

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **Magister**

CARACTÉRISATION ET EXPLOITATION DE L'ARGILE DE BENAZZOUZ DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE

Option :

Géotechnique

Par

BENSALEM Ahmed

DIRECTEUR DE MEMOIRE : Dr N.CHELGHOU M.C Université d'Annaba

DEVANT LE JURY

PRESIDENT	: Pr. M.F. HABITA	Prof. Université d'Annaba
EXAMINATEUR	: Pr. M.MEKSAOUINE	Prof. Université d'Annaba
EXAMINATEUR	: Dr A.HACENE.CHAOUCH	M.C Université d'Annaba
EXAMINATEUR	: Dr M. HIDJEB	M.C Université de SKIKDA

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail

À ma mère,

à mon père,

à mes frères et sœurs,

à toute ma famille,

à tous les amis.

Remerciements

Ma profonde gratitude s'adresse tout particulièrement à mon Directeur de thèse, Monsieur Noureddine Chelghoum, maître de conférences au département de Génie Civil de l'Université d'Annaba, qui m'a accordé sa confiance dans l'élaboration de cette thèse. Tout en suivant de près ma démarche scientifique, il m'a fait partager son expérience enrichissante dans le domaine géotechnique et m'a prodigué de précieux conseils et encouragements pour mener à bien ce travail.

Je remercie également le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je tiens aussi à adresser mes sincères remerciements à Monsieur Fillali f, Directeur de l'unité des granulas de Benazzouz –ENG ainsi que les cadres de l'unité de Benazzouz, pour leur aide et leur disponibilité.

Je ne saurais remercier l'équipe du Laboratoire de l'Habitat et de la Construction Sud unité Djelfa, personnels, ingénieurs et techniciens qui m'ont grand ouvert leurs portes

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble du personnel de Laboratoire des travaux publics de l'est.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance et ma gratitude à toutes celles et tous ceux qui m'ont aidé dans la Préparation de cette thèse.

ملخص

يعاني الشرق الجزائري من نقص التربة الصالحة للاستعمال في إنجاز مشاريع الطرقات، لهذا يتطلب جلبها من الولايات المجاورة مما يؤدي إلى ارتفاع كلفة المشاريع. إن سبب قيامنا بدراسة طين بن عزوز ومعالجته بالجير هو لغرض استخدامه في مشاريع الطرقات والمحافظة على البيئة وترك مساحة شاسعة من المكان .

من خلال التجارب المتمثلة في دراسة حدود آترباغ و الرص والقص بعلبة كزاغرانة والضغط البسيط على عينات من الطين المزوج بنسب مختلفة من الجير والمحافظة لمدة 28 يوم توصلنا إلى نتائج ممتثلة في تغير الطبيعة الرخوية لطين بن عزوز إلى طبيعة صلبة ومستقرة عند إضافة نسبة 4 و 6 بالمائة من الجير .

RÉSUMÉ

L'Est Algérien souffre d'un manque crucial de remblai de sol pour la réalisation des projets routiers. Le cheminement de cette matière à partir des autres wilayas limitrophes revient très couteux et par conséquent augmente le prix de revient des projets. Le fait que nous étudions l'argile de Benazzouz traitée à la chaux pour raisons de valoriser ce produit dans les constructions routières et résoudre ainsi un problème environnemental du aux énormes dépôts d'argile sur sites.

Dans ce contexte nous sommes arrivés à travers des essais de plasticité, de compactage, et de cisaillement à la boîte de Casagrande et la compression simple sur différents échantillons d'argile traitée à différents pourcentages de chaux et conservés à une durée de 28 jours à modifier la consistance de l'argile non traité et qui était de consistance tendre à une consistance dure et stable par d'ajout des pourcentages de chaux de 4 et 6%.

ABSTRACT

The east Algeria suffers from a crucial lack of backfill soil for carrying out road projects. To bring this matter from other neighboring wilayat still very expensive and therefore increases the cost of projects. The fact that we are studying the clay Benazzouz treated with lime to make a valuable product in road construction and hence solving an environmental problem of the huge deposits of clay sites.

In this context we have come through plasticity tests, Compaction, and shear box Casagrande and simple compression on different clay samples treated with different percentages of lime and retained for a period of 28 days to modify the consistency of the untreated clay which was a soft consistency to hard and stable one by adding lime percentages of 4 and 6%.

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 Développement du Réseau Routier National	3
Figure 1-2 Sol Avant Traitement	8
Figure 1-3 Sol Après Traitement	9
Figure 1-4 Triangle du Choix de la Méthode de Stabilisation	12
Figure 1-5 Choix de la Méthode de stabilisation d'Après CURIN et al. 1976.	14
Figure 1-6 Formation d'une Couche d'Eau Diffuse Autour des Particules d'Argile (D'Après LITTLE, 1987)	17
Figure 1-7 Evolution de la Capacité d'Echange Cationique en Fonction de Pourcentage de Chaux. (M.Afés, 2000).	17
Figure 1-8 Effets de la Chaux sur les limites de Consistance (P.SHERWOOD, 1993)	21
Figure 1-9 Effets de la Chaux sur les limites de Consistance (F.G.BELL, 1996)	22
Figure 1-10 Effets de la Chaux sur les limites de Consistance (Z.NALBANTOGLU, 2006)	22
Figure 1-11 Effets de la Chaux sur les limites de Consistance (K.A.KASSIM, et K.K. CHERN 2004)	23
Figure 1-12 Effets de la Chaux sur le Gonflement (LITTLE, 1995)	24
Figure 1-13 Evaluation Pression de Gonflement –Ajut chaux TRB(1987).	25
Figure 1-14 Effets de la Chaux sur le Compactage (S.WILD 1993)	26
Figure 1-15 Effets de la Chaux sur le Compactage (LITTLE, 1995)	27
Figure 1-16 Effets de la Chaux sur le Compactage (F.G. BELL et col.1989 et 1996)	27
Figure 1-17 Effets de la Chaux sur le Compactage (M.AFES G DIDLER 2000)	28
Figure 1-18 Effets de la Chaux sur le Compactage (Z. NALBANTOGLU 2006)	28
Figure 1-19 Effets de la Chaux sur le Compactage (M.C.TONNOZ et al 2006)	29
Figure 1-20 Effets la Chaux sur le CBR	30
Figure 1-21 Effets de la Chaux sur la Résistance (F.G. Bell. (1989 et 1996)	32
Figure 1-22 Effets de la Chaux sur la Résistance (LITTLE, 1995)	32
Figure 1-23 Effets de la Chaux sur la Résistance (M.C.TONNOZ et al, 2006)	33
Figure 1-24 Effets de la Chaux sur la Résistance (Z. NALBANTOGLU, 2006)	33
Figure 1-25 Effets de la Chaux sur la Résistance (K.A.KASSIM et K.K.CHERN, 2004)	34
Figure 1-26 Effets de la Chaux sur la Résistance (MOHAMED.A et col, 2009)	34
Figure 1-27 Effets de la Chaux sur la Résistance (MICHAEL A. MOONEYET et NATHAN M. TOOHEY, 2010)	35
Figure 1-28 Effets de la Chaux sur les Modules d'Elasticités (F.G. BELL et col. 1996)	36
Figure 1-29 Effets de la Chaux sur les Modules d'Elasticités	36

Figure 2-1 Situation Géographique du Gisement de –BENAZZOUZ- SKIKDA	38
Figure 2-2 Analyse Minéralogiques de l'Argile BENAZZOUZ.	40
Figure 2-3 Courbe Granulométrique de l'échantillon	42
Figure 2-4 Limite de Liquidité	43
Figure 2-5 Essai Proctor Normal Argile Non Traitée	45
Figure 2-6 Essai de Compression Simple à 0 % de Chaux	45
Figure 2-7 Cercle de Mohr pour l'Argile de BENAZZOUZ	45
Figure 2-8 Courbe Contrainte-Déplacement Argile Non Traitée à Teneur en Eau Optimale	47
Figure 2-9 Enveloppe de MOHR COULOMB Argile Non Traitée à Teneur en Eau Optimale	48
Figure 2-10 Courbe Indice des Vides – Contraintes	49
Figure 2-11 Méthode d'Eades et Grim	52
Figure 2-12 Appareil X PERT PRO Aux Rayons X	53
Figure 2-13 Matériels de Confection des Eprouvettes	56
Figure 2-14 Appareil de Compression simple	58
Figure 2-15 Appareil de Cisaillement Direct	59
Figure 2-16 Appareil Oedométrique	60
Figure 3-1 Evolution du pH-% de Chaux	62
Figure 3-2 Limite de Liquidité pour l'Argile non Traitée	63
Figure 3-3 Limite de Liquidité Pour l'Argile +2 % Chaux.	64
Figure 3-4 Limite de Liquidité Pour l'Argile + 4% Chaux	64
Figure 3-5 Limite de Liquidité Pour l'Argile +6 % chaux	65
Figure 3-6 Influence du Pourcentage de la Chaux sur les Limites de Liquidité	65
Figure 3-7 Influence du Pourcentage de la Chaux Sur les Limites de Plasticité	67
Figure 3-8 Influence du Pourcentage de la Chaux Sur l'indice de Plasticité	68
Figure 3-9 Influence du Pourcentage de la Chaux sur les Limites d'Atterberg	68
Figure 3-10 Courbe de compactage pour l'argile non traitée.	69
Figure 3-11 Courbe de compactage pour l'argile traitée à 2 % Chaux.	70
Figure 3-12 Courbe de compactage pour l'argile traitée à 4 % Chaux.	70
Figure 3-13 Essai PROCTOR Normal d' Argile Traitée à 6 % Chaux	71
Figure 3-14 Influence de Pourcentage de Chaux sur la Compactage d'Argile	72
Figure 3-15 Evolution de la Masse Volumique Sèche – Teneur en Chaux	72
Figure 3-16 Evolution de la Teneur en Eau – Teneur en Chaux	73
Figure 3-17 Essai de Compression Simple à 0 % de Chaux.	74

Figure 3-18 Essai de Compression Simple à 2 % de Chaux	74
Figure 3-19 Essai de Compression Simple à 4 % de Chaux	75
Figure 3-20 Essai de Compression Simple à 6 % de Chaux	76
Figure 3-21 Essai de Compression Simple à 3 jrs	77
Figure 3-22 Effet de la Chaux sur la Compression Simple à 3 Jours	77
Figure 3-23 Effet de la Chaux sur la Déformation Axiale 3 Jours	78
Figure 3-24 Effet de la Chaux sur le Module d'Elasticité à 3 Jours	79
Figure 3-25 Effet de la Chaux sur la Contrainte à 3 Jours	79
Figure 3-26 Essai de Compression Simple à 7 jrs	80
Figure 3-27 Effet de la Chaux sur la Compression Simple à 7 Jours	81
Figure 3-28 Evolution du Déformation – Teneur en Chaux à 7 Jours	81
Figure 3-29 Effet de la Chaux sur le Module d'Elasticité à 7 Jours	82
Figure 3-30 Effet de la Chaux sur la Contrainte à 7 Jours	82
Figure 3-31 Essai de Compression Simple à 14 jrs	83
Figure 3-32 Effet de la Chaux sur la Compression Simple à 14 Jours	83
Figure 3-33 Evolution du Déformation – Teneur en Chaux à 14 Jours	84
Figure 3-34 Effet de la Chaux sur le Module d'Elasticité à 14 Jours	84
Figure 3-35 Effet de la Chaux sur la Contrainte à 14 Jours	85
Figure 3-36 Essai de Compression Simple à 21 jours	85
Figure 3-37 Effet de la Chaux sur la Compression Simple à 21 Jours	86
Figure 3-38 Evolution du Déformation – Teneur en Chaux à 21 Jours	86
Figure 3-39 Effet de la Chaux sur le Module d'Elasticité à 21 Jours	87
Figure 3-40 Effet de la Chaux sur la Cohésion à 21 Jours	87
Figure 3-41 Essai de Compression Simple à 28 jrs.	88
Figure 3-42 Effet de la Chaux sur la Compression Simple à 28 Jours	88
Figure 3-43 Evolution du Déformation – Teneur en Chaux à 28 Jours	89
Figure 3-44 Effet de la Chaux sur le Module d'Elasticité à 28 Jours	89
Figure 3-45 Effet de la Chaux sur la Cohésion à 28 Jours	90
Figure 3-46 Effet de la Chaux sur la Compression Simple à Différent Temps de Conservation	91
Figure 3-47 Effet de la Chaux sur la Déformation à Différents Temps de Conservation	92
Figure 3-48 Effet de la Chaux sur le Module d'Elasticité à Différents Temps de Conservation	92
Figure 3-49 Effet de la Chaux sur la Cohésion à Différents Temps de Conservation	93
Figure 3-50 Courbe Contrainte - Déplacement 0% de Chaux	94

Figure 3-51 Enveloppe de Mohr - Coulomb Pour 0% Chaux	94
Figure 3-52 Courbe Contrainte - Déplacement 2% de Chaux	95
Figure 3-53 Enveloppe de Mohr - Coulomb Pour 2% Chaux	96
Figure 3-54 Courbe Contrainte - Déplacement 4% de Chaux	97
Figure 3-55 Enveloppe de Mohr - Coulomb Pour 4% Chaux	97
Figure 3-56 Courbe Contrainte - Déplacement 6% de Chaux	98
Figure 3-57 Enveloppe de Mohr - Coulomb Pour 6% Chaux	99
Figure 3-58 Courbe Contrainte -% de Chaux	100
Figure 3-59 Courbe Déplacement-% de Chaux	100
Figure 3-60 Courbe Cohésion - % de Chaux	101
Figure 3-61 Courbe Frottement - % de Chaux	101
Figure F-1 Essai de Compression Simple Argile +2 % CaO à 7 Jours	117
Figure F-2 Essai de Compression Simple Argile +4 % CaO à 7 Jours	117
Figure F-3 Essai de Compression Simple Argile +6 % CaO à 7 Jours	118
Figure F-4 Essai de Compression Simple Argile +2 % CaO à 14 Jours	118
Figure F-5 Essai de Compression Simple Argile +4 % CaO à 14 jours	119
Figure F-6 Essai de Compression Simple Argile +6 % CaO à 14 Jours	119
Figure F-7 Essai de Compression Simple Argile +2 % CaO à 21 Jours	120
Figure F-8 Essai de Compression Simple Argile +4 % CaO à 21 Jours	120
Figure F-9 Essai de Compression Simple Argile +6 % CaO à 21 Jours	121
Figure F-10 Essai de Compression Simple Argile +2 % CaO à 28 Jours	121
Figure F-11 Essai de Compression Simple Argile +4 % CaO à 28 Jours	122
Figure F-12 Essai de Compression Simple Argile +6 % CaO à 28 Jours	122

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 Guide du Choix de la Méthode de Stabilisation	13
Tableau 2-1 Analyse Chimique de l'Argile BENAZOUZZ	39
Tableau 2-2 Analyse Minéralogique - Argile BENAZZOUZ	40
Tableau 2-3 Limites d'Atterberg	43
Tableau 2-4 les Contraintes de Cisaillement pour l'Argile de BENAZZOUZ	47
Tableau 2-5 Composition de la Chaux Vive	50
Tableau 3-1 Evolution du pH - % de la Chaux	62
Tableau B-1 Limites d'Atterberg	111
Tableau C 1 Classification internationale USCS (Unified Soil Classification System) décrite dans la norme ASTM D2487-98	112
Tableau D-1 Essai Œdometrique	114
Tableau E-1 Essai Proctor	115
Tableau F-1 Evolution du Compression Simple – Teneur en Chaux	116
Tableau F-2 Evolution du Déformation - Teneur en Chaux	116
Tableau F-3 Evolution du Module d'Elasticité - Teneur en Chaux	116
Tableau F-4 Evolution du Cohésion - Teneur en Chaux	116
Tableau F-5 Consistance d'Argile	123
Tableau G-1 Essai AU Cisaillement Direct	124

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
Chapitre 1 MÉTHODES DE STABILISATION CHIMIQUE DES SOLS	2
.1.1 INTRODUCTION	2
1-2 TECHNIQUES DE STABILISATION	3
1.2.1 Stabilisation par ajout des matériaux inertes	3
1.2.2 Stabilisation chimique des sols	4
Liants organiques	4
<i>Les produits organiques</i>	4
Les liants hydrauliques	5
Le ciment	5
<i>La chaux</i>	7
<i>Les liants hydrauliques routiers (LHR)</i>	10
<i>Les cendres volantes</i>	11
1.2.3 Sélection du choix de traitement	11
1.3 STABILISATION DES SOLS A LA CHAUX	15
1.3.1 Introduction	15
1.3.2. Mécanismes de réactions sol – chaux	15
<i>Capacité d'échanges cationiques</i>	16
<i>Réactions pouzzolaniques</i>	18
<i>Carbonatation</i>	19
1.3.3 Effets du traitement des sols à la chaux	19
<i>Effets du traitement des sols à la chaux sur les Limites de consistance</i>	20
<i>Effets du traitement des sols à la chaux sur la Texture</i>	23
<i>Effets du traitement des sols à la chaux sur le Gonflement</i>	24
<i>Effets du traitement des sols à la chaux sur Le Compactage</i>	25
<i>Effets du traitement des sols à la chaux sur le C.B.R.</i>	29
<i>Effets du traitement des sols à la chaux sur la Résistance des sols</i>	30
<i>Effets du traitement des sols à la chaux sur Le module d'élasticité</i>	35

Chapitre 2 MATÉRIAUX ET ÉTHODES	37
2.1. INTRODUCTION	37
2.2. MATÉRIAUX	37
2.2.1 L'argile	37
<i>Analyse chimique</i>	38
<i>Analyses minéralogiques</i>	39
<i>Caractéristiques physiques</i>	41
<i>Caractéristiques mécaniques</i>	44
2.2.2 La chaux	50
2.3 MÉTHODES	50
2.3.1 Analyse chimique	50
2.3.2 Analyses minéralogiques	52
2.3.3 Caractéristiques physiques	53
2.3.4 Caractéristiques mécaniques	55
Chapitre 3 ESSAIS ET INTERPRÉTATIONS	61
3.1. INTRODUCTION.	61
3.2. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES.	61
3.2.1. Influence du Pourcentage de la Chaux sur le pH.	61
3.2.2. Influence du Pourcentage de la Chaux sur les Limites d'Atterberg.	62
3.2.3 Influence du Pourcentage de la Chaux Sur le Compactage.	69
3.2.4 Influence du Pourcentage de la Chaux Sur la Compression Simple UCST.	73
3.2.5 Influence du Pourcentage de la Chaux Sur le Cisaillement Direct.	93
CONCLUSIONS	102
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	103
ANNEXE- A- RAPPORT D'ANALYSES MINERALOGIQUE	108
ANNEXE- B- LIMITES D'ATTERBERG	111
ANNEXE- C- CLASSIFICATION DU SOL	112
ANNEXE- D- ESSAI ŒDOMETRIQUE	114
ANNEXE- E- ESSAI PROCTOR	115
ANNEX- F- ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE (UCST)	116
ANNEX- G- ESSAI AU CISAILLEMENT DIRECT	124

INTRODUCTION

L'Est Algérien souffre d'un manque crucial de remblai de sol pour la réalisation des projets routiers. Le cheminement de cette matière à partir des autres wilayas limitrophes revient très couteux et par conséquent augmente le prix de revient des projets. La solution à ce problème est certainement la recherche de matériaux alternatifs en vue de réduire ces couts.

Le site de BENAZZOUZ connu pour ces gisements de produits argileux recèle des quantités importantes de sol utilisé dans l'industrie. L'argile provient du gisement de Si MESSAOUD, situé dans la Daïra de BENAZZOUZ à 48 km au sud Est de la ville de SKIKDA, chef Lieu de Wilaya. Dans ce gisement, les réserves en calcaires pour agrégats ont été estimées à un total de 76 millions de tonnes et les argiles qui sont considérées comme déchets industriel sont estimées à 10 % des réserves. Soit environ 7.6 millions de tonnes. L'argile ne trouve pas preneur et la direction de l'Entreprise Nationale des Granulats a eu l'idée de valoriser ce produit dans les constructions linéaires et résoudre ainsi un problème environnemental due aux énormes dépôts d'argile sur sites. L'université de ANNABA a été appelée à faire une étude géotechnique sur le produit et soumettre des propositions.

Ce présent travail de recherche porte sur cette étude géotechnique pour caractériser cette argile et voir comment améliorer ses propriétés par ajout d'additives en vue de son exploitation dans La construction routière.

Les travaux de recherche dans cette thèse sont présentés sous forme de 3 chapitres en plus de l'introduction et la conclusion

Dans le *chapitre 1*, le candidat expose la revue bibliographique concernant les études de stabilisation des argiles par la chaux. Les résultats des essais de plasticité ; de compactage, de compression simple et de cisaillement direct des travaux antérieurs sont présentés et commentés.

Le *chapitre 2* présente les différentes caractéristiques de l'argile utilisée dans la recherche ainsi que le mode opératoire concernant les différents essais : procédures et techniques employées pour préparer les différentes éprouvettes et les déroulements des essais.

Les résultats des essais entrepris de plasticité, de compactage, de compression simple et de cisaillement à la boîte de Casagrande sur différents échantillons de sol sont exposés au *chapitre 3* en fonction des pourcentages d'ajout de chaux. L'effet du temps de conservation sur la compression simple des éprouvettes de sol préparée a aussi fait l'objet d'une étude.

Chapitre 1

MÉTHODES DE STABILISATION CHIMIQUE DES SOLS

.1.1 INTRODUCTION

Les développements économiques, sociaux et technologiques ont été suivis par un développement du réseau routier dans le monde. En Algérie, par exemple le réseau routier a connu une expansion rapide de réalisation de routes et d'autoroutes. Le rapport établi par le Conseil National Economique et Social (CNES, 2003) évalue le schéma directeur des infrastructures qui représente la configuration du réseau routier et autoroutier à l'horizon 2020 figure 1-1. L'ensemble des aménagements proposés pour la période 2002 - 2020 totalise un linéaire de 12075,5km et touche plusieurs régions du pays. L'autoroute Est Ouest à elle seule s'étale sur une longueur de 1216Km et sera livrée à l'horizon 2010. Dans le rapport est aussi particulièrement mis sur le volume des travaux d'entretien que nécessitent ces projets et les moyens financiers qu'ils demandent. On sait que la réalisation de ces projets exige une quantité des matériaux dits nobles qui doivent satisfaire à des conditions spécifiques de qualité pour assurer la continuité de ces grands projets.

Lors de la construction des routes, on a un problème du manque de matériaux nobles. Par ailleurs, les matériaux locaux disponibles en grandes quantités sont souvent inadéquats ; gonflants, plastiques, pas assez résistants. Et pour être utilisés en se conformant aux exigences spécifiques du projet, ces matériaux nécessitent souvent des traitements ou stabilisations.



Figure 1-1 Développement du Réseau Routier National

1-2 TECHNIQUES DE STABILISATION

Les techniques de stabilisation les plus utilisées qu'elles soient chimiques ou autres dans le domaine routier sont :

- La stabilisation par ajout de matériaux inertes.
- La stabilisation chimique.

Le choix de l'une ou de l'autre de ces méthodes fait appel à plusieurs facteurs tels que la nature du sol, la disponibilité du matériau ou du produit stabilisant, les délais de réalisation du projet, les considérations économiques et les conditions environnementales et de mise en œuvre.

1.2.1 STABILISATION PAR AJOUT DES MATERIAUX INERTES

De nombreuses études scientifiques ont montré qu'on peut stabiliser les sols par ajout de matériaux inertes tels que les sables. Cependant, des cas pratiques de projets de stabilisation par ajout de sable rapportés dans la littérature sont plutôt rares.

DIDIER (1972) a étudié l'influence du sable et de sa granularité sur le potentiel de gonflement.

EL-SOHBY et EL-SAYED (1981) ont été traité les argiles expansives d’Egypte avec du sable et du limon en vue d’étudier l’influence de la finesse des éléments non argileux sur le potentiel et la pression de gonflement.

LOUAFI (1997) a été montré l’effet du sable sur le taux et la pression de gonflement d’une bentonite. Elle a également mis en évidence l’effet marqué de la taille et de la forme des grains qui composent le sable utilisé.

BENGRAA (2004) a étudié l’évolution du potentiel et la pression de gonflement d’une argile par ajout de sable à des granulométries différentes et à différents taux de sable. Il a noté une réduction importante du gonflement.

1.2.2 STABILISATION CHIMIQUE DES SOLS

Elle se base sur l’utilisation de produits chimiques ou de liants afin d’augmenter la concentration ionique de l’eau libre et de réduire les phénomènes d’échange indésirables.

Ils sont deux types :

- Les liants organiques (goudrons, bitume, résine naturelle, polymère)
- Les liants hydrauliques (ciment, chaux, Les liants hydrauliques routiers (LHR), cendres volantes, pouzzolane)

Liants organiques

Les liants organiques sont des produits collants. Lors du malaxage, ils enrobent les particules argileuses et donnent aux sols gonflants des propriétés d’hydrophobes. Ceci entraîne une diminution de l’affinité du sol à l’eau et une modification de sa structure microscopique.

Les produits organiques

L’asphalte est un matériau viscoélastique qui couvre et lie les particules entre elles plus qu’il n’induit de réactions chimiques ou crée des nouveaux composants. Il peut augmenter la résistance et la rigidité et réduire la sensibilité à l’eau des matériaux.

Certains produits organiques sont proposés pour la stabilisation des sols fins. Il s’agit de dérivés aminés tensioactifs, de résines associées à des agents durcisseurs ou d’extraits de

végétaux. Ces produits améliorent les caractéristiques des sols fins en diminuant leur affinité à l'eau, en enrobant leurs particules d'un film tensioactif. Ces additifs sont fournis sous forme de liquide ou de pâte ou de poudre. Ils ont une action d'imperméabilisation qui réduit l'imbibition par capillarité et par succion mais qui ne renforce pas les qualités des sols intrinsèquement faibles. Leur effet à long terme n'est pas assuré. Pour que les dosages ne soient pas excessifs, il faut que le pourcentage d'argile contenu dans les sols traités ne dépasse pas 15%. Les sols qui se prêtent le mieux à ces traitements sont les limons argileux. Les meilleurs produits sont les amines aliphatiques que l'on peut employer pour la protection temporaire des plates formes. En Algérie, des produits hydro phobants ont été utilisés dans le traitement du sable limoneux de la couche de base de l'aérodrome de Tessalit, dans le sud Saharien PELTIER, (1959).

Des produits hydrophiles ont été utilisés dans le traitement des couches de base de GASSI TOUIL (couloir de plus de 300 km qui traverse le grand désert oriental du nord au sud), Les 15 centimètres superficiels du sol ont été traités par des lignosulfites (dosage de 1% en poudre).

Les liants hydrauliques

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

Le ciment

Les ciments sont constitués généralement d'une proportion plus ou moins importante de clinker Portland et de différents autres constituants.

Le clinker est obtenu par la cuisson du cru, à environs de 1450 °C, le cru est composé d'environ 80 % de calcaire et de 20 % d'argile. Au cours de la cuisson, le cru est tout d'abord séché jusqu'à 550 °C, puis décarbonaté à 950 °C et enfin clinkerisation à 1450 °C.

Après refroidissement, et ajout des éventuels constituants d'apport, le mélange est finement broyé et homogénéisé (D_{\max} des grains inférieur à 0,08 mm, surface spécifique comprise entre 2800 et 5000cm²/g). Le produit final est composé de constituants qui, en présence d'eau, se dissolvent quasi instantanément avec formation de précipités de gel de silicates et de ferro-aluminates de calcium. Ce gel s'hydrate progressivement et se transforme en espèces cristallines rigides, résistantes, insolubles et stables, qui agglomèrent les éléments grenus du sol.

Les constituants ajoutés au clinker au moment du broyage sont notamment : des laitiers de hauts-fourneaux, des pouzzolanes, des cendres volantes des centrales thermiques fonctionnant au charbon, des fumées de silice etc., ainsi qu'une proportion de l'ordre de 5 % de gypse destiné à régulariser la cinétique de la prise hydraulique.

En fonction de la composition du ciment et de la composition minéralogique du sol, des réactions chimiques peuvent se produire entre l'hydroxyde de calcium et les silices et alumines solubles présentes dans l'argile donnant une modification de la structure des particules et une augmentation de la résistance au gonflement – retrait. Approximativement après deux heures d'exposition du mélange sol – ciment à l'humidité, la liaison entre particules est faite et le compactage est complet. Une manipulation supplémentaire du matériau traité peut casser les liaisons établies. Le gain en résistance peut continuer encore pendant plusieurs jours. La modification des particules à ce stade du processus de réaction est empêchée par l'état des liaisons.

Le mélange du ciment à l'eau initie un processus chimique l'hydratation qui forme une pâte dure. Quand les particules de ciment subissent l'hydratation, un gel cimentaire fin se forme autour des particules. Puisque le gel cimentaire est poreux et contenant de l'eau de cristallisation, son volume va augmenter plus que celui du ciment avant la réaction. Ainsi, dès que la réaction entre le ciment et l'eau se produit, les vides entre les particules du ciment se remplissent graduellement avec le gel. En même temps, la pâte du ciment augmente de densité et devient plus résistante JANZ, JOHANSSON, (2002).

Comme déjà mentionné, l'action de stabilisation par le ciment est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau et de la température. De plus, la présence de chaux dans le ciment provoque des réactions d'échange. Le ciment est

fréquemment utilisé dans le traitement des sols de surface. Les pourcentages utilisés varient de 2 à 6% THOMAS, (2002).

HAOFENG et al (2009) rapportent que la résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours augmente avec le pourcentage de ciment.

L'ajout de ciment à une argile gonflante augmente sa résistance, diminue sa plasticité et réduit son potentiel de variation de volume. Le ciment augmente aussi la limite de retrait et améliore la résistance au cisaillement du sol traité.

Il a été montré qu'un gain considérable en résistance est souvent enregistré dans les sols traités au ciment seul ou combiné à la chaux AHENBERG et al, (1995) référence citée par JANZ et JOHANSSON, (2002). Le ciment a permis la stabilisation des sols à problèmes contenant les matières organiques et ayant une teneur en eau élevée.

Par ailleurs, plus le sol est argileux, plus le ciment aura du mal à enrober et à lier ses particules. En conséquence, le traitement au ciment seul n'est efficace qu'avec des sols peu argileux. Il faut alors soit prétraiter à la chaux, soit recourir à un liant hydraulique routiers (LHR).

Bien entendu, l'aspect économique peut influencer sur le choix du ciment. À cet égard, le coût de son transport est un facteur essentiel, qui peut conduire à sélectionner un ciment produit par une usine proche du chantier.

La chaux

On distingue plusieurs natures de chaux, selon la composition chimique de la roche d'origine calcique et/ou dolomitique et sa teneur en argile. On parle de chaux aérienne si la roche de base est un carbonate quasiment pur et de chaux hydraulique si elle contient de l'argile jusqu'à 20 %. Les chaux résultant directement de la calcination d'un carbonate sont des chaux vives, celles ayant ensuite subi une hydratation sont des chaux éteintes.

Les chaux dolomitiques, disponibles en bien moindres quantités, ne sont, en pratique, pas utilisées, car ayant une réactivité lente et pouvant créer un risque de gonflement dû aux composés magnésiens.

La chaux calcique aérienne vive

Ce type de chaux dénommé « chaux vive » tout court dans la suite est le premier liant à avoir été utilisé en traitement de sols.

Il s'agissait essentiellement de rendre possibles les terrassements de grands chantiers dans des limons argileux très humides

Les actions immédiates de la chaux vive avec l'eau, est la modification de la structure des particules et l'accroissement de la résistance au gonflement – retrait c'est-à-dire à la sensibilité à l'eau. La modification transforme les sols argileux, ils deviennent friables et facilement compactables. Le séchage des sols humides par ajout de chaux réduit au minimum le retard de la construction dû aux conditions atmosphériques. Ce qui se traduit par des économies du temps et d'argent figure 1-2.et figure 1-3.



Figure 1-2 Sol Avant Traitement



Figure 1-3 Sol Après Traitement

Elle est d'assurer la liaison entre les particules en présence de l'argile et le gain en résistance. Elle réalise la stabilisation des sols en créant des changements chimiques à long terme dans les sols argileux de faible performance. Puisque la modification de la structure des particules se produit lentement en fonction du type d'argile présent dans le sol, une période de maturation de 1 à 4 jours est permise pour obtenir un mélange homogène et friable. Il n'y a pas de limitations dans les spécifications sur le temps pour accomplir le compactage NLA, (2004).

La chaux calcique aérienne éteinte

La chaux éteinte est moins utilisée que la chaux vive. Sa densité foisonnée est sensiblement inférieure à celle de la chaux vive, ce qui rend son transport et sa manutention plus coûteux. De plus, son seul effet d'assèchement est son apport en tant que matière sèche; il est donc très limité.

Les actions immédiates de la chaux éteinte sur les caractéristiques géotechniques sont semblables à celles de la chaux vive. Elles sont simplement moins marquées, car la chaux éteinte n'est pas utilisée avec des sols très humides.

Les chaux hydrauliques

Il n'y a pas, a priori, de contre-indication d'ordre technique à l'utilisation de chaux hydraulique pour le traitement de sols. En pratique, les chaux hydrauliques sont destinées essentiellement au bâtiment et les quantités fabriquées ne sont pas à la hauteur des besoins en matière de traitement de sol.

Les liants hydrauliques routiers (LHR)

Des liants spéciaux routiers (LHR) ont été étudiés et mis au point depuis plusieurs années pour le traitement des sols en place ou en centrale et pour la fabrication de matériaux d'assises de chaussées, le LHR concerné présente, pour un type de sol et une nature d'ouvrage donnés, un comportement satisfaisant, mais toute extrapolation à d'autres paramètres de chantier comporte une part de risque qu'il convient d'évaluer pour chaque nouveau chantier.

Les principes d'action des LHR ne sont pas fondamentalement différents de ceux des ciments car on y retrouve, mais en proportion différentes, les mêmes constituants et donc des phénomènes de prise hydraulique de même nature, mais le plus souvent avec des cinétiques spécifiques.

Les LHR peuvent présenter certains avantages et notamment :

- leur coût de fabrication plus faible, car leur composition est en forte proportion à base de constituants ne nécessitant pas de cuisson spécifique (laitiers, cendres volantes, pouzzolanes, etc.),
- leur possibilité de mieux s'adapter à un cas de chantier particulier. En effet, leur fabrication pouvant être gérée de manière plus souple que celle des ciments, il peut être envisagé, si les enjeux du projet le justifient, de fabriquer un produit optimisé à un sol particulier et ayant une cinétique de prise ajustée à l'époque des travaux et/ou aux contraintes d'organisation du chantier. En contrepartie, l'absence, jusqu'à présent, de normalisation de procédure de certification gêne en partie le développement de ces produits (du fait, notamment, de la nécessité de pratiquer des études plus détaillées qu'avec des ciments).

Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des produits dérivés de la combustion du charbon. Les constituants varient en fonction du mode de combustion qui les a générées. La classe FS Furnace Slag : produit de haut fourneau est une pouzzolane qui requiert souvent un activateur tel que le ciment ou la chaux pour réagir. La classe CS est une combinaison de la pouzzolane et du matériau Self Setting. Quand ils sont combinés à l'eau, des réactions de cimentation se produisent et créent des liaisons entre les particules. En fonction de la composition chimique, on assiste à une modification de la structure des particules, une augmentation de la résistance, une réduction du gonflement-retrait et de la sensibilité à l'eau.

Ces réactions immédiates accélérées par les cendres volantes sont plus lentes que celles obtenues avec le ciment et plus rapides que celles obtenues avec la chaux. Le compactage doit se faire dans les six heures de l'application de la stabilisation.

Pour un sol silteux peu cohérent ou pour reprendre la chaussée sur toute l'épaisseur d'asphalte, des investigations récentes et quelques pratiques récentes ont montré que la stabilisation à la chaux et aux cendres volantes de classe F peut être économiquement utilisée pour réaliser des performances à long terme. Pour les sols appropriés, LFA Lime Fly Ash peuvent offrir des économies en réduisant le coût des matériaux jusqu'à de 50% comparé à la stabilisation au ciment Portland, BEEGLY, (2003).

ZALIHE NALBANTOGLU, (2004) a étudié la stabilisation des argiles gonflantes par les cendres volantes. Il a noté une réduction de l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement avec une amélioration de la texture.

1.2.3 SELECTION DU CHOIX DE TRAITEMENT

Le choix de traitement a été déterminé par les méthodes suivantes :

La figure 1-4 et le tableau 1-1 sont utilisés pour déterminer le choix de la stabilisation hydraulique qui s'indique le mieux pour le traitement des sols ou matériaux. Le choix est basé sur les passants du tamis N° 200 et le pourcentage de sable en poids et l'indice de plasticité.

La figure 1-5 permet ainsi de déterminer le choix de la stabilisation hydraulique, il est basé sur les passants N°200 et l'indice de plasticité.

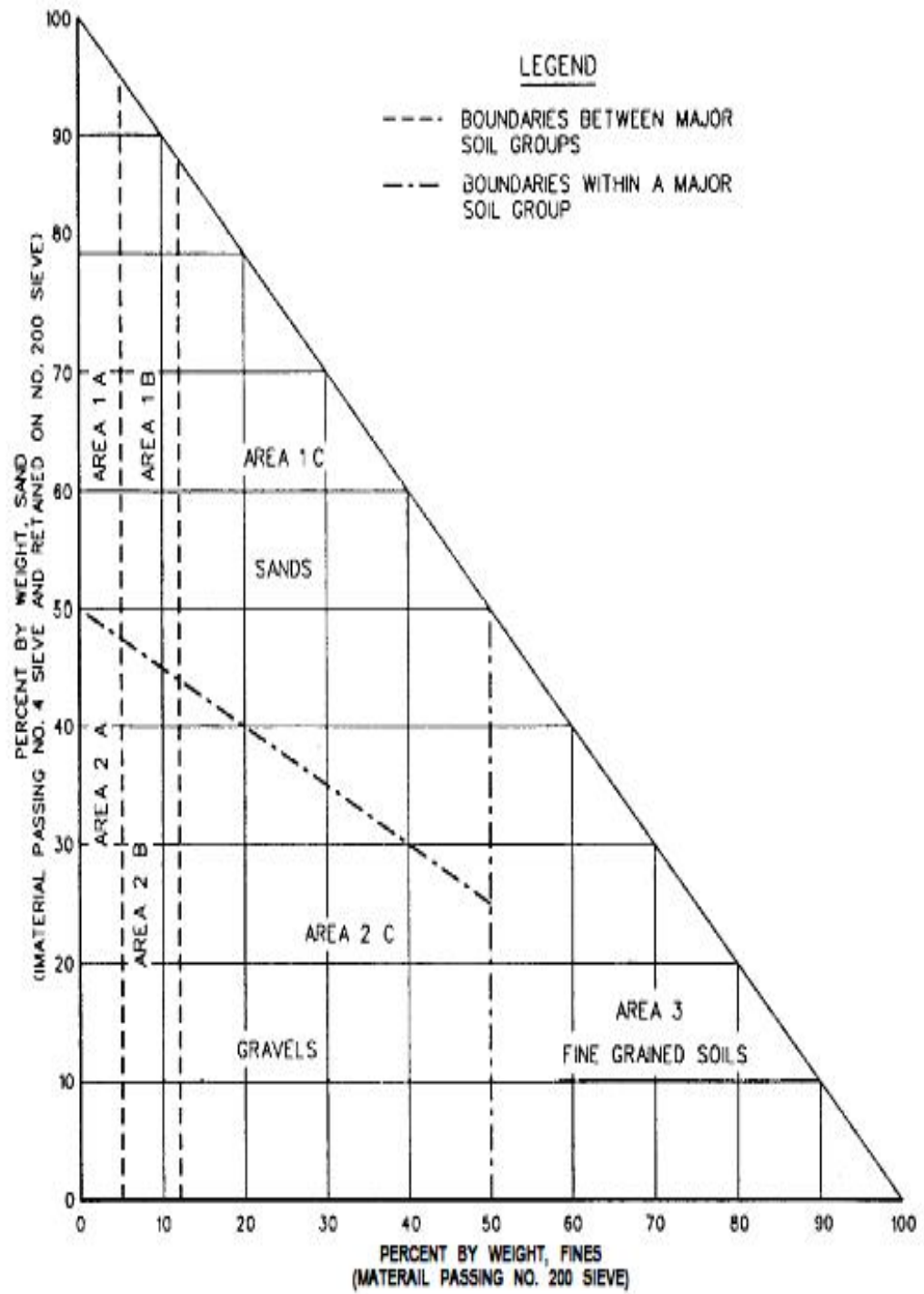


Figure 1-4 Triangle du Choix de la Méthode de Stabilisation

Area	Soil Class. ^a	Type of Stabilizing Additive Recommended	Restriction on LL and PI of Soil	Restriction on Percent Passing No. 200 Sieve ^a	Remarks
1A	SW or SP	(1) Bituminous (2) Portland cement (3) Lime-cement-fly ash	PI not to exceed 25		
1B	SW-SM or SP-SM or SW-SC or SP-SC	(1) Bituminous (2) Portland cement (3) Lime (4) Lime-cement-fly ash	PI not to exceed 10 PI not to exceed 30 PI not to exceed 12 PI not to exceed 25		
1C	SM or SC or SM-SC	(1) Bituminous (2) Portland cement (3) Lime (4) Lime-cement-fly ash	PI not to exceed 10 -- ^b PI not less than 12 PI not to exceed 25	Not to exceed 30% by weight	
2A	GW or GP	(1) Bituminous (2) Portland cement (3) Lime-cement-fly ash	PI not to exceed 25		Well-graded material only Material should contain at least 45% by weight of material passing No. 4 sieve
2B	GW-GM or GP-GM or GW-GC or GP-GC	(1) Bituminous (2) Portland cement (3) Lime (4) Lime-cement-fly ash	PI not to exceed 10 PI not to exceed 30 PI not less than 12 PI not to exceed 25		Well-graded material only Material should contain at least 45% by weight of material passing No. 4 sieve
2C	GM or GC or GM-GC	(1) Bituminous (2) Portland cement (3) Lime (4) Lime-cement-fly ash	PI not to exceed 10 -- ^b PI not less than 12 PI not to exceed 25	Not to exceed 30% by weight	Well-graded material only Material should contain at least 45% by weight of material passing No. 4 sieve
3	CH or CL or MH or ML or OH or OL or ML-CL	(1) Portland (2) Lime	LL less than 40 and PI less than 20 PI not less than 12		Organic and strongly acid soils falling within this area are not susceptible to stabilization by ordinary means

Tableau 1-1 Guide du Choix de la Méthode de Stabilisation

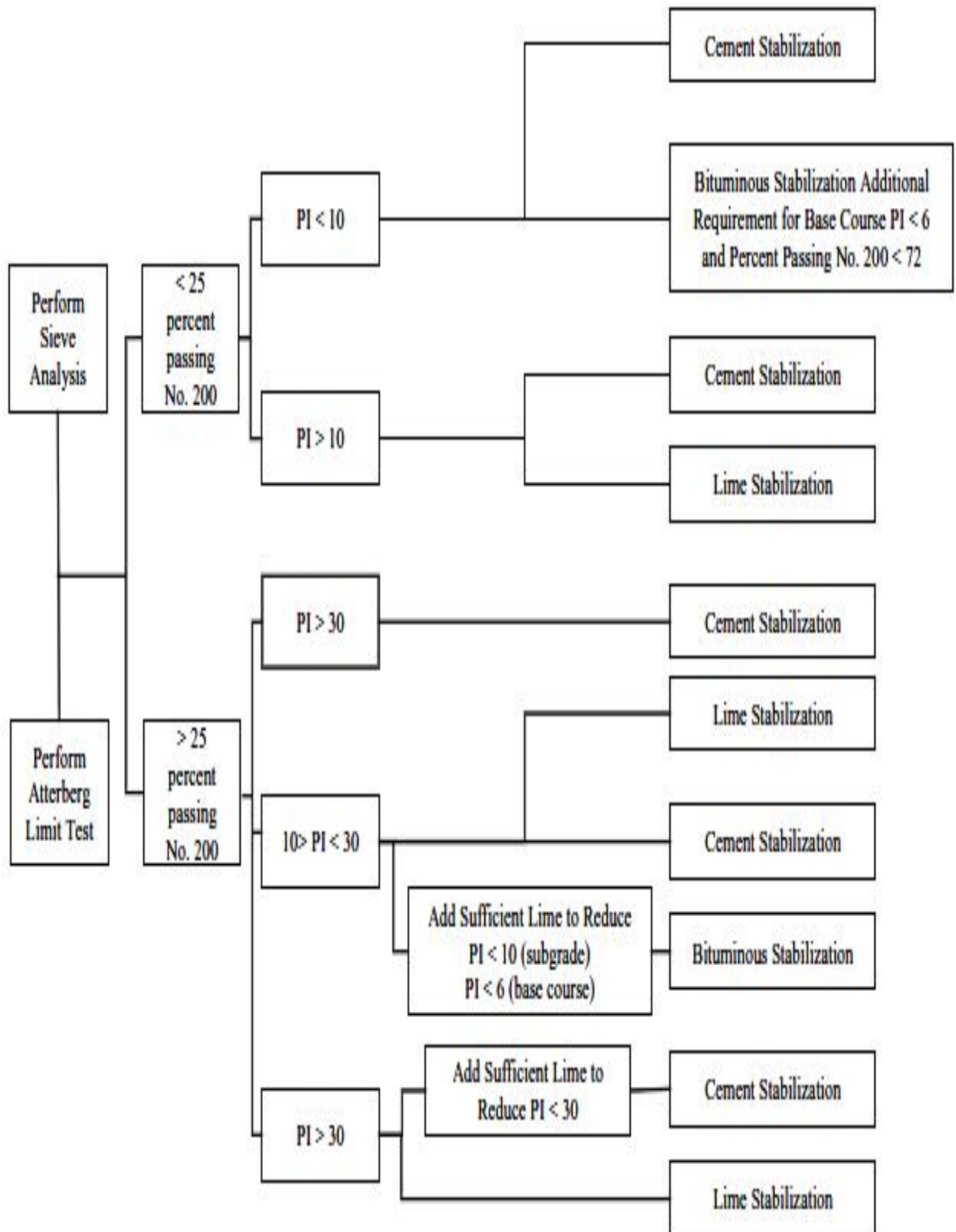


Figure 1-5 Choix de la Méthode de stabilisation d'Après CURIN et al. 1976.

1.3 STABILISATION DES SOLS A LA CHAUX

1.3.1 Introduction

La stabilisation des sols à la chaux est une technique ancienne. Elle a été utilisée dans les voies romaines, l'Egypte, les Grecs, et dans la construction de la muraille de Chine (argile traitée à la chaux). Elle continue à se présenter comme une des meilleures solutions pour les problèmes de portance posés par le sol. Il reste néanmoins que sa plus large utilisation est dans la stabilisation des assises de chaussées (sols supports, couches de base, de fondation, surfaces, canaux de drainage, remblais).

De nos jours, de nombreux comités, des centres de recherche et des associations scientifiques encouragent et financent la recherche sur l'utilisation de la chaux en tant que matériau de construction et encadrent la vulgarisation des nouvelles procédures de stabilisation à la chaux pour assurer une efficacité optimale de durabilité des structures. En 2003, plus de 1,6 millions de tonnes de chaux ont été utilisés dans la stabilisation des sols aux Etats Unis, Miller (2004). La stabilisation des sols à la chaux permet l'amélioration immédiate et dans le temps, des performances des sols traités. ces performances sont obtenues parfois à de très faibles taux de chaux ce qui représente un grand intérêt économique. Les performances se traduisent de manière remarquable sur toutes les caractéristiques du sol traité, à savoir la réduction de la plasticité, du potentiel et de la pression de gonflement, de la densité sèche maximale et de la déformabilité.

1.3.2. Mécanismes de réactions sol - chaux

La chaux est très utilisée pour modifier les propriétés des sols fins et des fractions fines des sols grenus. Elle est plus efficace dans le traitement des sols plastiques capables de prendre une grande quantité d'eau.

Les particules de ces sols argileux ont des surfaces chargées négativement qui attirent les cations libres (les ions chargés positivement) et les dipôles des molécules d'eau. Comme résultat, on obtient de larges couches diffuses d'eau qui se forment autour des particules argileuses, les éloignant ainsi et les rendant instables avec des liaisons plus faibles Ceci dépend de la quantité d'eau présente dans le sol et de la minéralogie et la morphologie des argiles, LITTLE, (1987), et NLA, (2004).

L'ajout de chaux au sol fin déclenche en présence d'eau plusieurs réactions. Les réactions de l'échange cationique et la floculation se produisent rapidement et réalisent des améliorations dans la plasticité, la maniabilité, la résistance et la déformabilité du sol stabilisé.

Des réactions pouzzolaniques peuvent aussi avoir lieu, donnant naissance à des agents de cimentation qui augmentent la résistance et la durabilité du sol stabilisé. Les réactions pouzzolaniques dépendent du temps et de la température ambiante. Les températures élevées (plus de 16°C) accélèrent ces réactions.

La réaction qui peut se produire avec la chaux est la carbonatation. Dans cette réaction, la chaux réagit avec le dioxyde de carbone atmosphérique pour former des carbonates relativement insolubles. Cette réaction est préjudiciable pour le processus de stabilisation et peut être évitée par des méthodes de mise en œuvre adéquates qui minimisent l'exposition de la chaux à l'air et aux chutes de pluie, CHOU, (1987).

Capacité d'échanges cationiques

Selon EADES et GRIM (1960), pratiquement tous les sols fins traités à la chaux, font des réactions d'échange cationique et de floculation – agglomération, en présence d'eau figure 1.6. Cette réaction produit des modifications immédiates dans les propriétés et la structure du sol par échange cationique et par floculation ce qui provoque des améliorations immédiates dans la plasticité du sol, sa maniabilité, sa résistance et sa déformation.

L'ajout de chaux au sol en quantités suffisantes fournit un excès de cations multivalents de calcium qui tendent à remplacer des cations tels que le sodium et le potassium. Ce qui produit une diminution de la taille de la couche d'eau diffuse entourant les particules argileuses et augmente le contact entre elles. Elles s'agglomèrent et leurs tailles augmentent. Ceci transforme le sol argileux humide en un matériau silteux ou sableux, il passe d'un état plastique à un état solide, friable, maniable et perd une partie de sa sensibilité à l'eau.

En général, cette phase de floculation - agglomération de la stabilisation à la chaux, produit des sols faciles à malaxer, à travailler et à compacter. Ces réactions immédiates sont principalement responsables de la réduction du retrait et du gonflement du sol. D'après HOLTZ (1969) l'ajout de 3 % à 5 % de chaux par poids sec de sol est recommandé pour réaliser des changements considérables. Ces réactions d'échange cationique sont réputées être

réversibles. Dans le souci d'évaluer la durabilité des transformations apportées par la stabilité à la chaux, une recherche active s'intéresse actuellement à l'étude du degré de pérennité de ces transformations, KHATTAB et AL MUKHTAR, (2008).

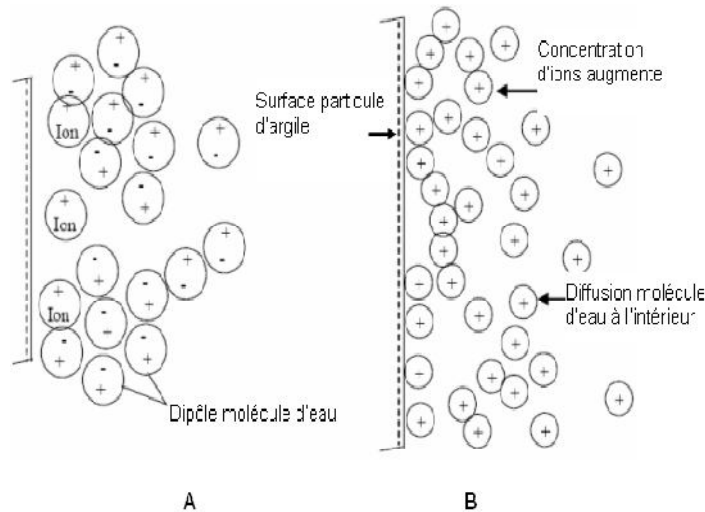


Figure 1-6 Formation d'une Couche d'Eau Diffuse Autour des Particules d'Argile
(D'Après LITTLE, 1987)

D'après M.AFES G DIDLER (2000) figure 1-7, les résultats obtenus, pour les différents échantillons d'argile naturelle et traitée à 3 et 6% de chaux montrent que la CEC diminue légèrement à mesure que le pourcentage de chaux ajoutée augmente. On constate aussi que la CEC pour un même pourcentage de chaux diminue pour des temps de contact longs. La Fig. 1-7 montre l'évolution de la capacité d'échange cationique en fonction du pourcentage de chaux et du temps de cure.

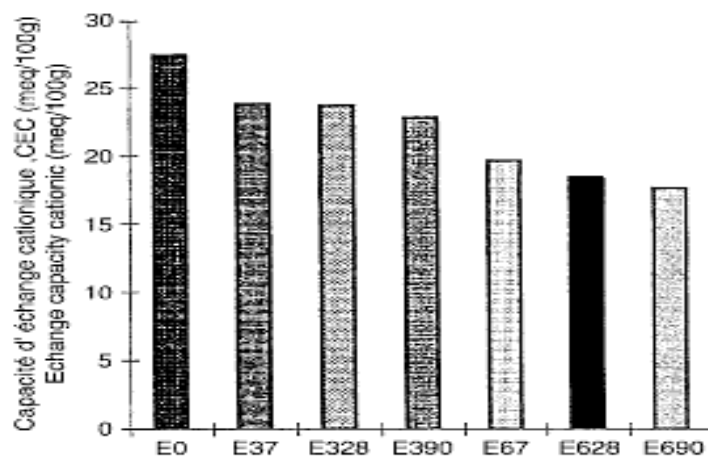
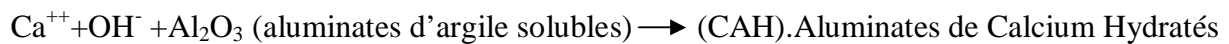
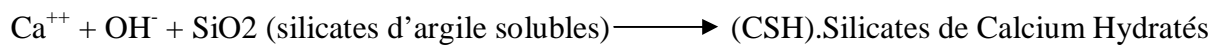
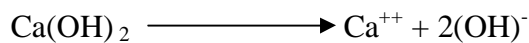


Figure 1-7 Evolution de la Capacité d'Echange Cationique en Fonction de Pourcentage de Chaux. (M.Afés, 2000)

Réactions pouzzolaniques

Cette réaction a lieu entre la chaux, l'eau et les silicates et ou des aluminates des sols argileux pour donner dans le temps, des agents cimentants qui sont essentiellement les silicates de calcium hydratés ou les aluminates de calcium hydratés, similaires à ceux produits durant l'hydratation du ciment portland, TERREL et al, (1979). Les silicates et les aluminates des sols argileux doivent pour ce faire être libérés de leurs liaisons dans les motifs cristallins octaédriques et tétraédriques des minéraux argileux. Ceci est rendu possible par l'augmentation substantielle du pH du milieu, apportée par la chaux qui autorise la dissolution des aluminates et silicates. Ces réactions de cimentation provoquent les augmentations principales de la résistance dans le mélange sol-chaux dans le temps. On observe aussi l'augmentation de la cohésion, de l'indice CBR, l'amélioration de la perméabilité des argiles, la diminution des variations volumiques pour les argiles gonflantes et le renforcement de la structure due aux phénomènes de prise et de cristallisation. La réaction pouzzolanique de base est illustrée par les équations suivantes :



Quand une quantité suffisante de chaux est rajoutée au sol, le pH du mélange augmente et quand il atteint 12,4 (pH de la chaux saturée), les silicates et les aluminates des argiles deviennent potentiellement solubles et se détachent du minéral argileux. Ils réagissent alors avec le calcium de la chaux pour former des ciments qui se consolident dans un processus graduel qui peut durer plusieurs années, EADES et GRIM, (1960).

Tant qu'il y a suffisamment de calcium pour réagir avec les silicates et les aluminates, la réaction pouzzolanique continue aussi longtemps que le pH demeure suffisamment élevé pour maintenir la solubilité des silicates et aluminates, LITTLE, (1987). La quantité de chaux nécessaire pour cet objectif dépend des caractéristiques des sols et de la résistance exigée. En général, elle varie de 3 à 8 %.

Il est important de rappeler que le gain en résistance dépend aussi de la quantité des silicates et des aluminates dans l'argile traitée. Ainsi, il a été prouvé que la stabilisation à la

chaux est plus efficace dans les sols montmorillonitiques que kaolinitiques, LEES et al, (1982).

Dans la plupart des cas les sols sableux sont stabilisés au ciment alors que les sols argileux sont stabilisés à la chaux, les sols argileux intermédiaires sont d'abord traités à la chaux ensuite au ciment pour augmenter leur résistance. Lorsque le sol stabilisé ne contient pas une quantité suffisante de silicates et aluminates, des matériaux pouzzolaniques, tels que les cendres volantes sont quelques fois adjoints à la chaux pour améliorer la résistance du sol.

Carbonatation

Simultanément avec la réaction pouzzolanique, la réaction de carbonatation peut aussi mener à une augmentation de résistance à long terme dans les sols stabilisés à la chaux. La carbonatation se produit quand la chaux réagit avec le dioxyde de carbone dans l'air pour produire un carbonate de calcium relativement insoluble. Cette réaction peut être avantageuse et mener à une augmentation de résistance à long terme, ARMAN et MUNFAKH, (1970) cité par CRISTOPHER, (2005).

Cependant, il est recommandé qu'avant le mélange, l'exposition de la chaux à l'air doit être évitée par des méthodes de mise en œuvre adéquates, CHOU, (1987).

D'après JAGANNATH (2004) cette réaction serait indésirable car la chaux réagit avec le dioxyde de carbone au lieu des cimentants CAH et CSH citée par, JANZ et JOHANSSON, (2002).

1.3.3 Effets du traitement des sols à la chaux

Les effets immédiats sont réalisés dans la première phase de la stabilisation. Ils sont atteints rapidement et sans cure. Ils sont le résultat de l'échange cationique et les réactions de floculation qui se produisent dès que le sol est mélangé à la chaux en présence d'eau. Ils sont d'un intérêt principal durant la phase de construction des chaussées.

En revanche, les effets à long terme, appelés effets de stabilisation, s'amorcent durant la construction et continuent dans le temps. Ils concernent la résistance et la durabilité. Bien que ces effets soient générés par l'échange cationique et la floculation, ils sont principalement le résultat du gain de la résistance pouzzolanique.

Effets du traitement des sols à la chaux sur les Limites de consistance

Les modifications obtenues dans les limites de consistance sont immédiates. Ces changements dépendent surtout du minéral argileux. P.SHERWOOD, (1993) figure 1-8, F.G.BELL, (1996) figure 1-9 et Davidson et HILT, (1960) confirment que les ions de calcium provenant de la chaux sont à l'origine de la réduction de la plasticité des sols cohérents, les rendant friables et faciles à manipuler à placer et à compacter. Ce constat a été confirmé également par les travaux de LEROUX et RIVIERE, (1969), avec 3% de chaux, ils ont obtenu des résultats rapides et importants.

Z.NALBANTOGLU (2006) figure 1-10 et F.G.BELL (1989 et 1996) ont été montrée que la limite de liquidité diminue après le traitement des sols par la chaux, pour la Kaolinite, elle reste inchangée et augmente parfois. Ce résultat a été aussi observé par BRANDL (1981).

F.G. BELL (1989 et 1996), a été constaté que l'augmentation la plus importante de la limite de plasticité des sols traités à la chaux est obtenue dans les sols à composante montmorillonitique prédominante. En effet, la limite de plasticité varie avec l'ajout de chaux jusqu'à un taux limite appelé « point de fixation de chaux ». Au-delà de ce taux les variations des limites de consistance sont très faibles. Ces résultats ont été aussi observés par Z.NALBANTOGLU (2006), K.A.KASSIM, et K.K. CHERN (2004) figure 1-11, HILT et DAVIDSON, (1960).

Une réduction de l'indice de plasticité : Elle est le résultat de la réduction de la limite de liquidité et l'augmentation de la limite de plasticité.

LAZZALI (1997) a été traité une bentonite très plastique à la chaux et a montré qu'un dosage inférieur à 4% est suffisant pour réduire de manière significative la plasticité. L'indice de plasticité a diminué presque de 80%.

La réaction rapide qui se produit avec l'ajout de chaux aux sols argileux (montmorillonitiques) diminue remarquablement l'indice de plasticité et augmente aussi rapidement la limite de retrait HOLTZ (1969).

Une augmentation de la limite de retrait : Les caractéristiques du retrait des sols argileux sont améliorées aussi, par l'ajout de chaux, Des argiles testées par l'USBR (US Bureau of Reclamation) (1975) ont vu leur indice de retrait augmenter de 7 à 26%.

La stabilisation des sols argileux par ajout de chaux est utilisée aussi pour limiter la variation de volume ou modifier les caractéristiques de la variation de volume de ces sols

L'indice de plasticité et la limite de retrait sont de très bons indicateurs du potentiel de gonflement d'un sol.

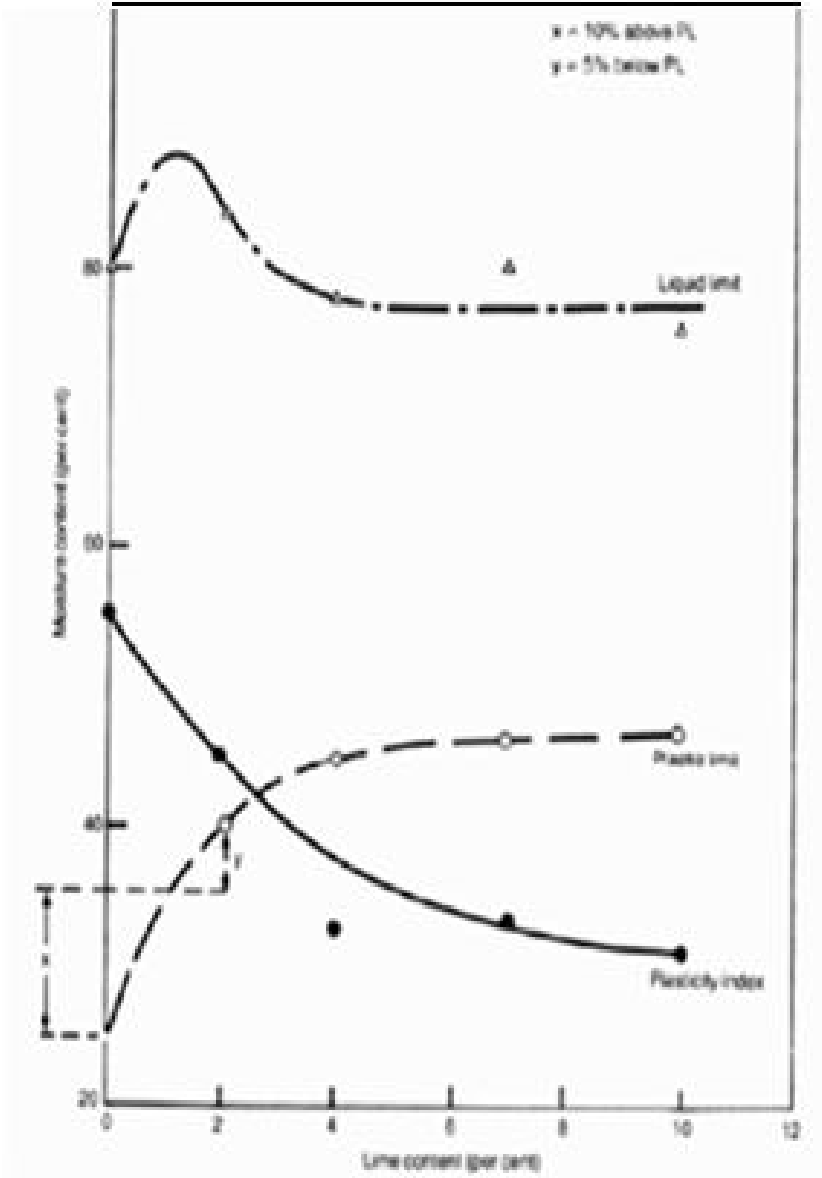


Figure 1-8 Effets de la Chaux sur les limites de Consistance (P.SHERWOOD, 1993)

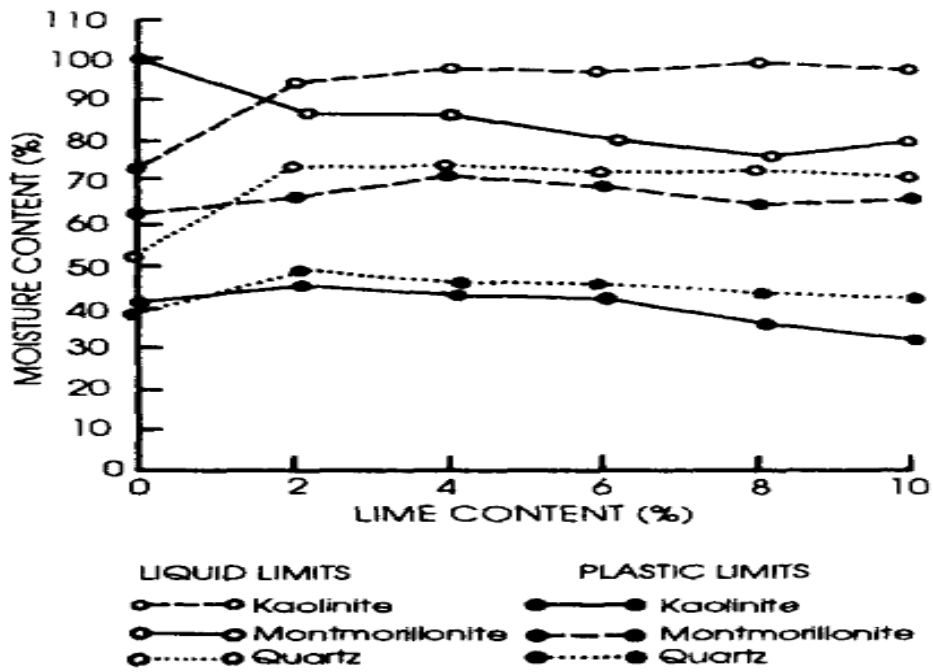


Figure 1-9 Effets de la Chaux sur les limites de Consistance (F.G.BELL, 1996)

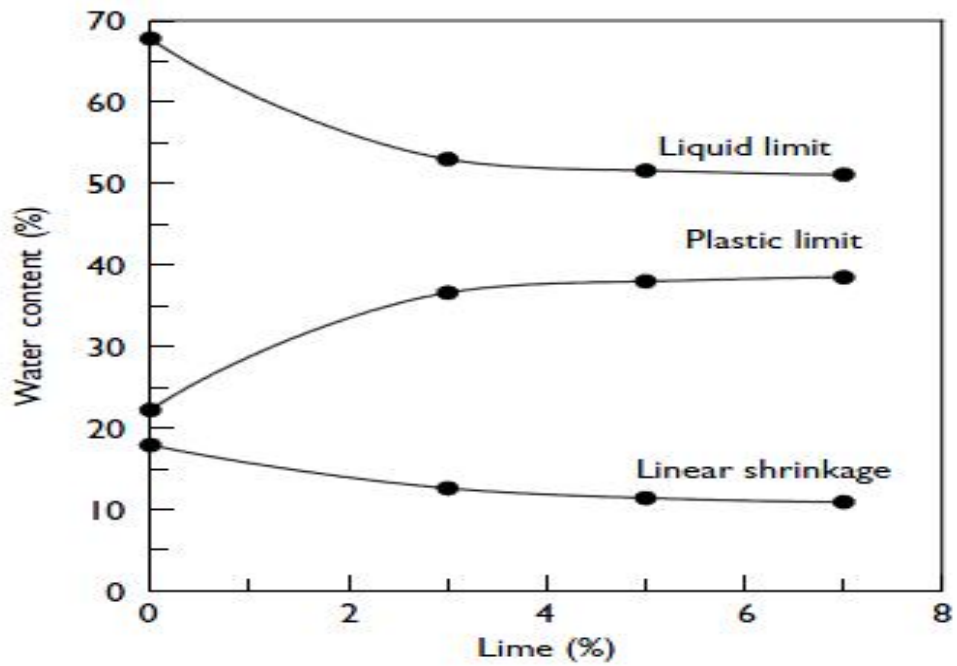
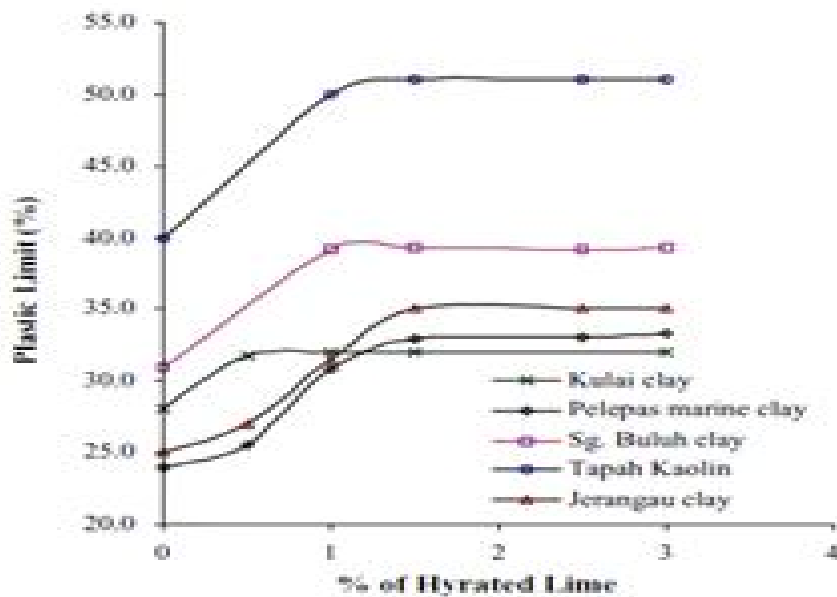


Figure 1-10 Effets de la Chaux sur les limites de Consistance (Z.NALBANTOGLU, 2006)



Lime fixation capacity of various types of materials with different additions of lime.

Figure 1-11 Effets de la Chaux sur les limites de Consistance

(K.A.KASSIM, et K.K. CHERN 2004)

Effets du traitement des sols à la chaux sur la Texture

La texture subit une modification rapide, elle devient grenue. Ce phénomène est le résultat de la floculation des particules fines qui s'agglomèrent suite à l'altération des couches d'eau adsorbée par la présence des ions de calcium.

La nature de cation échangeable ne fait pas beaucoup de différence dans les argiles kaolinitiques mais elle peut avoir un effet significatif sur les sols qui contenant la montmorillonite. En effet, les argiles gonflantes tendent à réagir aisément avec la chaux, avec une diminution immédiate de la plasticité F.G. BELL, (1996).

Les particules d'argile sont entourées par double couche hydrique qui sera modifié par l'échange ionique de calcium. Cette modification change la charge électrique autour des particules qui produit une attraction entre ces particules pour former « une floculation ». La floculation est le premier responsable de la modification des propriétés des sols argileux traités à la chaux P.SHERWOOD, (1993) F.G. BELL, (1996).

Effets du traitement des sols à la chaux sur le Gonflement

Le potentiel et la pression de gonflement du sol traité à la chaux subissent une forte réduction. En effet la réduction de l'indice de plasticité dans pratiquement tous les sols fins stabilisés à la chaux est un bon indicateur de la réduction du potentiel de gonflement. La relation entre l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement est illustrée dans la figure 1.12 de LITTLE, (1995). Dans cette figure, le pourcentage du gonflement est défini comme le changement de volume subi par le sol quand la teneur en eau augmente jusqu'à la saturation.

La figure 1.13 montre la variation de la pression de gonflement en fonction de la densité sèche du matériau pour différents dosages en chaux d'après TRB(1987).

Dans son travail sur le traitement de la bentonite à la chaux, LAZZALI, (1997) a trouvé que 2% de chaux fait chuter le potentiel de gonflement de 79% à 22%. Le taux de 8% considéré comme optimal donne une valeur de 7,83%. La pression de gonflement passe de 6,5 bars à 1 bar à partir de 6% de chaux.

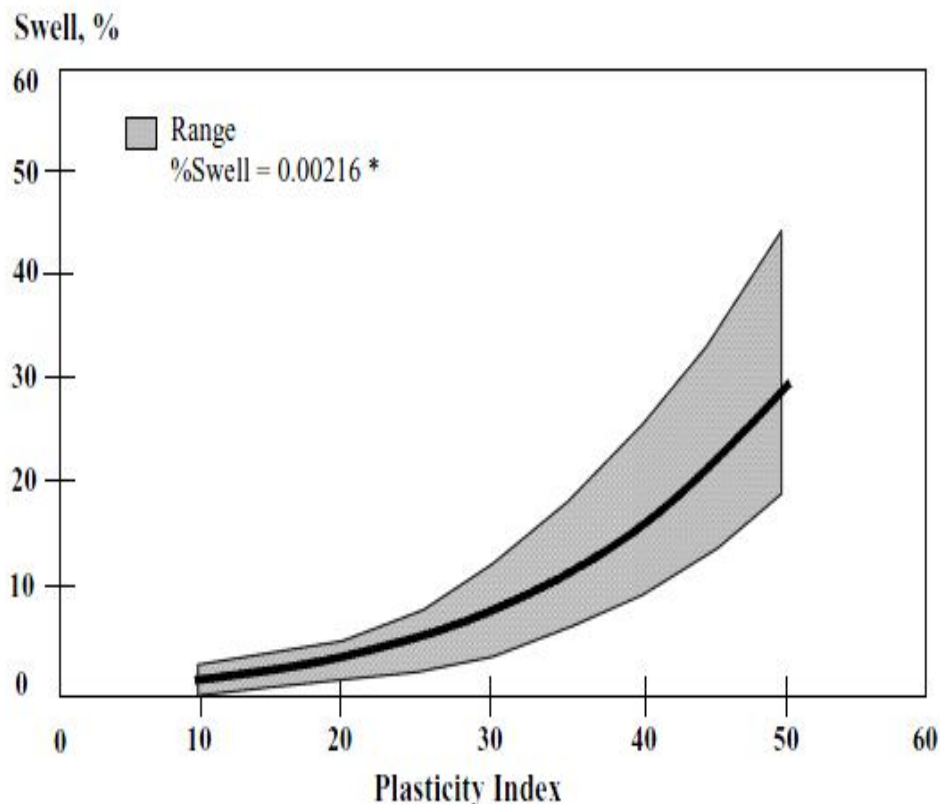


Figure 1-12 Effets de la Chaux sur le Gonflement (LITTLE, 1995)

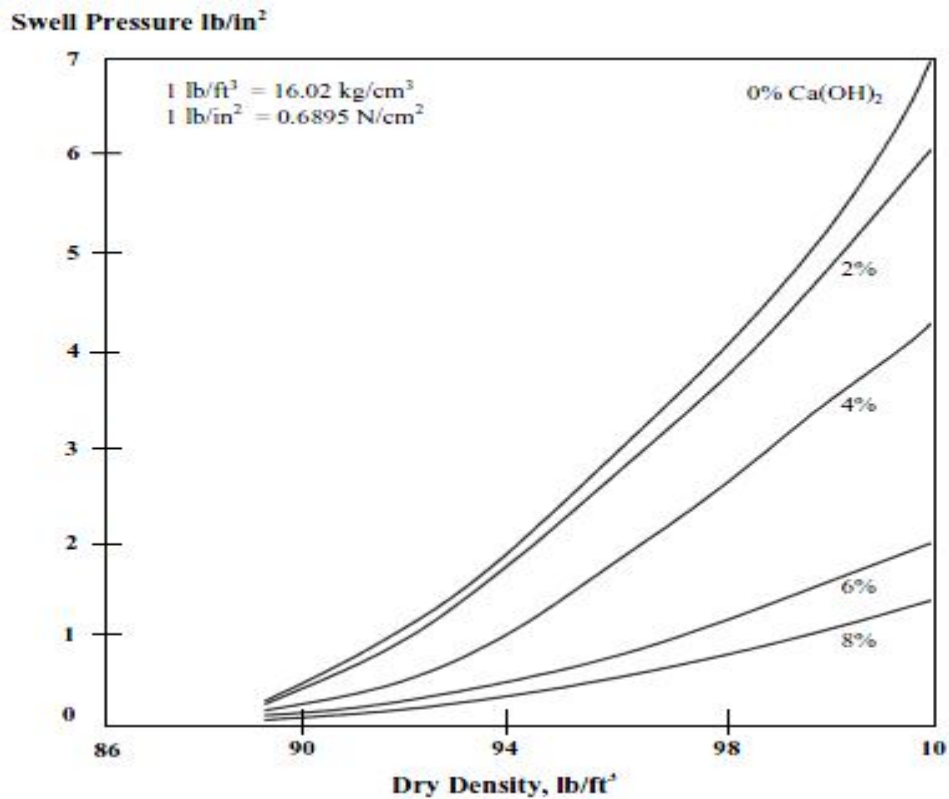


Figure 1-13 Evaluation Pression de Gonflement – Ajust chaux TRB(1987).

Effets du traitement des sols à la chaux sur Le Compactage

La relation entre la densité sèche et la teneur en eau du sol traité est modifiée, comme effet de l'ajout de chaux. Le changement reflète la nouvelle nature du sol qui est marquée par une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche maximale M.R.ABDI et S.WILD (1993) figure 1-14.

Le compactage des sols stabilisés à la chaux est plus facile que celui des sols stabilisés au ciment. Le retard est moins critique BELL, (1989). Le traitement à la chaux aplatit la courbe de compactage ce qui offre un large intervalle pour le choix des teneurs en eau optimales pour une densité donnée Ces résultats ont été aussi observé par LITTLE, (1995) figure 1-15,.F.G. BELL (1996) figure 1-16, M.AFES G DIDLER (2000) figure 1-17, Z. NALBANTOGLU (2006) figure 1-18, et M.C.TONOZ et al (2006) figure 1-19 La qualité est mieux assurée par le contrôle de la teneur en eau que par la densité sèche.

La teneur en eau atteint des valeurs plus grandes, permettant aux sols se trouvant dans des conditions plus humides que d'origine, d'être compactés de manière satisfaisante.

La conception des sols stabilisés à la chaux doit tenir compte des changements dans les optima de compactage. Ces changements sont en fait, proportionnels aux quantités de chaux et sont largement compensés par le gain en résistance ANDREWS et O. FLAHERTY (1968) affirment que la réduction de la densité dépend non seulement du pourcentage de chaux mais aussi de la quantité des minéraux d'argile présents.

Par exemple, la teneur en eau optimale augmente avec la quantité de la fraction argileuse alors que la densité sèche maximale diminue. LEES et ALL (1982) ont montré que pour 30 à 50% de teneur en argile, l'ajout de chaux entraîne une baisse de 5% de la valeur de la densité sèche maximale. De plus, à des teneurs en eau élevées, les mélanges sols chaux montrent une meilleure compactibilité que celle des sols non traités.

THOMPSON et HARTY (1973) ont confirmé que l'effet de la chaux diminue lorsque le temps d'attente entre l'opération du mélange et celle du compactage augmente. Un processus de carbonatation prend place et les particules cimentées se comporteront comme des grains de sable.

La montmorillonite et la kaolinite donnent une plus haute résistance avec la chaux que l'illite, le chlorite ou la halloysite. Les argiles expansives répondent plus rapidement à l'augmentation de la résistance, quoique la résistance finale réalisée soit plus grande dans les argiles kaoliniques.

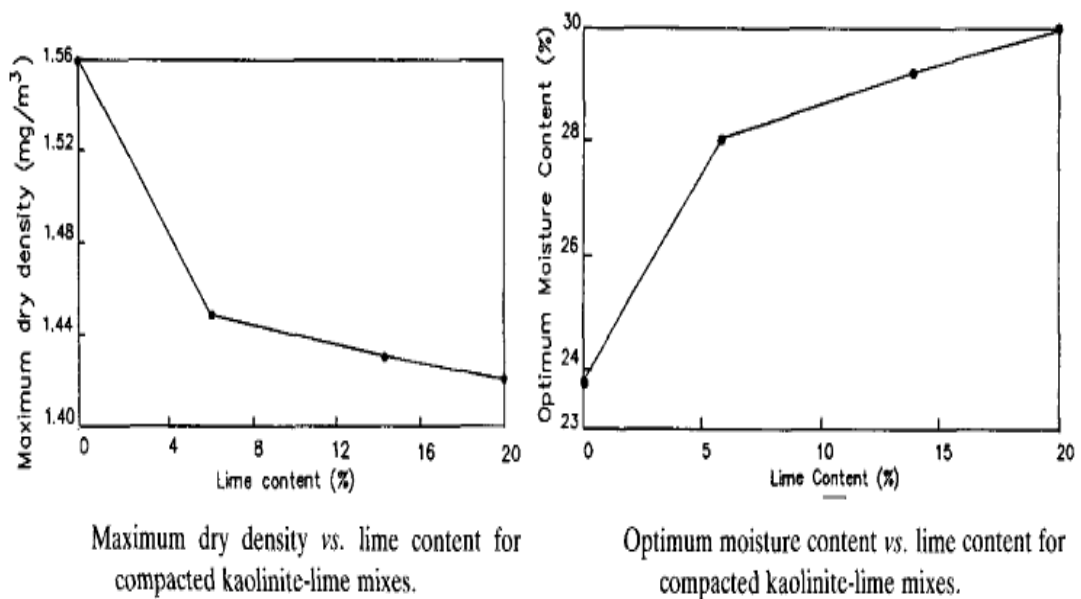


Figure 1-14 Effets de la Chaux sur le Compactage (S.WILD 1993)

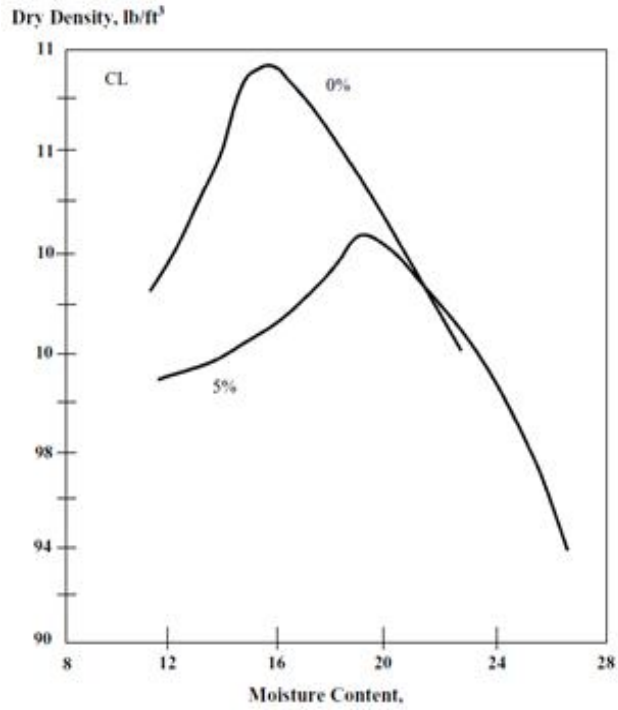


Figure 1-15 Effets de la Chaux sur le Compactage (LITTLE, 1995)

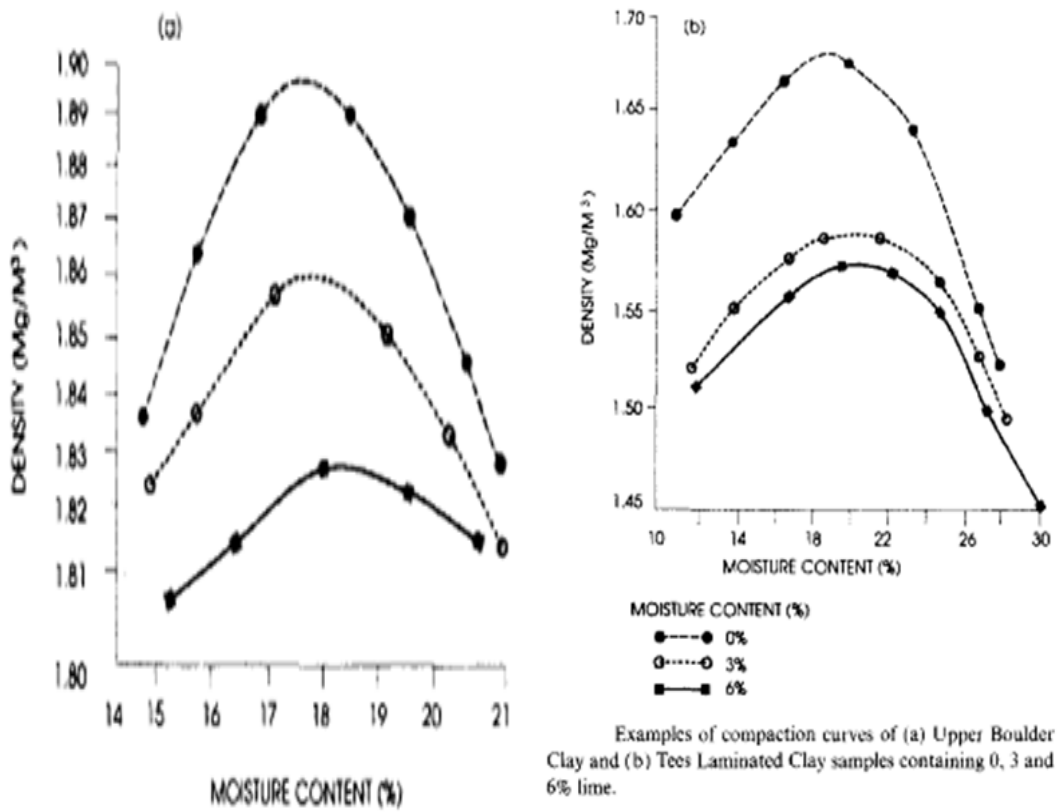


Figure 1-16 Effets de la Chaux sur le Compactage (F.G. BELL et col.1989 et 1996)

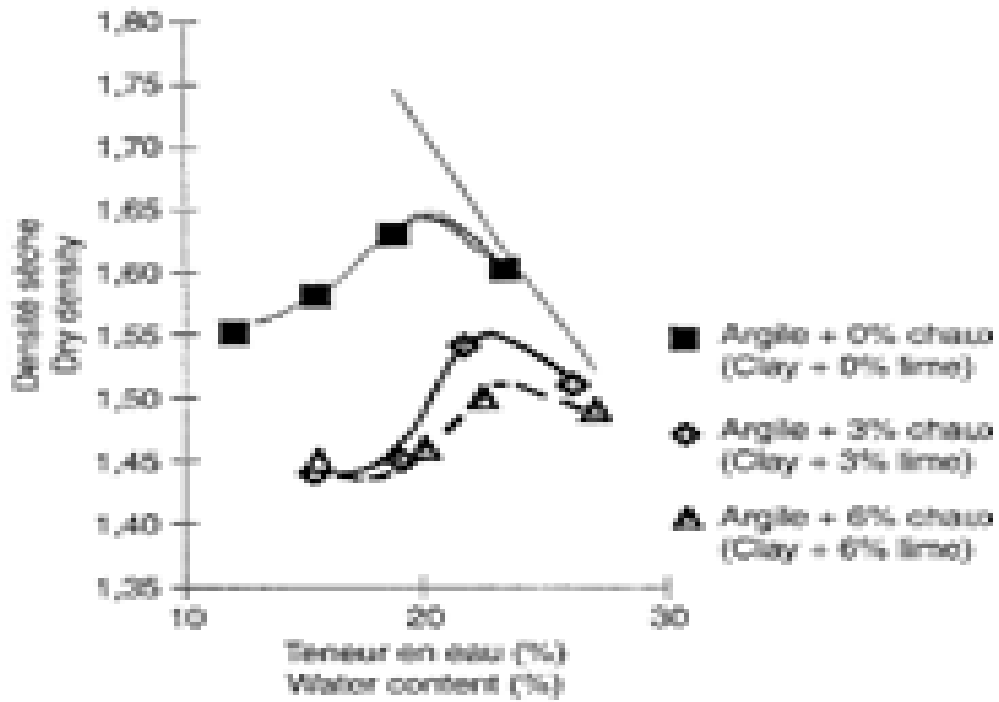


Figure 1-17 Effets de la Chaux sur le Compactage (M.AFES G DIDLER 2000)

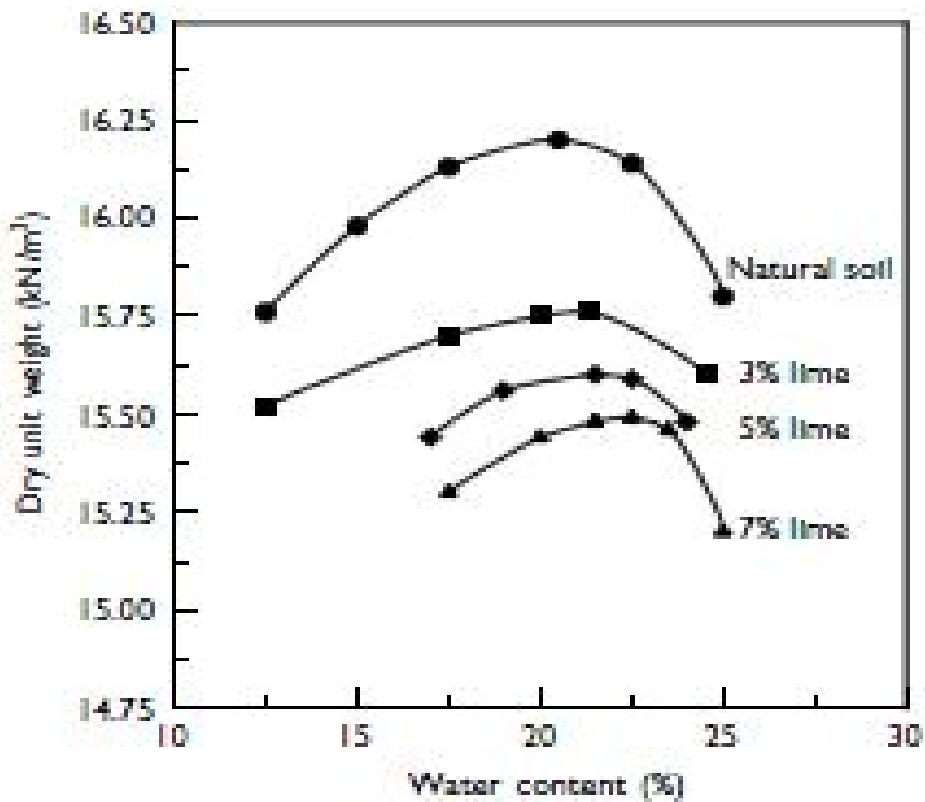


Figure 1-18 Effets de la Chaux sur le Compactage (Z. NALBANTOGLU 2006)

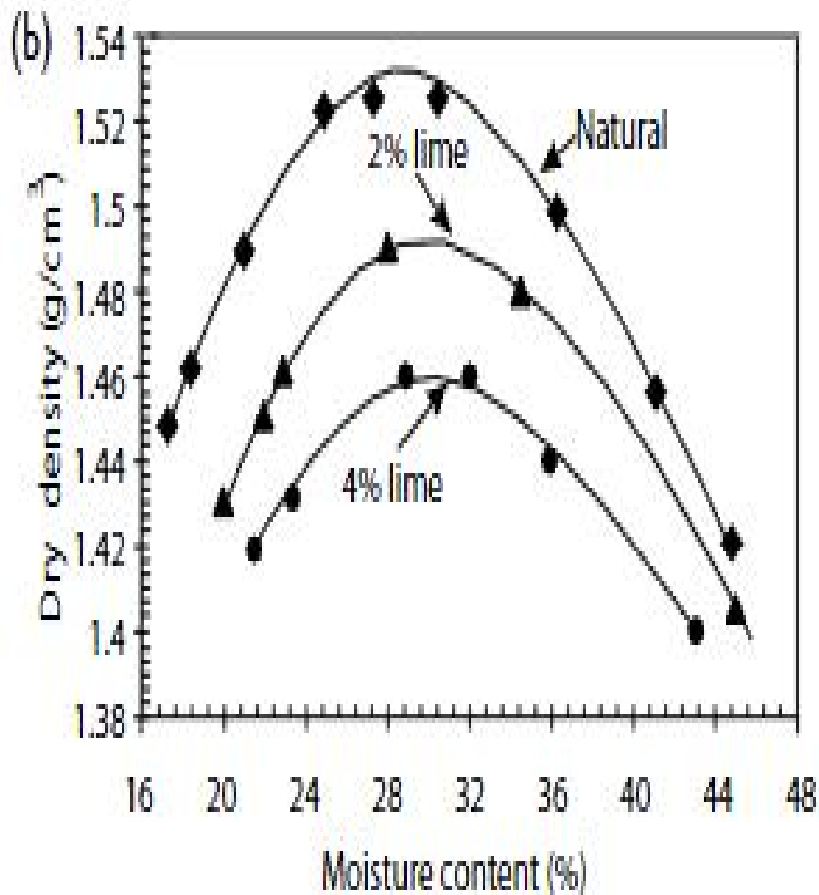


Figure 1-19 Effets de la Chaux sur le Compactage (M.C.TONNOZ et al 2006)

Effets du traitement des sols à la chaux sur le C.B.R.

Le CBR (Californian Bearing Ratio) des sols argileux est amélioré par l'ajout de chaux, En effet, le CBR est amélioré immédiatement après l'addition de chaux et continue à augmenter dans le temps. Cette augmentation est possible avec l'excès de chaux présent dans le sol, au delà du point de fixation de chaux F.G. Bell. (1989 et 1996) Un exemple illustrant ce résultat est donné dans la figure 1.20 cité par MARSHALL R. THOMPSON, (2005).

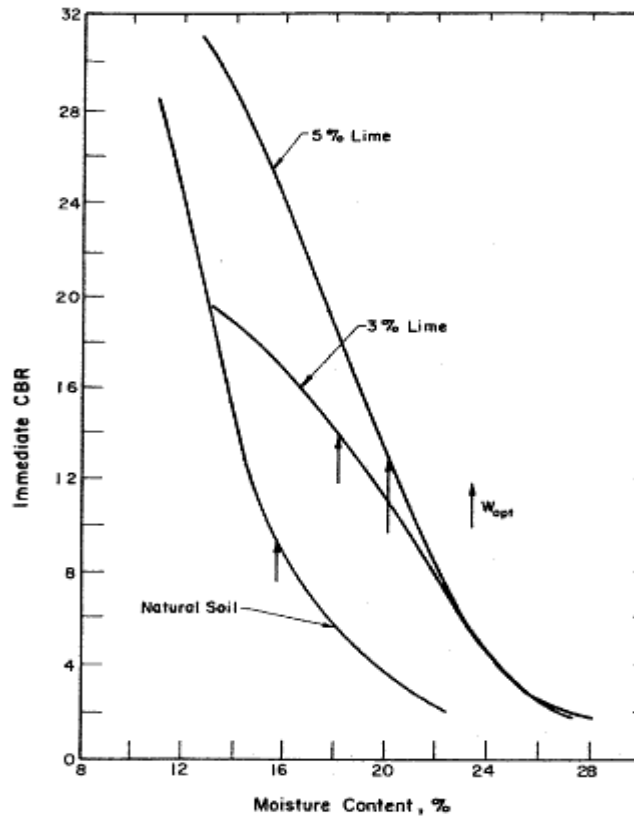


Figure 1-20 Effets la Chaux sur le CBR. (MARSHALL R. THOMPSON, 2005).

Effets du traitement des sols à la chaux sur la Résistance des sols

L'effet de l'ajout de chaux aux sols argileux se manifeste par des améliorations dans les propriétés de déformation et de résistance. Ces améliorations, qui sont en grande partie, le résultat de la floculation des particules, facilitent la circulation des engins et offrent une plate forme stable de travail pour tous les équipements de la construction.

Dans de nombreux cas, une petite quantité d'argile est suffisante pour que le sol réagisse avec la chaux. Ce point de vue est soutenu par THOMPSON et HARTY (1973), qui par des études de la réactivité de la chaux ont conclu que la teneur en argile n'est pas corrélée avec la réactivité de la chaux. Il est apparent alors que la quantité absolue d'alumine et de silice exigée pour assurer les réactions pouzzolaniques dans le sol est relativement faible.

La résistance des mélanges sol chaux, est influencée par plusieurs facteurs tels que le type de sol, le type de chaux et la quantité utilisée, le temps de cure et la température, la teneur en eau, le poids unitaire, le temps écoulé entre le malaxage et le compactage. Ceci a été illustré par INGLES et METCALF (1972) qui ont noté que les argiles montmorillonitiques

donnent de plus faibles résistances avec la chaux dolomitiques qu'avec des chaux semi hydrauliques ou à haute teneur en calcium. D'un autre côté, l'argile kaolinitique produit de plus hautes résistances avec les mélanges à la chaux semi hydraulique et de plus faibles résistances sont obtenues avec la chaux à haute teneur en calcium.

La modification de la résistance est affectée par le taux de chaux et le temps. Les performances à long terme des chaussées stabilisées à la chaux ont aussi été validées Kentucky Transportation Center, (2002).

La figure 1.21 montre l'augmentation de la résistance du sol traité à la chaux avec le temps. F.G. Bell, (1989 et 1996), Ces résultats ont été aussi observé par LITTLE, (1995) figure 1-22, M.C.TONNOZ et al, (2006) figure 1-23, Z. NALBANTOGLU, (2006) figure 1-24, K.A.KASSIM et K.K.CHERN, (2004) figure 1-25, MOHAMED.A et col, (2009) figure 1-26, MICHAEL A. MOONEYET et NATHAN M. TOOHEY, (2010) figure 1-27.

LAGUROS et al, (1956) ont montré que la résistance d'un sol stabilisé croît rapidement notamment les 7 premiers jours de cure, ensuite elle augmente plus lentement à un taux plus ou moins constant pendant 15 semaines environ. Ceci soutient l'idée que des produits de cimentation dus à la réaction entre la chaux et l'argile sont formés dans un premier temps dès que la floculation est terminée LEES et al, (1982).

Certes, un gain lent et constant dans la résistance après des mois est une caractéristique des sols stabilisés à la chaux. BRANDL, (1981) a observé que l'augmentation de la résistance a diminué en une année ou deux et que des changements n'ont pas eu lieu même dans les argiles actives après sept ans. Il soutient en plus que l'augmentation de la résistance en fonction du temps est approximativement linéaire avec le logarithme du temps.

Ce gain lent et uniforme dans la résistance fournit un facteur de sécurité considérable pour les conceptions basées sur les résistances à 7, 14 ou 28 jours BELL, (1988).

LAGUROS et al, (1956) ont trouvé que 90% d'humidité relative donne la plus grande résistance finale en comparaison à des conditions de cure différentes et ont rapporté également que de plus hautes températures accélèrent le traitement et donnent de plus grandes résistances. Ceci a été confirmé par MATEOUS, (1964) et MARKS et HALIBURTON, (1972). Par exemple, MATEOUS, (1964) a trouvé que les échantillons traités à 35°C ont

développé deux fois ou plus de résistance que ceux traités à 25°C. Le même constat a été fait par RIVIERE et LEROUX, (1969).

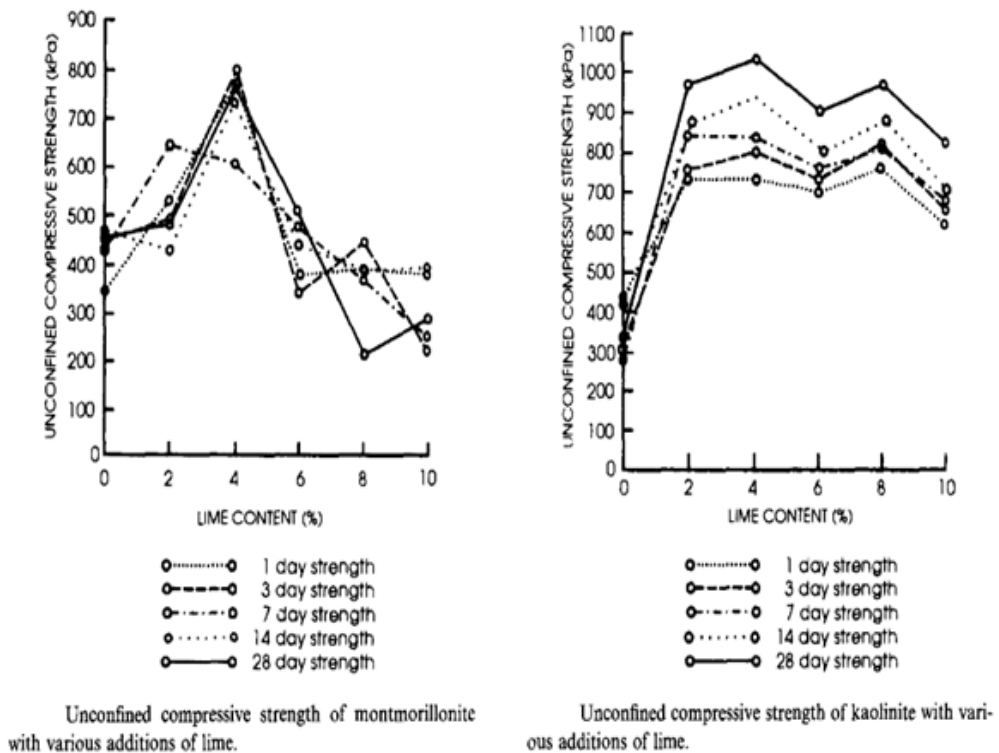
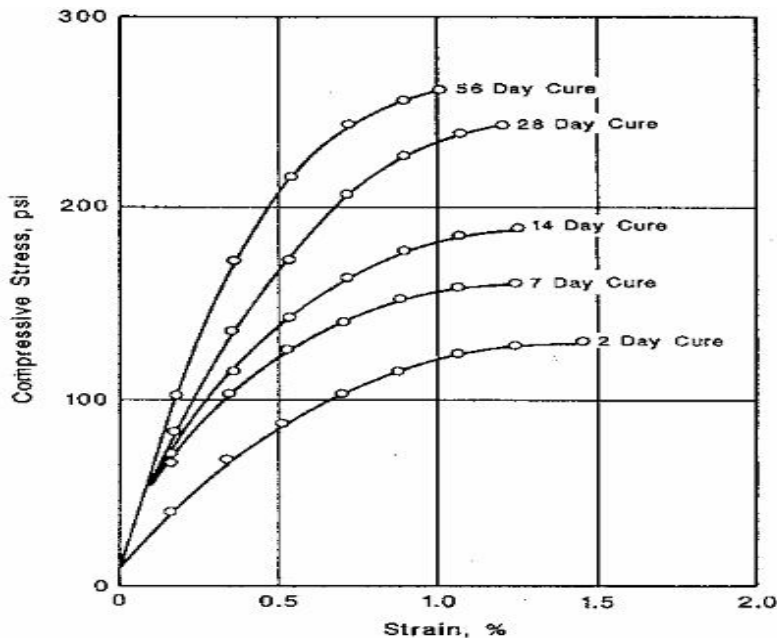
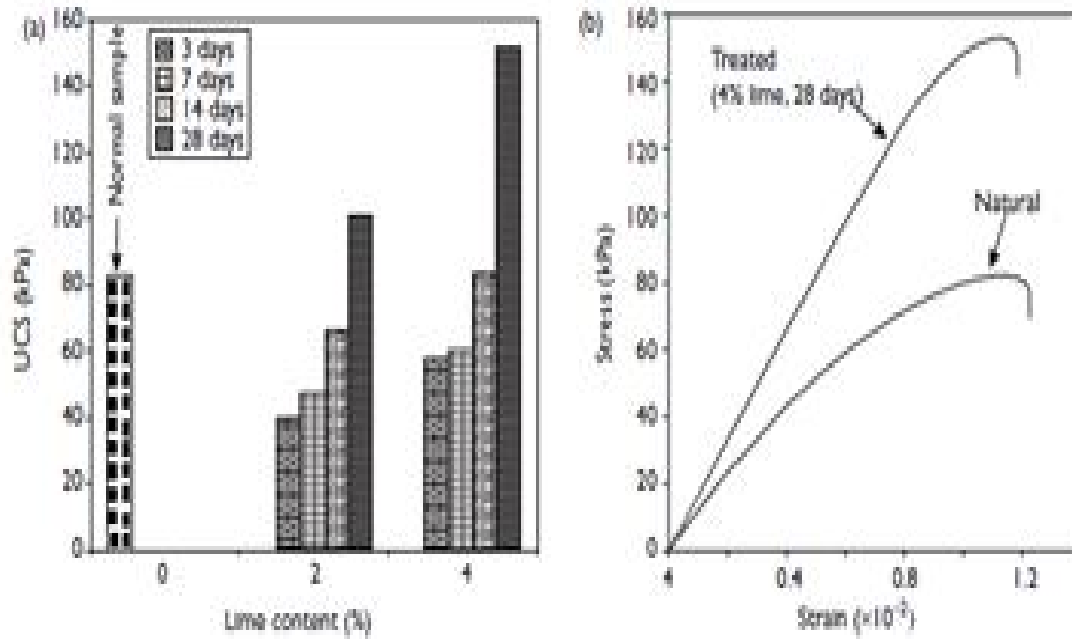


Figure 1-21 Effets de la Chaux sur la Résistance (F.G. Bell. (1989 et 1996),



Change in stress-strain characteristics over time for a reactive, lime-stabilized soil (Goose Lake clay) (Little, 1995).

Figure 1-22 Effets de la Chaux sur la Résistance (LITTLE, 1995)



(a) Variation of unconfined compressive strength (UCS) with lime content, and (b) stress-strain behaviour of the soil after stabilization by lime-mixture technique.

Figure 1-23 Effets de la Chaux sur la Résistance (M.C.TONNOZ et al, 2006)

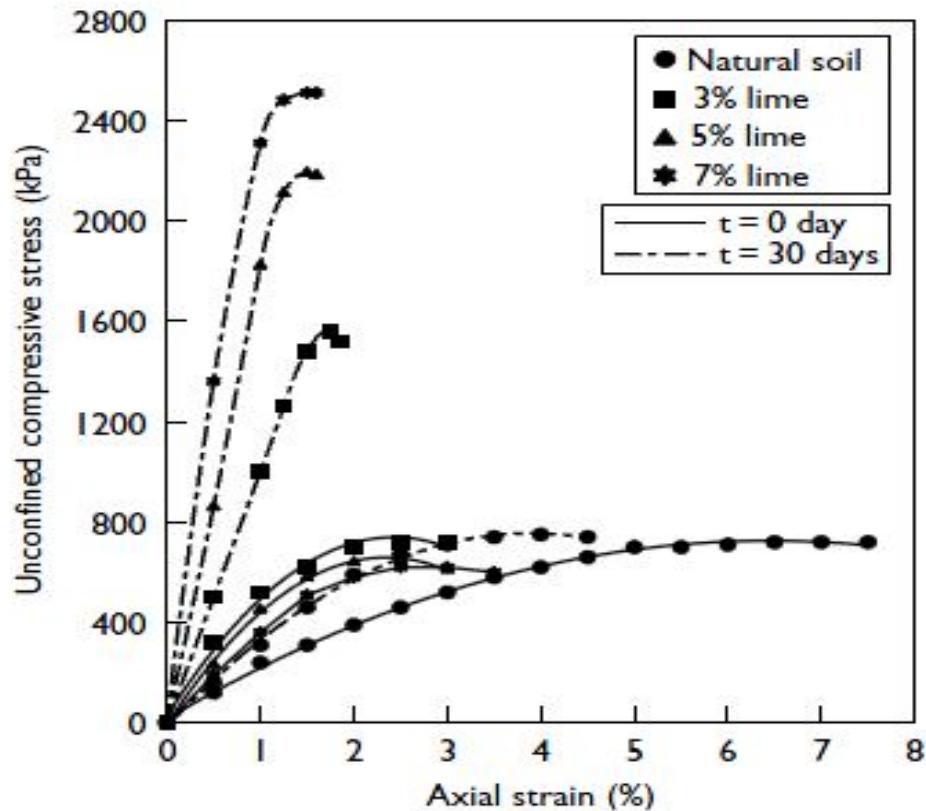
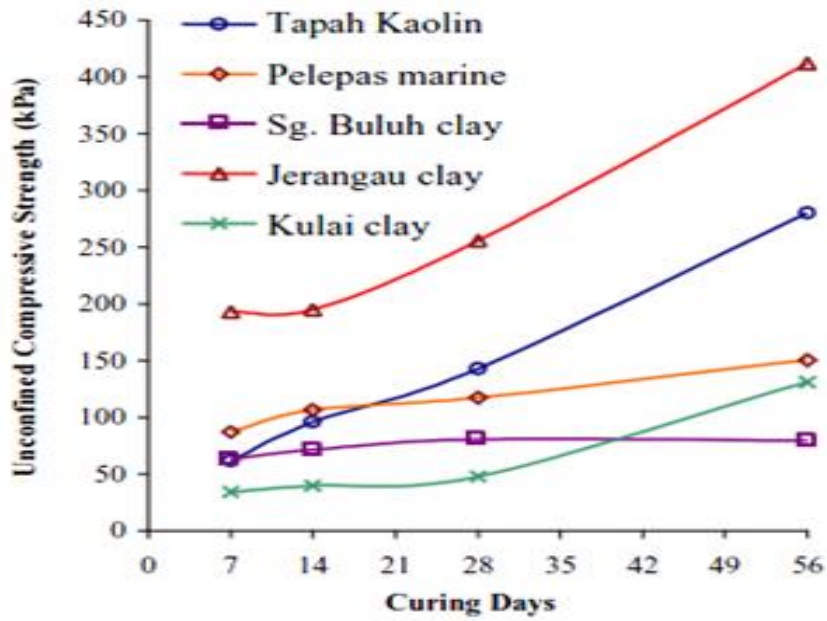


Figure 1-24 Effets de la Chaux sur la Résistance (Z. NALBANTOGLU, 2006)



Unconfined compressive strength at mix design with various curing days at room temperature.

Figure 1-25 Effets de la Chaux sur la Résistance (K.A.KASSIM et K.K.CHERN, 2004)

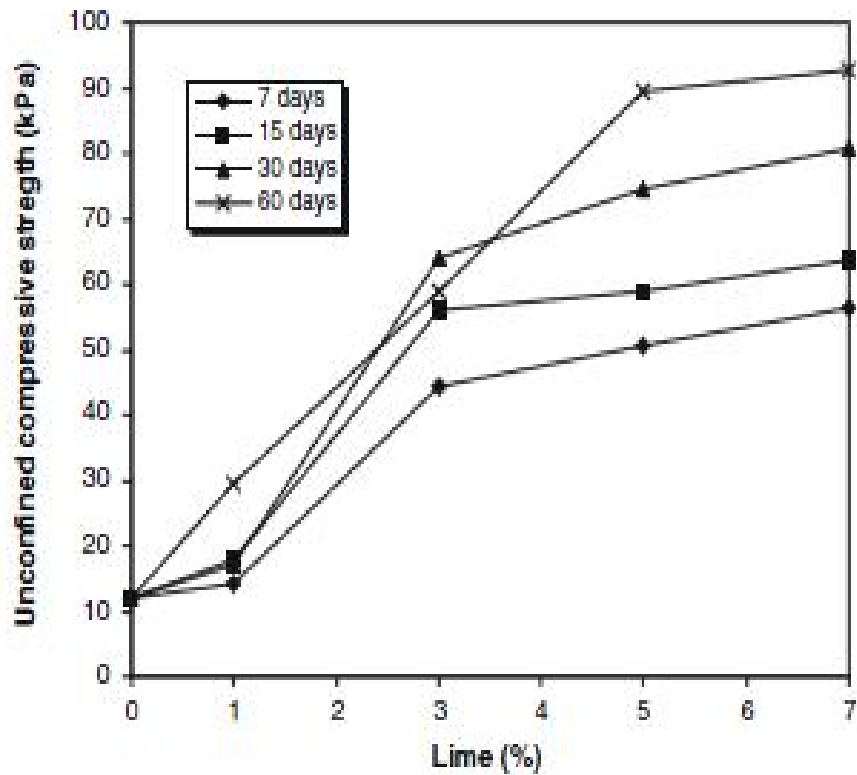
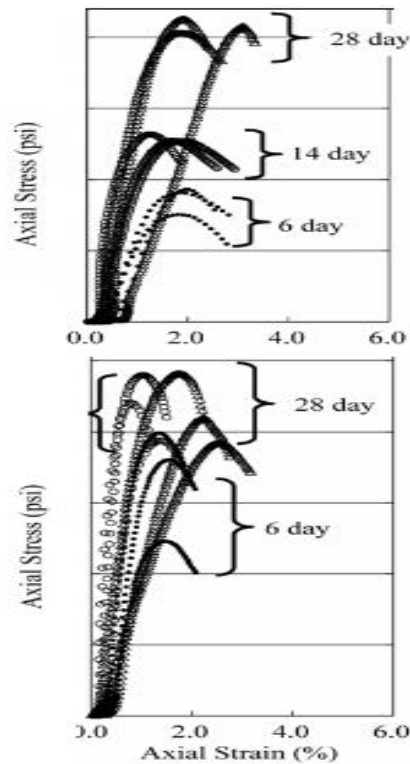


Figure 1-26 Effets de la Chaux sur la Résistance (MOHAMED.A et col, 2009)



Axial stress-strain behavior of soil 1 (top) and soil 2 (bottom)

Figure 1-27 Effets de la Chaux sur la Résistance (MICHAEL A. MOONEYET et NATHAN M. TOOHEY, 2010)

Effets du traitement des sols à la chaux sur Le module d'élasticité

Des essais réalisés par HOLM (1979), ont montré que la stabilisation des sols à la chaux augmente la valeur du module de Young, d'après F.G. BELL, (1996) figure 1-28 MOHAMED.A et col (2009) figure 1-29. Ce module a augmenté de 15 fois après trois semaines de traitement et autour de 35 fois après 16 mois. Le module de Young est passé de 300kN/m², après traitement à la chaux et après les périodes mentionnées, respectivement à 4,4MN/m² et 10,8MN/m². Plus encore, l'accroissement de ce module augmente avec la température de cure Al Rawi, (1981), un petit ajout de chaux seulement est suffisant pour rendre le comportement du sol friable.

La montmorillonite subit une augmentation du module de Young avec seulement 2% d'ajout de chaux. La valeur optimale est obtenue à 2 à 3% d'ajout. Bell et Tyrer (1987), ont noté que la kaolinite a enregistré un accroissement rapide du module de Young avec un petit supplément de chaux (entre 2 et 4%) après lesquels, l'accroissement a diminué même avec une grande quantité de chaux.

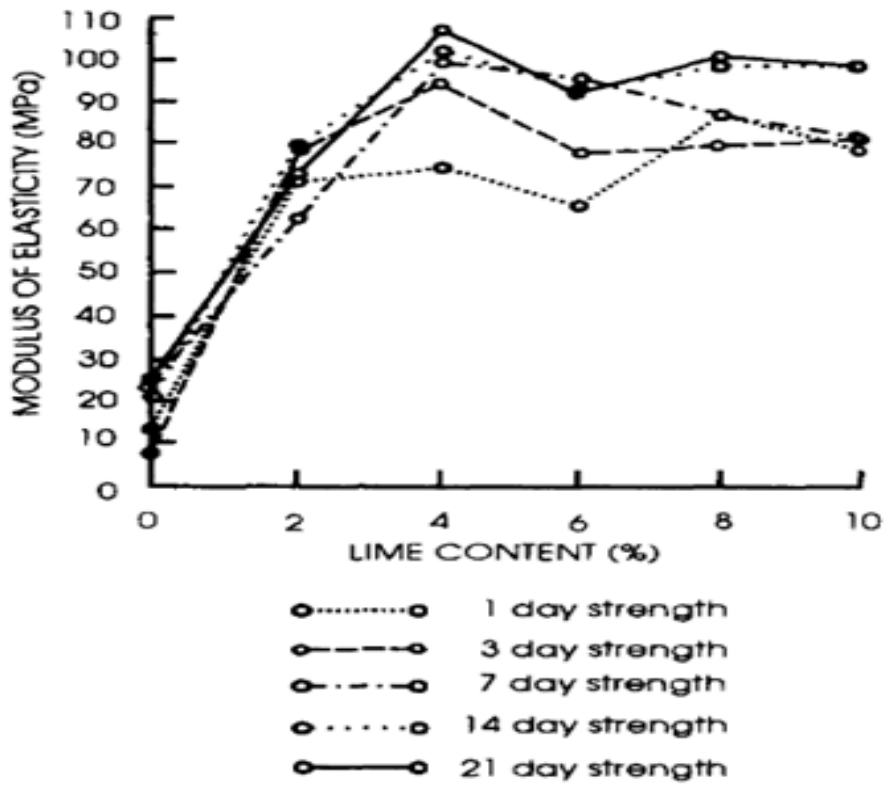
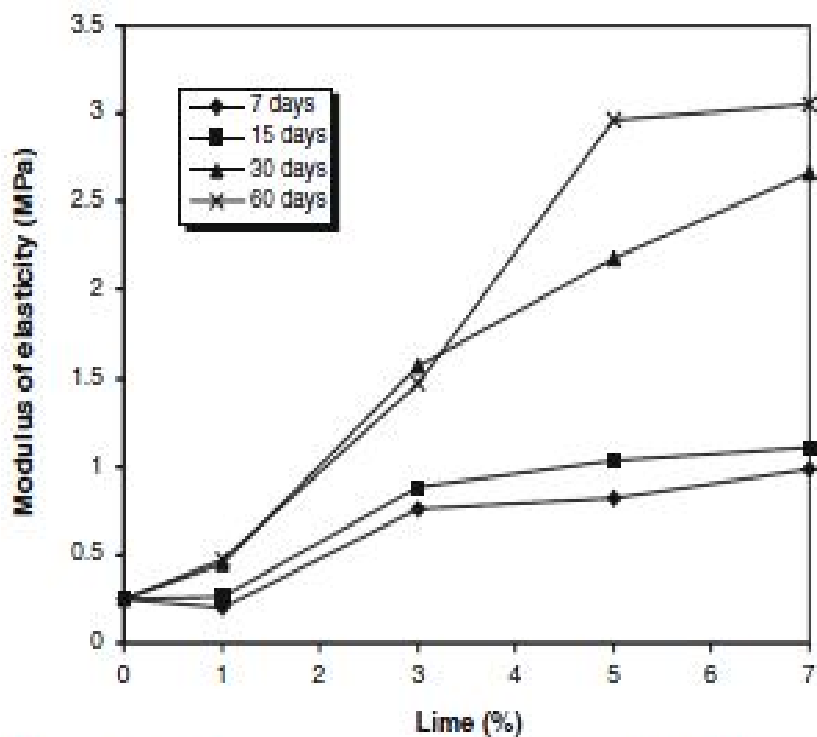


Figure 1-28 Effets de la Chaux sur les Modules d'Elasticités (F.G. BELL et col. 1996)



Effects of lime percent on stress-strain modulus of elasticity

Figure 1-29 Effets de la Chaux sur les Modules d'Elasticités

Chapitre 2

MATERIAUX ET MÉTHODES

2.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre les différents matériaux utilisés lors de ce travail de recherche ont été identifiés et caractérisés par une campagne d'essais. L'*argile* de provenance du gisement de BENAZZOUZ a été identifiée par des analyses chimiques, minéralogiques puis caractérisée physiquement au laboratoire en déterminant la teneur en matière organique (*TMO*), la densité spécifique G_s , la granulométrie, les limites d'Atterberg. Les essais Proctor et l'UCST ainsi que l'essai de Cisaillement Direct ont été conduits pour la caractérisation mécanique. Le gonflement de l'argile a été analysé par un essai œdométrique. Le deuxième matériau analysé a été la *chaux* dont la composition chimique a été obtenue de l'usine même de provenance. Les différentes méthodes concernant chacun des essais utilisés sont aussi décrites et données à la fin du présent chapitre.

2.2. MATERIAUX

Les différents matériaux utilisés sont essentiellement l'argile de BENAZZOUZ et la chaux manufacturée par l'usine SODEPAC Filiale ERCO situé à Oum DJERANE wilaya de SAIDA. Cette dernière a été utilisée comme ajout pour la stabilisation de l'argile déjà mentionnée.

2.2.1 L'ARGILE

Origine : L'argile provient du gisement de Si MESSAOUD, situé dans la Daïra de BENAZZOUZ à 48km au sud Est de la ville de SKIKDA, chef lieu de Wilaya. La figure 2-1 montre le plan de situation du gisement. Dans ce gisement, les réserves en calcaires pour agrégats ont été estimées à un total de 76 millions de tonnes et les argiles qui sont considérées

Désignations	Symbole	% en poids
Teneur en carbonate de calcium	CaCO ₃	3.07 %
Chlorures (Méthode de VOLHARD)	Cl	9.94 %
Perte au feu	PF	10.38 %
Résidu insoluble	R-INS	80.8 %
Sulfates soluble dans l'acide	SO ₃	Traces

Tableau 2-1 Analyse Chimique de l'Argile BENAZOUZZ

Mesure de pH

L'essai du pH a été conduit selon la norme ASTM-D 4972-95a en utilisant le pH mètre de marque HANNA instruments HI 931401 au laboratoire du département de génie des procédés de l'université d'Annaba. Un pH de 8,64 a été obtenu montrant que l'argile est une argile *basique*.

Essai au bleu de Méthylène

La détermination de la surface spécifique des fines a été déterminée par la relation de GAILLABAUD et CINOT (1982). Cette relation relie la surface spécifique à la valeur au bleu de méthylène selon l'équation :

$$S_{St} = 21 \times V_B(0/2 \mu m)$$

L'essai au bleu de méthylène a été conduit selon la norme française NF-P94-068 au Laboratoire des Travaux Public de l'Est ANNABA. Une valeur au bleu de méthylène de $V_B = 6$ a été trouvée et a permis d'obtenir une surface spécifique de $126 \text{ m}^2/\text{g}$.

Analyses minéralogiques

Le diffractomètre X PERT PRO aux rayons X du laboratoire de physique de l'Université AMAR TLEDJI LAGHOUAT a été utilisé pour l'analyse minéralogique de l'argile. La figure 2-2 montre le spectre obtenu et le tableau 2-2 donne la composition minéralogique de ce matériau.

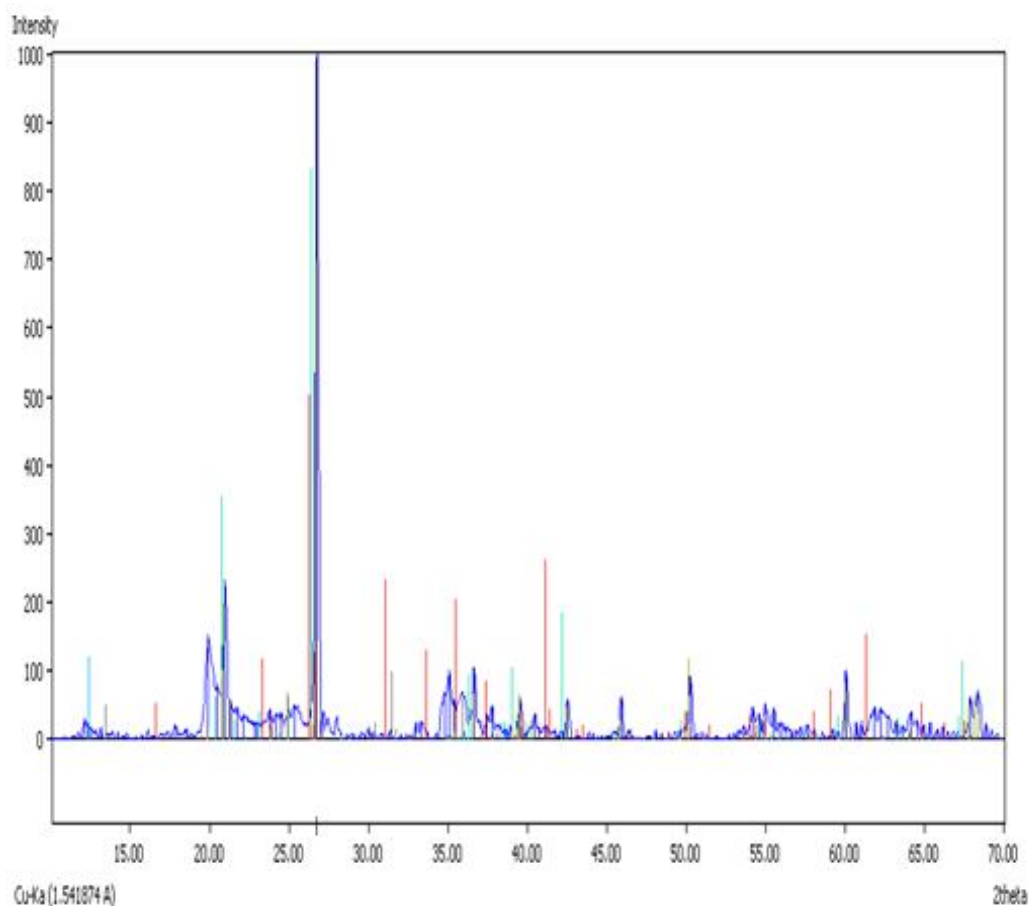


Figure 2-2 Analyse Minéralogiques de l'Argile BENAZZOUZ.

Nom	Formule	Référence	Quantité
Sillimanite	Al₂ Si O₅	99-100-7381	10,10
Berlinite	Al P O₄	99-100-7404	18,56
Quartz	Si O₂	99-101-2545	19
Kaolinite	Al₂ Si₂ O₉	99-101-0871	16,50
Moganite	SiO₂	99-100-2733	26,33
Si O₂	Si O₂	99-100-7154	8,18
Brucite	Mg O₂	99-100-2431	1,22
Aragonite	Ca CO₃	99-100-0230	0,96

Tableau 2-2 Analyse Minéralogique - Argile BENAZZOUZ.

Caractéristiques physiques

Teneur en matière organique

La teneur en matière organique a été obtenue par la méthode d'incération détaillée par la norme ASTM D 2974-87. Le taux de matière organique obtenu pour l'argile de BENAZZOUZ est de 0.78% inférieur au seuil limité pour une stabilisation de l'argile à la chaux.

Densité spécifique

La densité spécifique exprime le rapport entre la masse d'un certain volume de matériau à la masse d'un même volume d'eau à la température de référence. Celle-ci a été obtenue au Laboratoire à une température d'eau de 20°C selon la norme ASTM D 854-98. Une moyenne arithmétique de trois essais avec une différence inférieure à 1% à montrer que $G_s = 2,65$.

Analyse granulométrique

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

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

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

Les résultats sont exprimés sous forme d'une courbe granulométrique figure 2-3. L'essai a été effectué à LNHC de DJELFA.

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

- ✓ Le pourcentage des fines inférieures à 75µm est de 94% contenant une fraction d'argile de 37%.
- ✓ La courbe granulométrie est étalée et continue.

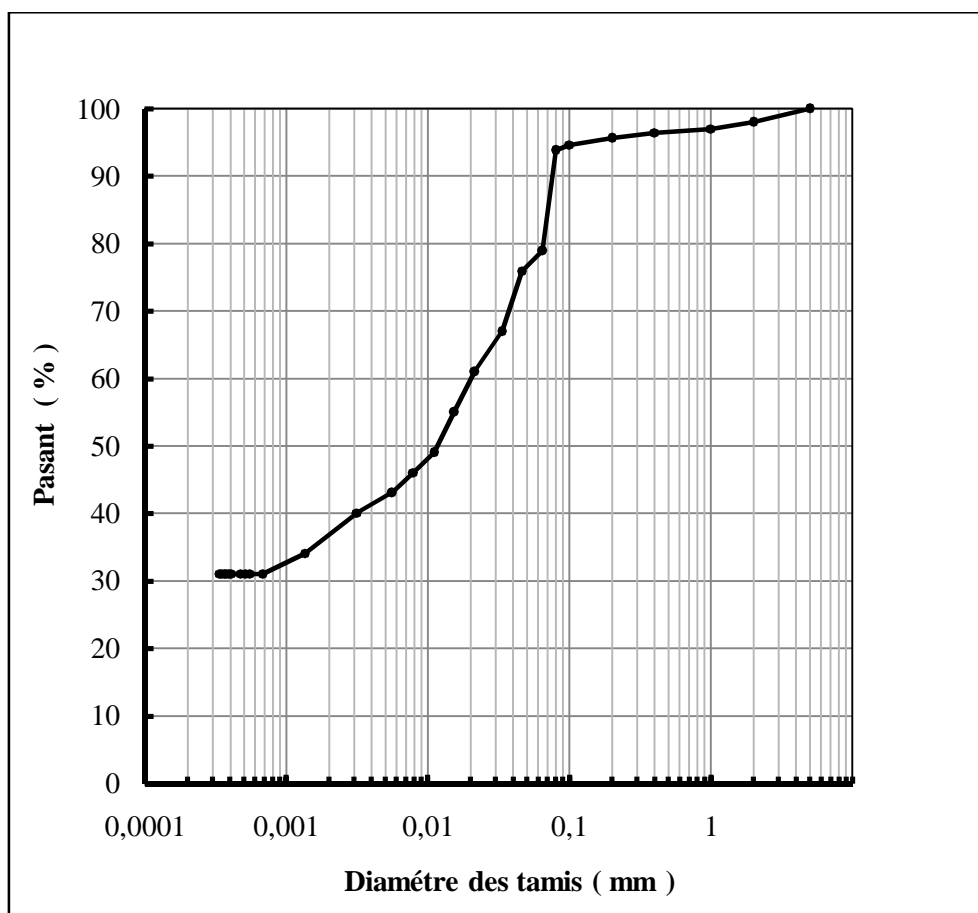


Figure 2-3 Courbe Granulométrique de l'échantillon

Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg ont été réalisées selon la norme ASTM D 4318-98 sur une fraction d'argile passant à travers le tamis N°40 (425µm). Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérales qui caractérise le sol, elles correspondent à des comportements particuliers. Les résultats des essais de la limite de liquidité pour trois éprouvettes de l'argile de BENAZZOUZ sont présentés sur la figure 2-4.

La courbe obtenue montre une limite de liquidité de 58,48%. La limite de plasticité est la moyenne arithmétique des trois valeurs obtenues de trois essais effectués, la valeur de cette limite est égale à 28,91%. L'indice de plasticité a été calculé par la formule $I_P = W_L - W_P$. La valeur calculée est de 29,57%. Le tableau 2-3 résume les résultats des limites de consistance de l'Argile BENAZZOUZ.

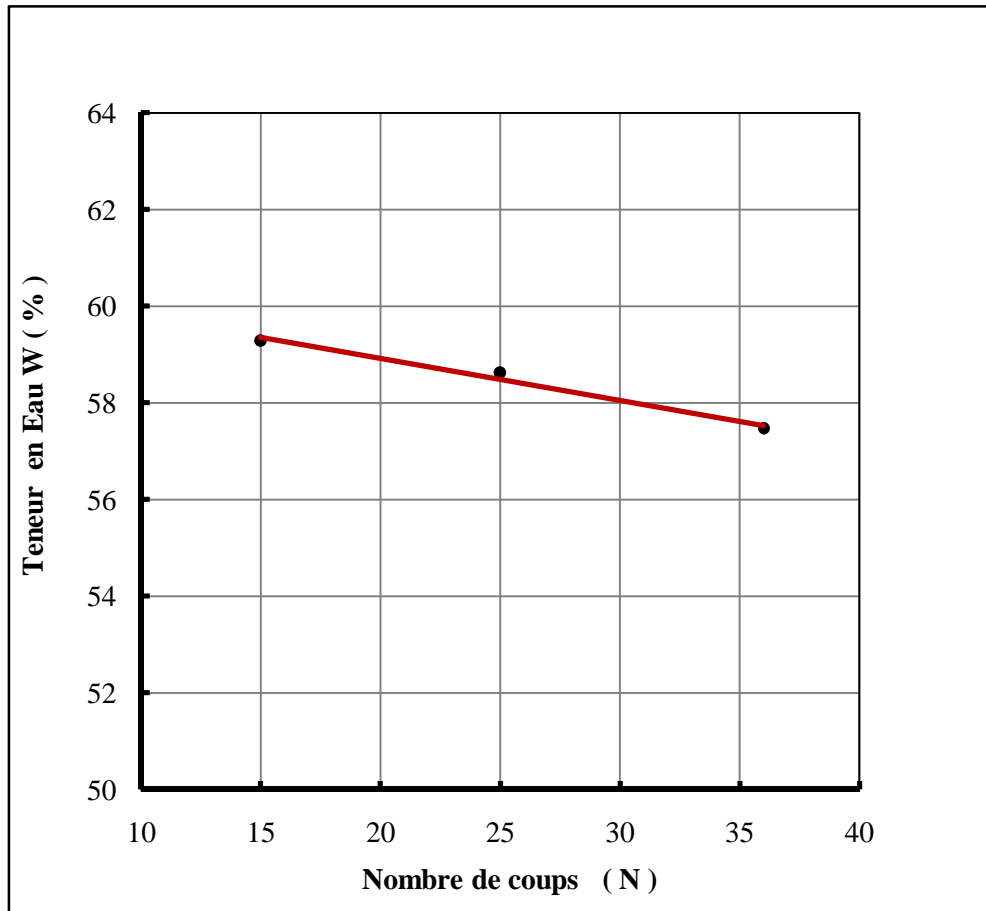


Figure 2-4 Limite de Liquidité.

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

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

La valeur calculée de l'activité de l'argile BENAZOUZZ est de **0,82**. Cette valeur indique que l'activité de cette argile est *normale* et apte d'être stabilisée par la chaux.

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

Tableau 2-3 Limites d'Atterberg.

Classification du sol

La classification du sol de BENAZZOUZ a été faite selon la classification internationale USCS (Unified Soil Classification System) décrite dans la norme ASTM D2487-98.

Le pourcentage des éléments passant à travers le tamis N°200 (75µm) est de 94% supérieur à 50% indique que *le sol est fin* (Fine-Grained Soil).

La limite de liquidité et l'indice de plasticité du sol BENAZZOUZ portés sur le diagramme de Casagrande se rencontrent en un point situé au dessus de la ligne A. Ce qui signifie que le sol est classé comme *une argile grasse inorganique de plasticité élevée CH* (Fat Clay Highly Plastic).

Caractéristiques mécaniques

Essai Proctor

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

La courbe Proctor pour l'argile de BENAZZOUZ présentée sur la figure 2-5 a une forme pointue ce qui explique la sensibilité de l'argile à la teneur en eau. La valeur de la teneur en eau optimale est de 25,85% correspondante à une masse volumique sèche maximale de 1532kg/m³.

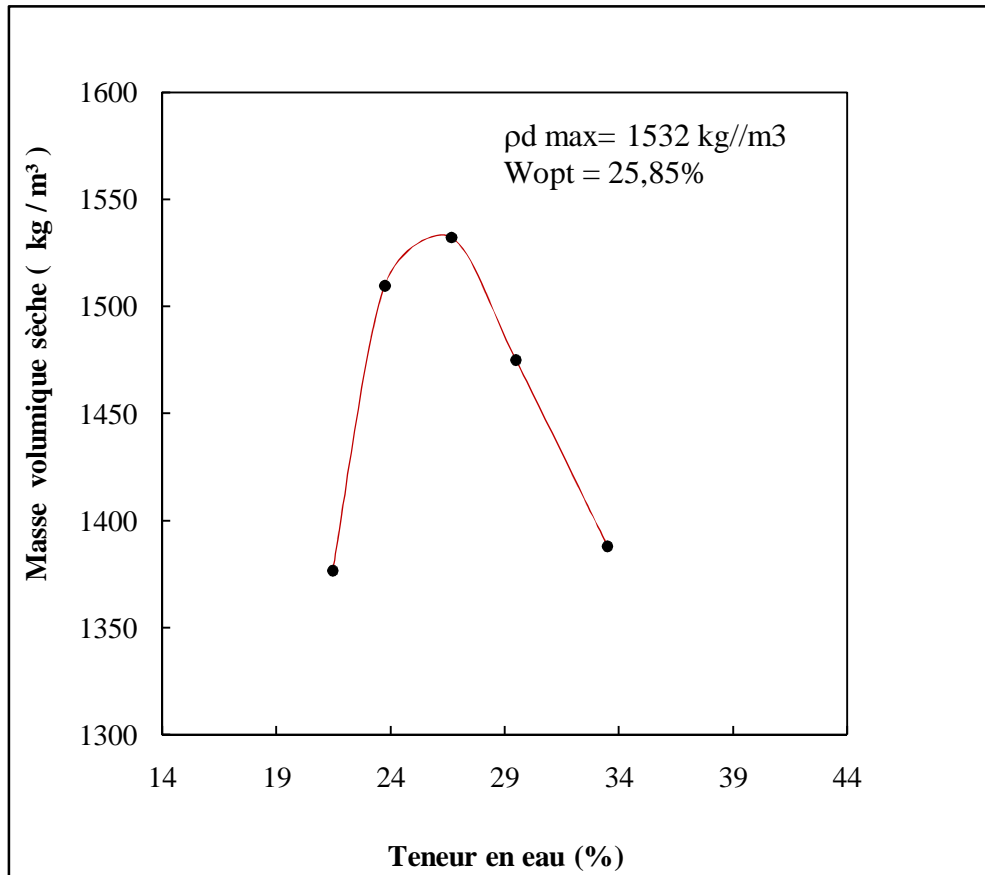


Figure 2-5 Essai Proctor Normal Argile Non Traitée

Essai de compression simple (UCST)

Des échantillons d'argile compactés à la densité sèche maximale avec la teneur en eau optimale de l'essai Proctor normal ont été préparés pour l'essai de cisaillement à la compression simple. Cet essai a été conduit selon la norme ASTM D 2166-98a sur ces échantillons étanches après 3 jours de conservation dans une chambre humide à une température de 20°C.

La courbe de résistance à la compression simple de l'argile de BENAZZOUZ est montrée sur la figure 2-6. La rupture totale de l'éprouvette de sol a été observée pour un déviateur de 40.5kPa et une déformation axiale principale majeure de 5,8%. Le module d'élasticité qui n'est autre que la tangente à la courbe initiale est égal à 17kPa. La représentation du cercle de Mohr figure 2-7 a permis de déduire une cohésion non drainée de 20,25kPa. La compression simple et la cohésion non drainée obtenus permettent de classer l'argile comme étant une argile *tendre* (Soft Clay)

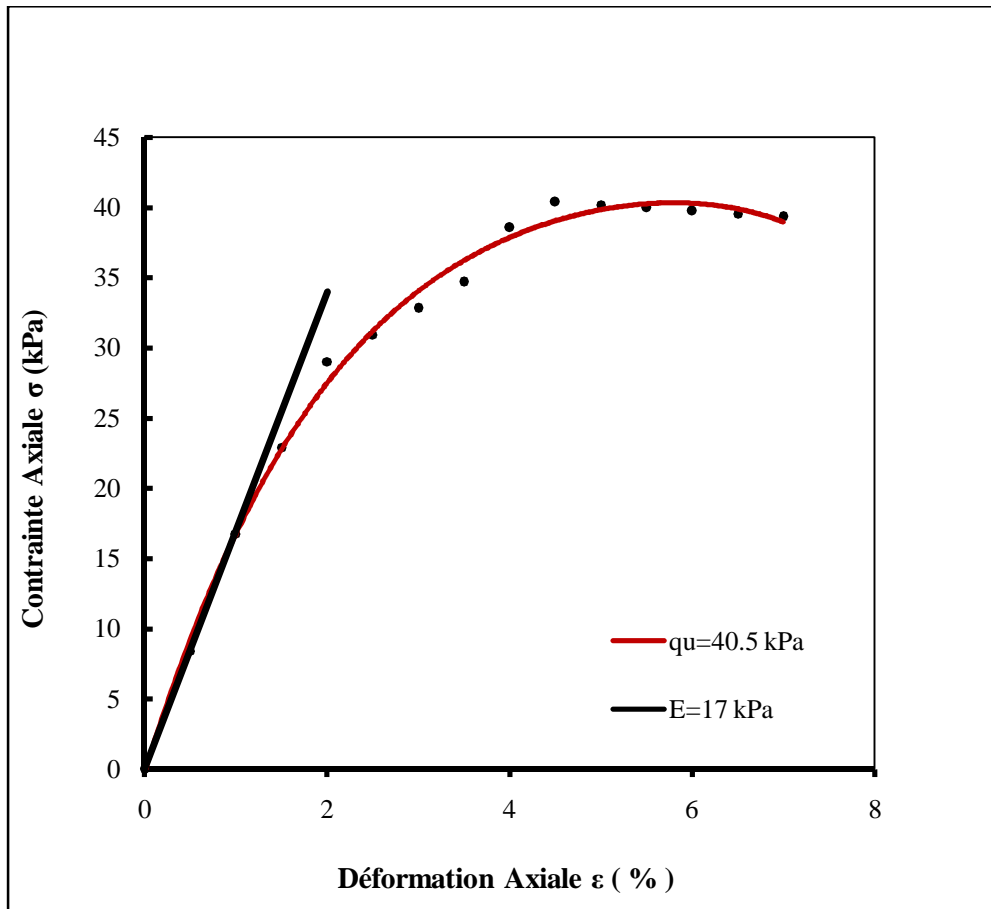


Figure 2-6 Essai de Compression Simple à 0 % de Chaux

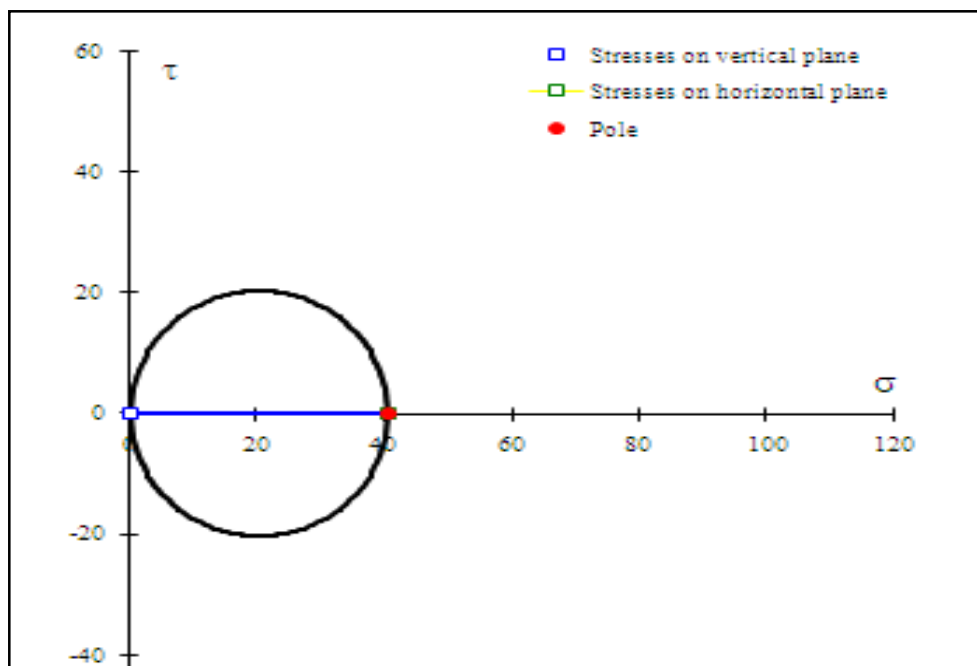


Figure 2-7 Cercle de Mohr pour l'Argile de BENAZZOUZ

Essai au cisaillement direct

Trois échantillons ont été préparés à la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale de l'essai Proctor. Les essais au cisaillement direct effectués sur ces trois échantillons, ont été réalisés selon la norme ASTM D 3080-98. Les contraintes au cisaillement tangentielles maximales pour les contraintes normales appliquées de 100, 200 et 300kPa sont présentées sur le tableau 2-4 avec leurs déplacements horizontaux correspondants. La figure 2-8 montre la variation de la contrainte tangentielle avec le déplacement horizontal. L'enveloppe de Mohr-Coulomb est représentée sur la figure 2-9 et donne un angle de frottement interne total de $16,38^\circ$ et une cohésion de 55,37kPa.

Contraintes normales σ (kPa)	Contraintes au cisaillement τ_{\max} (kPa)	Déplacement (mm)
100	88,33	4
200	107,33	4.5
300	147,26	4.5

Tableau 2-4 les Contraintes de Cisaillement pour l'Argile de BENAZZOUZ

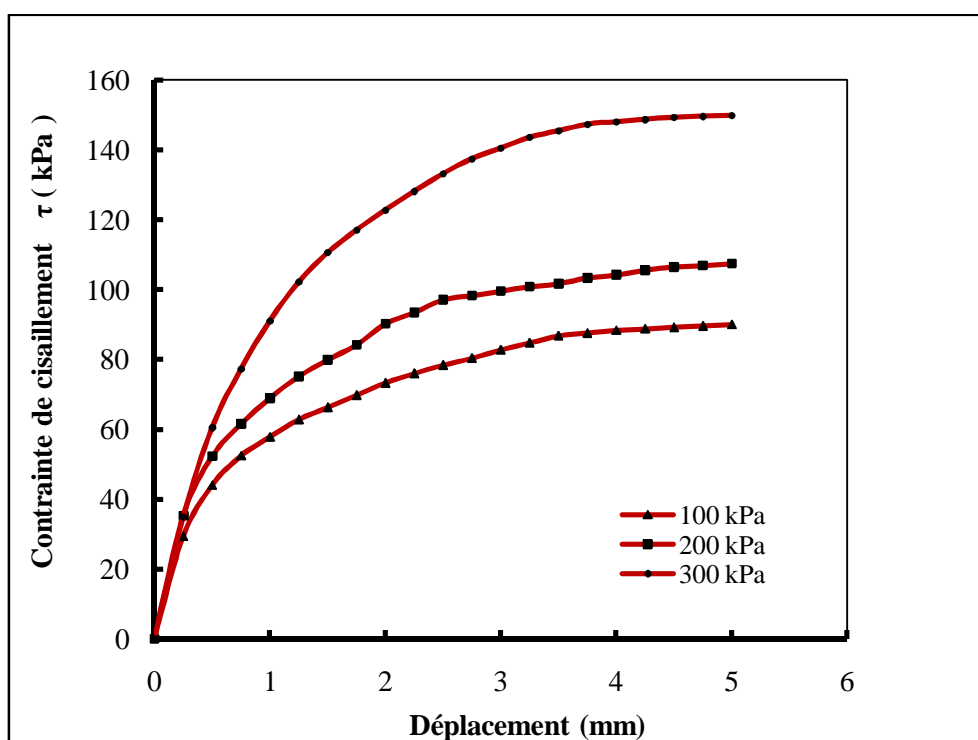


Figure 2-8 Courbe Contrainte - Déplacement Argile Non Traitée à Teneur en Eau optimale

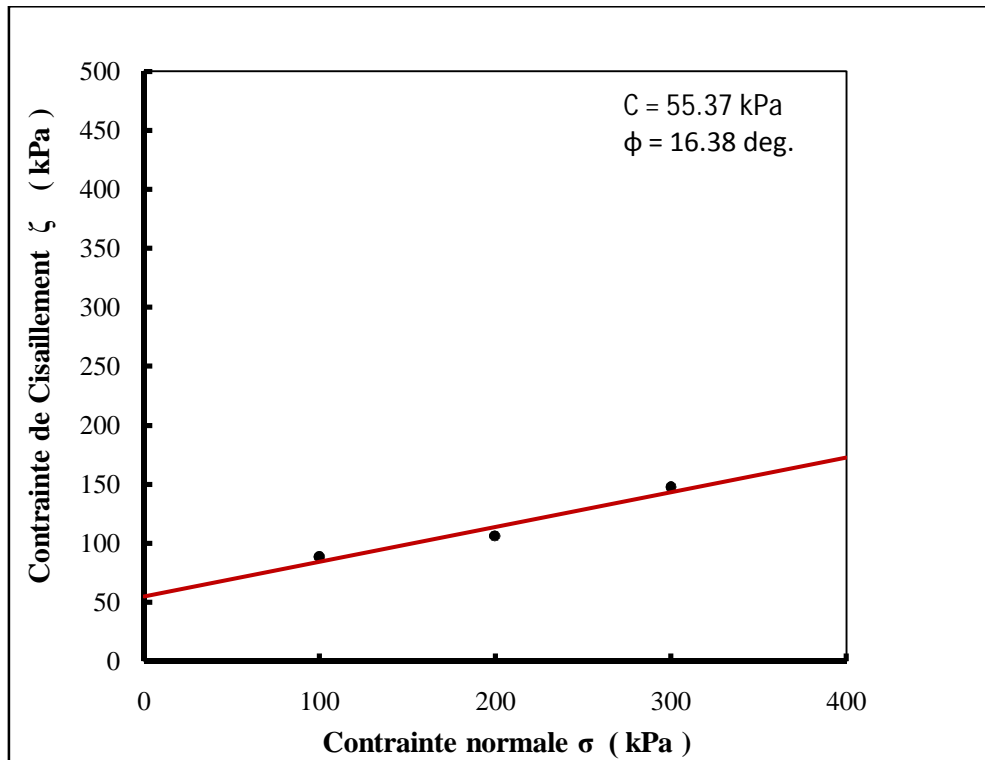


Figure 2-9 Enveloppe de MOHR - COULOMB Argile Non Traitée à Teneur en Eau Optimale

Essai Œdométrique

C'est un essai de compression par paliers et de gonflement à l'œdomètre. L'éprouvette cylindrique est confinée latéralement et en général, soumise à des incréments discrets de chargement ou déchargement axial vertical, le drainage pouvant s'effectuer dans la direction axiale. Cet essai réalisé selon la norme ASTM-D 2435-96. La courbe œdométrique présentée sur la figure 2-10 donne une valeur de pression de préconsolidation de 29kPa, un indice de compression de 19,36%, un indice de gonflement de 3,28% et indice des vides initial de 1,347

Les résultats et la forme de la courbe ont montré que l'argile de BENAZZOUZ est moyennement compressible et non gonflante.

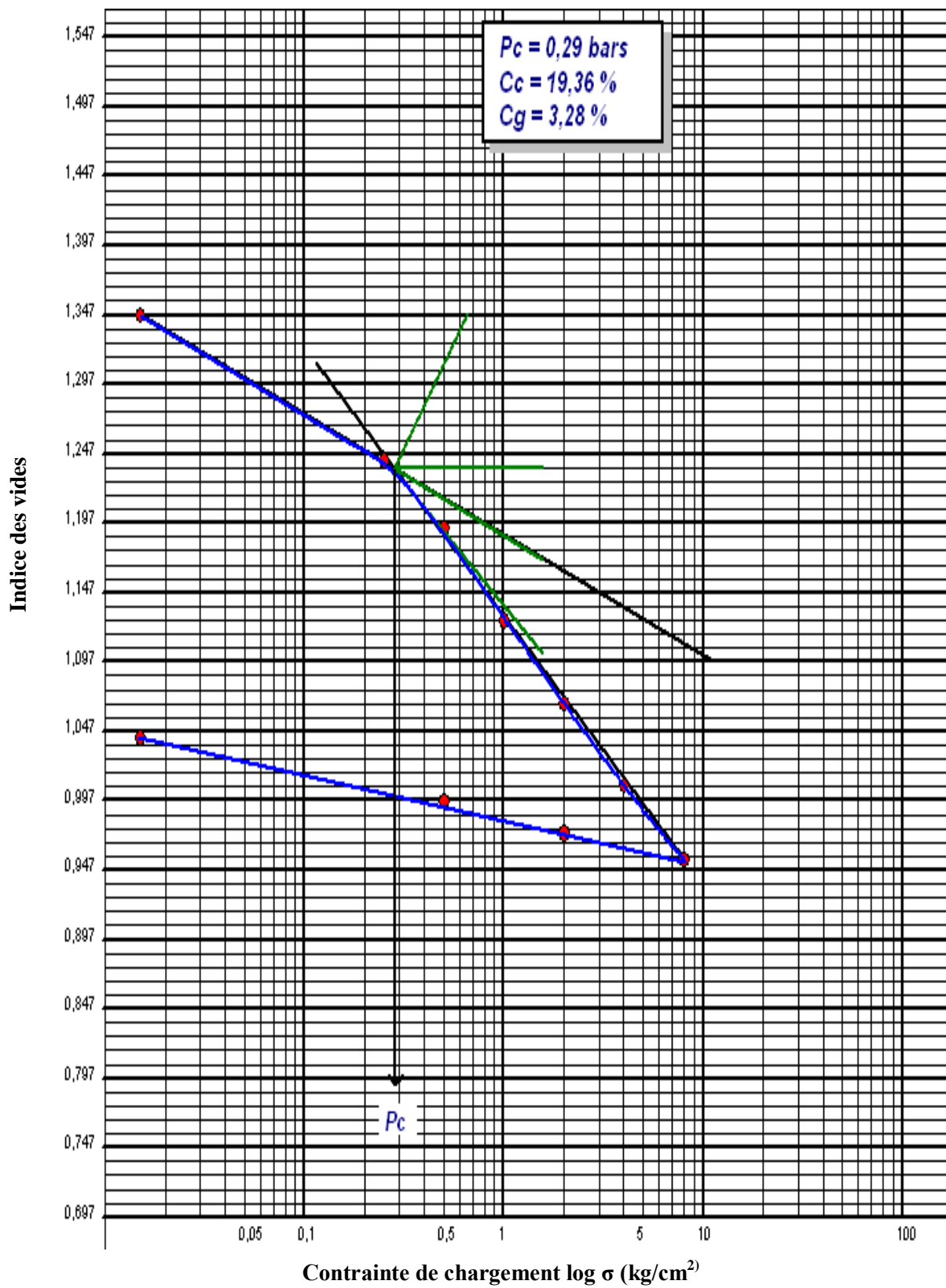


Figure 2-10 Courbe Indice des Vides – Contraintes

2.2.2 LA CHAUX

La chaux utilisée est la chaux vive manufacturée par l'usine SODEPAC Filiale ERCO situé à Oum DJERANE wilaya de SAIDA. La composition de ce produit est montrée sur le tableau 2-5.

Caractéristiques de base	La fiche technique de la chaux
Apparence physique	Poudre blanche sèche
Humidité	>5
FE ₂ O ₃	< 2
AL ₂ O ₃	< 1,5
MgO	< 0,5
SiO ₂	< 2,5
SO ₃	< 0,5
Na ₂ O +K ₂ O	< 0,47à 0,5
Co ₂	<5
CaCO ₃	<10
Insoluble dans HCL	<1
Densité	600 à 900 g/l
Poids spécifique	20 g/ cm ³
Refus90 μ	10 %

Tableau 2-5 Composition de la Chaux Vive

2.3. MÉTHODES

2.3.1 Analyse chimique

Détermination du pourcentage initial de la chaux (Méthode de pH-mètre)

La détermination du pourcentage initial de la chaux a été conduit selon la norme ASTM-C 977-00, cette méthode est basée sur l'essai de EADES et GRIM (1960) figure 2-11.

Les étapes de l'essai sont les suivantes :

Prendre des échantillons représentatifs séchés à l'étuve des passants du tamis N°40 (425 μ m), peser 20 grammes de sol à 0,1 grammes de précision, les verser dans cinq bouteilles en plastique de 150 ml avec des bouchons à visser.

Ajouter des pourcentages différents de chaux pour chaque bouteille prenant les valeurs de 2, 3, 4, 5 et 6%, avec une précision de 0,01 gramme. Bien agiter pour donner un mélange homogène.

Ajouter 100 ml d'eau distillée aux mélanges. Puis Agiter le mélange chaux-sol-eau 30 secondes jusqu' à ce qu' il n y ait plus de traces du matériau sec sur le fond.

Agiter la bouteille pendant 30 secondes toutes les 10 minutes pendant 1 heure.

Mesurer le pH avec un pH mètre équipé d'une électrode et l'étalonner chaque fois dans une solution tampon de pH 10.

Noter le pH pour chacun des mélanges de sol-chaux. le plus faible pourcentage de chaux qui donne un pH de 12,4 est le pourcentage exigé pour stabiliser le sol.

Si le pH ne dépasse pas 12,3 et deux taux de chaux donnent la même lecture, le plus bas pourcentage qui donne un pH de 12,3 est celui exigé pour stabiliser le sol. Si le pH le plus élevé est 12,3 et seulement 1 taux de chaux donne un pH de 12,3, il faudra prévoir des bouteilles additionnelles d'essai avec un plus grand pourcentage de chaux.

Essai au bleu de Méthylène

l'essai a été effectué sur un échantillon de fraction inférieure à 5mm et de masse de 30g trempé dans 500ml d'eau déminéralisée et dispersé à l'aide d'un agitateur à ailettes tournant à 700 tr/min pendant au moins 5 minutes Pour la suite de l'essai, la vitesse de rotation est maintenue à 400 tr/min. Le dosage consiste à injecter successivement des quantités précises de bleu de méthylène dans la suspension jusqu'à atteindre la saturation des particules d'argile. Le test à la tache permet de repérer l'instant de cette saturation. On prélève pour cela une goutte dans la solution que l'on dépose sur un papier filtre. Une tache centrale de couleur bleue se forme et s'entoure rapidement d'une auréole. Si cette dernière est colorée,

le test est positif et l'essai est terminé Dans le cas contraire, on ajoute une quantité supplémentaire connue de bleu de méthylène à l'aide d'une pipette de 1 ml.



Figure 2-11 Méthode D'EADES et GRIM

2.3.2 Analyses minéralogiques

Le diffractomètre X PERT PRO aux rayons X du laboratoire de physique de l'Université AMAR TLEDJI LAGHOUAT a été utilisé pour l'analyse minéralogique de fraction argileuse inférieure à $2\mu\text{m}$ dans ce cas il faut éliminer la matière organique avec 30% H_2O_2 à un pH de 5 comme traitement préparatoire de l'échantillon puis balayer par étape à un temps de quatre secondes de $0,075^\circ$ à 2θ on utilise le rayonnement de $\text{CuK}\alpha$ (20 mA, 40 kilovolts figure 2-12).



Figure 2-12 Appareil X PERT PRO Aux Rayons X

2.3.3 Caractéristiques physiques

Teneur en matière organique

La teneur en matière organique a été obtenue par la méthode d'incération détaillée par la norme ASTM D 2974, on a séché d'abord un échantillon représentatif au four à 105°C pendant 24 heures, puis on a enregistré la teneur en eau. L'échantillon a été ensuite placé dans un four à moufle, chauffé à 440°C,. La teneur en cendres de l'échantillon est égale à la perte de poids divisé par le poids sec initial. Le contenu organique a été alors calculé en tant que 1 moins la teneur en cendres.

Densité Spécifique

La densité spécifique de l'argile a été déterminée selon la norme ASTM D 854-98. En plaçant un poids connu séché au four dans un pycnomètre, rempli d'eau. La densité est égale au poids de l'argile sec sur le poids de l'eau excédant

Analyse granulométrique

L'essai de granulométrie par tamisage se fait suivant la norme ASTM C 136-96a sur un échantillon de masse 500g de diamètre supérieur ou égal 75 μ m. par voie humide les argiles sont sensibles à l'eau, pour cela l'échantillon doit être imbibé pendant une journée avant, pour les grains d'un diamètre inférieur à 75 μ m on procède à l'essai de Sédimentométrie selon la norme ASTM D 422-63. sur une masse de 50g.

L'essai consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. plus les grains sont fines, plus la vitesse de décantation est lente conformément à la loi de Navier – Stokes.

La mesure de la densité de la suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion de grains de chaque diamètre.

Limites d'ATTERBERG

Les limites d'Atterberg sont déterminées sur la fraction argileuse passant au tamis 400 μ m d'au moins 200 g. Pour la limite de liquidité, on utilise l'appareil de Casagrande, l'ensemble qui permet de faire tomber une coupelle d'une hauteur de 10mm sur le socle, chaque choc entraînant la fermeture progressive d'une rainure pratiquée dans l'échantillon de l'argile. Par définition, W_L est la teneur en eau qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1cm de longueur en 25 coups Pour la limite de plasticité, le principe consiste à réaliser manuellement des cylindres avec l'argile sur une surface lisse et sèche.

Par définition, W_P est la teneur en eau du cylindre qui se brise lorsque son diamètre atteint 3mm Les teneurs en eau ont été déterminées par étuvage à 105°C, la balance utilisée est de 0,1g de précision.

2.3.4 Caractéristiques mécaniques

Préparation des mélanges

Les préparations ont été effectuées selon la norme ASTM D 3551-96. Les quantités respectives des différents matériaux argile et eau ont été préparés à la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale de l'essai Proctor. Les argiles ont été introduites en premier dans le bol du malaxeur, puis la chaux le malaxeur est mis en marche à une durée d'une minute jusqu'à ce que le mélange soit homogène, puis on ajoute de l'eau. A partir du moment où la totalité de l'eau a été incorporée, le malaxage est maintenu pendant 5 minutes, durée suffisante pour obtenir un mélange parfaitement homogène. A la fin du malaxage, le bol est retiré et immédiatement recouvert d'une bâche en plastique afin de prévenir l'évaporation de l'eau.

Confection des éprouvettes

Pour les essais de compression, des éprouvettes d'élongement ont été confectionnées ayant les dimensions suivantes : $H=5\text{cm}$ et $\varnothing=5\text{cm}$. Les quantités utilisées d'argile, chaux et eau ont été déterminées suivant les essais de Proctor ρ_d OPN et W_{opt} . 32 éprouvettes ont été confectionnées. Un seul gâchis a été utilisé pour chaque âge et pourcentage et la teneur en eau introduite a été majorée de 1% pour éviter le risque d'évaporation lors du malaxage et de la confection.

Pour les essais de cisaillement, des éprouvettes ont été confectionnées ayant les dimensions suivantes : $H=13\text{cm}$ et $\varnothing=8\text{cm}$ figure 2-13. Les quantités utilisées d'argile, eau ont été déterminées suivant les essais de Proctor ρ_d OPN et W_{opt} . Les éprouvettes sont étanches et conservées pendant 24h dans une chambre humide à une température de 20°C .

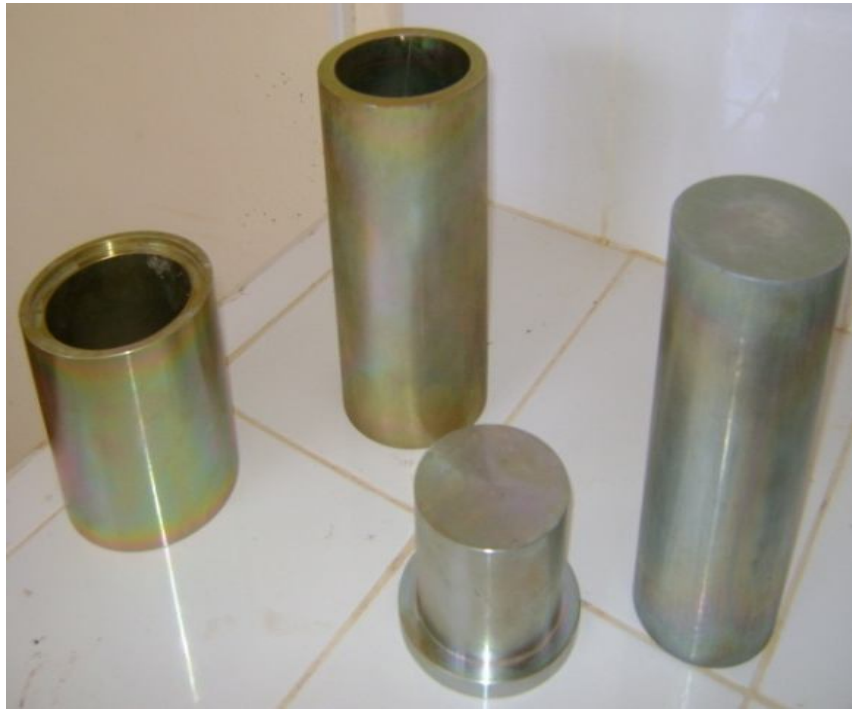


Figure 2-13 Matériels de Confection des Eprouvettes

Essai de Proctor

L'essai a été conduit selon la norme ASTM-D698-91, on utilise un moule en acier de dimensions normalisées $H = 11.7\text{cm}$ et $\varnothing = 10.15\text{cm}$ placé sur une embase et muni d'une hausse. Les différentes pièces ont été assemblées, le matériau, préalablement malaxé avec une certaine quantité d'eau, a été mis dans le moule en 3 couches, chaque couche a été compactée de 25 coups par une dame de 2,480 kg. A la fin de l'essai, la hausse a été retirée et arasée la surface du moule. la masse volumique humide du matériau compacté a été déterminé. et la teneur en eau, obtenue par étuvage à 105°C , a permis de calculer sa masse volumique sèche. Puis la courbe Proctor tracée exprimant les masses volumique en fonction des teneurs en eau.

Essai de compression simple (UCST)

Les essais ont été réalisés suivant la norme ASTM-D5102-96 Méthode B. les éprouvettes sont retirées de sachets filmés et testées en compression simple sur une presse sous le nom « MULTIS PEED TESTER » figure 2-14 d'une capacité de 50kN. et une vitesse variable de 0.5 à 63mm/min. équipée d'un poinçon monté sur un anneau dynamométrique de 5kN étalonné. Un comparateur au 100e de millimètre a été utilisé pour mesurer le déplacement. La vitesse de déplacement du plateau inférieur a été fixée à 0,6mm/min, les lectures des forces qui correspondent à la force de l'écrasement ont été enregistrées en fonction du déplacement et les courbes contrainte/déformation ont été tracées pour chacune des éprouvettes testées.



Figure 2-14 Appareil de Compression simple « MULTIS PEED TESTER »

Essai au cisaillement direct

Les essais ont été réalisés suivant la norme ASTM- D3080 Pour cet essai on a utilisé un moule carré en acier de dimensions normalisées $H = 2.19\text{cm}$ et $L = 6\text{cm}$ et un moule circulaire en acier de dimensions normalisées $H = 2.19\text{cm}$ et $\varnothing = 6\text{cm}$, les éprouvettes sont retirées de sachets filmés à un âge de 24h pour le mélange (argile +chaux+eau), on a utilisé un appareil sous le nom « SHEARTRONIC » équipé d'un anneau dynamométrique de 3kN étalonné et un comparateur au 100e de millimètre pour mesurer le déplacement .horizontal La vitesse de déplacement de la demi – boîte a été fixée à 1mm/min, on lit les lectures des forces horizontales qui correspondent à la force de cisaillement en fonction du déplacement Puis on trace les courbes contrainte/déplacement (figure 2-15)



Figure 2-15 Appareil de Cisaillement Direct

Essai Œdométrique

Pour cet essai on à préparé des échantillons circulaires de dimensions normalisées $H = 1,9\text{cm}$ et $\text{Ø} = 7\text{cm}$, le haut et le bas de l'échantillon sont constitués de pierres poreuses permettant l'évacuation de l'eau interstitielle, le chargement a été appliqué par palier, l'appareil a été déposé sur un bâti métallique Figure 2- 16 qui permet d'appliquer au piston des pressions par l'intermédiaire d'un bras de levier. La compressibilité de l'échantillon a été mesurée par un comparateur au 2000e de millimètre, on lit les lectures de déplacement vertical qui correspond à l'indice des vides en fonction de la contrainte de chargement en traçant la courbe de l'indice des vides en fonction de la contrainte.



Figure 2-16 Appareil Œdométrique

Chapitre 3

ESSAIS ET INTERPRETATIONS

3.1. INTRODUCTION.

Le présent chapitre présente et interprète les différents résultats obtenus lors des essais conduits en laboratoire sur l'argile de BENAZOUZ. Le premier essai était la détermination du pH de l'argile traité afin de situer le pourcentage initial de l'élément stabilisateur. Le deuxième essai était celui de la détermination des limites de liquidité et de plasticité ainsi que l'indice de plasticité de l'argile stabilisée. Le troisième essai était celui du Proctor normal afin d'identifier la teneur en eau optimale et la densité max relatives à chaque traitement. La compression simple avec l'influence de la période de conservation était le quatrième essai. Ce dernier a permis la détermination de la compression simple et la consistance de l'argile stabilisée et enfin le cinquième essai qui est le cisaillement direct pour l'évaluation des paramètres de résistance.

3.2. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES.

3.2.1. Influence du Pourcentage de la Chaux sur le pH.

L'influence du pourcentage de la chaux sur le pH de l'argile de BENAZOUZ a été investigué au moyen d'un pH mètre. Les résultats obtenus durant cette série d'essais sont donnés sur le tableau 3-1 et représentés sur la figure 3-1. La figure montre que la valeur de pH en fonction du pourcentage de chaux est croissante jusqu'à une valeur d'environ 13. Ce pH de 13 est supérieur à la valeur nominale de 12,4 celui-ci montre que l'argile est apte à être traité à la chaux à partir de 2% d'ajout de chaux.

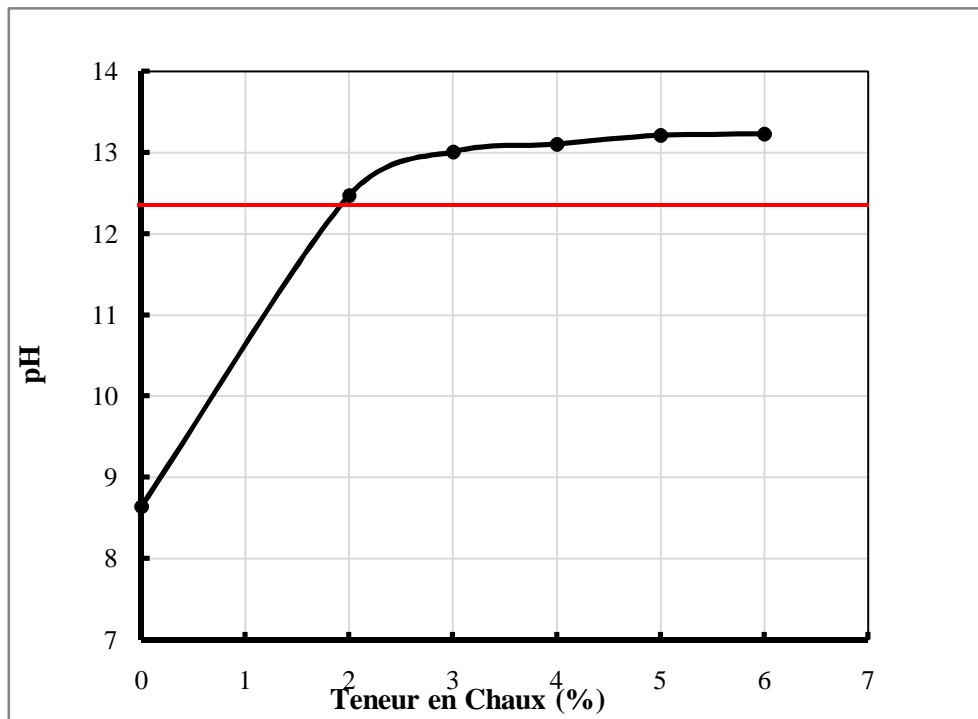


Figure 3-1 Evolution du pH-% de Chaux.

% Chaux	pH
0	8,64
2	12,47
3	13,01
4	13,1
5	13,21
6	13,23

Tableau 3-1 Evolution du pH - % de la Chaux

3.2.2. Influence du Pourcentage de la Chaux sur les Limites d'Atterberg.

L'influence du pourcentage de chaux sur la limite de liquidité, la limite de plasticité ainsi que l'indice de plasticité a fait l'objet de l'étude. Les résultats sont représentés successivement pour des pourcentages de : 2%, 4% et 6% d'ajout.

Limite de Liquidité

Les résultats des essais de limite de liquidité pour trois éprouvettes d'argile non traitée sont représentés sur la figure 3-2. La courbe obtenue montre une limite de liquidité de l'ordre de 58,50%.

Pour l'argile traitée à 2% de chaux, trois essais de limite de liquidité à une teneur en eau croissante ont été effectués et les résultats sont représentés sur la figure 3-3. La limite de liquidité correspondante à la teneur en eau à 25 coups est de l'ordre de 48,9%.

Les résultats de l'essai de limite de liquidité pour l'argile traitée à 4% de chaux sont représentés sur la figure 3-4. Celle-ci montre qu'une limite de liquidité de l'ordre de 46,18% a été obtenue.

La figure 3-5 montre l'essai de limite de liquidité pour d'argile traitée à 6% de chaux. La teneur en eau à 25 coups est de l'ordre de 46,73%.

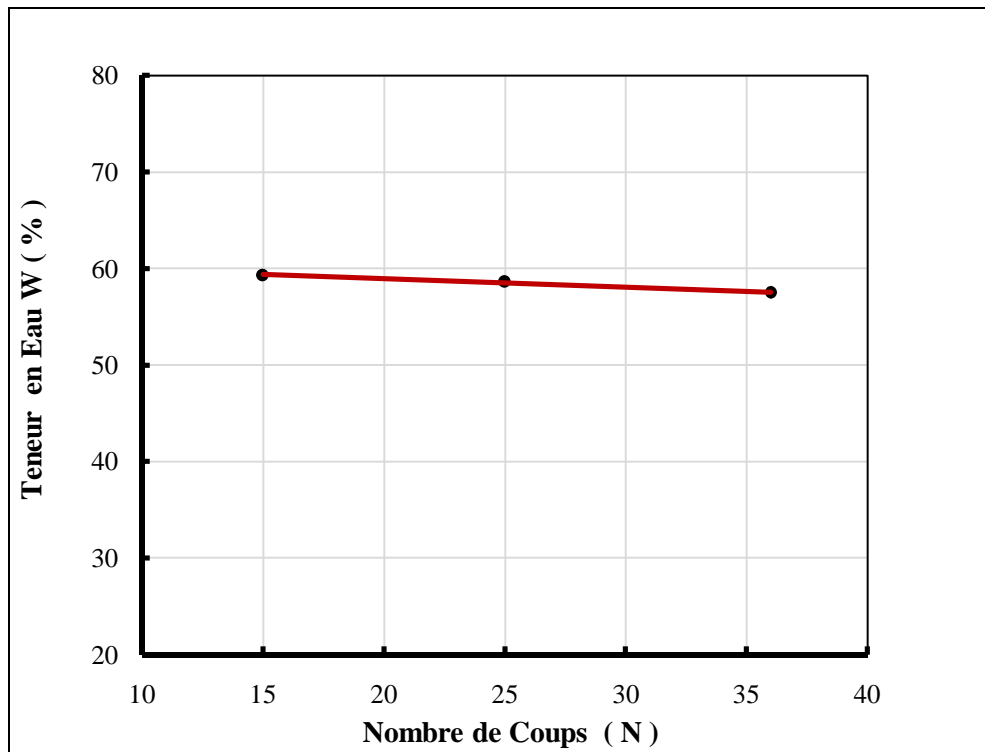


Figure 3-2 Limite de Liquidité pour l'Argile non Traitée.

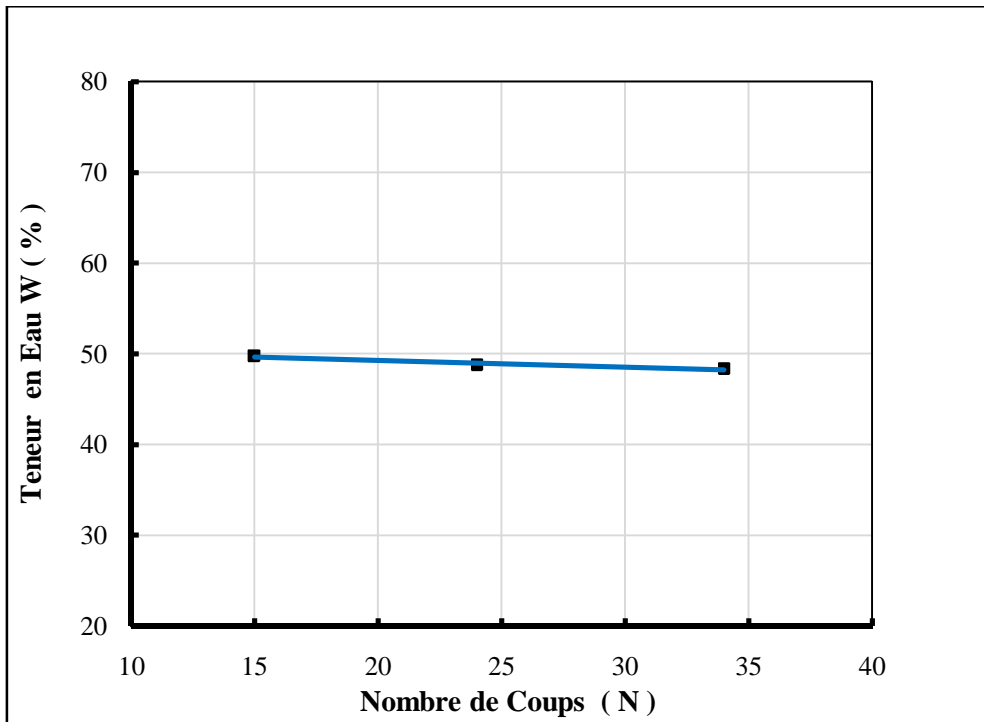


Figure 3-3 Limite de Liquidité Pour l'Argile +2 % Chaux.

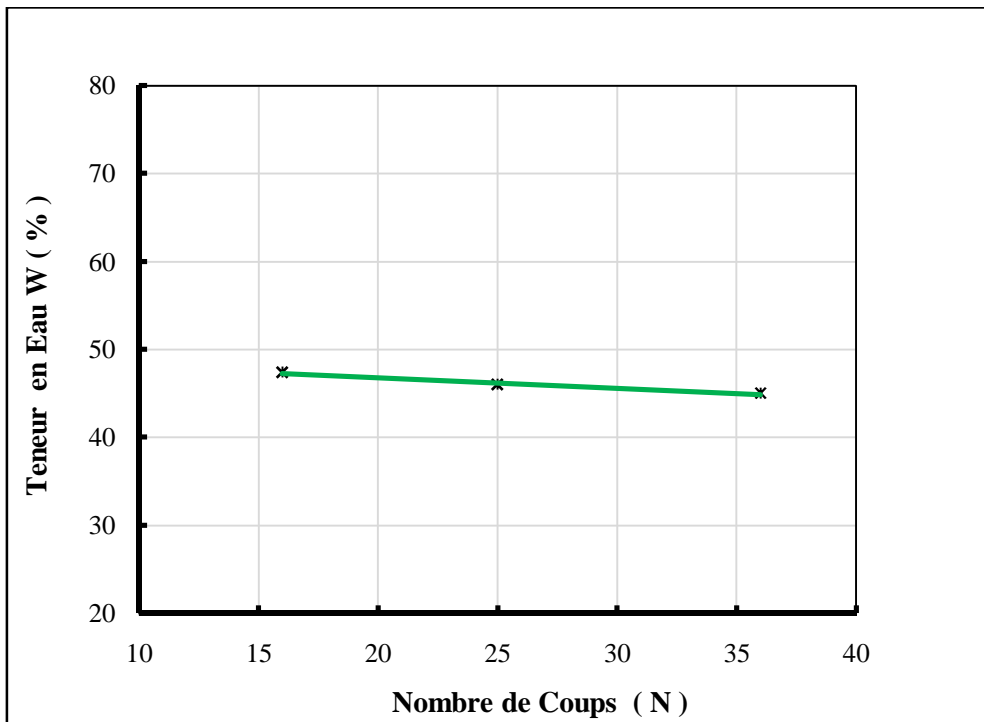


Figure 3-4 Limite de Liquidité Pour l'Argile + 4% Chaux.

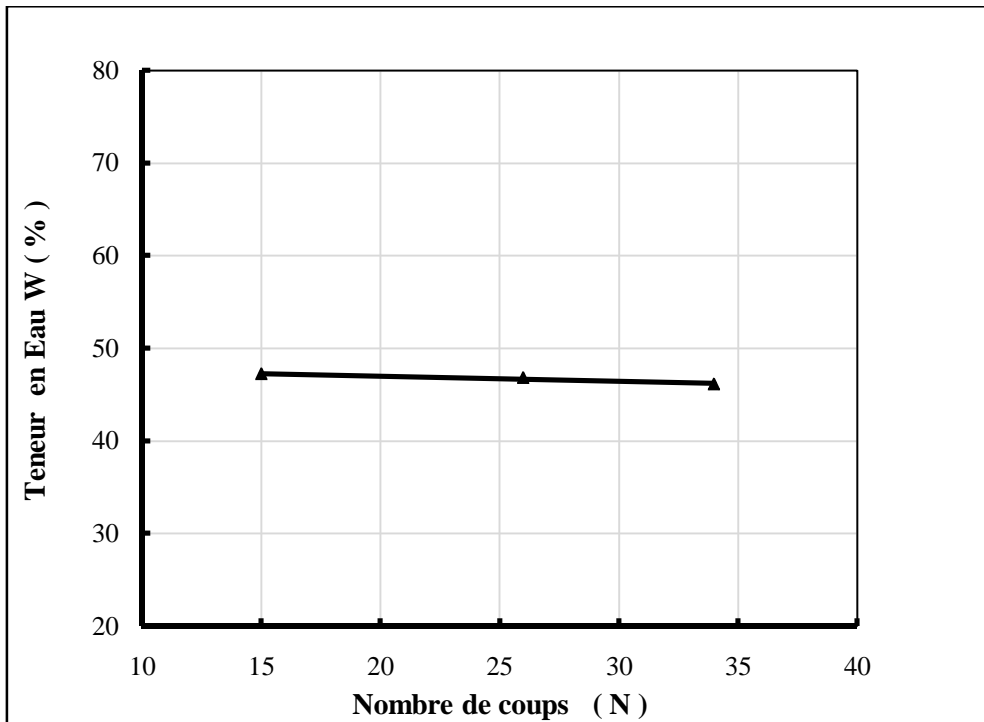


Figure 3-5 Limite de Liquidité Pour l'Argile +6 % chaux.

La représentation de la variation de la limite de liquidité en fonction du pourcentage de chaux est donnée sur la figure 3-6.

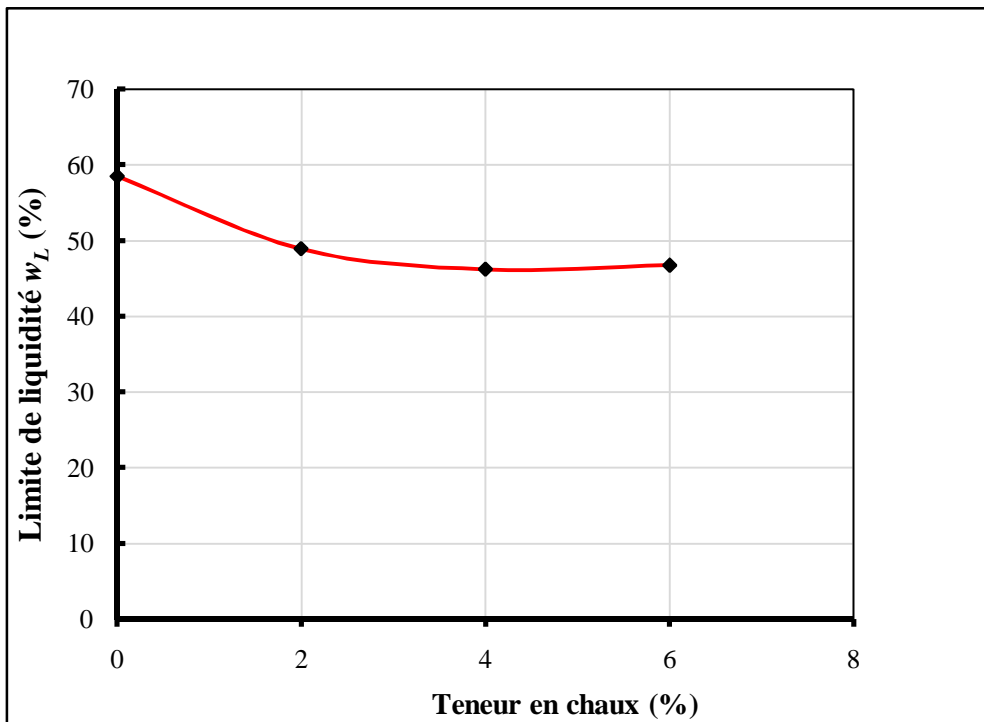


Figure 3-6 Influence du Pourcentage de la Chaux sur les Limites de Liquidité

Elle montre une diminution de la teneur en eau avec l'accroissement du pourcentage de chaux due certainement à l'absorption d'eau par hydratation de la chaux selon la formule chimique $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 15,5 \text{ kcal}$ Celle-ci tend à s'estamper à des pourcentages plus élevés. Ce résultat a été aussi observé par HILT et DAVIDSON, (1960), Davidson et HILT, (1960) LEROUX et RIVIERE, (1969), BRANDL (1981).P.SHERWOOD, (1993), F.G.BELL (1989 et 1996), K.A.KASSIM, et K.K. CHERN (2004), Z.NALBANTOGLU (2006) et Z.NALBANTOGLU (2006).

Limite de Plasticité

Les résultats de la limite de plasticité pour l'argile de BENAZZOUZ sont représentés sur la figure 3-7 pour 0%, 2%, 4% et 6% de chaux. En effet l'augmentation du pourcentage d'ajout de chaux engendre une augmentation de la limite de plasticité. La chaux agit sur les charges électriques des particules fines et modifie les champs électriques inter-particulaires, ce qui entraîne leur floculation. Le pourcentage optimum d'ajout de chaux pour l'obtention de l'accroissement maximum de la limite de plasticité du sol est appelé « seuil de fixation de la chaux » si l'on ajoute de la chaux au-delà de ce seuil elle est utilisée par le processus de cimentation, et conduit à une augmentation de la résistance du sol. Ce résultat a été aussi observé par HILT et DAVIDSON, (1960), Davidson et HILT, (1960) LEROUX et RIVIERE, (1969), BRANDL (1981).P.SHERWOOD, (1993), F.G.BELL (1989 et 1996), K.A.KASSIM, et K.K. CHERN (2004), Z.NALBANTOGLU (2006) et Z.NALBANTOGLU (2006).

Indice de Plasticité

Les limites de liquidité et de plasticité pour l'argile non traitée et traitée à différents pourcentages de chaux ont permis de calculer les indices de plasticité correspondants. La variation de ce paramètre en fonction du pourcentage de chaux est donnée sur la figure 3-8. Celle-ci montre que les indices de plasticité sont inversement proportionnels à l'accroissement du pourcentage de chaux. Cette proportion approche 52% de diminution de la teneur en eau correspondant à un pourcentage de chaux de 6%. Dans ce cas la chaux réagit avec les minéraux argileux dans le sol de manière ionique par nature. C'est une réaction complexe dans laquelle l'excès de cations de calcium, fourni par la chaux cause par son action de saturation sur les particules d'argile une *floculation* du sol ainsi qu'un *échange* de calcium

Avec d'autres cations dans la structure de l'argile. Par cette réaction la plasticité diminue la facilité pour la manipuler et augmente considérablement les changements de volume dus à l'humidité moins importante. Ce résultat a été aussi observé par HILT et DAVIDSON, (1960), Davidson et HILT, (1960) LEROUX et RIVIERE, (1969), BRANDL (1981).P.SHERWOOD, (1993), F.G.BELL (1989 et 1996), K.A.KASSIM, et K.K. CHERN (2004), Z.NALBANTOGLU (2006) et Z.NALBANTOGLU (2006).

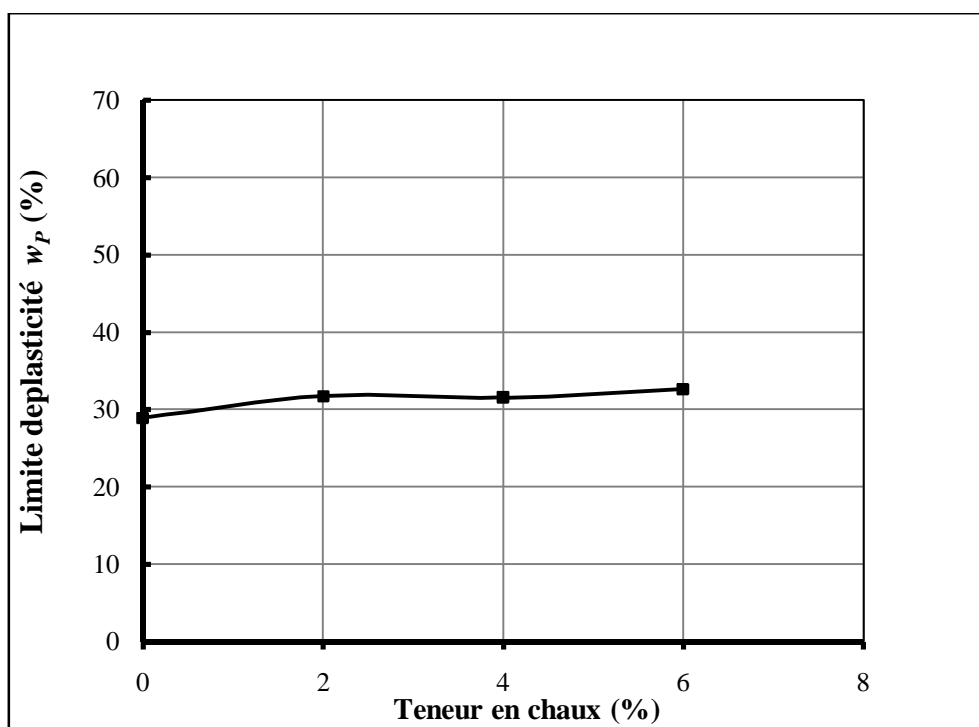


Figure 3-7 Influence du Pourcentage de la Chaux Sur les Limites de Plasticité

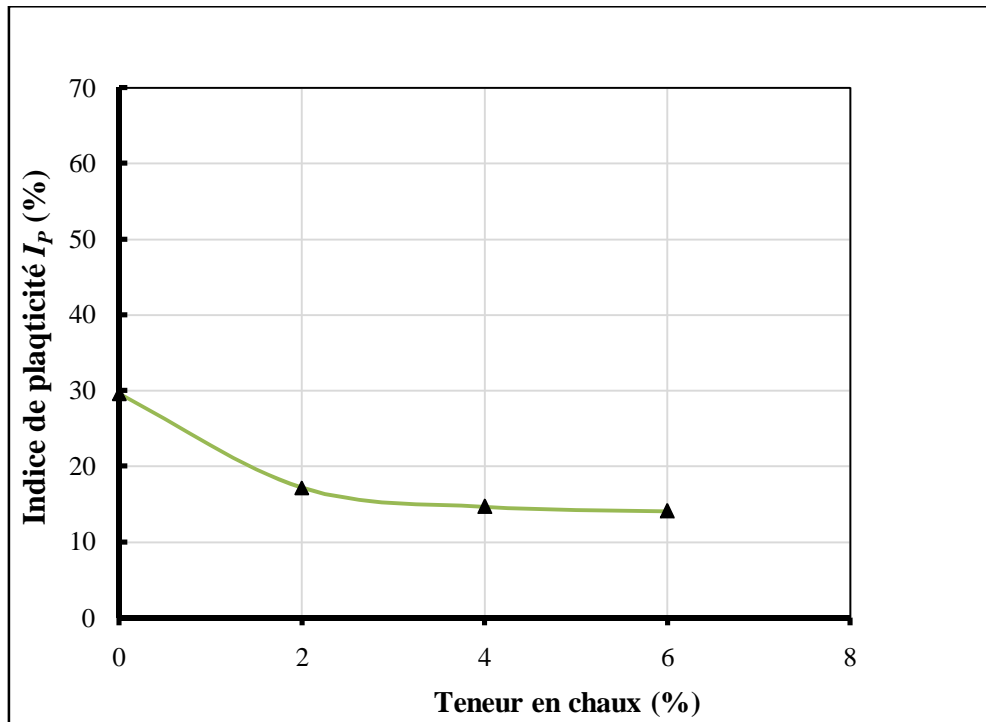


Figure 3-8 Influence du Pourcentage de la Chaux Sur l'indice de Plasticité

L'influence du pourcentage de chaux sur la liquidité, la plasticité et l'indice de plasticité de l'argile de BENAZZOUZ peut être mieux résumée par la figure 3-9.

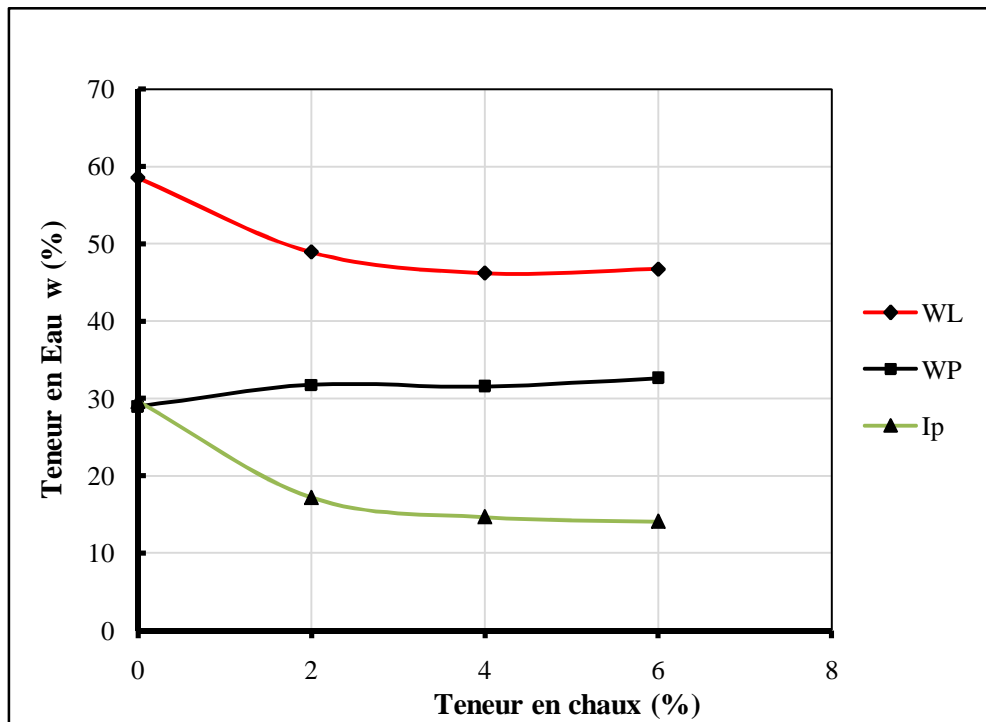


Figure 3-9 Influence du Pourcentage de la Chaux sur les Limites d'Atterberg.

3.2.3. Influence du Pourcentage de la Chaux Sur le Compactage.

A fin de voir l'influence des différents pourcentages d'ajout sur les paramètres de compactage de l'argile de BENAZZOUZ traitée à la chaux une série de 20 essais au compactage Proctor normal a été effectuée. Les résultats obtenus sont représentés ci après.

La figure 3-10 présente la courbe de compactage pour l'argile de BENAZZOUZ sans aucun traitement. La courbe de compactage montre une masse volumique sèche de 1532kg/m^3 obtenue pour une teneur en eau optimale de 25,85%.

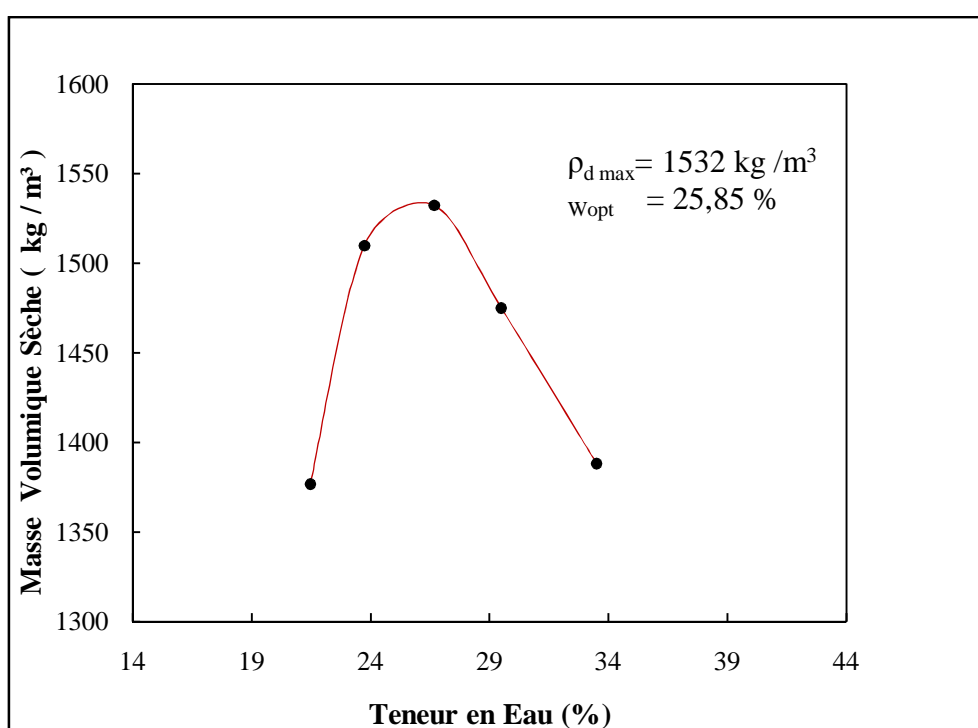


Figure 3-10 Courbe de compactage pour l'argile non traitée.

Les résultats de l'argile traitée à 2% sont donnés sur la figure 3-11. La courbe de compactage montre une masse volumique sèche de 1451kg/m^3 et une teneur en eau optimale de 29%.

Le traitement de l'argile à 4% de chaux a permis d'obtenir la courbe donnée sur la figure 3-12. Celle-ci montre une masse volumique maximale sèche de 1382kg/m^3 et une teneur en eau optimale de 31,3%.

L'ajout de 6% de chaux pour la stabilisation de l'argile a engendré une masse volumique maximale sèche de 1333kg/m³ et une teneur en eau optimale de 33,1%. La figure 3-13 montre clairement les paramètres obtenus.

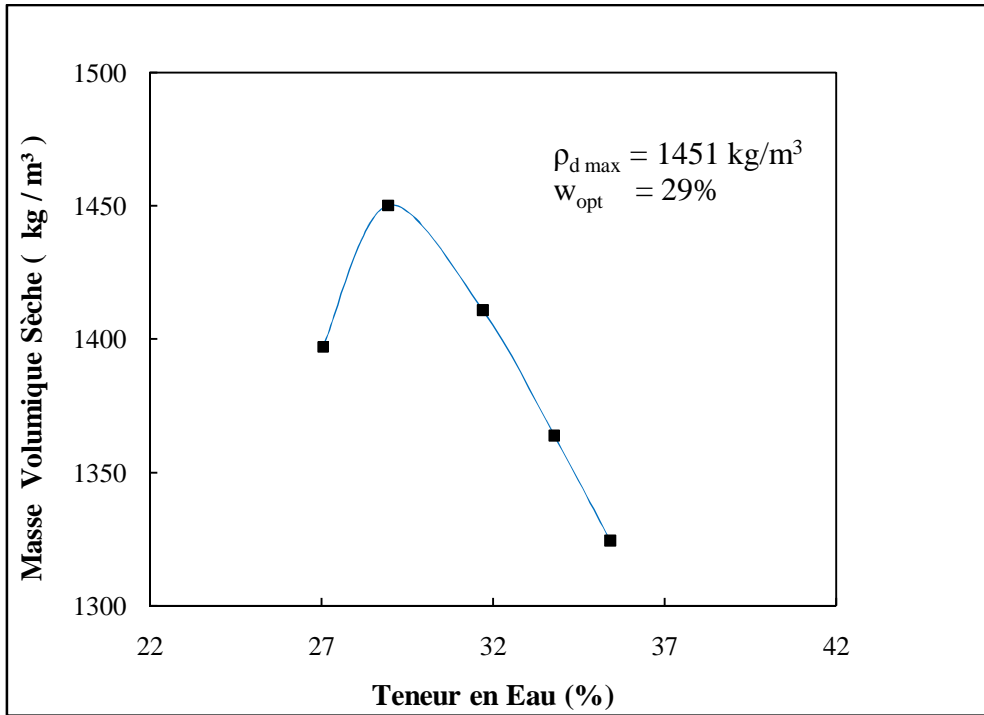


Figure 3-11 Courbe de compactage pour l'argile traitée à 2 % Chaux.

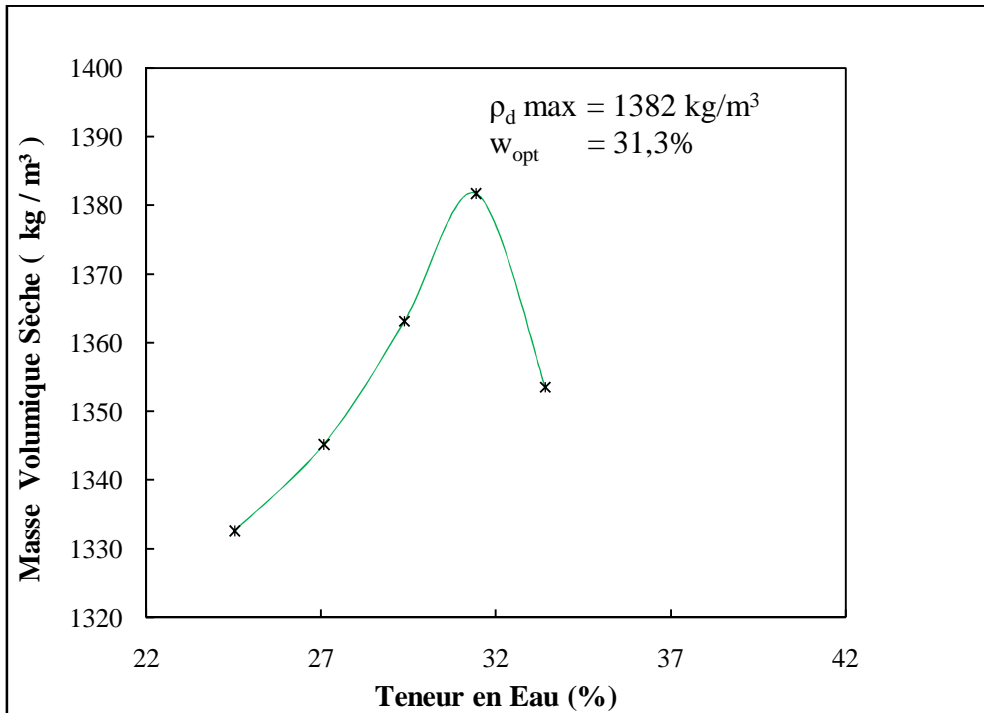


Figure 3-12 Courbe de compactage pour l'argile traitée à 4 % Chaux.

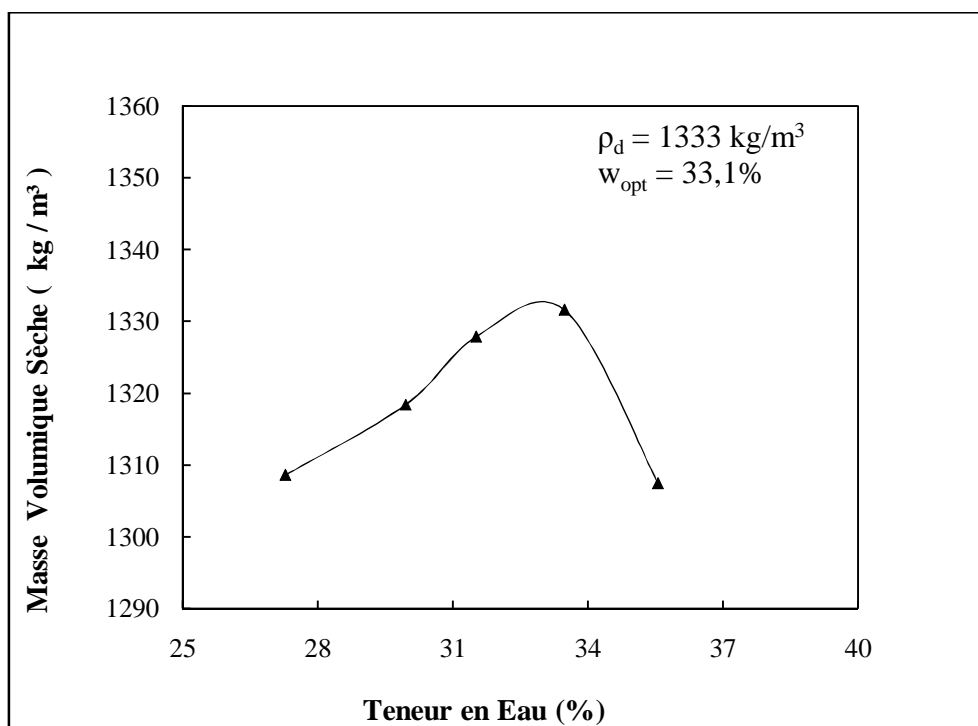


Figure 3-13 Essai PROCTOR Normal d' Argile Traitée à 6 % Chaux.

La figure 3-14 montre que les courbes Proctor des échantillons argileux traités à un pourcentage croissant s'inscrivent en dessous et à droite de l'argile naturelle et deviennent aplaties facilitant ainsi le choix de la teneur en eau optimale sur chantier.

L'augmentation des pourcentages de chaux provoque une réduction de la masse volumique sèche maximale. Cette diminution est schématisée par la représentation d'histogramme sur la figure 3-15. L'une des conséquences de cette observation est l'augmentation du coefficient de sécurité de l'ouvrage à réaliser.

Plus encore, l'accroissement du pourcentage de chaux entraîne une augmentation de la teneur eau optimale. La figure 3-16 montre clairement cette observation qui justifie l'insensibilité à l'eau de l'argile et par conséquent l'allongement de la durée de travail aux saisons humides. Ces mêmes résultats ont été observés par LEES et ALL (1982), M.R.ABDI et S.WILD (1993), LITTLE, (1995), F.G. BELL (1989 et 1996), M.AFES G DIDLER (2000), Z. NALBANTOGLU (2006), et M.C.TONOZ et al (2006),

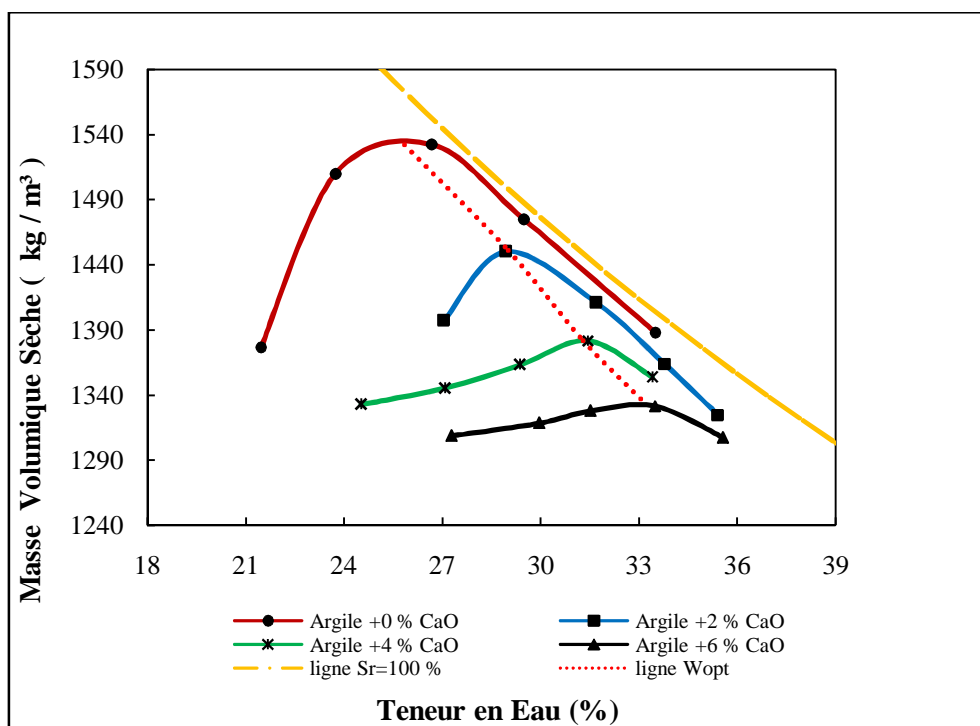


Figure 3-14 Influence de Pourcentage de Chaux sur la Compactage d'Argile.

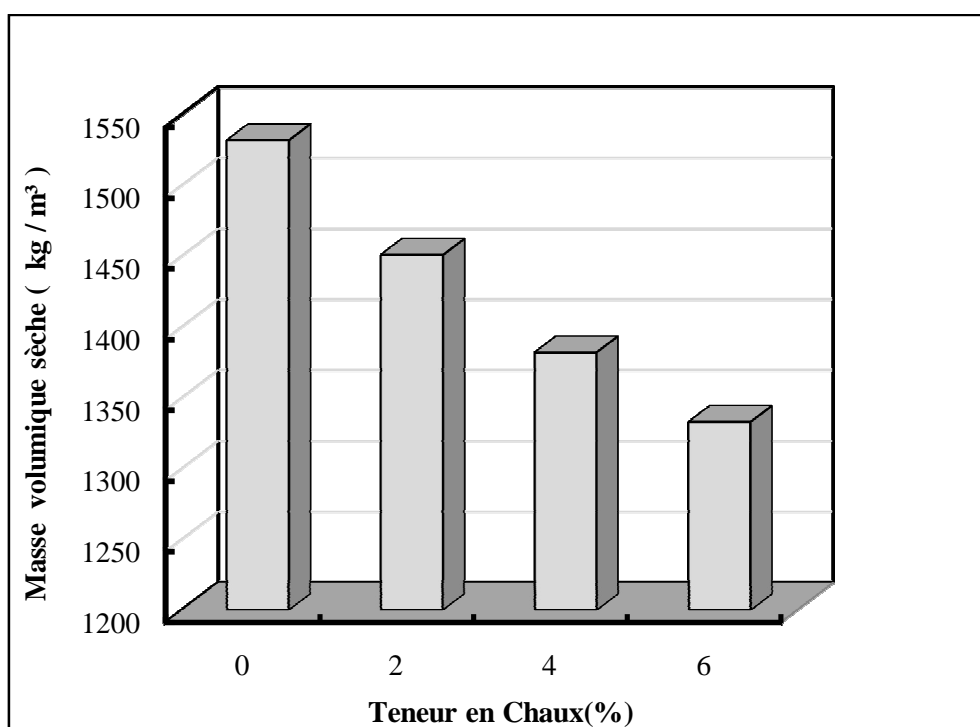


Figure 3-15 Evolution de la Masse Volumique Sèche – Teneur en Chaux

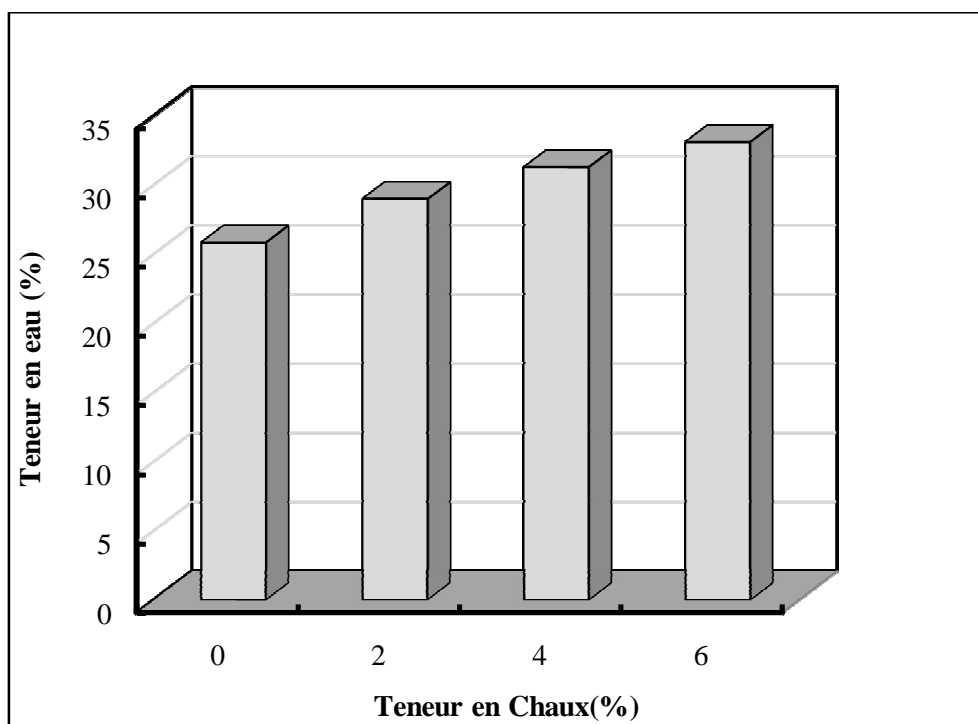


Figure 3-16 Evolution de la Teneur en Eau – Teneur en Chaux.

3.2.4. Influence du Pourcentage de la Chaux Sur la Compression Simple UCST.

Les essais de cisaillement à la compression simple ont été conduits sur des échantillons d'argile étanches après 3 jours de conservation dans une chambre humide à une température de 20°C.

La courbe de résistance à la compression simple de l'argile non traitée est montrée sur la figure 3-17. La rupture totale de l'éprouvette de sol a été observée pour une contrainte de 40.5kPa et une déformation axiale principale majeure de 5,8%. Le module d'élasticité qui n'est autre que la tangente à la courbe initiale est égal à 17kPa. La représentation du cercle de Mohr a permis de déduire une cohésion non drainée de 20,25kPa. La compression simple et la cohésion non drainée obtenues permettent de classer l'argile comme étant une argile *tendre* (Soft Clay)

La compression simple de l'argile traitée à 2% de chaux a permis de tracer la courbe de résistance de la figure 3-18. Cette argile traitée a montré une contrainte à la rupture de 46kPa obtenu pour une déformation axiale de 4,4%. L'analyse de cette courbe a permis de

déduire un module d'élasticité de 19kPa et une cohésion non drainée de 23kPa. Suite à ces résultats cette argile traitée à 2% est classée comme étant une argile *tendre* (Soft Clay).

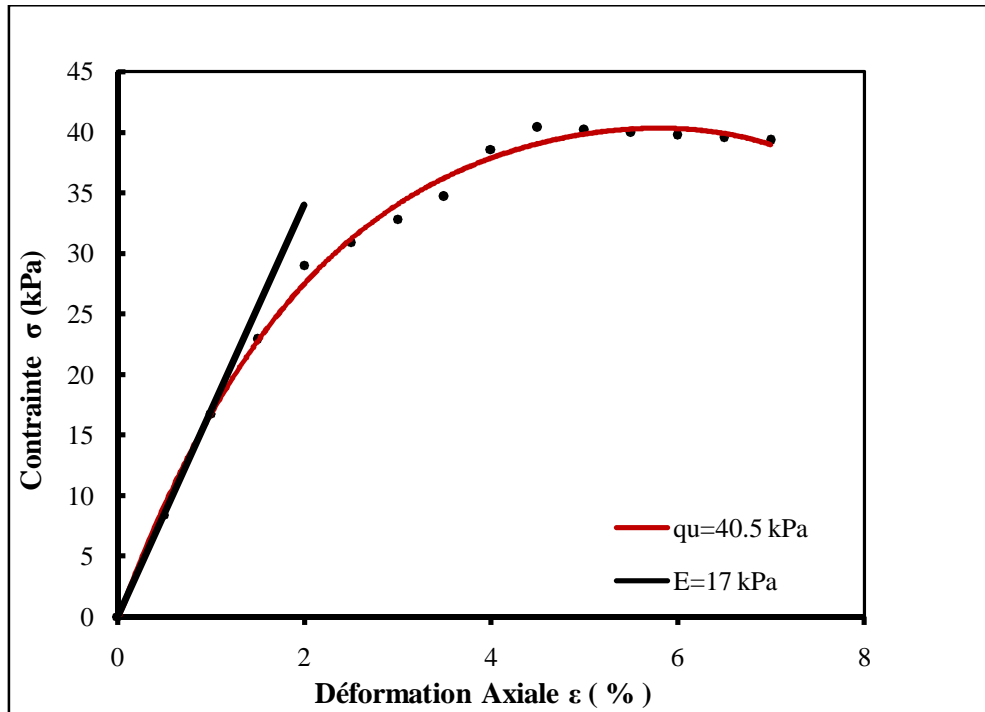


Figure 3-17 Essai de Compression Simple à 0 % de Chaux.

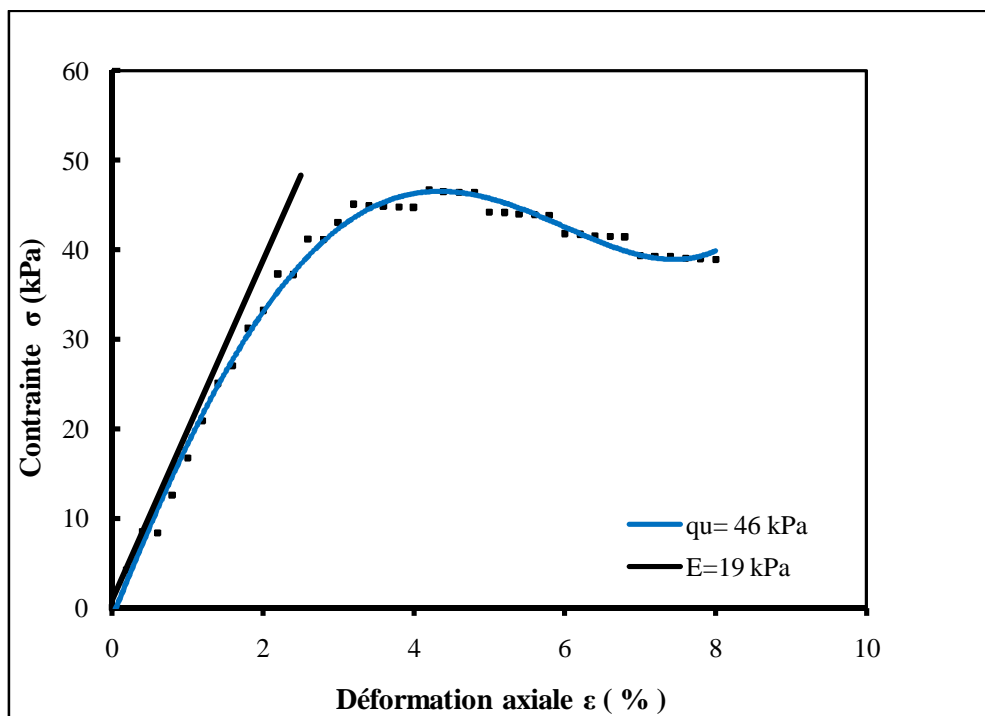


Figure 3-18 Essai de Compression Simple à 2 % de Chaux

Le traitement à 4% de chaux de l'argile est représenté sur la figure 3-19 en ce qui concerne sa résistance à la compression simple. Ce dernier a permis d'obtenir un déviateur à la rupture de 58kPa observé à une déformation axiale de 3,3% et un module d'élasticité de 24kPa ainsi qu'une cohésion non drainée de 29kPa. Il a en découle que l'argile traitée à 4% de chaux est une argile *moyen tendre* (Medium Soft Clay).

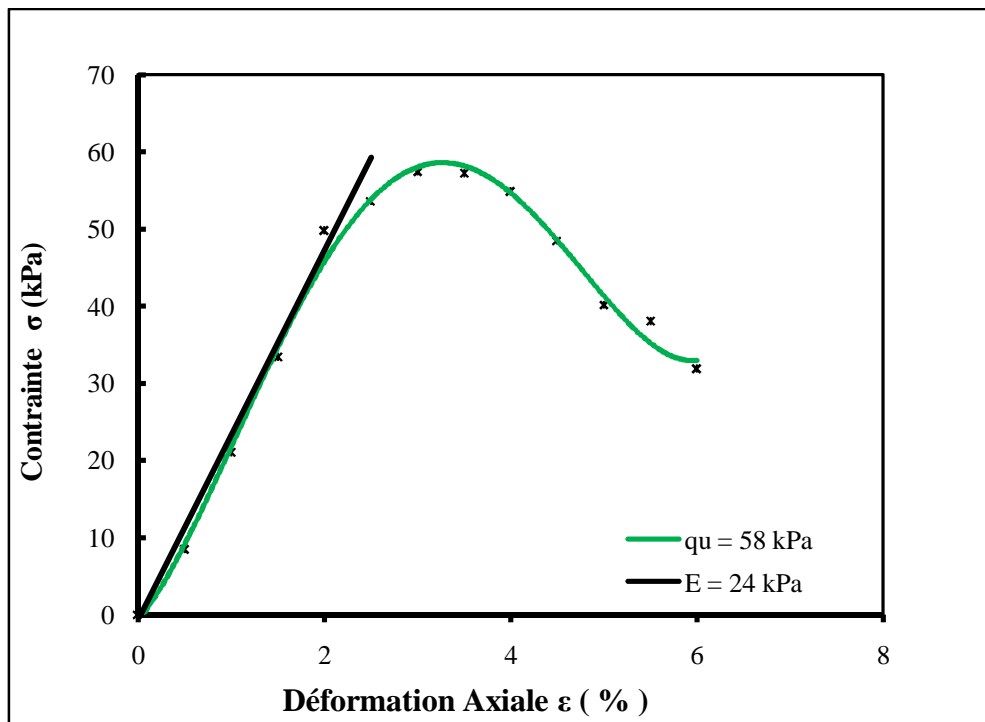


Figure 3-19 Essai de Compression Simple à 4 % de Chaux

Une contrainte axiale à rupture de 74kPa ainsi qu'une déformation axiale de 1,5% ont été obtenues pour une argile traitée à 6% de chaux figure 3-20. Le comportement de cette argile à UCST a montré un module d'élasticité et une cohésion non drainée successivement de 74kPa et 30,5kPa. Le traitement à 6% de chaux a transformé l'argile en une argile *moyenne tendre* (Medium Soft Clay)

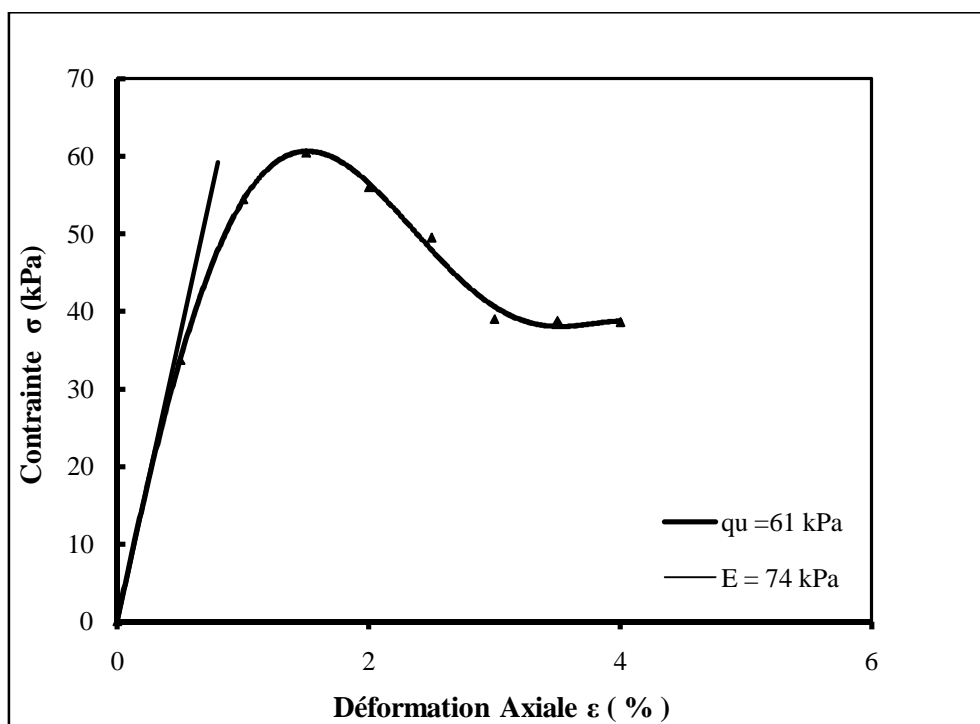


Figure 3-20 Essai de Compression Simple à 6 % de Chaux

La comparaison des résultats des essais sur l'argile non traitée et traitée à 2%, 4% et 6% de chaux est représentée sur la figure 3-21. Celle-ci montre que l'argile non traitée présente une courbe de compression étalée. L'ajout de la chaux semble augmenter la résistance à la compression et diminuer la déformation axiale à la rupture avec un pic bien prononcé.

La figure 3-22 représente la variation de la compression simple en fonction du pourcentage de chaux ajouté pour le traitement de l'argile. En effet la résistance semble augmenter avec l'augmentation du pourcentage de chaux. Ainsi, l'argile passe d'une consistance tendre à une consistance moyenne tendre à 4 et 6% de chaux.

La diminution de la déformation axiale à la rupture avec l'augmentation du pourcentage de chaux est représentée sur la figure 3-23 sous forme d'histogramme elle passe de 5,8 % pour une argile non traitée à 4,4% pour l'argile traitée à 2% et 3,3% pour l'argile traitée à 4% et 1,5% pour l'argile traitée à 6%.

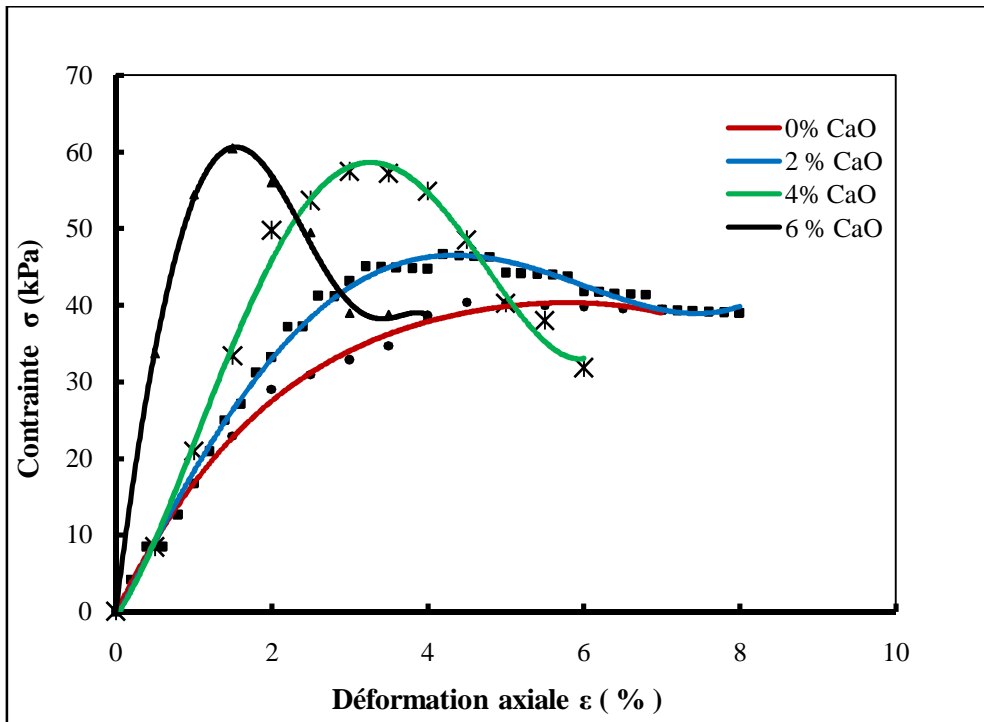


Figure 3-21 Essai de Compression Simple à 3 jrs

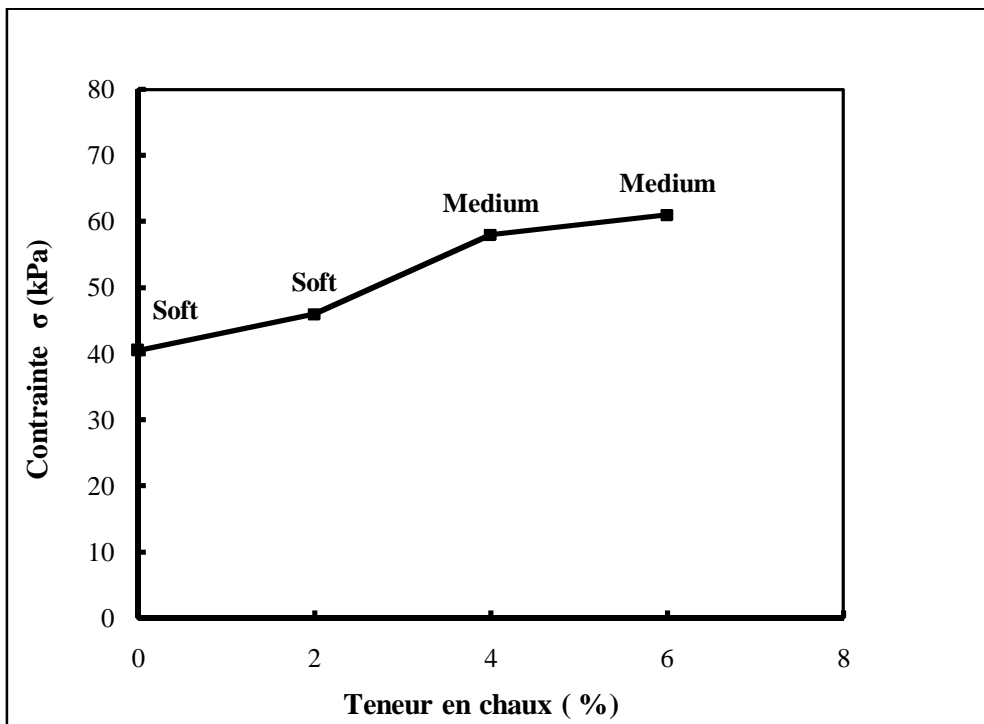


Figure 3-22 Effet de la Chaux sur la Compression Simple à 3 Jours

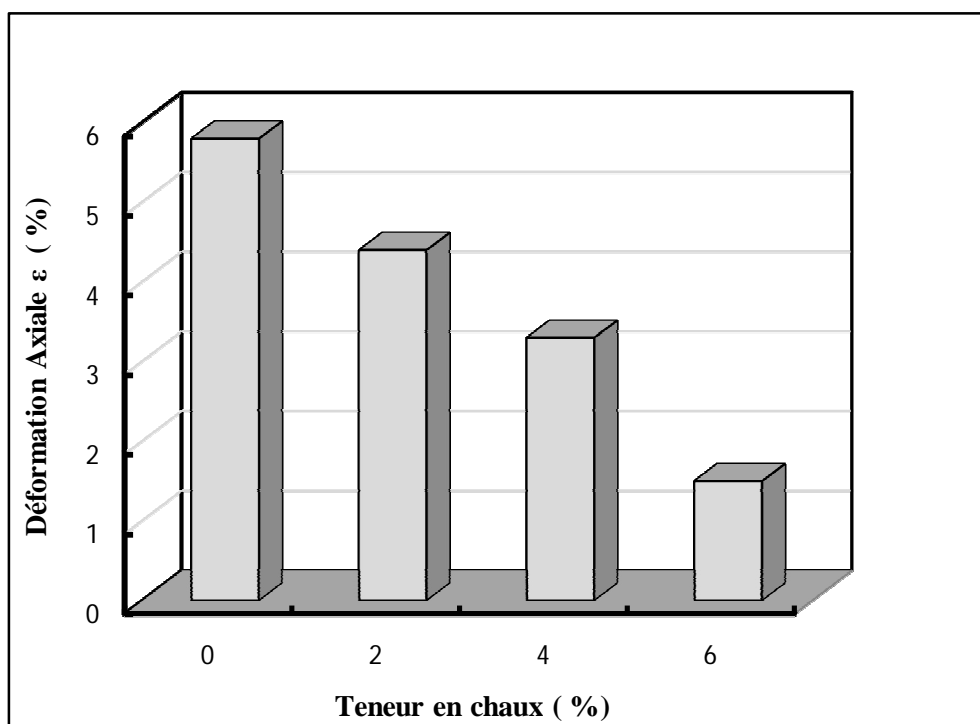


Figure 3-23 Effet de la Chaux sur la Déformation Axiale 3 Jours

La variation du module d'élasticité en fonction du pourcentage de chaux est montrée sur la figure 3-24. Celle-ci montre que la pente de la droite augmente d'une manière significative avec l'accroissement du pourcentage de la chaux passant d'un module d'élasticité de 17kPa à 0% de chaux à successivement 19, 24, 74kPa pour un traitement de 2, 4, et 6% de chaux.

La figure 3-25 montre l'amélioration de la cohésion non drainée de l'argile lorsque celle-ci est traitée à la chaux. Cette cohésion passe de 20,25kPa pour non traitée à 23kPa à 2%, puis à 29kPa à 4% et 30,5kPa à 6% de chaux.

L'effet du temps sur les paramètres de résistance de l'argile traitée à la chaux a aussi fait objet dans cette étude. Après avoir présenté les résultats de l'essai UCST pour 3 jours de conservation dans la section précédente, les résultats pour l'argile conservée à 7, 14, 21 et 28 jours sont donnés ci après.

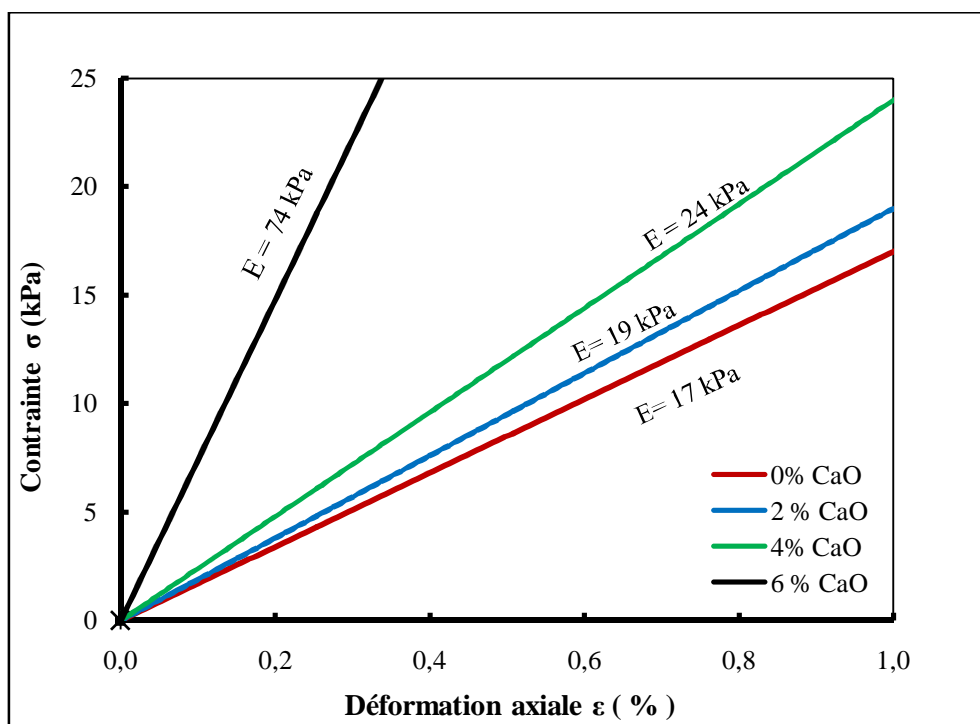


Figure 3-24 Effet de la Chaux sur le Module d'Elasticité à 3 Jours

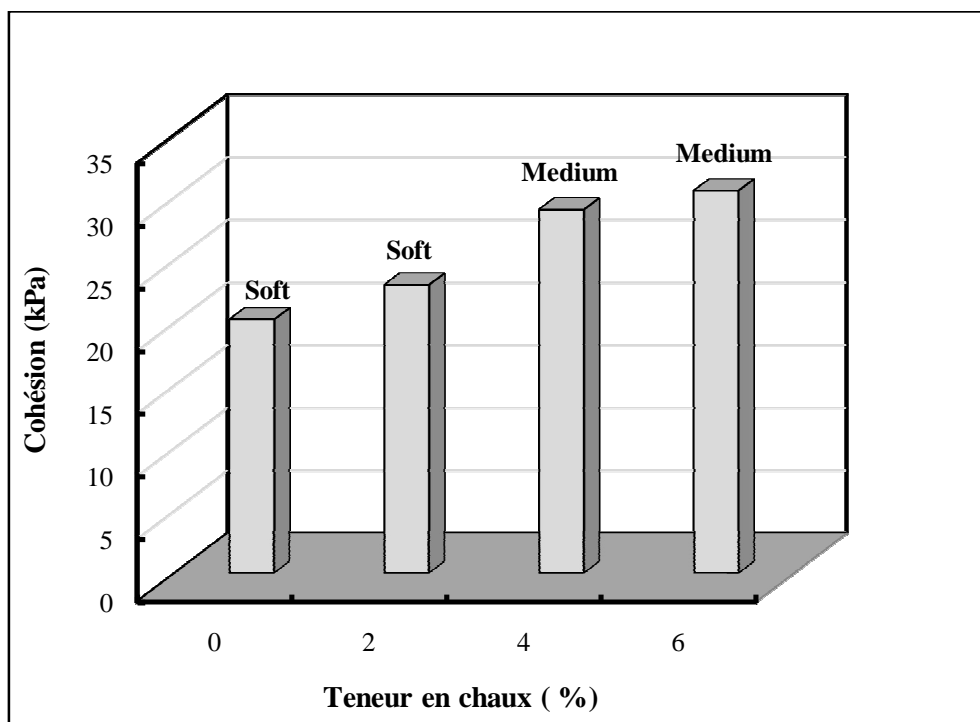


Figure 3-25 Effet de la Chaux sur la Cohésion à 3 Jours

Les figures 3-26 à 3-30 représentent les résultats obtenus après *7 jours* de conservation. La figure 3-26 montre l'amélioration dans la résistance de l'argile traitée et la diminution de la déformation axiale à la rupture. La compression simple passe de 40.5kPa à 0% de chaux à 85kPa à 2%, 110kPa à 4% et 305kPa à 6%.

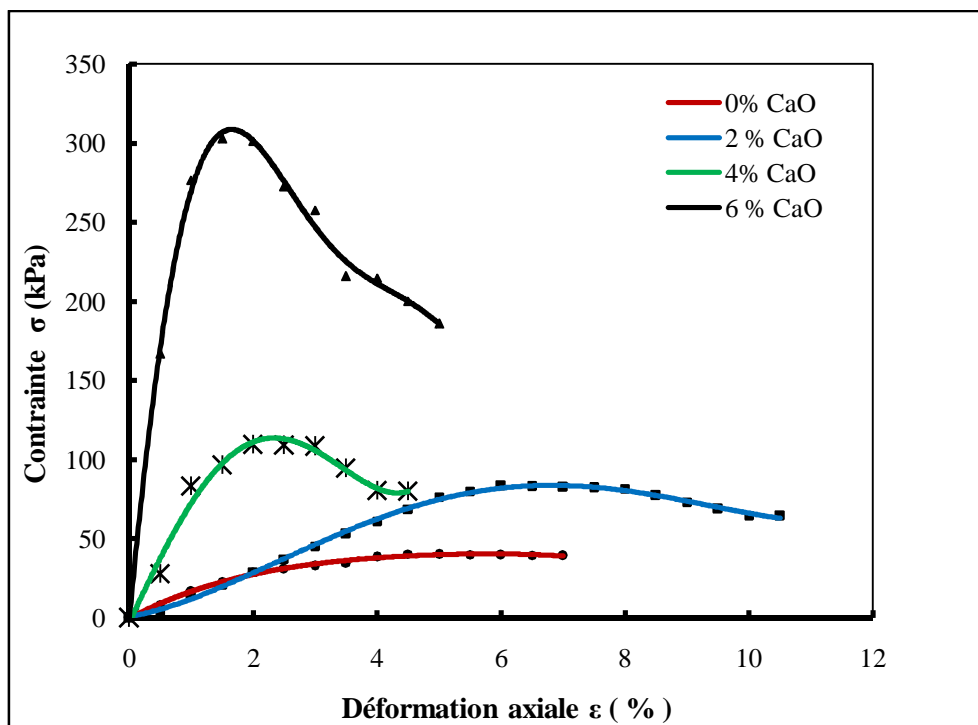


Figure 3-26 Essai de Compression Simple à 7 jrs

Après 7 jours de conservation, La figure 3-27 montre que la compression simple de l'argile traitée continue à s'améliorer lorsque le pourcentage de chaux est augmenté.

La figure 3-28 représente la variation de la déformation axiale à la rupture en fonction du pourcentage de chaux après 7 jours de conservation. Après une légère augmentation de la déformation à 2% celle-ci semble diminuer lorsque le pourcentage de chaux est augmenté. Cette augmentation dans la déformation à 2% peut être expliquée par une réaction non uniforme dans toute la nouvelle matrice.

Le module d'élasticité étant inversement proportionnel à la déformation, ce dernier diminue légèrement à 2% de chaux avant de reprendre son accroissement. Ce dernier est montré sur la figure 3-29. La figure 3-30 montre l'amélioration de la cohésion non drainée de l'argile lorsque celle-ci est traitée à la chaux. Cette cohésion passe de 20.25kPa pour non

traitée à 42.5kPa à 2%, puis à 55kPa à 4%, et 152.5kPa à 6% de chaux. Une amélioration claire et nette.

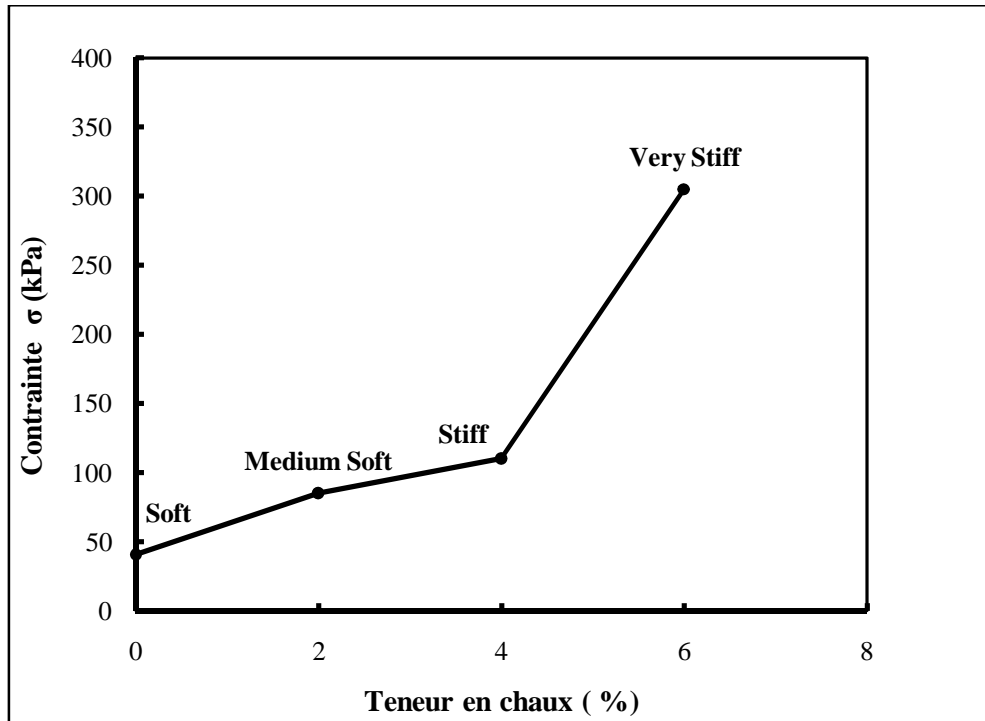


Figure 3-27 Effet de la Chaux sur la Compression Simple à 7 Jours

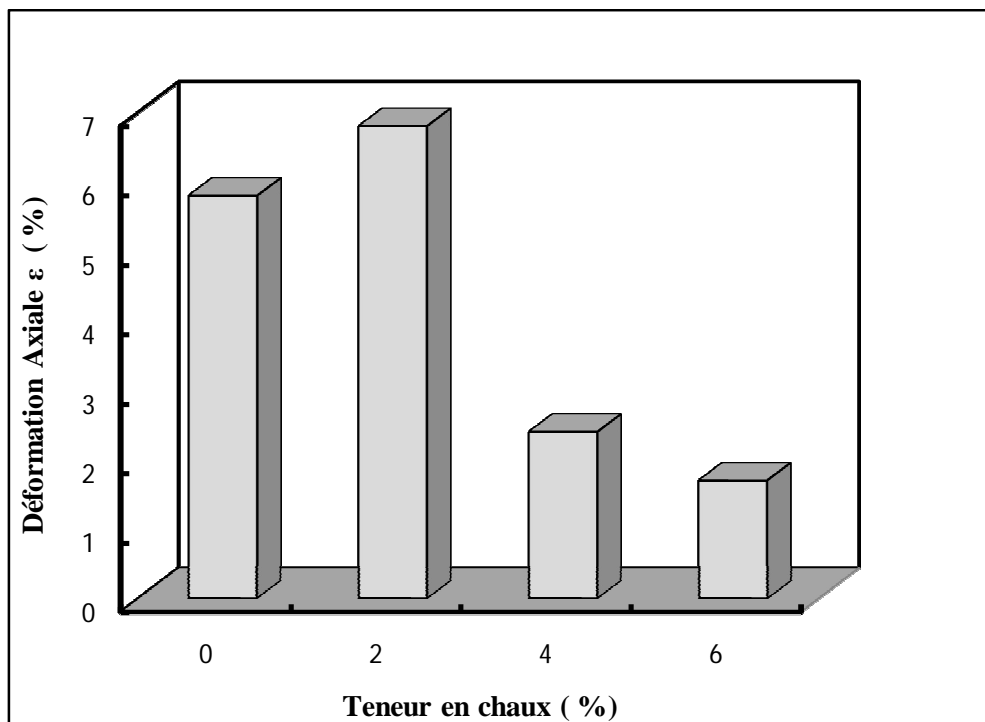


Figure 3-28 Evolution du Déformation – Teneur en Chaux à 7 Jours

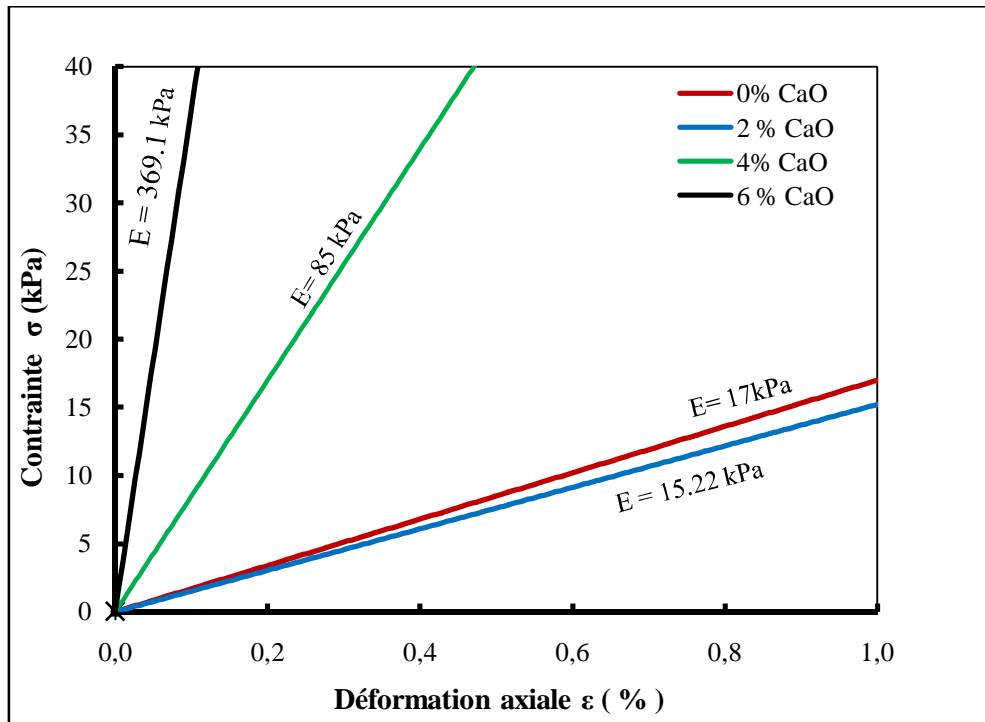


Figure 3-29 Effet de la Chaux sur le Module d'Elasticité à 7 Jours

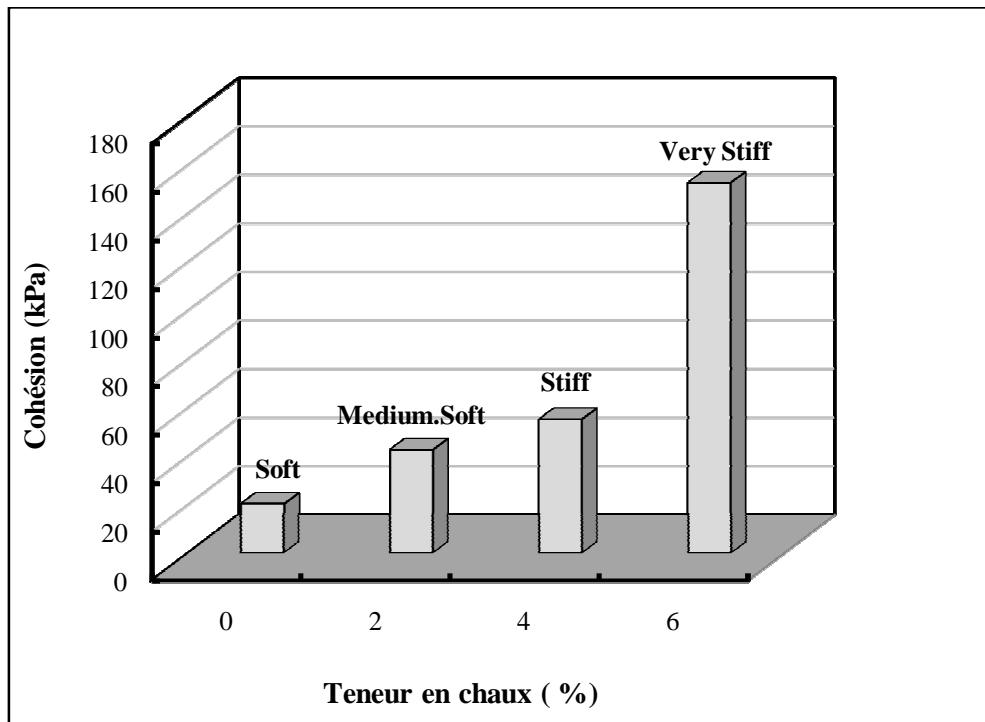


Figure 3-30 Effet de la Chaux sur la Contrainte à 7 Jours

Toutes ces observations montrées pour les deux cas de traitement d'argile à des pourcentages élevés sont confirmées pour un traitement à la chaux et une conservation à 14, 21 et 28 jours sur les figures 3-31-à 3-45 présentées ci après :

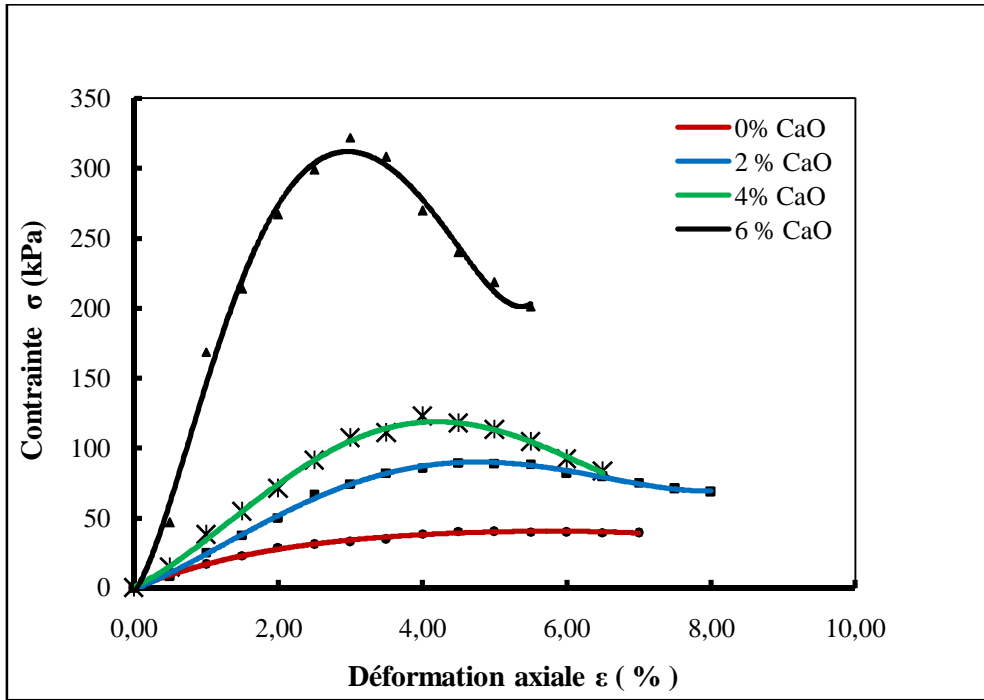


Figure 3-31 Essai de Compression Simple à 14 jrs

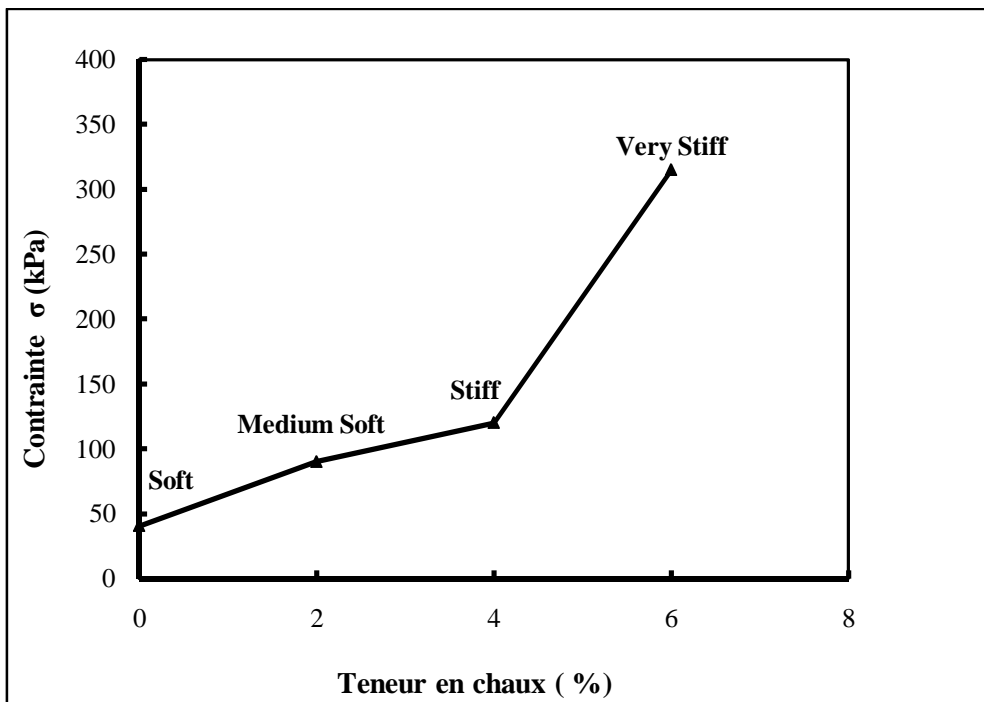


Figure 3-32 Effet de la Chaux sur la Compression Simple à 14 Jours

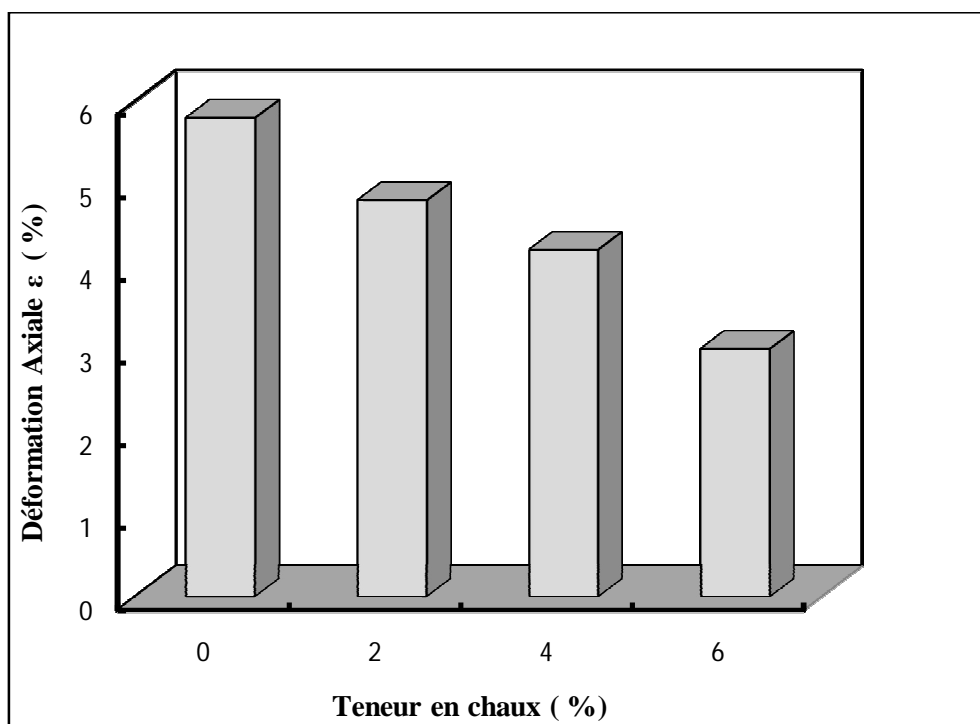


Figure 3-33 Evolution du Déformation – Teneur en Chaux à 14 Jours

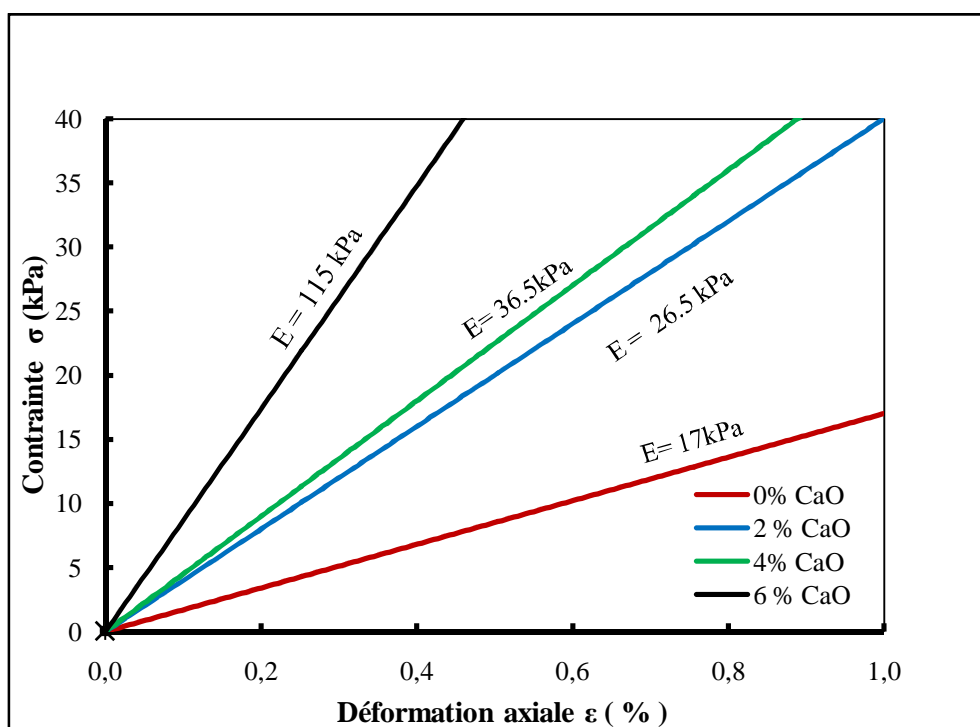


Figure 3-34 Effet de la Chaux sur le Module d'Elasticité à 14 Jours

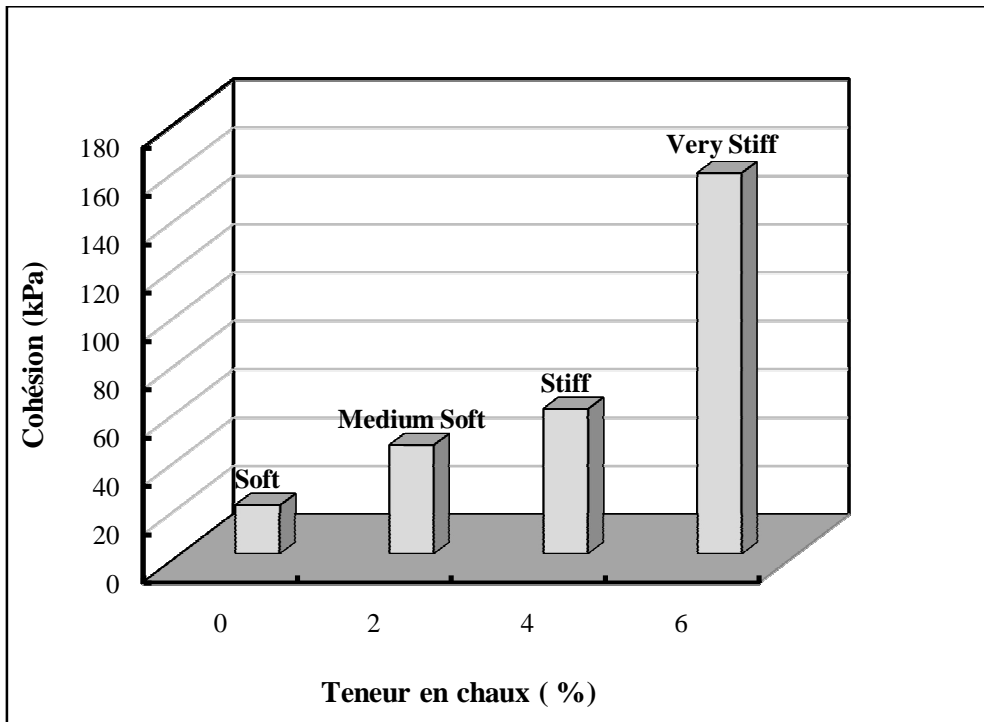


Figure 3-35 Effet de la Chaux sur la Contrainte à 14 Jours

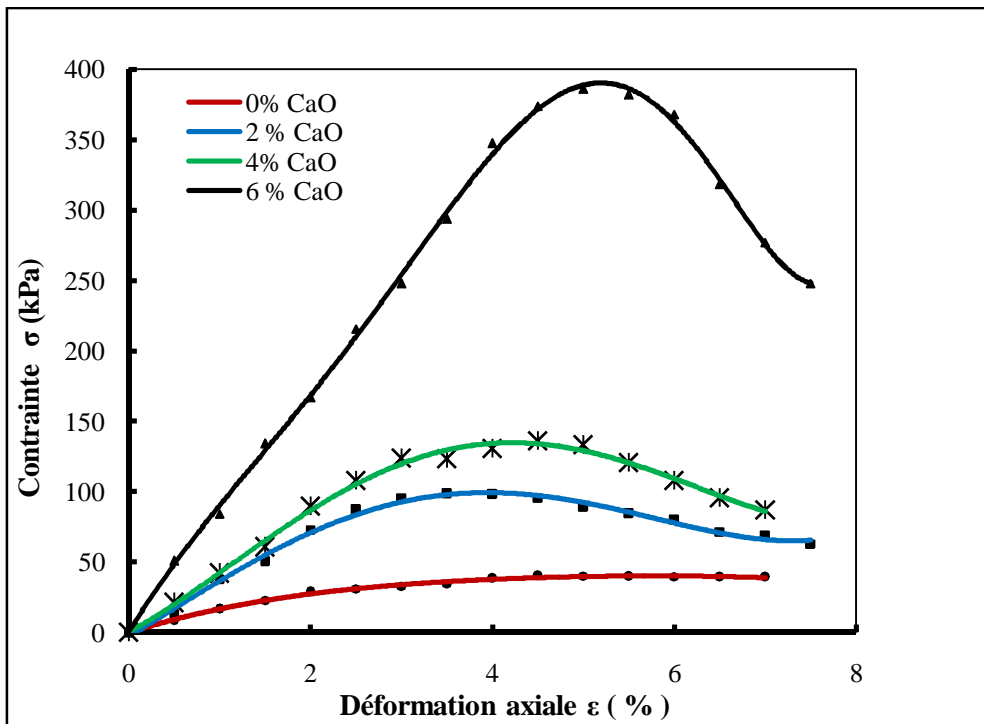


Figure 3-36 Essai de Compression Simple à 21 jours

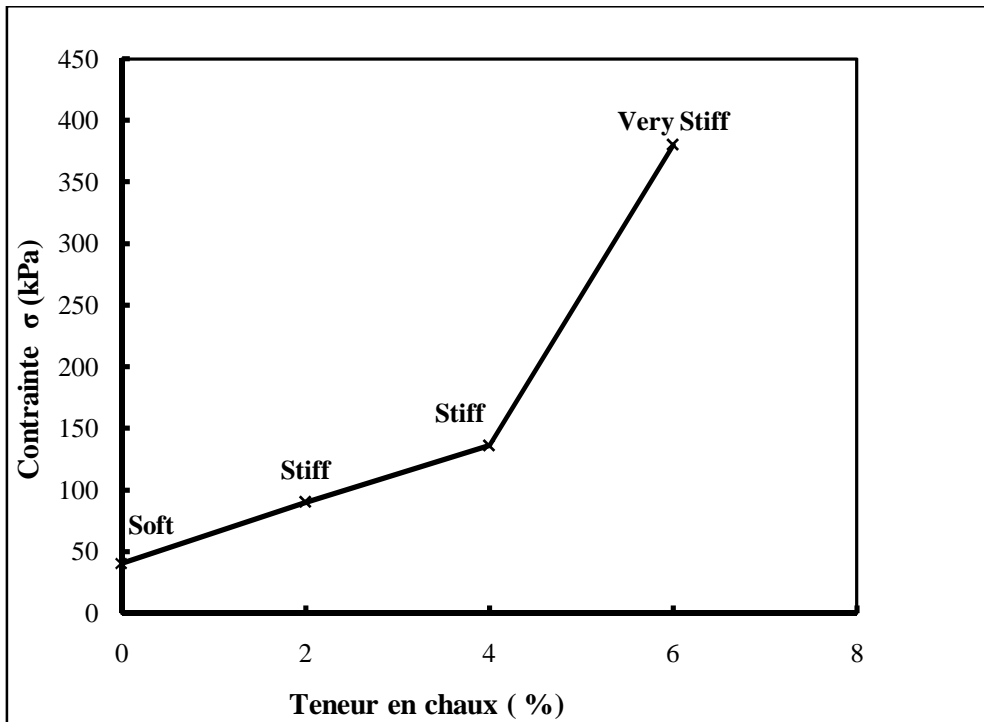


Figure 3-37 Effet de la Chaux sur la Compression Simple à 21 Jours

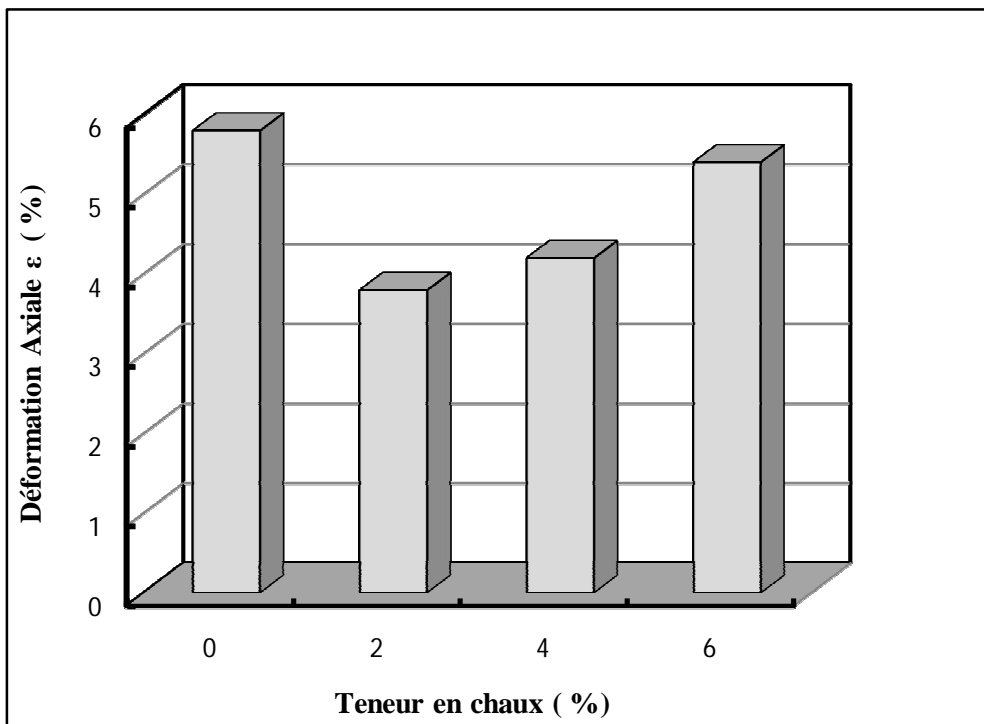


Figure 3-38 Evolution du Déformation – Teneur en Chaux à 21 Jours

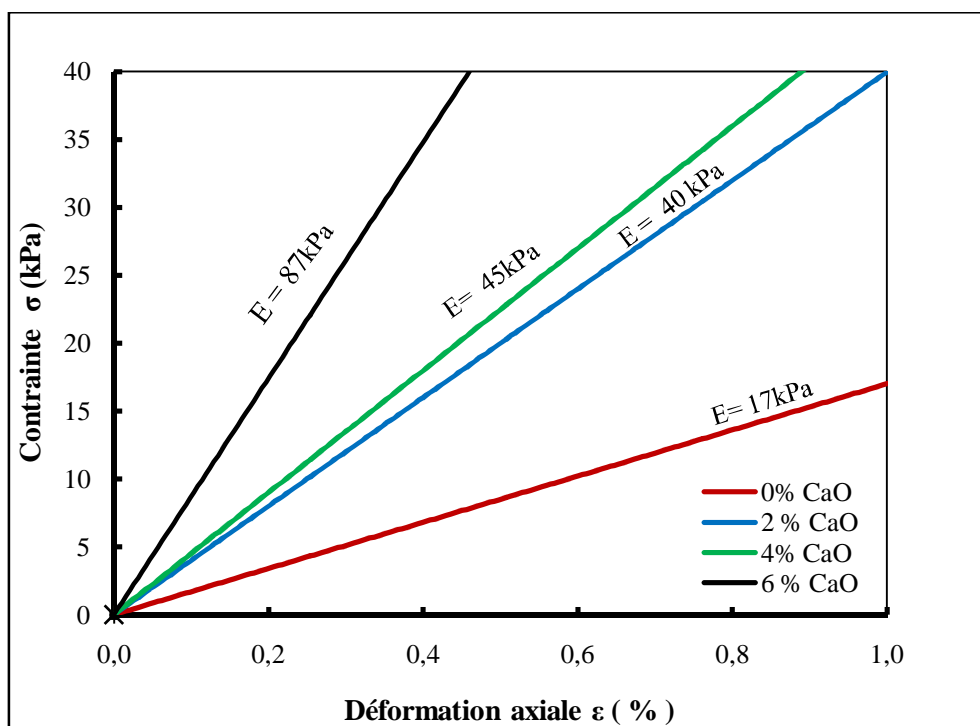


Figure 3-39 Effet de la Chaux sur le Module d'Elasticité à 21 Jours

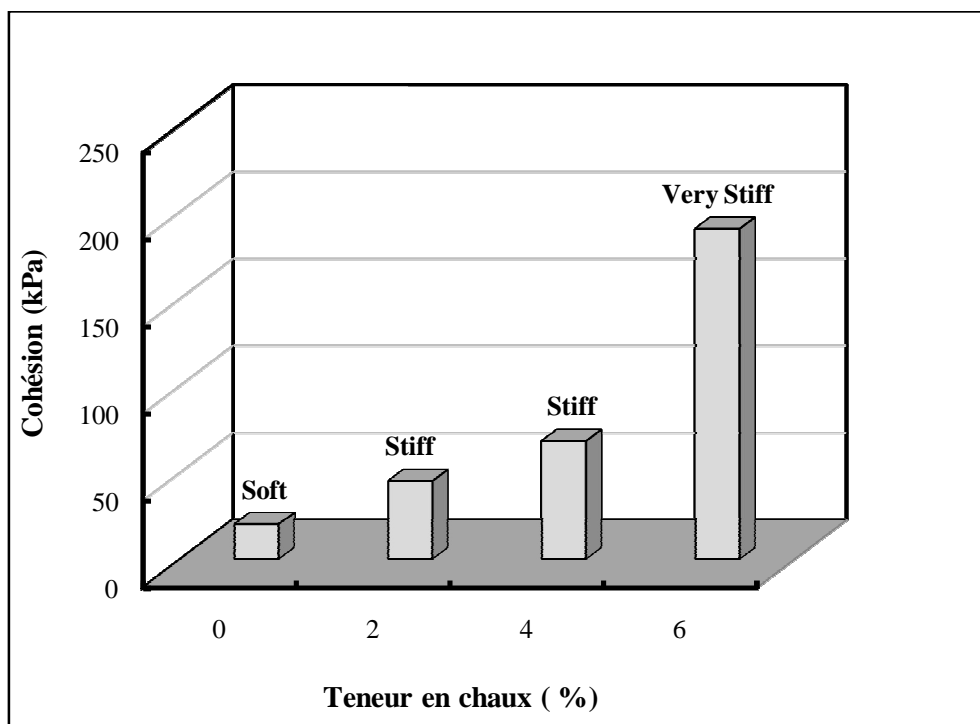


Figure 3-40 Effet de la Chaux sur la Cohésion à 21 Jours

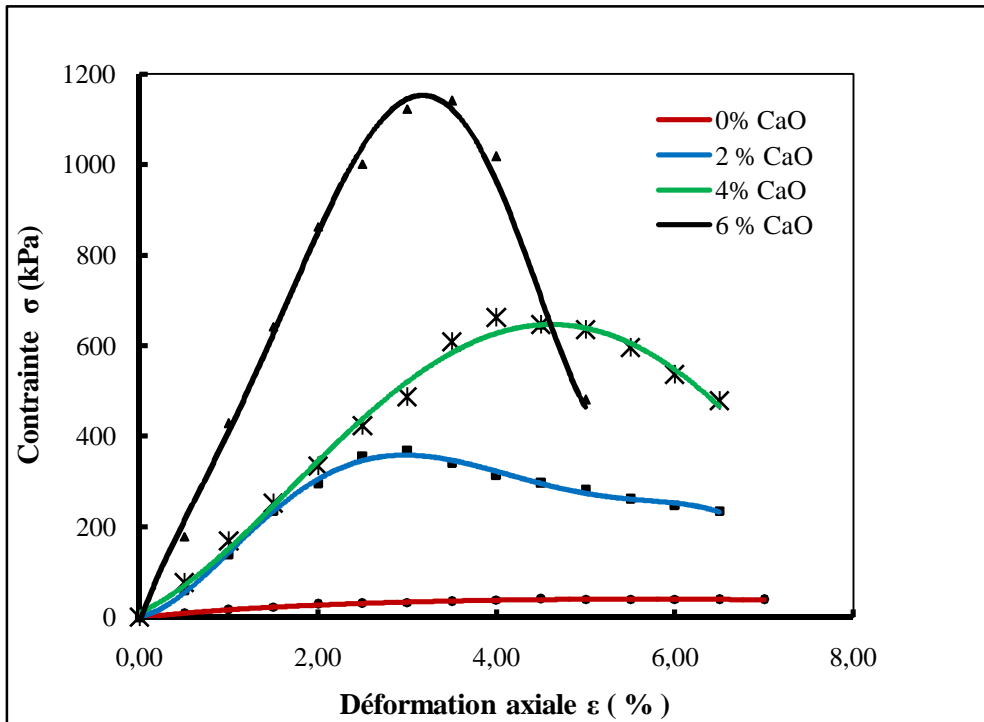


Figure 3-41 Essai de Compression Simple à 28 jrs.

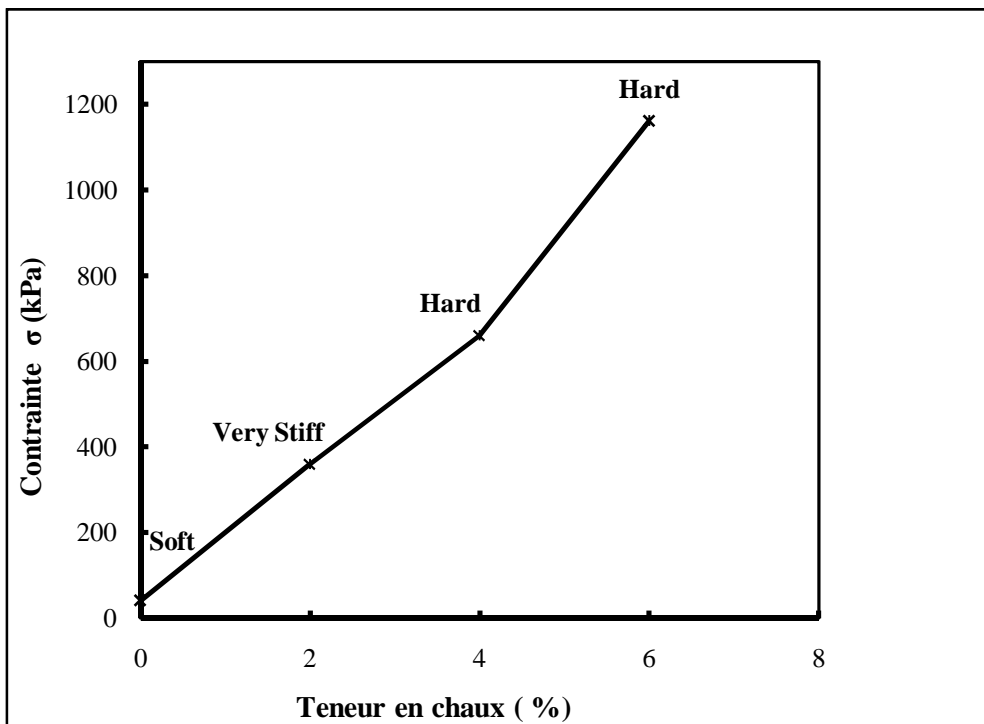


Figure 3-42 Effet de la Chaux sur la Compression Simple à 28 Jours

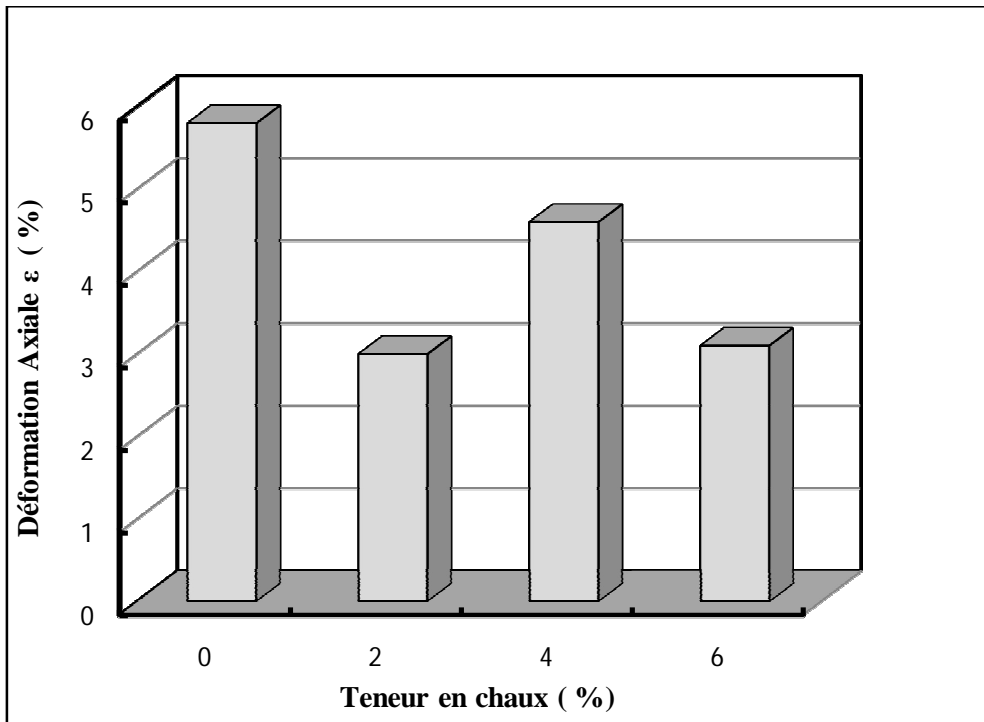


Figure 3-43 Evolution du Déformation – Teneur en Chaux à 28 Jours

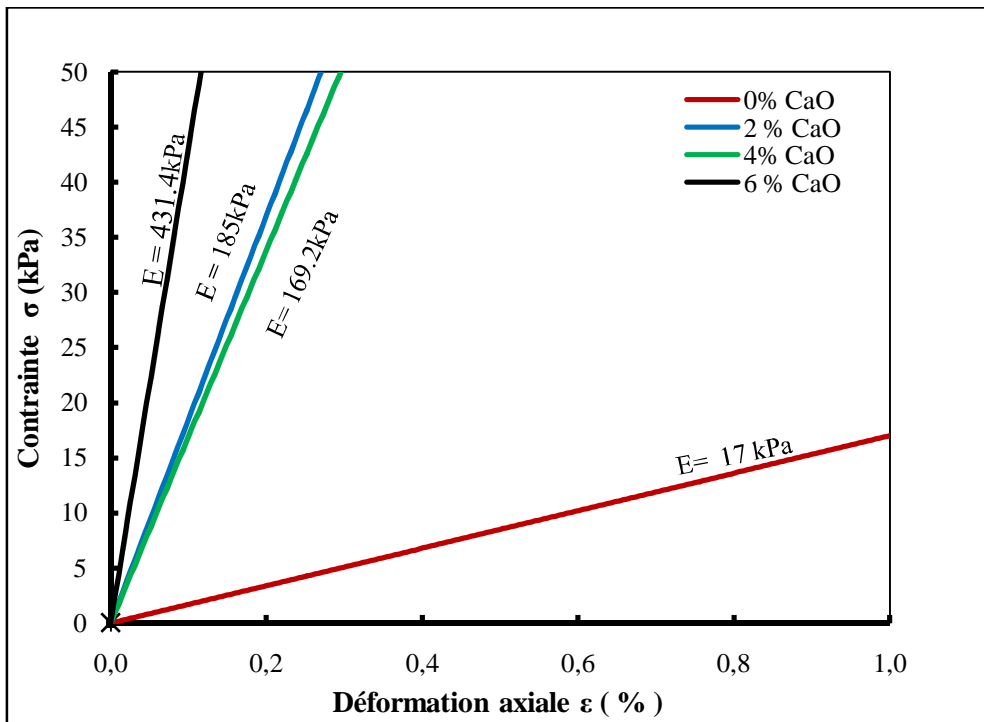


Figure 3-44 Effet de la Chaux sur le Module d'Elasticité à 28 Jours

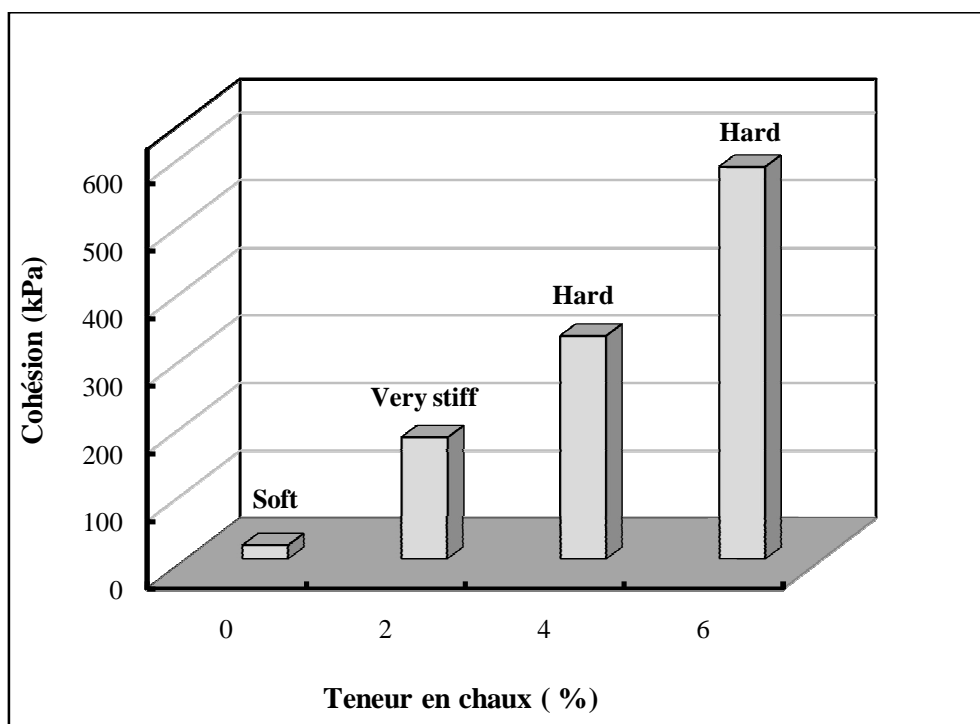


Figure 3-45 Effet de la Chaux sur la Cohésion à 28 Jours

La comparaison des résultats des argiles traitées à différents pourcentages et différents temps de conservation est donnée sur les différentes figures ci-dessous. La figure 3.46 illustre l'évolution de la compression simple en fonction du pourcentage d'ajout de chaux pour 3, 7, 14, 21 et 28 jours de conservation permettant ainsi une réaction pouzzolanique plus importante. Les histogrammes obtenus montrent l'amélioration de la compression simple avec l'augmentation du pourcentage de chaux. Cette amélioration semble être plus importante lorsque le temps de conservation est plus long. Pour les quatre temps de conservation étudiés le sol passe d'une argile de consistance tendre (soft) à une argile moyennement tendre (medium soft), raide (stiff), très raide (very stiff) et dure (hard) lorsque la période de conservation est plus longue. Ainsi la résistance du sol traité à la chaux s'améliore dans le temps. Ces résultats ont été aussi observé par F.G. Bell, (1989 et 1996), LITTLE, (1995), M.C.TONAZ et al, (2006), Z. NALBANTOGLU, (2006), K.A.KASSIM et K.K.CHERN, (2004), MOHAMED.A et col, (2009), MICHAEL A. MOONEYET et NATHAN M. TOOHEY, (2010).

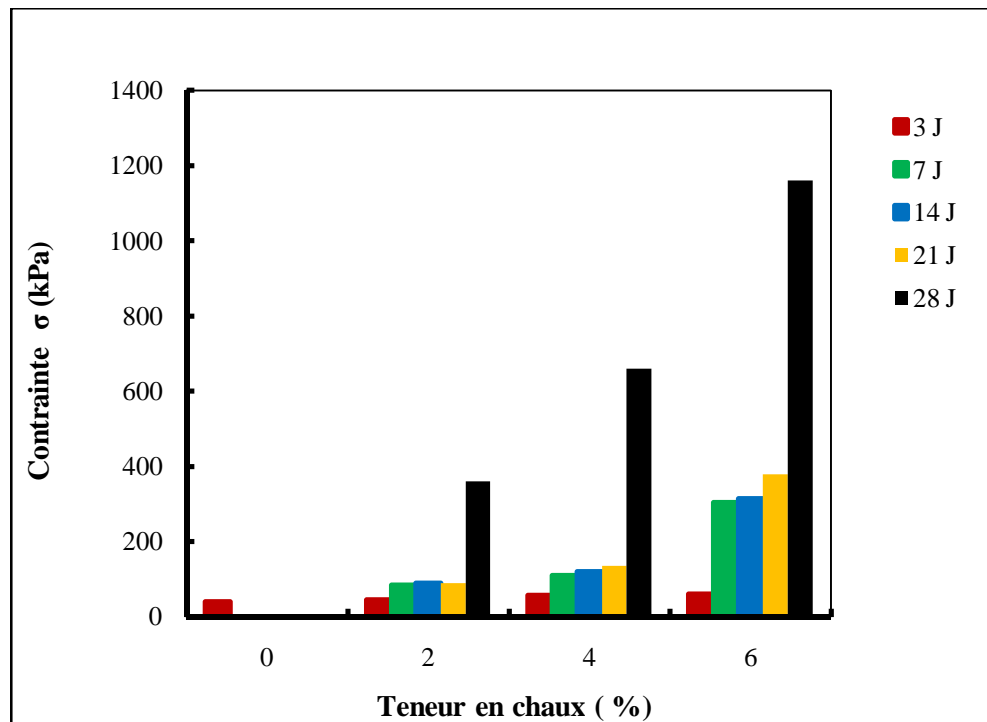


Figure 3-46 Effet de la Chaux sur la Compression Simple à Différent Temps de Conservation

Les histogrammes donnant la variation de la déformation en fonction du pourcentage d'ajout de chaux et le temps de conservation sont montrés sur la figure 4.47. Si pour 3, 7 et 14 jours la déformation à la rupture semble diminuer, il n'est pas le cas pour 21 et 28 jours de conservation. Une étude minéralogique plus approfondie semble être nécessaire pour comprendre le phénomène qui semble être déjà rapporté par d'autres auteurs, HOLM, (1979), F.G. BELL, (1996), MOHAMED.A et col, (2009).

La variation du module d'élasticité en fonction de la teneur en chaux et le temps de conservation est donnée sur la figure 3-48. Celle-ci montre une augmentation de ce module avec l'accroissement du taux de chaux et du temps de conservation.

Le même phénomène est observé pour l'évolution de la cohésion non drainée de cette argile. La figure 3.49 illustre l'amélioration de la cohésion avec l'augmentation du taux de la chaux et l'accroissement du temps de conservation

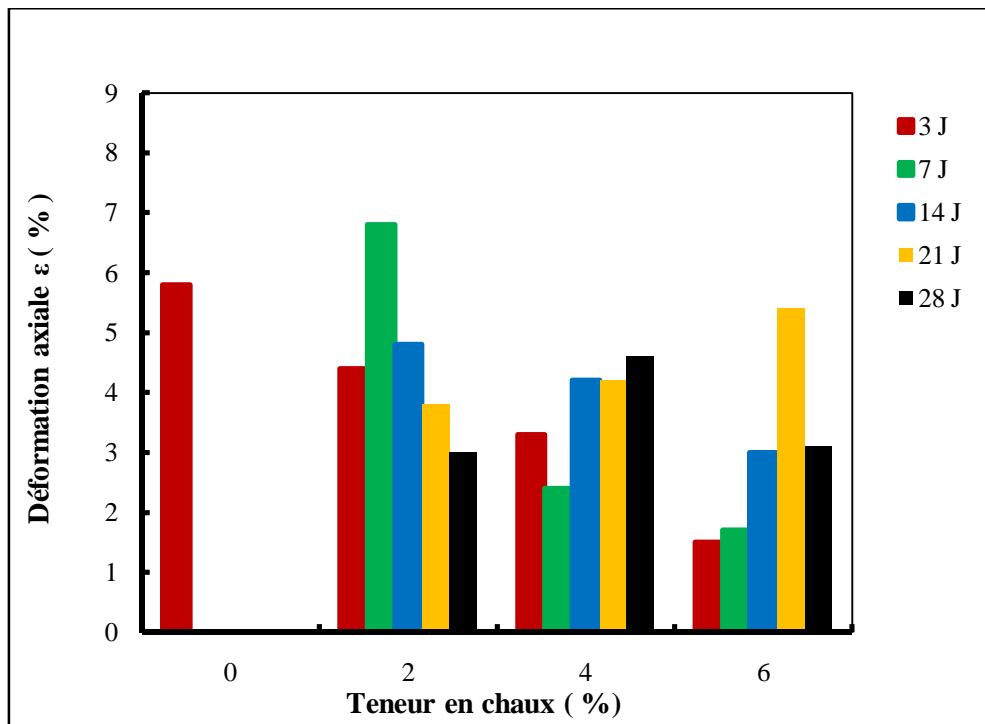


Figure 3-47 Effet de la Chaux sur la Déformation à Différents Temps de Conservation

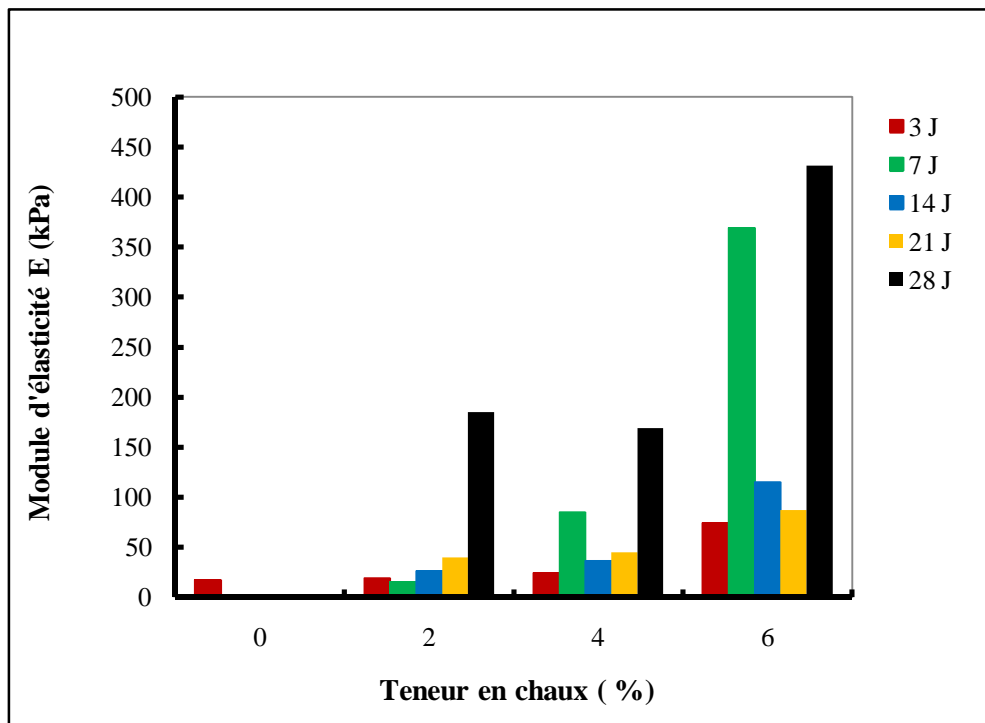


Figure 3-48 Effet de la Chaux sur le Module d'Elasticité à Différents Temps de Conservation

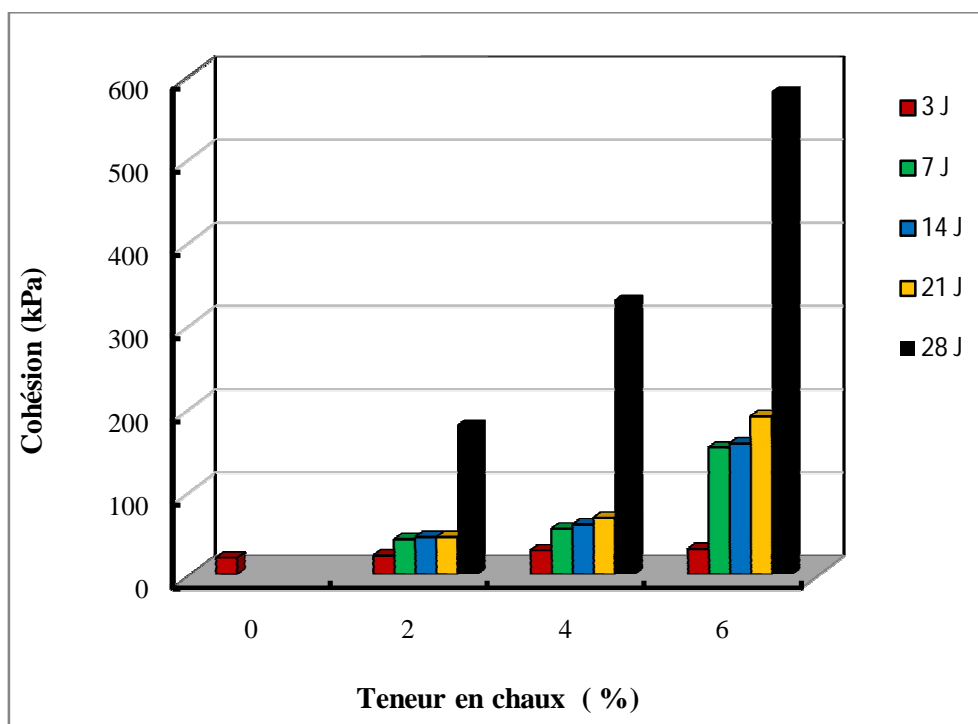


Figure 3-49 Effet de la Chaux sur la Cohésion à Différents Temps de Conservation

3.2.5. Influence du Pourcentage de la Chaux Sur le Cisaillement Direct.

Afin d'étudier l'influence du traitement à la chaux sur les paramètres de résistance de la l'argile de BENAZZOUZ, une campagne d'essais au cisaillement direct à la boîte de Casagrande a été conduite. Ce chapitre présente et discute les résultats obtenues pour une argile non traitée, et les argiles traitées à 2%, 4% et 6% de chaux à leurs teneurs en eau optimales et leurs densités sèches max respectives obtenues lors des essais de compactage au Proctor normal. Pour chaque argile trois essais de cisaillement direct ont été conduit pour des contraintes normales de 100, 200 et 300kPa.

La figure 3-50 présente la variation de la contrainte de cisaillement τ en fonction du déplacement horizontal pour l'argile non traitée soumise aux contraintes normales précitées. Les courbes obtenues montrent un accroissement de la contrainte au cisaillement à la rupture lorsque la contrainte normale augmente. Les résultats montrent les contraintes de cisaillement max respectives 88,33 ; 107,33 et 147,26kPa. Les déplacements linéaires respectifs sont de 4mm, 4,5mm et 4,5mm pour les contraintes normales appliquées. Les essais ont été conduits jusqu'à la rupture des spécimens. Les contraintes normales et de cisaillement à la rupture ont

permet de tracer l'enveloppe de Mohr-Coulomb et déduire les paramètres de résistance de l'argile. Celle-ci est donnée sur la figure 3-51 où la cohésion obtenue est de l'ordre de 55,37kPa et l'angle de frottement interne égal à 16,38°.

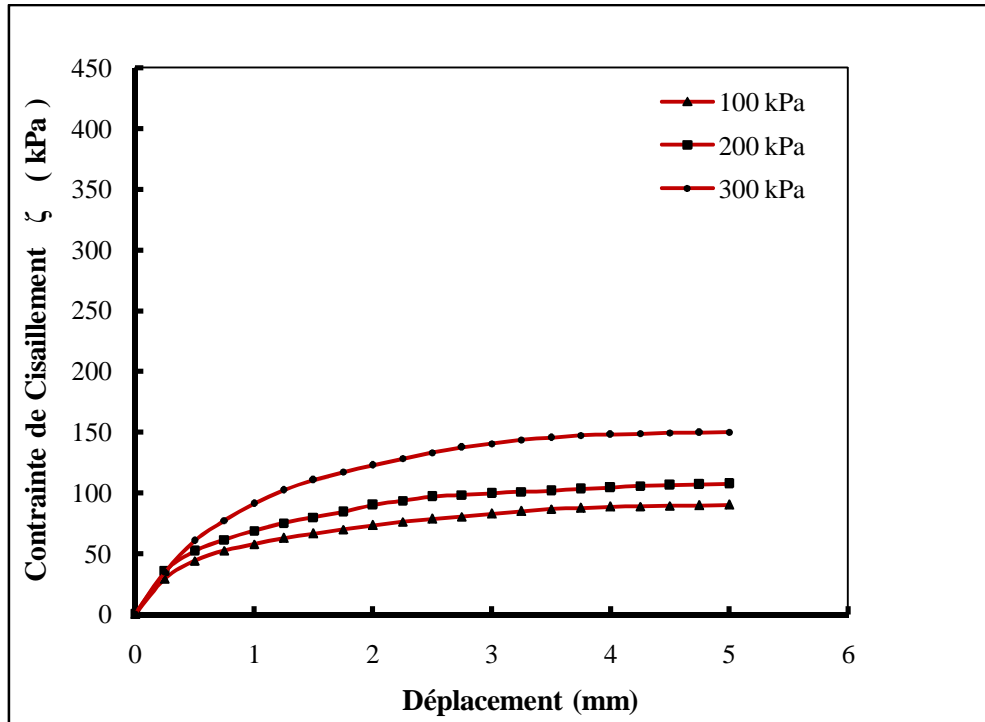


Figure 3-50 Courbe Contrainte - Déplacement 0% de Chaux

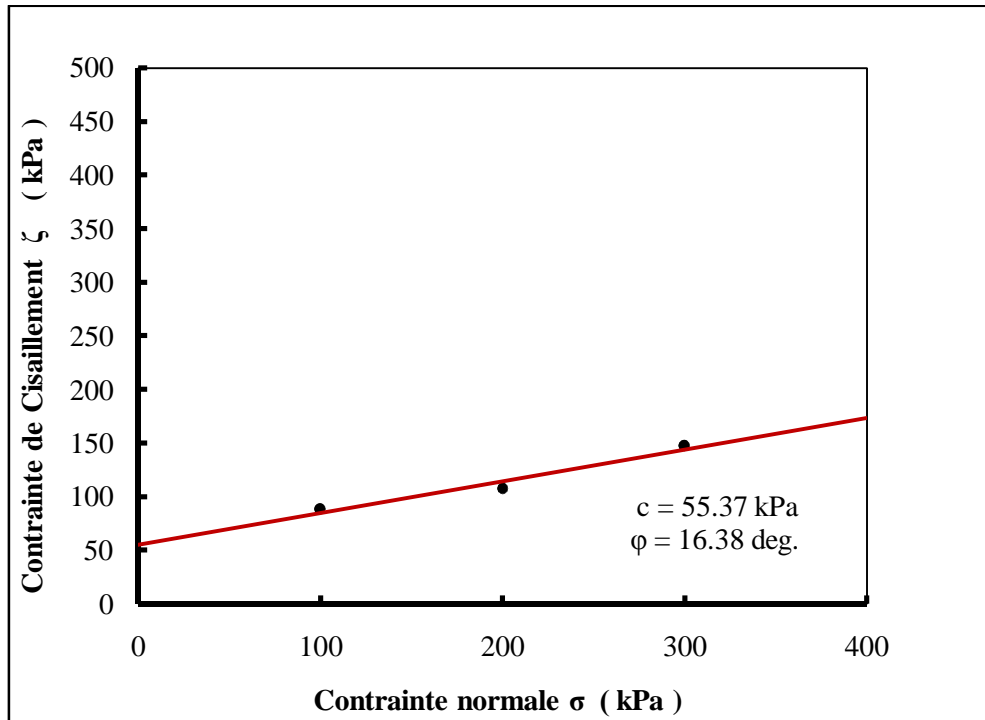


Figure 3-51 Enveloppe de Mohr - Coulomb Pour 0% Chaux

La figure 3-52 présente la variation de la contrainte de cisaillement τ en fonction du déplacement horizontal pour l'argile traitée à 2% de chaux et soumise aux contraintes normales de 100, 200 et 300kPa. Les courbes obtenues montrent un accroissement de la contrainte au cisaillement à la rupture lorsque la contrainte normale augmente. Les résultats montrent les contraintes de cisaillement max respectives 173,69; à 253,70 et 346,85kPa. Les déplacements linéaires respectifs sont de 4,25mm, 5mm et 6,25mm pour les contraintes normales appliquées. Les essais ont été conduits jusqu'à la rupture des spécimens. Les contraintes normales et de cisaillement à la rupture ont permis de tracer l'enveloppe de Mohr-Coulomb et déduire les paramètres de résistance de l'argile. Celle-ci est donnée sur la figure 3-53 où la cohésion obtenue est de l'ordre de 84,92kPa et l'angle de frottement interne égal à 40,85°.

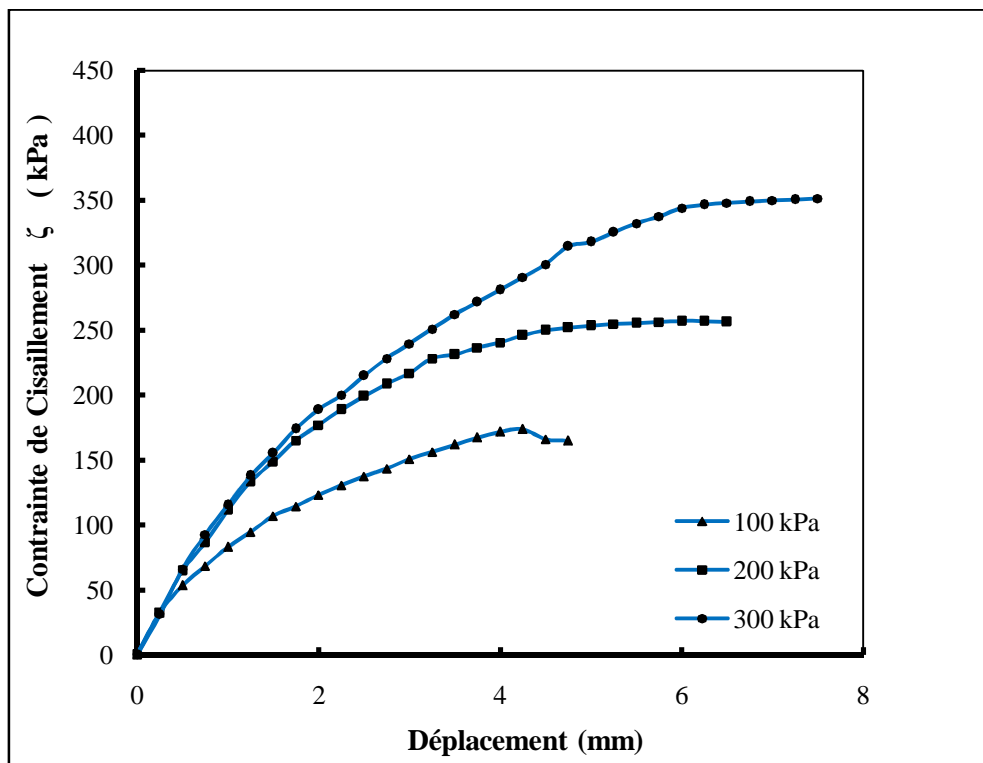


Figure 3-52 Courbe Contrainte - Déplacement 2% de Chaux

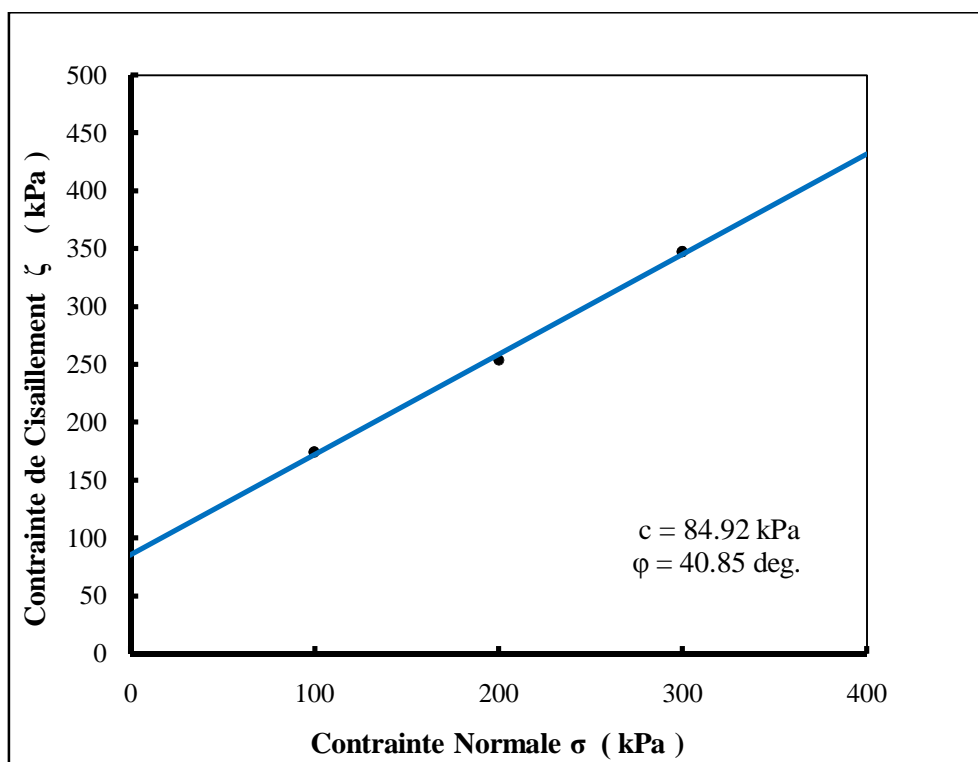


Figure 3-53 Enveloppe de Mohr - Coulomb Pour 2% Chaux

La figure 3-54 représente la variation de la contrainte de cisaillement τ en fonction du déplacement horizontal pour l'argile traitée à 4% de chaux et soumise aux contraintes normales de 100, 200 et 300kPa. Les courbes obtenues montrent un accroissement de la contrainte au cisaillement à la rupture lorsque la contrainte normale augmente. Les résultats montrent les contraintes de cisaillement max respectives 198,18; à 289,29 et 384,96kPa. Les déplacements linéaires respectifs sont de 3,25mm, 4,75mm et 5mm pour les contraintes normales appliquées. Les essais ont été conduits jusqu'à la rupture des spécimens. Les contraintes normales et de cisaillement à la rupture ont permis de tracer l'enveloppe de Mohr-Coulomb et déduire les paramètres de résistance de l'argile. Celle-ci est donnée sur la figure 3-55 où la cohésion obtenue est de l'ordre de 104kPa et l'angle de frottement interne égal à 43,01°.

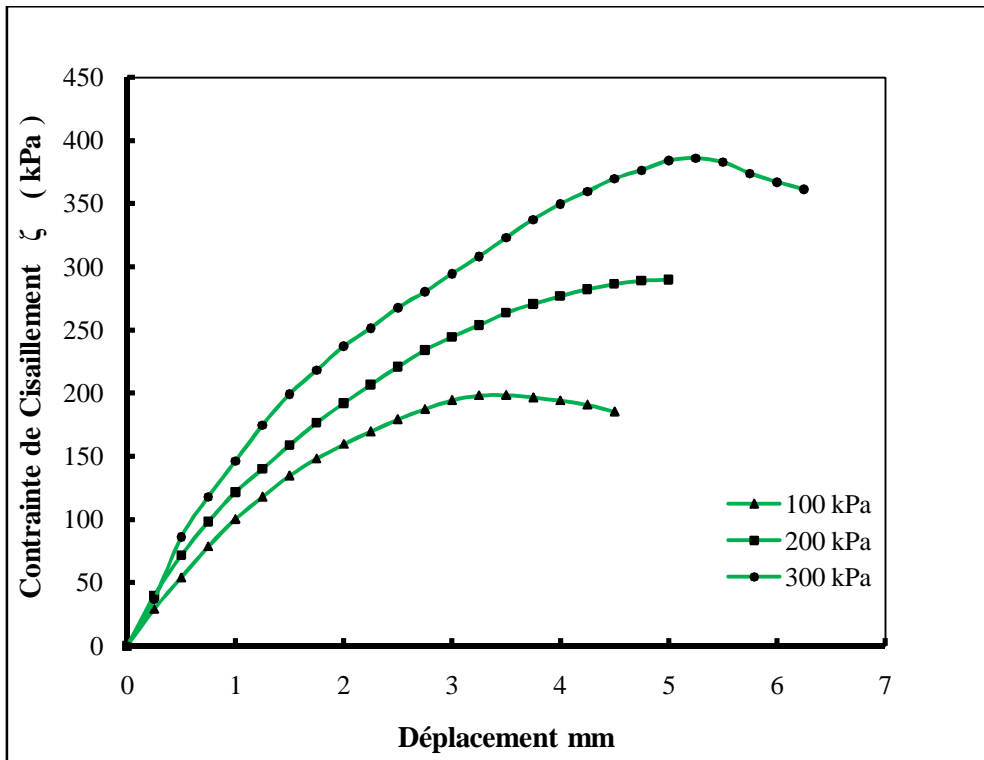


Figure 3-54 Courbe Contrainte - Déplacement 4% de Chaux

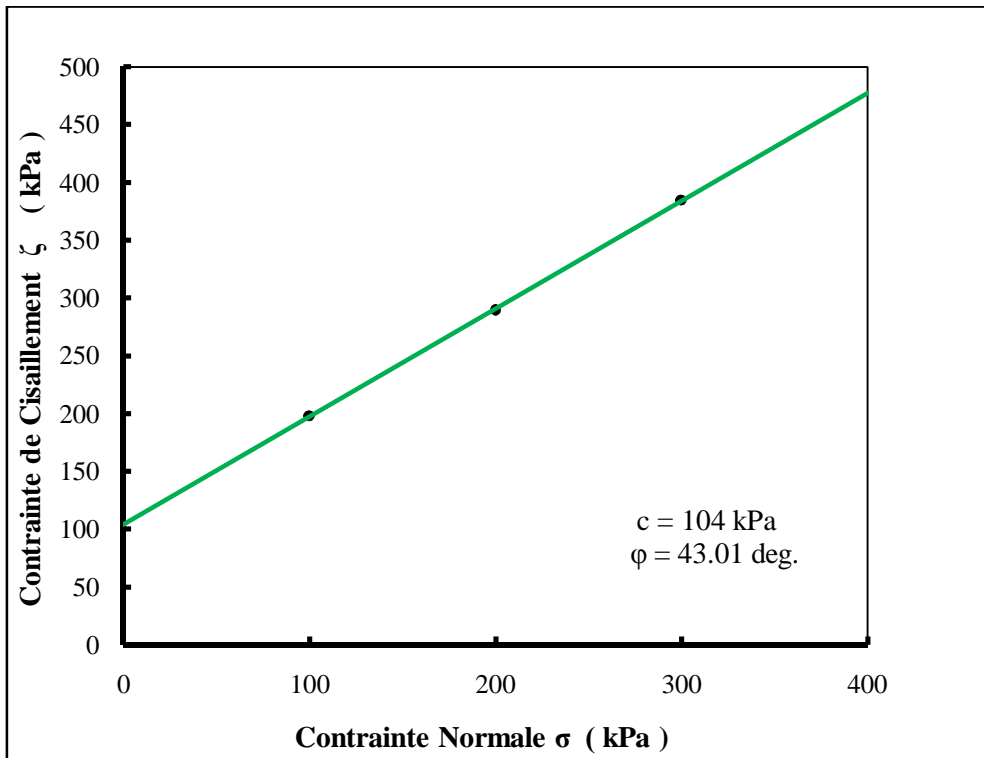


Figure 3-55 Enveloppe de Mohr - Coulomb Pour 4% Chaux

La figure 3-56 représente la variation de la contrainte de cisaillement τ en fonction du déplacement horizontal pour l'argile traitée à 6% de chaux et soumise aux contraintes normales de 100, 200 et 300kPa. Les courbes obtenues montrent un accroissement de la contrainte au cisaillement à la rupture lorsque la contrainte normale augmente. Les résultats montrent les contraintes de cisaillement max respectives 246,57; à 308,72 et 367,42kPa. Les déplacements linéaires respectifs sont de 3.5mm, 4,75mm et 4,75mm pour les contraintes normales appliquées. Les essais ont été conduits jusqu'à la rupture des spécimens. Les contraintes normales et de cisaillement à la rupture ont permis de tracer l'enveloppe de Mohr-Coulomb et déduire les paramètres de résistance de l'argile. Celle-ci est donnée sur la figure 3-57 où la cohésion obtenue est de l'ordre de 186,6kPa et l'angle de frottement interne égal à 31,13°.

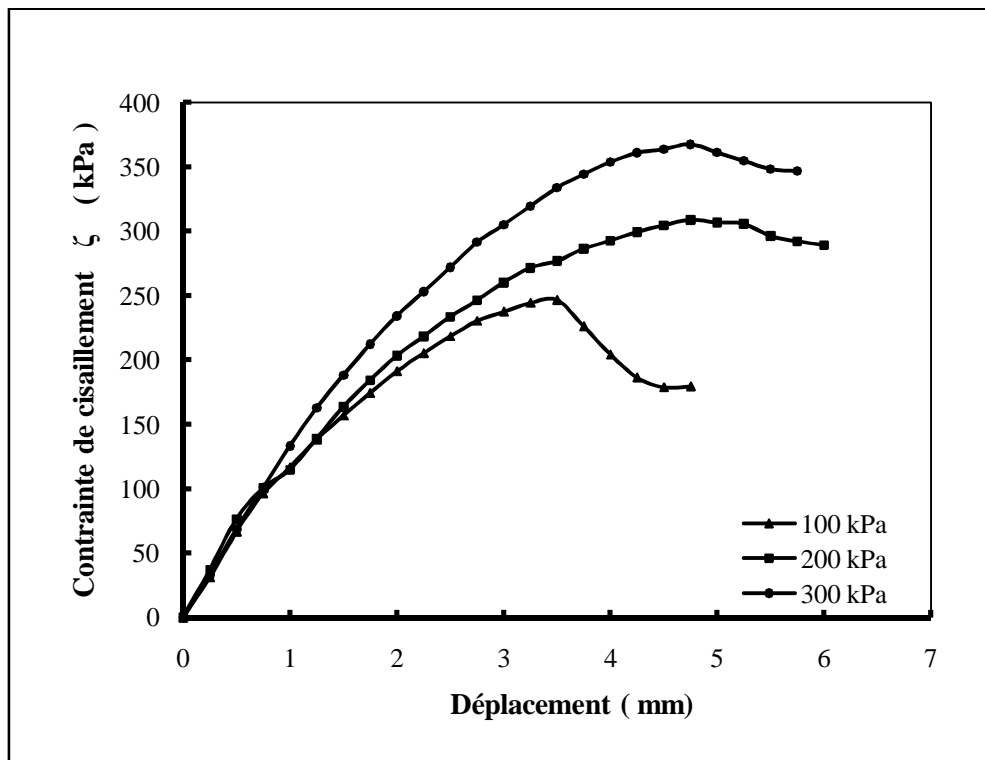


Figure 3-56 Courbe Contrainte - Déplacement 6% de Chaux

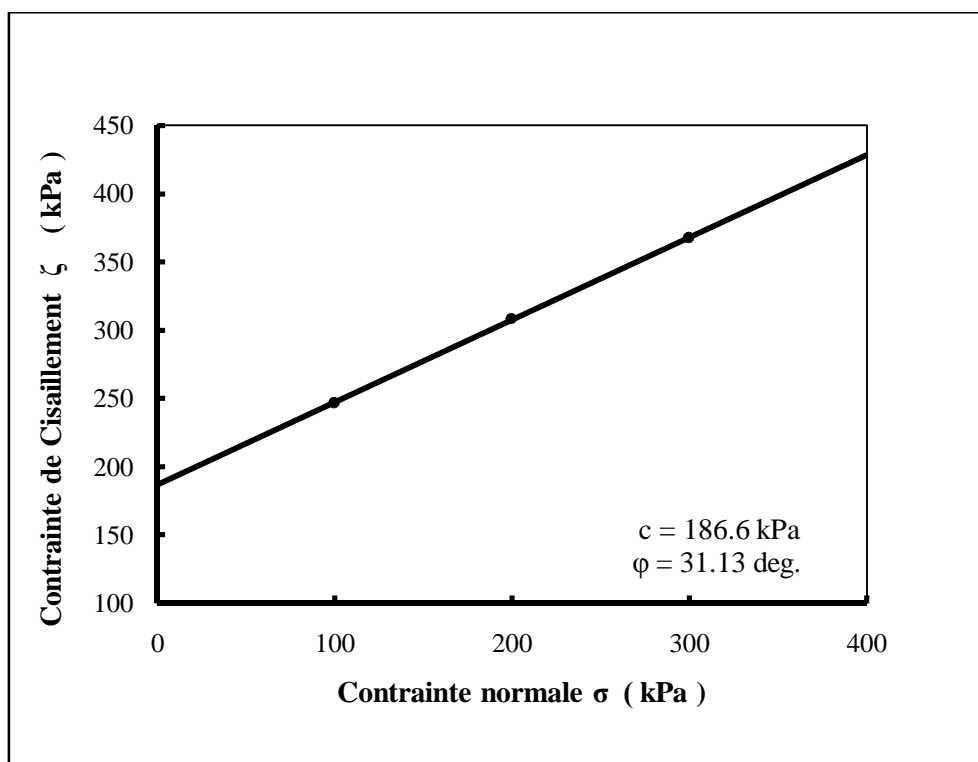


Figure 3-57 Enveloppe de Mohr - Coulomb Pour 6% Chaux

La comparaison des résultats de la boîte de cisaillement pour les différents paramètres sont représentés sous forme d'histogrammes pour la variation de la contrainte de cisaillement, le déplacement et les paramètres de résistance en fonction du pourcentage de chaux. La figure 5.58 montre l'accroissement de la contrainte de cisaillement à la rupture en fonction du pourcentage de la chaux et des contraintes normales appliquées aux éprouvettes de sol.

L'évolution des déplacements à la rupture est donnée sur la figure 3.59. Celle-ci montre un accroissement du déplacement jusqu'au environ de 2% de chaux puis un décroissement du déplacement à un taux plus élevé.

La cohésion obtenue par le cisaillement direct montre une augmentation de la cohésion. Celle-ci est donnée sur la figure 3-60

La figure 3.61 montre l'amélioration de l'angle de frottement interne avec l'augmentation du pourcentage d'ajout de chaux.

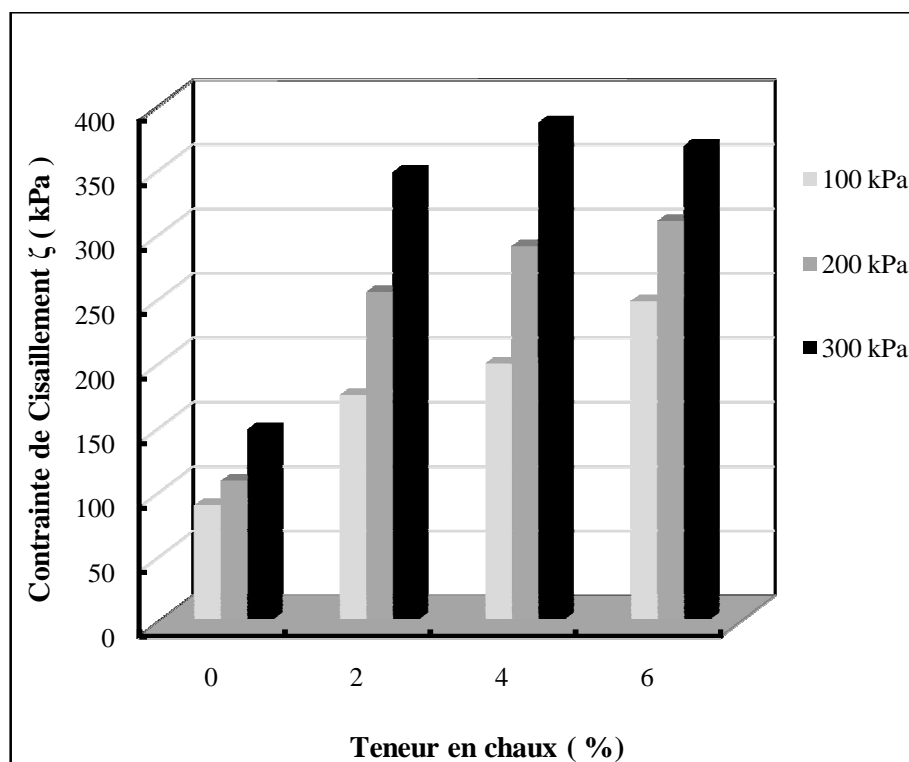


Figure 3-58 Courbe Contrainte -% de Chaux

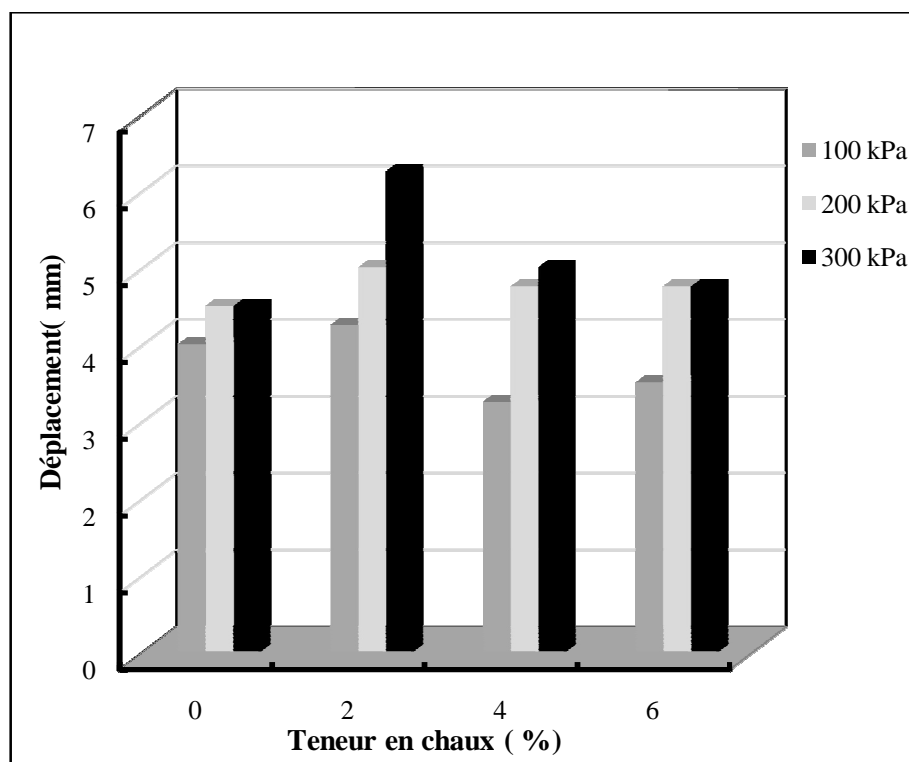


Figure 3-59 Courbe Déplacement-% de Chaux

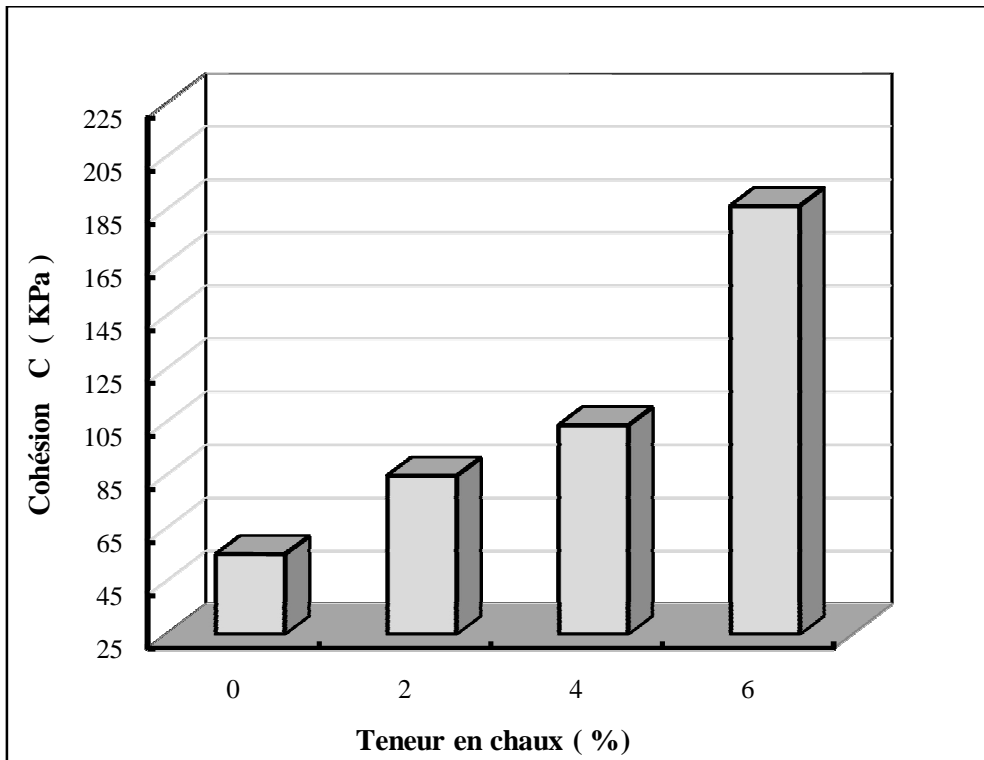


Figure 3-60 Courbe Cohésion - % de Chaux

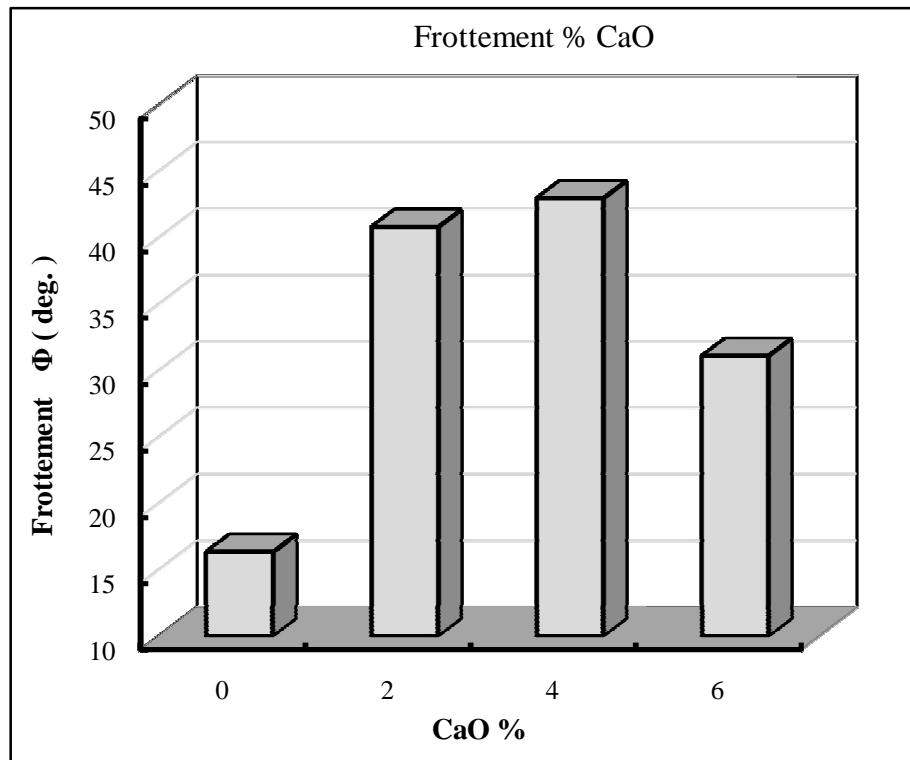


Figure 3-61 Courbe Frottement - % de Chaux

CONCLUSIONS

L'interprétation et l'exploitation des résultats obtenus ont montré que :

1. Cette argile est de consistance tendre et possède une résistance à la compression simple moyenne après compactage.
2. Le traitement de l'argile à différent pourcentage de chaux a diminué la limite d'élasticité et augmenté sa limite de plasticité. Un accroissement de l'indice de plasticité a été observé ce qui rend l'argile très maniable durant les périodes humides.
3. L'adduction de la chaux à cette argile a beaucoup influé sur ses caractéristiques de compactage. Ainsi la teneur en eau optimale a augmenté avec l'accroissement du taux de la chaux permettant une fixation de la teneur en eau sur site plus aisée alors que la densité maximale sèche a été réduite. Celle-ci conforte le coefficient de sécurité des ouvrages linéaires.
4. La compression simple de l'argile soumise à des essais d'écrasement non confinés croît avec l'augmentation du pourcentage de chaux injecté. Le temps de conservation améliore encore plus cette résistance. En effet la consistance de l'argile non traité et qui était de consistance tendre (soft clay) est passé à une consistance dure (Hard clay) après 28 de conservation pour des pourcentages de chaux de 4 et 6%.
5. Les essais de cisaillement direct sur l'argile traitée ont bien montré une augmentation de la contrainte de cisaillement à la rupture et de la cohésion relativement à l'argile non traitée. Mieux encore l'enveloppe de Mohr Coulomb augment de pente lorsque le taux de chaux est plus important c'est-à-dire une amélioration de l'angle de frottement interne.
6. Suite à ces résultats obtenus l'argile de BENAZZOUZ est certainement recommandée pour la construction des ouvrages linéaires lorsque celles-ci est accompagnée d'un traitement à la chaux.

L'auteur recommande une étude minéralogique très poussée de cette argile traitée pour mieux comprendre les développements de la réaction pouzzolanique et procéder a des essais in situ tels qu'une planche d'essai et les essais à la plaque.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Michael A. Mooney Nathan M. Toohey, ACCELERATED CURING AND STRENGTH-MODULUS CORRELATION FOR LIME-STABILIZED SOILS, Final Report CDOT, (2010).

Mohamed A. Sakr, Mohamed A. Shahin, Yasser M. Metwally, UTILIZATION OF LIME FOR STABILIZING SOFT CLAY SOIL OF HIGH ORGANIC CONTENT, Geotech Geol Eng, (2009).

Joseph Abdo Jean-Pierre Serfass, TERRASSEMENTS ET ASSISES DE CHAUSSÉES TRAITEMENT DES SOLS AUX LIANTS HYDRAULIQUES, CIM béton, (2009).

GUERIDI Fatima, STABILISATION DES SOLS A LA CHAUX : DETERMINATION DU TAUX OPTIMAL MEMOIRE *Pour obtenir le grade de MAGISTER Délivrée par l'école nationale supérieure des travaux publics – Alger*, (2009).

F.Z.Aissiou1, A.Nechnech2, AMELIORATION DE CARACTERISTIQUES MECANQUES D'UN SOL ARGILEUX PAR INCORPORATION DE CHAUX, SBEIDCO 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), (2009).

Pierre-Yves SCORDIA, CARACTERISATION ET VALORISATION DE SEDIMENTS FLUVIAUX POLLUES ET TRAITES DANS LES MATERIAUX ROUTIERS, THESE, *Pour obtenir le grade de DOCTEUR, Délivrée par L'ECOLE CENTRALE DE LILLE Spécialité : Génie Civil*, (2008).

O.O.Amu, J.B.Adeyeri, E.W.Oduma and O.A.Fayokun, TABILIZATION CHARACTERISTICS OF LIME ON PALM KERNEL BLENDED LATERITIC SOIL, trends in applied sciences research3 (2):182-188, (2008).

Mouhamadou Bassir Diop, Abdoulaye Boiro, Raoul Jauberthie,Ahmed Bouguerra, TRAITEMENT A LA CHAUX DES TUFES VOLCANIQUES DU SENEGAL ORIENTAL ACTIVATION DE LA REACTION POUZZOLANIQUE PAR DU PHOSPHOGYPSE, DECHETS, revue francophone d'écologie industrielle N° 49 1er trimestre (2008).

Bujang B.K. Huat, Asmidar Alias and Azlan Abdul Aziz, EVALUATION, SELECTION AND ASSESSMENT OF GUIDELINES FOR CHEMICAL STABILIZATION OF TROPICAL RESIDUAL SOILS, *American journal of environmental sciences* 4 (4): 303-309, (2008).

Rapport établi par Dr.H.MEZGHACHE et Dr.BOUIMA, (2007).

Braja M. Das, ADVANCED SOIL MECHANICS, Third edition, this edition published in the taylor & francis e-library, (2007).

Technical Brief: MIXTURE DESIGN AND TESTING PROCEDURES FOR LIME STABILIZED SOIL, (2006)

Amer Ali Al-Rawas, Mattheus F.A. Goosen, EXPANSIVE SOILS RECENT ADVANCES IN CHARACTERIZATION AND TREATMENT, This edition published in the Taylor & Francis e-Library, (2006).

Sudhakar m. Rao and p Shivananda, COMPRESSIBILITY BEHAVIOUR OF LIME-STABILIZED CLAY, *Geotechnical and Geological Engineering* (2005)3: 309–319, (2005).

S.O. Faluyi and O.O. Amu, EFFECTS OF LIME STABILIZATION ON THE PH VALUES OF LATERITIC SOILS IN ADO-EKITI, NIGERIA, *Journal of Applied Sciences* 5 (1): 192-194, (2005).

Marshall R. Thompson, ADMIXTURE STABILIZATION (Lime Treatment of Subgrades), tech note N°: 14, University of Illinois, Dept of Civil & Environmental Engineering, (2005).

Ichael iller, LIME, Minerals Yearbook, (2005).

Amer Ali Al-Rawas, A.W. Hago, Hilal Al-Sarmi, EFFECT OF LIME, CEMENT AND SAROOJ (ARTIFICIAL POZZOLAN) ON THE SWELLING POTENTIAL OF AN EXPANSIVE SOIL FROM OMAN, *Building and Environment* 40 (2005) 681–687, (2005).

Nicolas CABANE, SOLS TRAITES À LA CHAUX ET AUX LIANTS HYDRAULIQUES : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation THESE *Pour obtenir le grade de DOCTEUR* de l'Université Jean Monnet et de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de St-Etienne *Discipline: Génie des Procédés*, (2004).

Khairul Anuar Kassim 1, Kok Kai Chern, LIME STABILIZED MALAYSIAN COHESIVE SOILS, *Jurnal Kejuruteraan Awam 16(1): 13-23 (2004)* 1 3, (2004).

Jagannath Mallela, Harold Von Quintus, P.E Kelly L. Smith, CONSIDERATION OF LIME-STABILIZED LAYERS IN MECHANISTIC-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN, (2004).

Centre de recherches routières, GUIDE PRATIQUE N°3, AMELIORATION DES SOLS POUR TERRASSEMENTS ET FOND DE COFFRE, (2004).

Centre de recherches routières, GUIDE PRATIQUE N°2, STABILISATION DES SOLS POUR COUCHES DE SOUS-FONDATION, (2004)

Centre de recherches routières, GUIDE PRATIQUE N°1, AMELIORATION DES SOLS POUR LE REMBLAYAGE DES TRANCHEES D'EGOUTS ET L'ENROBAGE DES TUYAUX, (2004).

Robert L. Parsons, Justin P. Milburn, ENGINEERING BEHAVIOR OF STABILIZED SOILS, TRB, (2003).

Standard specification (ASTM C 977 – 00) FOR QUICKLIME AND HYDRATED LIME FOR SOIL STABILIZATION, (2000).

M. Afès 7 G, STABILISATION DES SOLS GONFLANTS: CAS D'UNE ARGILE EN PROVENANCE DE MILA (ALGERIE), *Didier Bull Eng Geol Env (2000) 59: 75–83,* (2000).

Document édité par : LCPC et CETRA, ETUDE ET REALISATION DES REMBLAIS SUR SOLS COMPRESSIBLES, GUIDE TECHNIQUE (2000)

Document édité par : LCPC et CETRA , TRAITEMENT DES SOLS A LA CHAUX ET/OU AUX LIANTS HYDRAULIQUES APPLICATION A LA REALISATION DES REMBLAIS ET DES COUCHES DE FORME, GUIDE TECHNIQUE, (2000).

M.R.ABDI and S.WILD, SULPHATE EXPANSION OF LIME – STABILIZED KAOLINITE: PHYSICAL CHARACTERISTICS, *clay Minerals (1993)28, 55-567,* (1993).

Standard Test Methods (ASTM D 422 – 63) (Reapproved 1998) FOR PARTICLE-SIZE ANALYSIS OF SOILS, (1998).

Standard Test Methods (ASTM D 854 – 98) FOR SPECIFIC GRAVITY OF SOILS, (1998).

Standard Test Methods (ASTM D 698 – 91 (Reapproved 1998) FOR Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400ft-lbf/ft³ (600kN-m/m³)), (1998).

Standard Test Methods (ASTM D 4318 – 98) FOR LIQUID LIMIT, PLASTIC LIMIT, AND PLASTICITY INDEX OF SOILS, (1998).

Standard Test Methods (ASTM D 3080 – 98) FOR DIRECT SHEAR TEST OF SOILS UNDER CONSOLIDATED DRAINED CONDITIONS, (1998).

Standard Test Methods (ASTM D 2487 – 98) FOR CLASSIFICATION OF SOILS FOR ENGINEERING PURPOSES (UNIFIED SOIL CLASSIFICATION SYSTEM), (1998).

Standard Test Methods (ASTM D 2166 – 98a) FOR UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF COHESIVE SOIL, (1998).

Norme Française (NF P 94-068), SOLS : RECONNAISSANCE ET ESSAIS MESURE DE LA CAPACITE D'ADSORPTION DE BLEU DE METHYLENE D'UN SOL OU D'UN MATERIAU ROCHEUX, (1998).

Vineent Robitalle, Denis tremblay, MECANIQUE DES SOLS, THEORIE ET PRATIQU, modulo, (1997).

Peter Evans Man, UPDATE ON LIME STABILISATION, Paper presented at QMR Technology Transfer Seminar, 12 July 1997, (1997).

K.Ben amor, M.Temimi, J.P.Camps, M.Lasuerbe ; STABILISATION A FROID DE MATERIAUX MONTMORILLONITIQUES PAR DU CIMENT PORTLAND, materials and structures/ matériaux et constructions, vol.30 (1997); pp355-361, (1997).

Standard Test Methods (ASTM D 5102 – 96) FOR UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF COMPACTED SOIL-LIME MIXTURES, (1996).

Standard Test Methods (ASTM D 2435 – 96) FOR ONE-DIMENSIONAL CONSOLIDATION PROPERTIES OF SOILS, (1996).

Standard Test Methods (ASTM C 136 – 96a) FOR SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES, (1996).

Standard practice (ASTM D 3551 – 90 (Reapproved 1996)) FOR LABORATORY PREPARATION OF SOIL-LIME MIXTURES USING A MECHANICAL MIXER, (1996).

F.G.Bell, LIME STABILIZATION OF CLAY MINIRALS AND SOILS, ENGINEERING GEOLOGY 42(1996) 223-237, (1996).

1995 Standard Test Methods (ASTM D 4972 – 95a) FOR PH OF SOILS, (1995).

Standard Test Methods (ASTM D 2974 – 87 (Reapproved 1995)) FOR MOISTURE, ASH, AND ORGANIC MATTER OF PEAT AND OTHER ORGANIC SOILS, (1995).

1991 Robert D .Holtz, William D.Kovacs, traduit par Jeanlafleur, Introduction a la géotechnique, édition de l'école polytechnique de montréal, (1991).

P.K.Banerjee and R.Butterfield, ADVANCED GEOTECHNICAL ANALYSES *DEVELOPMENTS IN SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING—4*, elsevier applied science london and new York, (1991).

F.G.Bell, LIME STABILISATION OF CLAY SOILS STABILISATION DE SOLS ARGILEUX A LA CHAUX, Bulletin N°39 paris, (1989).

G.N.Smith and Ian.G.N.Smith, ELEMENTS OF SOIL MECHANICS, seventh edition, Blackwell Science, (1988).

Rossip.L, Ildefonse.P, De Nobrega M.T et Chauvel.A, ETUDE DES TRANSFORMATIONS STRUCTURALES ET MINERALOGIQUES PROVOQUEES PAR COMPACTAGE AVEC OU SANS ADDITION DE CHAUX A DES ARGILES LATERITIQUES BRESILIENNE, Bulletin N°28 paris, (1983).

M. Mateos, RECHERCHES SUR LA STABILIZATION DES SOLS PAR LA CHAUX EN LES CENDRES VOLANTES.

ANNEX -A-

RAPPORT D'ANALYSES MINERALOGIQUES

MATCH! PHASE ANALYSIS REPORT

Sample Data

Filename	sol benazzouz
Data collected	
Data range	10.070° to 70.020°
Number of points	1200
Step size	0.050
Alpha2 subtracted	Yes
Background subtr.	Yes
Data smoothed	Yes
2theta correction	0.07°
Radiation	Cu-Ka
Wavelength	1.541874 Å

MATCHED PHASES

A: Quartz (Quartz)

Formula	Si O2
Entry number	99-101-2545
Figure-of-Merit (FoM)	0.844934
Total number of peaks	35
Peaks in range	18
Peaks matched	18
Intensity scale factor	0.34
Quant. (weight %)	18.14

B: Sillimanite (Sillimanite)

Formula	Al2 Si O5
Entry number	99-100-7384
Figure-of-Merit (FoM)	0.803914
Total number of peaks	186
Peaks in range	76
Peaks matched	68
Intensity scale factor	0.06
Quant. (weight %)	10.10

C: Sillimanite (Sillimanite)

Formula	Al2 Si O5
Entry number	99-100-7381
Figure-of-Merit (FoM)	0.794527
Total number of peaks	192
Peaks in range	77

Peaks matched	67
Intensity scale factor	0.00
Quant. (weight %)	0.00

D: Kaolinite (Kaolinite)

Formula	Al ₂ Si ₂ O ₉ H ₄
Entry number	99-101-0871
Figure-of-Merit (FoM)	0.793765
Total number of peaks	254
Peaks in range	135
Peaks matched	120
Intensity scale factor	0.08
Quant. (weight %)	16.50

E: Moganite (Moganite)

Formula	Si O ₂
Entry number	99-100-2733
Figure-of-Merit (FoM)	0.784333
Total number of peaks	232
Peaks in range	103
Peaks matched	88
Intensity scale factor	0.16
Quant. (weight %)	26.33

F: Berlinite (Berlinite)

Formula	Al P O ₄
Entry number	99-100-7404
Figure-of-Merit (FoM)	0.779294
Total number of peaks	68
Peaks in range	32
Peaks matched	29
Intensity scale factor	0.14
Quant. (weight %)	18.56

G: SiO₂ (SiO₂)

Formula	Si O ₂
Entry number	99-100-7154
Figure-of-Merit (FoM)	0.778698
Total number of peaks	146
Peaks in range	57
Peaks matched	53
Intensity scale factor	0.05
Quant. (weight %)	8.18

H: Aragonite (Aragonite)

Formula	Ca C O ₃
Entry number	99-100-0230
Figure-of-Merit (FoM)	0.761534
Total number of peaks	132

Peaks in range	56
Peaks matched	51
Intensity scale factor	0.00
Quant. (weight %)	0.96

I: Brucite (Brucite)

Formula	Mg O2
Entry number	99-100-2431
Figure-of-Merit (FoM)	0.751845
Total number of peaks	16
Peaks in range	8
Peaks matched	8
Intensity scale factor	0.01
Quant. (weight %)	1.22

ANNEX -B-

LIMITES D'ATTERBERG

	Pourcentage des chaux	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Nombre des coups	0	15	25	36
W (%) Moyenne		59,3	58,6	57,5
Nombre des coups	2	15	24	34
W (%) Moyenne		49,73	48,78	48,33
Nombre des coups	4	16	25	36
W (%) Moyenne		47,33	45,02	44,97
Nombre des coups	6	15	26	34
W (%) Moyenne		47,23	46,78	46,13

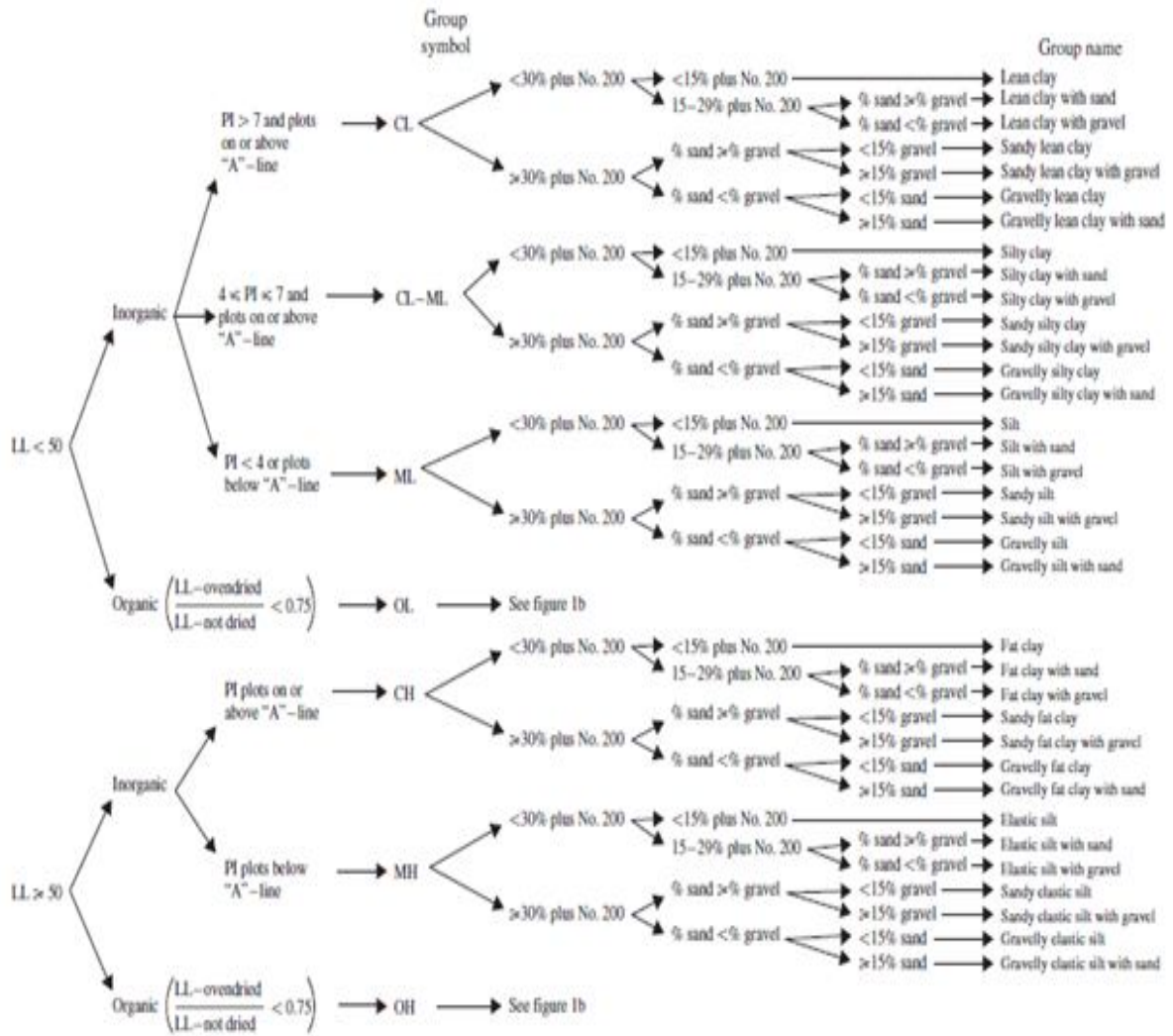
Tableau B-1 Limites d' Atterberg

ANNEX -C-

CLASSIFICATION DU SOL

Field Identification Procedures (Excluding particles larger than 3 in. and using fractions on estimated weights)				Group Symbols ^a	Typical Names	Information Required for Describing Soils	Laboratory Classification Criteria	
<p>Clayey gravel and silty gravel soils More than half of material is larger than No. 200 sieve size.</p> <p>Clayey sand More than half of coarse fraction is larger than No. 40 sieve size.</p> <p>Sandy gravel More than half of coarse fraction is smaller than No. 40 sieve size.</p> <p>Sandy sand More than half of coarse fraction is smaller than No. 40 sieve size.</p>	Clayey gravel (little or no fines)	Wide range in grain size and substantial amounts of all intermediate particle sizes	GW	Well graded gravel, gravel-sand mixtures, little or no fines	<p>Give typical name; indicate approximate percentage of sand and gravel; maximum size; angularity, surface condition, and hardness of the coarse grain; local or geologic name and other pertinent descriptive information; and symbols in parentheses.</p> <p>For undisturbed soils add information on stratification, degree of compaction, cementation, moisture conditions and drainage characteristics.</p> <p>Example: Silty sand, gravelly; about 20% hard, angular gravel particles 1/2 in. maximum size; rounded and subangular sand grains coarse to fine; about 15% non-plastic fines with low dry strength; well compacted and recent in place; alluvial sand; (SM)</p>	$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Greater than 4 $C_C = \frac{D_{30}}{D_{10} \times D_{60}}$ Between 1 and 3		
		Preponderantly one size or a range of sizes with some intermediate sizes missing	GP	Poorly graded gravel, gravel-sand mixtures, little or no fines				
	Clayey sand (little or no fines)	Nonplastic fines (for identification procedures see <i>ML</i> below)	GM	Silty gravel, poorly graded gravel-sand-silt mixtures		<p>Not meeting all gradation requirements for GW</p> <p>Aterberg limits below "A" line or <i>PI</i> less than 4</p> <p>Aterberg limits above "A" line with <i>PI</i> greater than 7</p>		
		Plastic fines (for identification procedures, see <i>CI</i> below)	GC	Clayey gravel, poorly graded gravel-sand-clay mixtures				
	Sandy gravel (little or no fines)	Wide range in grain size and substantial amounts of all intermediate particle sizes	SW	Well graded sand, gravelly sand, little or no fines		<p>Example: Silty sand, gravelly; about 20% hard, angular gravel particles 1/2 in. maximum size; rounded and subangular sand grains coarse to fine; about 15% non-plastic fines with low dry strength; well compacted and recent in place; alluvial sand; (SM)</p>	$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Greater than 6 $C_C = \frac{D_{30}}{D_{10} \times D_{60}}$ Between 1 and 3	
		Preponderantly one size or a range of sizes with some intermediate sizes missing	SP	Poorly graded sand, gravelly sand, little or no fines				
		Nonplastic fines (for identification procedures, see <i>ML</i> below)	SM	Silty sand, poorly graded sand-silt mixtures				
		Plastic fines (for identification procedures, see <i>CI</i> below)	SC	Clayey sand, poorly graded sand-clay mixtures				
	<p>Clayey sand More than half of coarse fraction is smaller than No. 40 sieve size.</p> <p>Sandy sand More than half of coarse fraction is smaller than No. 40 sieve size.</p> <p>Sandy silt More than half of coarse fraction is smaller than No. 40 sieve size.</p>	Identification Procedures on Fraction Smaller than No. 40 Sieve Size						
		Silty sand clays Liquid limit less than 50	Dry Strength (crushing characteristics)	Dilatancy (reaction to shaking)		Toughness (consistency near plastic limit)		<p>Give typical name; indicate degree and character of plasticity, amount and maximum size of coarse grains; colour in wet condition, odour if any, local or geologic name, and other pertinent descriptive information, and symbol in parentheses.</p> <p>For undisturbed soils add information on structure, stratification, consistency in undisturbed and remoulded states, moisture and drainage conditions.</p> <p>Example: Clayey silt, brown, slightly plastic; small percentage of fine sand; numerous vertical root holes; firm and dry in place; loess; (ML)</p>
None to slight			Quick to slow	None	ML	Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands with slight plasticity		
Medium to high			None to very slow	Medium	CL	Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays		
Slight to medium			Slow	Slight	OL	Organic silts and organic silt clays of low plasticity		
Silty sand-clays Liquid limit greater than 50		Slight to medium	Slow to none	Slight to medium	MH	Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts	<p>Plasticity chart for laboratory classification of fine grained soils</p>	
		High to very high	None	High	CH	Inorganic clays of high plasticity, fat clays		
		Medium to high	None to very slow	Slight to medium	OH	Organic clays of medium to high plasticity		
Highly Organic Soils		Readily identified by colour, odour, spongy feel and frequently by fibrous texture			PT	Peat and other highly organic soils		

Tableau C 1 Classification internationale USCS (Unified Soil Classification System) décrite dans la norme ASTM D2487-98.



Organigramme pour Classification internationale USCS (Unified Soil Classification System) décrite dans la norme ASTM D2487-98.

ANNEX -D-

ESSAI ŒDOMETRIQUE

Hauteur éprouvette (cm) : 2,153

Section éprouvette (cm²) : 38,48

Poids sec (g) : 94

Densité des grains : 2,65

Pression (bars)	Indice des vides
0,015	1,347
0,250	1,242
0,5	1,194
1	1,127
2	1,067
4	1,008
8	0,955
2	0,974
0,5	0,997
0,015	1,043

Tableau D-1 Essai Œdometrique

Le classement des sols selon leurs indices de compressibilités et de vides, est donné par Philipponnat qui est la suivante.

$C_c/1+e_0 < 0.015$ sol incompressible.

$0.015 < C_c/1+e_0 < 0.05$ sol peu compressible.

$0.05 < C_c/1+e_0 < 0.2$ sol moyennement compressible.

$C_c/1+e_0 > 0.2$ sol très compressible.

ANNEX -E-

ESSAI PROCTOR

	Pourcentage des chaux	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Mv sèche (kg/m ³)	0	1376,79	1509,88	1532,37	1475,15	1388,16
W (%) Moyenne		21,46	23,74	26,67	29,48	33,49
Mv sèche (kg/m ³)	2	1397,23	1450,29	1410,97	1364,04	1324,61
W (%) Moyenne		27,04	28,94	31,70	33,78	35,41
Mv sèche (kg/m ³)	4	1332,67	1345,20	1363,17	1381,76	1353,57
W (%) Moyenne		24,52	27,08	29,38	31,43	33,40
Mv sèche (kg/m ³)	6	1308,57	1318,44	1327,86	1331,58	1307,40
W (%) Moyenne		27,28	29,96	31,51	33,48	35,56

Tableau E-1 Essai Proctor

ANNEX -F-

ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE (UCST)

% chaux	3jours	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
	qu (kPa)	qu (kPa)	qu (kPa)	qu (kPa)	qu (kPa)
0	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5
2	46	85	90	90	360
4	58	110	120	136	660
6	61	305	315	380	1160

Tableau F-1 Evolution du Compression Simple – Teneur en Chaux

% chaux	3jours	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
	ε (%)	ε (%)	ε (%)	ε (%)	ε (%)
0	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8
2	4,4	6,8	4,8	3,8	3
4	3,3	2,4	4,2	4,2	4,6
6	1,5	1,7	3	5,4	3,1

Tableau F-2 Evolution du Déformation - Teneur en Chaux

% chaux	3jours	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
	E (kPa)	E (kPa)	E (kPa)	E (kPa)	E (kPa)
0	17	17	17	17	17
2	19	15,22	26,5	40	185
4	24	85	36,5	45	169,2
6	74	369,1	115	87	431,4

Tableau F-3 Evolution du Module d'Elasticité - Teneur en Chaux

% chaux	3jours	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
	Cu (kPa)	Cu (kPa)	Cu (kPa)	Cu (kPa)	Cu (kPa)
0	20,25	20,25	20,25	20,25	20,25
2	23	42,5	45	45	180
4	29	55	60	68	330
6	30,5	152,5	157,5	190	580

Tableau F-4 Evolution du Cohésion - Teneur en Chaux

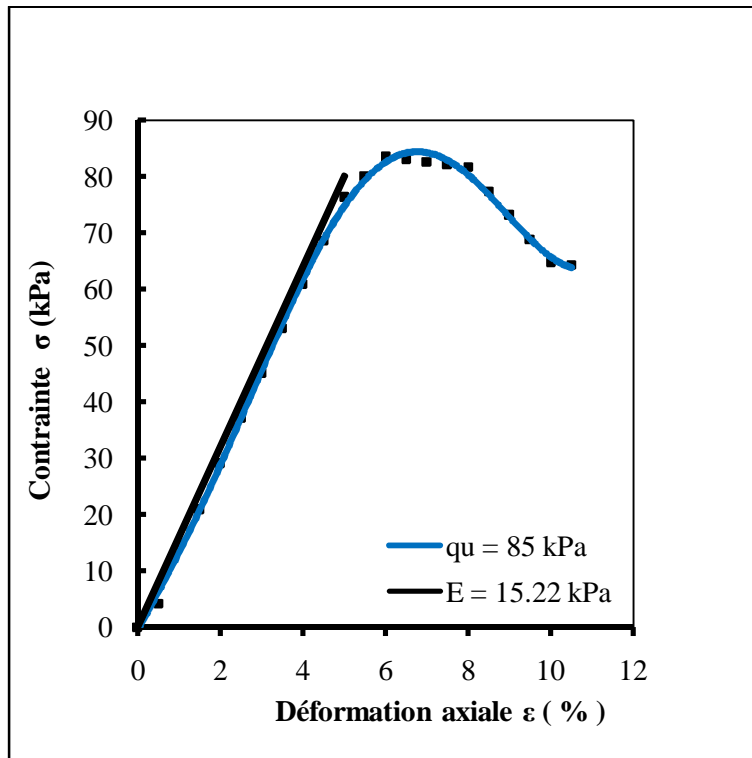


Figure F-1 Essai de Compression Simple Argile +2 % CaO à 7 Jours

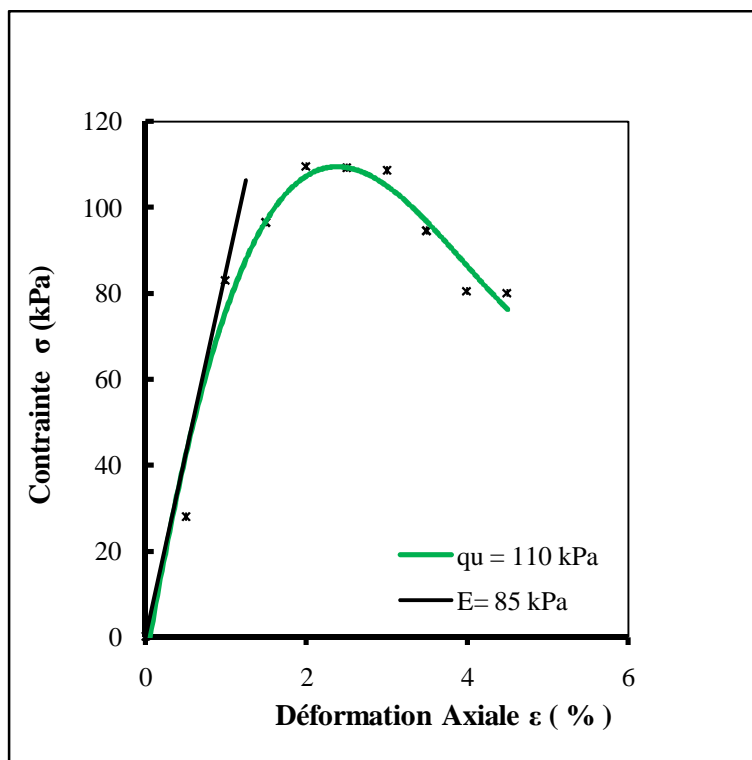


Figure F-2 Essai de Compression Simple Argile +4 % CaO à 7 Jours

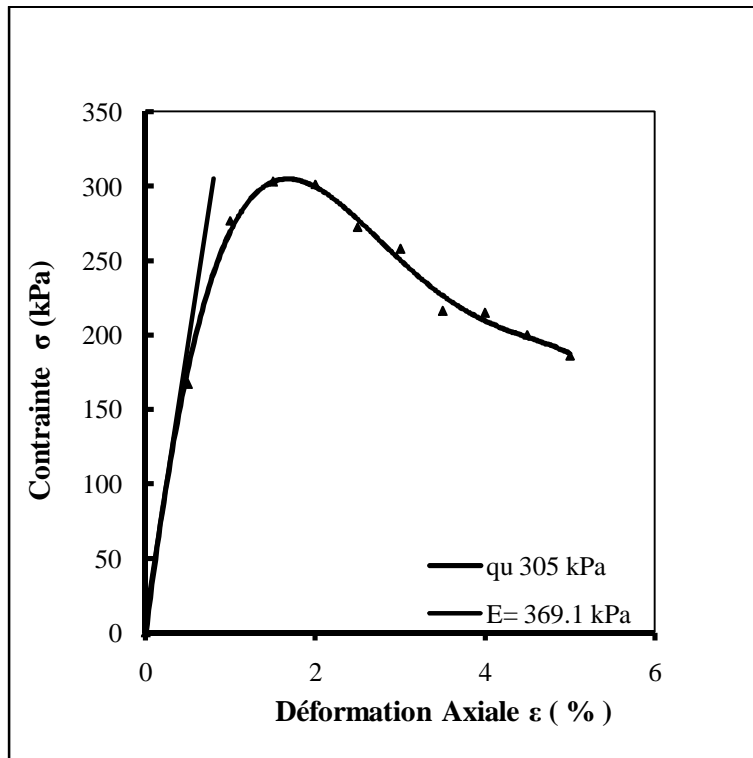


Figure F-3 Essai de Compression Simple Argile +6 % CaO à 7 Jours

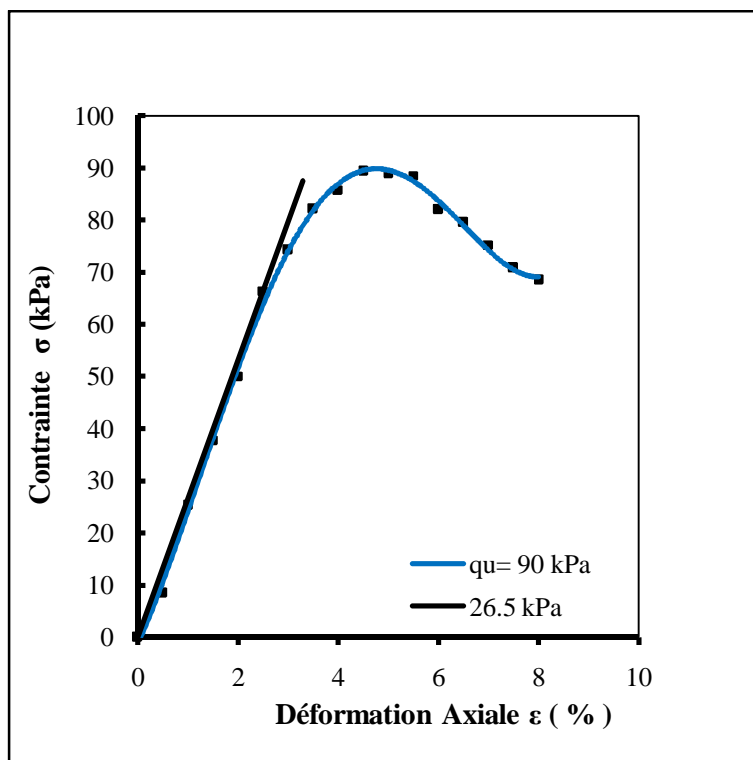


Figure F-4 Essai de Compression Simple Argile +2 % CaO à 14 Jours

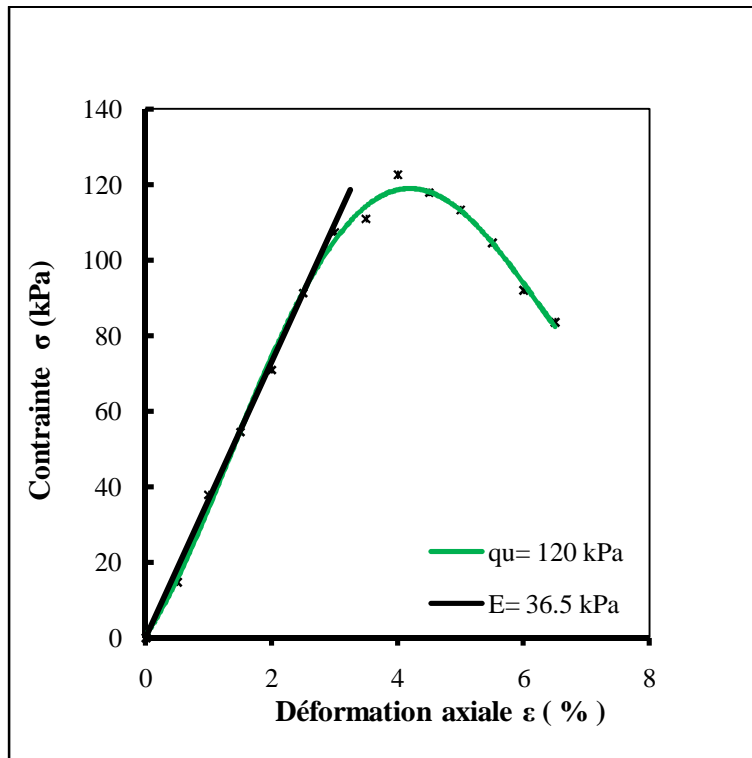


Figure F-5 Essai de Compression Simple Argile +4 % CaO à 14 jours

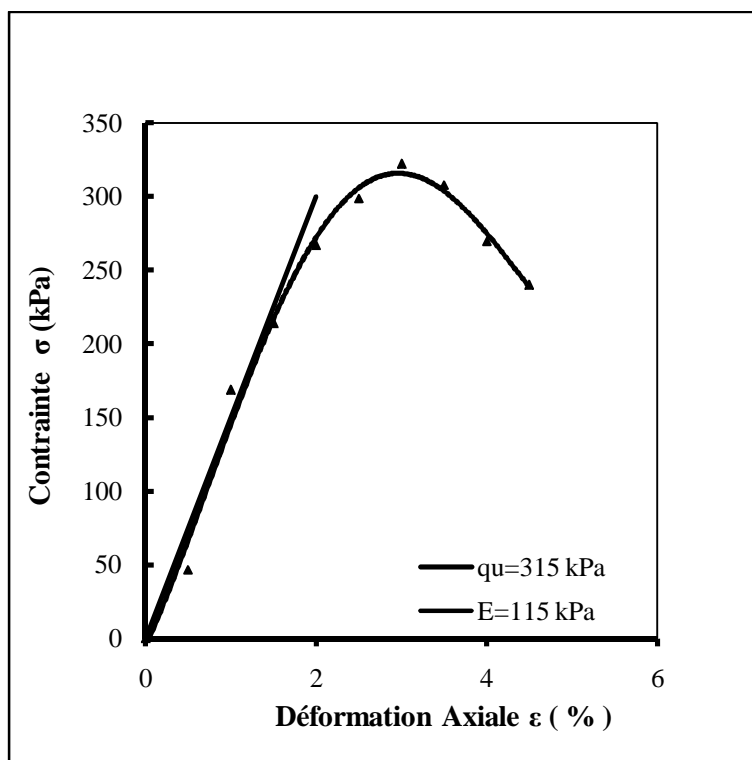


Figure F-6 Essai de Compression Simple Argile +6 % CaO à 14 Jours

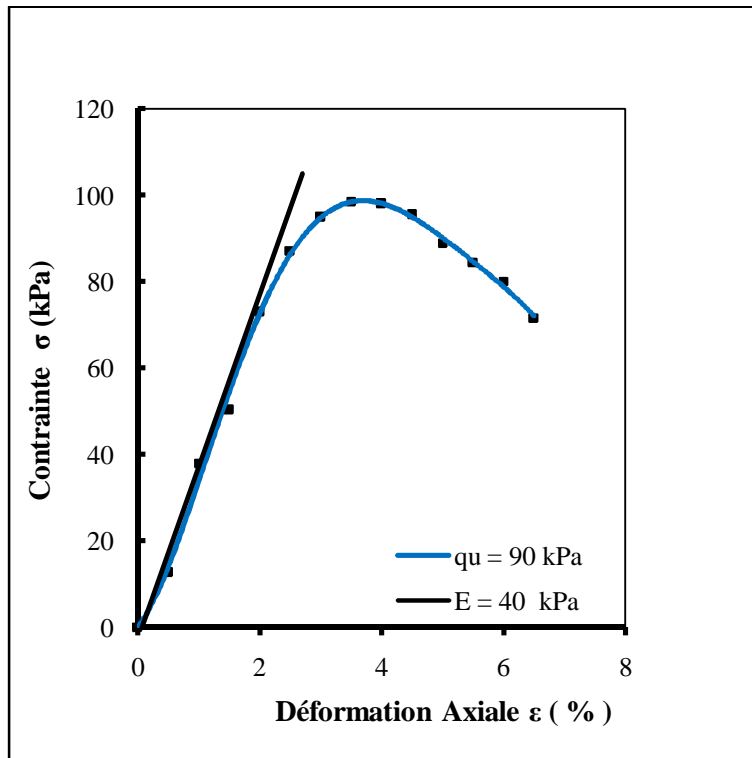


Figure F-7 Essai de Compression Simple Argile +2 % CaO à 21 Jours

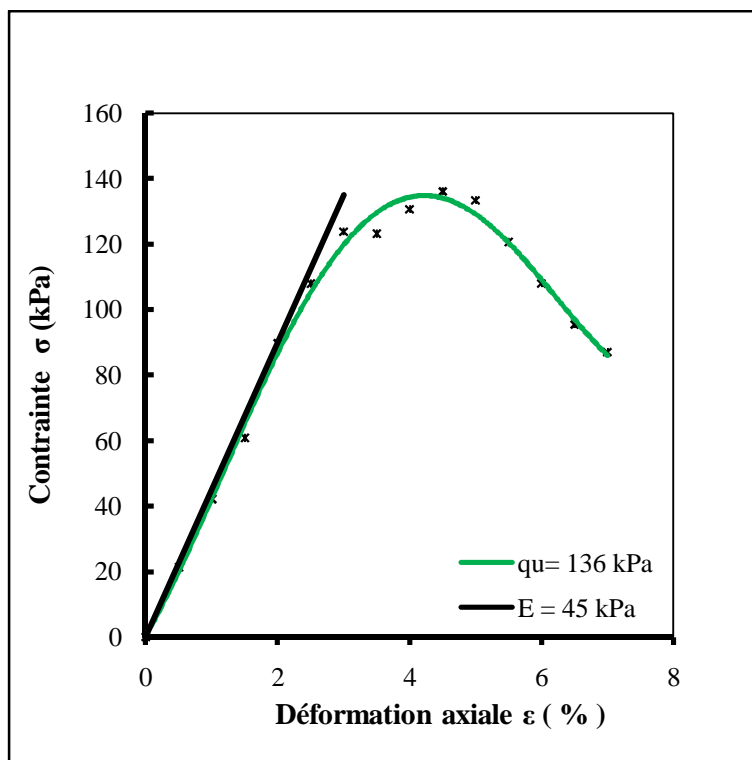


Figure F-8 Essai de Compression Simple Argile +4 % CaO à 21 Jours

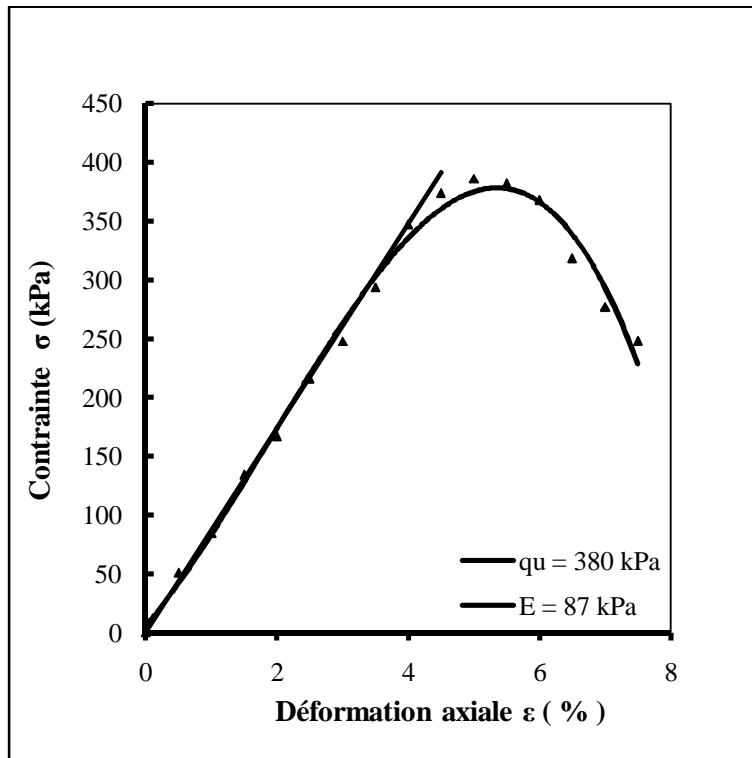


Figure F-9 Essai de Compression Simple Argile +6 % CaO à 21 Jours

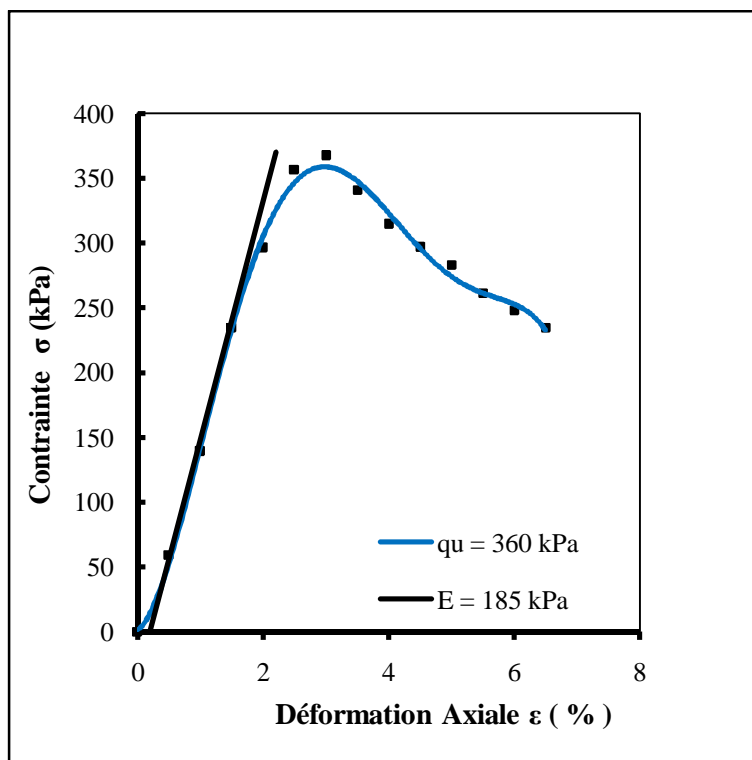


Figure F-10 Essai de Compression Simple Argile +2 % CaO à 28 Jours

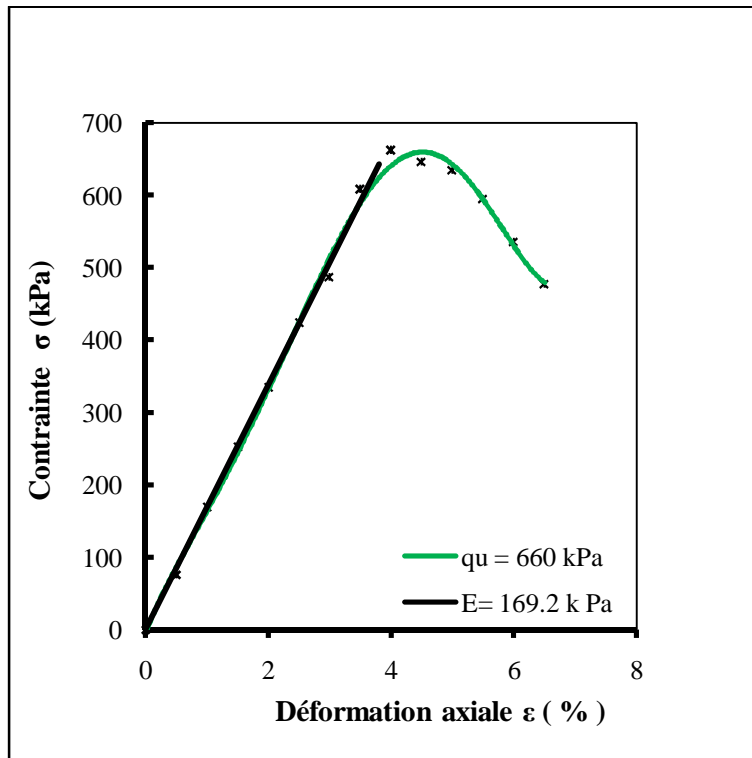


Figure F-11 Essai de Compression Simple Argile +4 % CaO à 28 Jours

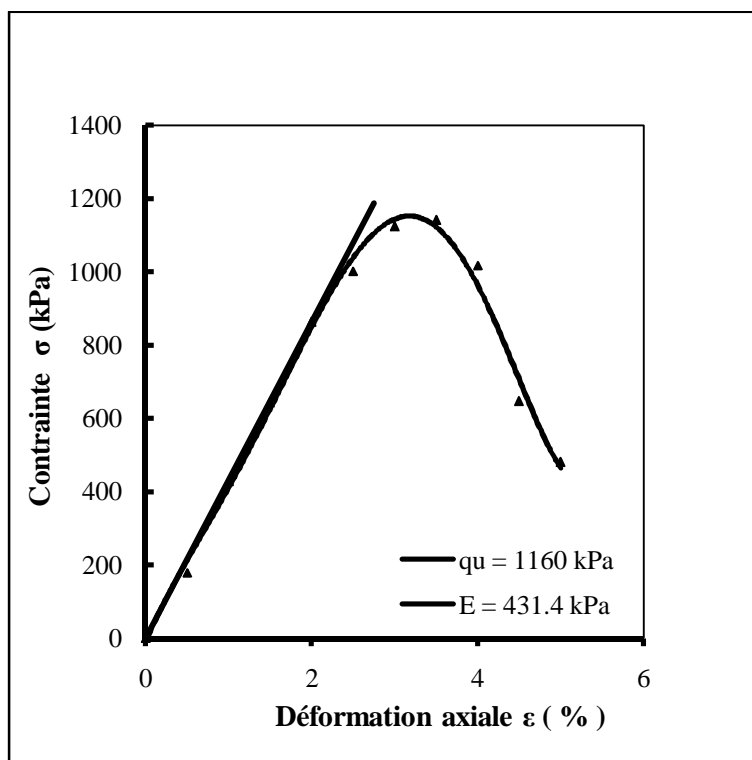


Figure F-12 Essai de Compression Simple Argile +6 % CaO à 28 Jours

Consistency of Clay	Undrained Shear Strength, kPa (TSF)	Unconfined Compressive Strength, kPa (TSF)
Very Soft	<12 (<0.125)	<24 (<0.25)
Soft	12–24 (0.125–0.25)	24–48 (0.25–0.5)
Medium	24–48 (0.25–0.5)	48–96 (0.5–1.0)
Stiff	48–96 (0.5–1.0)	96–192 (1.0–2.0)
Very Stiff	96–192 (1.0–2.0)	192–383 (2.0–4.0)
Hard	>192 (>2.0)	>383 (>4.0)

Source: Adapted from Terzaghi and Peck, 1948.

Tableau F-5 Consistance d' Argile

ANNEX -G-

ESSAI AU CISAILLEMENT DIRECT

		chaux (%)			
		0	2	4	6
τ (kPa)	100 kPa	88,33	173,69	198,18	246,55
	200 kPa	107,33	253,7	289,29	308,72
	300 kPa	147,26	346,85	384,96	367,42
Déplacement (mm)	100 kPa	4	4,25	3,25	3,5
	200 kPa	4,5	5	4,75	4,75
	300 kPa	4,5	6,25	5	4,75
C(kPa)		55,37	84,92	104	186,6
Φ (deg.)		16,38	40,85	43,01	31,13
$\rho_{d \max}$ (kg/m ³)		1532	1451	1382	1333
W_{opt} (%)		25,85	29	31,3	33,1

Tableau G-1 Essai au Cisaillement Direct