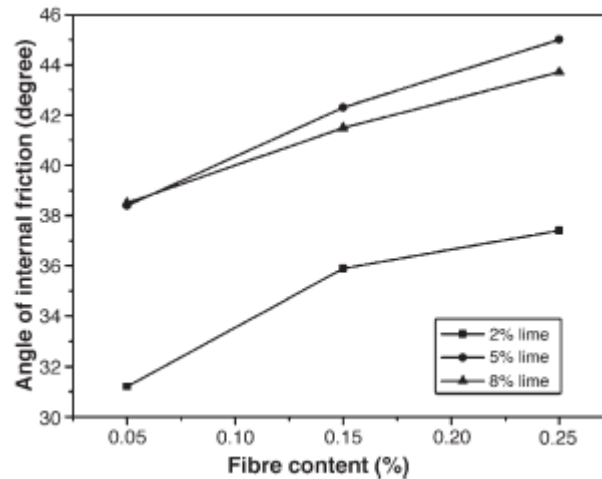


Figure 2.20: Effet de contenu en fibre sur l'angle de frottement des mélanges traités à la chaux après 28 jours [63]

2.5 Conclusion

Les conséquences et les désordres dans les ouvrages géotechniques dus aux sols évolutifs étudiés dans le chapitre 1, ont permis de mettre en évidence l'importance de l'application des solutions stabilisatrice de ce type de sol.

De nombreux chercheurs ont étudié différentes méthodes avec différents ajouts en vue de stabiliser ces formations évolutives. Les différents résultats trouvés concernant la stabilisation à la chaux peuvent classer cette dernière comme la meilleure et l'idéal dans le domaine de stabilisation.

C'est pourquoi nous avons décidé d'étudier l'influence de la solution de traitement à la chaux sur notre sol.

2^{eme} Partie :
comportements
physico-chimiques et
mécaniques des
mélanges
(Chaux + marne)

CHAPITRE 3

CARACTERISATION ET CLASSIFICATION DES MATERIAUX UTILISES

3.1 Introduction

Quelque soient les objectifs recherchés dans une étude géotechnique, il est de règle d'effectuer initialement l'identification des sols concernés. Cette procédure permet d'orienter les analyses géotechniques ultérieures et surtout d'effectuer une classification des matériaux rencontrés. Les paramètres nécessaires pour cette classification sont aussi bien de natures physico-chimiques et mécaniques.

Ce chapitre est consacré à l'identification des matériaux désirés pour cette étude qui sont la marne et la chaux éteinte.

3.2. Sol étudié

Dans notre étude on a choisit des matériaux provenant des zones de déblai situé au PK 3+900 du tronçon d'autoroute section des 27 KM mis en dépôt au PK 5+800 ;

Du point de vue géologique, cette zone est caractérisée par une dominance des formations marno-calcaire renfermant des roches argileuses aux caractéristiques géotechniques médiocres.

Les reconnaissances géotechniques réalisées au niveau de ce tracé d'autoroute moyennant une campagne de sondages ont mis en évidence une coupe lithologique (figure 3 .1) qui se présente d'une façon générale comme suit :

- une terre végétale d'une puissance de 0. 20 à 0.50 m.
- Un sol marneux argileux jaunâtre à verdâtre rencontré sur la hauteur restante des déblais, il se trouve directement sous la terre végétale.

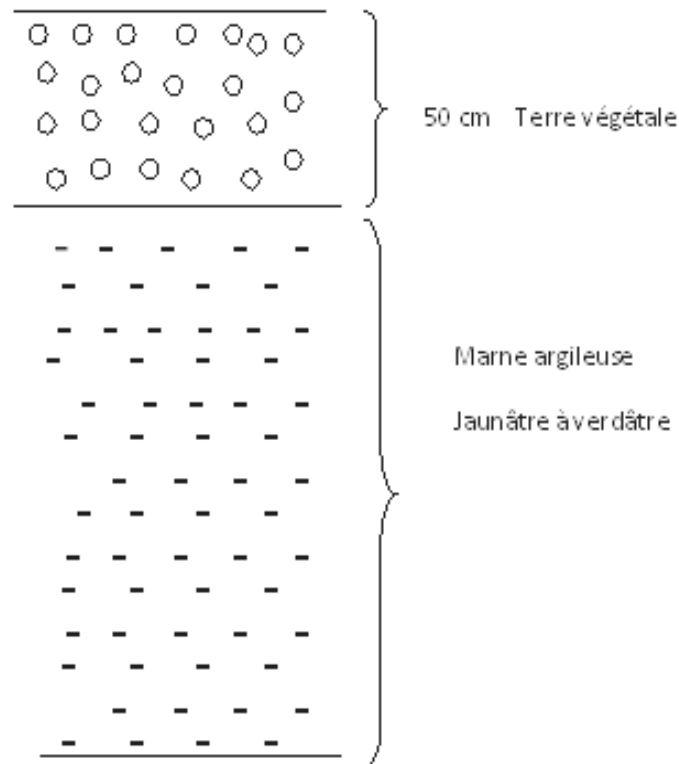


Figure 3. 1 : coupe lithologique du sol

3.2.1 Prélèvement des échantillons

Les prélèvements d'échantillons effectués par le biais d'une pelle mécanique ont fait l'objet d'une sélection au niveau du dépôt situé au voisinage de l'oued Boussouf et ce dans le but d'obtenir une éventuelle homogénéité des sols à étudier.

Pour notre étude on s'est basé sur les matériaux marneux renfermant des roches argileuses (le cas le plus défavorable des matériaux).

3.2.2 Propriétés chimiques

Cette analyse a porté sur la détermination de la nature chimique de la marne argileuse à étudier. Dans ce cadre, une analyse chimique quantitative réalisée par fluorescence X a été déterminée, les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 3.1 : composition chimique de la marne.

Composition chimique	Quantité (%)
Insolubles (INS)	63.77
Carbonate de calcium (CaCO ₃)	21.19
Perte au feu a 1050° (PF)	17.16
Oxyde de fer d' Alumine (R ₂ O ₂)	5.43
Sulfates (CaSO ₄ , 2H ₂ O)	TRACES
Anydride carbonique CO ₂	9.32
Chlorure de Sodium (Na Cl)	0.35
Eau de constitution (H ₂ O)	7.84

3.2.3 Propriétés physiques

3.2.3.1 Analyse granulo-sédimentométrique

L'analyse granulométrique d'un sol a pour but de déterminer, en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions. De cette distribution résulte la classification du matériau. L'analyse granulométrique s'obtient par deux opérations successives :

- le tamisage pour les particules de dimensions supérieures à 80 µm.
- Lorsque le sol étudié comporte une quantité importante de particules inférieures à cette taille, on procède à analyse en sédimentométrie.

La sédimentométrie est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage des sols. Elle s'applique aux éléments de diamètre inférieur à 0.100 mm.

Les résultats des analyses granulométriques, synthétisés dans le tableau 3.2, ont montré que notre sol est constitué de plus de 50% d'éléments inférieurs à 80 µm

Tableau 3.2 : Caractéristiques granulométriques de la marne.

Ech N°	Gravier (%)	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	W (%)	Pd (t/m ³)
01	02	17	10	70	04	1.98
02	05	21	4	70	04	1.98

Les essais sont réalisés suivant les normes NF P94 056, NF P94-057, NF P94-064.

3.2.3.2 Limites d'Atterberg

La détermination des limites d'Atterberg est fondamentale dans le cas des argiles car elles permettent d'évaluer la plasticité qui est une propriété très importante pour les sols argileux. [57].

Limite de liquidité (WL) : correspond à la teneur en eau permettant un éloignement des particules suffisant pour annuler pratiquement les forces interparticulaires ce qui leur permet un libre déplacement relatif ;

Limite de plasticité (WP) : correspond à la teneur en eau suffisante pour permettre une certaine liberté de déplacement relatif des particules mais trop faible pour les éloigner au point de réduire fortement les forces de liaisons entre elles.

Indice de plasticité (IP) : $IP = WL - WP$: celui-ci correspond à l'amplitude du domaine plastique dans lequel le matériau peut subir des déformations irréversibles à volume constant sous contraintes.

Limite de retrait (WR) : c'est la teneur en eau qui sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait (elle correspond à la quantité d'eau juste nécessaire pour combler les vides d'un sol lorsque celui-ci est à son volume minimum).

Indice de retrait (IR) $IR = WL - WR$

Les résultats des limites d'Atterberg trouvés sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 3.3 : Présentation des valeurs des limites d'Atterberg.

WL (%)	WP (%)	IP (%)	WR (%)	IR (%)
60	28	32	28	32

3.2.3.3 Essai au bleu de méthylène (Vb)

L'essai au bleu de méthylène permet d'évaluer la surface spécifique d'échange d'un matériau argileux, ce qui constitue un bon indicateur de sa susceptibilité au phénomène de retrait gonflement, nettement plus représentatif que l'indice de plasticité qui n'est que très partiellement corrélé au comportement du sol vis-à-vis du retrait gonflement.

Cet essai consiste à mesurer la capacité d'adsorption en bleu de méthylène, c'est à dire la quantité de ce colorant nécessaire pour recouvrir d'une couche mono-élémentaire les surfaces externes et internes de toutes les particules argileuses présentes dans 100 g de sol. On appelle cette quantité : la « Valeur au bleu », notée Vb et exprimée en grammes de bleu par 100 g de matériau.

Les résultats des valeurs au bleu de méthylène sont récapitulés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : présentation des valeurs au bleu de méthylène.

Ech N°	Valeur au bleu VB (g/kg)
01	6.00
02	7.00
Moyenne	6.5

3.2.3.4 Essai de dégradabilité et de fragmentabilité

Afin d'apprécier certains paramètres d'état et de comportement des matériaux rocheux, des recherches effectuées sur les matériaux évolutifs tels que les marnes, les calcaires, les schistes, les grès etc., ont aboutis à la mise au point de trois essais spécifiques à ces matériaux notamment pour caractériser leur altérabilité, leur fragmentabilité, et leur dégradabilité.

Conformément aux normes françaises (NFP 94.066 et 94.067) caractérisant respectivement les deux derniers essais qui ont pu faire l'objet d'un test sur un mélange de roches provenant des matériaux de déblais.

a. Degré de dégradabilité

Le coefficient de dégradabilité est un paramètre représentatif du comportement de certains matériaux rocheux se traduisant par une évolution continue de leurs caractéristiques géotechniques (granularité, argilosité, plasticité).

Le coefficient de dégradabilité est un des paramètres d'identification retenu dans la classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme.

Sa détermination est en particulier nécessaire pour préciser le classement des roches argileuses (marne, argilites, schistes sédimentaires).

L'essai consiste à déterminer la réduction du D10 d'un échantillon de granularité d/D donnée soumis à quatre cycles imbibition séchage conventionnels.

Cette réduction s'exprime par le rapport :

$$DG = \frac{\text{D10 du matériau avant le 1}^{\text{ere}} \text{ cycle imbibition séchage}}{\text{D10 du matériau après le 4}^{\text{eme}} \text{ cycle imbibition séchage}}$$

DG : coefficient de dégradabilité du matériau.

La valeur trouvée pour notre matériau est **DG = 12**.

b. Indice de fragmentabilité

L'essai consiste à déterminer la réduction du D10 d'un échantillon de granularité d /D donnée soumis à un pilonnage conventionnel.

Cette réduction s'exprime par le rapport

$$FR = \frac{\text{D10 du matériau avant pilonnage}}{\text{D10 du matériau après pilonnage}}$$

FR : coefficient de fragmentabilité du matériau.

La valeur trouvée pour notre matériau est FR = 8.33

3.2.4 Propriétés mécaniques

3.2.4.1 Essai Proctor normal et modifiée

Il s'agit de déterminer la teneur en eau optimale conduisant à une force portante maximale pour un sol donné, selon des conditions de compactage précises.

Donc on détermine d'une part la teneur en eau optimum Proctor normale (W_{OPN} %) et masse volumique sèche maximale (Pd OPN) et d'autre part, la teneur en eau optimum Proctor modifiée (W_{OPM} en %) et masse volumique sèche maximale Proctor modifiée (Pd OPM) elle s'applique aux matériaux suivants (non traités ou traités à la chaux ou aux liants hydrauliques).

Les caractéristiques de compactage Proctor sont des paramètres qui sont très utilisés pour identifier les matériaux en vue de définir les spécifications de compactage applicables dans la construction des remblais, des couches de forme et des assises de chaussées.

Les caractéristiques à l'optimum Proctor déterminées sur les matériaux étudiés sont résumées dans le tableau ci après :

Tableau 3.5 : Présentation des références de compactage.

Caractéristiques à l'OPN		Caractéristiques à l'OPM	
W (%)	Pd g/cm ³	W (%)	Pd g/cm ³
15	1.705	13.5	1.94

Les références caractérisant un sol assez dense avec un Pd de 1,94 g/cm³ pour l'OPM et 1.705 g/cm³ pour l'OPN.

3.2.4.2 Portance du sol

La portance d'un sol est la caractéristique qui définit sa capacité à supporter les charges qui lui sont appliquées.

La portance dépend de la nature du sol, du pourcentage d'eau et du degré de compactage. Quel que soit le sol, sa résistance mécanique augmente avec sa densité en faisant passer plusieurs fois des engins lourds qui assurent le compactage.

La portance du sol et sa teneur en eau optimum sont déterminés par l'essai Proctor.

Les paramètres de portance obtenus suite à l'essai de poinçonnement immédiat et après quatre jours d'immersion sont résumés dans le tableau 3.6 :

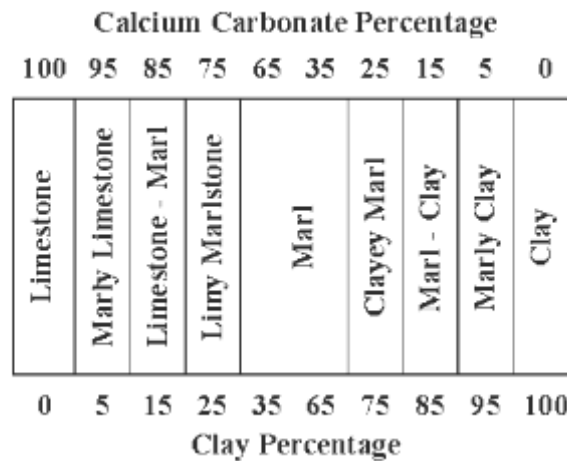
Tableau 3.6 : Présentation des valeurs des indices de portance.

Indice de portance immédiat IPI (%)	Indice de portance imbibé CBR (%)
09	3.3

3.2.5 Interprétation des résultats et classification du sol

3.2.5.1 selon les approches empiriques

*Les sols marneux sont bien classés suivant le pourcentage du carbonate constitué. Ghazvinian et al ont donné une classification suivant ce pourcentage (Figure 3.2) [23].

**Figure 3.2 :** Position des différents sols dans le domaine géologique [23]

D'après les résultats de l'analyse chimique faite et selon la figure 3.1, le sol est classé comme étant une marne argileuse avec un pourcentage de carbonate de l'ordre de 21.19 %.

*L'analyse granulo-sédimentométrique réalisée a permis de mettre en évidence des sols classés comme étant des argiles marneuses sableuses montrant par loi une forte cohésion selon la classification LCPC.

*A l'état naturel cette marne se présente comme une roche marnoargileuse moyennement dure de teneur en eau naturelle faible (4%) mais dès qu'il ya présence d'eau ; cette marne devienne molle et très plastique.

Les limites d'Atterberg constituent des paramètres intéressants dans le cas des sols gonflant. En effet ; la littérature contient un nombre considérable d'approches empiriques pour évaluer le potentiel de gonflement en fonction de ces limites.

La Limite de liquidité WL peut renseigner, selon Dakshanamurthy et Raman (1973), cité par [29], sur le taux de gonflement du sol (tableau 3.7).

Tableau 3.7 : Classification des sols en fonction de la limite de liquidité.

Limite de liquidité WL (%)	Classification
0-20	Non gonflant
20-35	Gonflement faible
35-50	Gonflement moyen
50-70	Gonflement élevé
70-90	Gonflement très élevé
> 90	Gonflement critique

Cette classification montre que notre marne argileuse admet un gonflement élevé puisque la valeur de la limite de liquidité W_L synthétisée est comprise entre 50 et 70%.

L'indice de plasticité IP, peut renseigner, selon Seed et al. (1962), cité par [29], sur le taux de gonflement du sol (tableau 3.8).

Tableau 3.8 : Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité.

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

Selon ces auteurs le gonflement de la marne argileuse peut être considéré comme est élevé, puisque la valeur de l'indice de plasticité trouvé est supérieure à 20%.

D'après Ranganatham et Satyanarayana (1965) cité par [29], les deux tableaux ci-dessous donnent une classification des sols en fonction de la limite de retrait et de l'indice de retrait.

Tableau 3.9 : Classification des sols en fonction de la limite de retrait

WR (%)	Potentiel de gonflement
< 10	Faible
10-12	Critique
> 12	Fort

Tableau 3.10 : Classification des sols en fonction de l'indice de retrait.

Indice de retrait (%)	Potentiel de gonflement
0 - 20	Faible
20 - 30	Moyen
30 - 60	Elevé
60	Très élevé

L'indice de retrait obtenue est de 32% cette valeur comparée aux indices indiqués dans le tableau 5 caractérise un potentiel de gonflement classé comme étant moyen. La valeur de la limite de retrait synthétisé est de 28 % donc à partir du tableau 6 cette marne doit être gonflante.

* On considère généralement d'après Chassagneux et al, 1996) que la sensibilité d'un matériau argileux varie de la manière suivante (tableau. 3.11) en fonction de la valeur de bleu (Vb) [29]:

Tableau 3.11 : Classification des sols en fonction de la valeur au bleu de méthylène.

Valeur au bleu	susceptibilité	Note
$V_b < 2.5$	faible	1
$2.5 \leq V_b < 6$	Moyenne	2
$6 \leq V_b < 8$	Forte	3
$V_b > 8$	Très forte	4

La valeur au bleu de méthylène trouvée (6.5), laisse clairement apparaître que notre marne admet une forte sensibilité donc un potentiel de gonflement élevé.

*D'après les résultats trouvés de notre marne et les seuls retenus (tableau 3.12) nous pouvons dire que notre marne rocheuse peut être classée comme fragmentable à moyennement dégradable.

Tableau 3.12 : Seuls retenus de dégradabilité et de fragmentabilité

DG	Matériau
> 20	très dégradable
$5 < DG < 20$	moyennement dégradable
$DG < 5$	peu dégradable

FR	Roche
$FR < 7$	peu fragmentable
$FR > 7$	Fragmentable

En effet une roche fragmentable conduit à un remplissage des vides par des éléments fins pouvant fournir un remblai de faibles caractéristiques mécaniques.

3.2.5.2 Classification du sol selon le GTR

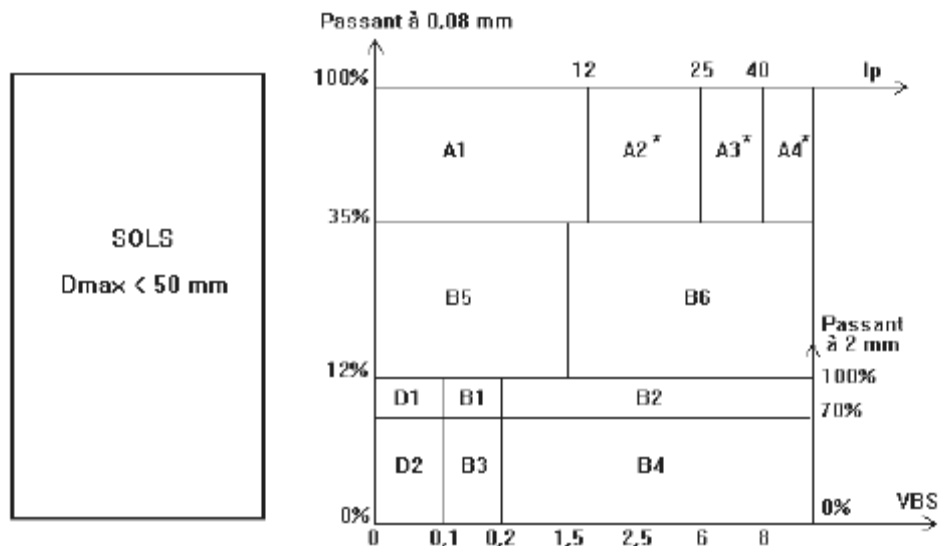
L'utilisation des terres en remblai est d'abord directement liée à leur classification et à leur comportement lors de leur mise en place.

Le GTR 92 (Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme, LCPC, SETRA, 1992) et la norme qui en découle NF- P 11-300 (septembre 1992) proposent une classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

Ils permettent de définir la classe du matériau à partir des résultats de plusieurs types d'essais.

Le tableau 3.13, indique la classification primaire des matériaux, basée sur leur granulométrie, leur argilosité et leur nature pétrographique.

Tableau 3.13 : Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature



MATERIAUX ROCHEUX	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R1
			Calcaires	R2
		Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...	R3
		Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	R4
		Roches salines	Sel gemme, gypse	R5
	Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites..., gneiss..., schistes métamorphiques et ardoisiers...		R6
MATERIAUX PARTICULIERS	Sols organiques, sous-produits industriels			F

* Matériaux pour lesquels la mesure de l'**Ip** est à retenir comme base de classement. Pour les autres matériaux on utilisera la **VBS**.

- A la lumière des résultats trouvés (indice de plasticité de 32%, valeur au bleu de 6.5 et passant à 0.08 mm de 80 %) et selon la première partie du tableau pour les éléments inférieurs à 50 mm, la marne est de la classe A3*
- Les éléments rocheux de la marne (les éléments supérieurs à 50 mm) sont caractérisés par un degré de fragmentabilité de 7 et une teneur à l'OPN de 15.8 % et une teneur en eau naturelle de 4%, suivant la classification de GTR cette roche est de classe R 34 ts. D'après le tableau 3.13 ce classement est désigné pour les roches argileuses

D'après le GTR les matériaux de la classe A3 sont caractérisés par une forte plasticité et un état hydrique très humide et les matériaux de classe R3i sont caractérisés par un état en place sur consolidé semi rocheux avec des états hydriques très secs

Ils sont d'autant collants ou glissants à l'état humide, d'où difficulté de mise en œuvre sur chantier et de manipulations en laboratoire ; ils peuvent conduire à des glissements d'autant plus grands que les remblais sont élevés.

Leur réemploi en l'état naturel pour la construction des remblais pose des problèmes délicats au moment de la mise en œuvre, mais surtout à long terme perdant la vie de l'ouvrage ; du fait de la présence d'un matériau semi rocheux, et la première interrogation réside dans la nature évolutive utilisée en remblai pouvant conduire à un risque d'évolution granulométrique dans le temps une fois mise en remblai.

Les matériaux rocheux à caractère évolutif peuvent changer l'état à l'intérieur de l'ouvrage. Conformément au G.T.R ces matériaux sont inutilisables dans l'état.

3.3. Chaux utilisée

3.3.1 Introduction

L'intégration de la chaux dans les nouvelles techniques de réalisations routières s'est répandue ces dernières années dans plusieurs pays d'Amérique et d'Europe. Ce produit améliore la stabilité, l'imperméabilité [45].

Les propriétés techniques des sols sont grandement améliorées par :

- La modification de tous les sols à grains fins en particulier les sols argileux et plastiques.
- La réaction avec les surfaces argileuses provoque une réduction de la plasticité.
- Une meilleure stabilité par la construction d'une couche à base solide.

Dans cette étude notre choix s'est porté sur la chaux hydraulique provenant de l'usine de la wilaya de Saida.

3.3.2 Identification de la chaux utilisée

3.3.2.1 Définition

Ce sont des chaux aériennes, calciques résultant de l'extinction contrôlée des chaux vives ; elles sont produites sous forme de poudre sèche, de pâte ou de coulis (lait de chaux).

3.3.2.2 Spécification du produit

C'est un terme générique désignant toutes les formes physiques et chimiques dans lesquelles peuvent apparaître l'oxyde de calcium et de magnésium (CaO et MgO) et /ou l'hydroxyde de calcium et /ou de magnésium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

Dans la suite, on présente les résultats des analyses physico-chimiques de notre chaux éteinte

3.3.2.3 Caractéristiques physico-chimiques de la chaux éteinte :

a. Caractéristiques physiques :

La chaux est caractérisée :

- par sa granulation représentée par les passants au tamis de 80μ sont supérieur à 90 %
- par sa teneur en eau libre $< 2\%$

La chaux éteinte a utilisée dans cette étude à une teneur en eau libre de 0.5 % et des passants au tamis de 80μ de 96%.

b. Caractéristiques chimiques :

La chaux est caractérisée :

- par sa teneur en oxyde de calcium libre (ou chaux libre) teneur en $\text{CaO} > 50\%$, (norme NF 196-2)

- éventuellement par sa teneur en oxyde de magnésium $MgO < 6\%$
(normes NF 044 – 145, NFU 44 – 146, NF 44 -147 ou NF U44-148).

Le tableau 3.14 représente les caractéristiques chimiques de la chaux utilisée.

Tableau 3.14 : composition chimique de la chaux éteinte

Composition chimique	Quantité (%)
Insolubles (INS)	14.94
Carbonate de calcium ($CaCO_3$)	78.81
MgO (%)	< à 4
Perte au feu a 1050° PF	35.76
Oxyde de fer d'Alumine (R_2O_2)	4.08
Sulfates ($CaSO_4, 2H_2O$)	TRACES
Anydride carbonique CO_2	34.68
Chlorure de Sodium ($NaCl$)	0.29
Eau de constitution (H_2O)	1.08

La chaux fabriquée au niveau de l'usine de Saida est bien surveillée par son laboratoire de contrôle afin de fournir une meilleure qualité du produit (photo).



Photo N° 2 : laboratoire du contrôle de la qualité de la chaux éteinte à Saida [45]

Selon les résultats trouvés et les thèmes de spécification déjà cités, on peut dire la chaux hydratée de Saida est conforme pour son utilisation dans le traitement des remblais routiers.

3.4 Conclusion

En vertu de tout ce qui précède, et en conformité avec l'analyse de l'ensemble des informations recueillies à partir des différents résultats ; il y a lieu de conclure que le réemploi des matériaux évolutifs en remblai risque de poser des problèmes délicats au moment de la mise en œuvre, mais surtout à long terme pendant la vie de l'ouvrage. Donc leur réemploi dans un remblai routier est valorisé par un traitement à la chaux hydraté, qui peut provenir dans notre, dans notre cas, de la wilaya de Saida.

La deuxième partie de ce mémoire est consacrée à l'étude du comportement physicochimique et mécanique, au laboratoire, des mélanges (marne- chaux).

COMPORTEMENT PHYSIQUE DES MELANGES

4.1 Introduction

La nature et la proportion des minéraux, la masse volumique et la teneur en eau ainsi que l'argilosité, sont les paramètres physiques fondamentaux qui influent sur le comportement d'un sol [10]. L'argilosité qui est une caractéristique exclusive de la fraction fine consiste à déterminer les caractéristiques de plasticité IP et de la valeur au bleu VB. D'autre part la teneur en eau et la compacité des mélanges sont définies par les essais de compactibilité. C'est pourquoi il est intéressant d'étudier la nature et l'évolution de ces paramètres en fonction de la proportion de chaux additionnée.

Ce chapitre a pour but de voir le comportement physique des mélanges traités par le biais des essais des limites d'Atterberg, des essais au bleu et des essais Proctor normal et modifié sur les mélanges composés de la marne argileuse identifiée et classifiée (chapitre 3) et de la chaux hydratée de Saida avec des proportions variées (C= 1, 2, 3 et 4%).

4.2. Préparation des mélanges

La préparation des mélanges est faite selon la norme française.

La méthode que l'on utilise pour la préparation des mélanges est simple et nécessite des moyens de laboratoire :

- * Des bacs
- * Des petites pelles
- * Une étuve
- * Balance électrique
- * Des tamis

On prend chaque fois une quantité de marnes tamisées à 5 mm puis on ajoute des quantités de chaux suivant le pourcentage voulu.

Le mélange est mis dans un bac ; le malaxage du mélange se fait à sec à l'aide des pelles jusqu'à l'homogénéisation, cette opération dure environ 5 à 10 min pour éviter la perte de la réactivité de la chaux



(a) avant le malaxage



(b) après le malaxage

Photo N°2 : Préparation des mélanges au laboratoire

4.3 Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg et la limite de retrait

Plusieurs auteurs ont essayé de relier le gonflement et la sensibilité du sol à l'eau avec les limites de consistance des sols argileux en particulier ; Holtz, Ranganatham et al.

A cet effet nous allons étudier l'influence des différents pourcentages de chaux sur les limites d'Atterberg de la marne argileuse.

De la même façon que l'état naturel, les limites d'Atterberg des mélanges sont déterminés selon les normes françaises NF P94-051 et NF P94-060-1.

4.3.1. Résultats et interprétation

Les résultats des limites d'Atterberg sont représentés dans le tableau 4.1

Tableau 4.1 : Les limites d'Atterberg et limite de retrait.

Matériaux	WL (%)	WP (%)	IP (%)	WR (%)	IR (%)
Marne	60	28	32	30	34
Marne+1%C	60	31	28	30	30
Marne+1%C	59	38	20	33	28
Marne+1%C	59	38	18	36	22
Marne+1%C	58.5	39	15	40	17

Selon la figure 4.1, les indices de plasticités et de retrait varient presque inversement proportionnelle avec l'augmentation du pourcentage de chaux.

L'augmentation du pourcentage de chaux implique une réduction importante des indices de retrait et de plasticité, un pourcentage de 4% de chaux fait réduire les deux indices d'un taux de 50%.

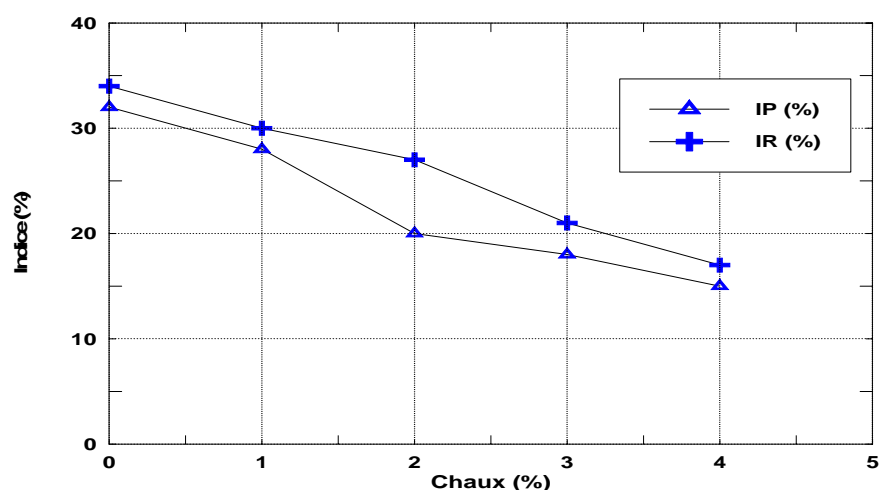


Figure 4.1 : Variation des indices de plasticité et de retrait pour les différents pourcentages de chaux

Les limites de retrait et de plasticité varient presque linéairement avec l'augmentation du pourcentage de chaux (Figure 4.2), contrairement pour les limites de liquidité qui ne donnent aucun signe de changement, elles gardent presque la même valeur du sol non stabilisé.

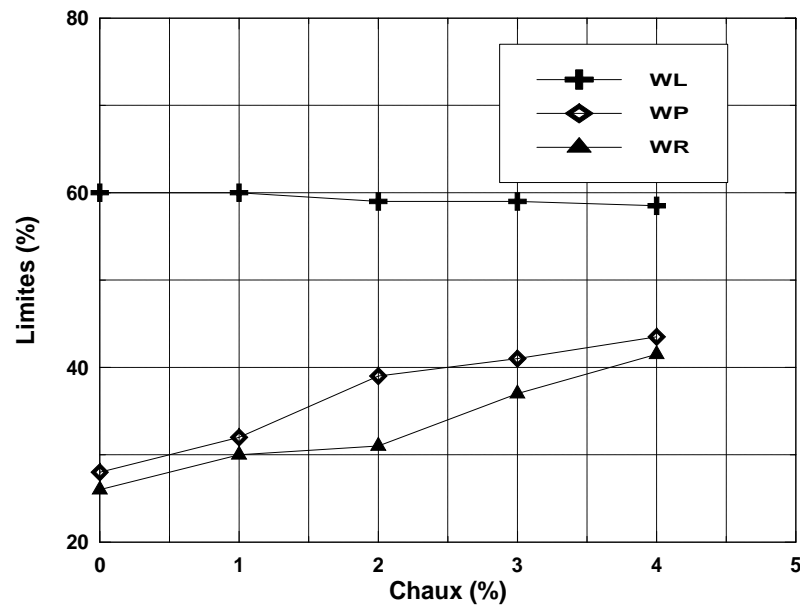


Figure 4.2 : Variation des indices de plasticité et de retrait pour les différents pourcentages de chaux

Les mêmes résultats sont constatés par nombreux chercheurs [2], [9], [64].

D'après les résultats trouvés et suivant les différentes classifications du sol citées dans le chapitre 2, on peut dire que l'addition de la chaux éteinte à notre marne argileuse avec les pourcentages 1, 2, 3 et 4% implique une réduction de plasticité et de retrait, donc une réduction du degré de gonflement, également une diminution de la sensibilité à l'eau. L'addition de la chaux peut faire passer un sol de l'état plastique (déformable, collant - donc difficilement compactable) à l'état sec (rigide, frottant, friable - donc beaucoup plus facile à travailler).

4.4. Effet de la chaux sur la valeur au bleu de méthylène

La valeur au bleu est l'un des paramètres physiques qui caractérise la sensibilité des sols argileux, pour cela on va étudier la variation de ce paramètre en fonction des pourcentages de chaux proposés (C = 1, 2, 3 et 4%).

4.4.1. Résultats et interprétation

Les résultats obtenus (figure 4. 3) mettent en évidence une révolution irréversible, une diminution presque linéaire de VB avec l'augmentation du pourcentage de chaux, de même que les limites d'Atterberg, on atteint un taux de réduction de 50% pour le mélange de 4%.

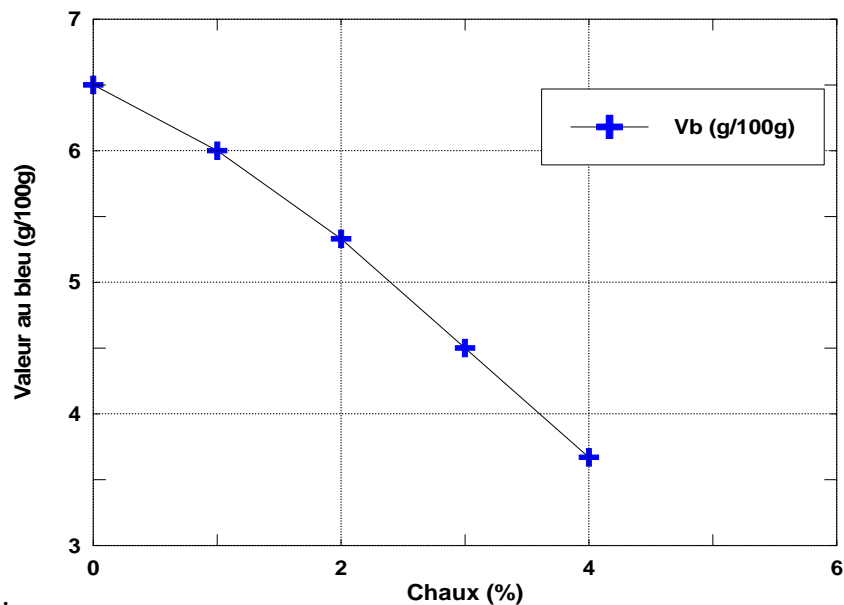


Figure 4. 3 : Variation des valeurs au bleu pour les différents pourcentages de chaux

Selon la classification de susceptibilité élaborée par Chassagneux et al (1996) cité dans le chapitre 3, l'addition de la chaux donne une diminution très importante de la sensibilité de la marne argileuse.

4.5 Etude de la compactibilité des mélanges

La compactibilité d'un matériau est défini par son aptitude au compactage, celui-ci peut être considérée comme un effet statique ou dynamique qui s'exerce sur un sol pour réduire son volume des vides en réarrangement les éléments d'une façon optimale en faisant intervenir le pouvoir lubrificateur de l'eau et de l'argile. Le compactage modifie certaines propriétés du sol, notamment la résistance mécanique, la perméabilité et la susceptibilité au tassement et au gonflement [10].

4.5.1. Compactage des mélanges:

De même principe que l'état naturel, la préparation des mélanges et le compactage ont été effectuée selon le principe de l'essai normal et modifiée.

4.5.2. Résultats et interprétation

La sensibilité à l'eau des mélanges se traduit par des formes de courbes variées, selon la figure 4.4, on remarque que pour l'état naturel, la courbe de compactage soit à (l'OPN ou l'OPM) présente une forme accentuée, ce qui explique la grande sensibilité du sol. Pour les mélanges de C= 1, 2,3 et 4%, les courbes proctor sont déplacées vers la droite elles présentent une forme aplatie qui traduit la faible sensibilité des mélange à l'eau.

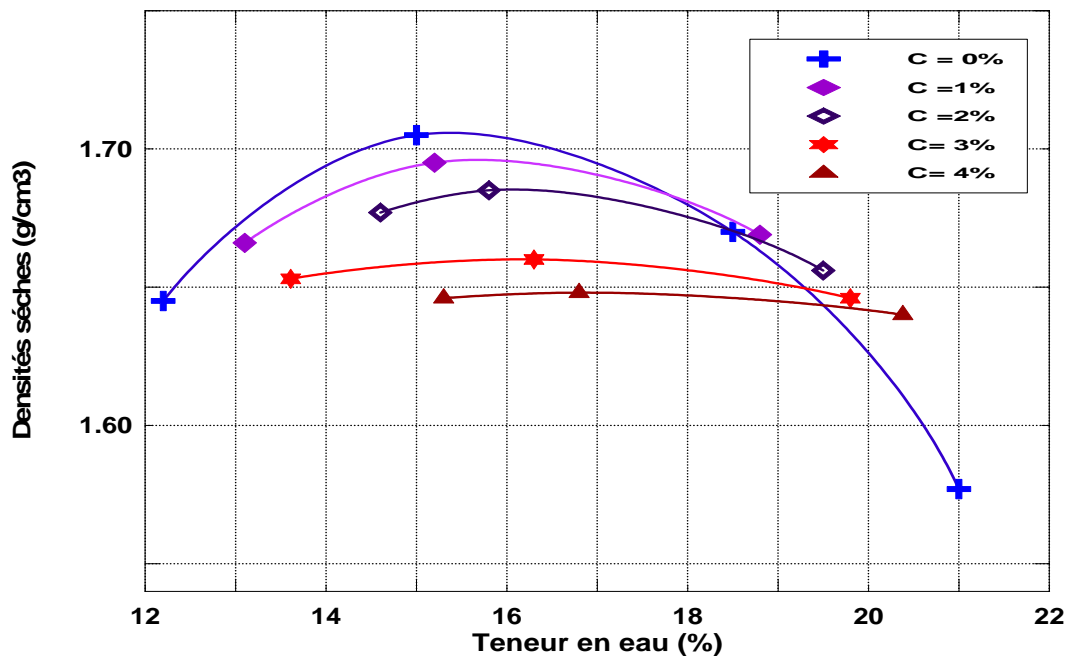


Figure 4. 4: Variation des caractéristiques de compactage à l'OPN pour les différents pourcentages de l'eau

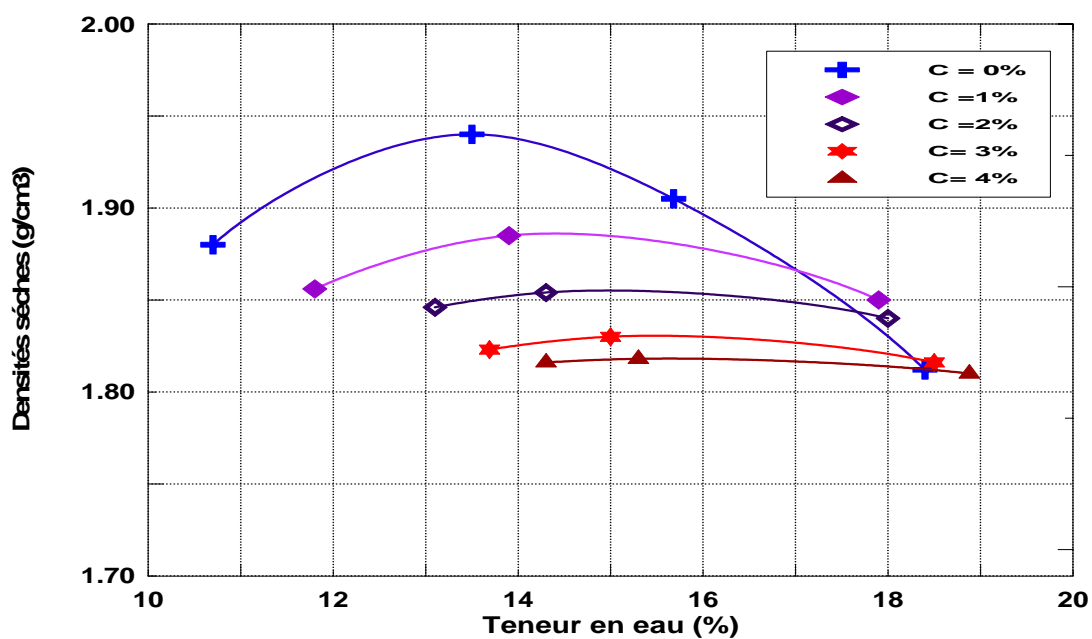


Figure 4.5: Variation des caractéristiques de compactage à l'OPM pour les différents pourcentages de l'eau.

Cette tendance de variation des courbes Proctor de sol traité et non traité a été déjà observée par plusieurs auteurs (chapitre 2), la courbe Proctor d'un sol traité à la chaux éteinte est déplacée vers la droite et vers le bas par rapport à la courbe du sol naturel. Ce déplacement est d'autant plus marqué que le sol réagit bien avec la chaux.

La variation de la masse volumique sèche maximale et la teneur en eau optimale sont représentées par les figures 4.6 et 4.7. On peut constater qu'un accroissement du pourcentage de la chaux de 1 à 4% conduit à une diminution de la masse volumique sèche à l'optimum proctor normal (OPN) ou (OPM) respectivement de 1.75 à 1.685 et de 1.94 à 1.818 (g/cm³).

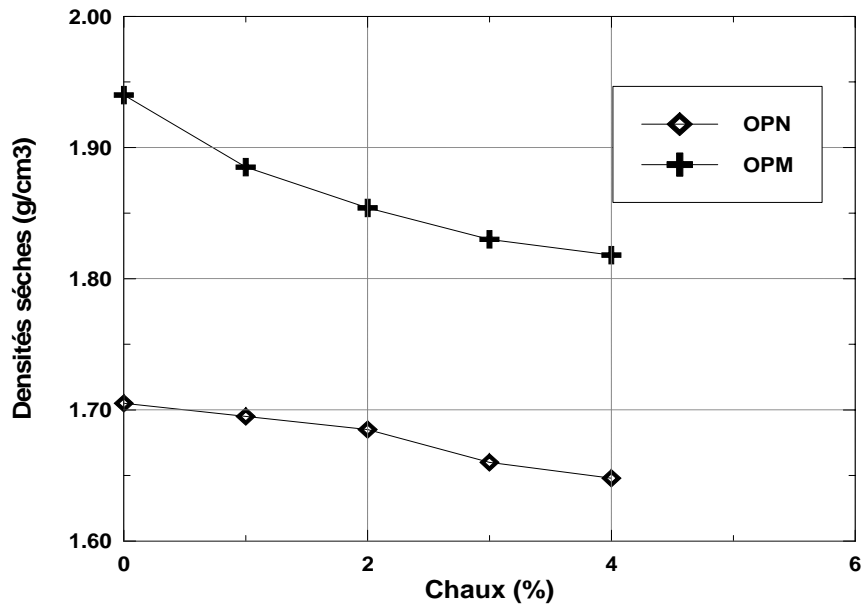


Figure 4.6 : Variation de la densité sèche à l'OPN et l'OPM en fonction du pourcentage en chaux

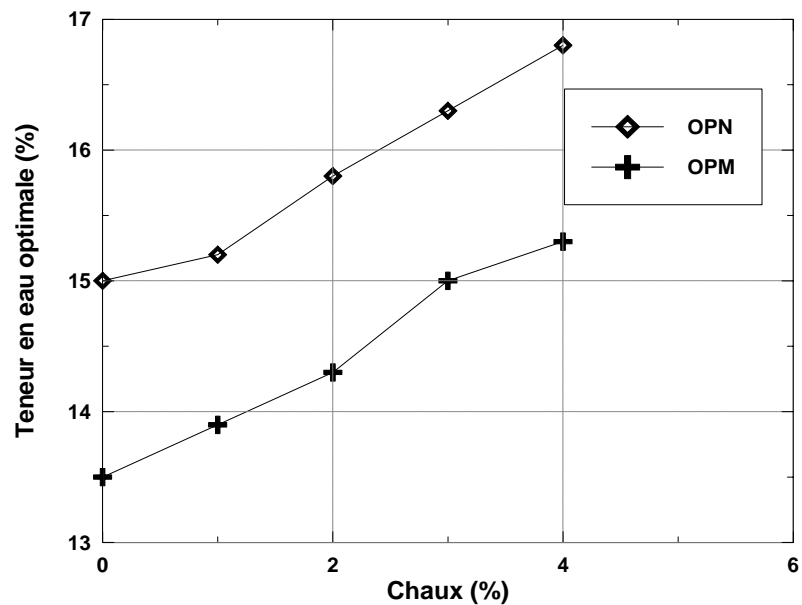


Figure 4.7 : Variation de la teneur en eau à l'OPN et l'OPM en fonction du pourcentage en chaux

Par ailleurs, la teneur en eau à l'OPN et à l'OPM (Figure 4.8) augmente avec le pourcentage en chaux additionnée, elle atteint sa valeur maximale à un OPM de 15.3% pour un pourcentage de chaux de 4%.

Le traitement à la chaux réduit donc la valeur maximale de la masse volumique apparente sèche et augmente la valeur de la teneur en eau optimale.

L'augmentation de la teneur en eau optimale est due à la réaction d'hydratation de la chaux, puis la raison la diminution de la densité sèche maximum est le faible poids volumique de la chaux [44].

4.6 Conclusion

L'addition de la chaux implique une diminution importante de la plasticité et de retrait se qu'il faire passer le sol d'un état plastique à un état solide, friable, facilement travailleuse et perd une partie de sa sensibilité à l'eau.

La chaux attaque aussi les paramètres de la compactibilité, on constate une augmentation de la teneur en eau et une diminution de la densité sèche maximale

Les paramètres physiques des mélanges trouvés n'interviennent pas de façons explicites dans la caractérisation du comportement mécanique de ces matériaux.

Le chapitre suivant est consacré à l'étude du comportement mécanique du sol traité et non traité.

COMPORTEMENT MECANIQUE DES MELANGES

5.1 Introduction

Dans le but d'obtenir une meilleure connaissance du comportement de la marne et des mélanges étudiés, on a réalisé les essais suivants ; la résistance à la compression, la portance, la compressibilité, le potentiel et la pression de gonflement, de gonflement à l'oedomètre et le cisaillement direct à la boîte de Casagrande.

L'effet de l'hétérogénéité et le remaniement du sol qui est dû aux différentes étapes du prélèvement (extraction des déblais, stockage dans un dépôt et cycles d'humidification et séchage), nous impose le problème de la reconstitution des éprouvettes à étudier.

La préparation des mélanges et la reconstitution d'éprouvettes de sol en laboratoire sont nécessaires quand on étudie des matériaux pour l'utilisation en remblais routiers, quand le prélèvement d'éprouvettes du sol naturel est impossible.

5.2 Préparation des mélanges

La préparation des mélanges du sol de référence est une étape très importante pour le bon déroulement d'un programme d'essais au laboratoire.

Le but de notre travail est d'étudier le comportement de la marne provenant des déblais, avec des différents pourcentages de chaux, destiné pour la construction d'un remblai d'axe secondaire de l'autoroute Est-Ouest. Généralement, le compactage du sol s'effectue à l'optimum ou du côté humide de l'optimum, ce qui implique que le sol se trouve dans un état quasi-saturé (degré de saturation supérieur à 90%) après la construction, le corps du

remblai conserve généralement l'état de saturation lors du compactage [3]. La vérification de la stabilité de ce remblai requiert par conséquent la connaissance des paramètres mécaniques (résistance à la compression, portance, compressibilité, résistance) du sol dans un état proche de la saturation.

A cet effet, les éprouvettes sont préparées dans les conditions d'OPM (teneur en eau optimale), nous commençons par l'humidification de la marne naturelle et les mélanges dont le diamètre maximal (D_{max}) ne dépasse pas 5mm, ensuite le malaxage des deux constituants jusqu'à homogénéisation. Les mélanges ainsi préparés sont conservés dans des sacs hermétiques pendant 24 à 48 heures environ avant l'essai. La photo N° 4 représente un exemple de mélanges conservés dans des sacs hermétique



Photo N° 4 : Mélanges conservés dans les sacs hermétiques

5.4 Résistance à la compression des mélanges

La résistance à la compression des sols est l'un des paramètres désignés importants dans la construction des routes.

5.4.1 Reconstitution des éprouvettes

Les mélanges sont préparés à 96% d'OPN et reconstitués sous forme d'éprouvette de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur par un compactage statique en utilisant le système de double pistonnage qui consiste à appliquer par l'intermédiaire de deux pistons et d'une presse CBR, deux efforts similaires sur les deux cotés de l'éprouvette dans un cylindre de 50 mm de diamètre (Figure 5.1). L'intérieur du cylindre est enduit d'une couche de graisse afin de réduire les frottements sol-moule et éviter la rupture de l'éprouvette lors du

démontage. L'extraction de l'éprouvette se fait manuellement en utilisant les deux pistons. On détermine ensuite son poids et ses dimensions exactes.

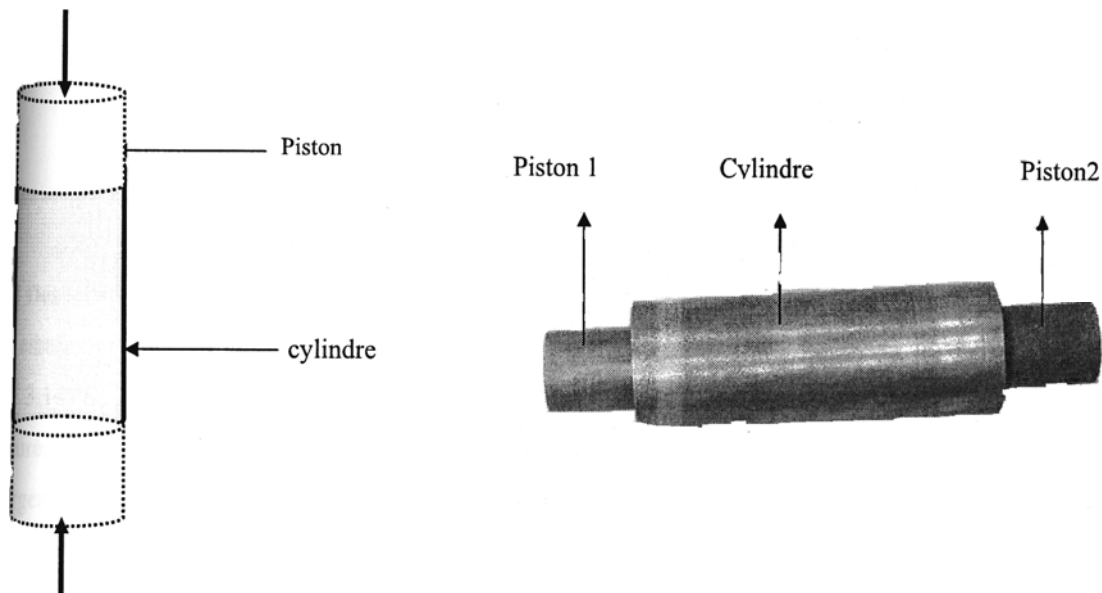


Figure 5.1 : Système de double pistonnage

5.4.2 Mode opératoire

Lors de l'essai de la résistance à la compression simple l'écrasement est: immédiatement après moulage puis ou deuxième âge après 28 jours avec séchage à l'étuve à 20°C et au troisième âge après 90 jours de séchage à l'étuve à une température de 20°C.



Photo N°5 : éprouvettes de compression simple

5.4.3 Résultats et interprétation

La résistance à la compression de la marne à l'état naturel et très faible, elle est de l'ordre de 0.644 MPa.

La figure 5.2, représente le développement de la résistance à la compression en fonction des différentes conditions de cure pour les mélanges traités et non traités. On remarque que pour une durée de cure nulle (l'écrasement immédiat), la résistance à la compression garde sa valeur faible pour les différents mélanges.

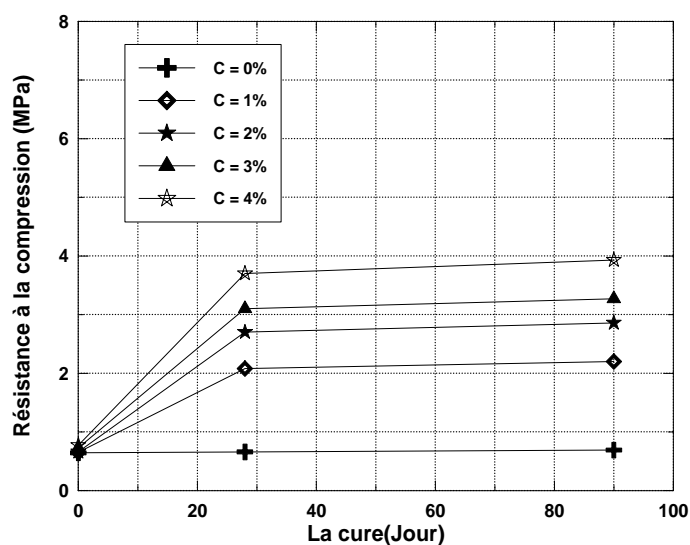


Figure 5.2 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la durée de cure et le pourcentage en chaux additionné

Pour la durée de cure de 28 jours, on constate une évolution importante avec l'augmentation du pourcentage de chaux, les valeurs de la résistance obtenues pour les mélanges C= 1, 2,3et 4 % sont respectivement 2.08, 2.7, 3.1 et 3.7 MPa.

Pour la durée de cure de 90 jours, on remarque une faible augmentation de la résistance qui varie de 3.7 à 3.93 MPa pour un pourcentage de 4%.

La même aptitude de variation est trouvée par plusieurs auteurs cités dans le chapitre 2.

La résistance à la compression augmente avec l'accroissement du pourcentage en chaux dans les mélanges traités, cette augmentation peut être expliquée par l'addition des matériaux fins dans les sols qui implique une augmentation de la cohésion. La raison de la forte augmentation de la résistance à la compression après 28 jours est justifiée par la réaction d'hydratation de la chaux pendant cette période [44].

5.5 Etude de la portance

L'essai CBR est un test de force simple qui compare le comportement capacité d'un matériau (une matière) avec celui d'une pierre écrasée bien graduée, il est nécessaire de le déterminer dans les travaux de terrassement des routes.

5.5.1 Mode opératoire

Les tests de CBR ont été exécutés sur des échantillons non traités et traités à la chaux avec les pourcentages de C= 1, 2, 3 et 4%.

5.5.2 Résultats et interprétation

La figure 5.3 donne les effets de l'additif chaux sur les deux indices de portance IPI et le CBR. On montre qu'il y a une tendance générale d'augmenter des valeurs de CBR et IPI avec l'augmentation de contenu en chaux, un pourcentage de 1% de chaux donne une augmentation de 50% de CBR.

Un accroissement de l'IPI de 15 à 41% et de 14 à 43% pour le CBR a été montré sur les échantillons de sol stabilisés à la chaux avec un pourcentage variant de 2 à 4%.

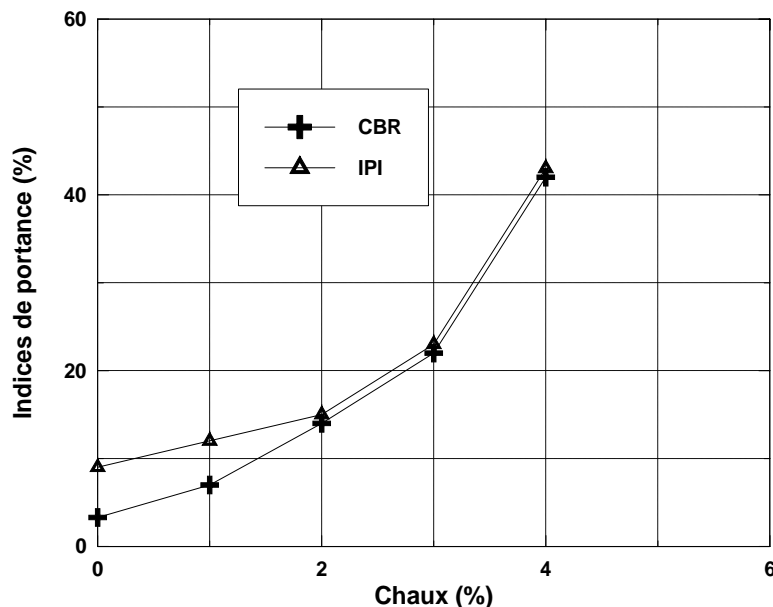


Figure 5.3 : Variation de l'indice de portance IPI et du CBR en fonction des différents pourcentages de chaux

L'amélioration de la portance de la marne traitée (augmentation de CBR et IPI) est justifiée par la diminution du volume des vides dans le sol qui est due à la bonne distribution des particules du sol avec les particules fine de l'additive chaux.

5.6 Etude de la compressibilité

L'essai de compression à l'oedomètre est un essai fondamental c'est une application directe de la théorie de la consolidation. Il permet d'évaluer l'amplitude des tassements des ouvrages ainsi que leurs évolutions.

5.6.1 Reconstitution des éprouvettes

La reconstitution des échantillons est faite dans les conditions d'OPM. Le compactage du matériau a été effectué selon le principe de l'essai Proctor modifié (norme). Le procédé consiste à introduire l'échantillon de sol en deux couches dans la machine de compactage Proctor.

L'éprouvette est alors prélevée sur les échantillons compactés en enfonçant la bague de l'oedomètre en forme de trousse coupante, après arasement, les vides éventuelles en surface doivent être comblés. La durée de la préparation doit être la plus faible possible afin d'éviter les pertes d'eau. Nous nous sommes dans cette partie à l'étude de la détermination des deux paramètres l'indice de compressibilité C_c et l'indice de gonflement C_g .



Photo N°6 : Eprouvettes oedométriques reconstituées

5.6.2 Mode opératoire

Dans l'oedomètre les déformations latérales sont empêchées, la compressibilité étudiée dans cet appareil et de ce fait une certaine approche de la réalité dans laquelle le sol se déforme aussi bien axialement que latéralement.

5.6.2.1 Système de chargement

Le bâti, qui comprend essentiellement un levier pour la transmission des charges, doit être stable et rigide et doit permettre l'application de la force dans l'axe du piston. Les poids sont généralement constitués par des disques plats fendus, la méthode la plus courante consiste à charger l'échantillon par incréments pour l'évolution des tassements, TERZAGHI l'inventeur, a proposé de doubler systématiquement les charges appliquées [24]. Les échantillons sont saturés dans les cellules oedométriques par l'eau. Les contraintes de compressibilité utilisées : 0.015 0.25, 0,5, 1.00, 2,00 4.00, 8.00 bars. Après avoir passé l'échantillon à la compressibilité (chargement), on commence le déchargement par paliers qu'on appelle étapes de gonflement.

5.6.2.2 Détermination de l'indice de compressibilité (C_c) et de l'indice de gonflement (C_g)

a. Indice de compressibilité C_c

Cet indice C_c est déterminé par l'utilisation de la partie de chargement dans l'essai de compressibilité, il est donné par la formule suivante :

$$C_c = \Delta e / \Delta \log \sigma$$

e et σ sont respectivement indice de vide du matériau et la contrainte axiale oedométrique.

L'indice de compressibilité C_c sert à la classification et l'identification des sols [18]. Le tableau 5 .1 représente cette classification.

Tableau 5 .1 : classification des sols en fonction de l'indice de compressibilité.

Indice de compression C_c	Type de sol
< 0.02	Sol incompressible
$0.02 < C_c < 0.05$	Sol très peu compressible
$0.05 < C_c < 0.1$	Sol peu compressible

b- Indice de gonflement C_g

Pour la détermination de l'indice de gonflement C_g , en utilisant la deuxième étape de l'essai de compressibilité qui est le déchargement, l'indice de gonflement est égal à la pente de cette droite de déchargement qui est définie par:

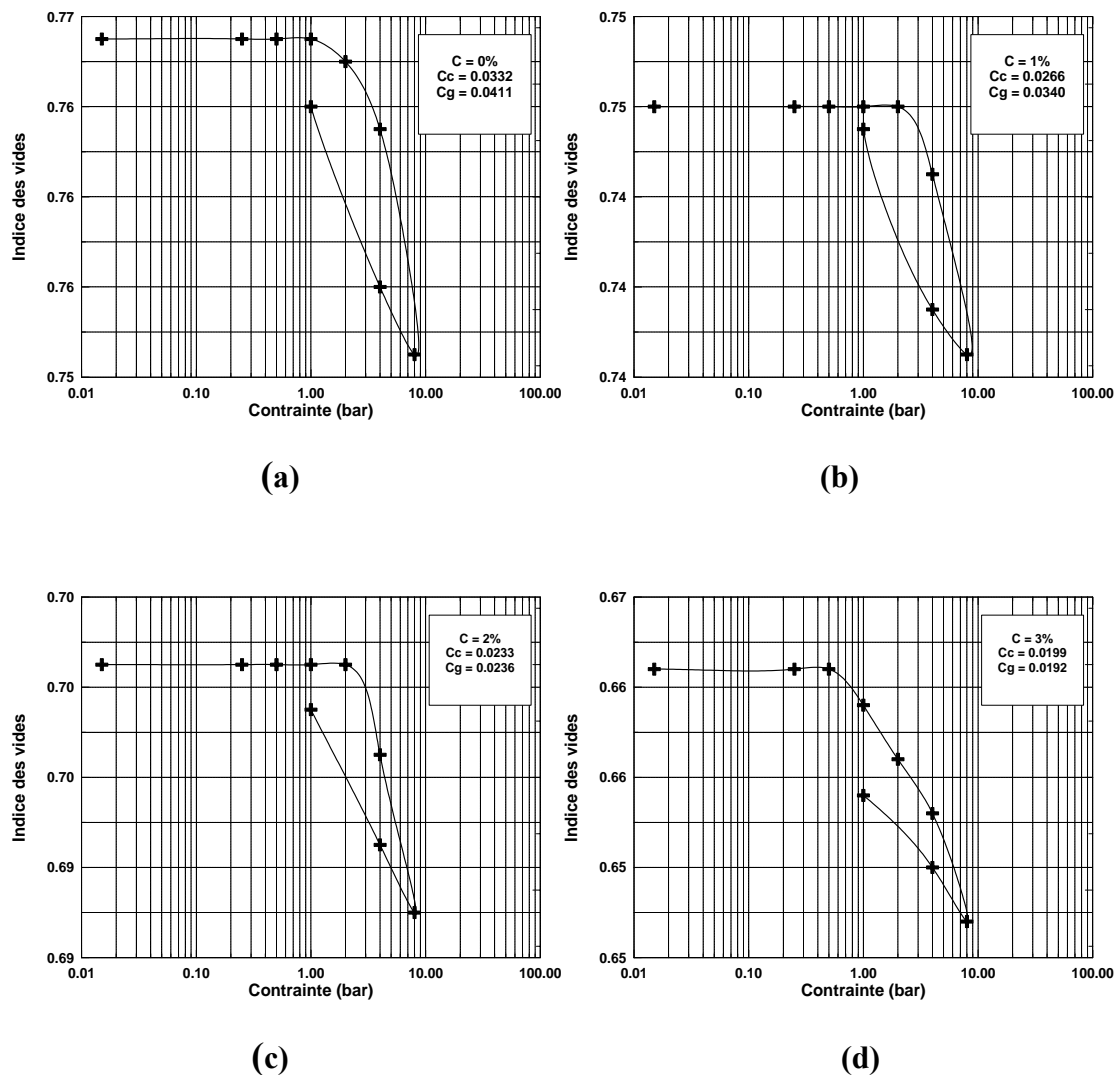
$$\Delta e / \Delta \log \sigma$$

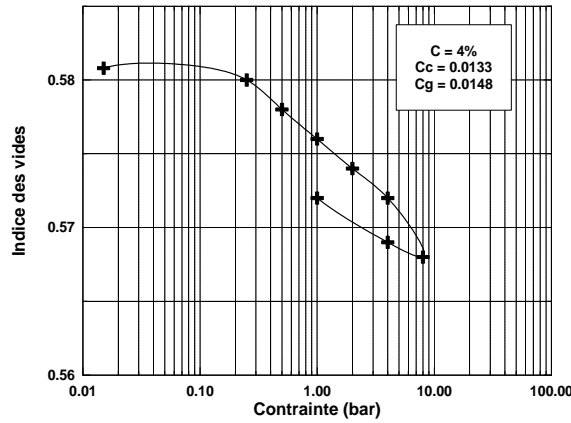
De même que l'indice de compressibilité, l'indice de gonflement C_g est un paramètre de classification des sols, le gonflement des matériaux est à considérer lorsque $C_g \geq 4\%$ [8].

5.6.3 Présentation des résultats et interprétations

Les essais de compressibilité à l'oedomètre (NFP94-090) ont été réalisés sur la marne à son état naturel puis à des mélanges ayant quatre proportions de la chaux ($C = 1, 2, 3$ et 4%).

Les courbes de compressibilité sont représentées sur la figure 5.4.





(e)

Figure 5.4 : Compressibilité oedométrique des mélanges (C= 0,1, 2, 3 et 4%).

(a)- (b)- (e)-
(c)- (d)-

L'indice de compression C_C est le paramètre qui précise la sensibilité du sol au tassement.

A l'état naturel de la marne étudiée, la valeur de C_c a été trouvée de l'ordre de 0.0332, selon la classification (Tableau 5.1), cette marne est classée comme étant très peu compressible.

La figure 5.5 montre qu'il y a une diminution de l'indice de compression au fur et à mesure que le pourcentage de chaux augmente, pour une variation de 0 à 2% de la chaux, le sol garde son état très peu compressible et passe à un état incompressible pour la plage de 2 à 4%.

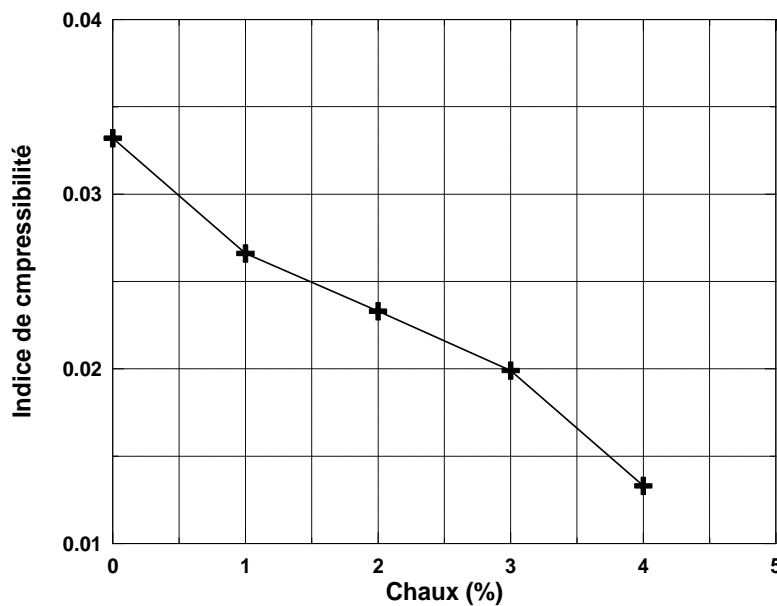


Figure 5.5 : Variation de l'indice de compressibilité en fonction du pourcentage en chaux additionnée

L'indice de gonflement C_g est le paramètre qui précise la sensibilité du sol au gonflement. L'indice de gonflement de la marne naturelle a une valeur de 4.11%, ce qui donne une marne argileuse gonflante.

La figure 5.6 montre que la marne argileuse est influencée par le pourcentage de la chaux additionné : une augmentation de 1 à 4% de chaux provoque une diminution importante de l'indice de gonflement de 3.4 à 1.48%

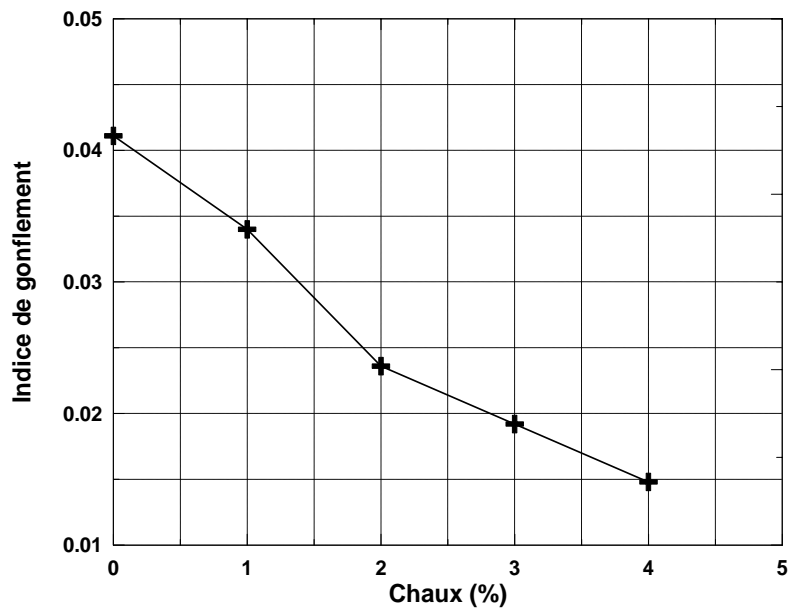


Figure 5.6 : Variation de l'indice de gonflement en fonction du pourcentage en chaux additionnée

On constate que le sol perd sa sensibilité au gonflement à partir de 1% de chaux, donc on peut dire que la chaux a une grande utilité pour la réduction du phénomène de gonflement, on peut confirmer cela, à partir de l'étude des deux autres paramètres qui caractérisent le gonflement et qui sont: le potentiel de gonflement et la pression de gonflement.

5.7 Etude du potentiel de gonflement

On définit le potentiel de gonflement, qu'on appelle aussi gonflement libre, comme le gonflement relatif d'un échantillon de sol inondé et autorisé à gonfler librement sous une charge très faible [22], de nombreux auteurs avancent que le potentiel de gonflement d'un sol est égal au volume d'eau réellement absorbé par le sol pendant le gonflement, ce gonflement des sols est considéré pour des valeurs de potentiel de gonflement supérieur au égale à 4%. [34].

5.7.1 Mode opératoire

On utilise pour cet essai l'oedomètre ; les échantillons sont reconstitués de même principe que les essais de compressibilité.

Les échantillons traités et non traités sont placés dans des éprouvettes (oedomètre)., au début, on assiste à une saturation très rapide, en second lieu les échantillons commencent à prendre leur gonflement réel sous une faible contrainte normale (1.5 kPa) relative au poids du piston, on arrête l'essai au moment de la stabilisation des déformation.

Comme la section reste constante pendant l'essai, on a :

$$G\% = \frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta v}{v}$$

G% : potentiel de gonflement

h : hauteur initiale de l'échantillon.

Δh : variation de la hauteur de l'échantillon.

v : volume de l'échantillon.

Δv : variation de volume de l'échantillon.

5.7.2 Présentation et interprétation des résultats

La figure 5.7 représente les évolutions des potentiels de gonflement G% en fonction du temps pour le sol naturel et les différents mélanges (C = 1, 2, 3 et 4%).

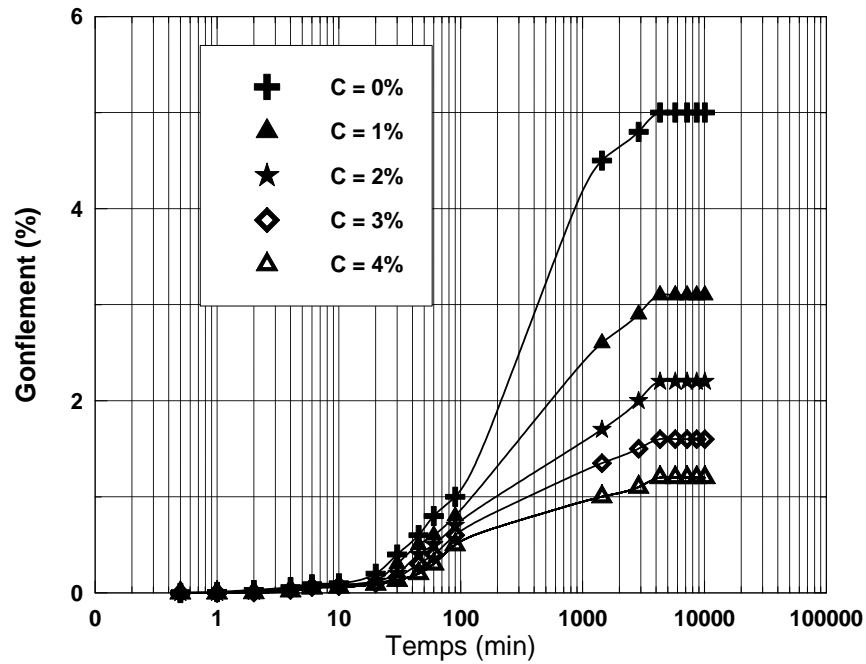


Figure 5.7 : Courbe de gonflement pour les mélanges (C= 0,1, 2, 3 et 4)

A l'état naturel, la marne a un potentiel de gonflement de l'ordre de 5%, ce qui implique un potentiel de gonflement élevé, c'est une marne argileuse gonflante.

La figure 5.8 représente la variation du potentiel de gonflement en fonction du pourcentage de chaux additionné.

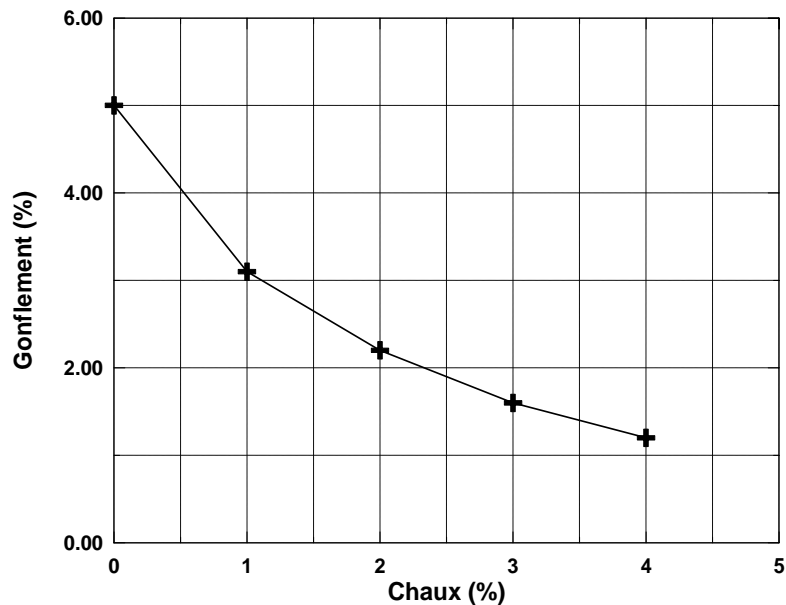


Figure 5.8 : Variation du potentiel de gonflement en fonction du pourcentage en chaux additionnée

Selon la figure 5.8, on observe que le potentiel de gonflement varie inversement proportionnel avec l'augmentation du pourcentage de chaux, cette augmentation provoque une diminution remarquable des valeurs du potentiel de gonflement, un mélange traité à 1% fait passer la marne d'un état gonflant à un état non gonflant avec un potentiel de 3.1%, pour les autres mélanges C=2, 3 et 4%, les valeurs du potentiel sont respectivement 2.2, 1.6 et 1.2%. Les mêmes résultats sont trouvés par des expériences faites par Golbet et Klein cité par [5], qui ont montré que de faibles pourcentages de chaux (2 à 6%) entraînaient une réduction importante du gonflement.

5.8 Etude de la pression de gonflement

La pression de gonflement caractérise l'énergie de succion dans l'échantillon prélevé. Cette pression peut être définie comme celle qu'il faut exercer sur l'échantillon mis en présence d'eau pour conserver son volume initial [51].

La pression de gonflement est obtenue par interpolation sur la courbe représentant le taux de gonflement en fonction de la pression de surcharge.

La pression de gonflement correspond à la pression pour laquelle le taux de gonflement (le potentiel de gonflement) est nul [57].

5.8.1 Mode opératoire

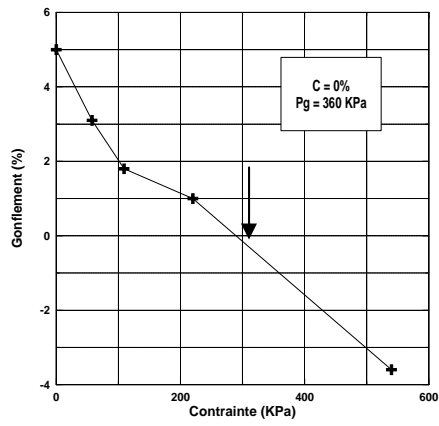
La pression de gonflement est évaluée en utilisant le plus souvent l'oedomètre. Les procédures d'essai les plus employées sont la méthode du pré gonflement, la méthode des différentes pressions, et la méthode du volume constant. [8].

Les essais utilisés pour cette étude sont des essais de prégonflement, la procédure de mesure de la pression de gonflement consiste alors à submerger l'échantillon de matériau placé dans la cellule œdométriques. On laisse l'éprouvette gonfler sous l'action du poids du piston (1.5 KPa), et enfin le soumet à une consolidation classique jusqu'à ce qu'il retrouve son volume initial. La pression pour laquelle le volume de l'échantillon est équivalent à son volume initial représente la pression de gonflement (P_g).

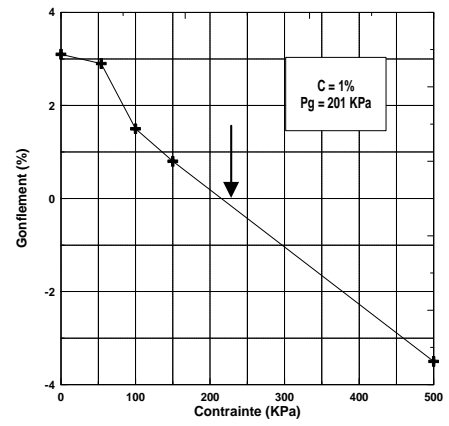
5.8.2 Interprétation et présentation des résultats

Les pressions de gonflement sont présentées en fonction du pourcentage en chaux dans la figure.5.9

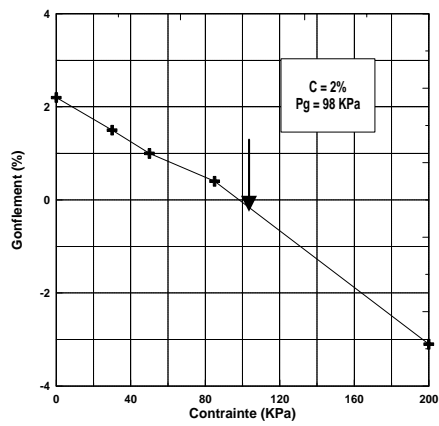
La marne a une pression de gonflement de 360 kPa, elle est encore classée comme étant gonflante puisque la pression de gonflement est supérieure à 100 KPa.



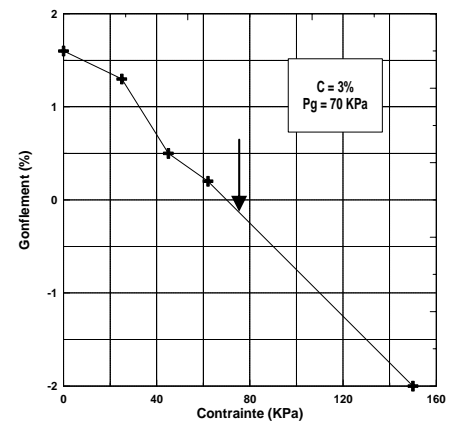
(a)



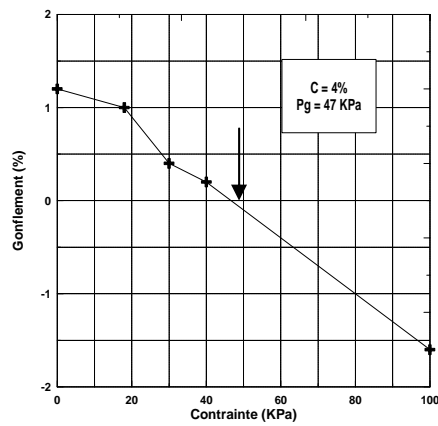
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 5.9 : Pression de gonflement pour les mélanges (C= 0,1, 2, 3 et 4)

(a)- (b)- (c)-

(d)- (e)-

Selon la figure 5.10, l'augmentation des pourcentages de chaux exerce un effet remarquable sur la pression de gonflement des mélanges, une variation de 2 à 4% de chaux donne une diminution importante de la pression allant de 98 à 47 KPa, donc le sol devient non gonflant

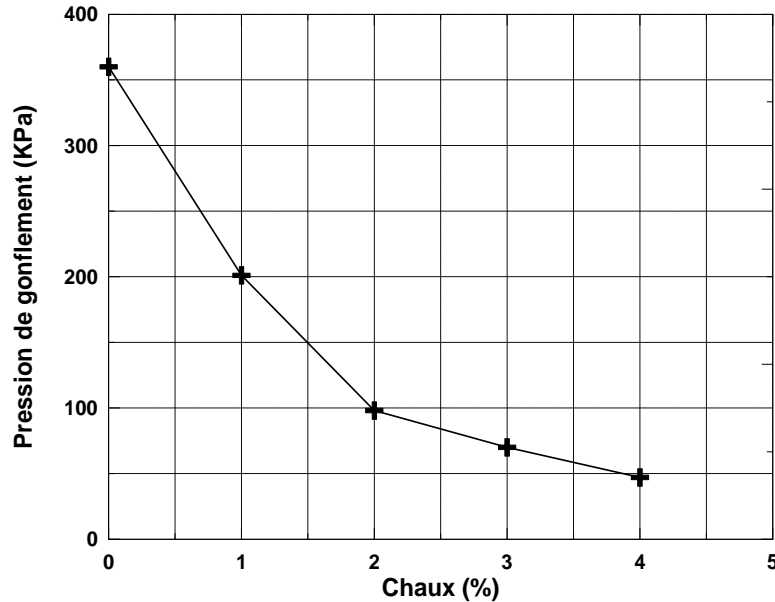


Figure 5.10 : Variation de la pression de gonflement en fonction du pourcentage en chaux additionnée

5.9 Paramètres du cisaillement direct

Dans tous les problèmes de stabilité des sols (étude de fondations, ouvrages de soutènement, remblais, talus, barrages, chaussées, ponts, etc...), on a besoin de connaître la résistance au cisaillement du sol. Cette résistance est souvent difficile à déterminer, surtout lorsqu'il s'agit d'un sol cohérent.

Le but de cet essai est la détermination de la résistance au cisaillement, la cohésion et l'angle de frottement interne.

5.9.1 Reconstitution des éprouvettes

Les éprouvettes obtenues par la préparation dans les conditions de l'optimum sont taillées de telle sorte que les dimensions de la section droite de l'éprouvette soient ajustées au mieux à celles de la boîte, la photo N° suivante représente un exemple d'une éprouvette préparée



Photo N°7 : Epreuve de cisaillement reconstitué

5.9.2 Mode opératoire

Le cisaillement est réalisé à différentes durées de cure soit immédiatement soit après 7, 14 et 28 jours avec séchage à l'étuve à 20°C, ensuite le cisaillement se fait sous l'application des pressions normales de 0.5, 1, 2 et 3 bars pour chaque éprouvette avec une vitesse de cisaillement de l'ordre de 0.08 mm/min. La mesure de la teneur en eau a été faite avant et après chaque essai.

a. Résistance au cisaillement

Lorsqu'un système de forces est appliqué à un volume déterminé d'un sol, il se développe en général des contraintes de cisaillement. Ces contraintes de cisaillement entraînent des déformations de sol, qui peuvent être importantes le long de certaines surfaces que l'on appelle surface de glissement ou surface de rupture.

La résistance au cisaillement d'un sol est définie comme étant la contrainte de cisaillement dans le plan de rupture, au moment de la rupture. Cependant, cette notion de résistance au cisaillement n'est pas toujours facile à définir, que ce soit dans un essai de laboratoire ou dans le sol sur lequel est construit l'ouvrage.

En effet, si on porte l'évolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction de la déformation ϵ dans le plan de cette contrainte de cisaillement, on obtient le graphique indiqué sur la figure 5.11.

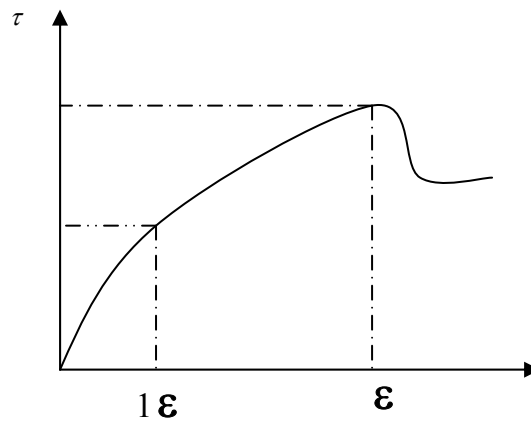


Figure 5.11 : Courbe Contrainte -déformation

La résistance au cisaillement peut être définie, sur ce graphique, comme étant : le maximum de la contrainte de cisaillement τ_{\max}

b. Paramètres de cisaillement C et Φ

Les paramètres de cisaillement (C et Φ) sont à déterminer, en contraintes totales, par la courbe intrinsèque qui représente les points correspondants à la rupture dans le diagramme de Mohr-Coulomb (σ_n, τ).

Les valeurs de la résistance au cisaillement ainsi définies sont portées sur un graphique en fonction de la contrainte normale σ , s'appliquant sur le plan de rupture.

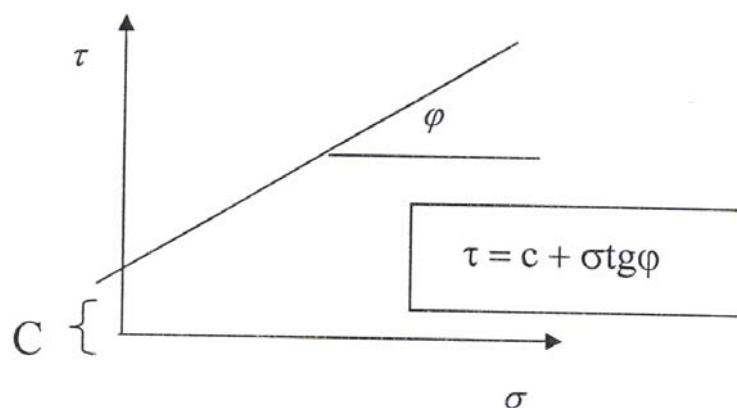


Figure 5.12 : Droite intrinsèque

5.9.2 Présentation des résultats et interprétation

5.9.2.1 Relation contrainte - déformation

Pour le cisaillement qui se fait immédiatement sur les échantillons stabilisés et non stabilisé (figure 5.13), le pic qui représente la résistance au cisaillement reste presque le même pour toutes les contraintes normales appliquées (0.5, 1 , 2 et 3 bars).

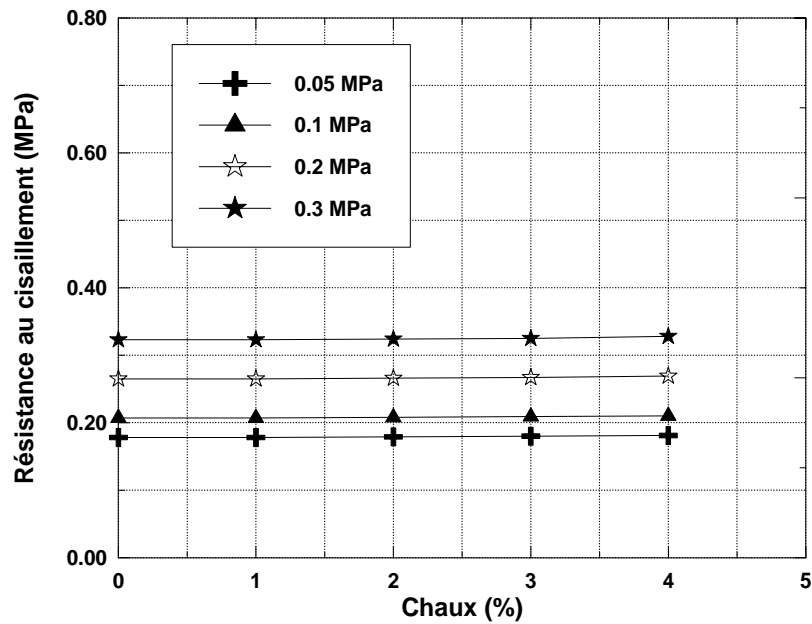
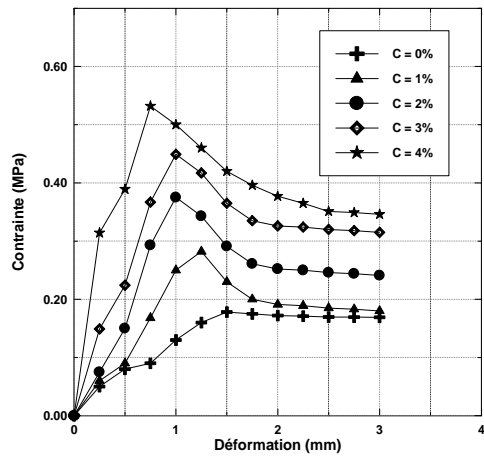
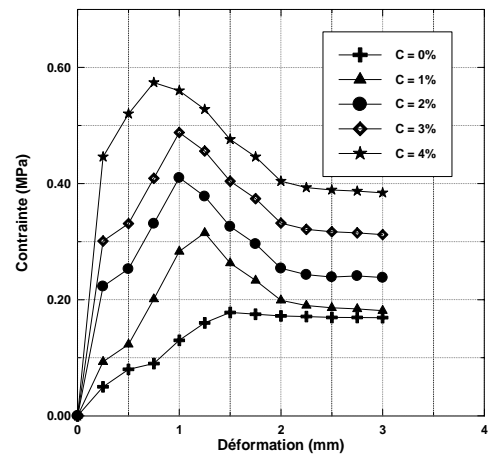


Figure 5.13 : Variation de la résistance au cisaillement des mélanges traités pour un cisaillement immédiat

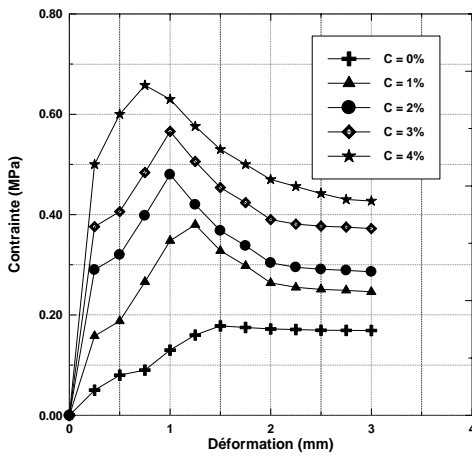
L'accroissement des valeurs des pics est bien marqué après une durée de cure de 7 jours dans les mélanges traités, puis une légère augmentation après 14 et 28 jours. Cette tendance de variation est bien mentionnée dans les figures 5.14 , 5.15 et 5.16 suivantes :



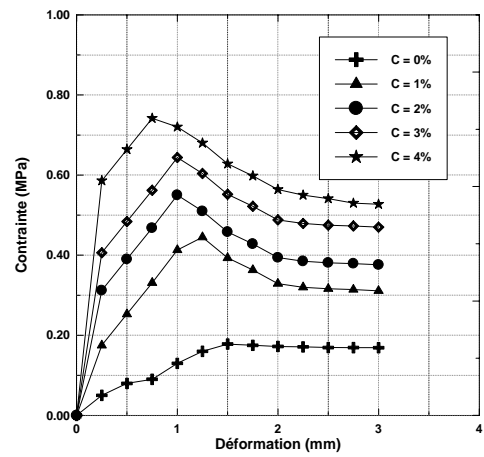
(a) $\sigma_1 = 0.5$ bars



(b) $\sigma_2 = 1$ bars

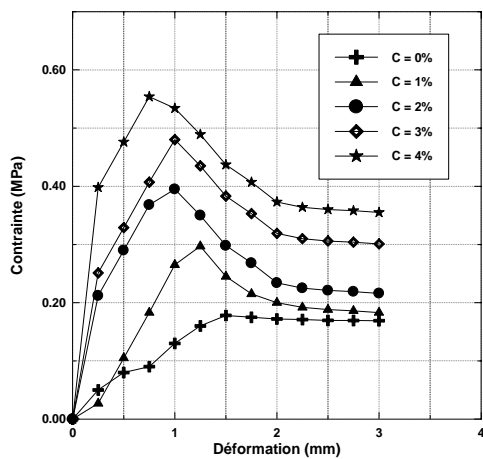


(c) $\sigma_3 = 2$ bars

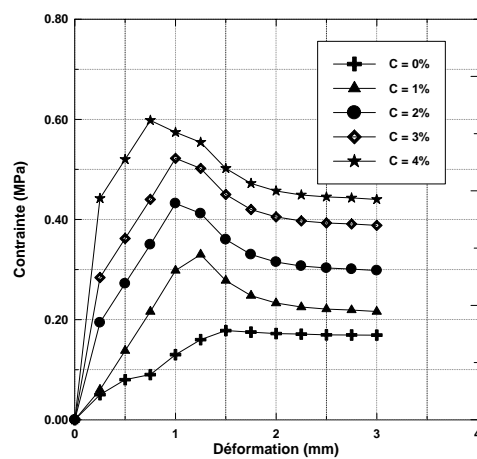


(d) $\sigma_1 = 3$ bars

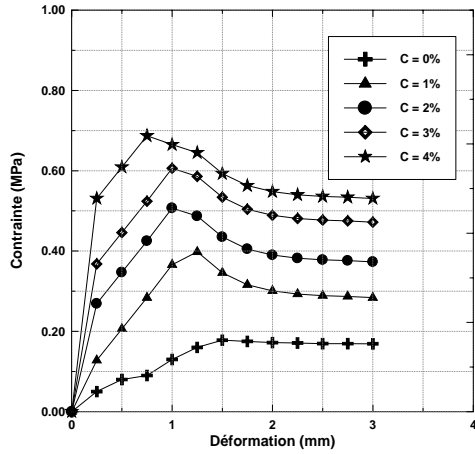
Figure 5.14 : Contrainte -déformation pour une durée de cure de 7 jours



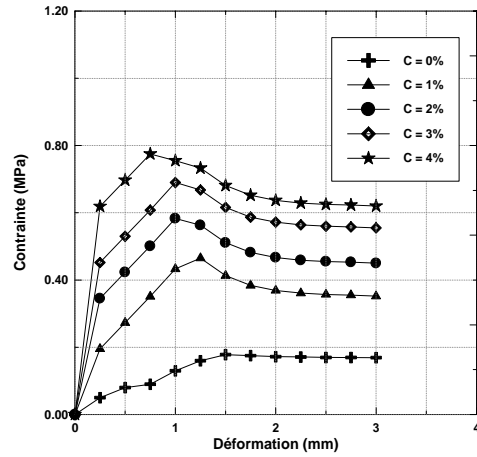
(a) $\sigma_1 = 0.5$ bars



(b) $\sigma_2 = 1$ bars

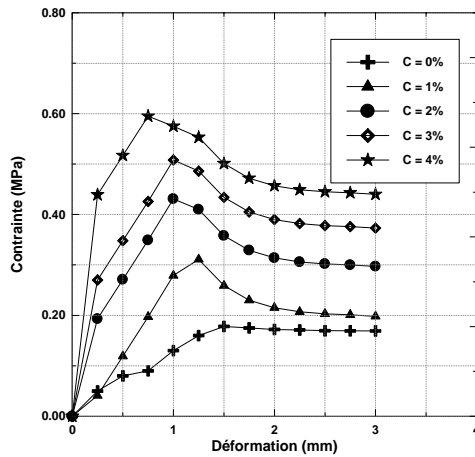


(c) σ_3 2 bars

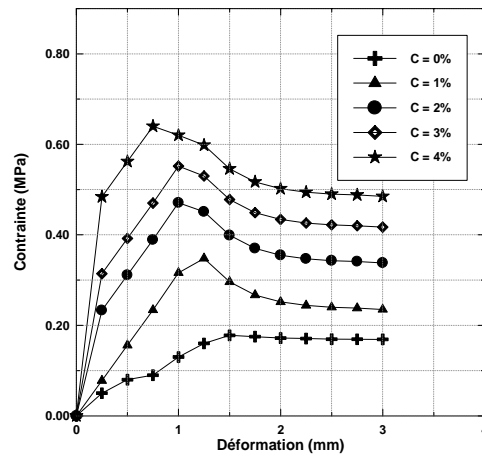


(d) σ_4 3 bar

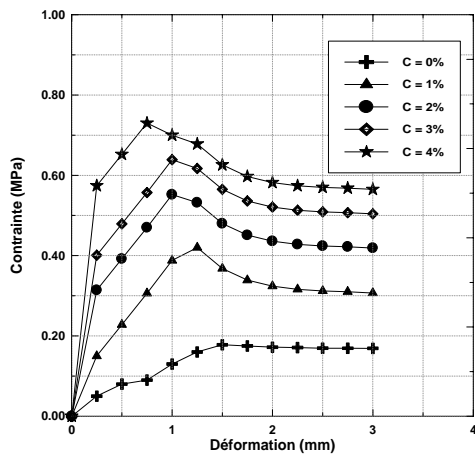
Figure 5.15 : Contraite - déformation pour une durée de cure de 14 jours



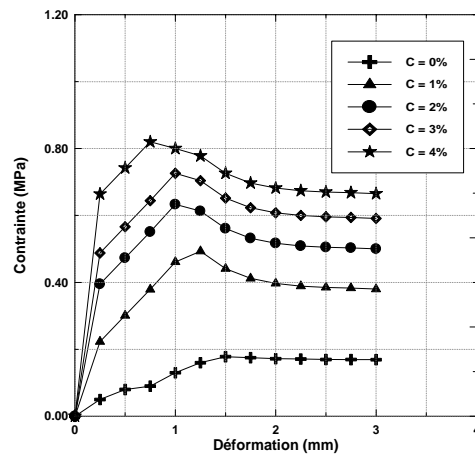
(a) σ_1 0.5 bars



(b) σ_2 1 bars



(c) σ_3 2 bars



(d) σ_4 3 bars

Figure 5.16 : Contraite - déformation pour une durée de cure de 28 jours

La figure 5.14 , montre l'évolution de la résistance au cisaillement des mélanges à (1 , 2, 3 et 4%) pendant 7 jours ,on observe que le pic de résistance augmente au fur et à mesure l'augmentation du pourcentage en chaux , par exemple à une contrainte normale maximale de 0.3 MPa , la valeur maximale de résistance est obtenue à 4% de chaux, elle est de l'ordre de 0.742 MPa donc 2 fois celle du sol à l'état naturel, la valeur minimale de la résistance est de 0.445 MPa , à été trouvée pour un pourcentage de 1%.

Les figures 5.15 et 5.16, représentent l'évolution de la résistance au cisaillement des mélanges traités pendant une durée de cure de 14 à 28 jours, on peut constater une faible augmentation après la durée de cure de 7 jours, elle atteint sa valeur maximale de 0.82 MPa à 28 jours pour une contrainte normale de 0.3 MPa.

L'augmentation des résistances au cisaillement des mélanges traités après 7 jours est due aux réactions chimiques de la solidification pendant cette durée.

5.9.2.2 Paramètres de résistance au cisaillement

Les variations de la cohésion et des angles de frottement avec le pourcentage en chaux évaluées immédiatement à 7, 14 et 28 jours sont illustrées dans les Figures 5.17 et 5.18 :

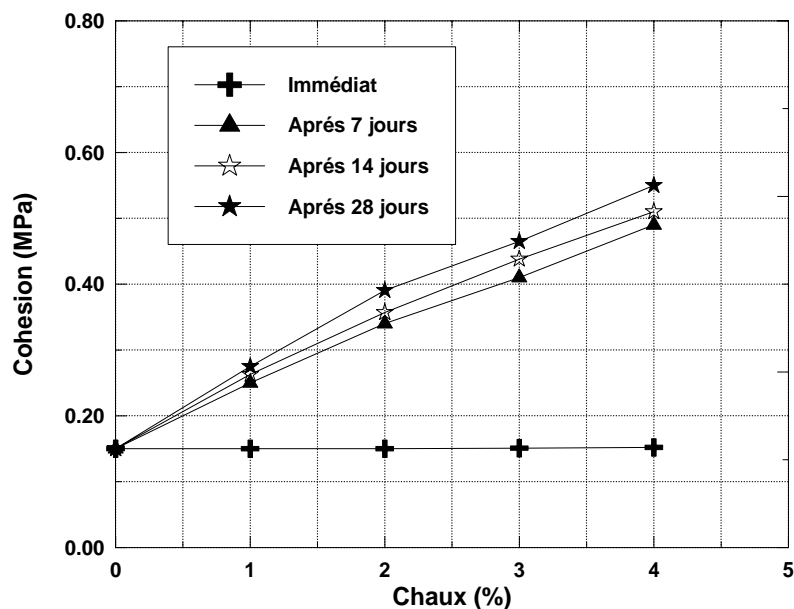


Figure 5.17 : Variation de la cohésion en fonction du pourcentage en chaux additionné
Pour les différentes durées de cure

Il est indiqué dans la figure 5.17 qu'une forte amélioration de la cohésion des mélanges à durée de cure de 7 jours et une légère augmentation à 14 et 28 jours.

On remarque que la cohésion, pour 2 % de chaux et à 7 jours représente 2 fois celle de la marne non traitée avec une valeur de 0.34 MPa. La cohésion atteint sa valeur maximale de 0.49 MPa à un pourcentage de chaux de 4% donc 3.5 fois celui de l'état naturel.

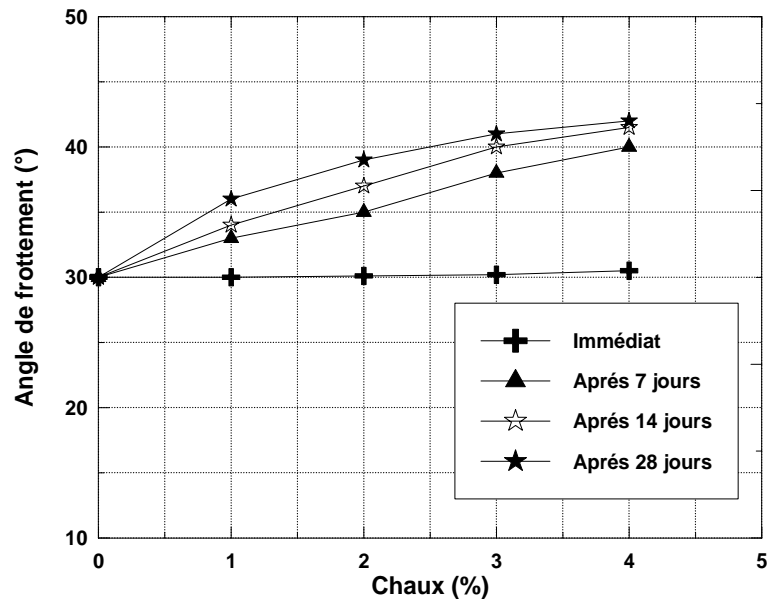


Figure 5.18 : Variation de l'angle de frottement en fonction du pourcentage en chaux additionné pour les différentes durées de cure

La variation de l'angle de frottement interne avec le pourcentage en chaux, illustré dans la figure 5.18, est semblable à celle de la cohésion. La valeur maximale de l'angle de frottement interne est de 42.0 ° observée à 28 jours avec un pourcentage de chaux de 4%. Il augmente jusqu' à 1.4 fois de celui de la marne non traitée. Une valeur minimale de 36° est enregistrée dans le cas de 1 % de chaux.

L'augmentation de la cohésion par l'accroissement de la quantité en chaux peut être expliquée par le fait qu'au fur et à mesure qu'on augmente le pourcentage en chaux, la distance entre les particules de la marne argileuse devient moins importante, ceci est dû aux attractions électrostatiques, électromagnétiques et les différentes réactions chimiques sol-chaux.

L'angle de frottement interne augmente avec l'accroissement du pourcentage en chaux traduit par la diminution des particules argileuses et la présence de particules non argileuses génératrices de frottement.

5.10 Conclusion

A la lumière des résultats trouvés dans ce chapitre on peut tirer les conclusions suivantes :

- La résistance à la compression augmente avec l'addition de la chaux dans les mélanges traités cette augmentation est plus remarquable pour une durée de cure de 14 jours,
- L'addition de la chaux a permis d'augmenter les valeurs des paramètres de portance CBR et IPI.
- La chaux a fait passer le sol d'un état très peu compressible à un état incompressible par une réduction du paramètre de compressibilité C_C
- L'introduction de la chaux dans la marne argileuse étudiée a permis de réduire le phénomène de gonflement par la réduction des valeurs des paramètres qui interviennent dans le gonflement: l'indice de gonflement C_g , le potentiel de gonflement $G\%$ et la pression de gonflement P_g .
- Un accroissement de la résistance au cisaillement est bien observé pour tous les mélanges traités, après une durée de cure de 7 jours.
- Les quantités en chaux influent d'une manière significative sur le développement des paramètres de cisaillement (cohésion et angle de frottement interne) après une durée de cure de 7 jours.

L'amélioration du comportement mécanique de la marne traitée confirmée par le développement des paramètres mécaniques, peuvent s'expliquer par l'existence des réactions chimiques entre les minéraux argileux présents dans le sol et les ions de chaux qui sont libérés par l'hydratation de la chaux éteinte.

Le chapitre suivant est consacré à l'étude des différentes réactions chimiques entre chaux et marne argileuse.

COMPORTEMENT CHIMIQUE DES MELANGES

6.1 Introduction

Les réactions du mélange sol - chaux peuvent être classifiées en réactions à court terme et à long terme. Des réactions à court terme incluent la floculation, la migration de la chaux hydratée, tandis que le long terme est défini par des réactions pozzolanique. [47].

La présence de sulfates dans le sol stabilisé peut affecter l'échange des cations et les réactions pozzolaniques des systèmes de sol à traiter au ciment et à la chaux. [60].

Ce chapitre est consacré à bien détailler les différents réactions chimiques sol - chaux.

6.2 Réaction à court terme

6.2.1 Echange cationique

L'addition de la chaux engendre un excès de cations de calcium divalents qui tendent à remplacer les cations monovalents (Na et K). Les ions de calcium non échangés seront adsorbés, ce qui conduit à augmenter la densité en ions, c'est à dire une baisse dans la capacité d'échange des particules. Tout ceci se traduit par une réduction du gonflement [37].

6.2.2 Floculation et agglomération des particules d'argiles

L'ajout de la chaux à des grains fins d'argiles cause une floculation et une agglomération des particules. Ce phénomène a comme résultat un changement apparent dans la texture, les petits grains se regroupent pour former d'autres grains de grande taille. Donc, la floculation d'argile augmente la grosseur effective des grains et joue un rôle important dans la stabilisation. [37].

6.2.3 Carbonations de la chaux

La chaux réagit avec le dioxyde de carbone de l'air (CO_2) pour former de faibles agents de cimentation comme les carbonates de calcium par exemple (CaCO_3 , MgCO_3) selon le type de chaux utilisée. Généralement, on essaie de réduire ce phénomène par compactage du sol traité après une petite durée de malaxage. Des études ont montré que cette réaction est probablement plus nuisible qu'utile dans la stabilisation du sol. [37].

6.2 Réaction à long terme

6.2.1 Réaction pozzolanique

Les principaux minéraux argileux qui composent la matrice marneuse sont la silice et Alumine. La réaction pozzolanique se produit entre ces deux principaux minéraux et la chaux pour former deux types d'agents de cimentation ou de solidification. [49].

Saitoh et al (1985), ont montré les divers mécanismes de réaction impliqués dans le durcissement du sol amélioré à la chaux ou au ciment (Figure 6.1) [53].

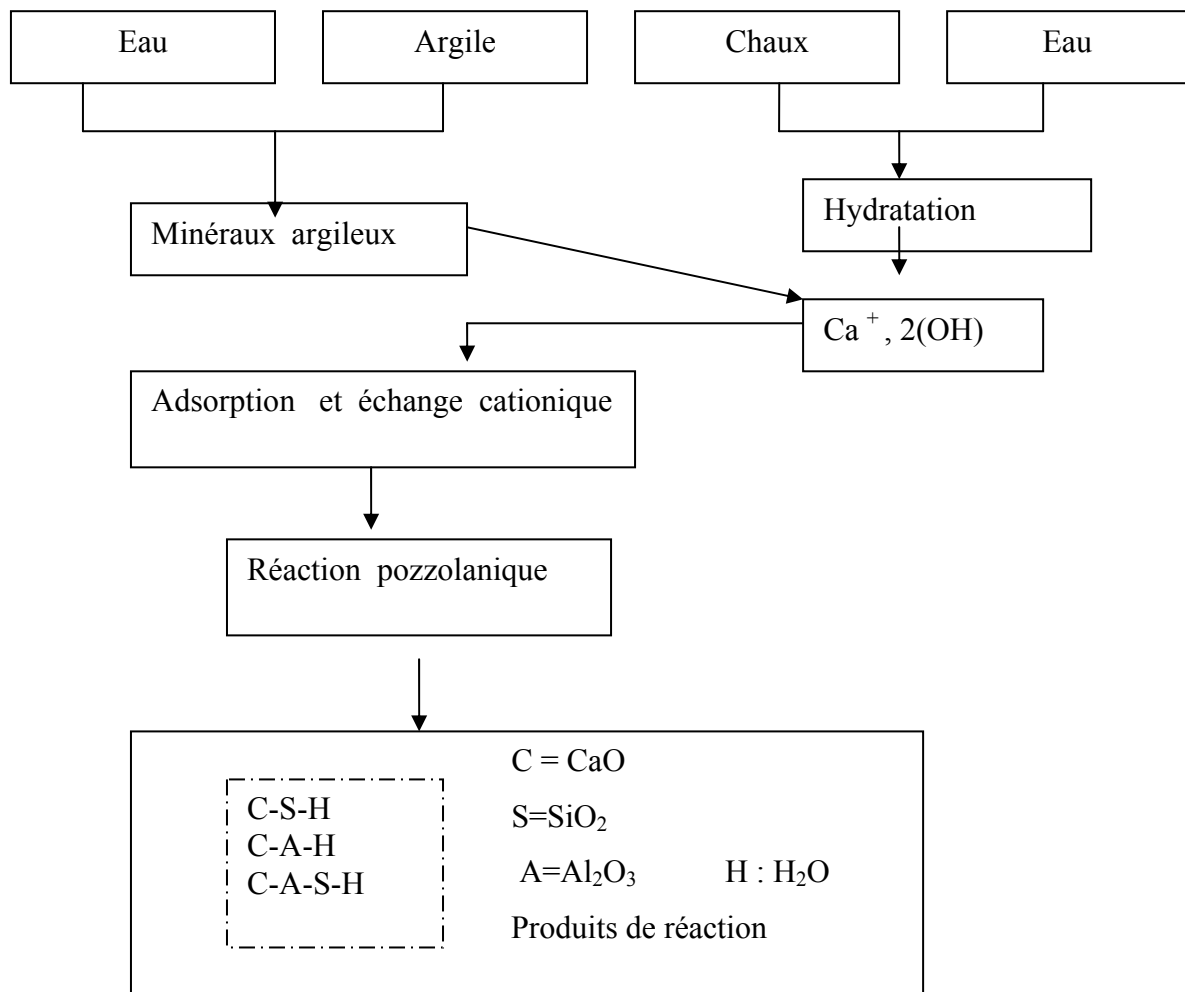
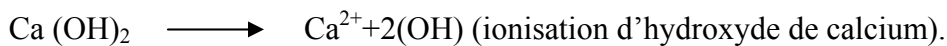
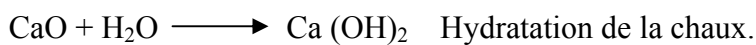


Figure 6.1 : Mécanismes des réactions du sol et durcissement des agents [53]

D'autre part, Mohamed (2000) a étudié les différentes réactions chimiques durant la durée de stabilisation [41]



le silice + chaux + eau = silicate de calcium hydraté CSH ($3\text{CaO} + 2\text{SiO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$).

Alumine + chaux + eau = alumine de calcium hydraté CAH ($3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 + 12\text{H}_2\text{O}$).

La cimentation et le durcissement de mélange chaux marne est faite par la cristallisation d'un pourcentage important des deux agents **CSH** et **CAH**.

6.3 Risque de formation d'ettringite et thaumasite

D'après Rajasekaran, (1994) [46], il est nécessaire de comprendre les mécanismes divers d'attaque de sulfate causant les échecs pour que des mesures protectrices appropriées puissent être prises à temps.

Les échecs dans la stabilisation de sol ont été annoncés par la formation d'ettringite, un minéral expansif qui se développe en présence de sulfate, le calcium et les composés d'aluminium de fraction d'argile dans des hauts niveaux pH entre 10.36 et 14. [60].

Les réactions chaux + sol, comme l'échange de cation, l'agglomération et la carbonatation et la réaction pozzolanique à long terme, sont affectées par le sulfate qui est induite dans le sol traité pleuvant être observé pour une longue durée. Le sulfate enrichis dans les sols a incité des réactions expansives dans le cas d'un traitement à la chaux en raison de la formation d'ettringite (le calcium-hydroxyde d'aluminium- de sulfate l'hydraté) et thaumasite (calcium- hydroxyde de silicate - carbonate de sulfate hydraté) Il a annoncé la formation d'ettringite en présence d'aluminium et sa conversion à thaumasite à une température ci-dessous 15 8C. La présence de minéraux d'argile réagissant avec la silice d'excès et l'alumine pourrait des résultats de la formation d'ettringite $\{Ca_6 [Al(OH)_6]_2 (SO_4)_3 \cdot 26H_2O\}$ et le changement postérieur à thaumasite $\{Ca_6 [Si(OH)_6]_2 (CO_3)_2 (SO_4)_2 24H_2O\}$. En cas de la température au-dessus de 15 8C, ettringite semble être plus stable. La conversion d'ettringite à thaumasite arrive par la substitution isostructural de silice. [47].

Ogawa et Roy (1982) et Uchikawa et Uchida (1986) ont énoncé le mécanisme de réaction schématique de composés C3S-pozzolanic et le développement d'ettringite pendant la réaction pozzolanique, respectivement dans les figures 6.2 et 6.3. [47]

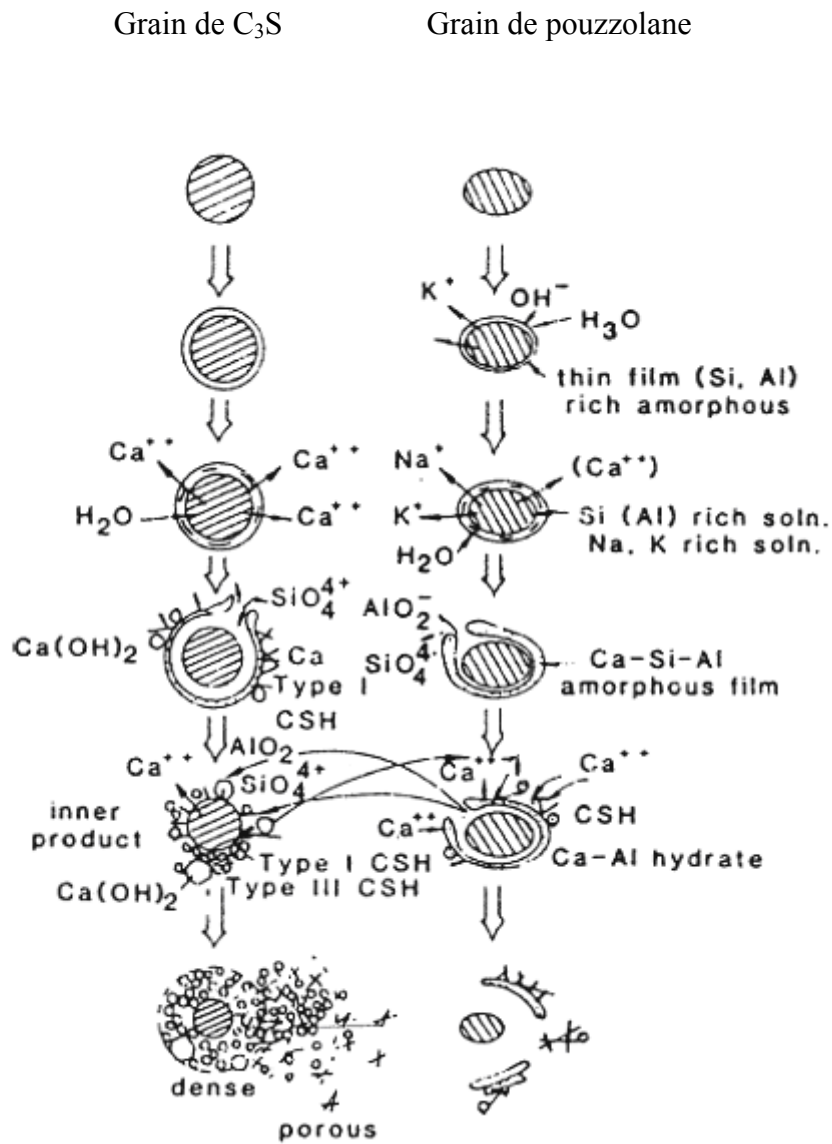


Figure 6.2 : Mécanisme de réaction impliqué dans le développement de grains C₃S-pouzzolane [47]

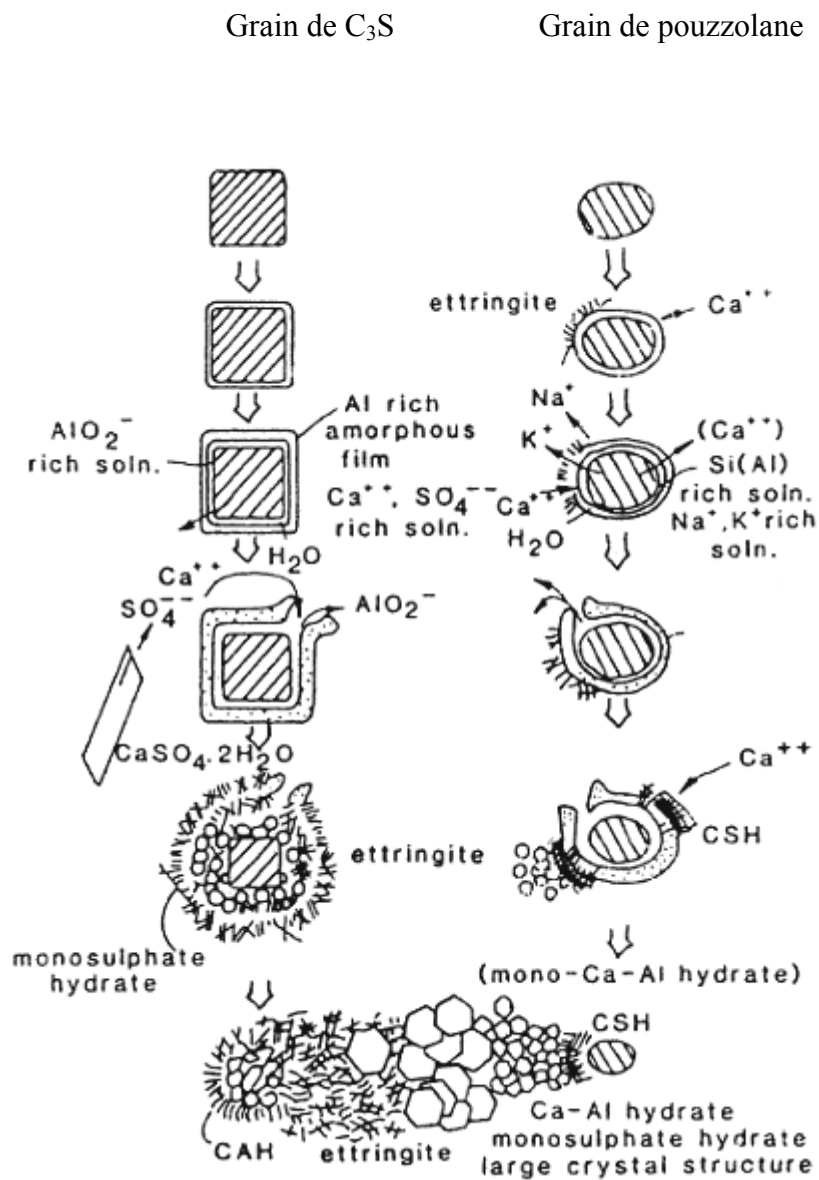
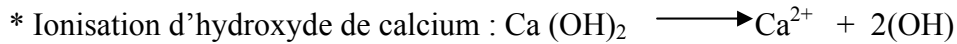
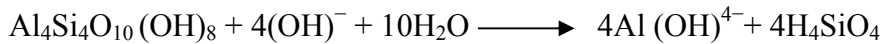


Figure 6.3 : Schématisation du développement de la formation d'Ettringite [47]

Les réactions chimiques de la formation d'ettringite et de la thaumasite sont détaillées par Hunter (1989) [30] :



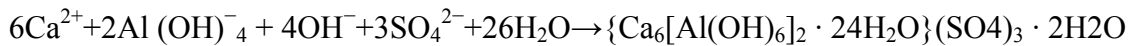
* Dissolution des minéraux argileux PH > 10.5 :



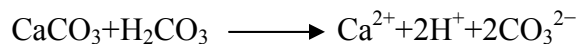
* Dissolution des minéraux surfaciques; x = 1; y = 2 ou x = 2; y = 1) :



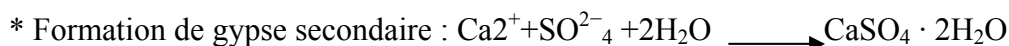
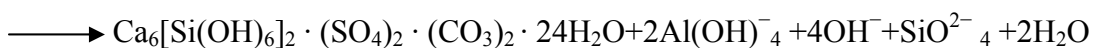
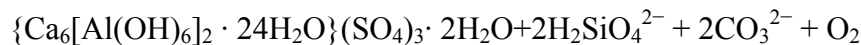
* Sulfate dans l'interparticule d'eau + l'Aluminium libéré par l'argile + calcium par la chaux → calcium d'aluminium de sulfate (ettringite).



* Dissolution de la calcite dans l'acide carbonique :



* La substitution isostructural quand l'ettringite change à thaumasite



Plusieurs chercheurs ont essayé d'apprécier des seuils de classification du risque sulfatique (formation des minéraux expansifs) en fonction du pourcentage de sulfate présenté dans le sol (tableau 6.1) [6].

Tableau 6.1 : risque sulfatique en fonction de la teneur en sulfate présente dans le sol.

Risque sulfatique	Risque faible	?	Risque important
Teneur en sulfate	$\leq 0.3 \%$		0.7 à 1%

6.4 Conclusion

Les réactions à court terme qui sont l'échange cationique et la floculation des particules entre la marne argileuse et la chaux hydratée est le responsable d'une amélioration immédiate des paramètres physiques du mélange traité (diminution de la plasticité et de retrait, diminution de la sensibilité à l'eau, augmentation de la teneur en eau et diminution de la densité sèche maximale).

Les réactions à long terme (réaction pozzolnique) qui donnent naissance aux deux agents de cimentation et de solidification et de durcissement CSH et le CAH qui sont les responsables de la stabilisation du sol traité (augmentation de la portance, de la résistance, réduction du gonflement des sols. [58].

La réussite de l'opération de traitement du sol peut être échouée par la formation des deux minéraux expansifs l'ettringite et la thaumasite qui sont des minéraux gonflants qui impliquent une augmentation du potentiel de gonflement ; et une chute importante de la résistance mécanique donc des désordres géométriques intéressants, et une chute importante de la résistance mécanique. [39].

Donc il est nécessaire de vérifier le pourcentage de sulfate présent dans le sol est comparé avec les seuls cités déjà, avant l'application du traitement pour apparaître notre but de stabilisation.

3^{eme} Partie : Traitement sur chantier

APPLICATION DU TRAITEMENT A LA CHAUX

7.1 Introduction

L'ajout d'un agent de traitement permet d'assurer, par une mise en oeuvre correcte, une traficabilité de la couche traitée, l'obtention des compacités visées, une portance élevée et une durabilité de cette portance dans le temps vis-à-vis de l'influence de l'eau et du gel.

Certains sols, en raison de leurs propriétés géotechniques intrinsèques et/ou de leur teneur en eau sont considérés comme mauvais ou médiocres et ne présentent pas par conséquent les performances nécessaires pour supporter le trafic de chantier. Le traitement de ces sols à la chaux est une solution appropriée qui leur confèrera des propriétés nouvelles répondant aux qualités requises.

Dans les travaux de terrassements routiers, le recours à la technique de traitement du sol peut se faire selon deux objectifs [21]:

- * La réalisation des plates-formes rigides et stables, sous forme de couches de forme traitées, en visant des caractéristiques mécaniques élevées qui doivent répondre à la fois à des objectifs à court terme (vis-à-vis de la phase de réalisation de la chaussée) et à long terme lorsque la route est en service.

- * L'amélioration immédiate des sols trop humides en augmentant leur stabilité et en assurant leur mise en oeuvre en corps de remblai dans des conditions pratiques satisfaisantes du chantier sans viser pour autant des performances mécaniques élevées.

7.2 Raison de l'application du traitement

Dès que la réalisation d'un projet implique la mise en oeuvre, le transport ou la réutilisation de sols fins, le traitement à la chaux est la solution idéale. En effet, les sols fins, c'est-à-dire ceux contenant des proportions notables de minéraux argileux, ont des propriétés géotechniques très variables en fonction de leur teneur en eau : ils peuvent gonfler et deviennent plastiques en présence d'eau, montrer une faible durabilité, ils se rétractent à la sécheresse, foisonnent sous l'effet du gel. La circulation des engins de chantier y est toujours délicate.

7.2.1 Raison économique

Une faible dose de chaux (1 à 3 %) est suffisante généralement pour l'amélioration du comportement des sols argileux [50].

Les avantages économiques du traitement à la chaux sont :

- Limitation des besoins en matériaux d'emprunt et diminution des coûts liés à leur transport.
- Limitation de l'impact des mouvements de camions sur le chantier et sur ses voies d'accès.
- Amélioration de la productivité : la circulation des engins est facilitée et les temps d'arrêt aux intempéries sont réduits, ce qui permet d'abaisser sensiblement les coûts de chantier et de diminuer les délais d'exécution.
- Augmentation de la durée de vie des structures (remblais, couches de forme) et diminution de leur coût d'entretien.

7.2.2 Raison écologique

En plus de l'aspect économique, le traitement a un intérêt écologique, puisque la valorisation des ressources locales en matériaux, limite l'ouverture des carrières et des dépôts, atténuant ainsi l'impact du projet sur le milieu naturel. Le traitement participe, en l'optimisation des mouvements des terres, à la réduction des nuisances causées aux riverains et à la faune et la flore en diminuant les transports à l'extérieur du chantier. [17]

7.2.3 Raison technique

L'addition de la chaux implique un changement cationique et une floculation à court terme et une action de cimentation (réaction pozzolanique) à long terme qui cause une stabilité de la structure et une grande résistance dans les conditions de mouillage et du séchage [49].

*Selon l'analyse chimique effectuée (chapitre 3), le pourcentage de sulfate est inférieur à 0.3 %, cette valeur trouvée nous protégée nous du risque de la formation des minéraux expansifs (ettringite, taumasite) et nous autorise à appliquer l'opération du traitement à la chaux de notre marne argileuse.

*L'histogramme de la figure 7.1 représente une comparaison entre les paramètres physiques de la marne non traitée et la marne traitée à 2% de chaux.

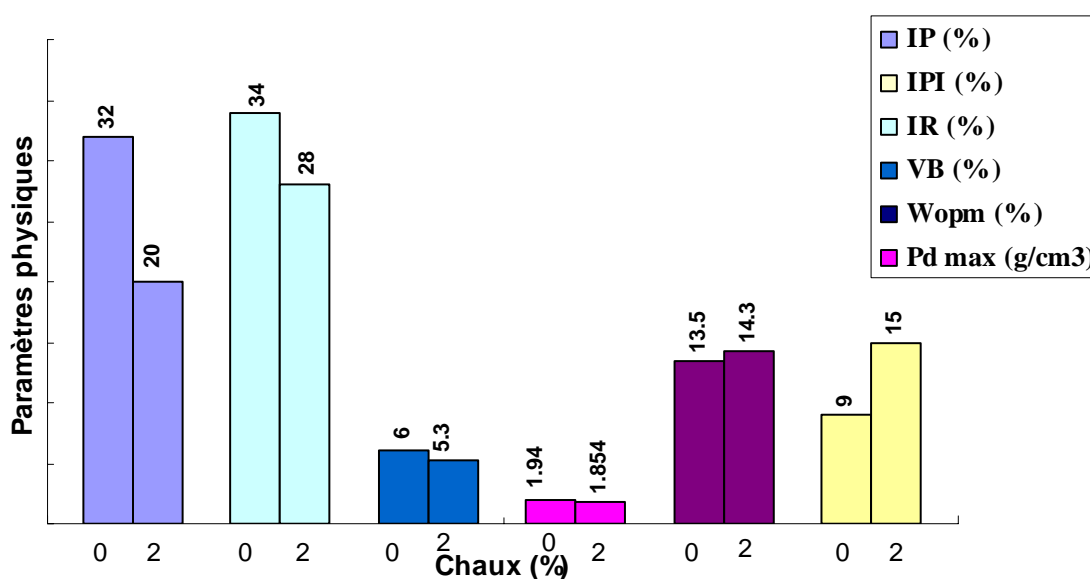


Figure 7.1 : Variation des paramètres physique en fonction du pourcentage en chaux (0 et 2%).

On peut constaté :

- Une diminution de l'indice de plasticité, de l'indice de retrait et de la valeur au bleu de méthylène ce qui explique la diminution de la sensibilité à l'eau du sol traité.
- Une diminution de la densité sèche maximale tandis que la teneur en eau optimale augmente, la courbe Proctor du sol traité est déplacée vers la droite et vers le bas par

rapport à la courbe du sol naturel. Ce déplacement est d'autant plus marqué que le sol réagit bien avec la chaux qui implique également une facilité de compactage au chantier.

- une augmentation de la portance, de l'indice portant immédiat IPI du sol traité 2 fois plus élevée que celui d'un sol non traité.

Ces améliorations des paramètres géotechniques sont dues à la réaction de la **Floculation** qui peut être définie par l'incorporation de chaux qui modifie les champs électriques résultants des charges réparties à la surface des particules argileuses. Celles-ci acquièrent une structure granuleuse.

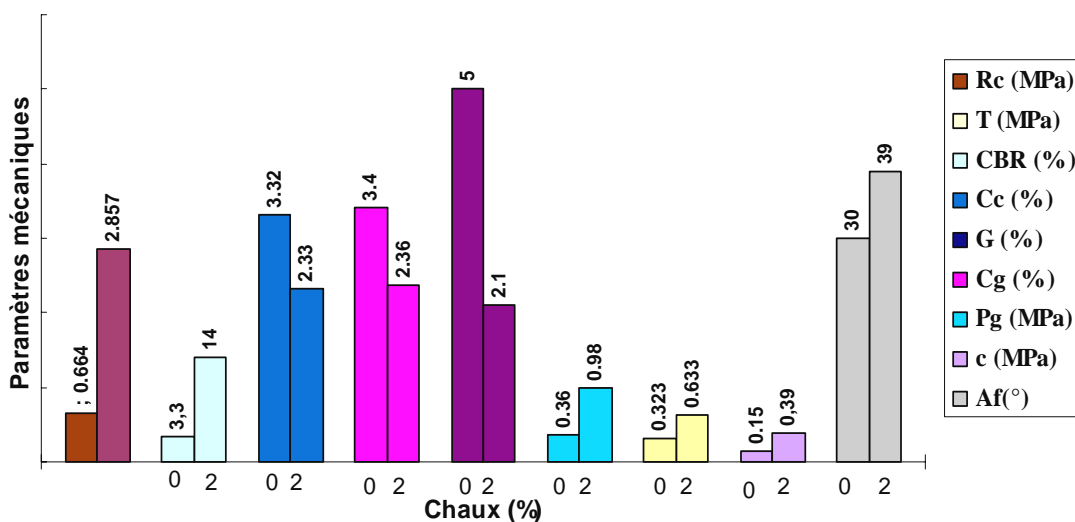


Figure 7.2 : Variation des paramètres mécaniques en fonction du pourcentage en chaux (0 et 2%).

A long terme, et selon la Figure 7.2, on constate :

- une augmentation importante de l'indice de portance imbibé CBR, de la résistance à la compression
- Une diminution des paramètres de gonflement et de compressibilité : potentiel de gonflement G%, pression de gonflement Pg, indice de gonflement Cg et indice de compressibilité Cc.
- Une amélioration des paramètres de cisaillement : augmentation de la cohésion C, de l'angle de frottement Φ , et de la résistance au cisaillement.

Cette stabilisation du sol traité est justifiée par une réaction, dite “**pouzzolanique**” :

Le contact entre la matière contenant des silicates et des aluminates (ce qui est le cas pour les argiles et les limons) et la chaux forme des aluminates et des silicates de calcium hydratés, qui en cristallisant, entraînent une véritable “prise” des matières en contact, comme le ferait un ciment.

7.2.4 Conclusion

Le traitement à la chaux éteinte permet donc de transformer en quelques minutes un matériau plastique, collant et difficile à compacter, en un matériau rigide, facile à manipuler et à mettre en œuvre, il devient facile à extraire, à charger, à décharger, à niveler et à compacter, et qui présente de plus une excellente portance. La circulation des engins s'en trouve grandement facilitée.

7.3 Application du traitement

Pour tous les raisons techniques, économiques et écologiques mentionnées, on doit favoriser la réutilisation des quantités de déblais de la marne argileuse mise en dépôts dans les travaux de remblais par le biais d'un traitement à la chaux avec un pourcentage de 2%.

7.3.1 Présentation du site de traitement

Le projet de construction de l'Autoroute EST OUEST tronçon Oued Fodda Khemis Miliana a prévu le recours au traitement des sols à la chaux pour la construction du remblai de l'axe secondaire situé au PK 5+800 sections des 27 km coté droit, le remblai a une hauteur de 10 m. Le remblai est réalisé avec la marne provenant des déblais (marne est stocké à oued Boussouf), la distance entre le dépôt et le chantier de traitement est de l'ordre de 1200m.

La photo N°8 représente le site du traitement



Photo N°8 : Site du traitement

7.3.2 Exécution

L'ajout d'un agent (chaux) permet d'assurer par une mise en œuvre avec les ateliers traditionnels de terrassement une amélioration des propriétés géotechniques du sol (augmentation de la portance et la durabilité du sol vis-à-vis de l'eau et du gel, obtention des compacités visées).

7.3.2.1 Epannage des matériaux

*Les matériaux utilisés pour le traitement sont de classe GTR R32 ou A2 ayant des caractéristiques géotechniques similaires à l'échantillon testé au laboratoire.

L'épandage des matériaux à traiter pour permettre la décomposition des matériaux par Les engins de fragmentation mécanique : bulldozers, tracteur muni de socs et compacteur à pied dameur interviennent pour réduire les matériaux à une mouture de classe 0/20 mm sur 30 cm.

*La chaux utilisée est une chaux éteinte conforme à la norme NFP98-101, l'approvisionnement du chantier est assuré depuis l'usine de Hassana à Saida par des camions bananes de 20 tonnes de capacité.

L'épandage se réalise par sac sur le sol préalablement quadrillé (photo 9), chaque carré définissant la surface sur laquelle un sac complet doit être répandu. Cette solution est techniquement acceptable, mais n'est économiquement envisageable que pour des chantiers de petite envergure et de forme irrégulière [50]. L'opération doit être menée de façon à réduire au maximum la production de poussière.



Photo N°9 : Epannage de la chaux sur le sol à traiter

7.3.2.2 Malaxage

Le malaxage en couche étalée permet un rendement plus élevé dans des conditions de chantier adaptées, c.-à-d. des grandes surfaces sans obstacles (tuyaux, chambres de visite, etc.).

Dans le cas d'un traitement en couche étalée, la couche de sol est malaxée d'une façon intensive après l'épandage, jusqu'à obtention d'un mélange homogène sur toute la surface et dans toute l'épaisseur de la couche traitée (couleur et structure uniformes). Le malaxage s'effectue immédiatement (1/4 h) après l'épandage de la chaux pour éviter la dispersion de l'agent de traitement par le vent (ainsi qu'une perte de réactivité dans le cas de la chaux). Il faut veiller à ce que l'humidité du sol après traitement corresponde à l'optimum déterminé par l'étude en laboratoire.

Le malaxage s'exécute par des passes longitudinales et transversales successives par : bulldozers, tracteur avec disque et compacteur à pied dameur.

L'opération est menée de façon à limiter la production de poussière.



Photo N°10 : Malaxage du sol avec la chaux

7.3.2.3 Compactage

Le compactage des matériaux traités intervient après un éventuel nivellement en couches d'épaisseur compatible avec les performances des compacteurs, qu'ils soient à pneus, vibrants ou à pieds dameurs.

Un arrosage supplémentaire peut s'avérer indispensable. Il est également important que le compactage s'étende à toute l'épaisseur malaxée. C'est pourquoi les remblais sont généralement mis en oeuvre par couches de 0,3 m à 0,5 m d'épaisseur.

Le compactage de la marne traitée demande une attention toute particulière, la couche est compactée à la densité exigée avec un nombre de passe limite (3 à 4 passes) par un rouleau vibrant.



Photo N°11 : Compactage du sol traité

7.3.2.4 Contrôle

a. Contrôle de l'agent de traitement utilisé

Au moment de la livraison: vérifier les bons de livraison et contrôler que les agents de traitement répondent aux exigences du cahier des charges.

Après le stockage la chaux (photo 12), on doit vérifier la conformité de la réactivité T60 et de la teneur en CaO disponible aux spécifications du cahier des charges.



Photo N°12 : Stockage de la chaux

D'après les résultats d'analyse chimique donnée dans le chapitre 3, la chaux hydratée de Saida est conforme aux conditions d'utilisation du traitement.

b. Contrôle de l'exécution

Selon les guides géotechniques du traitement et selon le CPS spécification du marché

*Un contrôle global peut également être réalisé par le contrôle du poids total épandu sur la surface traitée.

*Le contrôle de l'humidité du sol traité avant compactage se fait par la détermination de la teneur en eau d'un échantillon retiré de la couche non compactée après traitement.

*L'épaisseur de la couche après compactage est vérifiée par des sondages dans la couche traitée.

*Dans le cas d'une stabilisation à la chaux seule:

$R_c > 2,5$ MPa.

Suivant l'histogramme déjà mentionné dans la partie des raison technique du traitement la résistance à la compression à 60 jours est de l'ordre de :

*Le contrôle de compactage se fait par :

-Vérification du rapport CBR à 4 jours d'imbibition par rapport à l'indice portant immédiat ≤ 1 . Ce critère est bien vérifié dans le pourcentage de chaux choisie 2%. Le rapport ICBR (après quatre (04) jours d'immersion) / IPI = 0.93.

-Vérification de la densité et la teneur en eau au moyen d'un Troxler. Les teneurs en eau et les densités sèches de chaque couche doivent être proche au paramètre optimum trouvé au niveau de laboratoire.

Les deux figures suivantes représentent la variation de la teneur en eau et la densité sèche insitu en fonction de nombre de couches.

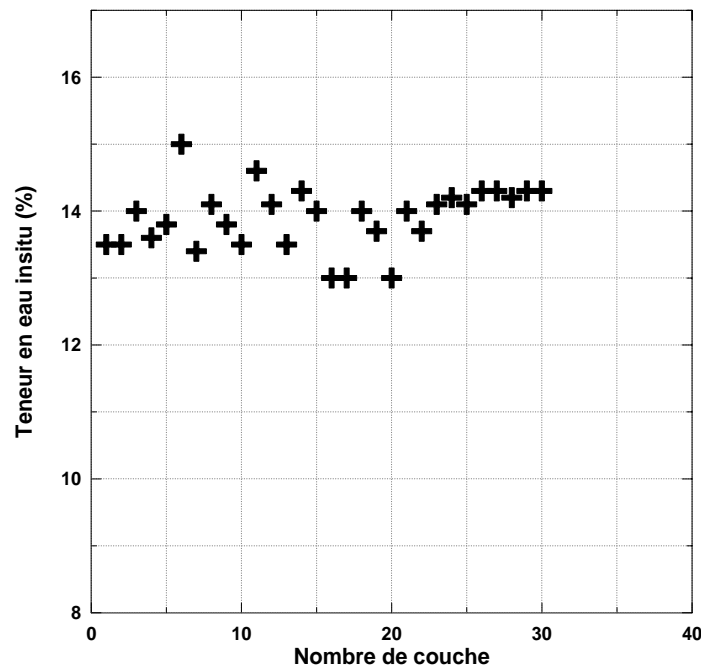


Figure 7.3 : Variation de la teneur en eau in situ en fonction du nombre de couches

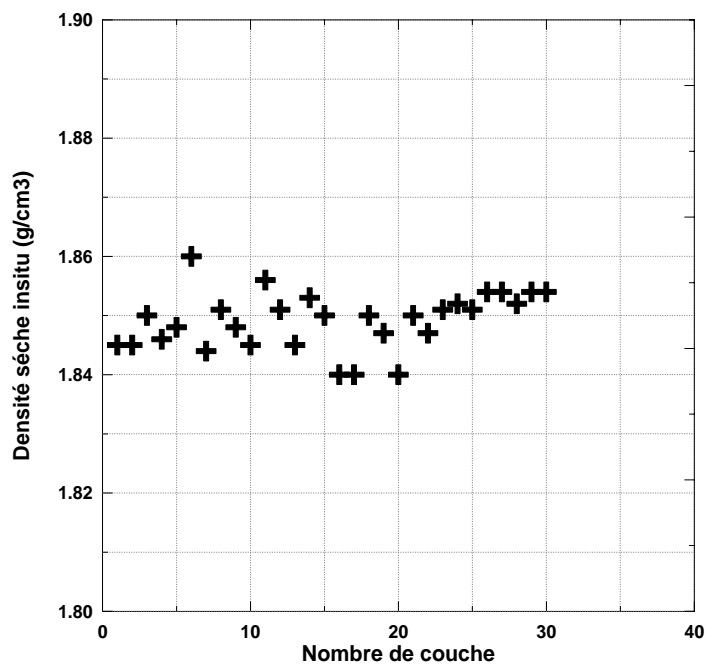


Figure 7.4 : Variation de la densité sèche insitu en fonction de nombre de couches

On peut constater que la majorité des valeurs trouvées sont proches des paramètres à l'optimum $W_{opm} = 14,3 \%$ $\gamma_d = 1,845 \text{ g/cm}^3$.

-Vérification de la portance de module sous chargement à la plaque EV2 doit être ≥ 40 MPa.

Les essais de déformabilité effectués par le biais de la plaque $\phi 600$ mm sur chaque 3^{ème} couche de remblai de l'axe 5 (PK 5+833)

Les résultats mentionnés dans la figure 7.5 montre que tous les valeurs sont supérieures à la valeur exigée par les guides du traitement EV2 ≥ 40 MPa.

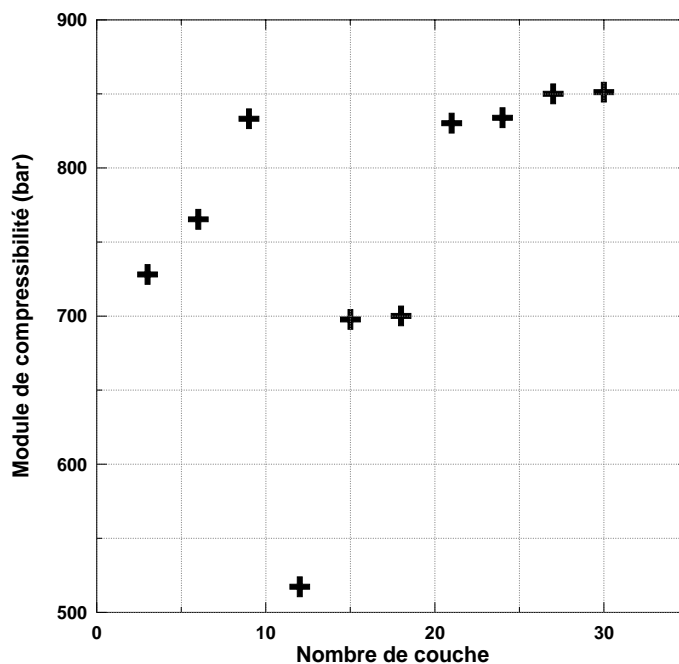


Figure 7.5 : Variation du module de déformabilité en fonction de nombre de couches

7.5 Conclusion

Le remblai traité à la chaux au niveau de l'axe 05 a été mené selon une cadence moyenne journalière de l'ordre de 500 m³/jour. Le délai global d'exécution est de l'ordre de 2 mois.

Les résultats du contrôle d'exécution et du compactage trouvés confirment la réussite de cette opération du traitement, mais au niveau de la réalisation on a rencontré plusieurs problèmes :

- La nature des matériaux R32 qui sont initialement à l'état semi rocheux se débitant à l'extraction sous forme de blocs de marne sur consolidé. Pour ramener ces matériaux semi rocheux à une classe granulométrique 0/20, le procédé adopté consiste à une transformation des blocs de marne par étalage et sous l'action des engins bulldozers, compacteurs à pieds dameurs; la mouture finale est satisfaisante. L'on arrive à la fin de ce procédé à une classe 0/10 voire 0/5. Sans cette transformation de granulométrie le traitement ne peut pas réussir sur ce type de matériaux ;

- Le phénomène de feuilletage qui provoque la décomposition de la surface traitée sur une pellicule superficielle de 5 cm a été traité par un rabotage à la niveleuse, léger arrosage et compactage au pneu ou au pied dameur.
- Le vent qui bloque l'opération de traitement pendant plusieurs jours à cause des problèmes de dosage.
- Les problèmes qui concernent l'approvisionnement de la chaux (Problème de linéaire et la capacité de production a l'unité de Saida).
- Le manque dans les moyens de l'épandage de la chaux et moyen de malaxage (un manque de l'épandeuse et la machine stabilisatrice).

CONCLUSION GENERALE

L'étude a été entreprise pour étudier le comportement physicochimique et mécanique d'un remblai routier traité à la chaux par une validation d'une campagne expérimentale au laboratoire. Les paramètres étudiés sont multiples et variés. Il s'agit notamment des pourcentages des constituants (marne, chaux et eau), de la méthode de préparation des échantillons ainsi que les caractéristiques de chaque essai.

Après cette étude, on peut tirer les principaux résultats suivants :

L'introduction de la chaux dans les sols marneux argileux a un effet considérable sur son comportement physique : il a été constaté une diminution des limites d'Atterberg, la valeur au bleu et un aplatissement de la courbe Proctor. L'ajout de La chaux apporte une amélioration immédiate dans la résistance du sol par la diminution importante de sa sensibilité à l'eau.

Les paramètres mécaniques de la marne sont clairement influencés par l'ajout de chaux.

- l'augmentation de la résistance à la compression des mélanges traités est bien remarquée à partir de 28 jours.
- l'addition de la chaux donne un accroissement de la portance des mélanges.
- il a été observé des modifications inhérentes sur les paramètres de compressibilité (indice de compression C_c et l'indice de gonflement C_g) à l'apport de la chaux dans la marne. Une diminution importante de ces deux paramètres du fait que le pourcentage en chaux augmente. Pour une plage de variation de la chaux additionnée de 2 à 4%, la marne est passée d'un état très peu compressible à un état incompressible.

- L'ajout de la chaux à la marne fait diminuer les deux principaux paramètres du gonflement (le potentiel et la pression du gonflement), un pourcentage de chaux de 2% est suffisant pour rendre cette marne dans un état non gonflant.

- une augmentation de la résistance et les paramètres au cisaillement (cohésion et angle de frottement) du sol a été enregistré au fur et à mesure que l'augmentation du pourcentage en chaux dans la marne.

L'amélioration du comportement physique et mécanique des mélanges traités peut être expliqué par des réactions chimiques à court terme (floculation et agglomération) et des réactions à long terme (réaction pozzolanique):

- La première est une réaction directe et rapide responsable a des effets immédiats produits par la chaux (**amélioration du sol**). La chaux hydratée peut alors réagir avec les minéraux argileux, provoquant une floculation et agglomération des argiles. Cette floculation augmente l'aptitude au compactage et diminue la plasticité du sol.
- La deuxième est une réaction lente, qui durcit progressivement le mélange sol-chaux compacté, responsable des effets à long terme (**stabilisation du sol**). L'alcalinité de la chaux augmente le pH du sol, ce qui libère les aluminates et les silicates. Ces derniers peuvent alors réagir avec le calcium apporté par la chaux et l'eau présente dans le sol qui donne deux agents de cimentation CSH et CAH qui sont les responsables à la solidification et le durcissement du sol.

L'application du traitement de la marne sur chantier avec un pourcentage en chaux de 2% a confirmé les résultats trouvés au laboratoire. A court terme de la réalisation, on a remarqué que la marne est passée d'un état déformable, collant difficilement compactable à un état rigide, frottant, friable plus facile à travailler. Ce changement d'état est dû à l'amélioration du comportement physique du sol traité (diminution de la plasticité et l'aplatissement de la courbe proctor).

Le contrôle de la compacité et la portance des couches traitées a donné des résultats fiables. Les valeurs de la densité sèche et les teneurs en eau trouvée in situ à l'aide du Troxler sont généralement proches des valeurs trouvées au laboratoire, les valeurs de Module de sous chargement à la plaque EV2 qui représente la portance ont été supérieures

à 0.4 MPa. Cette bonne portance et compacité sont justifiées par l'amélioration du comportement mécanique observé au laboratoire des mélanges (augmentation de CBR augmentation de la cohésion et l'angle de frottement, diminution du gonflement).

L'apport de chaux et de liant hydraulique routier permet de retraiter la chaussée in situ. La structure devient ensuite insensible aux infiltrations et elle reste homogène sur toute la distance souhaitée. L'utilisation de ces matériaux est malheureusement encore trop marginale, puisque de nombreux maîtres d'ouvrage préfèrent «dilapider» les carrières.

Les conclusions ont été extrêmement positives et permettent d'affirmer la possibilité de l'utilisation de la chaux dans les travaux publics en Algérie.

Perspective et recommandation

- Etudier le comportement des sols argileux traités à l'aide de l'appareil triaxial de révolution qui permettra sans doute d'approfondir la compréhension du comportement mécanique de ce sol (module de déformation des matériaux à des cycles de déchargement rechargement).
- Valider des résultats trouvés par la modélisation numérique du sol traité.
- Suivre le comportement des remblais traités à long terme par l'emplacement d'instruments situ tels que : tassomètre,.....

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ABOUBEKR, N. & AISSA MAMOUNE, S.M., 2004. Stabilisation des sols gonflants par les sels. Conférence Internationale de Géotechnique, Beyrouth.
- [2] AFES, M. & DIDIER, 1999. Stabilisation des sols gonflants: cas d'une argile en provenance de Mila (Algérie). Bull Eng Geol Env, vol. 59, pp 75–83.
- [3] ALSHIHABI, O., MIEUSSENS, C. & SHAHROUR, I., 2001. Etude à l'appareil triaxial de la résistance d'un sol compacte quasi saturé. XV ème Congrès Français de Mécanique.
- [4] ALSO, E.E. & DELAGE, P., 1975. Etude en laboratoire du gonflement de l'argile de la Flandres. Thèse de doctorat, école centrale de Lille.
- [5] AZZOUZ, F.Z., 2006. Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen. Thèse de Magister, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen.
- [6] BEAUCOUR, J.C. & RAYNAUD, D., 2008. Valorisation de ressources locales : Utilisation en terrassement des marnes de l'aéroport de PARIS-CHARLES DE GAULLE. Journée d'information STAC-LCPC.
- [7] BELL, F.G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. Engineering Geology ,vol. 42 ,pp 223–237.
- [8] BELKACEMI, S. & TAS, M., 1996. Effets de la Procédure d'Essai sur la Mesure du Potentiel de Gonflement en Laboratoire. Revue Scientifique, Algérie Equipement, n° 8, pp.13.
- [9] BENGRAA, H., 2004. Contribution a l'Etude de la stabilisation du gonflement par ajout du sable. Thèse de magister, Université de Mohamed Boudiaf U.S.T.O, Oran.
- [10] BOUSSAID, K., 2005. Sols intermédiaires pour la modélisation physique : Application aux fondations. Thèse de doctorat, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes.
- [11] BULTEL, F., 2001. Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels. Thèse doctorat, école nationale des ponts et chaussées.

- [12] BULLETIN Cftr-info ., 2002. Le traitement des sols.
- [13] BULLETIN CRR., 2001. Amélioration des sols à la chaux.
- [14] BULLETIN FEBELCEM - Fédération de l'Industrie Cimentière Belge., 2003. Le retraitement en place des chaussées au moyen de ciment.
- [15] BULLETIN LCPC., 1975. Eléments pour la construction des remblais avec en matériaux évolutifs ou sensibles.
- [16] CAI, Y., SHI, B., NG, C.W.W. & TANG, C., 2006. Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering Geology* , vol 87, pp 230–240.
- [17] CHOUH, M. M. M., 2008. Pst en pémmites et marnes traitées à la chaux. Autoroute TANGER – PORT OUED R'MEL, communication.
- [18] CORDARY, D., 1994. Mécanique des sols. Edition Lavoisier, pp.21-22.
- [19] DENELEE, D., 2008. Processus physico-chimiques et comportement géotechnique des sols traités. communication, laboratoire centrale des ponts et chaussé.
- [20] DOCUMENTATION TECHNIQUE DRCR ., 2001.Le Traitement des sols à la chaux et/ou au ciment.
- [21] Journée d'information STAC-LCPC.
- [22] GEORGIANNOU, V .N., BURLAND, J.B & HIGHT, D.W., 1990.The undrained behaviour of clay sands in triaxial compression and extension . *Journal of geotechnical engeneery*, vol 40, n°3, pp.431-449.
- [23] GHAZVINIAN, A.H., FATHI, A & MORADIAN, Z.A., 2005. Failure behavior of marlstone under triaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 45, pp.807–814.
- [24] GRAHAM, J., SAADAT, F., GRAY, M.N., DIXON, D.A. & ZIIANG, Q. Y., 1989.Strength and volume change behaviour of Sand=Bentonite mixture. *Revue Canadienne de géotechnique*, vol26, pp.292-305.
- [25] Guide Technique : Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques .,2000. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. LCPC / Setra.
- [26] HACHICHI, A. & FLEUREAU, J.M., 1999. Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Alger. *Revue Française de géotechnique*.
- [27] HAFSI, A., 1998. Théorie de la Double Couche et Gonflement des Argiles Non Saturées. *Revue Scientifique, Algérie Equipement*.

- [28] HAOFENG, X., XIAOMING, Y., CHAO, X. & GUANBAO, Y., 2009. Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil–cement. *Engineering Geology*, vol 103, pp.33–38.
- [29] HUIDI, J., HASHEM, M., ELIOT, F. & JOHN, D., 2006. Kinetics of thermally induced swelling of hydrogels. *International Journal of Solids and Structures*, vol 43, pp. 1878–1907.
- [30] HUNTER, D., 1989. Lime induced heave in sulphate-bearing clay minerals. *Geotechnical Enging*, vol. 114, pp.150–167.
- [31] IKIZLER, S.B., AYTEKIN, M. & NAS, E., 2008. Laboratory study of expanded polystyrene (EPS) geofam used with expansive soils . *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 26 , pp, 189–195.
- [32] ILTIS, M., 1979. Etude du Traitement des Argiles Gonflantes. Thèse de Doctorat , Ecole Centrale de Nantes.
- [33] JAFRANE, S., 2004. Préalables d'utilisation de la technique de la terre armée au cas de la rocade méditerranéenne. Communication.
- [34] KADDADJ, S., 1992. Effets de la Procédure d'Essai sur la Mésure du Potentiel de Gonflement en Laboratoire. *Revue Scientifique, Algérie Equipement*, n° 8, pp.13.
- [35] KHLIFA, T., 1994. Etude de la Stabilisation des Sols Gonflants par Ajout de Sable. Thèse de Magister, Université Houari BOUMEDIENNE, Alger.
- [36] KOLIAS, S., KASSELOURI-RIGOPOULOU, V. & Karahalios, A., 2005. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Cement & Concrete Composites*, vol. 27, pp.301–313.
- [37] Larsson, S., Mirja, R. & Gunnar, J., 2008. A laboratory study on strength loss in kaolin surrounding lime-cement columns. *Applied Clay Science*. pp,1-38
- [38] MATEO, M., 1964. Recherches sur la stabilisation des sols par la chaux en les cendres volantes. Publié dans les comptes-rendus du congrès, Madrid, Espagne.
- [39] MEHTA, P.K., 1973. Mechanism of expansion associated with ettringite formation. *Cement Concrete Res*, vol. 3, pp. 1–6.
- [40] MEKKAKIA MAAZA, M., 1999. Etude en Laboratoire des Comportements des Sables Argileux sous un Oedomètre. Thèse de Magister, Université Hassiba BEN BOUALI, Chlef.
- [41] MOHAMED, A.M.O., 2000. The role of clay minerals in marly soils on its stability. *Engineering Geology*, vol 57, pp.193–203.

- [42] NALBANTOGLU, Z. & GUCBILMEZ, E., 2002. Utilization of an Industrial Waste in Calcareous Expansive Clay Stabilization. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 25, pp. 78–84.
- [43] NARASIMHA, R. & RAJASEKARAN G., 1996. Reaction products formed in lime-stabilized marine clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol.122, pp. 329–336.
- [44] NECMI, Y., EKREM, K. & SUAT, A., 2007. Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze–thaw, of granular soils with waste additives. *Cold Regions Science and Technol*, vol, 48, pp.44–54.
- [45] Note trimestrielle d'information ,2005. Utilisation de la chaux dans les travaux routiers. Centre d'Etudes et de Services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction.
- [46] RAJASEKARAN, G., 1994. Physico-chemical behaviour of lime treated marine clay. PhD Thesis, Indian Institute of Technology, Madras, India, vol.37, pp 97–104.
- [47] RAJASEKARAN, G., 2005. Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays. *Ocean Engineering*, Vol. 32, pp.1133–1159.
- [48] RAO, S. M. & THYAGARAJ, 2003. Lime slurry stabilisation of an expansive soil. *Geotechnical Engineering Journal*. pp 139 – 146.
- [49] RAYMOND, N., YONG, & VAHID, O. 2007. Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils. *Applied Clay Science*, vol.35, pp. 238–249.
- [50] RENS, L., 2003. Le retraitement en place des chaussées au moyen de ciment. bulletin est publié par: FEBELCEM - Fédération de l'Industrie Cimentière Belge.
- [51] RIA ASIH ARYANI, S., 1994. Etude du Rôle de la Pression Interstitielle Négative dans le Gonflement et d'autre Aspects du Comportement de Sols non Saturés. Thèse de Doctorat. Ecole Centrale Paris.
- [52] SADIKI, A., FALEH, A., NAVAS, A. & BOUHLASSA, S., 2006. Estimation de l'état de dégradation des sols sur marnes du préif (MAROC) par la susceptibilité magnétique : exemple du bassin versant de l'Oued ", *Papeles de Geografía*. vol. 44, pp. 119.
- [53] SAITOH, S., SUZUKI, Y. & SHIRAI, K., 1985. Hardening of soil improved by deep mixing method. pp. 1745–1748.
- [54] SDHAKAR, M.R. & Al., 1998. Physico- chemical behaviour of dry silty clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp.451 – 453.

- [55] TANG, C., SHI, B., GAO,W., CHEN, F. & CAI, F.,2007. Strength and mechanical behaviour of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil . *Geotextiles and Geomembranes*,vol. 25,pp.194–202.
- [56] THOMAS, M., PETRY, P.E., FASCE, DALLAS, N.& LITTLE, P.E., 2002. Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures—History, Practice, and Future. *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp.447.460.
- [57] THUREAU, J.M., 1985. Etude Géotechnique des Sols Gonflants, Problèmes rencontrés au Sénégal", Thèse de Doctorat ,Ecole Centrale de Nantes.
- [58] Transportation Research Board, National Research Council, 1987.Lime Stabilization Reaction. Properties,Design and Construction, State of the Art Report N^o. 5.
- [59] VAHID, R., OUHADI & RAYMOND, N. Y., 2003.The role of clay fractions of marly soils on their post stabilization failure. *Engineering Geology*, vol. 70, pp. 365–375.
- [60] VAHID, R., OUHADI & RAYMOND, N. Y., 2008. Ettringite formation and behaviour in clayey soils. *Applied Clay Science*, vol 42, pp. 258–265.
- [61] VESSELY, M.J. & WU, J.T.H., 2002.Feasibility of geosynthetic inclusions for reducing swelling of expansive soils.*Transportation Research Record* ,pp.42–51.
- [62] VISWANADHAM, B.V.S., PHANIKUMAR, B.R. & RAHUL, V. M., 2006. Swelling behaviour of a geofiber-reinforced expansive soil. *Geotextiles and Geomembranes*,vol. 27, pp.73–76.
- [63] YI, C., BIN, S., CHARLES, W. & CHAO-SHENG, T., 2006.Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering Geology*, vol 87, pp. 230–240.
- [64] YUCEL, G., DURSUN, S. & MURAT CETIN, M., 2007.Impact of cyclic wetting–drying %Mon swelling behaviour of lime-stabilized soil. *Building and Environment*,vol. 42,pp. 681–688.

NORMES FRANCAISES :

NFP 94- 041 Analyse granulométrique, méthode de tamisage par voie humide

NFP 94- 057 Analyse granulométrique des sols par sedimentométrie.

NFP 94- 050 Détermination de la teneur en l'eau pondérale des matériaux-
Méthode par étuvage.

NFP 94- 051 Détermination des limites d'Atterbeg.

NFP 94- 060-1 Détermination conventionnelle de la limite retrait sur le passant à 400µm d'un
matériau.

NFP 94- 068 Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à tache.

XP P94- 090-1 Essai oedométrique.

NFP 94- 071-1 Essai de cisaillement rectiligne à la boîte.

NFP 94- 117-1 Portance des plates formes.

Partie 1 : Module sous chargement statique à la plaque EV2.

Annexes

Résultats des essais

Résultats des essais de compressibilité

Etat naturel

Contrainte appliquée (Bar)	Indice des vides e
0.015	0.767
0.250	0.767
0.5	0.767
1	0.767
2	0.766
4	0.763
8	0.753
4	0.756
1	0.764

C = 1%

Contrainte appliquée (Bar)	Indice des vides e
0.015	0.748
0.250	0.748
0.5	0.748
1	0.748
2	0.748
4	0.745
8	0.737
4	0.739
1	0.747

C = 2 %

Contrainte appliquée (Bar)	Indice des vides e
0.015	0.701
0.250	0.701
0.5	0.701
1	0.701
2	0.701
4	0.697
8	0.69
4	0.693
1	0.699

C = 3 %

Contrainte appliquée (Bar)	Indice des vides e
0.015	0.661
0.250	0.661
0.5	0.661
1	0.659
2	0.656
4	0.653
8	0.647
4	0.65
1	0.654

C = 4 %

Contrainte appliquée (Bar)	Indice des vides e
0.015	0.580
0.250	0.580
0.5	0.578
1	0.576
2	0.574
4	0.572
8	0.568
4	0.569
1	0.572

Résultat des essais du gonflement libre**" Potentiel de gonflement "****Etat naturel**

Temps	Lecture sur le comparateur	(-) ΔH (cm)	$\Delta H/H_0$ %
0'	3000	0.000	0
30''	3000	0.000	0
1'	3002	0.0002	0.01
2'	3006	0.0006	0.03
4'	3012	0.0012	0.06
6'	3018	0.0018	0.09
10'	3020	0.002	0.1
20'	3040	0.004	0.2
30'	3080	0.008	0.4
45'	3120	0.012	0.6
60'	3160	0.016	0.8
90'	3200	0.02	1
1440'	3900	0.09	4.5
2880'	3960	0.096	4.8
4320'	4000	0.1	5
5760'	4000	0.1	5
7200'	4000	0.1	5
8640'	4000	0.1	5
10080'	4000	0.1	5

Annexe B.

C = 1%

Temps	Lecture sur le comparateur	(-) ΔH (cm)	$\Delta H/H_0$ %
0'	3000	0.000	0
30''	3000	0.000	0
1'	3000	0.000	0
2'	3004	0.0004	0.02
4'	3010	0.001	0.05
6'	3016	0.0016	0.08
10'	3018	0.0018	0.09
20'	3026	0.0026	0.13
30'	3060	0.006	0.3
45'	3100	0.01	0.5
60'	3120	0.012	0.6
90'	3160	0.016	0.8
1440'	3520	0.052	2.6
2880'	3580	0.058	2.9
4320'	3620	0.062	3.1
5760'	3620	0.062	3.1
7200'	3620	0.062	3.1
8640'	3620	0.062	3.1
10080'	3620	0.062	3.1

C = 2%

Temps	Lecture sur le comparateur	(-) ΔH (cm)	$\Delta H/H_0$ %
0'	3000	0.000	0
30''	3000	0.000	0
1'	3000	0.000	0
2'	3004	0.0002	0.01
4'	3008	0.0008	0.04
6'	3014	0.0014	0.07
10'	3016	0.0016	0.08
20'	3024	0.0024	0.12
30'	3040	0.004	0.2
45'	3080	0.008	0.4
60'	3100	0.01	0.5
90'	3140	0.014	0.7
1440'	3340	0.034	1.7
2880'	3400	0.04	2
4320'	3440	0.044	2.2
5760'	3440	0.044	2.2
7200'	3440	0.044	2.2
8640'	3440	0.044	2.2
10080'	3440	0.044	2.2

Annexe B.

C = 3 %

Temps	Lecture sur le comparateur	(-) ΔH (cm)	$\Delta H/H_0$ %
0'	3000	0.000	0
30''	3000	0.000	0
1'	3000	0.000	0
2'	3000.6	0.00006	0.003
4'	3006	0.0006	0.03
6'	3012	0.0012	0.06
10'	3014	0.0014	0.07
20'	3020	0.002	0.10
30'	3032	0.0032	0.16
45'	3060	0.006	0.3
60'	3080	0.008	0.4
90'	3120	0.012	0.6
1440'	3270	0.027	1.35
2880'	3300	0.03	1.5
4320'	3320	0.032	1.6
5760'	3320	0.032	1.6
7200'	3320	0.032	1.6
8640'	3320	0.032	1.6
10080'	3320	0.032	1.6

C = 4 %

Temps	Lecture sur le comparateur	(-) ΔH (cm)	$\Delta H/H_0$ %
0'	3000	0.000	0
30''	3000	0.000	0
1'	3000	0.000	0
2'	3000.4	0.00004	0.002
4'	3008	0.0004	0.02
6'	3010	0.001	0.05
10'	3012	0.0012	0.06
20'	3018	0.0018	0.09
30'	3026	0.0026	0.13
45'	3040	0.004	0.2
60'	3060	0.006	0.3
90'	3100	0.01	0.5
1440'	3200	0.02	1
2880'	3220	0.022	1.1
4320'	3240	0.024	1.2
5760'	3240	0.024	1.2
7200'	3240	0.024	1.2
8640'	3240	0.024	1.2
10080'	3240	0.024	1.2

Résultats des essais du prégonflement

" Pression de gonflement "

Etat naturel

Charge (KPa)	Lecture sur le comparateur	ΔH (cm)	$\Delta H/H_0$ %
0	6000	0.1	5
57.58	5620	0.062	3.1
109.2	5360	0.036	1.8
220	5200	0.02	1
540	-4280	-0.072	-3.6

C = 1%

Charge (KPa)	Lecture sur le comparateur	ΔH (cm)	$\Delta H/H_0$ %
0	5620	0.062	3.1
54	5580	0.058	2.9
100	5300	0.03	1.5
150	5160	0.016	0.8
500	-4300	-0.07	-3.5

C = 2%

Charge (KPa)	Lecture sur le comparateur	ΔH (cm)	$\Delta H/H_0$ %
0	5440	0.044	2.2
30	5300	0.03	1.5
50	5200	0.02	1
85	5080	0.008	0.4
200	-4380	0.062	-3.1

C = 3 %

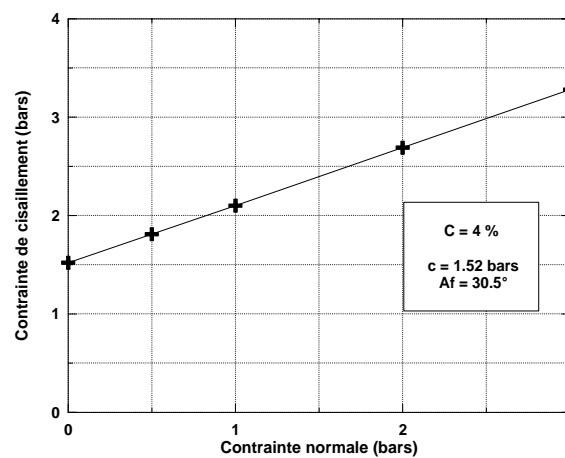
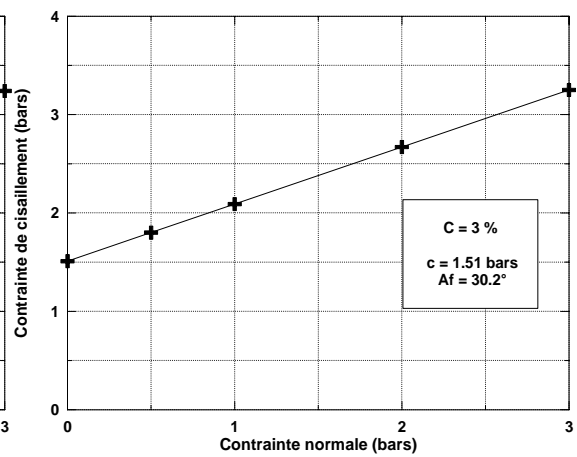
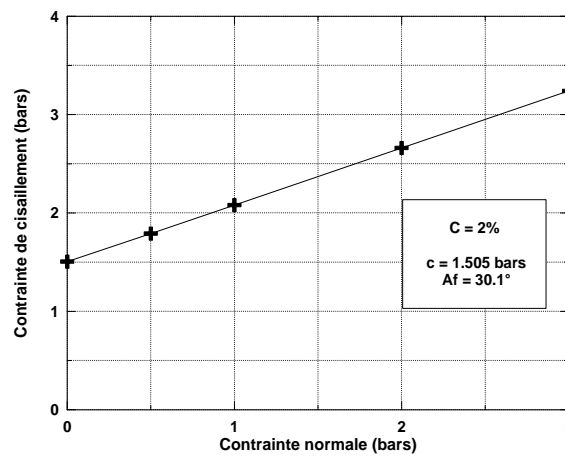
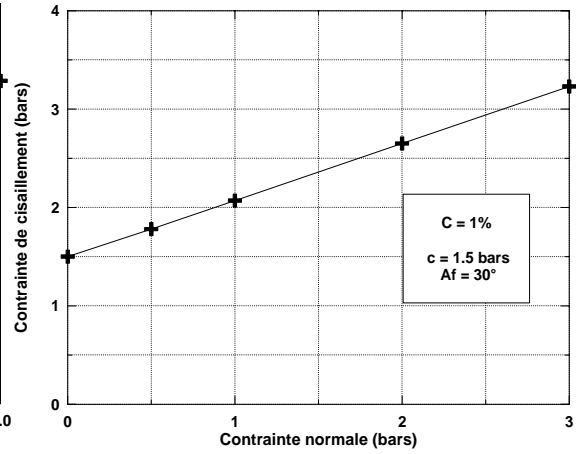
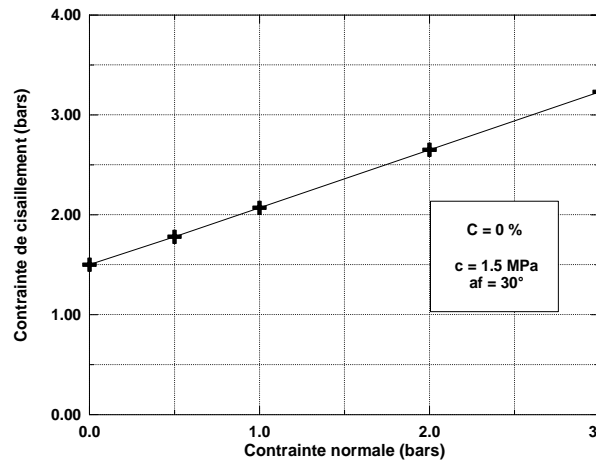
Charge (KPa)	Lecture sur le comparateur	ΔH (cm)	$\Delta H/H_0$ %
0	5320	0.032	1.6
25	5260	0.026	1.3
45	5100	0.01	0.5
62	5040	0.004	0.2
150	-4600	-0.04	-2

Annexe C.

C = 4 %

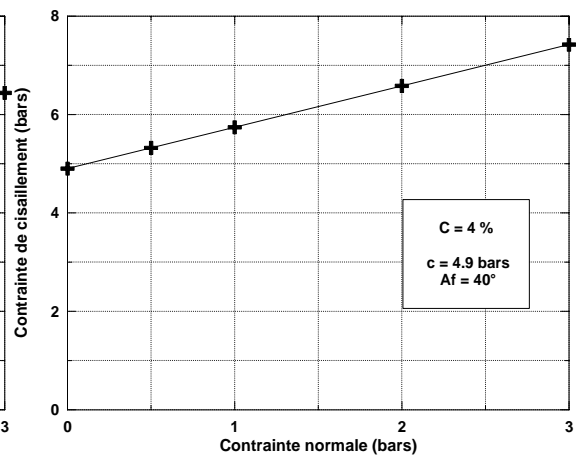
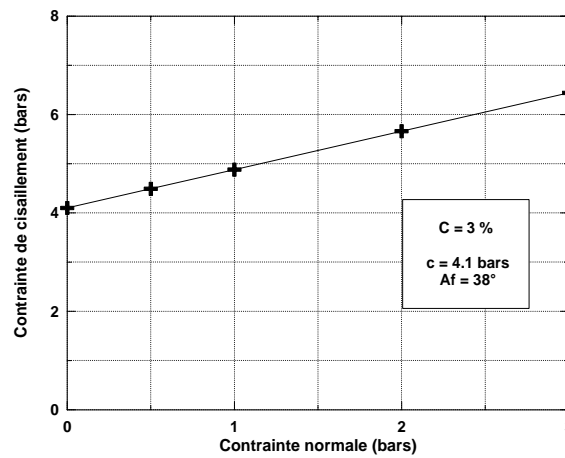
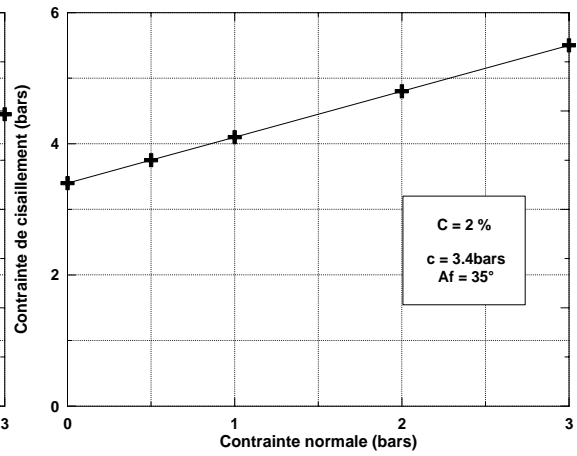
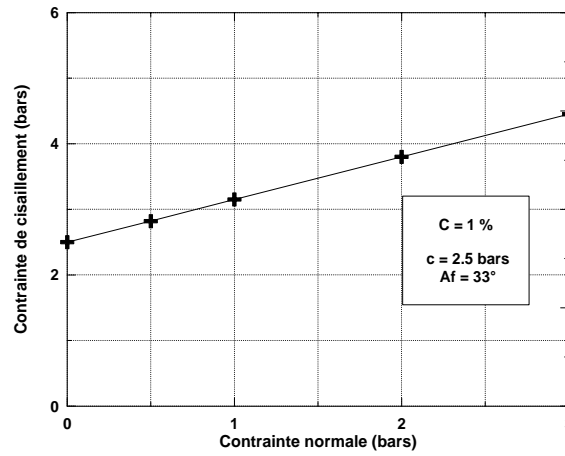
Charge (KPa)	Lecture sur le comparateur	ΔH (cm)	$\Delta H/H_0$ %
0	5240	0.024	1.2
18	5200	0.02	1
30	5080	0.008	0.4
40	5040	0.004	0.2
100	-4680	-0.032	-1.6

Détermination des paramètres de cisaillement (La cohésion (c) et l'angle de frottement interne (Af))

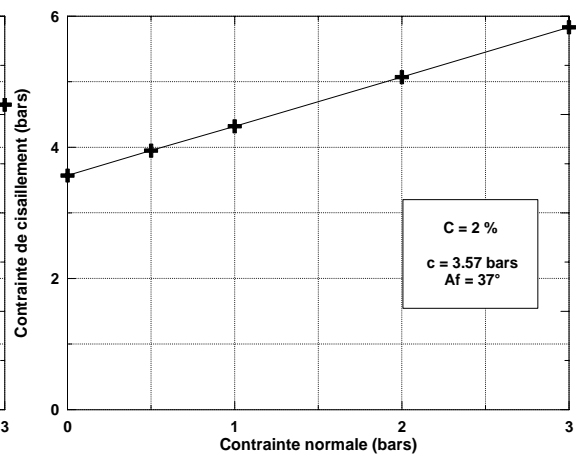
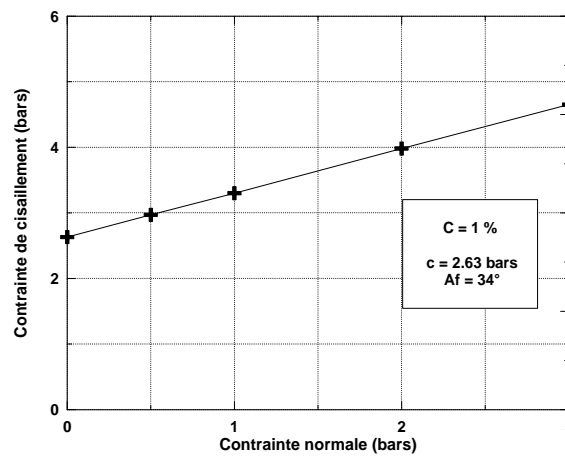


Cisaillement Immédiat

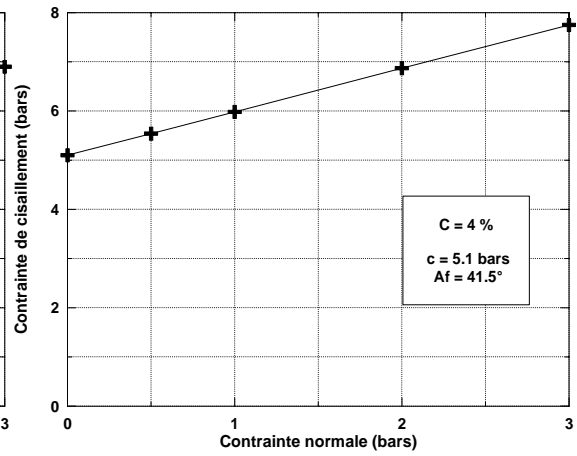
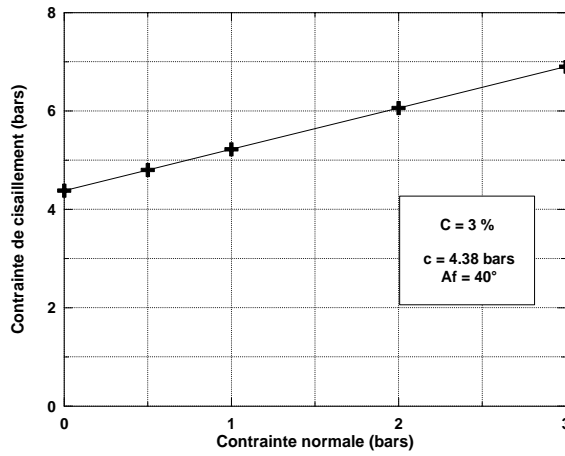
Annexe D.



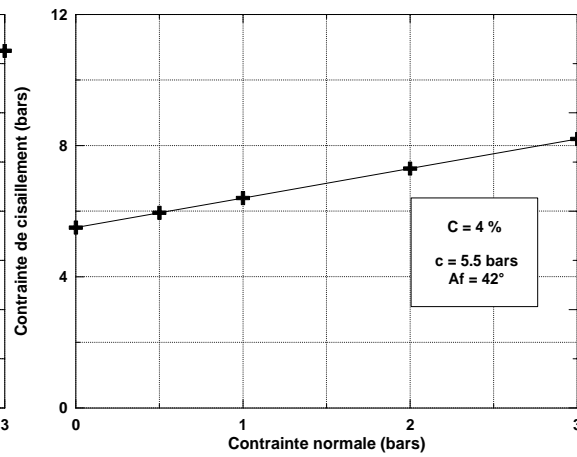
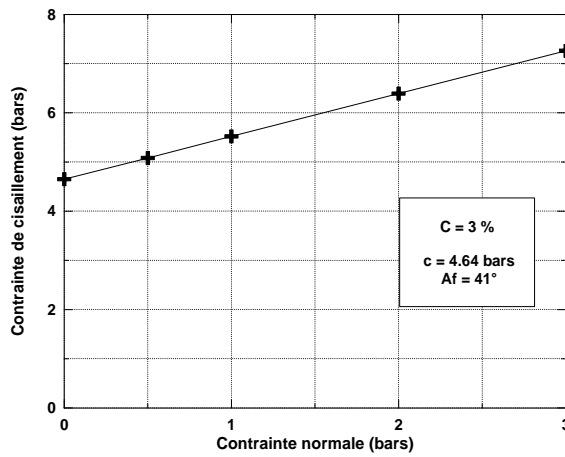
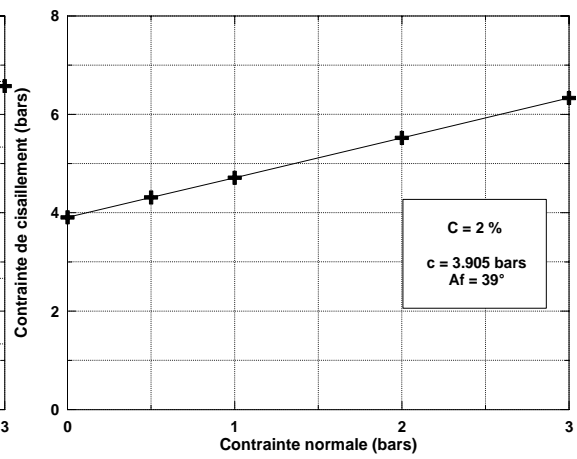
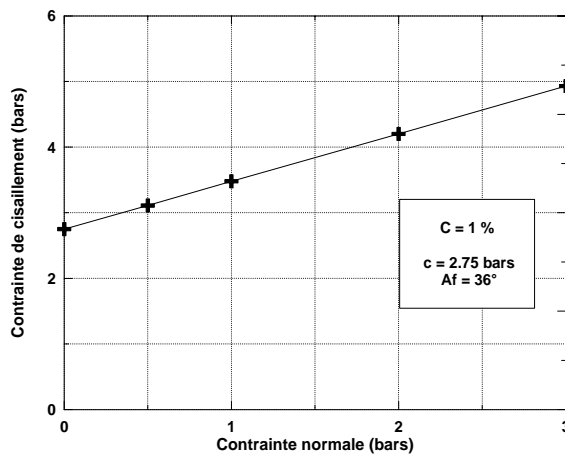
Cisaillement après 7 jours



Annexe D.



Cisaillement après 14 jours



Cisaillement après 28 jours