



# Mémoire de Fin d'Etudes

## Présenté au

**Département** : Sciences de la Technologie

**Domaine** : Sciences et Techniques

**Filière** : Génie Civil

**Spécialité** : Géotechnique & Matériaux

## Réalisé par

**BEN CHAA Salah Eddine**

**MEBSOUT Larbi**

**Pour l'obtention du diplôme de**

**MASTER ACADEMIQUE**

## Intitulé

*Effet de l'ajout d'un correcteur granulométrique sur les Propriétés géotechniques de la vase du barrage de Charef à base de chaux.*

Soutenu le : **17/09/2017**

Devant le jury de soutenance composé de :

MM: ATTIA Ahmed	MAA	Univ. Djelfa	Président
BEN SALEM Ahmed	MAA	Univ. Djelfa	Encadreur
.....//.....	Prof.	Univ. Djelfa	Co-encadreur
ALLOT Naas	MAA	Univ. Djelfa	Examineur



## Remerciement

Merci Dieu Tout-Puissant de nous réconcilier et grâce à sa capacité et nous préférons mettre fin à ce modeste travail.

La noblesse de la reconnaissance humaine et généreuse de ses mœurs de gratitude et grâce du meilleur à lui.

Nous adressons nos sincères remerciements au professeur estimé" BENSALÉM Ahmed "nous accompagner dans ce travail et nous aider à valoriser sa contribution et ses idées et son témoignage brillant pour nous sa direction pour éviter l'erreur et de marcher sur le chemin pour se rendre à droite.

Il est notre point de départ ce remercier tout particulièrement tous ceux qui mérite l'appréciation et des conseils et tous ceux qui nous a appris le sens de la détermination et de la volonté et tous ceux qui nous ont amenés à succès, même un mot pour nous tous de l'amour la science inculquée et la sanctification de la connaissance et diligente dans notre enseignement et de dévouement et nous guider conseillé.

Et à toutes les bonnes âmes qui se tenaient à nos côtés pendant le voyage de professeurs et camarades de classe école.

Merci au Laboratoire national de la population au sud de travailleurs(LNHC) Djelfa.

*Merci.*



## Dédicaces

Oh mon Dieu, votre nom a commencé et vous faire confiance et vous loue de bien vouloir vous remercier et vous demander de me bénir mon travail.

Seigneur aujourd'hui glorifiée dédie ce fruit que vous êtes en livres et le plus cher à ce que j'ai dans ce monde, mon père et ma mère chère compréhension de la source de ma force.

À l'esprit de mon cher frère "Aissa" la miséricorde de Dieu et de faire sa demeure le paradis et à tous mes frères, que Dieu prolonger l'âge de tous.

Pour l'architecte "Omar charif "et M. "Kamal moreish", qui E\_mrani de fournir toute l'aide et l'assistance des Autochtones.

Tous mes amis, en particulier Ali et Miloud, Abdul Wahab, Hannachi et Abdel-Rahman et Zuhair .....ect.

B·salah Eddine



## Dédicaces

Pour les mots ne peuvent pas être transmis à leur droit  
Pour ceux qui ne peuvent pas compter les nombres majeur et mineur.

Pour mes parents, mon Dieu sauve-moi

A mes frères et sœurs

Mon collègue en travail : *B. Salah Eddine*

Pour tous les amis proches

Et tous les étudiants du master Spécialité .géotechniques et matériaux année 2016\_2017

Et à chacun de ma plume est tombé par inadvertance

Je dédie ce travail

M.Larbi

## ملخص

ومن أجل تحسين قيمة الرواسب البحرية في سد الخريزة، أجرينا الدراسة الحالية بشأن تحسين الخواص الفيزيائية والميكانيكية للطمي المعالج بالجير بإضافة مصححات دقيقة. تتحول إلى رواسب غير ملوثة أثناء معالجة الجير والرمل. أظهرت النتائج تحسنا في الخصائص الميكانيكية و مقاومة الانضغاط البسيط وذلك بزيادة قدرها 46.43٪ بعد استخدام الرمال خلال 28 يوما من العلاج. الكلمات المفتاحية: طمي, سد, تحسين, التصحيح الحبيبي، الجير

## Abstract

In order to improve the value of marine sediments in the Al Khazira dam, we carried out the current study on the improvement of the physical and mechanical properties of the lime-treated vase by adding granular correctors. Transformed into uncontaminated sediments during lime and sand treatment. The results of the mechanical characterization showed an improvement of the simple compressive strength of more than 46, 43 % after the use of the sand and 28 days of normal cure.

**Keywords:** Vase, dam, improvement, grading corrector, lime

## Résumé

Afin d'améliorer la valeur des sédiments marins dans le barrage d'Al-Khazira, nous avons effectué l'étude actuelle relative à l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques de la vase traités avec aux chaux par ajout de correcteurs granulaires. Transformés en sédiments non contaminés pendant le traitement à la chaux et au sable. Les résultats de la caractérisation mécanique ont montré une amélioration de la résistance à la compression simple de plus de 46,43% après l'utilisation du sable et 28 jours de cure normale.

**Mots clés:** Vase, barrage, amélioration, correcteur granulométrique, la chaux

# TABLE DES MATIÈRES

Introduction Générale	1
<b>CHAPITRE I : Recherche Bibliographique</b>	
Introduction	2
I-1 SOLS	2
I-1.1 Structure des sols fins	2
I-1.2 Propriétés Physiques des Sols Fins	3
I-1.2.1 La répartition des grains	3
I-1.2.2 Les limite d'Atterberg	4
I-1.3 Rappel sur les Sols Argileux	6
I-1.3.1 Caractéristiques des argiles	6
I-1.3.2 Caractéristiques Minéralogiques des Argiles	7
I-2 Méthodes de Stabilisation Chimique des Sols	10
I-2.1 Définition	10
I-2.2 Techniques de Stabilisation	11
I-2.2.1 Stabilisation Par Ajout des Matériaux Inertes	11
I-2.2.2 Stabilisation Chimique des Sols	12
Liants organiques	12
Les produits organiques	12
Les liants hydrauliques	13
Le ciment	13
La chaux	14
Les cendres volantes	16
I-2.3 Sélection du Choix de Traitement	16
I-3 Stabilisation des Sols à la Chaux	20
I-3.1 Introduction	20
I-3.2 Mécanismes de Réactions Sol – Chaux	20
Capacité d'échanges Cationiques	21
Réactions Pouzzolaniques	23
Carbonatation	24
I-3.3 Effets du traitement des sols à la chaux	24

I-3.3.1 Effets du traitement des sols à la chaux sur les Limites de consistance	24
I-3.3.2 Effets du traitement des sols à la chaux sur la Texture	27
I-3.3.3 Effets du Traitement des Sols à la Chaux sur le Compactage	28
I-3.3.4 Effets du Traitement des Sols à la Chaux Sur la Résistance des Sols	31
I-3.3.5 Effets du Traitement des Sols à la Chaux Sur Le Module d'élasticité	36
I-4 Influence de l'ajout d'un Correcteur Granulométrique sur les Propriétés des Sédiments Traités aux Liants Hydrauliques	38
I-4.1 Introduction	38
I-4.2 Matériaux et Méthodes d'essais	39
I-4.3 Résultats et analyses	41
I-4.3.1 Résistances mécaniques	41
I- 4.3.1.1 Influence du Dosage en Sable Correcteur	41
I-4.3.1.2 Influence de la Nature Granulométrique du Correcteur	43
I-4.4 Conclusions et Perspectives	44
I-5 Choix du Stabilisant à Retenir	45

## **Chapitre II : Matériaux et Méthodes**

I. Introduction	47
II.1 Les Matériaux utilisés	47
II.1.1 La vase	47
II-1.1.1 Analyse Chimique	48
II-1.1.2 Caractéristiques Physiques	48
Teneur en Matière Organique	48
La Densité Relative	49
Analyse Granulométrique	49
Limites d'Atterberg	49
Classification du Sol	50
II-1.1.3 Caractéristiques Mécaniques	51
Essai Proctor	51
Essai de Compression Simple (UCST)	51
II-1.2 La Chaux	52
II-1.3 Sable	53

II-1.3.1 Analyse Chimique	53
II-1.3.2 Caractéristiques Physiques	54
Analyses granulométrique	54
II-2 Les Méthodes	54
II-2.1 Analyse chimique	54
II-2.2 Caractéristiques physiques	56
Teneur en Matière Organique	56
Essais Granulométrique	56
Limites d'Atterberg	56
II-2.3 Caractéristiques mécaniques	57
Préparation des Mélanges	57
Confection des Éprouvettes	57
Essai de Proctor	57
Essai de Compression Simple (UCST)	58

### **Chapitre III : Essais et Interprétations**

III-1 Introduction.	59
III-2 Caractéristiques Physiques et Mécaniques.	59
III-2.1 Influence du Pourcentage de la Chaux sur le pH.	59
III-2.2 Influence du Pourcentage de la Chaux Sur le Compactage.	60
III-2.3 Influence du Pourcentage de Sable Correcteur Sur la Compression Simple	62
III- 3 Influence du Temps de Cure Sur la Compression Simple	64
Conclusions	66
Références Bibliographiques	67
ANNEXE- A- Classification du Sol	70
ANNEXE- B- Consistance d'Argile	72



## LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Représentation de la composition texturale des sols fins.	3
Figure I-2 : Les états possibles d'un sol, (Léreau, 2006)	5
Figure I-3 : Classification des sols fins sur le diagramme de Casa grande.	5
Figure I-4 : Bloc moléculaire de base d'argile.	7
Figure I-5 : schéma de la structure de La kaolinite (Craig.1987).	8
Figure I-6 : Schéma de la structure de la montmorillonite (Craig, 197).	8
Figure I-7 : Schéma de la structure de l'illite (Craig, 1987).	8
Figure I-8 : Schéma de la structure du chlorite (Ho&, 1991).	9
Figure I-9 : Position des minéraux argileux les plus communs sur l'abaque de plasticité De Casa grande (Holz, 1991).	10
Figure I-10 : Triangle du Choix de la Méthode de Stabilisation	17
Figure I-11 : Choix de la Méthode de stabilisation d'Après CURIN et al. 1976.	19
Figure I-12 : Formation d'une Couche d'Eau Diffuse Autour des Particules d'Argile (D'Après LITTLE, 1987)	22
Figure I-13 : Evolution de la Capacité d'Echange Cationique en Fonction De Pourcentage de Chaux. (Mafés, 2000).	22
Figure I-14 : Effets de la Chaux sur les limites de Consistance (P.SHERWOOD, 1993)	26
Figure I-15 : Effets de la Chaux sur les limites de Consistance (F.G.BELL, 1996)	26
Figure I-16 : Effets de la Chaux sur les limites de Consistance (Z.NALBANTOGLU, 2006)	27
Figure I-17 : Effets de la Chaux sur les limites de Consistance (K.A.KASSIM, Et K.K. CHERN 2004)	27
Figure I-18 : Effets de la Chaux sur le Compactage (S.WILD 1993)	29
Figure I-19 : Effets de la Chaux sur le Compactage (LITTLE, 1995)	29
Figure I-20 : Effets de la Chaux sur le Compactage (F.G. BELL et col.1989 et 1996)	30
Figure I-21 : Effets de la Chaux sur le Compactage (M.AFES G DIDLER 2000)	30
Figure I-22 : Effets de la Chaux sur le Compactage (Z. NALBANTOGLU 2006).	31
Figure I-23 : Effets de la Chaux sur le Compactage (M.C.TONOZ et al 2006)	31
Figure I-24 : Effets de la Chaux sur la Résistance (F.G. Bell. (1989 et 1996),	33
Figure I-25 : Effets de la Chaux sur la Résistance (LITTLE, 1995)	34
Figure I-26 : Effets de la Chaux sur la Résistance (M.C.TONOZ et al, 2006)	34
Figure I-27 : Effets de la Chaux sur la Résistance (Z. NALBANTOGLU, 2006)	35
Figure I-28 : Effets de la Chaux sur la Résistance (K.A.KASSIM et K.K.CHERN, 2004)	35
Figure I-29 : Effets de la Chaux sur la Résistance (MOHAMED.A et col, 2009)	36
Figure I-30 : Effets de la Chaux sur la Résistance (MICHAEL A. MOONEYET Et NATHANM. TOOHEY, 2010)	36
Figure I-31 : Effets de la Chaux sur les Modules d'Elasticités (F.G. BELL et col. 1996)	37
Figure I-32 : Effets de la Chaux sur les Modules d'Elasticités	38
Figure I-33 : Courbes granulométriques des sables correcteurs utilisés	40
Figure I-34 : Résistances à la compression simple à 28 jours (moyennes et écarts-type) du Sédiment traité avec 10% de ciment, sans et avec 35, 40 et 45% de sable correcteur, Conservé en cure normale.	42
Figure I-35 : Résistances à la compression diamétrale à 28 jours (Moyennes et écarts-type) du sédiment traité avec 10% de ciment, sans et	

Avec 35, 40 et 45% de Sable correcteur, conservé en cure normale.	43
Figure I-36: Résistances à la compression simple à 28 jours (moyennes et écarts-type) du Sédiment traité avec 10% de ciment, sans et avec 35, 40 et 45% de sable correcteur, Conservé à l'air libre.	44
Figure II-1 : image capturée à partir du site	47
Figure II-2 : image du barrage capturé par le programme Google Earth	48
Figure II-3 : courbe granulométrique du sol étudié	49
Figure II-4 : Limite de Liquidité pour l'Argile non traité	50
Figure II-5 : Courbe de compactage pour l'Argile non traitée	51
Figure II-6 : Essai de Compression Simple à 0 % de Chaux	52
Figure II-7 : courbe granulométrie de sable	54
Figure II-8 : L'essai d'EADES et GRIM (1960)	55
Figure III-1 : Evolution du pH-% de Chaux.	59
Figure III-2 : Influence du pourcentage de sable correcteur sur la Masse Volumique Sèche Maximale $\rho_d^{max}$ .	60
Figure III-3:Influence de la Chaux sur la Teneur en Eau Optimale $w_{opt}$ .	60
Figure III-4:Influence de l'Addition de sable correcteur sur la Contrainte Axiale À 28 jrs	62
Figure III-5 : Influence de l'Addition de sable correcteur sur la Déformation Axiale À 28 Jours	62
Figure III-6 : Influence du Temps de Cure sur la Contrainte Axiale.	63
Figure III- 7 : Influence du Temps de Cure sur la Déformation Axiale.	64

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Classification des grains solides	5
Tableau I-2 : Coefficient d'activité de différents minéraux.	10
Tableau II-1 : Composition chimique de la vase.	48
Tableau II-2 : Récapitulation des résultats d'essais de limites d'Atterrer	50
Tableau II-3 : Propriétés physico-chimiques de la chaux	53
Tableau II-4 : Résultats Exprimés en % et en poids	53
Tableau III -1 : Evolution du pH - % de la Chaux	58

## **LISTE DES NOTATIONS**

LNHC	Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction
USCS	Unified Soil Classification system (Système de Classification des sols unifiée)
CC	Coefficient de courbure
CU	Coefficient d'uniformité
ML	Argile silteuses inorganique de faible plasticité.
ASTM	American Society for Testing and Materials
CPA	Ciment Portland Artificiel
MF	Module de Finesse
AFNOR	Association française de normalisation

$W_{opt}$  : teneur en eau optimale

IP: Indice de plasticité

WL : Limite de liquidité

WP : Limite de plasticité

$\gamma_h$  : Poids volumique humide

$\rho_d^{max}$  : Poids volumique sec maxime

$\sigma$  : Contrainte

$\varepsilon$  : déformation axiale

$q_u$  : La résistance simple

GS : Densité Spécifique

H : Hauteur

$\emptyset$  : Diamètre

# Introduction Générale

L'accumulation des sédiments dans les barrages est devenue un enjeu économique et environnemental majeur, La valorisation des sédiments en technique routière présente une voie très intéressante, ce domaine est parmi les plus gros consommateurs de granulats ce qui permet de diminuer un important volume de sédiments.

Le but de cette étude concerne l'amélioration des Propriétés géotechniques de la vase du barrage de Charef traités à la chaux par ajout des correcteurs granulométriques.

Les travaux de recherche dans cette mémoire 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. Les résultats des essais de plasticité ; de compactage et de compression simple sont présentés et commentés.

Le chapitre 2 présente les différentes caractéristiques de la vase 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 sur différents échantillons de sol sont exposés au chapitre 3 en fonction de pourcentage d'ajout de 2% chaux et avec dosage de sable correcteur. L'effet du temps de conservation sur les éprouvettes de sol préparée a aussi fait l'objet d'une étude.

## **Introduction**

Les sédiments de dragage gérés à terre, pollués ou non sont considérés comme des déchets solides. Ce sont des matériaux fins tout comme les fines de carrière, les fines de barrage, les fines de mer. Ainsi comment valoriser et traiter des sols fins le plus économiquement possibles tout en étant plus respectueux de l'environnement? Ce chapitre bibliographique présente les sols fins, les moyens de leur caractérisation et valorisation.

La valorisation des sols fins utilise grandement les techniques de stabilisation et solidification pour l'amélioration de leur caractéristiques mécaniques à base de liants hydrauliques (ciment, chaux, cendre volante, ...etc.) appliquées dans le domaine de génie civil ou d'autres produit en dehors des liants hydrauliques tels que : poudre de fours de ciment, fumée silice, l'huile sulfurée, les fibres végétales et synthétiques ...etc.

### **I.1 SOLS**

Le terme de « sol » est général. Selon la norme **NF XP 94-010**, un sol est défini comme étant un « agglomérat » constitué : de particules solides séparables par trituration sous l'eau provenant soit de la désagrégation des roches par altération mécanique ou chimique sous l'effet d'agents naturels, soit de la décomposition d'organismes vivants, végétaux ou animaux, soit d'une activité industrielle de fluides interstitiels ».

Le mode de caractérisation et de classification des sols dépend du domaine d'étude concerné : géologique, géotechnique et pédologique.

Dans le cadre du génie civil, diverses classifications existent, La norme NF P 94-011 permet de regrouper une partie de ces classifications, ainsi un sol peut être identifié selon :

Sa granulométrie, sa teneur en matières organiques, sa granularité, son plasticité, son argilo situé et sa pétrographie.

#### **I.1.1 STRUCTURE DES SOLS FINS**

La texture d'un sol fin est définie par la grosseur des particules qui le composent : Pourcentage de sable de limon et d'argile. La composition minéralogique des particules est d'ailleurs en relation avec leur taille (les plus grossières sont surtout à base de quartz, les plus fines à base de phyllo silicates).

Pour déterminer plus finement sa texture, on utilise un diagramme triangulaire (voir la Figure I.1) qui permet de déterminer la classe texturale du sol fin : on le qualifie par exemple d'argileux, de limoneux, d'argilo-sableux, de limono-argilo-sableux, de limoneux fins...

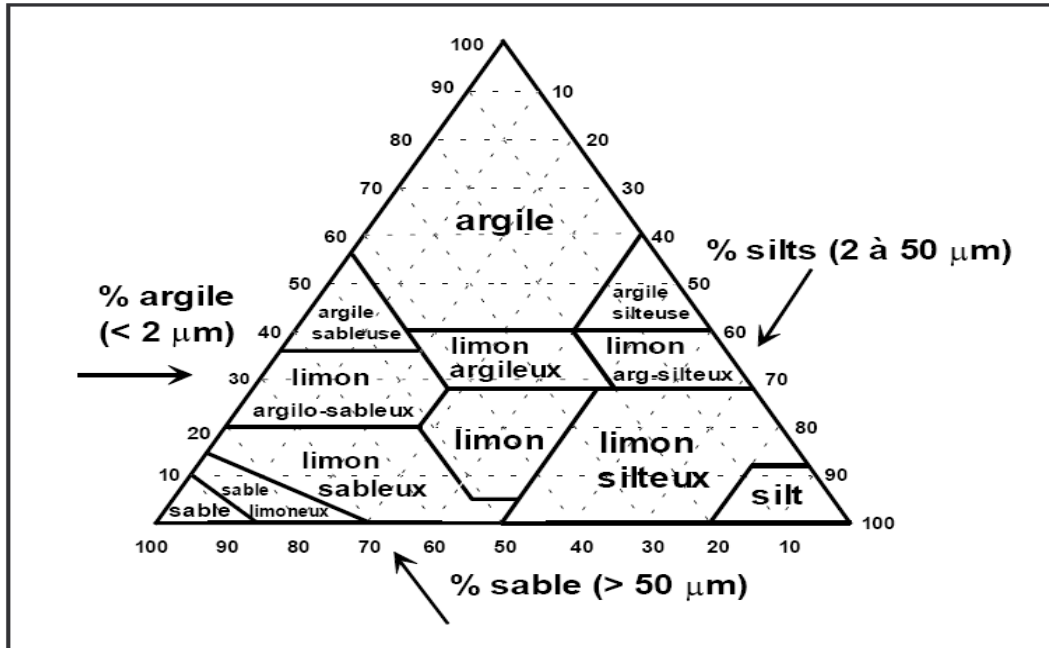


Figure I.1 : Représentation de la composition texturale des sols fins.

### I.1.2 PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS FINS

Les sols naturels sont constitués d'un mélange de particules élémentaires de différentes dimensions avec différentes propriétés. En général, Il est nécessaire d'analyser la classification des sols pour étudier ses propriétés mécaniques. Deux principales propriétés physiques sont rappelées : la répartition des grains (granulométrie) et les limites d'Atterberg.

#### I.1.2.1 La répartition des grains

Les particules minérales constituant un sol fin peuvent être isolées, triées et classées suivant leur taille. Pour les sols fins, leur taille est inférieure à 2mm, au-delà ce sont des sols considérés comme grossiers. Les limites de classes et leurs dénominations sont comme indiqué sur le Tableau I.1.

L'analyse granulométrique a pour objet la mesure de la taille des particules élémentaires afin de déterminer les proportions de grains qui constituent les ensembles de grains de substances diverses. Les limites de différentes classes de taille sont conventionnelles et sont choisies en fonction de l'objectif de l'application.

Classification des grains solides						
Sols fins	Dénominations en 5 classes	Argiles	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers
	Limites de taille en $\mu\text{m}$	< 2	2 à 20	20 à 50	50 à 200	200 à 2000
	Dénominations en 3 classes	Argiles	Limons		Sables	
	Limites de taille en $\mu\text{m}$	< 2	2 à 50		50 à 2000	
Sols grossiers	Dénominations en 3 classes	Graviers	Cailloux		Blocs rocheux	
	Limites de taille en mm	2 à 20	20 à 200		>200	

Tableau I.1 : Classification des grains solides

### I.1.2.2 Les limite d'Atterberg

La teneur en eau est très importante surtout pour les sols fins. Les argiles ont la propriété d'absorber des quantités importantes d'eau. Elles affectent leur plasticité et leur cohésion.

#### a- L'état d'un sol

La consistance (et donc le comportement) d'un sol varie dans des proportions importantes en fonction de la teneur en eau. Ceci est lié à l'importance plus ou moins grande des couches d'eau adsorbées autour des grains et plus généralement aux propriétés colloïdales des argiles et à leur proportion dans le sol considéré : il y 3 états :

- ✚ Quand la teneur en eau est élevée, les forces de cohésion ne sont pas assez importantes pour maintenir en place les particules de sol. C'est similaire à l'écoulement d'un fluide (boue), c'est l'état liquide.
- ✚ Quand la teneur en eau diminue, le sol peut être modelé. Les particules sont rapprochées car l'eau adsorbée est mise en commun. Les grains sont reliés entre eux par des molécules d'eau. Le sol est alors à l'état plastique.
- ✚ Quand la teneur en eau diminue encore, les grains deviennent très rapprochés; le sol ne change plus de volume quand sa teneur en eau diminue, c'est l'état solide, (voir Figure I.2)



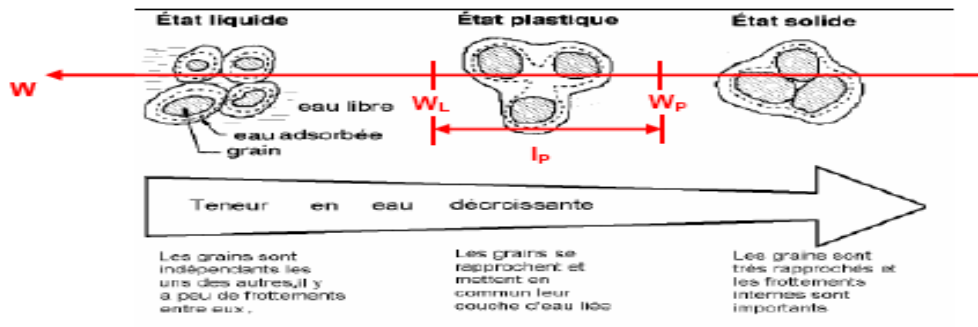


Figure Les états possibles d'un sol, (Léreau, 2006)

Figure I.2 : Les états possibles d'un sol, (Léreau, 2006)

**b- Les limites d'Atterberg**

En géotechnique, les limites d'Atterberg définissent à la fois un indicateur qualifiant la plasticité d'un sol et permettent de classifier les sols. Les caractéristiques des sols fins sont complétées par l'indice de plasticité IP qui s'exprime en %. Il est donné par la formule :

$$IP = WL - WP$$

Les valeurs de WL, WP et IP sont fonction de la proportion et de l'activité des particules argileuses contenues dans le sol. Pour les sols fins, il est d'usage de reporter les valeurs d'IP et WL sur un diagramme ayant IP en ordonnée et WL en abscisse. Ce diagramme est appelé diagramme de Casa grande (voir Figure I.3).

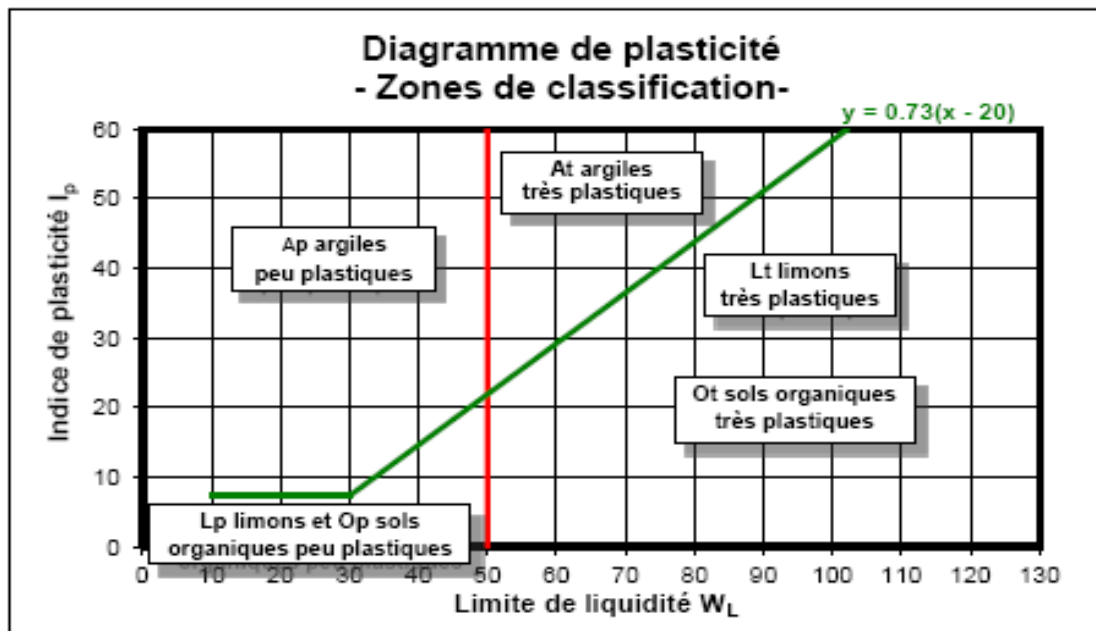


Figure I.3 : Classification des sols fins sur le diagramme de Casa grande.

## **I.1.3 RAPPEL SUR LES SOLS ARGILEUX**

### **I.1.3.1 Caractéristiques des argiles**

Les argiles sont des matériaux sédimentaires de la couche superficielle de l'écorce terrestre, obtenus par dégradation physique (gel, cristallisation de sels,..) et altération par l'hydrolyse des minéraux des roches éruptives et magmatiques (granites et basaltes) sous l'action physique et chimique des eaux de surface. Ces résidus détritiques sont déplacés par voie glaciaire, fluviale ou éolienne et se déposent dans les bassins de sédimentation. Un sol argileux peut contenir certains minéraux argileux ou tout autre minéral. Les sols argileux sont généralement plastiques et cohérents (**Hoel, 1991**). Selon le " Unifié Soli Classification System " (USCS) un sol est considéré fin lorsque sa granulométrie est inférieure à 0,075 mm (tamis No 200) qui correspond à 0.08 mm selon la norme **NFP 18-101**. L'USCS regroupe les silts et argiles dans cette même catégorie. Or, même si les silts sont des sols à grains fins, ils ont le comportement des sols granulaires; ils sont pulvérulents et non plastiques (**Holz, 1991**). L'eau influence leur comportement puisqu'ils sont dilatants, mais contrairement aux argiles, leur plasticité est à peu près nulle. Il est alors correct de dire que leur résistance est pratiquement indépendante à leur teneur en eau, ce qui les rapproche aux caractéristiques des sables.

D'autres systèmes de classification plus couramment utilisés en génie civil discriminent les argiles et les silts à cause de leurs différents comportements. En effet, les systèmes AASHTO (**AASHTO, 1990**) et ASTM (**ASTM, 1991**) catégorisent les argiles comme ayant une granulométrie se retrouvant entre 0,001 et 0,005 mm. Les silts, quant à eux, se retrouvent entre 0,005 et 0,075 mm. On retrouve aussi une classe inférieure à 0,005 mm, soit les colloïdes.

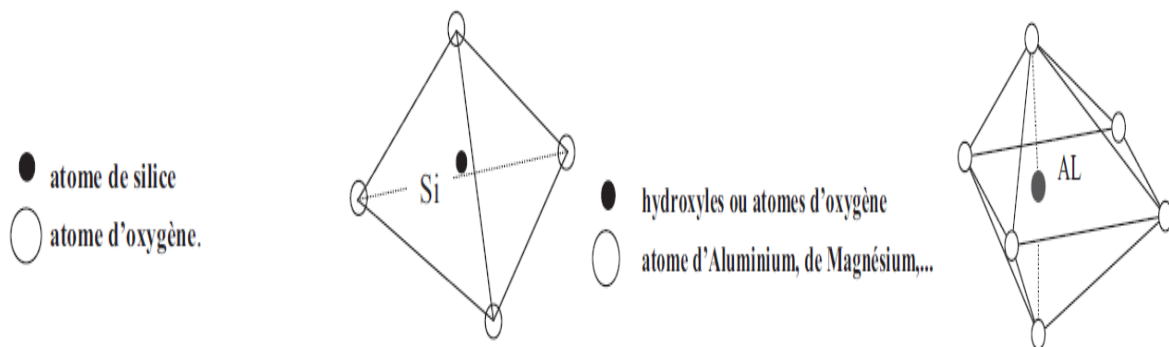
En mécanique des sols, on reconnaît que les argiles possèdent des propriétés mécaniques et chimiques qui leurs sont propres. Étant donné leur grande activité sur le plan électrochimique, une faible proportion d'un minéral argileux dans un sol peut modifier ses propriétés et son comportement mécanique. En effet, lorsque le pourcentage d'argile dans un sol excède 50 %, les particules de silts et de sable flottent dans une matrice argileuse ou leur présence n'a aucun effet sur le comportement global du mélange (**Holz, 1991**). Malgré leurs petites dimensions. Les argiles possèdent une très grande surface spécifique qui résulte de leur forme en feuillets. Possédant une grande surface chargée négativement, elles sont alors très actives et peuvent adsorber des liquides comme de l'eau ainsi que d'autres cations chargés positivement disponibles dans leur environnement. Certaines argiles peuvent retenir jusqu'à 7

fois leur masse sèche en eau (Littré, 1995). Lorsque les feuillets d'argiles sont pleinement hydratés, l'eau les force dans un positionnement parallèle. Dans cet arrangement, l'argile possède peu de force mécanique, notamment en cisaillement, et représente donc un sol peu accommodant pour soutenir des charges verticales.

### I.1.3.2 Caractéristiques minéralogiques des argiles

Cette section reprend brièvement les principales caractéristiques minéralogiques des argiles car celles-ci ont une influence primordiale pour une bonne compréhension du phénomène de stabilisation.

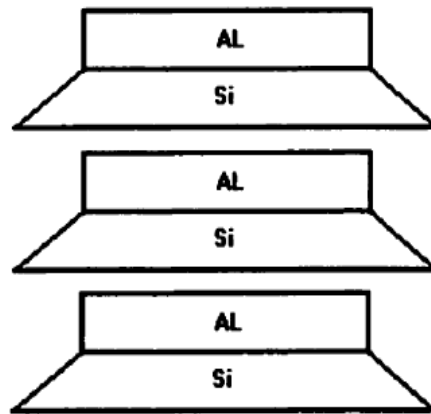
Les minéraux argileux font partie du groupe des **phyllo silicates** qui contiennent une grande proportion d'eau emprisonnée entre des feuillets de silice. Sur le plan chimique, ce sont des **aluminosilicates hydrox** ajoutés à d'autres ions métalliques. La figure I.4 illustre le bloc moléculaire de l'argile qui est constituée de feuillets d'oxyde de silice **tétraèdre (SiO<sub>4</sub>)** et de feuillets d'alumine **octaèdre (Al(OH)<sub>6</sub>)**.



**Figure I.4** : Bloc moléculaire de base d'argile.

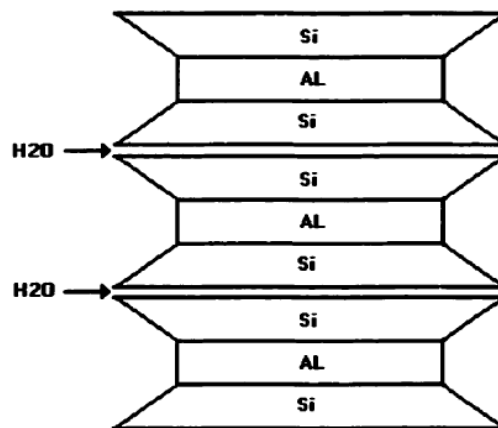
On retrouve quatre grands groupes minéralogiques chez les argiles; **la kaolinite, la montmorillonite, l'illite et le chlorite.**

- ✚ La kaolinite (**figure I.5**) est constituée d'un feuillet de silice en forme de tétraèdre et d'une plaquette d'alumine en forme d'octaèdre. La charge positive de la plaquette de silice balance la charge négative de la plaquette d'alumine hydratée. Les deux feuillets forment donc une couche stable sauf en périphérie où les liens sont souvent brisés (Scholem, 1995). La kaolinite est considérée comme étant un minéral argileux 1 :1 car les feuillets sont empilés en alternance (Holz, 1991)

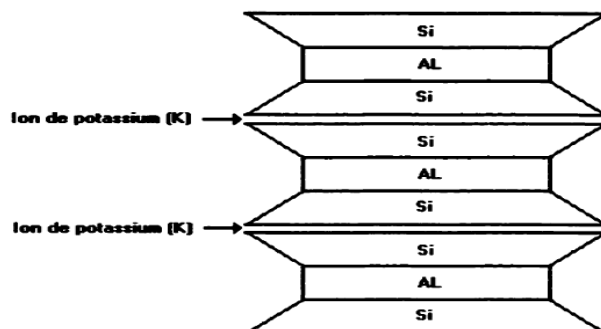


**Figure I.5 :** schéma de la structure de La kaolinite (Craig,1987).

✚ la montmorillonite, aussi appelée smaltite, et l'illite possèdent, quant à elles, des feuillets de silice de part et d'autre de la plaquette d'alumine (**figures I.6 et I.7**). Ce sont donc des argiles possédant trois feuillets par couche qui sont reconnues comme ayant une structure 2:1. Cependant, contrairement à la montmorillonite, les espaces entre les couches de l'illite sont reliés par un atome de potassium.

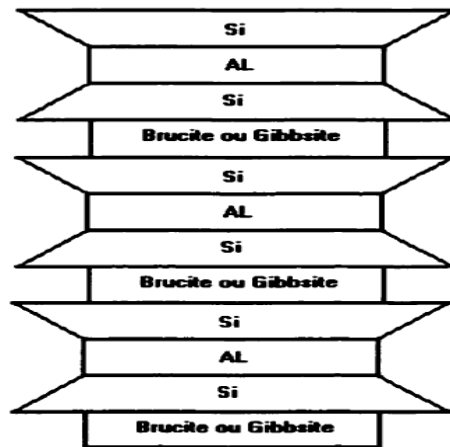


**Figure I.6 :** Schéma de la structure de la montmorillonite (Craig, 1987).



**Figure I.7 :** Schéma de la structure de l'illite (Craig, 1987).

Chlorite (figure 1.8) est composé d'une répétition de feuillets de silice, alumine, silice et gibbsite ou brucite. On la reconnaît donc comme ayant une structure 2:1 : 1. Etant donné que l'eau peut pénétrer entre les couches, le chlorite peut être gonflant. Or, elle n'est pas aussi active que la montmorillonite (Holz, 1 991).



**Figure I.8** Schéma de la structure du chlorite (Ho&, 1991).

Alors que la méthode la plus précise pour classifier les minéraux argileux est celle de la diffraction par rayons-X (XRD), il existe deux autres méthodes simples d'approximation.

- ✚ La première consiste à calculer le coefficient d'activité (A) utilisant la formule suivante :

**A = IP / pourcentage d'argile (Holz, 1991)**

A = Coefficient d'activité.

IP = Indice de plasticité.

Le tableau I.2 illustre la corrélation entre le coefficient d'activité et le type de minéral argileux.

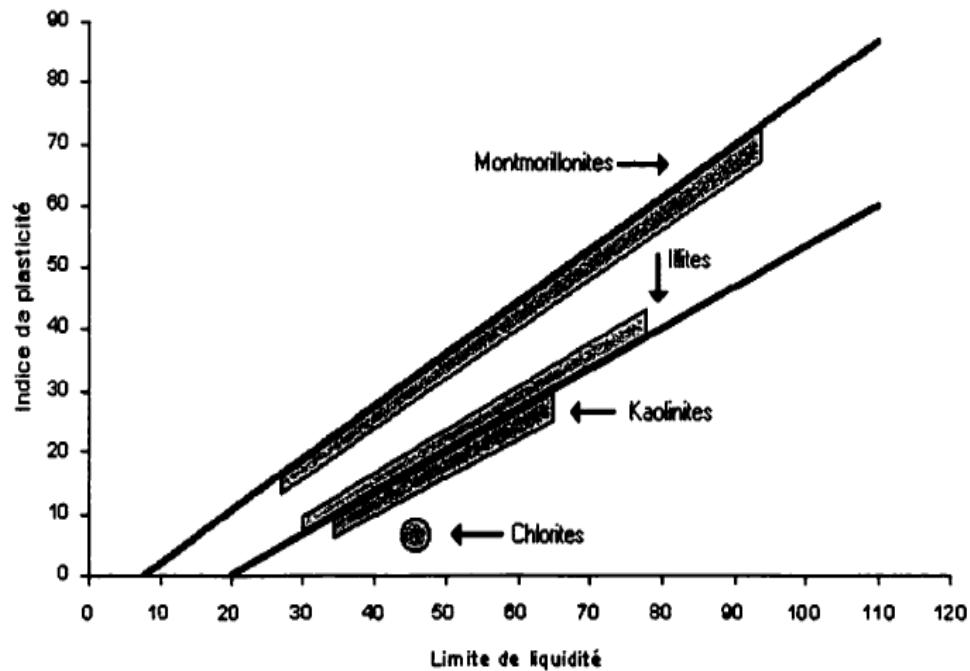
**Coefficient d'activité de différents minéraux**

Minéral	Activité
Montmorillonite	1,0 – 7,0
Illite	0,5 – 1,3
Kaolinite	0,3 – 0,5
Chlorite	n.d.

**(Holtz, 1991; Mitchell, 1976)**

**Tableau I.2 :** Coefficient d'activité de différents minéraux.

- ✚ Une deuxième méthode proposée par Casa grande (Holz, 1991) suggère d'utiliser les limites d'Atterberg. En effet, l'abaque de plasticité de casa grande (figure I.9) peut donner autant de renseignements pertinents que n'importe quelle analyse de haute précision par diffraction ou par différenciation thermique (Holz, 1991). Connaissant la limite de liquidité (WL) et l'indice de plasticité (IP), le minéral peut être déterminé en plaçant les points sur la figure 1.9.



**Figure I.9** : Position des minéraux argileux les plus communs sur l'abaque de plasticité de Casa grande (Holz, 1991).

## I.2.MÉTHODES DE STABILISATION CHIMIQUE DES SOLS

### I.2.1.DEFINITION

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 représentent 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 unilinéaire de 12075,5km et touche plusieurs régions du pays. L'autoroute Est Ouest à elle seules 'étales 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.

## **I.2.2. 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.

### **I.2.2.1. 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 étudié 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 étudié 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.

### **I.2.2.2. 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 probants 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<sub>max</sub> des grains inférieur à 0,08 mm, surface spécifique comprise entre 2800 et 5000cm<sup>2</sup>/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 FR ables 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. 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 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 France Salage : 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 silt eux 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 As 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.

### **I.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.

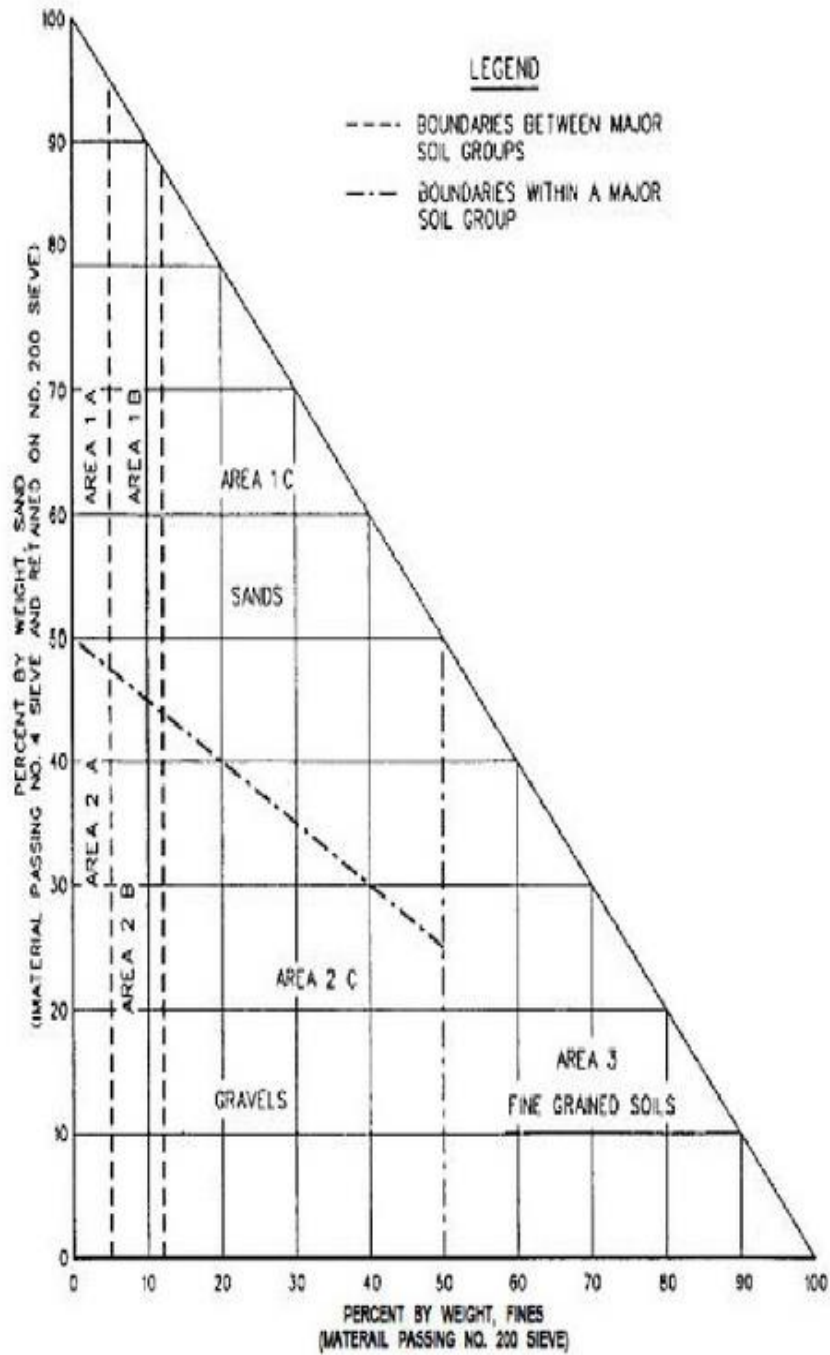


Figure I.10 Triangle du Choix de la Méthode de Stabilisation

Area	Soil Class. <sup>a</sup>	Type of Stabilizing Additive Recommended	Restriction on LL and PI of Soil	Restriction on Percent Passing No. 200 Sieve <sup>a</sup>	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 .. <sup>b</sup> 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 .. <sup>b</sup>  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 1-3 Guide du Choix de la Méthode de Stabilisation

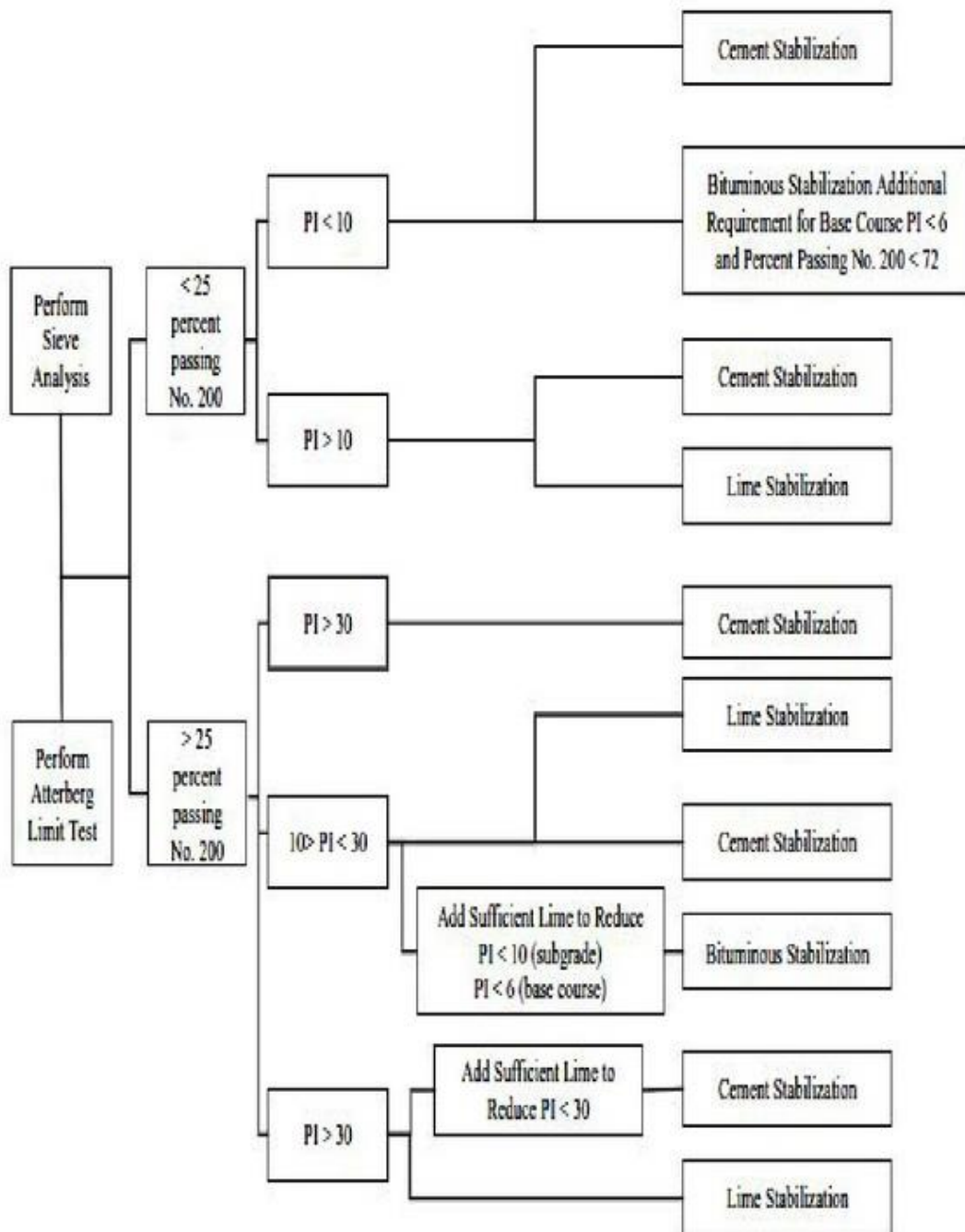


Figure I-11 Choix de la Méthode de stabilisation d'Après CURIN et al. 1976.

## **I.3 STABILISATION DES SOLS À LA CHAUX**

### **I.3.1 Introduction**

La stabilisation des sols à la chaux est une technique ancienne. Elle a été utilisée dans les voies romaines, l'Égypte, 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 États 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.

### **I.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

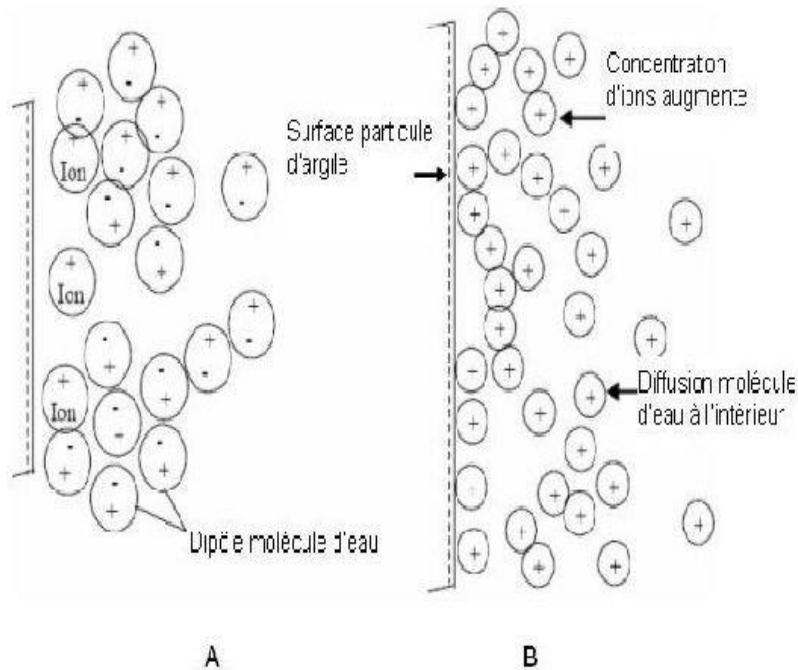


cimentation qui augmentent la résistance et la durabilité du sol stabilisé. Les réactions pouzzolaniques dépendent du temps et de la température ambiante. Les températures élevées (plus de 16°C) accélèrent ces réactions. La réaction qui peut se produire avec la chaux est la carbonatation. Dans cette 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**

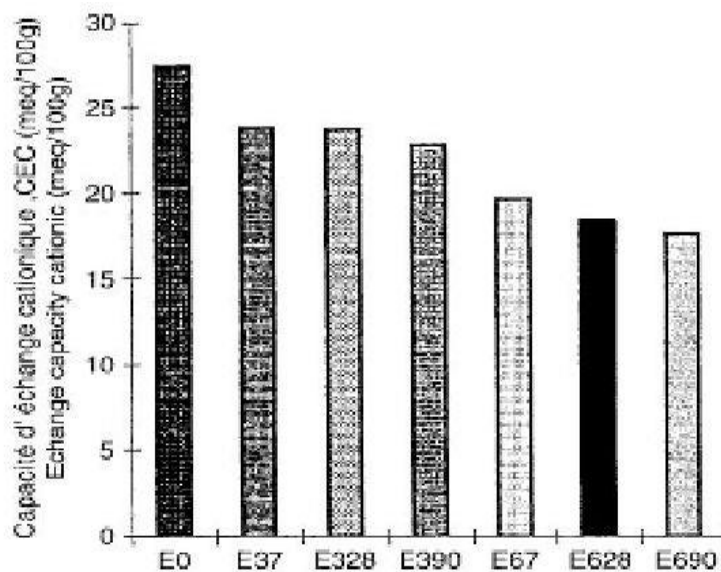
Selon EADES et GRIM (1960), pratiquement tous les sols fins traités à la chaux, font des réactions d'échange cationique et de floculation – agglomération, en présence d'eau figure 1.6. Cette réaction produit des modifications immédiates dans les propriétés et la structure du sol par échange cationique 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 siltueux 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 1-12** Formation d'une Couche d'Eau Diffuse Autour des Particules d'Argile (D'Après LITTLE, 1987)

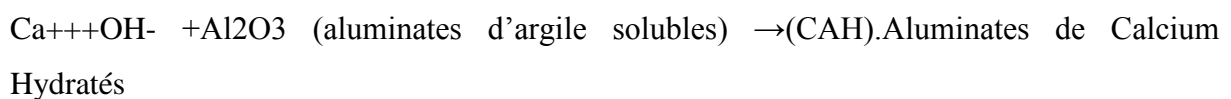
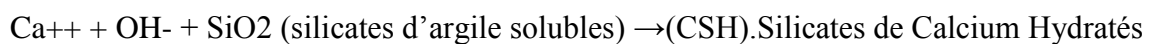
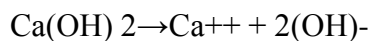
D'après M.AFES G DIDLER (2000) figure 1-7, les résultats obtenus, pour les différents échantillons d'argile naturelle et traitée à 3 et 6% de chaux montrent que la CEC diminue légèrement à mesure que le pourcentage de chaux ajoutée augmente. On constate aussi que la CEC pour un même pourcentage de chaux 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 1-13** Evolution de la Capacité d'Echange Cationique en Fonction de Pourcentage de Chaux. (Mafés, 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 cimentant qui sont essentiellement les silicates de calcium hydratés ou les aluminates de calciums 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 kaolin tiques, 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 cimentant CAH et CSH citée par, JANZ et JOHANSSON, (2002).

### **I.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.

#### **I.3.3.1 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 Réclamation) (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.

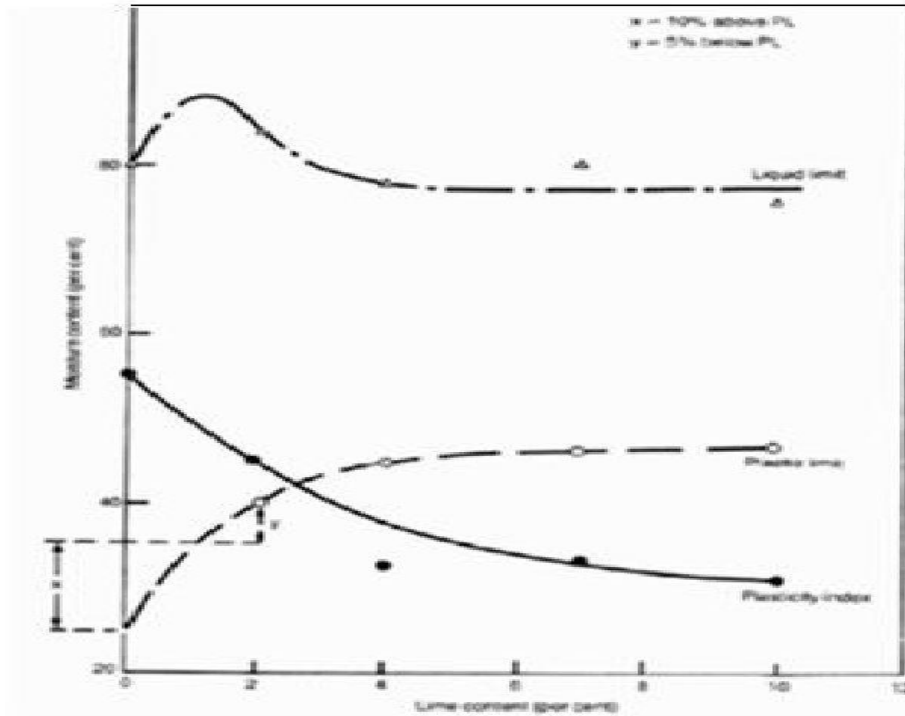


Figure 1-14 Effets de la Chaux sur les limites de Consistance (P.SHERWOOD, 1993)

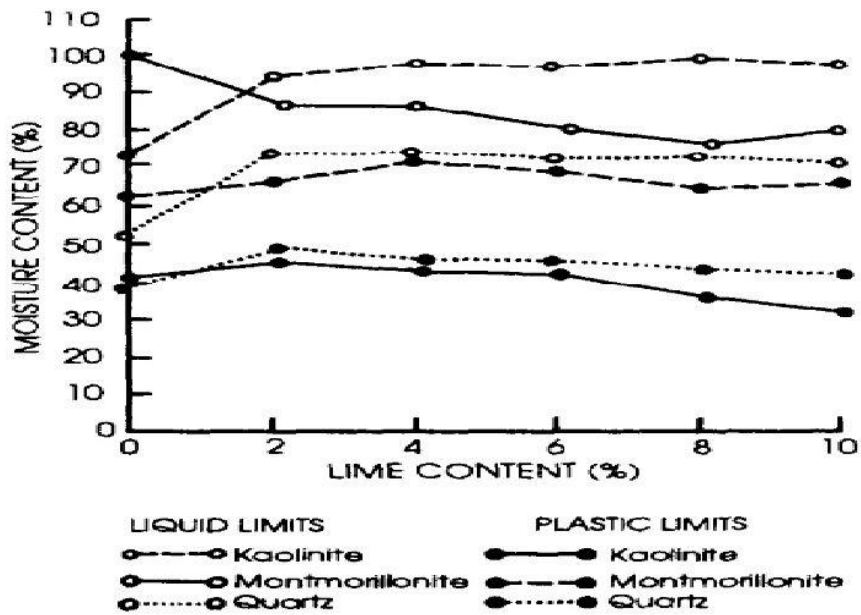


Figure 1-15 Effets de la Chaux sur les limites de Consistance (F.G.BELL, 1996)

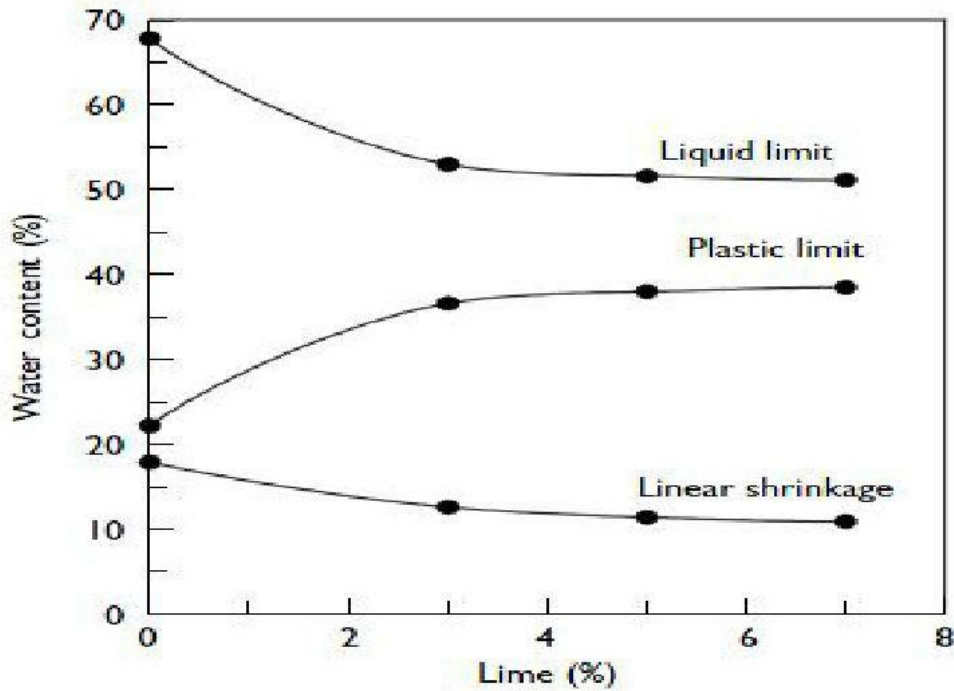


Figure 1-16 Effets de la Chaux sur les limites de Consistance (Z.NALBANTOGLU, 2006)

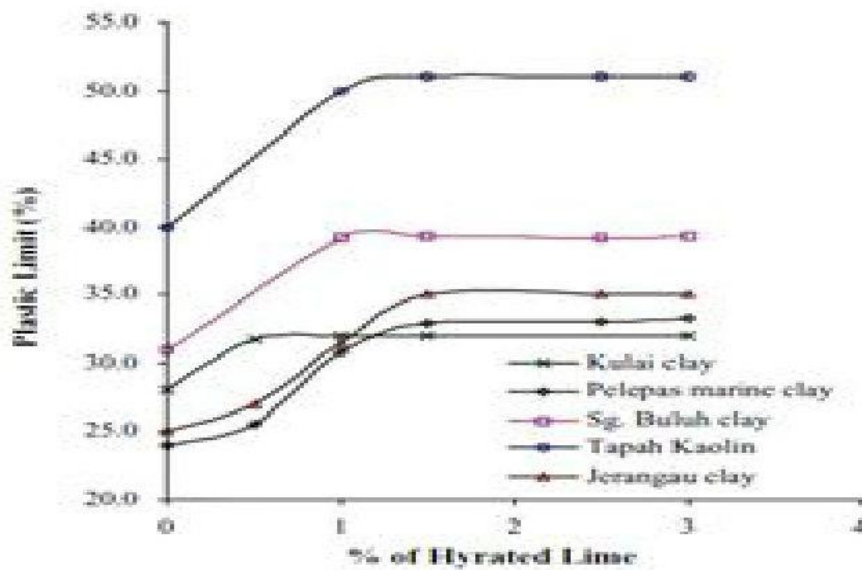


Figure 1-17 Effets de la Chaux sur les limites de Consistance (K.A.KASSIM, et K.K. CHERN 2004)

### I.3.3.2 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 Kaolin

tiques 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 autours 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).

### **I.3.3 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.

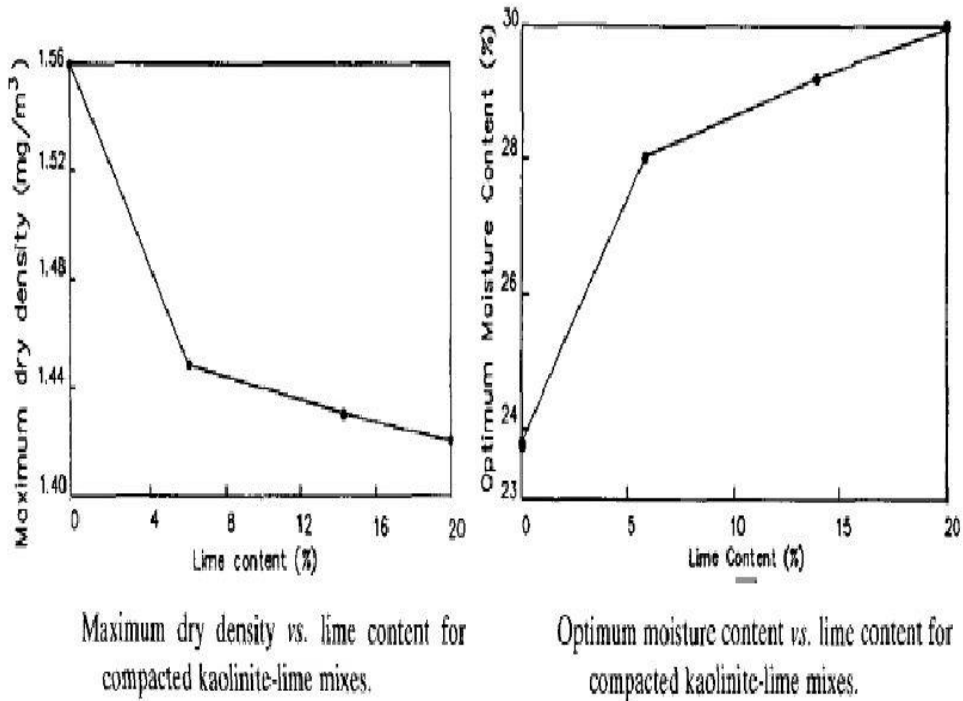


Figure 1-18 Effets de la Chaux sur le Compactage (S.WILD 1993)

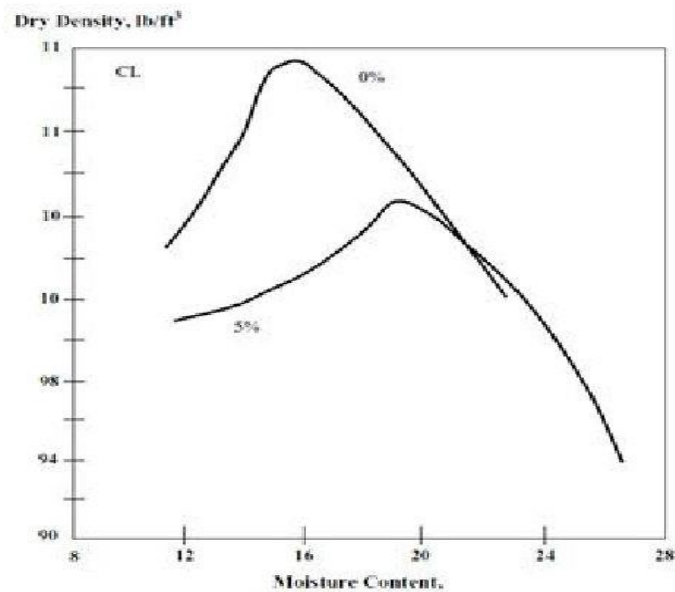


Figure 1-19 Effets de la Chaux sur le Compactage (LITTLE, 1995)

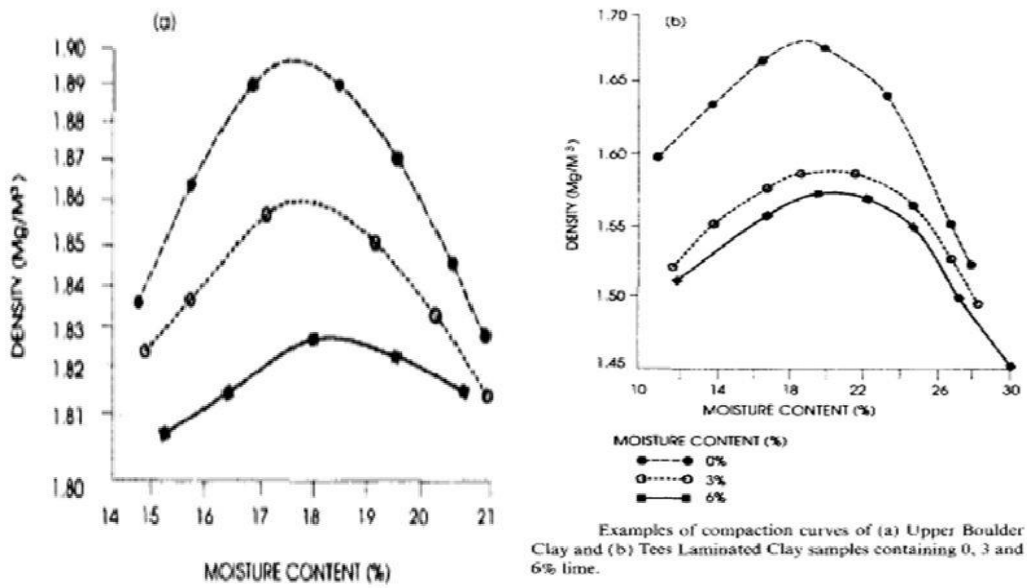


Figure 1-20 Effets de la Chaux sur le Compactage (F.G. BELL et col.1989 et 1996)

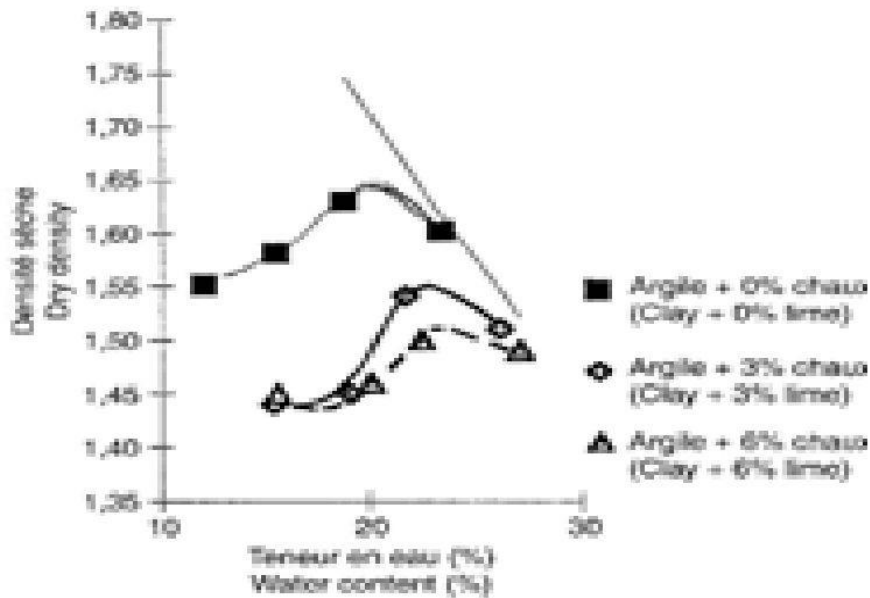


Figure 1-21 Effets de la Chaux sur le Compactage (M.AFES G DIDLER 2000)

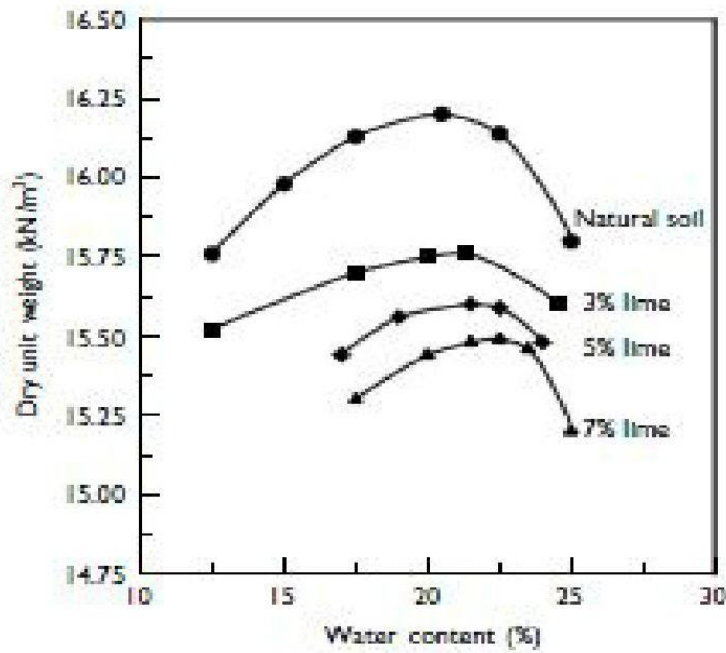


Figure 1-22 Effets de la Chaux sur le Compactage (Z. NALBANTOGLU 2006)

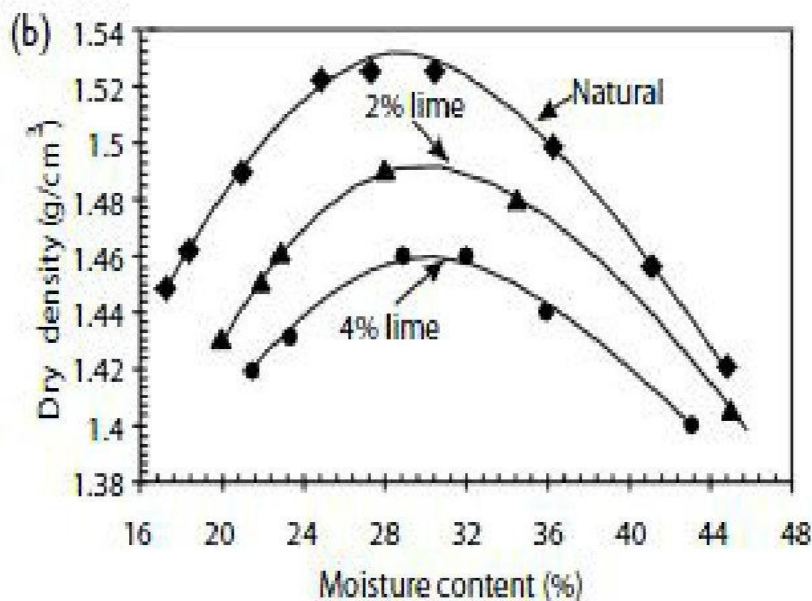


Figure 1-23 Effets de la Chaux sur le Compactage (M.C.TONNOZ et al 2006)

### I.3.3.4 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 kaolin tique 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).

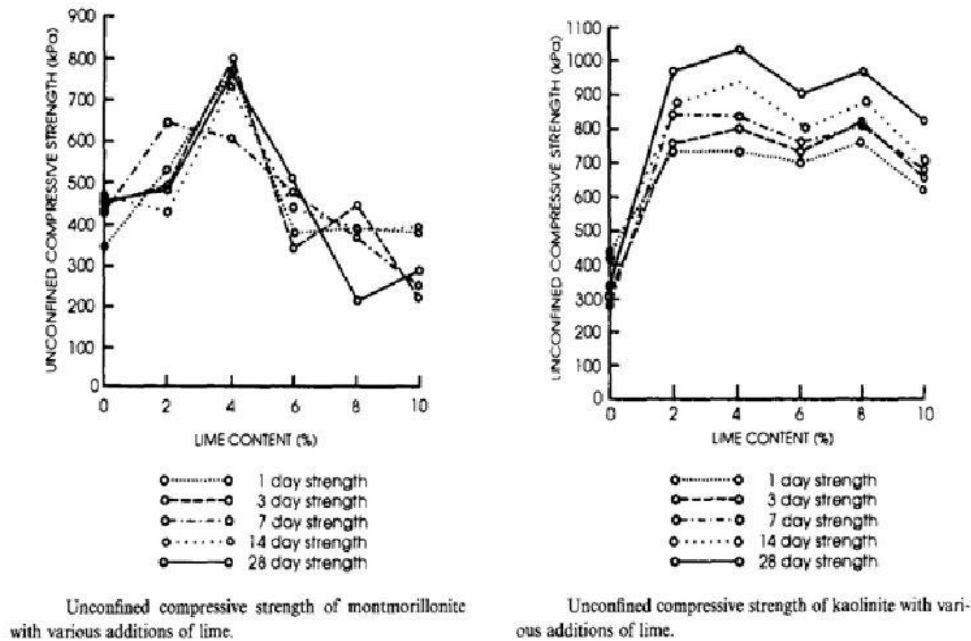
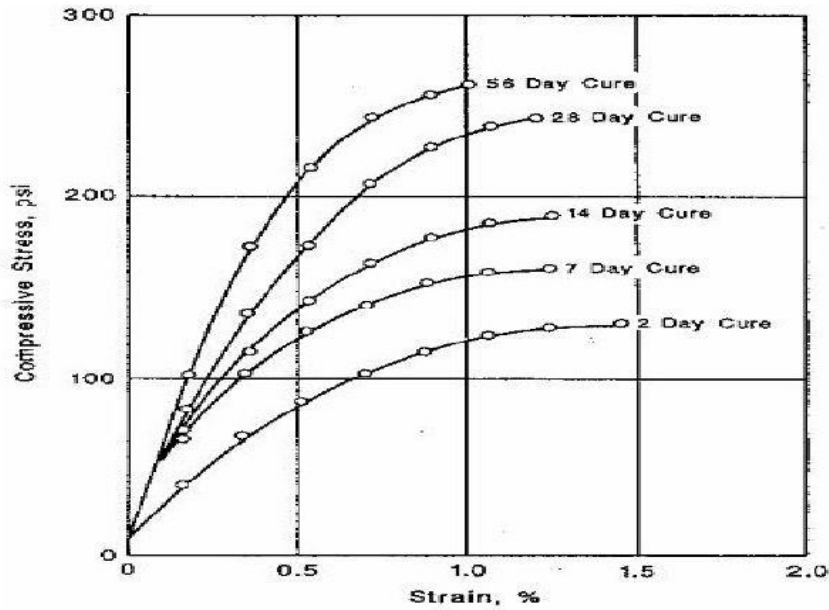
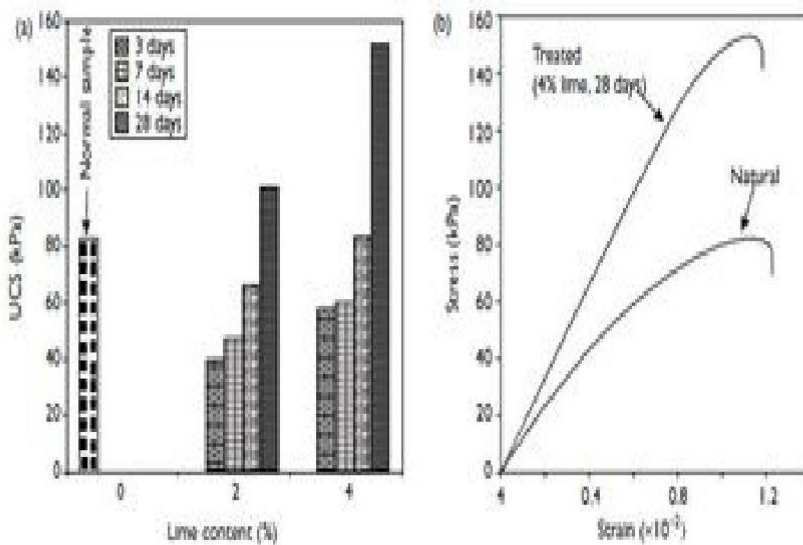


Figure 1-24 Effets de la Chaux sur la Résistance (F.G. Bell. (1989 et 1996),



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

Figure 1-25 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 1-26 Effets de la Chaux sur la Résistance (M.C.TONNOZ et al, 2006)

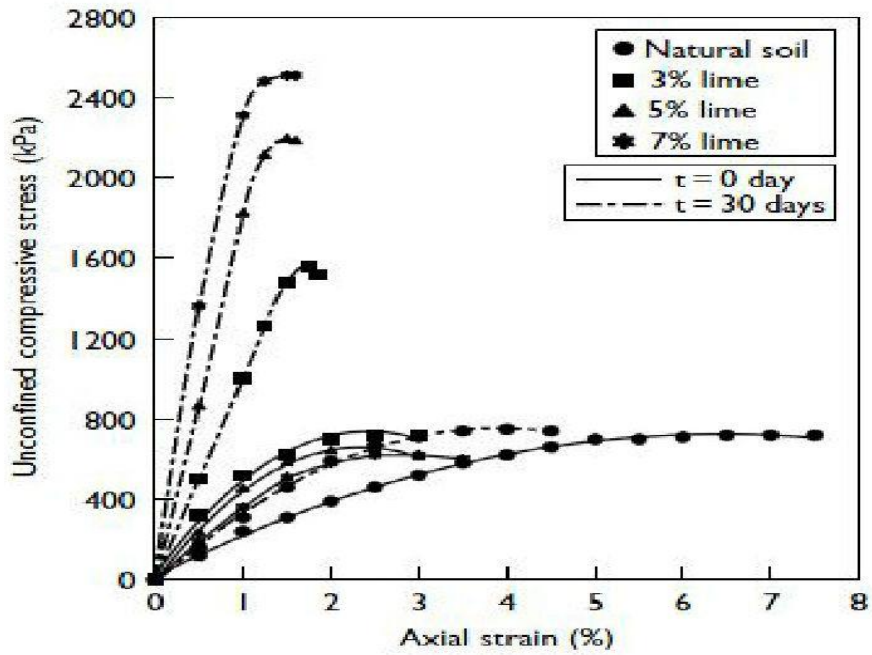
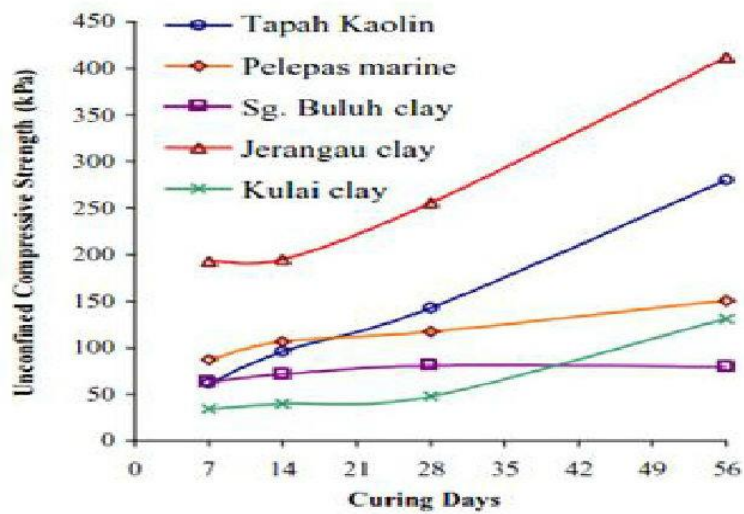


Figure 1-27 Effets de la Chaux sur la Résistance (Z. NALBANTOGLU, 2006)



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

Figure 1-28 Effets de la Chaux sur la Résistance (K.A.KASSIM et K.K.CHERN, 2004)

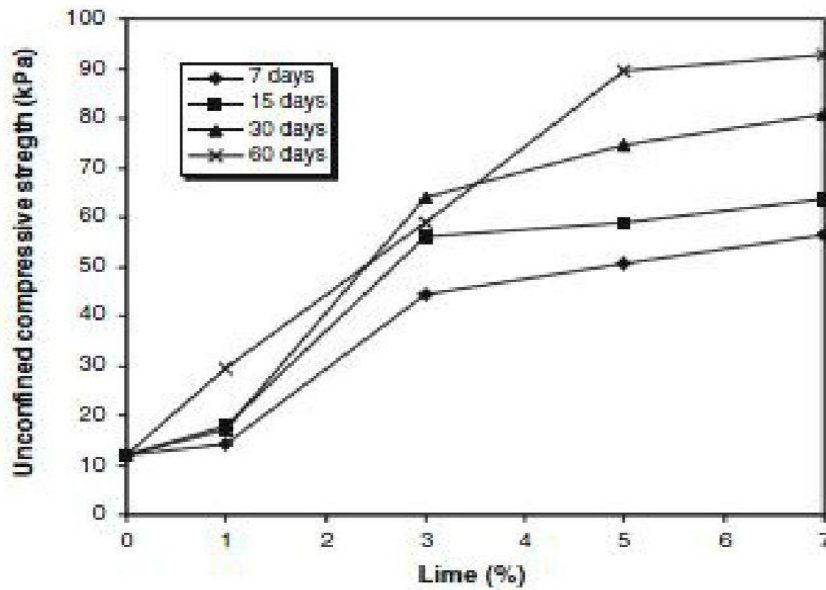


Figure 1-29 Effets de la Chaux sur la Résistance (MOHAMED.A et col, 2009)

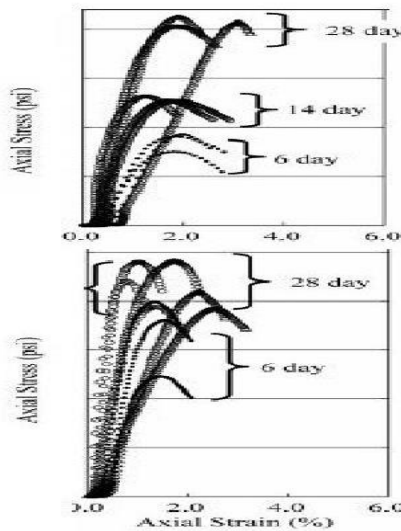


Figure 1-30 Effets de la Chaux sur la Résistance (MICHAEL A. MOONEYET et NATHAN M. TOOHEY, 2010)

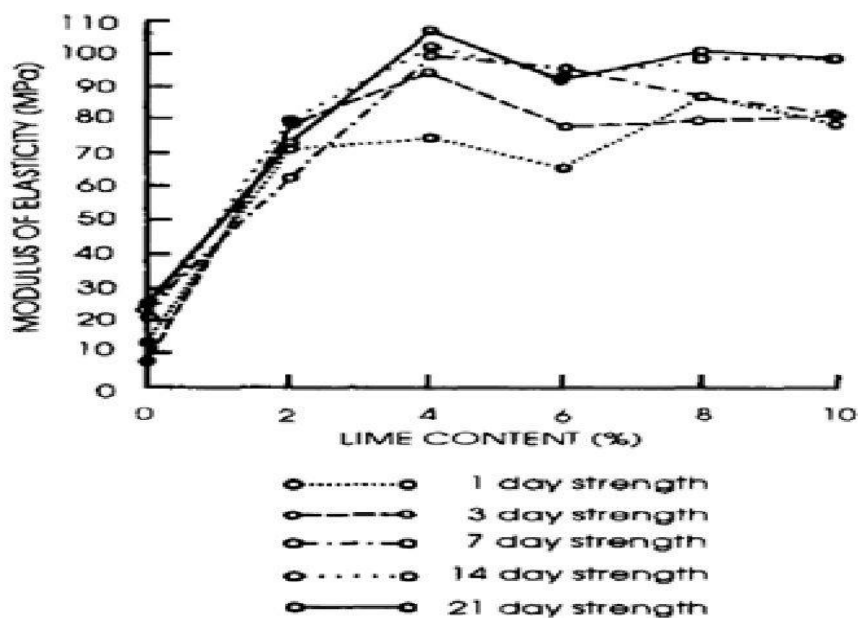
### I.3.3.5 Effets du traitement des sols à la chaux sur Le module d'élasticité

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/m<sup>2</sup>, après traitement à la chaux et après les périodes mentionnées, respectivement à

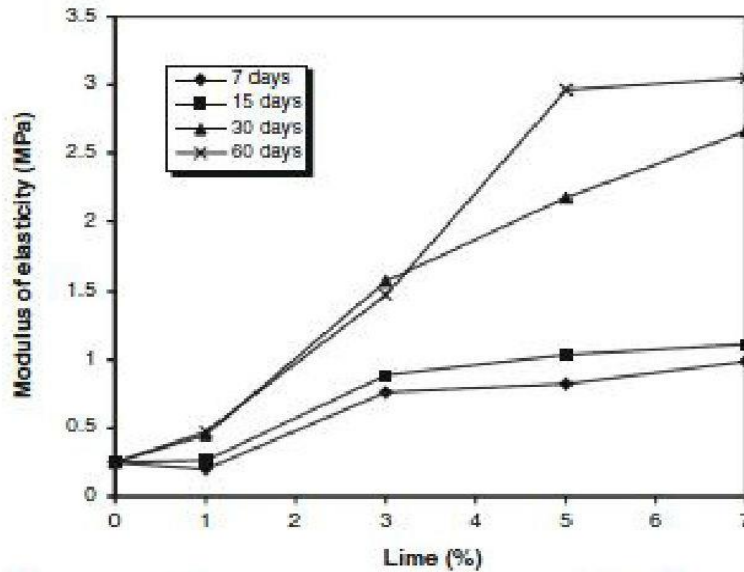


4,4MN/m<sup>2</sup> et 10,8MN/m<sup>2</sup>. Plus encore, l'accroissement de ce module augmente avec la température de cure Al Rawi, (1981), un petit ajout de chaux seulement est suffisant pour rendre le comportement du sol friable.

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 1-31** 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 1-32 Effets de la Chaux sur les Modules d'Elasticités

## I.4 Influence de l'ajout d'un correcteur granulométrique sur les Propriétés des sédiments traités aux liants hydrauliques

### I.4.1. Introduction :

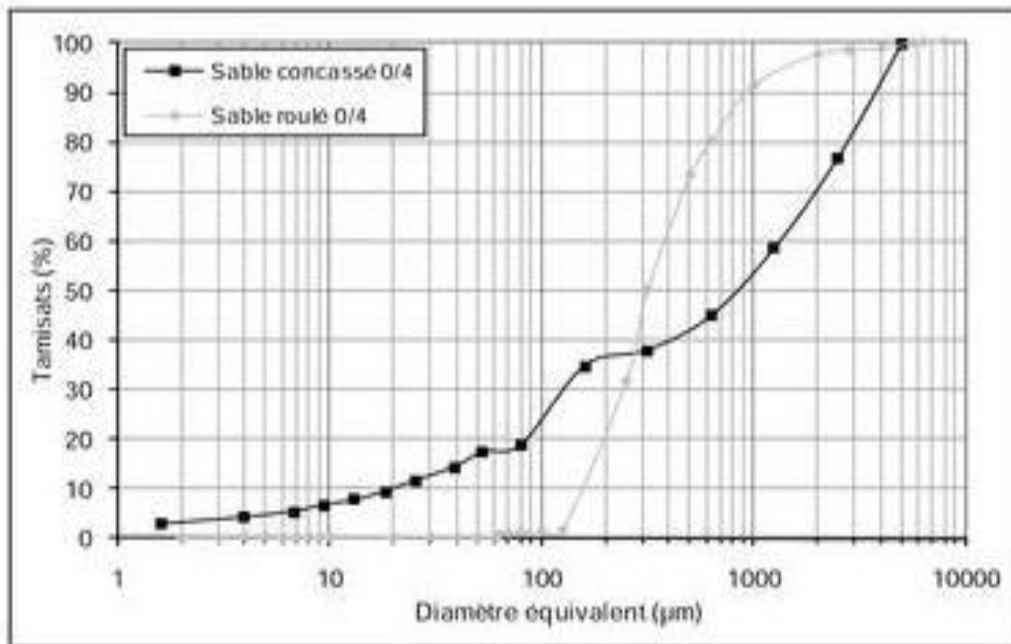
Au cours des deux dernières décennies, les autorités portuaires ont pris conscience que la gestion des matériaux de dragage d'entretien et/ou d'aménagement nécessite des solutions alternatives aux solutions traditionnelles de mise en dépôt à terre ou en mer. En effet ces dernières montrent leurs limites face à l'évolution de réglementations environnementales. Les recherches menées en France (BOUTOUIL, 1998 ; REY, 1999 ; COLIN, 2003 ; DUBOIS, 2006 ; REKIK, 2007 ; DUAN, 2008) s'orientent de plus en plus vers la valorisation par utilisation des matériaux de dragage en application génie civil et vers l'intégration de la valorisation directement dans les projets de gestion des sédiments dragage (DAMIDOT et al. 2006 ; GROSDÉMANGE et al. 2008). Actuellement, parmi les techniques de valorisation diverses, la technique de solidification/stabilisation à base de liants hydrauliques possède une application potentielle reconnue, notamment grâce à la perspective de réutilisation des matériaux traités. Ses objectifs fondamentaux sont de réduire l'impact chimique négatif d'un déchet sur l'environnement tout en assurant l'obtention d'un produit ayant une intégrité structurelle (BOUTOUIL & LEVACHER, 2000). Cependant, l'application de ce type de traitement sur des sédiments fins, caractérisés par une importante surface spécifique, engendre dans le matériau solidifié une porosité élevée, supérieure à 50% (BOUTOUIL &

LEVACHER, 2001 ; REKIK & BOUTOUIL, 2009). La résistance mécanique à long terme reste ainsi relativement faible. Les études récentes sur la valorisation des sédiments de dragage incluent la possibilité d'utiliser un correcteur granulométrique (COLIN, 2003 ; SANNIER, 2008) en complément du traitement aux liants hydrauliques. Cet apport consiste à améliorer le squelette granulaire du matériau solidifié, répondant à une meilleure répartition granulométrique et permet de réduire les vides pour obtenir une compressibilité plus faible et une résistance mécanique plus élevée. Il atténue les paramètres de nature tels que l'argilosité, la teneur en matière organique (M.O.) et la teneur en eau initiale et il influe sur la mise en œuvre du matériau (LEVACHER et al, 2006). Dans cette étude, le traitement à base de ciment CEMII/B-M (S-LL) 32.5 R et de différents sables est appliqué selon différentes formulations à un sédiment fin non contaminé du port d'Ouistreham (Calvados, France). L'influence de l'ajout de sable en tant que correcteur granulométrique est étudiée à travers les résistances mécaniques et l'évolution de la microstructure (granulométrie et observations au microscope électronique à balayage (MEB))

#### **I.4.2. Matériaux et Méthodes d'essais**

Le sédiment de dragage du port d'Ouistreham est caractérisé par une granulométrie fine, avec 93% de passant à 80  $\mu\text{m}$  (XP P 94-041) dont 25% d'argiles (NF P 94-057). La valeur au bleu (NF P 94-068) atteint 3,5 g pour 100 g de sédiment sec. La teneur initiale en matières organiques, non modifiée au cours de l'étude, est de 7% (XP P 94- 047). La teneur en eau du sédiment à l'extraction était de 127% (NF P 94-050). Après trois années de stockage et de manipulations successives des bidons hermétiques (i.e. ouvertures et fermetures pour prélèvement de sédiment), la teneur en eau atteint 90% au moment de la réalisation de l'étude. Cette valeur est retenue comme étant la teneur en eau initiale du sédiment avant traitement, sans abaissement préalable. Le liant hydraulique utilisé pour la technique de solidification / stabilisation est un ciment CEMII/B-M (S-LL) 32.5 R caractérisé par une classe vraie à 28 jours de 46,2 MP. Le dosage retenu, fixé à 10% par rapport à la masse humide initiale du Sédiment, est pris en référence à l'étude de REKIK (2007). L'équivalent du dosage en ciment par rapport à la masse sèche du sédiment est de 19%. Les valeurs de teneur en eau et de masse volumique sèche à l'optimum Proctor du sédiment traité sont respectivement de 38% et 1,11 t/m<sup>3</sup> (REKIK, 2007). Les effets de deux correcteurs granulométriques distincts sont recherchés pour des apports de 35, 40 et 45% par rapport à la masse des constituants secs, sédiment et ciment. Ces trois dosages sont intermédiaires aux dosages de 30 et 50% sélectionnés par COLIN (2003).

Le premier est un sable roulé siliceux de granularité 0/4 mm, le second, un grès feldspathique rouge concassé de classe 0/4. Ils diffèrent par leur nature, concassée et roulée, leur minéralogie et leur répartition granulométrique (voir figure 1). Le sable roulé est caractérisé par un coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) de 2,47 et par coefficient de courbure ( $C_c$ ) de 0,95, caractéristiques d'un sable mal gradué. Son module de finesse (MF) est de 2,1. Le sable concassé présente un  $C_u$  de 50 et un  $C_c$  de 0,78, caractéristiques d'un sable bien gradué. Son MF est de 3,2. Ainsi, la courbe granulométrique du sable concassé s'étale sur un plus large spectre que celle du sable roulé.



**Figure 1.33** Courbes granulométriques des sables correcteurs utilisés.

Les éprouvettes cylindriques 5×10 cm et 5×5 cm de matériau composite sont confectionnées à partir d'un mélange réalisé en incorporant successivement au sédiment, à sa teneur en eau initiale, le correcteur granulométrique puis le liant.

Les dimensions correspondent aux prescriptions du Guide technique de Traitement des Sols (GTS) (SETRA-LCPC, 2000).

Les calculs sont effectués pour s'approcher de la masse volumique sèche optimale de 1,11 t m<sup>-3</sup> déterminée par REKIK (2007) sur le sédiment traité avec 10% de ciment. Cependant l'utilisation du sédiment à sa teneur en eau initiale, sans déshydratation préalable, empêche d'atteindre cet optimum. Les éprouvettes sont compactées manuellement en trois couches par une succession de 25 coups sur la paillasse d'essai pour atteindre les hauteurs de 5 ou 10 cm requises. Trois éprouvettes sont confectionnées pour chaque formulation relative à chaque

dosage de l'apport en sable. Elles sont conservées dans les conditions d'une cure normale, en moule hermétique à une température de  $20 \pm 2$  °C, ou à l'air libre, et sont testées à 7 et 28 jours. Dans cette étude, sont présentés les résultats de caractérisation mécanique du matériau solidifié en compression simple (NF P98-232-1) et en compression diamétrale (NF P98-232-3) à une échéance de 28 jours. Les analyses microstructurales (analyse granulométrique NF P94-056, Sédimentométrie NF P94-057 et observations au MEB de type JEOL JSM 5300 LV en mode "électrons secondaires") ont été effectuées sur des échantillons issus d'éprouvettes soumises aux essais de résistance puis séchés à l'étuve à 50 °C.

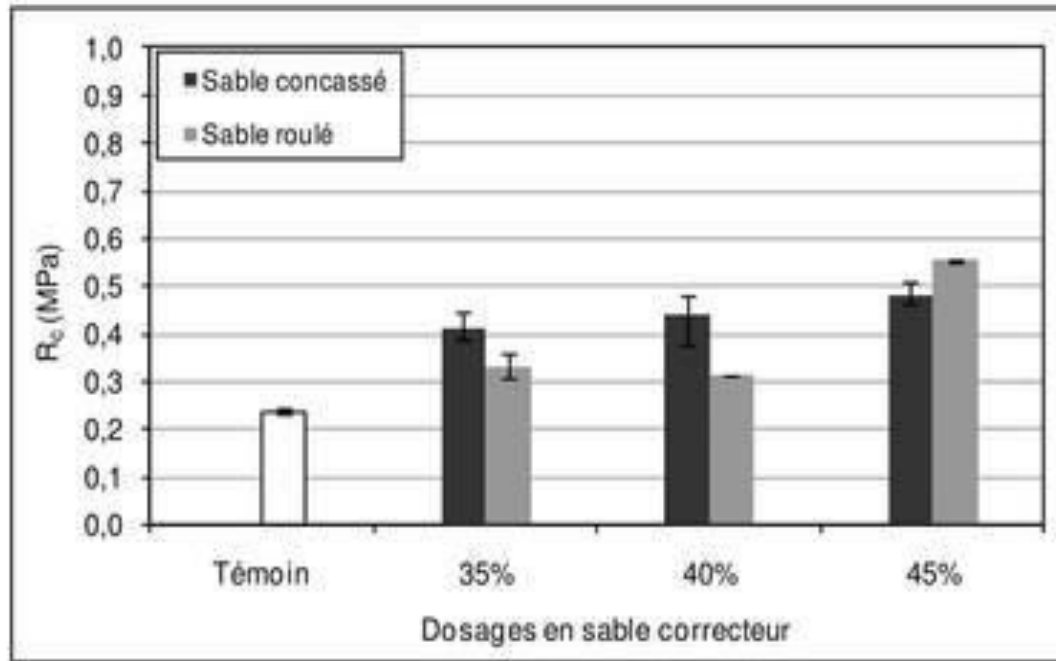
### **I.4.3. Résultats et analyses**

#### **I.4.3.1 Résistances mécaniques**

##### **I.4.3.1.1 Influence du dosage en sable correcteur**

Les essais de résistance à la compression simple ( $R_c$ ) réalisés à différentes échéances permettent de suivre la solidification du matériau traité. Les résultats des essais à 28 jours sur des éprouvettes conservées en cure normale sont présentés sur la figure 2. Dans l'optique d'une valorisation en construction routière, le GTS (SETRA-LCPC, 2000) préconise une valeur de  $R_c$  de 1 MP.

L'ajout de sable en tant que correcteur granulométrique permet d'améliorer la résistance à la compression simple. Quel que soit le type de sable, la résistance augmente par rapport à celle du sédiment traité sans apport i.e. échantillon témoin. Un ajout de sable dans l'intervalle des dosages étudiés conduit à un accroissement des performances. Pour un dosage de 45%, on observe un doublement de celles-ci.

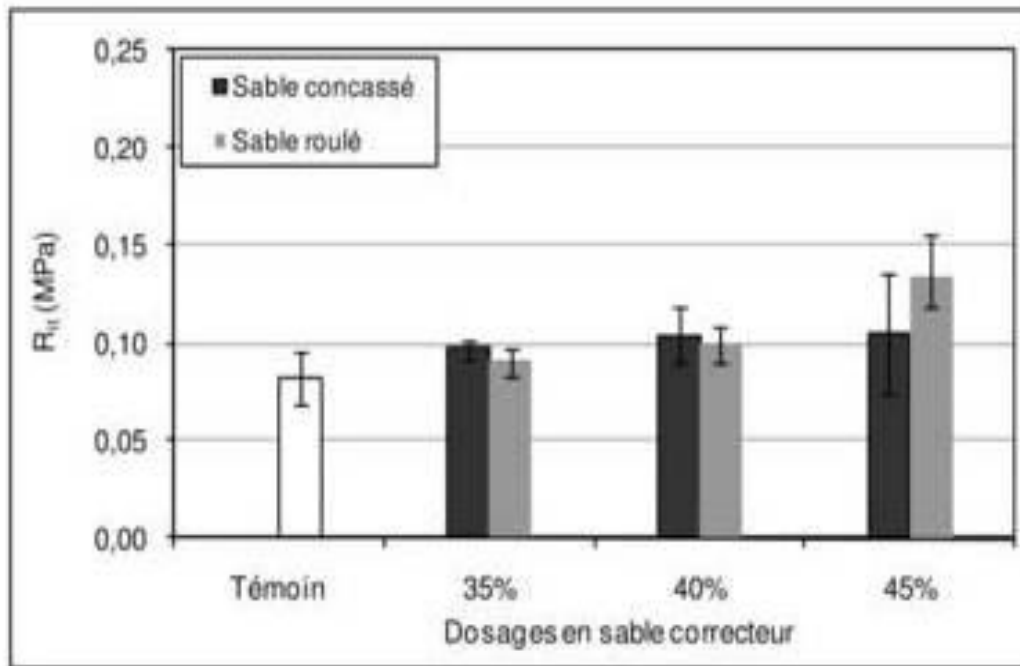


**Figure 1.34** Résistances à la compression simple à 28 jours (moyennes et écarts-type) du Sédiment traité avec 10% de ciment, sans et avec 35, 40 et 45% de sable correcteur, Conservé en cure normale.

Le matériau intégrant le sable concassé développe des résistances voisines sur l'intervalle des dosages étudiés. La valeur moyenne des  $R_c$  obtenues est de 0,44 MP. Pour l'intervalle considéré, il existe une légère augmentation des performances avec l'augmentation du dosage en sable correcteur.

Le matériau à base de sable roulé conduit à une valeur de  $R_c$  moyenne de 0,32 MP pour les deux premiers dosages. Pour le dosage de 45%, on obtient une valeur nettement plus élevée, de 0,55 MP.

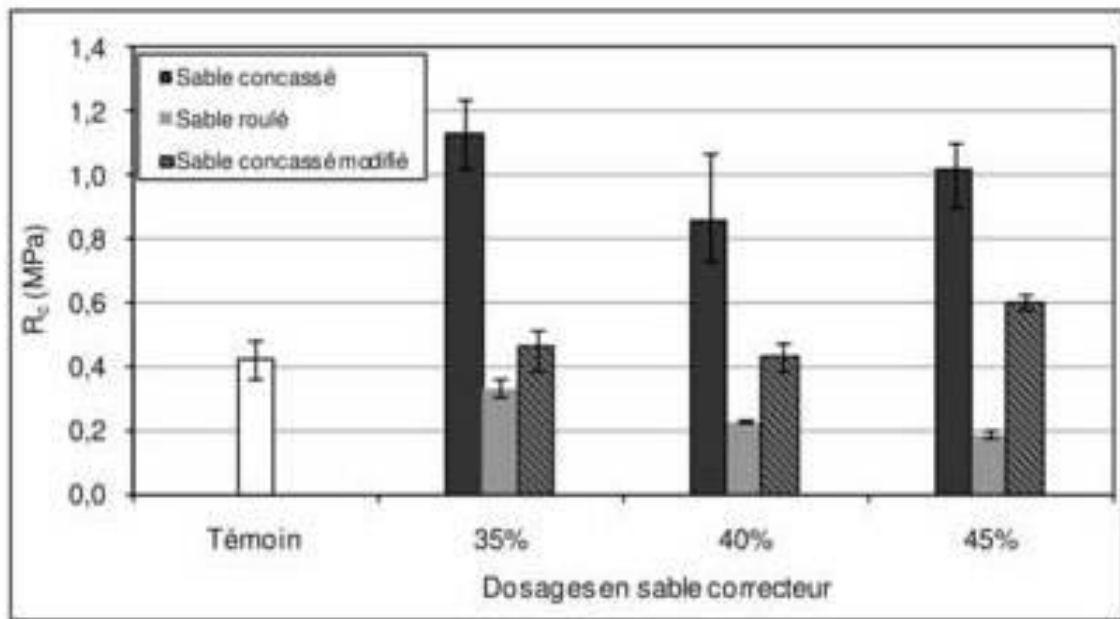
Les résultats des essais de résistance à la compression diamétrale  $R_{TBF}$ , réalisés à 28 jours sur des éprouvettes conservées en cure normale, sont donnés à la figure 3. Ils viennent confirmer que l'apport d'un sable correcteur permet d'améliorer sensiblement les performances mécaniques du sédiment traité. A 28 jours, quel que soit le dosage en sable correcteur, la valeur moyenne des  $R_{TBF}$  est de 0,10 MP. Sans apport elle n'est que de 0,08 MP. Pour un matériau à base de sable roulé dosé à 45%, la  $R_{TBF}$  atteint 0,14 MP, valeur la plus élevée. L'exigence fixée par le GTS (SETRA-LCPC, 2000) pour une réutilisation du matériau en couche de forme est une valeur de  $R_{TBF}$  de 0,25 MP.



**Figure 1.35** Résistances à la compression diamétrale à 28 jours (moyennes et écarts-type) du sédiment traité avec 10% de ciment, sans et avec 35, 40 et 45% de Sable correcteur, conservé en cure normale.

#### I.4.3.1.2 Influence de la nature granulométrique du correcteur

Les résultats des essais de résistance à la compression simple, exposés à la figure 2, montrent que les performances développées sont moindres qu'avec l'apport de grès concassé. Pour évaluer l'influence de la nature et de la répartition granulométrique des sables correcteurs sur les résistances à la compression simple, un troisième sable correcteur est proposé. Il s'agit du même sable concassé, modifié pour avoir la même granulométrie que celle du sable roulé donc le même  $C_u$ . Les résultats obtenus en compression simple après ajout de ce sable correcteur modifié au sédiment traité sont présentés sur la figure 4. Dans ce cas, les éprouvettes ont été conservées à l'air libre durant 28 jours avant d'être testées. L'évolution apportée par un ajout de sable concassé modifié au sédiment d'Ouistreham est marquée par une amélioration des résistances à la compression simple par rapport au témoin sans sable correcteur.



**Figure 1.36** Résistances à la compression simple à 28 jours (moyennes et écarts-type) du Sédiment traité avec 10% de ciment, sans et avec 35, 40 et 45% de sable correcteur, Conservé à l'air libre.

Ces performances sont aussi améliorées par rapport à celles du sédiment traité avec le sable roulé. La nature du sable est donc un facteur d'influence : le sable concassé favorise le développement des résistances mécaniques. Néanmoins cette amélioration demeure plus faible que celle apportée par le sable concassé dans sa granulométrie originelle. Il est ainsi démontré que la répartition granulométrique du sable roulé n'est pas la plus favorable au développement des résistances mécaniques au sein du matériau solidifié. L'incorporation d'un sable correcteur de granulométrie serrée au mélange conduirait à un empilement moins dense qu'avec un sable correcteur de granulométrie étalée.

La dispersion des mesures pour un matériau solidifié intégrant le sable concassé dans sa granulométrie initiale ne permet pas de conclure à un dosage préférentiel. Cette observation est valable quel que soit le mode de cure (voir les figures 2 et 4). Les incertitudes mesurées s'expliquent par une prise d'échantillon aléatoire qui ne garantit pas nécessairement la représentation de la totalité du spectre granulaire.

#### **I.4.4. Conclusions et perspectives**

Le sable correcteur participe au renforcement de la structure et améliore les performances mécaniques du matériau solidifié. En effet sa présence permet de doubler les résistances à la compression simple et d'améliorer les résistances à la compression diamétrale de 10%, quel



que soient sa nature granulométrique et son dosage. Les formulations les plus performantes sont constituées avec 45% de correcteur. Il existe une répartition granulométrique optimale du correcteur employé permettant de renforcer de manière efficace le squelette granulaire. Il semble qu'un granulats à Cu élevé, bien gradué, apporte de meilleures résistances.

A 28 jours, dans des conditions de cure normale, l'analyse granulométrique des matériaux solidifiés intégrant 45% de sable correcteur montre une répartition plus grossière sans distinction du type de sable. L'analyse microstructurale au MEB vient confirmer cette tendance en révélant la présence de CSH autour des particules constituant le matériau. La nature du sable correcteur, sa forme ainsi que sa distribution granulométrique sont des facteurs d'influence du développement des performances mécaniques du matériau solidifié qu'il convient de prendre en compte.

Afin de diminuer les fractions perturbatrices (M.O. et argiles en particulier) et leurs effets et d'optimiser les performances mécaniques, il pourrait être intéressant de procéder à l'incorporation de correcteurs granulométriques moins organiques, plus grossiers et avec une répartition granulométrique plus large.

La présente étude a été menée de façon empirique. Elle se base sur des mesures expérimentales suivies d'observations. Les études futures nécessiteraient le recours à des méthodes de mélange plus scientifiques et plus pertinentes, avec une correction du fuseau granulométrique maîtrisée, répondant à des modèles d'empilement contrôlés.

La correction peut alors être menée via l'utilisation de matériaux nobles ou de matériaux considérés actuellement comme des déchets dans un objectif de double valorisation.

## **I.5 CHOIX DU STABILISANT Á RETENIR**

Les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des grains fins du sol ainsi que son granulométrie influencent l'interaction sol-ajout. D'où la sélection du stabilisant doit être basée sur l'efficacité que va offrir pour améliorer les propriétés physico-chimiques du sol sélectionné. La sélection préliminaire de l'ajout approprié pour la stabilisation des sols devrait prendre en considération :

- Consistance et granulométrie du sol.
- Composition et minéralogie du sol.
- Caractéristiques techniques requise.
- But du traitement.
- Mécanismes de stabilisation.

- Conditions environnementales et économiques de l'ingénierie.

Egalement il ya lieu de tenir compte de :

- ✚ La disponibilité des produits de stabilisation à proximité des lieux des travaux.
- ✚ L'historique de la performance et la compatibilité des stabilisants au type de sol objet de l'étude.
- ✚ Le cout des produits de stabilisation livrés au site.

Etant donné que notre projet a un objectif purement pédagogique, qui consiste à l'étude des possibilités de stabilisation d'un sol fins (sédiment d'un barrage) avec l'ajout d'un sous produit (la chaux) déjà prédéfini, les dits critères ne peuvent être pris en considération.

## I. 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 de sédiments de barrage chlef a été identifiée par des analyses chimique, puis caractérisée physiquement au laboratoire en déterminants la granulométrie, les limites d'Atterberg.les essais Proctor ainsi les essais de compression simple ont été conduits pour la caractérisation mécanique. Le deuxième matériau analysé a été la chaux dont la composition chimique a été obtenue de l'usine de provenance Le troisième matériau est le sable, qui est défini comme déterminant de la taille des particules et l'équivalent du sable.les différents méthodes concernant chacun des essais utilisés sont aussi décrites et données à la fin du présent chapitre.

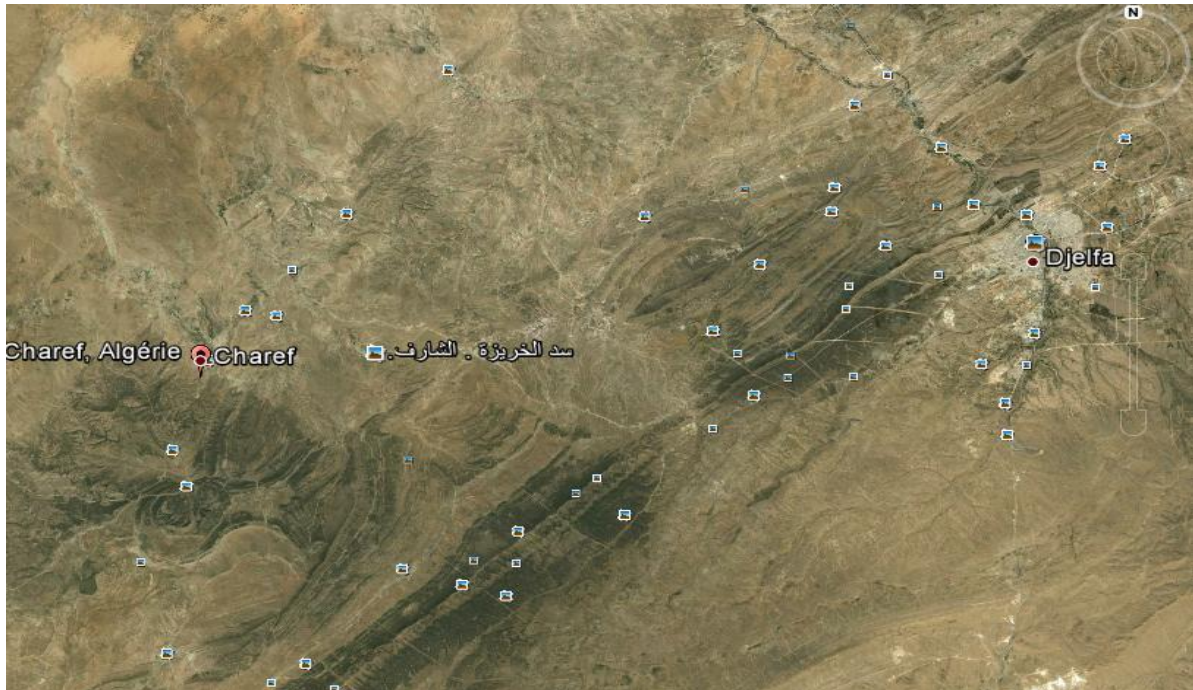
## II.1 Les Matériaux utilisés

### II.1.1La vase :

La provenance de la vase est des sédiments du barrage de Charef situé à 43 km à l'ouest de la ville de Djelfa.



**Figure. II.1**– image capturée à partir du site du barrage



**Figure. II-2 :** Image du barrage capturé par le programme Google Earth

### II.1.1.1 Analyse chimique

Cette analyse a porté sur la détermination de la nature chimique de la vase à étudier. Dans ce cadre, une analyse chimique a été réalisée par laboratoire de l'habitat et de la construction LHC sud Djelfa(LNHC), les résultats sont résumés dans le tableau **II.1** suivant :

Designations	Symbol	(%) en pods
Teneur en carbonate de calcium	Caco3	18,04
Chlorides(method de foolhardy)	Cal	0.50
Sulfates soluble l' acid	SO-4	Traces

**Tableau. II.1–** Composition chimique de la vase.

### Mesure de PH

Après la mesure du PH notre échantillon, on trouve que : PH=9.5 (basique)

### II.1.1.2.caractéristiques physiques

#### Teneur en matière organique

La teneur en matière organique a été obtenue par la méthode d'incération détaillée par la norme NF P 94-055 le taux de matière organique obtenu pour l'argile est de 2,75 %.

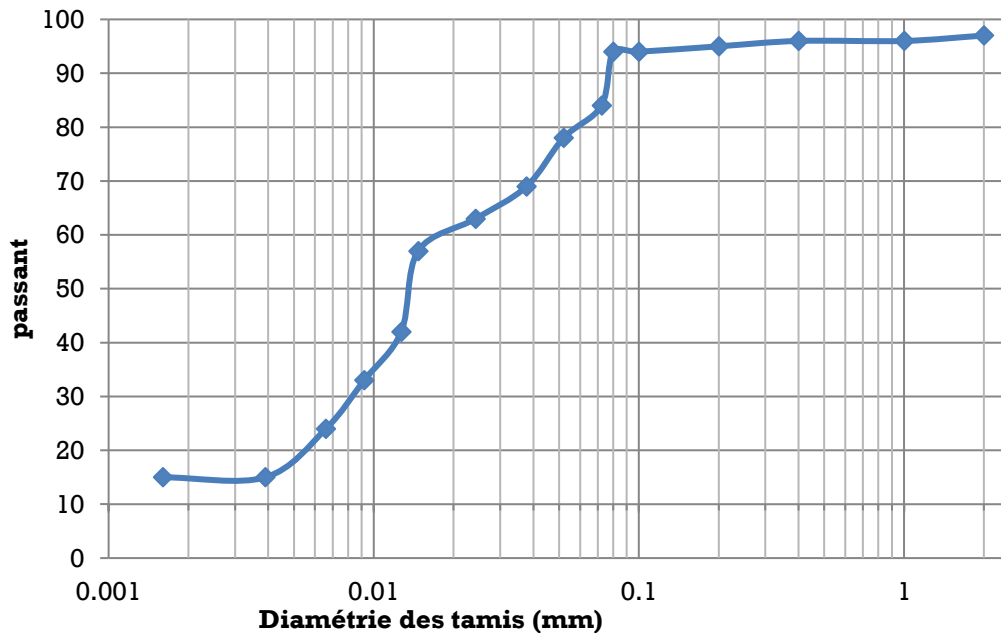
**La Densité relative**

La densité relative utilisée dans toutes les expériences est de :  $G_s=2.75$

**Analyse granulométrique**

D'après l'essai analyse granulométrique le sol contient 18% de sable, 69% de limon et 13% d'argile.

Le pourcentage des fines passant par le tamis (80 $\mu$ m) est environ de 97%.



**Figure II.3** : courbe granulométrique du sol étudié

**Limites d'Atterberg**

Les essais permettant la détermination des limites d'Atterberg ont été réalisés conformément à la norme **NF P 94-051**. Ils sont effectués sur la fraction inférieure à 400  $\mu$ m du sol étudié. La limite de liquidité (WL) est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales (N, W) : est obtenue pour une valeur N égale à 25 coups exprimée en pourcentage (%). Les résultats des essais de la limite de liquidité pour trois éprouvettes de l'argile de sédiments de barrage charef sont présentés sur la Figure II-4. La courbe obtenue montre une limite de liquidité de 34,5%. La limite de plasticité est la moyenne arithmétique des trois valeurs obtenues de trois essais effectués, la valeur de cette limite est égale à 24,1%. L'indice de plasticité a été calculé par la formule  $I_p = W_L - W_p$ . La valeur calculée est de 10,4%. Le Tableau II-2 résume les résultats des limites de consistance de l'Argile.

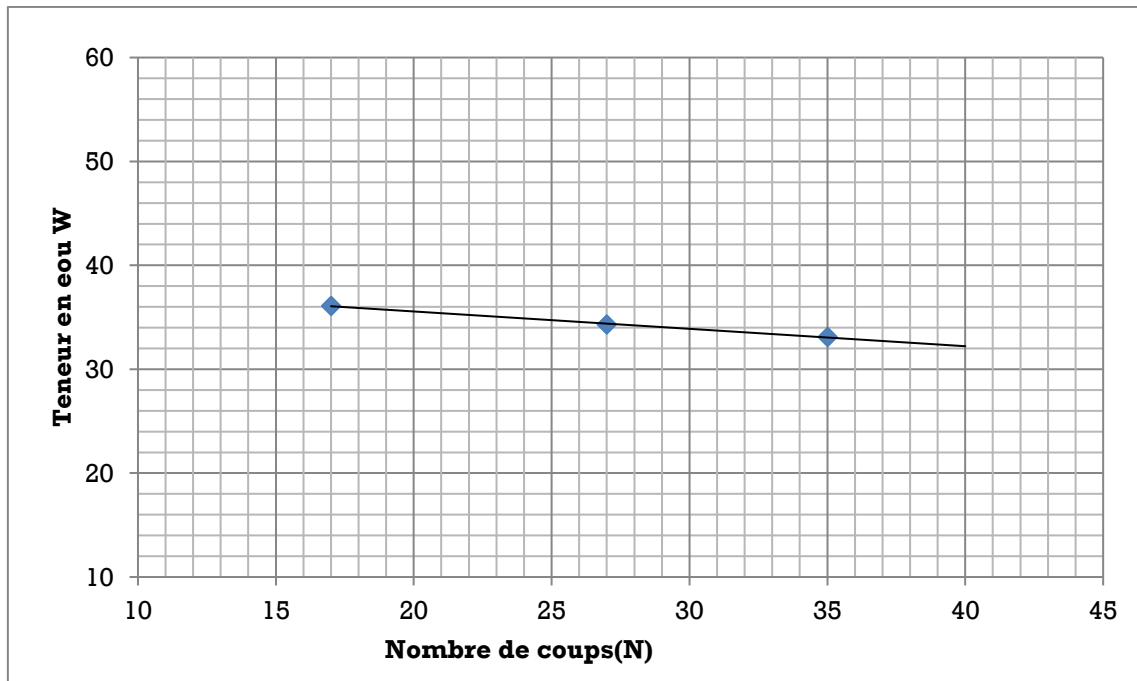


Figure II.4 : Limite de Liquidité pour l'Argile non traité

Limite d'Atterberg	Valeur (%)
Limited de Liquidité $w_L$	34,5
<b>Limite de plasticité <math>w_P</math></b>	24,1
L'indice de plasticité $I_P$	10,4

Tableau II-2:Récapitulation des résultats d'essais de limites d'Atterberg

### Classification du sol

La classification du sol de sédiments a été faite selon la classification internationale USCS.

L'analyse granulométrique montre que le sol nommé la vase est un *sol à grains fins* puisque plus de 50% en poids de l'échantillon étudié dans l'essai de l'analyse granulométrique passe à travers le tamis (80 $\mu$ m). Le diagramme de Casagrande donne comme désignation à la vase dont la limite de liquidité 34.5% inférieur à 50% et l'indice de plasticité 10.4%, le symbole **ML** correspondant à *une argile silteuses inorganique de faible plasticité*.

### II-1.1.3. 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 **NF P 94-093**.

La courbe Proctor pour l'argile de charef présentée sur la figure II. 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 10,13% correspondante à une masse volumique sèche maximale de 1740 kg/m<sup>3</sup>.

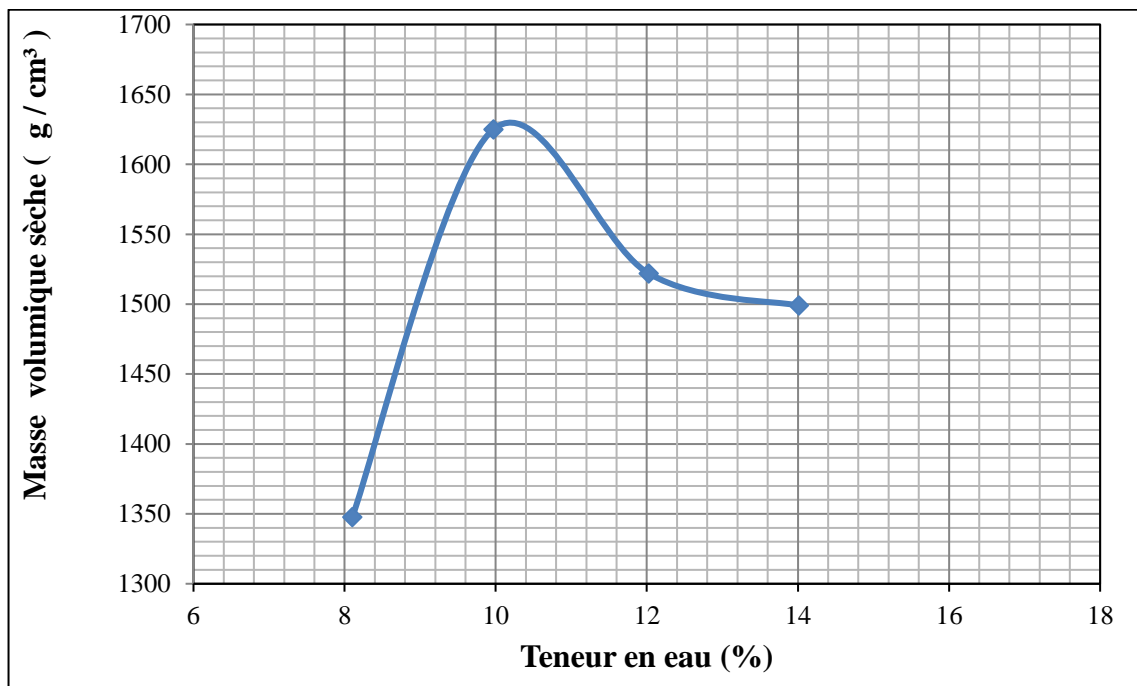


Figure II.5. Courbe de compactage pour l'Argile non traitée

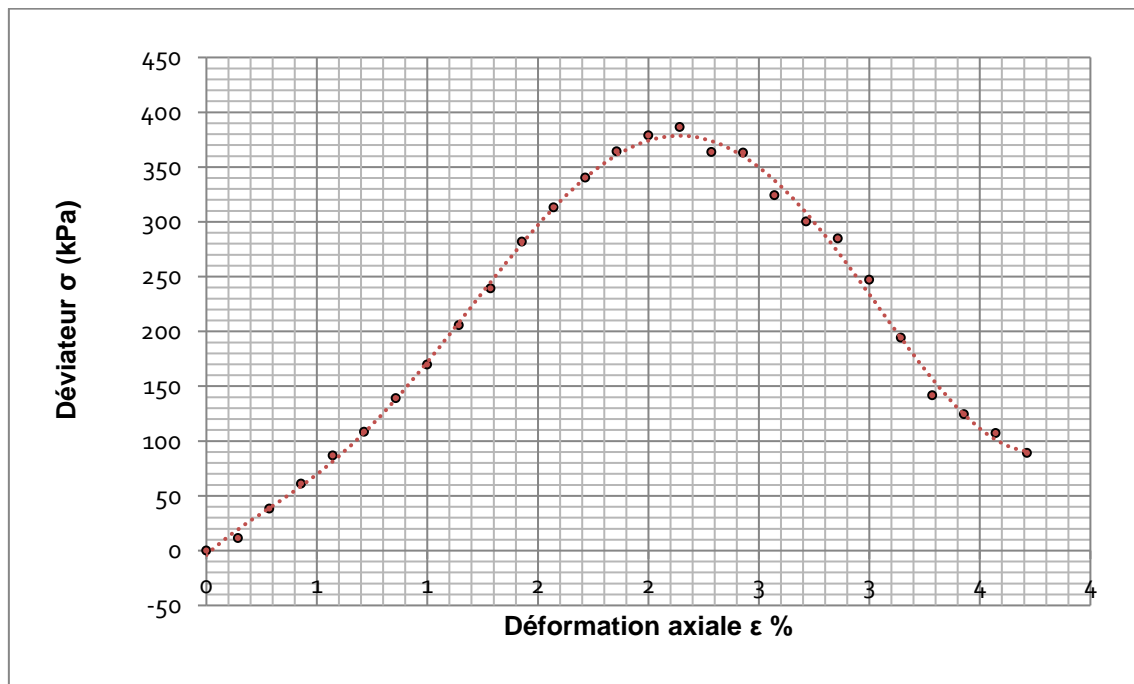
#### Essai de compression simple (UCST)

Les essais ont été réalisés suivant la norme **NF EN 13286-41** Méthode B. les éprouvettes sont retirées de sachets filmés et testées en compression simple sur une presse sous le nom « Techno test » 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.

La courbe de résistance à la compression simple de l'argile de charef est montrée sur la figure II.6. La rupture totale de l'éprouvette de sol a été observée pour un déviateur de 586.55 kPa et une déformation axiale principale majeure de 2,14 %. La compression simple et la cohésion non drainée obtenus permettent de classer l'argile comme étant une argile **tendre** (hard)



**Figure II.6** Essai de Compression Simple à 0 % de Chaux

### II.1.2.LA CHAUX

La chaux utilisée est une Chaux Hydratée  $\text{Ca(OH)}_2$  ramenée directement de l'usine de SAIDA située dans la région ouest de l'Algérie, livrée en sac. Ses Propriétés physico-chimiques ont été fournies par l'usine de fabrication (**Tableau. II.3**).



Caractéristiques de base	La fiche technique de Chaux
Appearance physique	Poudre blanche eschew
Humidity	> 5
FE2O3	< 2
Al2O3	< 1,5
MGO	< 0.5
SiO2	< 2.5
SO3	< 0.5
Na2O+K2O	< 0.47à0.5
CO2	< 5
CaCO3	< 10
Insoluble dans HCL	<1
Densité	600à900g/l
Poids spécifique	20g/cm <sup>3</sup>
Refus90 u	10%

**Tableau II.3**– Propriétés physico-chimiques de la chaux

### II.1.3. Sable

La provenance de sable roulé est de messâad à 70 km à la ville de Djelfa.

#### II.1.3. 1.Analyse chimique

Cette analyse a porté sur la détermination de la nature chimique de la vase à étudier. Dans ce cadre, une analyse chimique a été réalisée par laboratoire de l'habitat et de la construction LHC sud Djelfa(LNHC), les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Sondage ou puits	Profondeur (m)	Teneur en carbonate de calcium Caco3	Chlorures (méthode de Vollard) cl <sup>-</sup>	Sulfates soluble l' acid so <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Essai de pleur
ECH	01	5.75%	0.25%	Traces	0.1

**Tableau. II.4**– Résultats Exprimés en % et en poids

### II.1.3.2. Caractéristiques physiques

#### Analyses granulométrique

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

Les résultats sont exprimés sous forme d'une courbe granulométrique Figure II.7. L'essai a été effectué à LNHC de DJELFA. Le sable roulé utilisé est caractérisé par un coefficient d'uniformité (CU) de 2,54 et par coefficient de courbure (CC) de 1,08, caractéristiques d'un sable gradué. Son module de finesse (MF) est de 9,71.

- ✓ Le pourcentage des fines supérieur à 80 $\mu$ m est de 91.90%.
- ✓ La courbe granulométrie est étalée et continue.

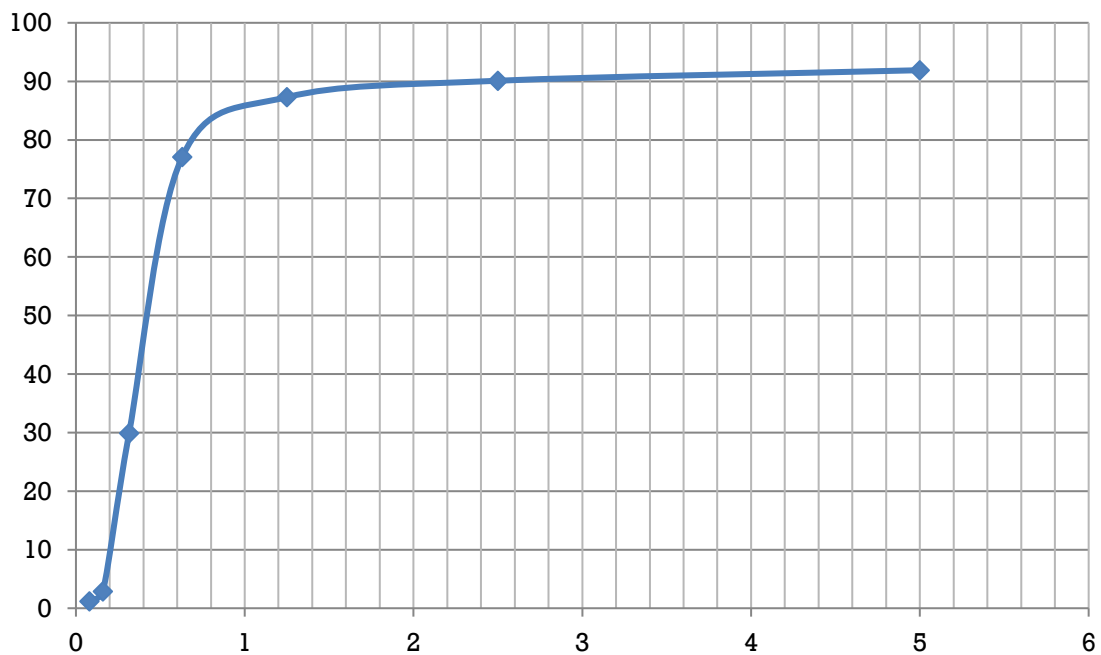


Figure II.7. Courbe granulométrique de sable

## II.2. Les Méthodes

### II.2.1. 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 D6276 a, cette méthode est basée sur l'essai de EADES et GRIM(1960) Figure II-8. A jouter 100 ml d'eau distillée de chaux pour chaque bouteille prenant les valeurs de 2, 4,6 et 8% 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-éoud 30secondes jusqu'à ce qu'ail n yati plus de traces du matériau sec sur le fond. Agiter la bouteille pendant 30 secondes toutes les 10 minutes pendant 1 heure. Mesure le PH avec un PH mètre équipé d'une électrode et l'étalonner chaque fois dans une solution tampon de PH 10. Notre le PH pour chacun des mélange de sol-chaux. Le plus faible pourcentage de choux qui donne un PH de 12.4 est le pourcentage exige pour stabiliser le sol. Si le PH ne dépasse pas 12,3,et deux taux de chaux donner 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 seulement 1 taux de chaux donne un PH de 12,3,il faudra prévoir des bouteilles additionnelles d'essais avec un plus grand pourcentage de chaux.



**Figure : II-8.** L'essai d'EADES et GRIM (1960)

## **II.2.2.Caractéristiques physiques**

### **Teneur en matière organique**

La teneur en matière organique a été obtenue par la méthode d'incération détaillée par la norme NF P 94-055, 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.

### **Essais granulométrique**

L'essai de granulométrie par tamisage se fait suivant la norme **NF P94-056** sur un échantillon de masse 500g de diamètre supérieur ou égal 80µm. 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 80µm on procède à l'essai de Sédimentométrie selon la norme **NF P94-057**.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 400µm d'au moins 200 g. Pour la limite de liquidité, on utilise l'appareil de Casa grande, 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, WL 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, WP 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.

### **II.2.3.Caractéristiques mécaniques**

#### **Préparation des mélanges**

Les préparations ont été effectuées selon la norme **NF EN 13286-41**. 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 un durée d'une minute jusqu'a 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 5minutes, 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'élanement<sup>1</sup> ont été confectionnées ayant les dimensions suivantes : H=7cm et Ø= 3.5cm Les quantités utilisées d'argile, chaux et eau ont été déterminées suivant les essais de Proctor  $\rho_d$  OPN et  $W_p$ , 15éprouvettes ont été confectionnées. Un seul gâchis a été utilisé pour chaque âge et pourcentage et La teneur en eau introduite a été majorée de 1.5% pour éviter le risque d'évaporation lors du malaxage et de la confection.

Les quantités utilisées d'argile, eau ont été déterminées suivant les essais de Proctor  $\rho_d$  OPN et  $W_{opt}$ . Les éprouvettes sont étanches et conservées pendant 24h dans une chambre humide à une température de 20°C

#### **Essai de Proctor**

L'essai a été conduit selon la norme **NF P 94-093** , on utilise un moule en acier de dimensions normalisées H = 11.65cm et Ø= 10.15cm 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 3 kg .A la fin de l'essai, la hausse a été retirée et a 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 **NF EN 13286-41** Méthode B. les éprouvettes sont retirées de sachets filmés et testées en compression simple sur une presse sous le nom « Techno test » 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 1mm/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.

## II.1. INTRODUCTION

Le présent chapitre présente et interprète les différents résultats obtenus lors des essais conduits en laboratoire sur la vase du barrage de charef. 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 du Proctor normal afin d'identifier la teneur en eau optimale et la densité maximale relatives à chaque traitement.

La compression simple avec l'influence de la période de conservation était le troisième essai. Ce dernier a permis la détermination de la compression simple et la consistance de l'argile stabilisée.

## III.2. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES.

### III.2.1. Influence du Pourcentage de la Chaux sur le pH.

L'influence du pourcentage de la chaux sur le pH de la vase du barrage de charef 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.

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

**Tableau III -1** Evolution du pH - % de la Chaux

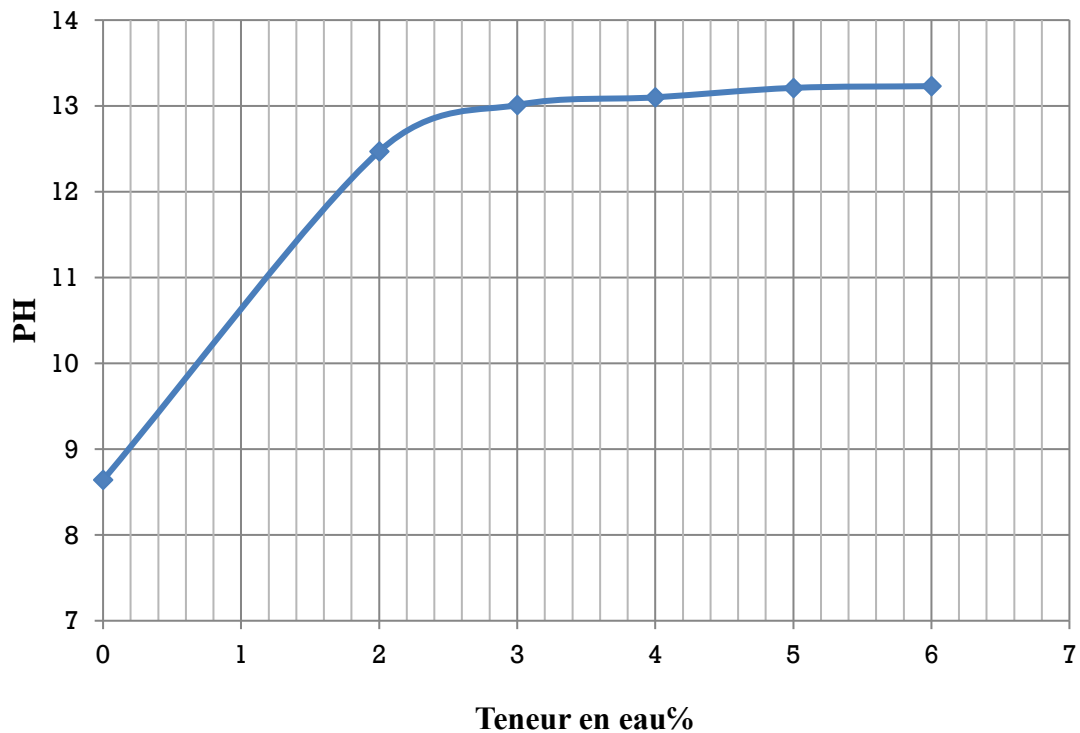


Figure III-1 Evolution du pH-% de Chaux.

### III.2.2. Influence du Pourcentage de sable correcteur Sur le Compactage

A fin de voir l'influence des différents pourcentages de sable correcteur sur les paramètres de compactage de la vase du barrage de Charef traitée à base de 2% chaux, une série de 35 essais au compactage Proctor normal a été effectuée. Les résultats obtenus sont représentés ci après.

L'augmentation des pourcentages de sable correcteur provoque un croissant de la masse volumique sèche maximale. Ce croissant est schématisé par la représentation d'histogramme sur la figure III-2.

Plus encore, l'accroissement du pourcentage de sable correcteur entraîne une augmentation de la teneur eau optimale. La figure III-3 montre clairement cette observation.



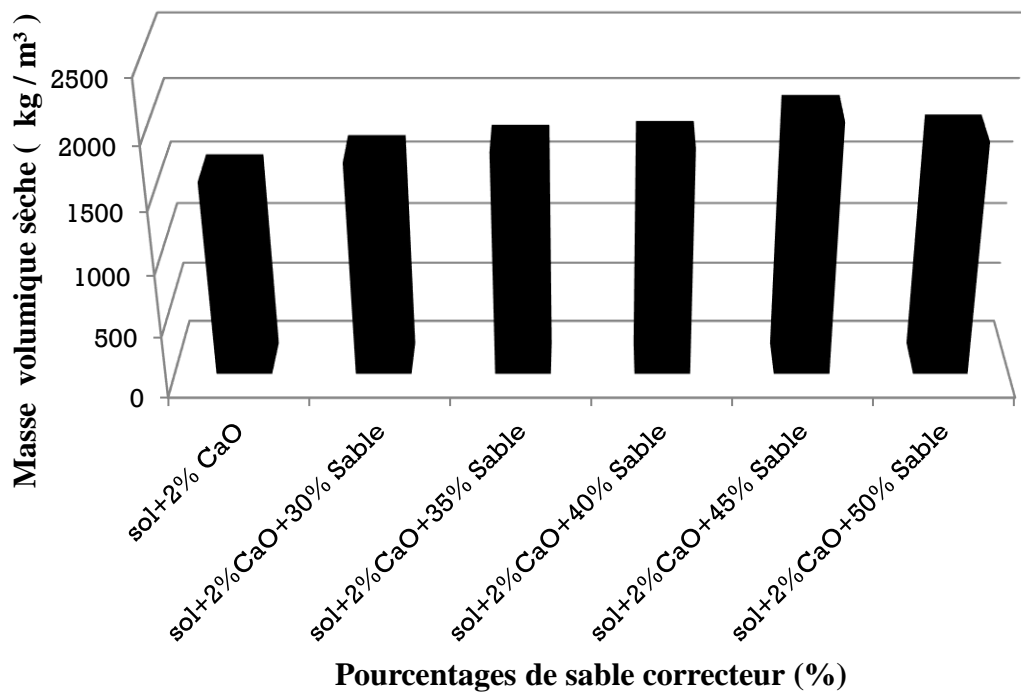


Figure III-2 Influence du pourcentage de sable correcteur sur la Masse Volumique Sèche Maximale  $\rho_d^{max}$ .

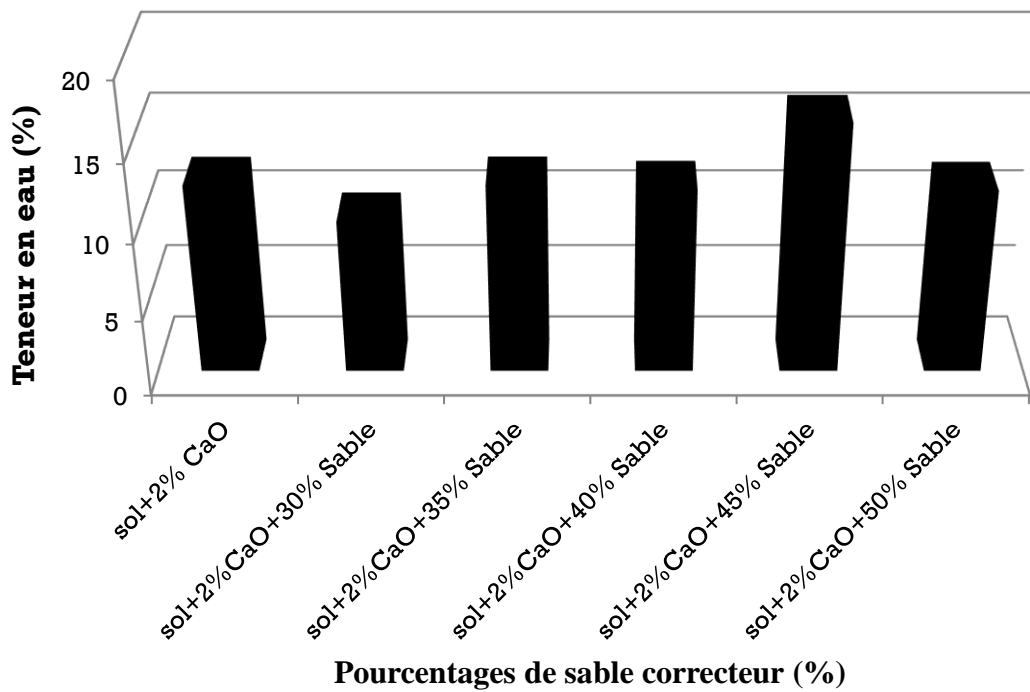


Figure III-3 Influence de la Chaux sur la Teneur en Eau Optimale  $w_{opt}$ .

### II.2.3 Influence du Pourcentage de sable correcteur Sur la Compression Simple

L'essai à la compression simple a été conduit pour l'étude de l'influence du pourcentage d'ajout de sable correcteur sur la résistance simple  $q_u$  de la vase du barrage de Charef dont la procédure a été donnée au chapitre précédant. Un temps de 24h comme recommandé dans les normes a été donné aux échantillons pour assurer l'hydratation de la chaux ainsi le processus de modification et après compactage une autre période de conservation de 28 jours pour subir une réaction pouzzolanique ce qui produit la stabilisation des échantillons traités. Les différents résultats montrant cette influence sur la compression simple, et la déformation des échantillons sont donnés ci-dessous.

Les relations entre les contraintes axiales (qui sont tout simplement les déviateurs, puisque les contraintes horizontales  $\sigma_3$  étant nulles) et les déformations axiales principales pour les pourcentages de sables de 30%, 35%, 40%,45% et 50% sont données sur les figures suivantes.

La rupture totale de l'éprouvette de sol traitée à 2% de chaux a été observée pour une contrainte de 565.67 kPa et une déformation axiale principale majeure de 1.7%. La compression simple obtenue permet de classer l'argile comme étant une argile **dure (Hard Clay)**.

Le traitement de 30% de sable correcteur à base 2% de chaux a permis d'obtenir un déviateur à la rupture de 886.67kPa observé à une déformation axiale de 1.96%. Il a classé l'argile comme étant une argile **dure (Hard Clay)**.

Une contrainte axiale à rupture de 1015kPa ainsi qu'une déformation axiale de 2,4% ont été obtenues pour une argile traitée à 35% de sable correcteur à base 2% de chaux. Le traitement à 35% de sable correcteur à base 2% de chaux a transformé l'argile en une argile **dure (Hard Clay)**.

L'accroissement de pourcentage de sable correcteur à 40% augmente la valeur de la compression simple à 1263.33kPa ainsi qu'une déformation axiale de 2,6%, il permet de classer l'argile comme étant une argile **dure (Hard Clay)**.

L'observation faite ci-dessus est mieux montrée par la représentation de la compression simple en fonction du pourcentage d'ajout de sable correcteur sous forme d'histogramme donné sur la Figure III-4

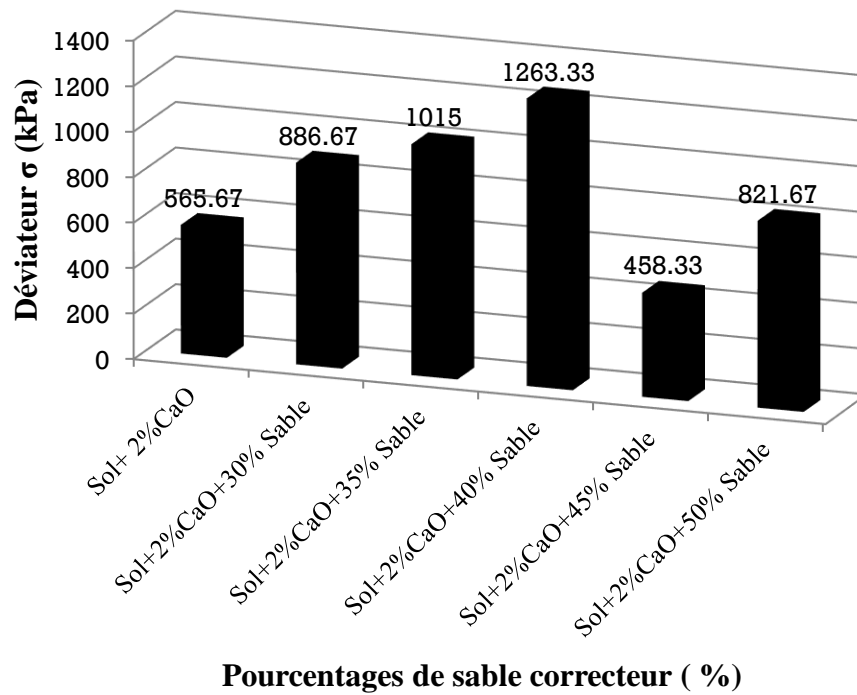


Figure III-4 Influence de l'Addition de sable correcteur sur la Contrainte Axiale à 28 jrs

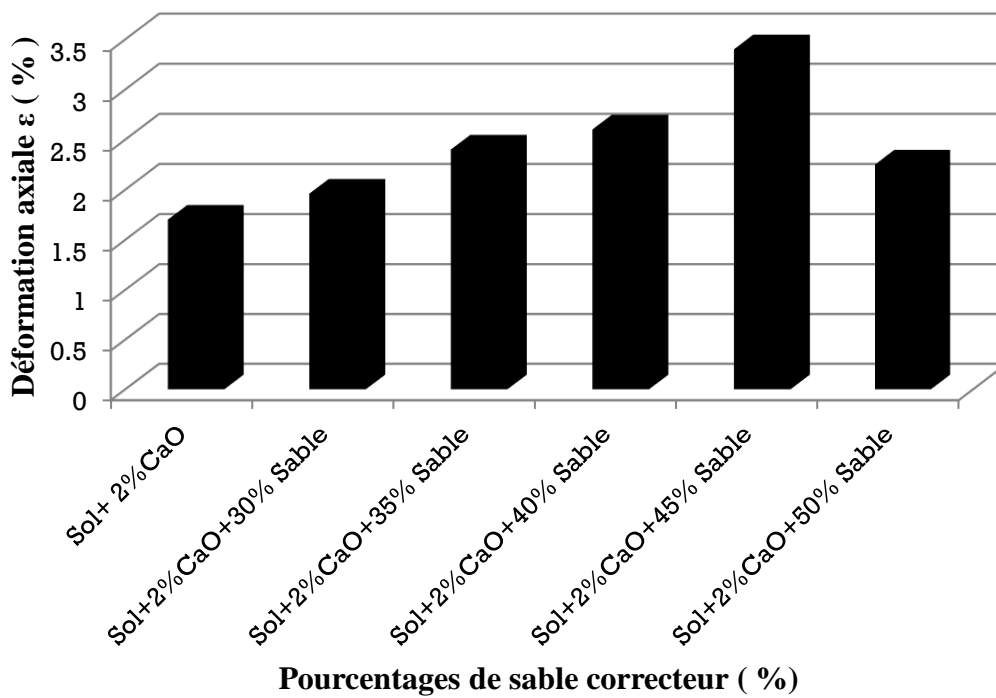
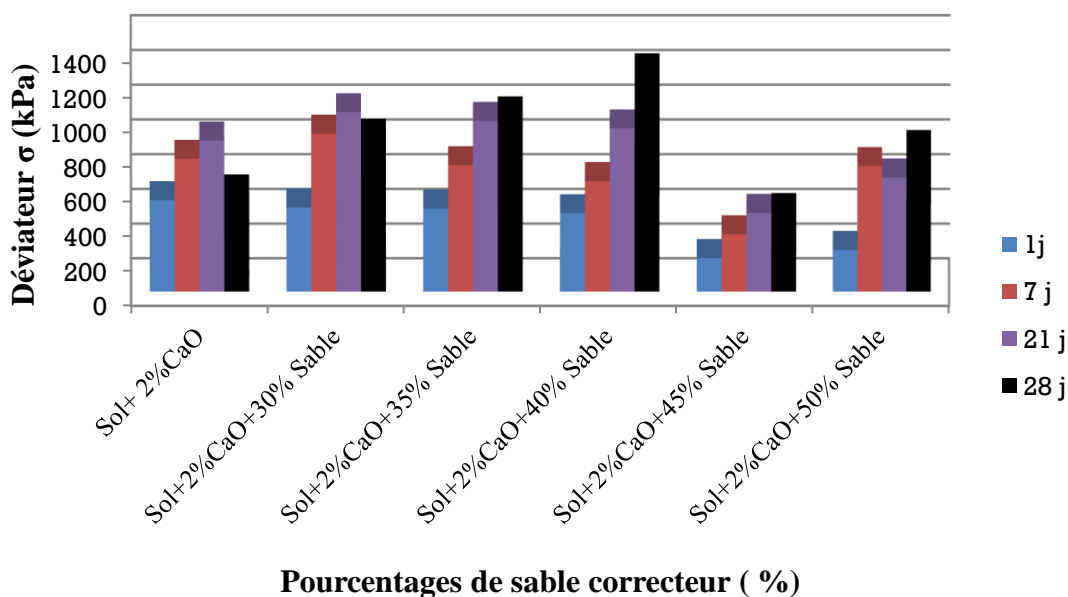


Figure III-5 Influence de l'Addition de sable correcteur sur la Déformation Axiale à 28 Jours

La variation de la déformation axiale à la rupture en fonction du pourcentage de sable correcteur ajoutée est donnée sur la Figure III-5 sous forme d’histogramme. Celle-ci montre clairement que la déformation axiale à la rupture croît avec l’augmentation du pourcentage de sable.

### III 3 Influence du Temps de Cure Sur la Compression Simple

La comparaison des résultats des argiles traitées à différents pourcentages de sable correcteur et différents temps de conservation est donnée sur les différentes figures ci-dessous. La figure III-6 illustre l’évolution de la compression simple en fonction du pourcentage d’ajout de sable pour 1, 7, 21 et 28 jours de conservation permettant ainsi une réaction pouzzolanique plus importante. L’histogramme obtenu montre l’amélioration de la compression simple avec l’augmentation du pourcentage de sable. Cette amélioration semble être plus importante lorsque le temps de conservation est plus long.



**Figure III-6** Influence du Temps de Cure sur la Contrainte Axiale.

L’histogramme présenté sur la Figure III-7 donne la variation de la déformation axiale principale avec la durée de conservation à différents pourcentages de sable correcteur. Celle-ci montre que l’accroissement du temps de cure augmente la déformation axiale.

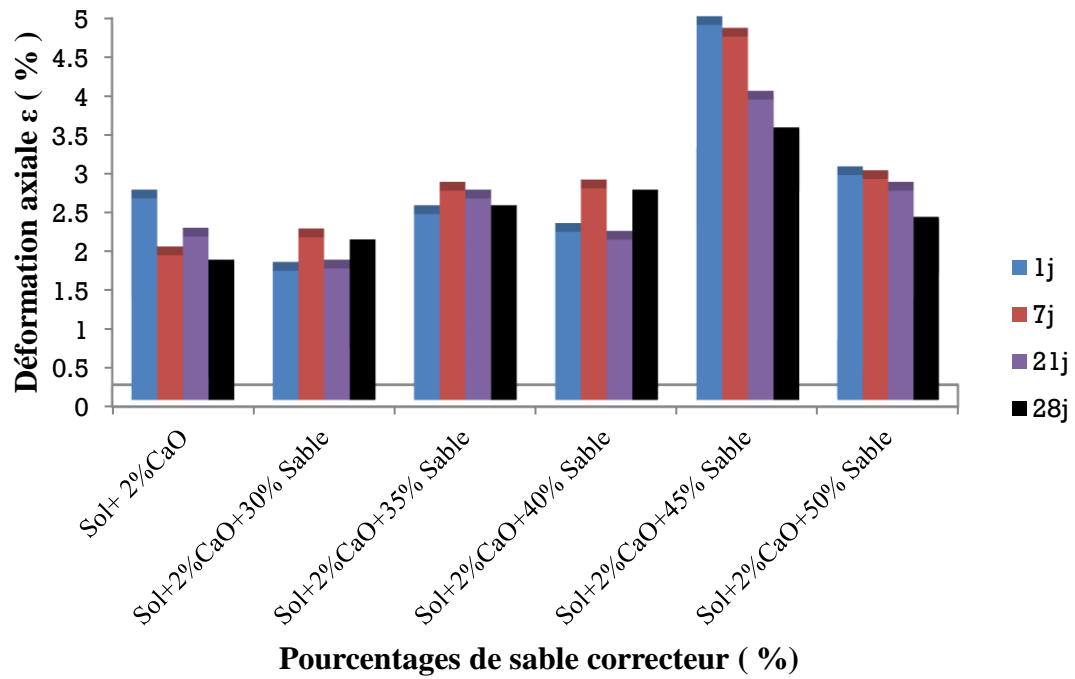


Figure III-7 Influence du Temps de Cure sur la Déformation Axiale.

## CONCLUSIONS

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

- 1) Les essais d'identification montrent que l'argile de provenance de sédiments du barrage de Charef est un sol à grains fins et qui est classé comme une argile silteuses inorganique de faible plasticité (ML).
- 2) L'adduction de sable correcteur à base de 2% de chaux à cette vase augmente la teneur en eau optimale et la densité maximale sèche.
- 3) La consistance de la vase non traité et qui était de consistance très ferme est passé à une consistance dure après 28 de conservation.
- 4) Le temps de conservation améliore la résistance à la compression simple et diminue la déformation axiale

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFNOR (1992) Analyse granulométrique des sols-Méthode par sédimentation (NF P94-057). Norme expérimentale, France, 20 p.

AFNOR (1993a) Détermination des limites d'Atterberg-Limite de liquidité à la coupelle-Limite de plasticité au rouleau (NF P94-051). Norme expérimentale, France, 15 pages.

AFNOR (1993b) Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités-Fabrication des éprouvettes de sables ou de sols fins par compression statique (NF P98-230-2). Norme expérimentale, France, 12 pages.

AFNOR (1997) Indice CBR après immersion-Indice CBR immédiat-Indice portant immédiat (NF P94-078). Norme expérimentale, France, 12 pages.

AFNOR (1999) Détermination des références de compactage d'un matériau-Essai Proctor normal-Essai Proctor modifié (NF P94-093). Norme expérimentale, France, 20 pages.

BOUTOUIL M. (1998). Traitement de vases de dragage par solidification/stabilisation à base de ciment et additifs. Thèse de l'Université du Havre. 279 p.

BOUTOUIL M., LEVACHER D. (2000). Traitement et valorisation des vases de dragage par solidification/stabilisation : état de l'art. VIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Caen, pp 367-375. doi:10.5150/jngcgc.2000.031-B

BOUTOUIL M., LEVACHER D. (2001). Étude expérimentale de la solidification d'une vase de dragage à base de ciments : évaluation de la porosité et de la structure poreuse après solidification. Materials and structures, vol. 34, n° 3, pp 186-192. doi:10.1007/BF0248051

COLIN D. (2003). Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière. Thèse de l'Université de Caen-Basse-Normandie, 181 p. Influence de l'ajout d'un correcteur granulométrique sur les propriétés des sédiments traités aux liants hydrauliques : 8.11

DAMIDOT D., ABRAIAK N.E., DUBOIS V., ZENTAR R., MAC FARLANE F., BULTEEL D., JUNQUA G., KADA H., KAMALI S., REFIF H., WIRQUIN E., DUAN Z. (2008). Caractérisation, stabilisation et solidification de sédiments marins. Thèse de l'Université de Caen-Basse-Normandie, 198 p.

Dubois V., Abriak N.E., Zentar R., Ballivy G. (2009). The use of marine sediments as a pavement base material. *Waste Management*, vol. 29, pp. 774–782. doi: 10.1016/j.wasman

DUBOIS V. (2006). Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins. Thèse de l'Université d'Artois. 285 p.

LCPC, SETRA. (2000a). Réalisation des remblais et des couches de forme, guide technique. Fascicule II-Annexes techniques, 2ème édition, Paris, 211 pages.

LCPC, SETRA. (2000b). Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques- Application à la réalisation des remblais et des couches de forme, guide technique, Paris, 246 pages.

Levacher D., Colin D., Carina A., Duan Z., Sun L. (2006). Recyclage et valorisation de sédiments fins de dragage à usage de matériaux routiers. IXème journées nationales Génie Civil- Génie Côtier, Brest, pp.603-612, doi: 10.5150/jngcgc.2006.058-

LEVACHER D., COLIN D., PERRONI A.C., DUAN Z., SUN L. (2006). Recyclage et valorisation des sédiments fins de dragage à usage de matériaux routiers. IXèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Brest, pp 603-612. doi:10.5150/jngcgc.2006.058-L

L Rekiik B., Boutouil M. (2011). Geotechnical properties of dredged marine sediments treated at high water/cement ratio. *Geo-Marine Letters*, vol. 29, pp. 171–179. doi: 10.1007/s00367-009-0134-x

REKIK B. (2007). Propriétés géotechniques des sédiments de dragage traités au ciment. Thèse de l'Université de Caen Basse-Normandie. 122 p.

REKIK B., BOUTOUIL M. (2009). Geotechnical properties of dredged marine sediments treated at high water/cement ratio. *Geo-Marine Letters*, n° 29, pp 171-179. doi:10.1007/s00367-009-0134-x

REY F. (1999). Etude physico-mécanique et environnementale du composite vase chaux et additifs. Thèse de l'Université de Caen Basse-Normandie. 271 p.



SETRA-LCPC (2000). Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme - Guide technique (GTS). 240 p.

Scordia P. (2008). Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers. Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, 202 pages.

Semcha A. (2006). Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug. Thèse de Doctorat, Université de Reims, France, 175 pages.

Walid M., Ben Abdelghani F. (2014). Dredged marine raw sediments geotechnical characterization for their reuse in road construction. Engineering Journal, vol. 18, n°4, pp.27-37. doi: 10.4186/ej.2014.18.4.27

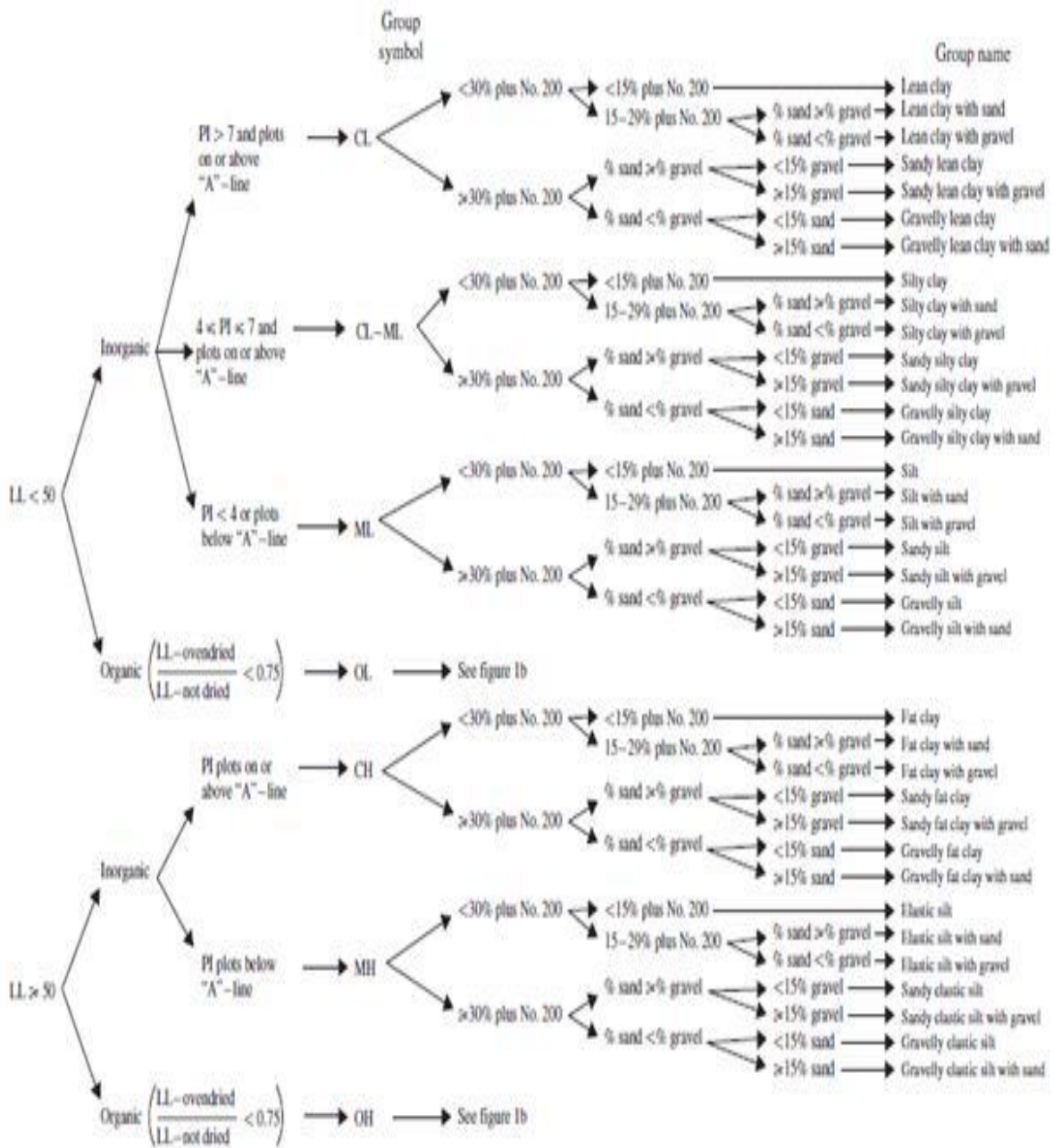
Wang D. (2011). Solidification et valorisation de sédiments du port de Dunkerque en travaux routiers. Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Douai et Université Lille 1, France, 174 pages.

# ANNEX –A

## CLASSIFICATION DU SOL

Field Identification Procedures (Including particles larger than 3 in. and heavy fractions on international weights)		Group Symbols	Typical Names	Information Required for Describing Soils	Laboratory Classification Criteria			
<p style="text-align: center;">Choose appropriate soils. Measure mass of material larger than No. 200 sieve and divide by mass of material retained on No. 40 sieve to obtain <math>C_u</math>.</p> <p style="text-align: center;">Choose appropriate soils. Measure mass of material larger than No. 200 sieve and divide by mass of material retained on No. 40 sieve to obtain <math>C_c</math>.</p>	<p style="text-align: center;">Clayey gravels (Clayey or matrix fine-grained soil)</p> <p style="text-align: center;">Silty gravels (Silty or matrix fine-grained soil)</p> <p style="text-align: center;">Clayey sands (Clayey or matrix fine-grained soil)</p> <p style="text-align: center;">Silty sands (Silty or matrix fine-grained soil)</p> <p style="text-align: center;">Clayey silts (Clayey or matrix fine-grained soil)</p> <p style="text-align: center;">Silty silts (Silty or matrix fine-grained soil)</p> <p style="text-align: center;">Clayey silts (Clayey or matrix fine-grained soil)</p> <p style="text-align: center;">Silty silts (Silty or matrix fine-grained soil)</p>	GW	Well graded gravel, gravel-sand mixture, 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 grains; local or geologic name and other pertinent descriptive information; and symbols in parenthesis</p> <p>For undisturbed soils add information on stratification, degree of compaction, cementation, moisture conditions and drainage characteristics</p> <p>Example: Jilty 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; fine with low dry strength; well compacted and moist in place; alluvial sand; (SM)</p>	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Greater than 4 $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Between 1 and 3			
		GP	Poorly graded gravel, gravel-sand mixture, little or no fines		Not meeting all gradation requirements for GW Atterberg limits below "A" line or $PI$ less than 4			
		GM	Silty gravel, poorly graded gravel-sand mixture		Atterberg limits above "A" line with $PI$ greater than 7			
		GC	Clayey gravel, poorly graded gravel-sand mixture		Atterberg limits below "A" line or $PI$ less than 4 Above "A" line with $PI$ between 4 and 7 are borderline cases requiring use of dual symbols			
		JW	Well graded sand, gravelly sand, little or no fines		$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Greater than 6 $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Between 1 and 3			
		SP	Poorly graded sand, gravelly sand, little or no fines		Not meeting all gradation requirements for JW Atterberg limits below "A" line or $PI$ less than 5 Above "A" line with $PI$ between 4 and 7 are borderline cases requiring use of dual symbols			
<p style="text-align: center;">Choose appropriate soils. Measure mass of material larger than No. 200 sieve and divide by mass of material retained on No. 40 sieve to obtain <math>C_u</math>.</p> <p style="text-align: center;">Choose appropriate soils. Measure mass of material larger than No. 200 sieve and divide by mass of material retained on No. 40 sieve to obtain <math>C_c</math>.</p>	<p style="text-align: center;">Clayey silts (Clayey or matrix fine-grained soil)</p> <p style="text-align: center;">Silty silts (Silty or matrix fine-grained soil)</p> <p style="text-align: center;">Clayey silts (Clayey or matrix fine-grained soil)</p> <p style="text-align: center;">Silty silts (Silty or matrix fine-grained soil)</p> <p style="text-align: center;">Clayey silts (Clayey or matrix fine-grained soil)</p> <p style="text-align: center;">Silty silts (Silty or matrix fine-grained soil)</p> <p style="text-align: center;">Clayey silts (Clayey or matrix fine-grained soil)</p> <p style="text-align: center;">Silty silts (Silty or matrix fine-grained soil)</p>	Identification Procedures on Fraction Smaller than No. 40 Sieve Size		<p>Give typical name; indicate degree and character of plasticity, amount and maximum size of coarse grains; color in wet condition, color if any, local or geologic name, and other pertinent descriptive information, and symbol in parenthesis</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; loam; (ML)</p>	<p style="text-align: center;">The grain size curve is determined by the fractions as given under field identification. Determine percentages of gravel and sand from grain size curve. Depending on percentage of fines (fine-grained soil), No. 200 sieve, the coarse-grained soil is classified as follows:                      Less than 5%: GW, GP, GM, GC                      5% to 12%: JW, SP, SM, SC</p>			
		ML	Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands with slight plasticity			None to slight Quick to slow None		
		CL	Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays			Medium to high None to very slow Medium		
		OL	Organic silts and organic silt clays of low plasticity			Slight to medium Slow to medium Slight		
		MH	Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts			Slight to medium Slow to none Slight to medium		
		CH	Inorganic clays of high plasticity, fat clays			High to very high None High		
		OH	Organic clays of medium to high plasticity			Medium to high None to very slow Slight to medium		
		PI	Peat and other highly organic soils			Readily identified by colour, odour, spongy feel and frequently by fibrous texture		

**Tableau A** 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 –B

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 B-** Consistance d'Argile