

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Année 2010

## MEMOIRE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Magister

### ETUDE ET AMELIORATION DES PROPRIETES DE L'ARGILE HAMAM DEBBAGH PAR AJOUT DE LIANTS

Option :

Géotechnique

Par

**Mr Mounir MOUISSAT**

DIRECTEUR DE MEMOIRE : **Dr N. CHELGHOUM**

M.C Université de Annaba

#### DEVANT LE JURY

PRESIDENT : **Pr M. MEKSAOUNE**

Prof. Université de Annaba

EXAMINATEUR : **Dr A. MENDJEL**

M.C Université de Annaba

EXAMINATEUR : **Dr S. KOULOUGHLI**

M.C Université de Constantine



## RESUME

Devant le développement économique en Algérie, la volonté d'aménagement du territoire conduit au développement et amélioration des infrastructures telles que routes, autoroutes, voies de chemins de fer, aéroports et autres projets linéaires. Cependant, l'Est algérien souffre d'un manque crucial dans les matériaux pour la construction de remblais, de couches de forme et d'assises de fondation. Le transport de ces matériaux des wilayas de voisinage est très coûteux ce qui augmente les prix des projets. La bonne solution de ce problème est l'utilisation des matériaux locaux. Les matériaux souvent rencontrés sont des sols fins qui nécessitent un traitement pour répondre aux caractéristiques mécaniques demandées. Le site Djebel DEBBAGH à la wilaya de Guelma recèle un gisement important d'argile Kaolinite DD3 qui se trouve en grandes quantités et reste en tant que déchet industriel. La Kaolinite DD3 reste méconnue de point de vue géotechnique et le but de cette étude est d'identifier et de valoriser cette argile et résoudre ainsi un problème environnemental dû aux énormes dépôts d'argile sur sites. La caractérisation de la Kaolinite DD3 montre que cette argile *organique* d'une *plasticité élevée* et d'une *consistance moyenne* ne peut pas être utilisée dans la construction des ouvrages linéaires. Le traitement à la chaux améliore la *maniabilité*, les *paramètres de compactage*, et la *consistance* de cette argile. Le gain de résistance à la compression simple pour la Kaolinite DD3 traitée à un pourcentage optimum de 3% de chaux montre que cette argile stabilisée est apte d'être utilisée dans la construction routière ce qui donne une solution aux problèmes posés.

## ABSTRACT

The economic development in Algeria, will planning led to the development and improvement of infrastructure such as roads, highways, railways, airfields and other linear projects. However, eastern Algeria suffers from a critical shortage in materials for the construction of embankments, subgrades and subbases. The transportation of these materials from neighbor Wilayas is very expensive which increases the price of projects. The correct solution to this problem is the use of local materials. The materials are often encountered fine-grained soils that require treatment to meet the required mechanical properties. The site at Jebel DEBBAGH in the Wilaya of Guelma contains a large deposit of DD3 Kaolinite clay, which is found in large quantities and remains as industrial waste. The DD3 Kaolinite remains unknown to geotechnical standpoint and purpose of this study is to identify and exploit the clay thereby solving an environmental problem due to huge deposits of clay sites. Characterization of DD3 Kaolinite shows that it is organic high plasticity clay with medium consistency; thus, it can not be used in the construction of linear structures. The lime treatment improves the workability, the compaction parameters, and the consistency of the clay. The gain in compressive strength for DD3 Kaolinite treated to optimum percentage of 3% lime stabilized clay shows that it is capable of being used in road construction which gives a solution to problem.

## ملخص

إن التنمية الاقتصادية التي تعيشها الجزائر تتطلب تطوير وتحسين البنية التحتية لشبكة الطرق عبر العمل على تهيئة وتأهيل الطرق ، الطرق السريعة ، السكك الحديدية ، المطارات، وكذا كل المشاريع الخطية. ومع ذلك فإن الشرق الجزائري يعاني من نقص حاد في المواد الأولية اللازمة لتحقيق هذا التأهيل وتلك التهيئة. إن أهم أجزاء الطريق هي الطبقات المكونة للأساس. وكما هو متعارف عليه أن عملية نقل هذه المواد من مختلف الولايات المجاورة مكلفة للغاية مما يزيد في تكلفة المشاريع. لحل الحل الأمثل لمثل هذه المعضلة هو استخدام المواد المحلية المتوفرة. إلا أن المشكلة المطروحة هي أن التربة المتوفرة هي عبارة عن تربة طينية بحبيبات دقيقة وبالتالي فهي تتطلب معالجة لتلبية الخصائص الميكانيكية المطلوبة. إن جبل دباغ بولاية قالمة يتوفر على كميات كثيرة من التربة الطينية المعروفة بكاوولينيت DD3 والتي هي عبارة عن بقايا صناعية ملقاة بموقع الإستخراج مما يسبب أضرار للبيئة. وهذه التربة لا تزال غير معروفة من وجهة النظر الجيوتقنية والغرض من هذه الدراسة هو تعريف التربة و تحديد خصائصها الجيوتقنية وكذا محاولة إستغلالها في مشاريع تهيئة وتحديث الطرقات وبالتالي حل مشكلة بيئية. بعد إجراء التجارب المخبرية وتحديد الخصائص الجيوتقنية للتربة تم توصيف هذه التربة الطينية بأنها تربة طينية عضوية ذات مرونة عالية وبالتالي لا يمكن إستخدامها في أسس الطرقات إذا ما استعملت على طبيعتها. إلا أن نفس التجارب التي أجريت على نفس التربة بعد علاجها بكميات من الجير أظهرت تحسن في خصائصها وكذا قوة ضغط ومقاومة معتبرة. وكننتيجة لهذه الدراسة تبين أخيرا أن هذه التربة قابلة للإستعمال في بناء الطرق والمشاريع الخطية بعد معالجتها ب 3 % من الجير.

# SOMMAIRE

Titre	Page
RESUME.....	i
ABSTRACT.....	ii
ملخص.....	iii
SOMMAIRE.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	x
<b>Chapitre 1 INTRODUCTION</b>	
1	
<b>Chapitre 2 RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
Introduction.....	4
Historique.....	4
1. RAPPELS MINÉRALOGIQUE SUR LES SOLS ARGILEUX.....	5
1.1. Les minéraux.....	5
Les argiles.....	6
1.1. Les substances minérales solubles.....	9
1.2. La matière organique.....	10
2. APERÇUS SUR LA CHAUX.....	10
2.1. Origine de la chaux.....	10
2.2. Types de Chaux.....	11
❖ Chaux Vive.....	11
❖ Chaux Hydratée.....	12
❖ Lait de Chaux.....	13
❖ Chaux Dolomitique.....	13
Remarques.....	13
3. STABILISATION CHIMIQUE DES SOLS ARGILEUX.....	14
3.1. Sélection des Additifs pour la Stabilisation.....	14
a. Sélection des additifs (département de l'armée en USA MIL-STD-619B).....	15
b. Méthode de l'Association Nationale de la Chaux aux Etats Unies.....	17
Autres considérations.....	18
<i>Effets de la Teneur en Matière Organique sur le Sol Traité à la Chaux.....</i>	18
<i>Effets des Sulfates sur le Sol Traité à la Chaux.....</i>	19

<b>4. TRAITEMENT DES SOLS A LA CHAUX</b> .....	20
<b>Séchage</b> .....	21
<b>Amélioration / modification</b> .....	21
<i>Effets produits par la modification du sol à la chaux (Dallas Little (2006))</i> .....	23
<b>Réaction à long terme : Stabilisation</b> .....	23
<i>Effets produits par la stabilisation du sol à la chaux (Dallas Little (2006))</i> .....	23
<b>5. MECANISME DE STABILISATION</b> .....	24
<b>6. Détermination des Teneurs en Chaux</b> .....	25
<i>Teneur en chaux pour modification</i> .....	25
<i>Teneurs en chaux pour la stabilisation</i> .....	25
<b>A. Méthode de Point de Fixation de Chaux</b> .....	25
<b>B. Méthodes de Détermination du Pourcentage Initial de Chaux</b> .....	26
<i>a. Méthode de pH (Méthode de Eades &amp; Grim)</i> .....	26
<i>b. Méthode Alternative</i> .....	26
<b>C. Teneur en Chaux Optimale</b> .....	27
<b>7. ETUDES PREALABLES SUR LE TRAITEMENT A LA CHAUX</b> .....	27
• En 2009 FZ. Aissiou (Algérie).....	27
<b>Essais de compression simple</b> .....	28
<b>Essais de cisaillement direct</b> .....	28
• En 2008 M. A. Sakr et al (Egypte).....	29
<b>Limites d'Atterberg</b> .....	30
<b>Essais de compression simple</b> .....	31
• En 2006 Paul Quigley Beng (Ireland).....	32
• En 2004 Khairul Anuar Kassim (Malaysia).....	32
<b>Limite de plasticité (Capacité de fixation de la chaux)</b> .....	33
<b>Influence de la chaux sur le pH (Teneur en chaux initiale)</b> .....	34
<b>Essais de compression simple</b> .....	34
<i>Influence de la chaux sur l'UCS</i> .....	34
<i>Influence du temps de cure sur l'UCS</i> .....	35
• En 2004 Giacomo Russo (Italie).....	35
• En 2000 A. M. El Sharief (Soudan).....	36
• En 1999 M. Afés (Algérie).....	36
<b>Limites d'Atterberg</b> .....	36
<b>Essai de compactage (Proctor)</b> .....	38
• En 1997 Peter Evans (Queensland).....	39
<b>Essai de compression simple</b> .....	40

• En 1996 et en 1989 F.G. Bell (UK).....	40
<b>Première série</b> .....	41
<b>Limites de consistance</b> .....	41
<b>Essai de compactage (Proctor normal)</b> .....	42
<b>Essai de compression simple</b> .....	42
<b>Deuxième série</b> .....	44
<b>Limites d'Atterberg</b> .....	44
<b>Essai de compactage</b> .....	45
<b>Essai de compression simple (UCST)</b> .....	45
• En 1988 K. E. Clare (UK).....	46
<b>Limites d'Atterberg</b> .....	46
<b>Influence de la chaux sur le pH</b> .....	47

### **Chapitre 3 MATHERIAUX ET METHODES D'ESSAIS**

<b>3.1. INTRODUCTION</b> .....	48
<b>3.2. MATERIAUX</b> .....	48
<b>3.2.1. Matériau: Sol</b> .....	48
<u>Analyses Chimiques</u> .....	49
<u>Analyse Minéralogique (XRD)</u> .....	49
<u>Analyse du pH</u> .....	51
<u>Teneur en Matière Organique</u> .....	51
<u>Poids Spécifique (Gs)</u> .....	52
<u>Analyse Granulométrique</u> .....	52
<u>Limites d'Atterberg</u> .....	54
<u>Limite de Liquidité</u> .....	54
<u>Limite de Plasticité</u> .....	55
<u>Indice de Plasticité</u> .....	55
<u>Indice d'activité</u> .....	55
<u>Classification selon l'USCS</u> .....	56
<u>Essai de Compactage - Proctor Normal</u> .....	56
<u>Essai de Compression Simple</u> .....	57
<u>Essai de Cisaillement Direct (ASTM D 3080)</u> .....	59
<b>3.2.2. Matériau: Chaux</b> .....	61
<b>3.3. METHODES</b> .....	62
<b>3.1.1 Préparation du Mélange (Sol-Chaux)</b> .....	62
<b>Malaxage</b> .....	62

Conservation.....	62
<i>Temps de Maturation</i> .....	63
<i>Durée de Conservation -Temps de Cure</i> .....	63
3.1.2 Mode Opérateur des Essais.....	63
Limites d'Atterberg.....	63
Essai de pH (Méthode Eades & Grim).....	64
Essai de Compactage (Proctor Normal).....	65
Essai de Compression Simple (UCST).....	65
<i>Influence de la Chaux sur la Compression Simple</i> .....	65
<i>Influence du Temps de Cure sur la Compression Simple</i> .....	66
Essai de Cisaillement Direct.....	67

#### Chapitre 4 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4.1. Influence de la Chaux sur les Limites d'Atterberg.....	68
4.1.1. <i>Limite de Liquidité</i> .....	68
4.1.2. <i>Limite de Plasticité</i> .....	75
4.1.3. <i>Indice de Plasticité</i> .....	76
<i>Conclusion</i> .....	77
4.2. Influence de la Chaux sur le pH.....	78
<i>Conclusion</i> .....	79
4.3. Influence de la Chaux sur les Paramètres de Compactage.....	80
<i>Conclusion</i> .....	84
4.4. Influence de la Chaux sur la Compression Simple.....	86
<i>Conclusion</i> .....	91
4.5. Influence de la Chaux sur l'Essai de Cisaillement Direct.....	95
<i>Conclusion</i> .....	100
4.6. Influence du Temps de Cure sur l'UCS pour 3% de Chaux.....	104
<i>Conclusion</i> .....	108

#### Chapitre 5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSIONS.....	113
RECOMMANDATIONS.....	115
REFERENCES.....	
ANNEX.....	

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre 2. Recherche Bibliographique.

Tableau 2.1 Règle pour la sélection d'additif stabilisateur (MIL-STD-619B).....	17
Tableau 2.2 Classes d'activité.....	18
Tableau 2.3 Classification des sols organiques. « <i>Foundation Engineering Handbook Robert W. Day (2006)</i> ».....	19
Tableau 2.4 Caractéristiques physiques des sols étudiés (FZ. Aissiou 2009).....	27
Tableau 2.5 Propriétés des sols utilisés dans l'étude (Khairul Anuar Kassim 2004).....	33
Tableau 2.6 Valeurs du pH en fonction des teneurs en chaux pour différents sols (Kh. A. Kassim 2004).....	34
Tableau 2.7 Composition des sols étudiés et l'influence de la chaux sur les limites d'Atterberg (A. M. El Sharief 2000).....	36
Tableau 2.8 Propriétés géotechniques de l'argile (M. Afès 1999).....	37
Tableau 2.9 Caractéristiques physiques du sol en fonction du pourcentage de chaux et du temps de cure (M. Afès 1999).....	38
Tableau 2.10 Composition chimique, propriétés physiques et mécaniques pour Kaolinite, Montmorillonite et quartz (F. G. Bell 1989-1996).....	41
Tableau 2.11 Comparaison des résultats de l'essai de compactage pour Kaolinite, Montmorillonite et Quartz avec l'addition de la chaux (F. G. Bell 1989-1996).....	42
Tableau 2.12 Variation des limites d'Atterberg avec l'addition de la chaux (F. G. Bell 1989-1996)....	44
Tableau 2.13 Résultats des essais physiques de l'argile étudiée (K. E. Clare 1988).....	46

## Chapitre 3. Matériaux et Méthodes d'Essais.

Tableau 3.1 Composition Chimique de la Kaolinite DD3.....	49
Tableau 3.2 Composition Minéralogique de la Kaolinite DD3.....	51
Tableau 3.3 Pourcentages des Fractions du Sol.....	53
Tableau 3.4 Limite de Plasticité.....	55
Tableau 3.5 Contrainte de Cisaillement Max et le Déplacement Horizontal.....	60
Tableau 3.6 Composition chimique de la chaux vive.....	61
Tableau 3.7 Caractéristiques physiques de la chaux vive.....	61

## Chapitre 4. Résultats et Interprétations.

Tableau 4.1 Valeurs des Limites de Liquidité vs Pourcentages de Chaux.....	73
Tableau 4.2 Valeurs de la Limite de Plasticité vs Pourcentages de Chaux.....	75
Tableau 4.3 Valeurs de l'Indice de Plasticité vs Pourcentage de Chaux.....	76
Tableau 4.4 Variation du pH avec l'Addition de la Chaux.....	79
Tableau 4.5 Variation des Paramètres de l'Essai UCS avec l'Addition de la Chaux.....	94
Tableau 4.6 Contrainte $\tau_{max}$ e et Déplacement $\delta_h$ pour le Sol non Traité.....	95
Tableau 4.7 Contrainte $\tau_{max}$ e et Déplacement $\delta_h$ pour le Sol Traité à 2% de Chaux.....	97
Tableau 4.8 Contrainte $\tau_{max}$ e et Déplacement $\delta_h$ pour le Sol Traité à 4% de Chaux.....	98
Tableau 4.9 Contrainte $\tau_{max}$ e et Déplacement $\delta_h$ pour le Sol Traité à 6% de Chaux.....	99
Tableau 4.10 Variation du Déplacement $\delta_h$ avec l'Addition de la Chaux.....	101
Tableau 4.11 Variation de la Cohésion avec l'Addition de la Chaux.....	103
Tableau 4.12 Variation de l'Angle de Frottement Interne avec l'Addition de la Chaux.....	103
Tableau 4.13 Variation des Paramètres de l'Essai UCS avec le Temps de Cure.....	112

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre 2. Recherche Bibliographique.

Figure 2.1 Structure du tétraèdre $\text{SiO}_4$ .....	7
Figure 2.2 Structure de l'octaèdre $\text{Al}_2\text{O}_6$ .....	7
Figure 2.3 Structure cristallographique des argiles.....	8
Figure 2.4 Triangle de gradation granulométrique pour l'aide à sélectionner le type d'additif.....	16
Figure 2.5 Effet de l'addition de chaux sur la plasticité de l'argile de London (Sherwood 1967).....	22
Figure 2.6 Abaque pour la détermination de la teneur en chaux initiale (MIL-STD-619B).....	26
Figure 2.7 Influence des teneurs en chaux sur les résistances de compression des sols à 28 et 45jrs (FZ. Aissiou 2009).....	28
Figure 2.8 Histogramme de résistances de compression des sols en fonction des dosages en chaux à 28jrs et 45jrs (FZ. Aissiou 2009).....	28
Figure 2.9 Courbe de variation des résistances de cisaillement des deux sols en fonction des dosages de chaux (FZ. Aissiou 2009).....	29
Figure 2.10 Histogramme de variation de l'angle de frottement des deux sols en fonction des dosages de chaux (FZ. Aissiou 2009).....	29
Figure 2.11 Variation de la limite de liquidité et de plasticité en fonction de l'addition de chaux (M. A. Sakr et al 2008).....	30
Figure 2.12 Variation de la limite de liquidité et de plasticité en fonction du temps de cure (M. A. Sakr et al 2008).....	30
Figure 2.13 Courbes contrainte-déformation pour l'argile non traitée et traitées à la chaux (M. A. Sakr et al 2008).....	31
Figure 2.14 Effets de la chaux sur (a) compression simple (b) module d'élasticité (c) cohésion non drainée (M. A. Sakr et al 2008).....	31
Figure 2.15 Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg (Paul Quigley Beng 2006).....	32
Figure 2.16 Limite de plasticité en fonction des pourcentages de chaux pour les différentes argiles (Khairul Anuar Kassim 2004).....	33
Figure 2.17 Influence de la chaux sur l'UCS pour différents sols (Kh. A. Kassim 2004).....	34
Figure 2.18 Influence du temps de cure sur l'UCS pour différents sols (Kh. A. Kassim 2004).....	35
Figure 2.19 Influence du 3% de chaux sur la courbe de compactage (Giacomo Russo 2004).....	36
Figure 2.20 Variation de l'indice de plasticité en fonction de la limite de liquidité (M. Afès 1999)....	38

Figure 2.21 Courbe Proctor de l'argile non traitée et traitée à la chaux, Evolution des caractéristiques de compactage en fonction du pourcentage de chaux (M. Afès 1999).....	38
Figure 2.22 Effet de l'addition de chaux sur les limites d'Atterberg, argile Warwick-Killarney (Peter Evans 1997).....	39
Figure 2.23 Effet de l'addition de chaux sur les limites d'Atterberg, argile Cunningham (Peter Evans 1997).....	39
Figure 2.24 Effet de l'addition de chaux sur le pH de l'argile Warwick-Killarney (Peter Evans 1997). .....	40
Figure 2.25 Effet de l'addition de chaux sur le pH de l'argile Warwick-Killarney (Peter Evans 1997). .....	40
Figure 2.26 Influence du temps de cure sur l'UCS (Peter Evans 1997).....	40
Figure 2.27 Limites de plasticité, de liquidité pour Kaolinite, Montmorillonite et Quartz avec l'addition de la chaux (F. G. Bell 1989-1996).....	42
Figure 2.28 Variation de la compression simple avec l'addition de la chaux pour (1) Montmorillonite (2) Kaolinite et (3) Quartz (F. G. Bell 1989-1996). ....	43
Figure 2.29 Variation du module d'élasticité avec l'addition de la chaux (F. G. Bell 1989-1996). ....	44
Figure 2.30 Courbes de compactage de (a) Upper Boulder clay (b) Tees Laminated Clay à 0, 3 et 6% de chaux (F. G. Bell 1989-1996).....	45
Figure 2.31 Variation de la compression simple avec l'addition de la chaux pour (a) Tees Laminated Clay (b) Upper Boulder Clay. Avec l'influence de la température (F. G. Bell 1989-1996). ....	45
Figure 2.32 Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg pour l'argile Kimmeridge Clay en fonction du temps de cure (K. E. Clare 1988).....	46
Figure 2.33 Influence de la chaux sur le pH de l'argile Kimmeridge Clay (K. E. Clare 1988).....	47

### **Chapitre 3. Matériaux et Méthodes d'Essais.**

Figure 3.1 Spectre de Réponse XRD.....	50
Figure 3.2 Courbe Granulométrique.....	53
Figure 3.3 Limite de Liquidité pour l'Argile Kaolinite DD3.....	54
Figure 3.4 Situation du Sol Kaolinite DD3 sur le Diagramme de Casagrande.....	56
Figure 3.5 Courbe de Compactage pour l'Argile Kaolinite DD3.....	57
Figure 3.6 Essai de Compression Simple (UCST) pour l'Argile Kaolinite DD3.....	58
Figure 3.7 Cercle de Mohr pour l'argile Kaolinite DD3.....	58
Figure 3.8 Courbes Contrainte de Cisaillement – Déplacement Horizontal.....	59
Figure 3.9 Courbe Intrinsèque de l'Argile Kaolinite DD3.....	60
Figure 3.10 Malaxeur Mécanique (Laboratoire de Mécanique des Sols).....	62

Figure 3.11 Mesure du pH (Méthode de Eades et Grim).....	64
Figure 3.12 Courbe de Compactage Proctor Normal – Moule Réduit (Kaolinite DD3).....	66

#### Chapitre 4. Résultats et Interprétations.

Figure 4.1 Limite de Liquidité pour l'Argile non Traitée.....	69
Figure 4.2 Limite de Liquidité pour l'Argile Traitée à 1% de Chaux.....	69
Figure 4.3 Limite de Liquidité pour l'Argile Traitée à 2% de Chaux.....	70
Figure 4.4 Limite de Liquidité pour l'Argile Traitée à 3% de Chaux.....	70
Figure 4.5 Limite de Liquidité pour l'Argile Traitée à 4% de Chaux.....	71
Figure 4.6 Limite de Liquidité pour l'Argile Traitée à 5% de Chaux.....	71
Figure 4.7 Limite de Liquidité pour l'Argile Traitée à 6% de Chaux.....	72
Figure 4.8 Limite de Liquidité pour l'Argile Traitée à 7% de Chaux.....	72
Figure 4.9 Limite de Liquidité pour l'Argile Traitée à 8% de Chaux.....	73
Figure 4.10 Influence de la Chaux sur la Limite de Liquidité.....	74
Figure 4.11 Influence de la Chaux sur la Limite de Plasticité.....	75
Figure 4.12 Influence de la Chaux sur l'Indice de Plasticité.....	77
Figure 4.13 Influence de la Chaux sur les Limites d'Atterberg.....	78
Figure 4.14 Influence de la Chaux sur la Valeur du pH.....	79
Figure 4.15 Courbe de Compactage (Proctor Normal) - Sol non Traité.....	80
Figure 4.16 Courbe de Compactage (Proctor Normal) - Sol Traité avec 1% de Chaux.....	81
Figure 4.17 Courbe de Compactage (Proctor Normal) - Sol Traité avec 2% de Chaux.....	81
Figure 4.18 Courbe de Compactage (Proctor Normal) - Sol Traité avec 3% de Chaux.....	82
Figure 4.19 Courbe de Compactage (Proctor Normal) - Sol Traité avec 4% de Chaux.....	82
Figure 4.20 Courbe de Compactage (Proctor Normal) - Sol Traité avec 5% de Chaux.....	83
Figure 4.21 Courbe de Compactage (Proctor Normal) - Sol Traité avec 6% de Chaux.....	83
Figure 4.22 Influence d'Addition de la Chaux sur la Courbe de Compactage.....	84
Figure 4.23 Influence de la Chaux sur la Masse Volumique Sèche Maximale $\rho_{dmax}$ .....	85
Figure 4.24 Influence de la Chaux sur la Teneur en Eau Optimale $w_{opt}$ .....	85
Figure 4.25 Courbe Contrainte-Déformation pour le Sol non Traité.....	86
Figure 4.26 Courbe Contrainte-Déformation pour le Sol Traité avec 1% de Chaux.....	87
Figure 4.27 Courbe Contrainte-Déformation pour le Sol Traité avec 2% de Chaux.....	88
Figure 4.28 Courbe Contrainte-Déformation pour le Sol Traité avec 3% de Chaux.....	88
Figure 4.29 Courbe Contrainte-Déformation pour le Sol Traité avec 4% de Chaux.....	89
Figure 4.30 Courbe Contrainte-Déformation pour le Sol Traité avec 5% de Chaux.....	90

Figure 4.31 Courbe Contrainte-Déformation pour le Sol Traité avec 6% de Chaux. ....	90
Figure 4.32 Influence de l'Addition de la Chaux sur la Courbe Contrainte-Déformation. ....	92
Figure 4.33 Influence de l'Addition de la Chaux sur la Contrainte Axiale. ....	93
Figure 4.34 Influence de l'Addition de la Chaux sur la Déformation Axiale. ....	93
Figure 4.35 Influence de l'Addition de la Chaux sur le Module d'Élasticité. ....	94
Figure 4.36 Courbe Contrainte de Cisaillement – Déplacement (Sol non Traité). ....	95
Figure 4.37 Courbe Intrinsèque pour le Sol non Traité. ....	96
Figure 4.38 Courbe Contrainte de Cisaillement – Déplacement (Sol + 2% Chaux). ....	96
Figure 4.39 Courbe Intrinsèque pour le Sol Traité avec 2% de Chaux. ....	97
Figure 4.40 : Courbe Contrainte de Cisaillement – Déplacement (Sol + 4% Chaux). ....	98
Figure 4.41 Courbe Intrinsèque pour le Sol Traité avec 4% de Chaux. ....	98
Figure 4.42 Courbe Contrainte de Cisaillement – Déplacement (Sol + 6% Chaux). ....	99
Figure 4.43 Courbe Intrinsèque pour le Sol Traité avec 6% de Chaux. ....	100
Figure 4.44 Influence de la Chaux sur la Contrainte de Cisaillement Maximale. ....	101
Figure 4.45 Influence de la Chaux sur le Déplacement Horizontal. ....	102
Figure 4.46 Influence de la Chaux sur la Cohésion. ....	102
Figure 4.47 Influence de la Chaux sur l'Angle de Frottement Interne. ....	103
Figure 4.48 Courbe Contrainte-Déformation (Sol Traité à 3% et Conservé pour 1 jour). ....	104
Figure 4.49 Courbe Contrainte-Déformation (Sol Traité à 3% et Conservé pour 3 jrs). ....	105
Figure 4.50 Courbe Contrainte-Déformation (Sol Traité à 3% et Conservé pour 7 jrs). ....	106
Figure 4.51 Courbe Contrainte-Déformation (Sol Traité à 3% et Conservé pour 14 jrs). ....	106
Figure 4.52 Courbe Contrainte-Déformation (Sol Traité à 3% et Conservé pour 21 jrs). ....	107
Figure 4.53 Courbe Contrainte-Déformation (Sol Traité à 3% et Conservé pour 28 jrs). ....	108
Figure 4.54 Influence du Temps de Cure sur l'Essai UCST (Sol Traité à 3% de Chaux). ....	109
Figure 4.55 Influence du Temps de Cure sur la Contrainte Axiale. ....	110
Figure 4.56 Influence du Temps de Cure sur la Déformation Axiale. ....	110
Figure 4.57 Influence du Temps de Cure sur le Module d'Élasticité. ....	111
Figure 4.58 Variation de la Droite Initiale (E) avec le Temps de Conservation. ....	111

## Chapitre 1

# INTRODUCTION

La volonté d'aménagement du territoire conduit au développement des infrastructures telles que routes, autoroutes, voies de chemins de fer ou plates-formes industrielles dont l'implantation requiert des travaux de terrassement.

Ces terrassements concernent la réalisation de *remblais, de couches de forme et d'assises*. Toutefois, la nature des terrains rencontrés à l'Est Algérien ne permettent pas une extraction importante de quantité de sol nécessaire pour la réalisation de ces structures. Le transport de ces matériaux à partir des wilayas de voisinage revient très coûteux ce qui par conséquent augmente les prix des projets. La solution à ce problème nécessite l'utilisation des matériaux locaux qui seront par la suite traités a fin d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques et répondre aux exigences des normes imposées par les institutions des travaux publiques.

Le site Djebel DEBBAGH située à 35Km du Nord-Ouest de la ville de Guelma recèle un gisement d'argile dont les propriétés physiques et mécaniques sont méconnues.

La mine SOALKA est mise en exploitation par l'Entreprise Nationale des Produits Miniers Non-Ferreux et des Substances Utiles (ENOF) du ministère de l'énergie et des mines. SOALKA extrait trois types d'argiles en vue de leur utilisation dans l'industrie de la céramique. Le gisement est encaissé dans 74 cavités karstiques. Trois produits sont actuellement exploités, à savoir :

- DD1 Kaolins de première qualité (utilisé pour la fabrication de la porcelaine);
- DD2 Kaolins de deuxième qualité (utilisé pour la fabrication des faiences);
- Et la troisième qualité Kaolinite DD3, cette argile est de couleur grise dû à un fort pourcentage de magnésium et par conséquent ne trouve pas preneur en vue de son utilisation dans l'industrie et *reste alors en tant que déchet industriel* en grandes quantités sur site.

L'objectif de ce sujet est d'essayer de valoriser la Kaolinite DD3 dans les constructions linéaires et résoudre ainsi un problème environnemental dû aux énormes dépôts d'argile sur

sites. Ce qui nécessite une étude géotechnique sur le produit et soumettre des propositions pour son exploitation. Cette étude est basé principalement sur la caractérisation de l'argile Kaolinite DD3 et trouver les moyens pour assurer sa stabilité et de permettre son utilisation dans la construction routière.

La technique proposée dans ce sujet pour assurer la stabilité de cette argile et améliorer ses propriétés géotechniques est la technique de traitement à la chaux.

La thèse comporte avec ce premier chapitre d'introduction quatre autres chapitres.

Le *Chapitre 2* expose une revue bibliographique contient un rappel sur la minéralogie des sols argileux, un aperçu sur la chaux et les différents types de chaux, la stabilisation chimique et la sélection des additifs, le traitement des sols à la chaux, le mécanisme de stabilisation, la détermination des différents teneurs en chaux et un résumé des études préalables sur le traitement des sols à la chaux.

Matériaux et méthodes d'essais est le titre donné au *chapitre 3* qui présente une première partie contient l'identification et la caractérisation des matériaux utilisés dans cette étude ainsi que les résumés des essais réalisés et la discussion de leurs résultats. Le matériau principal étant l'argile Kaolinite DD3 originaire du gisement de Djebel DEBBAGH de la wilaya de Guelma. Ce dernier a été caractérisé par, *des analyses chimiques, minéralogiques, la teneur en matière organique (TMO), le poids spécifique ( $G_s$ ), la granulométrie, les limites d'Atterberg ( $W_L$ ,  $W_p$ ,  $I_p$ ), la classification selon l'USCS, le compactage au Proctor normal, le cisaillement direct et la compression simple*. Cette première partie contient aussi l'identification et la caractérisation physico-chimique de la chaux utilisée comme additif. La deuxième partie présente *les méthodes pour la préparation des éprouvettes (sol-chaux), le malaxage, la conservation, la détermination des pourcentages de chaux à ajouter et la réalisation des essais mécaniques*.

L'objectif du *chapitre 4* est de suivre la variation des limites d'Atterberg, de la valeur du pH, des paramètres de compactage, de la compression simple et des paramètres de cisaillement direct avec l'addition des différents pourcentages de chaux. L'influence du temps de cure sur la compression simple de l'argile Kaolinite DD3 traitée à un pourcentage optimum a aussi fait l'objet de cette étude. Ces essais permettent de mieux comprendre le comportement de la Kaolinite DD3 vis-à-vis le traitement à la chaux et le temps de cure. Ces

différents résultats sont présentés, discutés et commentés dans ce chapitre qui prend le titre « Résultats et Interprétations ».

Le *chapitre 5* présente les conclusions obtenues de cette étude ainsi que les recommandations proposées.

## Chapitre 2

# RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

### Introduction.

Cette analyse bibliographique s'appuie sur des articles publiés dans la littérature scientifique et les rapports techniques liés au domaine de stabilisation des remblais et des couches de formes routières.

Ce chapitre est destiné à décrire la complexité des sols argileux, un aperçu sur la chaux, et à faire le point sur les connaissances relatives aux mécanismes de stabilisation des sols argileux à l'aide de traitements chimiques et les méthodes de sélection d'additifs. Ainsi qu'un résumé de quelques études préalablement faites liées au sujet de stabilisation à la chaux.

### Historique.

L'ajout de la chaux aux sols pour améliorer leurs l'utilisation dans les constructions n'est pas une récente innovation, mais il à une grande histoire. Plusieurs formes de la stabilisation à la chaux ont été utilisées pendant des centaines d'années. Jusqu'à l'innovation du ciment Portland dans le 19<sup>ème</sup> siècle, la chaux a été largement utilisée pour la construction des ouvrages. Les pyramides de Shersi dans le Tibet ont été construire en utilisant des mélanges argile-chaux. La Grande Muraille de Chine a été construire en utilisant le mortier stabilisé à la chaux. En 1959 McDowel a mentionné que la stabilisation des routes en terre a été utilisée en Mésopotamie et Egypt. Les indiens, Grecs et les Romains ont aussi utilisés le mélange sol-chaux dans leurs grande histoire.

Récemment les premiers essais concernant la stabilisation des sols ont été faits dans l'USA en 1904 (Clare and Cruchley, 1957). Premièrement, la chaux a été utilisée comme agent de stabilisation des sols dans les constructions modernes en 1924 et un usage limité dans le renforcement des autoroutes par l'ajout de la chaux hydratée (McCaustland, 1925). Environ 1930, et vue l'extension des routes suite à la propagation des véhicules, la stabilisation des sols débute sa développement. La technique de stabilisation été largement utilisé durant la deuxième guerre mondiale dans la construction des routes et piste d'aviation.

Aux Etats Unies depuis 1940 les techniques des essais de la mécanique des sols au laboratoire ont été développés et appliqués sur la combinaison sol-chaux. Le traitement des argiles à la chaux est débuté en 1950 et cette technique est rapidement et largement utilisée au présent. Des milles kilomètres des routes, autoroutes ainsi que les aéroports, comme celui de Dallas Fort Worth Airport, ont été construits par l'utilisation de l'argile stabilisée à la chaux.

Au Royaume Unie les travaux au laboratoire ont été débutés entre 1950 et 1960, et cette technique n'était pas utilisé largement au UK jusqu'à la fin des années 1970. Mais après 1980 la technique est généralisée principalement au sud-est d'Angleterre.

La technique du traitement des sols a été utilisée en France dès la fin des années soixante et, jusqu'au milieu des années soixante-dix, principalement appliquée à la réutilisation en remblai des sols sensibles à l'eau et humides. Elle a ainsi permis de réaliser, dans de bonnes conditions techniques, économiques et de délais, les grands travaux de terrassement nécessités par la construction des programmes autoroutiers du Nord, de l'Est et de l'Ouest de la France, ainsi que l'aéroport de Roissy-Charles de Gaulle.

Aujourd'hui, cette technique de stabilisation est largement utilisée dans le monde pour améliorer leurs utilisation dans le domaine de construction. Elle est utilisé dans la construction routière pour améliorer la fondation et la couche de forme routière, les chemins de fer, les pistes d'aéroport, les remblais, les talus instables...etc.

Malheureusement, en Algérie jusqu'à maintenant cette technique n'est pas largement utilisée dans la construction routière. Mais en a déjà été utilisée dans la stabilisation des sols de DAR EL BEIDA (Aéroport d'Alger HOUARI BOUMEDIENE 1984).

## **1. RAPPELS MINÉRALOGIQUE SUR LES SOLS ARGILEUX.**

### *1.1. Les minéraux.*

Les sols sont constitués de particules de minéraux regroupées en agrégats. Ces minéraux sont stables ou en train d'évoluer dans les conditions thermo-barométriques et climatiques de la surface de la terre. Généralement y sont rencontrés :

- Le quartz ;
- Les argiles ;
- Les feldspaths (potassiques et plagioclases) ;

- Les micas ;
- Les carbonates (calcite et dolomite) ;
- Les oxydes et hydroxydes métalliques dont l'hématite, la goethite et la limonite pour le fer.

Ces minéraux se présentent généralement dans les sols sous forme :

- De grains polygonaux plus ou moins réguliers dont la taille se situe entre quelques microns et quelques millimètres.
- De lamelles pour les argiles dont la plus grande dimension ne dépasse pas quelques microns.
- D'agrégats correspondant à des fragments de roches. Leurs formes résultent de la morphologie des minéraux les constituant.

Les propriétés physiques et mécaniques du sol dépendent de la nature des assemblages minéraux. Ainsi les minéraux granulaires (quartz, carbonates) n'ont pas de cohésion propre. Seules les argiles présentent une cohésion, qui résulte d'interactions spécifiques avec l'eau.

Les argiles.

Il est nécessaire de présenter les structures cristallographiques des différentes familles d'argile (communes) pour mieux comprendre les relations entre l'eau et l'argile.

Les argiles ainsi que les micas font partie de la famille des phyllosilicates. Le réseau cristallographique des phyllosilicates est basé sur un réseau de tétraèdres  $\text{SiO}_4$  (Figure 2.1). Chaque tétraèdre  $\text{SiO}_4$  partage 3 sommets avec les tétraèdres voisins ; l'ensemble des sommets partagés constitue un assemblage plan hexagonal. Le sommet du tétraèdre qui n'est pas dans le plan, est partagé avec un octaèdre  $\text{AlO}_6$  (Figure 2.2). C'est l'association de couches tétraédriques (T) et de couches octaédriques (O) qui constitue le motif du réseau cristallin de chaque argile.

La minéralogie de chaque argile est définie par un motif appelé feuillet (Figure 2.3) :

- **La structure TO** : le feuillet est constitué d'une couche de tétraèdres surmontée d'une couche d'octaèdres. Son épaisseur est de 7 Å. Chaque feuillet est relié à un autre feuillet par l'intermédiaire des liaisons changeantes de type hydrogène. La propriété de cette liaison est

de permettre la cohésion du cristal tout en laissant la possibilité de clivage de différentes feuilles. La kaolinite est de ce type. Sa composition chimique est  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ .



Figure 2.1 Structure du tétraèdre  $\text{SiO}_4$ .

Les 4 atomes d'oxygène forment un tétraèdre. L'atome de silicium est au centre de cette structure. Le réseau est formé par l'arrangement hexagonal des tétraèdres. Ce motif hexagonal se reproduit à l'infini dans le plan hexagonal.



Figure 2.2 Structure de l'octaèdre  $\text{Al}_2\text{O}_6$ .

Les 6 atomes d'oxygène forment un octaèdre. L'atome d'aluminium est au centre de cette structure. Le réseau est formé par l'arrangement linéaire des octaèdres.

- **La structure T O T** : elle correspond à une couche d'octaèdres encadrée par deux couches de tétraèdres. L'épaisseur du feuillet est de 10 Å. Les couches tétraédriques peuvent soit contenir des atomes de silicium et d'oxygène (groupe du talc), soit présenter une substitution partielle des atomes de silicium par des atomes d'aluminium. Dans ce cas, les feuillets présentent un manque en charges positives (substitution  $\text{Si}^{4+}$  par  $\text{Al}^{3+}$ ). Par compensation, des cations sont introduits au sein du réseau cristallin des phyllosilicates :

- **Groupe de la smectite** : une partie des atomes d'aluminium de la couche octaédrique est remplacée par des atomes de magnésium certainement de fer. La compensation des charges négatives excédentaires s'effectue par l'introduction dans l'espace interfoliaire (espace séparant deux triples consécutifs T O T) d'un cation ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ). Ces cations interfoliaires ont la particularité de pouvoir être solvatés par des molécules d'eau qui provoquent le gonflement du cristal : l'espace interfoliaire passe de 14 à 17 Å en présence de  $\text{Ca}^{2+}$  et de 13 Å jusqu'à l'infini pour  $\text{Na}^+$ . Il existe plusieurs minéraux argileux dans le groupe des smectites, entre autres, la montmorillonite :  $(\text{Al}_{1,67}\text{Mg}_{0,33})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

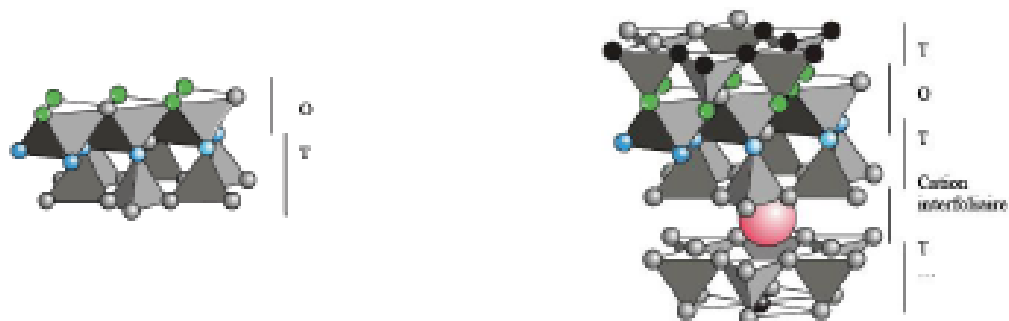
○ *Groupe de vermiculite* : il existe des substitutions au niveau des octaèdres entre l'aluminium, le fer et le magnésium et au niveau des tétraèdres entre le silicium et l'aluminium. Le minéral vermiculite a donné son nom à ce groupe :



○ *Groupe de l'illite* : un quart des atomes de silicium dans les tétraèdres est remplacé par des atomes d'aluminium. La compensation des charges négatives s'effectue par l'introduction dans l'espace interfoliaire d'un cation :  $\text{K}^+$ . Le cation interfoliaire lie les feuillets les uns aux autres. Cette structure confère au cristal d'illite une plus grande rigidité que celle du cristal de kaolinite. La composition minéralogique de l'illite est :



Comme il est constaté le terme d'argile est générique. Il regroupe des minéraux chimiquement et physiquement différents. Dans un sol, une argile peut avoir deux origines : détritique (transportée) ou chimique (diagénétique = cristallisée « sur place » ou d'altération d'une formation existante).



*Structure du feuillet de la kaolinite : une couche de tétraèdres  $\text{SiO}_4$  (T) surmontée par une couche d'octaèdres  $\text{AlO}_6$  (O).*

*Structure du feuillet de l'illite, de la smectite et de la vermiculite : deux couches de tétraèdres  $\text{SiO}_4$  (T) encadrant une couche d'octaèdres  $\text{AlO}_6$  (O). Le cation interfoliaire lie deux feuillets consécutifs.*

**Figure 2.3** Structure cristallographique des argiles.

Si l'argile a une origine chimique, le gisement est homogène tant que la chimie du site est homogène et que les réactions de cristallisation et/ou d'altération sont identiques. Deux grands modes d'altération existent :

- *L'altération superficielle* liée à l'infiltration des eaux de surface affectant tout le massif et dont l'ampleur est en relation directe avec la proximité de la surface ;
- *L'altération hydrothermale*, liée à la circulation de fluides (liquides ou gazeux), qui reste un phénomène local.

Si les argiles ont une origine détritique, le gisement peut receler une hétérogénéité dans la nature de ces argiles (autant que de sites d'érosion).

La présence, la nature et la teneur en argile dans un sol donné sont donc directement liées à l'histoire géologique de la région. D'autres caractéristiques telles que la présence d'éléments chimiques solubles ou de matière organique ou encore la microstructure du sol résultent aussi de l'histoire géologique.

### *1.2. Les substances minérales solubles.*

Certaines roches sont naturellement plus riches que d'autres en minéraux accessoires tels que le gypse et la pyrite.

La pyrite,  $\text{FeS}_2$ , est observable, entre autres, dans les marnes. Dans les conditions de surface, elle s'altère rapidement et forme des oxydes métalliques et des sulfates.

Le gypse,  $\text{Ca SO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ , peut également être présent initialement ou provenir de l'altération de pyrite. Les eaux séléniteuses apportent du sulfate dans des formations qui peuvent en être dépourvues.

Selon les conditions d'altération, les substances issues de l'hydrolyse des minéraux (entre autres les oxydes de silicium, d'aluminium et de fer) se combinent sous la forme de silicates et/ou de gels amorphes de silice.

D'autres substances ont une origine extérieure au sol : ce sont par exemple les engrais utilisés pour l'agriculture. Les apports en fertilisants chimiques et organiques modifient la chimie du sol. Les agriculteurs apportent quelquefois en excès les nutriments nécessaires aux plantes et une partie de ces produits se minéralise dans les sols. Les engrais chimiques les plus employés sont :

- Le nitrate d'ammonium,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  appelé couramment « ammo-nitrate ».

- Le « superphosphate » qui est un mélange de phosphate monocalcique et de sulfate de calcium.

Dans le sol, ces sources sont naturellement présentes en faible quantité. Elles proviennent de la décomposition de la matière organique fraîche.

### *1.3. La matière organique.*

Dans les sols, le terme de matière organique regroupe tous les produits constitués de molécules carbonées. Cette matière organique peut avoir deux origines : une origine récente liée au développement d'un sol pédologique ou une origine ancienne dont la formation est associée à la genèse de la roche.

Les horizons riches en matières organiques sont divers :

- le sol de surface qui correspond au sol pédologique constitué
  - de matières organiques fraîches en train de débiter leur décomposition mais qui sont encore riches en fibres végétales (cellulose, ...)
  - de matières organiques déjà plus évoluées où les fibres végétales ont disparu
- les sols fossiles
  - les tourbières riches en fibres végétales
  - les paléosols, anciens sols pédologiques enterrés sous d'autres formations sédimentaires
- les sols initialement dépourvus de matière organique et immergés par la circulation de fluides riches en matières organiques
- les roches mères ou réservoirs de matières organiques fossiles.

## **2. APERÇUS SUR LA CHAUX.**

### *2.1. Origine de la chaux.*

La source de production de la chaux est la roche de *Calcaire* (Carbonate de Calcium  $\text{CaCO}_3$ ) qui se produit comme roche sédimentaire. Quand la terre est pulvérisée, le carbonate de calcium s'adresse comme chaux d'agriculture. Elle peut être utilisée pour neutraliser les sols acides. Pour le génie civil ou les applications de bâtiment, plusieurs formes de chaux sont requises.

## 2.2. Types de Chaux.

Plusieurs types de chaux ont été utilisés comme agents de stabilisation pendant nombreuses années avec succès. Cependant, le produit le plus utilisé étant la chaux hydratée d'une teneur plus élevée de calcium, chaux vive calcique, lait de chaux et chaux dolomitique, chacune d'entre elles présentant avec les sols des interactions spécifiques.

### ◆ Chaux Vive.

Le carbonate de calcium doit être chauffé à une température très élevée (calcination ou brûlage), pour former la *chaux vive* qui est principalement constituée de 90% d'Oxyde de Calcium (CaO). Elle s'appelle aussi *chaux brûlée*. La réaction se fait selon l'équation :



La réaction étant réversible, la chaux vive produite peut, après hydratation par l'humidité ambiante se recarbonater lentement sous l'action du CO<sub>2</sub> atmosphérique avec formation d'une prise à l'air d'où la qualification de « chaux aérienne » (par opposition à « chaux hydraulique »).

### Avantages.

- La chaux vive est économique, car elle est une forme plus concentrée de chaux que la chaux hydratée, contenant 20 à 24% de CaO en plus,
- Un pourcentage de 3% de la chaux vive est normalement équivalent à 4% de chaux hydratée lorsque les conditions permettent une hydratation complète de la chaux vive en présence d'une quantité suffisante d'eau,
- La chaux vive est plus dense que la chaux hydratée nécessitant moins d'espace de stockage et de transportation,
- La chaux vive est beaucoup moins poussiéreuse que la chaux hydratée.
- La chaux vive produit une réduction importante de la teneur en eau due à l'hydratation et l'évaporation. Il est particulièrement bénéfique aux sols humides,

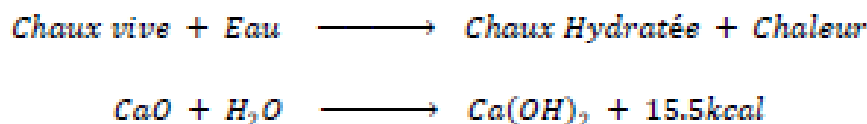
- La chaux vive génère de la chaleur par la réaction exothermique ce qui accélère le gain de la résistance. C'est un avantage de plus pour les zones d'un climat tempéré comme celle constatée à l'Est Algérien où la période de construction peut être prolongée.

#### Inconvénients.

- La chaux vive exige 32% de son poids d'eau pour l'hydratation et peut y avoir d'importantes pertes d'évaporation supplémentaire due à la chaleur d'hydratation.
- Il faut veiller à l'utilisation de chaux vive pour assurer plus suffisamment d'eau, adoucissement et malaxage.
- La chaux vive peut exiger plus de mélange que chaux hydratée ou le lait de chaux, car les particules plus grandes doivent d'abord réagir avec l'eau pour former la chaux hydratée et ensuite mélangé avec le sol.

#### ❖ Chaux Hydratée.

La chaux hydratée (aérienne ou éteinte) est créé lors de la chaux vive réagit chimiquement avec l'eau. Elle est constituée surtout d'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). L'hydratation se fait selon l'équation :



Elle est dite «aérienne», car elle réagit avec le  $\text{CO}_2$  de l'air. Elle réagit avec les particules d'argile et se transforme en permanence entre eux dans une matrice cimentaire forte.

#### Avantages.

- Peut être appliquée plus rapidement que lait de chaux.
- La chaux hydratée sèche peut être utilisé pour le séchage d'argile, mais ce n'est pas aussi efficace que la chaux vive.

#### Inconvénients.

- Les particules de chaux hydratée sont fines.
- La poussière peut pausée un problème dans les régions urbaines.

### ❖ Lait de Chaux.

Le lait de chaux est une suspension d'hydroxyde de calcium dans l'eau. Il est donc fluide et facile à utiliser.

#### Avantages.

- L'absence du problème de poussière.
- Plus facile pour réaliser la même distribution et former un mélange homogène.
- Moins d'eau supplémentaire est nécessaire pour le mélange final.

#### Inconvénients.

- L'exécution des travaux prend beaucoup de temps.
- Les coûts plus élevés en raison des exigences de l'équipement supplémentaire.
- Ne peut pas être pratiques dans les sols très humides.
- Pas pratique pour les applications de séchage.

### ❖ Chaux Dolomitique.

La chaux dolomitique ( $MgO$   $CaO$ ) est produite à partir de gisements de calcaire dolomitique de qualité supérieur, c'est-à-dire du calcaire contenant entre 35 et 46% de carbonate de magnésium ( $MgCO_3$ ). Elle est un composé chimique couramment utilisé. Il s'agit d'un solide blanc, caustique, alcalin et cristallin. Sous sa forme commerciale, la chaux dolomitique renferme souvent de petites quantités de dioxyde de silicium, d'oxydes d'aluminium et de fer à l'état de traces.

Dans certains cas, la chaux dolomitique est utilisée pour la stabilisation des sols. La chaux dolomitique peut bien performer dans la stabilisation des sols, bien que la fraction de magnésium réagit plus lentement que la fraction de calcium.

#### Remarques.

Parfois, le terme «chaux» est utilisé pour décrire la chaux agricole, qui est généralement calcaire broyé finement, un amendement du sol utile, mais non chimiquement assez actifs pour conduire à la stabilisation des sols.

Le terme «Chaux» est aussi parfois utilisé pour décrire les sous-produits du processus de fabrication de la chaux (comme la poussière de four à chaux), qui, bien qu'ils contiennent de la chaux réactive, n'ont en général qu'une fraction de l'oxyde ou hydroxyde de contenu du produit fabriqué.

La chaux hydratée a été utilisée plus souvent à cause elle est moins caustique que la chaux vive, mais l'utilisation de la chaux vive dans la stabilisation des sols est en augmentation ces dernières années. Dans le cas de cette recherche la chaux vive est utilisée pour la stabilisation du sol.

### **3. STABILISATION CHIMIQUE DES SOLS ARGILEUX.**

Plusieurs techniques sont actuellement utilisées dans le monde pour la stabilisation des sols argileux des assises de chaussées. Parmi ces techniques, La stabilisation chimique par additifs et liants hydrauliques est souvent considérée comme technique économique et alternative aux méthodes traditionnelles de remplacement partiel ou complet des sols mous par d'autres sols de bonne qualité.

Chaux, ciment Portland, cendres volantes, bitumes et autres matériaux chimiques ou des combinaisons de ces matériaux sont largement utilisés avec succès pour la stabilisation des sols mous.

La sélection du type et la détermination du pourcentage d'additif qui sera utilisé, dépendent de la classification du sol et le degré d'amélioration désirée dans la qualité du sol.

#### **3.1.Sélection des Additifs pour la Stabilisation.**

Dans le choix d'un stabilisateur, les facteurs qui doivent être considérés sont :

- le type du sol,
- l'objectif pour lequel la couche stabilisée sera utilisé,
- le type d'amélioration désirée des sols,
- la résistance nécessaire et la durabilité de la couche stabilisée,
- le coût et les conditions environnementales.

Il peut y avoir plus d'un seul stabilisateur candidat pour un type de sol, toutefois, il existe des règles générales pour choisir les stabilisateurs souhaitables en basant sur la granulométrie

et la plasticité ou la classification du sol. Le ciment Portland par exemple est utilisé avec plusieurs types de sol en évitant les matériaux les plus plastiques. Généralement, le ciment est le meilleur stabilisateur pour les matériaux granulaires bien gradués avec une quantité suffisante des fines pour produire une matrice homogène d'agrégats. La chaux réagit surtout avec les sols de plasticité moyenne à élevée pour produire une diminution de la plasticité, une augmentation de la maniabilité, une réduction du gonflement, et un accroissement dans la résistance. Elle est utilisée pour stabiliser divers matériaux, y compris les sols de fondation faibles, en les transformant en une « table de travail » ou couche de fondation, ainsi avec les matériaux marginalement granulaires constituant la couche de base, à savoir, les argiles graveleuses, graviers « sales », pour former une assise solide et de bonne qualité. Les cendres volantes sont des matériaux pouzzolaniques qui réagit avec la chaux et elles sont utilisées en combinaison avec la chaux dans les sols non ou légèrement plastiques. Elles sont souvent utilisées avec des petites quantités de ciment Portland et la chaux pour augmenter la résistance. Cette combinaison de Chaux-Ciment-Cendres volantes a été utilisée avec succès dans la stabilisation des assises de chaussé. L'asphalte et les matériaux bitumineux, les deux sont utilisés pour étancher et augmenter la résistance. Généralement, les sols appropriés à l'asphalte sont les sables limoneux ou les matériaux granulaires puisque il est désiré pour enrober toutes les particules de sol.

Deux méthodes sont utilisées dans cette étude pour voir si le sol étudié répond aux conditions de stabilisation à la chaux. La première méthode donne une procédure de sélection des stabilisateurs pour chaque type de sol. La deuxième présente des conditions aux sols pour voir si le sol est apte d'être stabilisé à la chaux. Les deux méthodes sont basées sur la composition granulométrique déterminée par la norme ASTM C 136 et les limites d'Atterberg (méthode humide) de la ASTM D 4318.

a. Sélection des additifs (département de l'armée en USA MIL-STD-619B).

La sélection des stabilisateurs candidats est effectué en utilisant la figure 2-1 et le tableau 2-1. Le triangle de gradation des sols dans la figure 2-1 est basé sur la composition granulométrique et il est divisé en zones de sols avec la taille de grains similaires. Le processus de sélection se poursuit avec le tableau 2-1 qui indique pour chaque zone montrée sur la figure 2-1 les stabilisateurs candidats et des restrictions basées sur la granulométrie et/ou l'indice de plasticité (PI). La deuxième colonne du tableau 2-1 contient une liste des symboles de classification des sols, c'est pour vérifier en plus la bonne zone dans le triangle

de la figure 2-1. Les données nécessaires pour l'utilisation du triangle de la figure 2-1 sont : le pourcentage des matériaux passants à travers le tamis N°200 (75µm) et le pourcentage des matériaux passants à travers le tamis N°4 (4.75mm) et retenus par le tamis N°200 (75µm). L'intersection de ces deux valeurs donne la zone du sol dans le triangle (1A, 2A, 3...etc.). Le symbole de la zone déterminée se trouve dans la première colonne et le symbole de classification selon l'USCS dans la deuxième colonne du tableau 2-1. Les stabilisateurs candidats pour chaque zone sont indiqués dans la troisième colonne et les limitations pour l'utilisation de chaque matériau sont dans les colonnes suivantes. Ces limitations sont utilisées pour empêcher l'utilisation des agents de stabilisation non applicables pour les types particuliers de sol à l'étude.

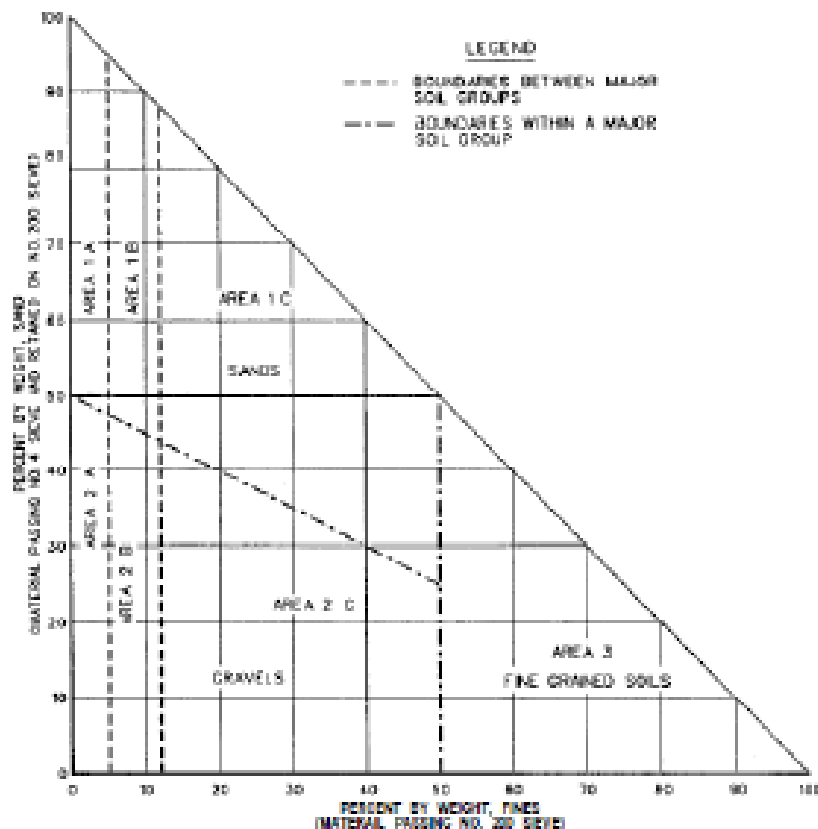


Figure 2-1. Gradation triangle for aid in selecting a commercial stabilizing agent.

Figure 2.4 Triangle de gradation granulométrique pour l'aide à sélectionner le type d'additif.

**Tableau 2.1 Règle pour la sélection d'additif stabilisateur (MIL-STD-619B).**

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>b</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 1.2 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 mate- rial 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 1.2 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 1.2 PI not to exceed 25	Not to exceed 30% by weight	Well-graded material only  Material should contain at least 45% by weight of mate- rial passing No. 4 sieve
3	OH 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 1.2		Organic and strongly acid soils falling within this area are not susceptible to stabilization by ordinary means

<sup>a</sup> Soil classification corresponds to MIL-STD-619B. Restriction on liquid (LL) and plasticity index (PI) is in accordance with Method 109 in MIL-STD-821A.

<sup>b</sup>  $PI \leq 20 + \frac{50 - \text{percent passing No. 200 sieve}}{4}$

#### **b. Méthode de l'Association Nationale de la Chaux aux Etats Unies.**

La méthode de sélection des matériaux apte d'être stabilisés à la chaux est extraite du guide technique de l'Association Nationale de la Chaux (NLA) aux Etats Unies réalisé par le Pr. Dallas Little en 2006. Il mentionne que, généralement tous les sols avec au moins 25% de passant à travers le tamis N°200 (0.75µm) et qui ont un indice de plasticité supérieur ou égal à

10% sont candidats pour la stabilisation à la chaux. Quelques sols ont un indice de plasticité inférieur à 10% peuvent être stabilisés avec succès à la chaux mais ils devraient répondre aux conditions du pH et de résistance.

La relation entre la fraction argileuse dans un sol et l'indice de plasticité est donnée par l'équation de l'activité du sol

$$A_c = \frac{\text{Indice de Plasticité (Ip)}}{\% \text{ de fraction Argileuse}}$$

L'activité est un indice supplémentaire pour voir l'aptitude du sol à la stabilisation à la chaux et le tableau suivant montre les classes d'activité.

**Tableau 2.2** Classes d'activité.

Activité $A_c$	Dénomination
$0 < A_c < 0,5$	inactif
$0,5 < A_c < 0,75$	peu actif
$0,75 < A_c < 1,25$	normal
$1,25 < A_c < 2$	actif
$2 < A_c$	très actif

### Autres considérations.

Autres conditions doivent être présent en considération tel que :

#### *Effets de la Teneur en Matière Organique sur le Sol Traité à la Chaux.*

Les sols qui ont une teneur en matière organique au-dessus de 2% par poids comme déterminé par la méthode ASTM D 2974, peuvent être incapable d'atteindre la résistance de compression simple désirée pour la stabilisation à la chaux. (Dallas Little (2006)). CDF Rogers (1996) indique que le seuil de 2% de matière organique peut être dépassé si la résistance du sol stabilisé est satisfaite.

Le type de la matière organique présente dans le sol influe considérablement sur le processus de stabilisation à la chaux plus que sa quantité (Sherwood, 1993). Plusieurs études ont montré que certains types de sols organiques ont été stabilisés à la chaux avec succès.

Parmi ces études celles faites par M. A. Sakr et al (2008) et Kairul Anuar Kassim (2004) pour deux sols argileux de 14% et 5.8% de matière organique respectivement.

Le tableau suivant donne la classification des sols selon leurs teneurs en matière organique.

**Tableau 2.3 Classification des sols organiques. « *Foundation Engineering Handbook Robert W. Day (2006)* ».**

Major divisions	Organic content	USCS symbol	Typical names	Distinguishing characteristics for visual identification	Typical range of laboratory test results
Organic matter	75–100 percent organics (either visible for inferred)	PT	Fibrous peat (woody, mats, and the like)	Lightweight and spongy. Shrinks considerably on air drying. Much water squeezes from sample	$w = 500\text{--}1200$ percent $\gamma_s = 9.4\text{--}11$ kN/m <sup>3</sup> (60–70 pcf) $G = 1.2\text{--}1.8$ $C_c/(1 + e_0) \geq 0.40$
		PT	Fine-grained peat (amorphous)	Lightweight and spongy. Shrinks considerably on air drying. Much water squeezes from sample	$w = 400\text{--}800$ percent $PI = 200\text{--}500$ $\gamma_s = 9.4\text{--}11$ kN/m <sup>3</sup> (60–70 pcf) $G = 1.2\text{--}1.8$ $C_c/(1 + e_0) \geq 0.35$
Highly organic soils	30–75 percent organics (either visible or inferred)	PT	Silty peat	Relatively lightweight, spongy. Shrinks on air drying. Usually can readily squeeze water from sample	$w = 250\text{--}500$ percent $PI = 150\text{--}350$ $\gamma_s = 10\text{--}14$ kN/m <sup>3</sup> (65 to 90 pcf) $G = 1.8\text{--}2.3$ $C_c/(1 + e_0) = 0.3\text{--}0.4$
		PT	Sandy peat	Sand fraction visible. Shrinks on air drying. Often a "gritty" texture. Usually can squeeze water from sample	$w = 100\text{--}400$ percent $PI = 50\text{--}150$ $\gamma_s = 11\text{--}16$ kN/m <sup>3</sup> (70–100 pcf) $G = 1.8\text{--}2.4$ $C_c/(1 + e_0) = 0.2\text{--}0.3$
Organic soils	5–30 percent organics (either visible or inferred)	OH	Clayey organic silt	Often has strong hydrogen sulfide (H <sub>2</sub> S) odor. Medium dry strength and slow dilatancy.	$w = 65\text{--}200$ percent $PI = 50\text{--}150$ $\gamma_s = 11\text{--}16$ kN/m <sup>3</sup> (70–100 pcf) $G = 2.3\text{--}2.6$ $C_c/(1 + e_0) = 0.2\text{--}0.35$
		OL	Organic sand or silt	Threads weak and friable near plastic limit, or will not roll at all. Low dry strength, medium to high dilatancy	$w = 30\text{--}125$ percent $PI = NP\text{--}40$ $\gamma_s = 14\text{--}17$ kN/m <sup>3</sup> (90 to 110 pcf) $G = 2.4\text{--}2.6$ $C_c/(1 + e_0) = 0.1\text{--}0.25$
Slightly organic soils	Less than 5 percent organics	Use Table 4.1	Soil with slight organic fraction	Depends on characteristics of inorganic fraction	Depends on characteristics of inorganic fraction

Source: NAWFAC EM-7.1 (1982), based on unpublished work by Ayres and Pilon.  
Notes:  $w$  = in situ water content,  $PI$  = plasticity index,  $NP$  = nonplastic,  $\gamma_s$  = total unit weight,  $G$  = specific gravity (soil minerals plus organic matter),  $C_c$  = compression index,  $e_0$  = initial void ratio, and  $C_c/(1 + e_0)$  = modified compression index.

### ***Effets des Sulfates sur le Sol Traité à la Chaux.***

Il est connu depuis longtemps que la présence des sulfates dans un sol traité à la chaux peut causer des problèmes en réagissant avec les matériaux cimentaires produisant et provoquer des soulèvements. C'est une réaction complexe en s'appuyant sur un certain nombre de facteurs, mais les produits formés dans cette réaction occupent un volume plus important que les parties constituantes, entraînant une perte de résistance et une augmentation du volume. Littleton (1995) a conclu que les facteurs contributifs sont les suivants:

- Le type et la solubilité du sulfate,
- La quantité de sulfate,
- La quantité et la taille des particules d'argile présentes,
- La capacité du sol à absorber l'eau au-dessus du niveau que le mélange a été compacté.

Ce sujet est abordé en détail par Perry et al (1995) et les recommandations ont ensuite été publiées dans HA 74/95, DTP Manuel de conception des ponts et chaussées au Royaume Unie.

Il est important de tenir compte que des quantités supplémentaires de sulfate peuvent être introduits par l'eau dans les matériaux traités une fois la construction a été achevée. Il est nécessaire donc de suivre les sulfates dans les eaux souterraines à l'étape de l'investigation du site, et par conséquent tout système de cimentation doit être enterré. La teneur en sulfates solubles maximale a été donnée par CDF Rogers (1996) de 1%.

La capacité des eaux souterraines à pénétrer dans le sol stabilisé à la chaux est en fonction de la perméabilité et donc le compactage est d'une importance fondamentale. Il est essentiel que le sol traité soit compacté à un indice des vides inférieur à 5% et qu'une attention particulière soit prise en considération sur la teneur en eau au moment de compactage pour assurer que cet objectif est réalisable.

#### 4. TRAITEMENT DES SOLS A LA CHAUX.

Le traitement à la chaux est obtenu par l'oxyde de calcium CaO (chaux vive) ou de l'hydroxyde de calcium Ca(OH)<sub>2</sub> (chaux éteinte). La chaux agricole est généralement du carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>). Elle est inefficace pour l'amélioration et la stabilisation des sols. L'effet stabilisateur dépend de la réaction entre la chaux et les minéraux argileux. Les principaux effets de cette réaction sont les suivantes:

- Une augmentation de la résistance au cisaillement et de la capacité portante du sol,
- Une réduction de la susceptibilité au gonflement et retrait,
- Une amélioration de la résistance au trafic et aux intempéries,
- Une réduction de la teneur en eau,
- Une amélioration de la maniabilité et les caractéristiques de compactage.

L'ajout de chaux aux sols à grains fins produit plusieurs réactions:

- *Le séchage par absorption et évaporation.* La réduction de la teneur en eau du sol peut être considérable et se produit immédiatement juste après le mélange de la chaux et le sol.
- *Les réactions physico-chimiques* rapides entre la chaux et les minéraux d'argile produisent de changement immédiat dans la plasticité du sol et sa maniabilité. Ceci est connu comme amélioration ou modification des sols.

- À long terme *les réactions pouzzolaniques* entre la chaux et le sol résulte à la formation des agents de cimentation qui augmentent la résistance et la durabilité. C'est la stabilisation à la chaux.

### Séchage

Si la chaux vive est utilisée pour la stabilisation plutôt que la chaux hydratée. La teneur en eau du sol naturel peut être significativement réduite. La chaux vive prendra immédiatement 32% de sa masse de l'eau environnant du sol et se délitent pour former une chaux hydratée (CDF Rogers 1996). La teneur en eau réelle du sol est, par conséquent, réduit. Ce dessèchement apparent est à cause de l'augmentation de la limite de plasticité. La réaction d'hydratation de la chaux vive est fortement exothermique et la chaleur produite provoque une perte d'eau supplémentaire due à l'évaporation. La perte d'eau par ce moyen peut être égale à la perte d'eau causée par l'hydratation de la chaux vive.

### Amélioration / modification

Lorsque la chaux est mélangée avec un sol contenant des minéraux argileux dans la présence d'eau, un échange de cations s'effectue ce qui produit un nouveau matériau. Le sol se transforme de sa structure naturelle de forme de lamelles à une autre structure de forme d'aiguilles. Il ya donc des changements importants dans les propriétés mécaniques du sol.

L'effet de l'addition de la chaux sur la plasticité argile de Londres a été présenté par Sherwood (1967). L'augmentation importante dans la limite de plasticité et la diminution de l'indice de plasticité sont illustrés sur la figure suivante.

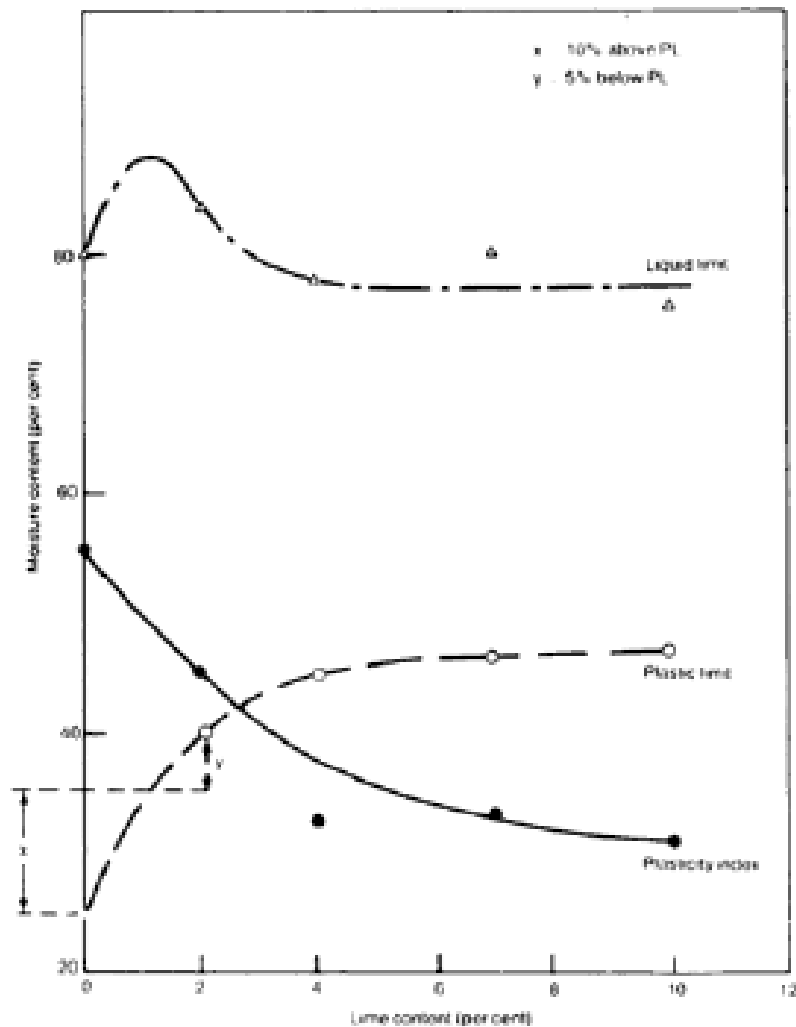


Figure 2.5 Effet de l'addition de chaux sur la plasticité de l'argile de London (Sherwood 1967).

Sherwood (1967) indique que la limite de plasticité augmente de 24% à 43% avec un ajout de 4% de chaux. Au-delà de ce seuil, l'addition de chaux échoue de réduire la plasticité.

La valeur de cet effet peut être appréciée en prenant en considération le sol de la figure 1, à une teneur en eau de 35%. Puisque la limite de plasticité de ce sol est de 25%, il est clair qu'à une teneur en eau de 35%, le sol sera dans un état humide et collant, et par conséquent il est impossible de compacter ce sol sur site (circulation des engins est impossible sur ce sol). L'ajout de 2% de chaux va changer la limite de plasticité à 40% alors que la teneur en eau du sol sera de 5% en dessous de la limite de plasticité ce qui améliore largement la maniabilité de ce sol, ce qui permet la circulation des engins de compactage.

Perry et al (1995) ont constaté que les sols stabilisés à la chaux ont un comportement très différent et des caractéristiques de plasticité complètement différentes par rapport aux sols naturels non stabilisés.

*Effets produits par la modification du sol à la chaux (Dallas Little (2006)) :*

- une réduction de la plasticité,
- augmentation de la teneur en eau optimale,
- diminution de la masse volumique sèche,
- amélioration dans la compacité,
- réduction la capacité du sol au gonflement et retrait,
- et amélioration dans la résistance et la stabilité après compactage à court terme.

Ces effets se produit généralement à court terme de 1 à 48h et ils sont bien remarqués dans les sols contenant une fraction argileuse importante, mais ils peuvent ou ne peuvent pas être permanents.

**Réaction à long terme : Stabilisation**

Les minéraux argileux sont pouzzolanes naturelles et ont la capacité de réagir avec de la chaux ajoutée au sol pour produire des produits de cimentation. La chaux ajoutée au sol résulte une augmentation du pH à une valeur de plus de 12 avec une augmentation résultante de la solubilité des composants siliceux et alumineux qui réagissent avec le calcium pour former des silices de calcium hydratées (CSH) et des alumines de calcium hydratées (CAH). Le silicate/aluminate de calcium se produit d'abord sous forme de gel pour bien enrober les particules du sol, et former une liaison, qui se cristallise finalement en silicate/aluminate de calcium hydraté. Les produits de cimentation sont largement similaires à celles de la composition de pâte de ciment. Le processus est relativement lent, car la chaux est désamorcer par la structure du sol et la cimentation initiale se produit aux sites de réaction. Cette réaction aboutit à un gain en résistance (CDF Rogers 1996).

La plupart, mais pas tous, les argiles dans les régions tempérées sont suffisamment réactives et pour développer une résistance importante ils doivent être stabilisés à la chaux. Toutefois, à la température ambiante la réaction est lente et les sols stabilisés peuvent continuer à gagner de résistance encore d'un certain nombre d'années.

*Effets produits par la stabilisation du sol à la chaux (Dallas Little (2006)) :*

- une réduction permanente dans le retrait, le gonflement, et la plasticité du sol,
- une augmentation dans la résistance à long terme,

La stabilisation à la chaux se fait durant une longue période du temps de cure. Les effets de la stabilisation à la chaux sont habituellement mesurés après 28 jours ou plus, mais peut être accéléré par augmentation de la température du sol pendant le temps de cure.

## 5. MECANISME DE STABILISATION.

Les essais au laboratoire indiquent que la chaux réagit avec le milieu, moyennement fine, et les sols à grains fins pour produire une diminution de plasticité, accroissement de maniabilité et une augmentation de résistance (Little, 1995). Le gain en résistance est principalement dû aux réactions chimiques qui se produisent entre les particules du sol et de la chaux. Ces réactions chimiques se produisent en deux phases, avec des avantages immédiats et à long terme.

La première phase de la réaction chimique implique des changements immédiats dans la texture et les propriétés du sol, ces changements sont causés par échange cationique. Le calcium libéré de la chaux s'échange avec les cations adsorbés des minéraux argileux, ce qui résulte une réduction de l'épaisseur de la couche d'eau entourant les particules d'argile. Cette réduction de la couche d'eau diffusée permet les particules d'argile d'entrer en contact plus étroit entre elles, provoquant ainsi une floculation/agglomération des particules d'argile, ce qui transforme l'argile en un matériau de comportement limoneux ou sableux. Dans l'ensemble, la phase floculation/agglomération de la stabilisation à la chaux se résulte dans un sol qui est plus facilement miscible, maniable et compactable. Selon Eades et Grim (1960), pratiquement tous les sols de grains fins traités à la chaux en présence d'eau subit cet échange cationique et les réactions de floculation/agglomération s'ils sont mélangés avec la chaux en présence d'eau.

La deuxième phase de la réaction chimique implique des réactions pouzzolaniques dans le mélange chaux-sol, entraînant un gain résistance avec le temps. Lorsque la chaux est combinée avec un sol argileux en présence d'eau, le pH du milieu augmente. Lorsque le pH atteint 12,4, la silice et l'alumine de l'argile deviennent solubles et sont libérés des minéraux argileux. À son tour, la silice et l'alumine libérés réagissent avec le calcium de la chaux pour former du ciment, ce qui renforce dans un processus graduel qui se poursuit à plusieurs années (Eades et Grim, 1960). Tant qu'il ya suffisamment de calcium (chaux) à combiner avec la silice et l'alumine solubles, la réaction pouzzolanique continuera tant que le pH reste suffisamment élevé pour maintenir la solubilité de la silice et d'alumine (Little, 1995). Le gain

en résistance dépend aussi en grande partie de la quantité de silice et d'alumine disponibles dans l'argile elle-même: ainsi, il a été constaté que la stabilisation à la chaux est plus efficace pour les sols montmorillonitiques que pour les sols kaolininitiques (Lees et. al, 1982).

## 6. Détermination des Teneurs en Chaux.

Généralement, tous les sols de grains fins traités à la chaux montre une diminution dans la plasticité, amélioration dans la maniabilité et réduction dans la déformation. Cependant, l'amélioration des caractéristiques de résistance ne se produit pas pour tous les sols. Il faut remarquer bien que les propriétés des mélanges sol-chaux dépendent de plusieurs variables :

- Le type de sol,
- type de chaux,
- pourcentage de chaux
- et les conditions de conservation (temps, température, humidité).

### *Teneur en chaux pour modification.*

La quantité de chaux requise pour améliorer la qualité d'un sol est déterminée selon la méthode dite (Trial-and-Error Method). Par exemple, s'il est désiré de réduire l'indice de plasticité ( $I_p$ ) du sol, quelques échantillons de mélange sol-chaux doivent être préparés aux différents pourcentages de chaux, et l'indice de plasticité pour chaque échantillon sera déterminé. La teneur en chaux minimale qui produit l'indice de plasticité désiré sera prise. La même méthode sera utilisée pour l'amélioration de la granulométrie et la réduction du gonflement en effectuant leurs essais.

### *Teneurs en chaux pour la stabilisation.*

Les méthodes suivantes sont recommandées pour la détermination de la teneur en chaux pour la stabilisation des sols à la chaux.

#### A. Méthode de Point de Fixation de Chaux

C'est une méthode traditionnelle où la teneur en chaux se détermine en utilisant la courbe qui montre la limite de plasticité en fonction de la teneur en chaux. Le point de fixation de chaux correspond à la valeur où l'addition de chaux ne provoque aucune variation dans la limite de plasticité (Little 1995).

## B. Méthodes de Détermination du Pourcentage Initial de Chaux.

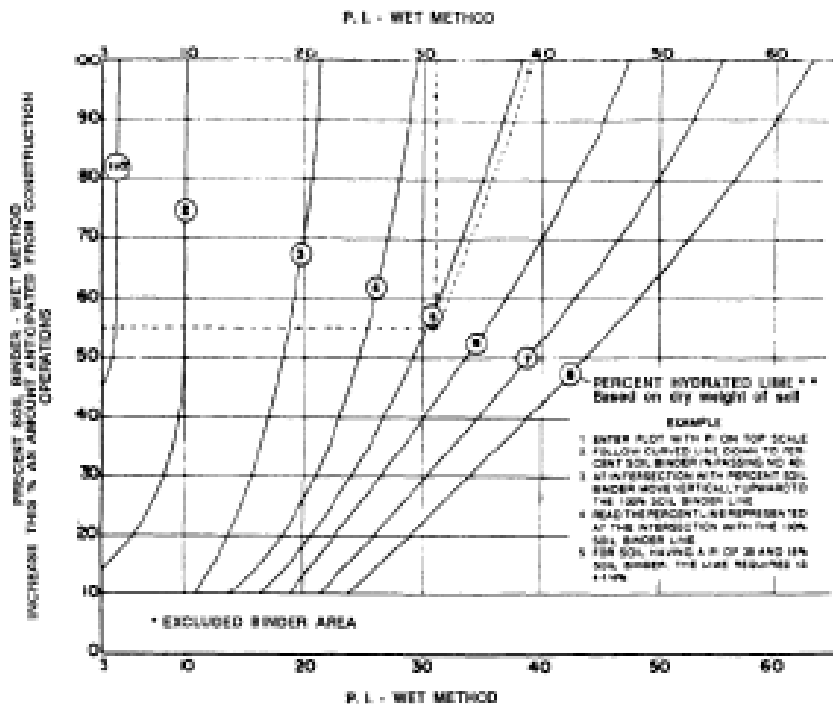
Deux méthodes sont actuellement utilisées pour la détermination de la teneur en chaux initiale (ICL : Initial Consumption of Lime) pour assurer la stabilisation de sol.

### a. Méthode de pH (Méthode de Eades & Grim).

La méthode préférée pour la détermination de la teneur en chaux initiale est celle développée par Eades et Grim et adoptée par la norme ASTM D 6276. Elle est utilisée pour déterminer le pourcentage initial de chaux qui correspond à un pH du mélange sol-chaux de 12.4 (le pH de la chaux). L'augmentation du pH du mélange sol-chaux-eau résulte une solubilité des ions ce qui permet la possibilité de développement de la réaction pouzzolanique et par conséquent la stabilisation du sol.

### b. Méthode Alternative.

Une méthode alternative a été développée pour la détermination de la teneur en chaux initiale en utilisant la figure suivante. Les valeurs spécifiques pour l'utilisation de cet abaque sont l'indice de plasticité ( $I_p$ ) et le pourcentage des passants à travers le tamis N°40 (425 $\mu$ m). Un exemple pour l'utilisation de cet abaque est cité sur la même figure.



\* Exclude use of chart for materials with less than 10% No. 40 and cohesionless materials (P.I. less than 3)

\*\* Percent of relatively pure lime usually 90% or more of Ca and/or Mg hydroxides and 85% or more of which pass the No. 200 sieve. Percentages shown are for stabilizing subgrade and base courses where lasting effects are desired. Satisfactory temporary results are sometimes obtained by the use of as little as 1/2 of above percentages. Reference to retaining strength is implied when such terms as "Lasting Effects" and "Temporary Reducer" are used.

Figure 2.6 Abaque pour la détermination de la teneur en chaux initiale (MIL-STD-619B).

### C. Teneur en Chaux Optimale.

L'obtention de la teneur en chaux initiale permet de débuté la préparation des échantillons pour l'essai de compression simple ou de CBR et déduire les valeurs des résistances obtenues pour chaque pourcentage supérieur au pourcentage initial de chaux.

Le pourcentage de chaux qui résulte un gain de résistance à la compression simple de 345kPa (50psi) du sol traité par rapport au sol non traité, égal à la teneur en chaux optimale pour la stabilisation du sol (*Geotechnical Manual Illinois Department of Transportation 1999*).

## 7. ETUDES PREALABLES SUR LE TRAITEMENT A LA CHAUX.

Cette partie présente quelques études préalablement faites sur le sujet du traitement des sols argileux à la chaux.

- En 2009 FZ. Aissiou (Algérie) a fait une étude sous le titre « *amélioration des caractéristiques mécaniques d'un sol argileux par incorporation de chaux* ». Cette étude a été faite sur deux types de sol de même région, le premier a été obtenu de Chéraga et le deuxième d'Ouled Fayet. Les caractéristiques physiques des sols étudiés sont illustrées sur le tableau suivant.

**Tableau 2.4** Caractéristiques physiques des sols étudiés (FZ. Aissiou 2009).

Caractéristiques de base	Echantillon n°1	Echantillon n°2
Profondeur [m]	4.70	5.40
Teneur en eau naturelle [%]	7.08	6.38
Densité Apparente (humide) [g/cm <sup>3</sup> ]	2.07	2.04
Teneur en matière organique [%]	0.84	0.31
Passant au tamis 80 µm [%]	99.44	99.66
Teneur en argile (< 2µm) [%]	59.24	56.76
Limite de liquidité [%]	65.2	81.87
Limite de plasticité [%]	30.013	34.23
Indice de plasticité [%]	35.19	47.64
Activité d'argile	0.594	0.84
Teneur en eau optimum [%]	15.3	16.9
Densité sèche maximum [g/cm <sup>3</sup> ]	1.64	1.61

L'analyse minéralogique par rayon X a montré que le minéral argileux prédominant étant l'illite, avec présence du quartz, calcite, kaolinite et montmorillonite. D'après l'abaque de Casagrande, les sols ont été classés comme sols argileux très plastique avec un indice de plasticité de 35.19% pour le 1<sup>er</sup> et 47.64% pour le 2<sup>ème</sup>. L'activité a été trouvée de 0.594 pour le premier et 0.84 pour le deuxième.

## Essais de compression simple.

Les essais de compression simple ont été faits sur des échantillons traités à 2, 3, et 4% de chaux, compacté selon les caractéristiques optimales obtenus par l'essai Proctor et conservés pendant 28 et 45jrs comme temps de cure. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures ci-dessous.

### Interprétation.

La résistance à la compression simple augmente avec l'accroissement du pourcentage de chaux. Elle a été nettement améliorée avec l'ajout de chaux et 4% est une teneur suffisante pour améliorer les caractéristiques mécaniques des deux sols. L'ajout de la chaux à 4% a doublé la résistance à la compression.

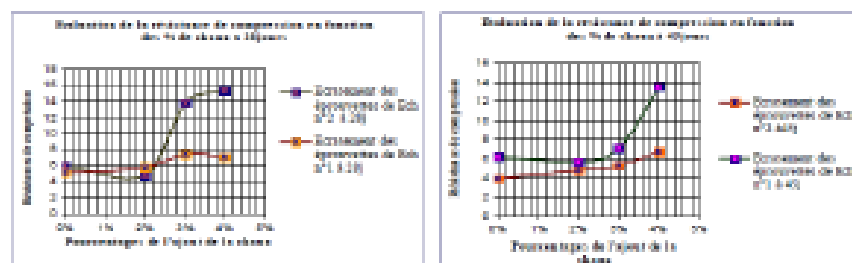


Figure 2.7 Influence des teneurs en chaux sur les résistances de compression des sols à 28 et 45jrs (FZ. Aissiou 2009).

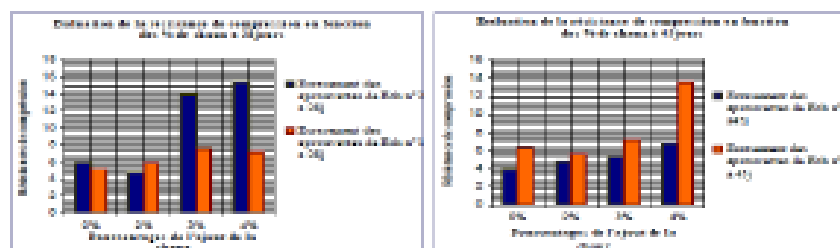


Figure 2.8 Histogramme de résistances de compression des sols en fonction des dosages en chaux à 28jrs et 45jrs (FZ. Aissiou 2009).

## Essais de cisaillement direct.

En utilisant les dosages de 2, 4, et 6% de chaux, les échantillons ont été mélangés et compactés statiquement pour les essais de cisaillement direct (consolidé non drainé). Dont les résultats obtenus sont présentés sur les figures suivantes :

Echantillon utilisé	Echantillon n°1					Echantillon n°2				
	C [bars]	$\phi$ [°]	$\tau_{pic}$ [bars]			C [bars]	$\phi$ [°]	$\tau_{pic}$ [bars]		
			$\sigma = 1bar$	$\sigma = 2bar$	$\sigma = 3bar$			$\sigma = 1bar$	$\sigma = 2bar$	$\sigma = 3bar$
0	0,07	18,75	0,31	0,95	0,99	0,26	11,23	0,47	0,50	0,86
2	0,08	21,45	0,95	0,68	1,25	0,15	17,23	0,47	0,79	1,65
4	0,07	27,65	0,60	1,35	1,62	0,80	32,74	1,22	1,54	1,91
6	0,67	23,90	0,99	1,56	1,99	0,32	25,18	0,22	1,28	1,73

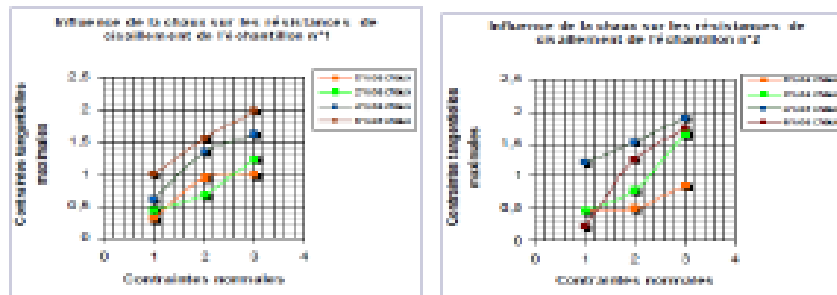


Figure 2.9 Courbe de variation des résistances de cisaillement des deux sols en fonction des dosages de chaux (FZ. Aissiou 2009).

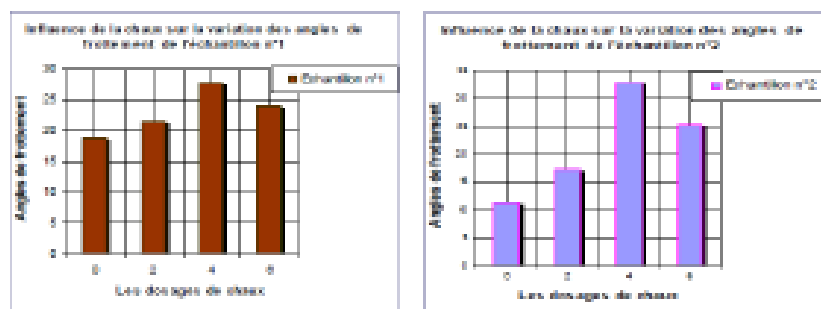


Figure 2.10 Histogramme de variation de l'angle de frottement des deux sols en fonction des dosages de chaux (FZ. Aissiou 2009).

### Interprétation.

L'addition de la chaux augmente aussi la résistance au cisaillement des deux sols argileux traités, l'angle de frottement pour chaque dosage en chaux a connu une certaine élévation la plus grande est à 4% de chaux.

- En 2008 M. A. Sakr et al (Egypte) ont fait une étude sous le titre « *Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content* ». Cette étude a été faite sur un sol argileux de la ville Idku en Egypte, dont la teneur en matière organique est de 14%. Une fraction argileuse de 57.4% est présente dans le sol qui est classé selon USCS comme OH (Organic clay of medium to high plasticity). Le XRD montre que le sol contient principalement la kaolinite, l'illite et la sméctite. La chaux utilisée étant la chaux hydratée. Le sol a été traité à 1, 3, 5 et 7% de chaux et les temps de conservation sont 7, 15, 30 et 60jrs. Les essais effectués et les résultats obtenus sont les suivants :

## Limites d'Atterberg.

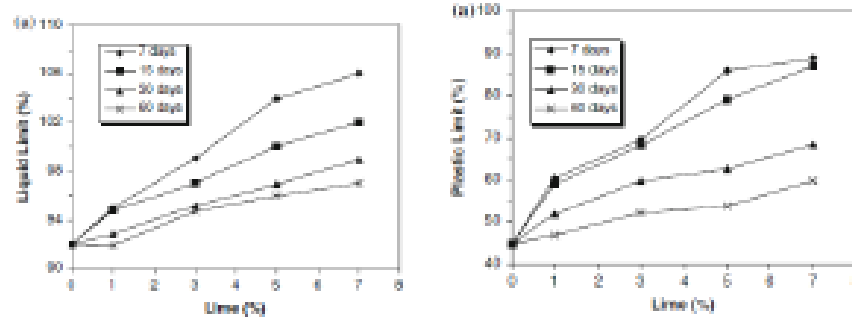


Figure 2.11 Variation de la limite de liquidité et de plasticité en fonction de l'addition de chaux (M. A. Salr et al 2008).

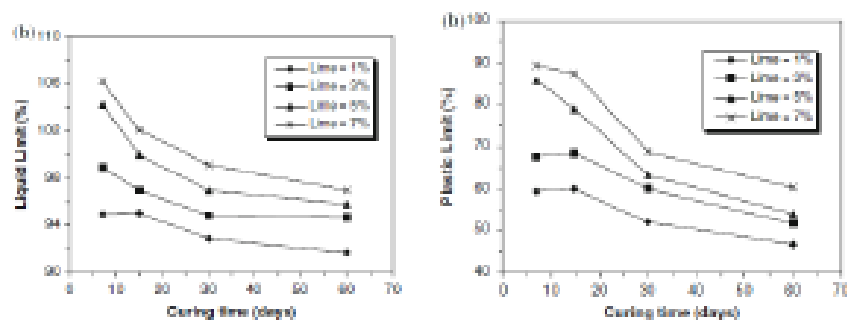


Fig. 4 Relationships of liquid limit of lime-treated soil with (a) lime percent and (b) curing time

Fig. 5 Relationships of plastic limit of lime-treated soil with (a) lime percent and (b) curing time

Figure 2.12 Variation de la limite de liquidité et de plasticité en fonction du temps de cure (M. A. Salr et al 2008).

### Interprétation.

La limite de liquidité du sol traité après les temps de conservation mentionnés ci-dessus augmente avec l'accroissement du pourcentage de chaux, mais en diminuant le nombre de jours. Pour l'augmentation des pourcentages de 1, 3, 5, et 7% de chaux la limite de liquidité diminue peut être due à une substitution des ions de  $Ca^{++}$  avec les ions de  $Na^{+}$  et  $K^{+}$  dans les minéraux de l'argile, qui cause une réduction de la teneur en eau comme l'explique Hilt et Davidson (1961). Cependant le comportement de la limite de plasticité est semblable à la limite de liquidité avec quelques différences. L'indice de plasticité diminue avec l'ajout de la chaux et augmente avec le temps de cure.

### Essais de compression simple.

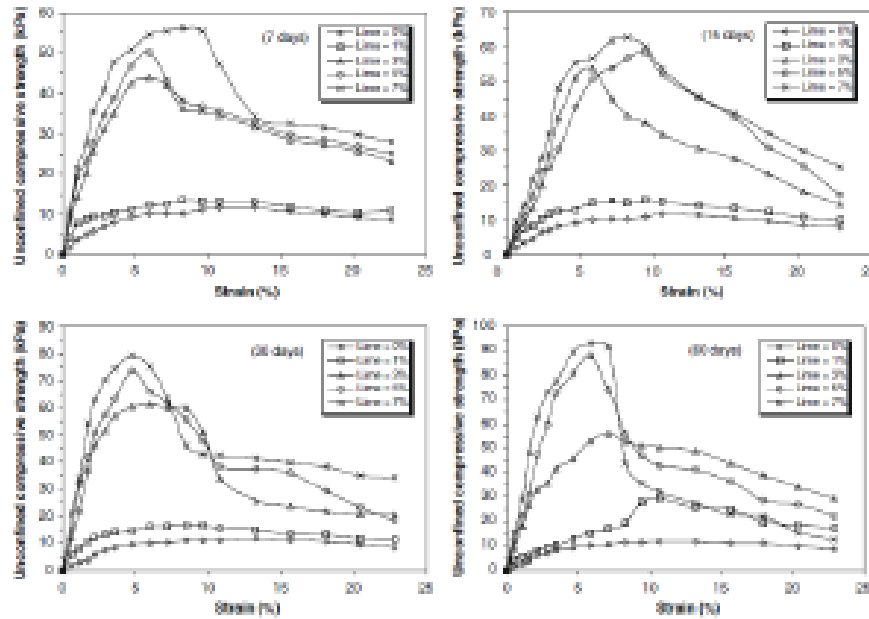


Fig. 6. Stress-strain curves of untreated and lime-treated soft clays

Figure 2.13 Courbes contrainte-déformation pour l'argile non traitée et traitées à la chaux (M. A. Sakr et al 2008).

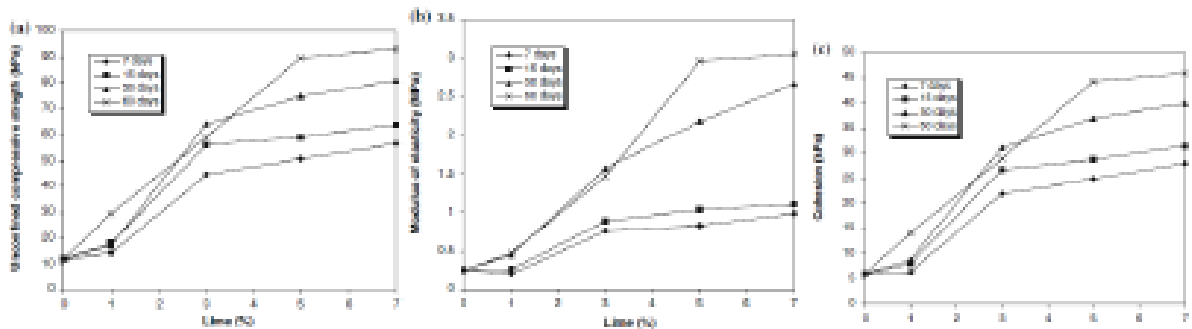


Figure 2.14 Effets de la chaux sur (a) compression simple (b) module d'élasticité (c) cohésion non drainée (M. A. Sakr et al 2008).

### Interprétation.

La résistance de compression simple de l'argile non traitée a été trouvée de 10kPa ce qui veut dire que le sol est très doux (Very Soft). La courbe contrainte-déformation montre que la déformation du sol non traité continue jusqu'à une valeur constante, sans aucune point de rupture (pic). Ce qui est en accord avec le comportement des sols normalement consolidés, que leurs courbes contrainte-déformation n'atteignent pas de pics. Les courbes contrainte-déformation du sol traité présentent des pics remarquables, et ça dépend du pourcentage de chaux et le temps de cure qui est lié à la cimentation des particules due à la réaction pouzzolanique. Le pourcentage de 3% est le pourcentage où le comportement du sol traité est changé depuis de l'état doux à l'état rigide. Ce comportement influe à une augmentation de  $q_u$  avec l'augmentation de pourcentage de chaux et le temps de cure. Par exemple, avec l'addition de 7% de chaux, une augmentation de 330% et 660% a été obtenue dans 7jrs et

60jrs de cure, respectivement. Cependant, le module d'élasticité E, et la cohésion non drainée augmentent avec l'augmentation de la teneur en chaux et le temps de cure.

- En 2006 Paul Quigley Beng (Ireland) a réalisé une étude sous le titre « *Modification and stabilisation of low strength cohesive soils under foundations and floor slabs* ». Cette étude a été faite sur un sol argileux de la ville Dublin (Irlande), ce type de sol a généralement une teneur en fines entre 25 et 40% et classé selon le BS comme argile de plasticité moyenne (CL/CI). Cette argile a un indice de plasticité vari entre 10 et 20% et une résistance entre 60 et 75kPa. La limite de plasticité augmente considérablement après l'ajout de 1% de chaux, mais elle diminue graduellement entre 2 et 6%. De même, la limite de liquidité augmente de 36 à 47% après l'addition de 1% de chaux, et elle diminue graduellement à 43% pour 6% de chaux. L'indice de plasticité augmente de 16% pour le sol non traité à 21.6% après traitement à 1% de chaux. Comme conclusion, l'indice de plasticité diminue avec l'accroissement de la teneur en chaux.

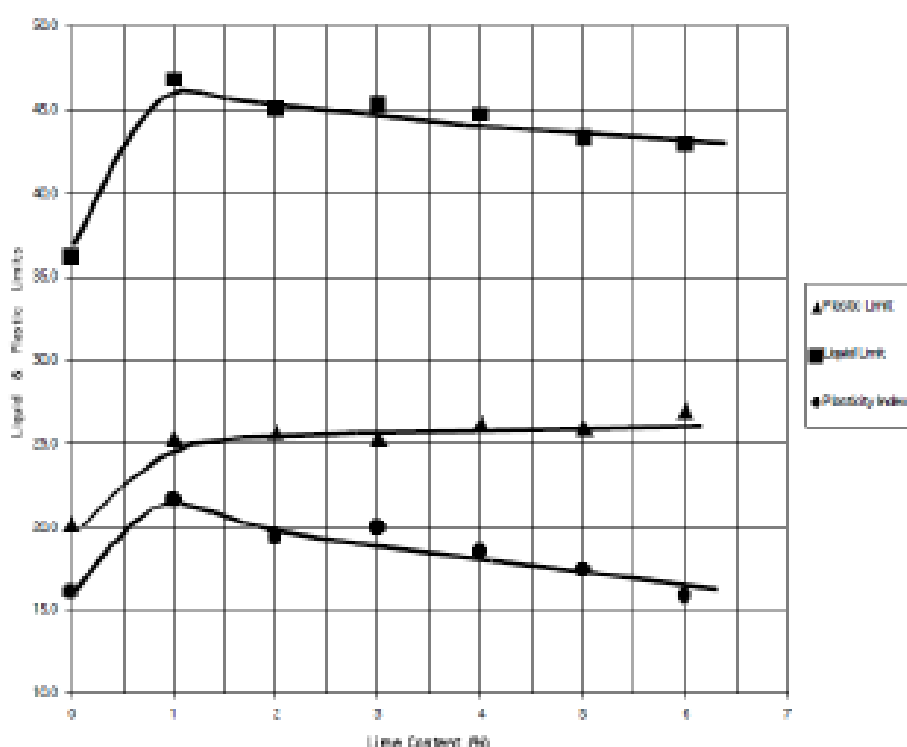


Figure 2.15 Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg (Paul Quigley Beng 2006).

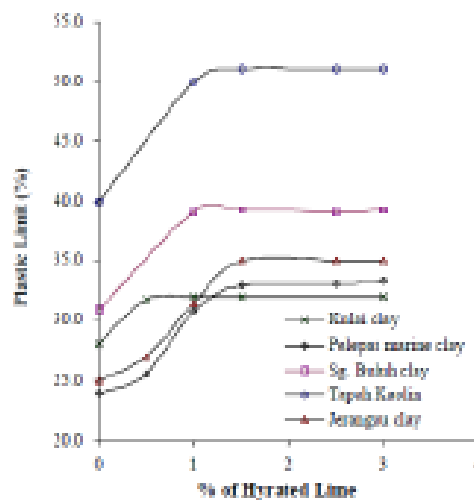
- En 2004 Khairul Amuar Kassim (Malaysia) a fait une étude sous le titre « *Lime stabilized Malaysian cohesive soils* ». Cette étude a été réalisée cinq types de sol argileux nommés Kulai, Pelepas, Sg. Buluh, Tapah Kaolin et Jeragau. Leurs propriétés géotechniques sont présentées sur le tableau suivant.

**Tableau 2.5 Propriétés des sols utilisés dans l'étude (Khairul Anuar Kassim 2004).**

	Kulai clay	Pelepas marine clay	Sg. Buloh clay	Tengah Kaslin	Jerangau clay
<b>1. Physical properties</b>					
Natural moisture content (%)	33	121	34	48	39
Particle density	2.73	2.74	2.75	2.64	2.69
Liquid limit (%)	52	98	71	95	70
Plastic limit (%)	28	24	31	43	25
Plasticity index (%)	24	32	40	50	45
UCS (kPa)	38.1	24.5	35.5	24.4	150.1
<b>2. Particle size distribution</b>					
Sand	43.2	34.0	6.5	6.0	0.4
Silt	45.4	27.7	68.2	37.6	33.4
Clay (CF)	11.4	38.3	31.3	36.4	44.2
Clay activity ( $A_c$ )	2.11	0.84	1.28	1.37	1.02
<b>3. Soil classification</b>					
USCS	MH	CH	CV	CE	CV
USCS	CH	CH	CH	MH	CH
ASCS	A-7-6	A-7-6	A-7-5	A-7-5	A-7-6
<b>4. Chemical properties</b>					
Organic content (%)	0.30	0.75	0.42	0.24	0.33
pH at 20% solids	4.3	8.4	3.5	4.5	4.9

La chaux utilisée pour le traitement des sols est la chaux hydratée. Les essais réalisés et les résultats obtenus sont :

**Limite de plasticité (Capacité de fixation de la chaux).**



**Figure 2.16 Limite de plasticité en fonction des pourcentages de chaux pour les différentes argiles (Khairul Anuar Kassim 2004).**

Les changements de la limite de plasticité des matériaux traités à plusieurs pourcentages de chaux pour les cinq différents sols sont montrés sur la ci-dessus. Cette figure montre que l'addition de la chaux augmente la limite de plasticité jusqu'à un point où elle devient constante, ce point est appelé le point de fixation de la chaux. La différence dans la capacité de fixation de chaux dépend de la fraction argileuse présente dans le sol et sa capacité d'échange cationique.

## Influence de la chaux sur le pH (Teneur en chaux initiale)

Tableau 2.6 Valeurs du pH en fonction des teneurs en chaux pour différents sols (Kh. A. Kassim 2004).

Table 3: pH values for the ICL tests.

Soil Types	Percentage of Lime Content							
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
Kalai clay	4.3	11.7	12.3	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4
Pelepas marine clay	8.4	10.9	11.8	12.1	12.3	12.3	12.4	12.4
Sg. Buluh clay	3.5	12.1	12.1	12.3	12.3	12.4	12.4	12.4
Tapoh Kaolin	4.5	10.6	11.4	12.3	12.4	12.4	12.4	12.4
Jerangau clay	4.8	10.3	11.8	12.2	12.3	12.4	12.4	12.4

Pour la stabilisation, la teneur minimale en chaux pour initié le processus de stabilisation peut être obtenu en utilisant l'essai ICL. Une quantité supplémentaire est nécessaire pour une stabilisation complète, et cette quantité peut être établie d'après l'essai de résistance.

### Essais de compression simple.

L'essai de compression simple UCS a été effectué sur le mélange sol-chaux en plusieurs temps de cure et plusieurs pourcentages de chaux.

### Influence de la chaux sur l'UCS.

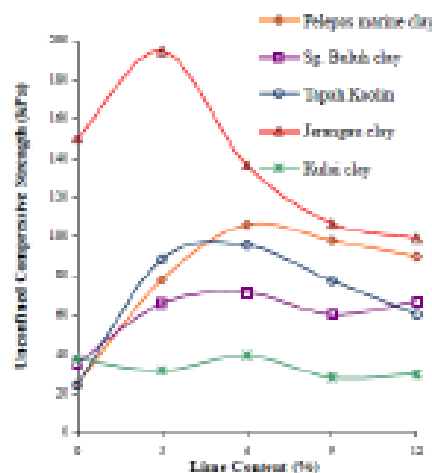


Figure 2.17 Influence de la chaux sur l'UCS pour différents sols (Kh. A. Kassim 2004).

La figure montre que la majorité des sols traités à la chaux montre un pic dans la courbe de compression simple en fonction de la chaux. La différence remarquée est la valeur de la teneur en chaux optimale pour atteindre une résistance maximale.

### Influence du temps de cure sur l'UCS.

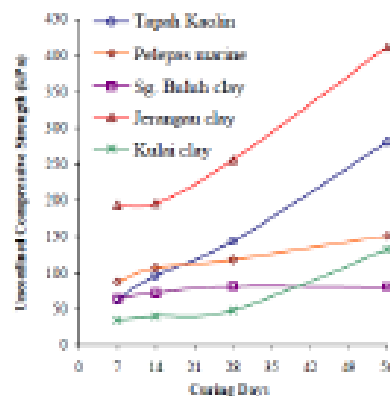


Figure 3. Unconfined compressive strength at mix design with various curing days at room temperature.

Figure 2.18 Influence du temps de cure sur l'UCS pour différents sols (Kh. A. Kassim 2004)

La figure précédente montre les résultats des essais UCS pour différents temps de cure depuis 7 jours à 56 jours, les échantillons ont été conservés à une température de  $27 \pm 2^\circ\text{C}$ . La résistance de l'argile Kulai augmente graduellement avec une vitesse presque constante entre 7 et 28 jours de cure. Après 28 jours l'augmentation accélère avec un maximum de plus que 200%. L'argile Pelepas marine montre la plus grande augmentation initiale en résistance 3.6 fois plus que celle du sol non traité. L'argile Sg. Buluh montre petite augmentation même après 28 jours de cure. Ça due peut être de la solubilité des minéraux d'argile à ce stade, ce qui ne développe pas une réaction entre la chaux et l'argile. Une quantité supplémentaire de la chaux est peut être nécessaire pour garder les conditions d'alcalinité et favoriser la réaction pouzzolanique. La résistance de Kaolinite Tapah augmente rapidement en fonction du temps avec une vitesse constante. A 56 jours de cure avec une teneur en chaux optimale de 6%, la Kaolinite Tapah a développé avec une résistance 11 fois plus que celle du sol non traité. L'argile non traitée Jerangau présente une résistance moyenne d'environ 150 kPa. Avec l'addition de 3% de chaux, la résistance de l'argile Jerangau stabilisée augmente lentement entre 7 et 14 jours de cure, mais la vitesse d'augmentation devrai plus rapide jusqu'à plus que 200% à 56 jours de cure.

- En 2004 Giacomo Russo (Italie) a fait une étude sous le titre « *Microstructure of a lime stabilised compacted silt* ». Cette étude a été effectuée sur un sol limoneux où l'auteur a étudié l'influence de 3% de chaux sur les propriétés physiques du sol. Ce qui n'est pas liés avec ce sujet de recherche sauf l'influence de la chaux sur l'essai de compactage qui est présentée sur la figure ci-dessous.

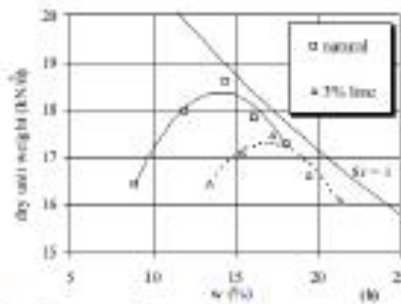


Figure 2.19 Influence du 3% de chaux sur la courbe de compactage (Giacomo Russo 2004).

Il est très claire qu'il n'ya pas de changement dans la forme de la courbe de compactage mais une augmentation remarquable dans la teneur en eau optimale ainsi qu'une diminution de la densité sèche maximale entre le sol naturel non traité et celui traité à 3% de chaux.

- En 2000 A. M. El Sharief (Soudan) a fait une étude sous le titre « *Technical and economical viability of lime stabilization of expansive soils for road construction in Sudan* ». Cette étude a été réalisée sur trois échantillons prélevés de deux autoroutes en Soudan. Le premier échantillon du kilomètre 56 et le deuxième du kilomètre 112 de la chaussée de la route de Sennar-Singa-Damazin. Le troisième échantillon a été prélevé de la route ElMujalad-Higlieg le kilomètre 143 à l'ouest de Soudan. La chaux utilisée est la chaux hydratée. Les propriétés géotechniques ainsi que l'effet de la chaux sur les limites d'Atterberg pour les trois échantillons sont présentées sur le tableau suivant.

Tableau 2.7 Composition des sols étudiés et l'influence de la chaux sur les limites d'Atterberg (A. M. El Sharief 2000).

Location	Atterberg			Particles Size		AASHTO Classification
	LL	PL	PI	% < No. 200	% < 4 $\phi$	
Sennar - Singa - Damazin Road ( Km. 56 )	88	30	58	60.3	92.0	A-7-6
Sennar - Singa - Damazin Road ( Km. 112 )	80	27	53	79	92.0	A-7-6
ElMujalad - Higlieg Road ( Km. 143 )	77	24	53	50	61.0	A-7-6

Location	Lime %	PI %	Decrease in P.I	% of Decrease in P.I
Singa - Damazin Road ( Km. 56 )	0	11	27	71
	3	8	30	78.0
	4	5	53	86.8
Singa - Damazin Road ( Km. 112 )	0	13	30	60.4
	3	0	34	72.7
	4	0	27	61.8

Il est évident que les trois échantillons ont des pourcentages élevés d'argile. Selon la classification de la norme AASHTO les sols sont classifiés comme A-7-6. En utilisant le système de classification pour les sols expansifs proposé par Van Der Merwe, le potentiel de gonflement des trois sols est élevé à très élevé.

L'addition de 2% chaux hydratée aux échantillons non traités Km 56 et Km 112 donne une diminution de leur indices de plasticité de 38 et 33 à 11 et 13 respectivement. Aussi l'addition de 3% et 4% de chaux hydratée diminue en plus les indices de plasticité. La tendance observée montre que l'addition d'une petite quantité de chaux (2%) a un effet considérable sur la réduction de la plasticité du sol, tandis que l'augmentation du pourcentage de chaux est moins significative.

- En 1999 M. Afès (Algérie) a fait une étude sous le titre « *Stabilisation des sols gonflants cas d'une argile en provenance de Mila* ». Cette étude a été faite sur un matériau provient de la région de Mila, dont 61% du matériau passe à travers le tamis 2 $\mu$ m. Les propriétés géotechniques du sol étudié sont présentées sur le tableau suivant.

**Tableau 2.8 Propriétés géotechniques de l'argile (M. Afès 1999).**

WL (%)	47,7
WP (%)	24
Ip	23,7
VBS	10,34
Indice de gonflement (I <sub>g</sub> , %)	50
Activité (Ac)	0,37
Classe (GTR)	A3
CEC (meq/100 g)	27,5

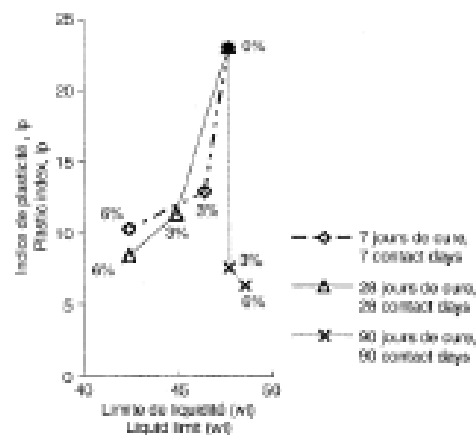
L'analyse aux rayons X montre la présence de plusieurs minéraux essentiellement : vermiculite-chlorite-montmorillonite, kaolinite et muscovite.

#### Limites d'Atterberg.

Sur le diagramme de Casagrande Afès a noté l'évolution simultanée de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité pendant 90 jours pour les teneurs en chaux à 3 et 6%. La figure suivante illustre le chemin suivi par l'argile de Mila suite à un traitement à 3 et 6% de chaux pour des temps de cure de 7, 28, et 90 jours. Afès a remarqué aussi que l'argile qui est de plasticité moyenne voit, après traitement à la chaux, sa consistance évoluer vers un limon de faible plasticité. Cette évolution de la consistance liée au pourcentage de chaux et à la durée du temps de contact, se traduit par une diminution de l'indice de plasticité. Le tableau suivant montre les caractéristiques physiques du sol en fonction du pourcentage de chaux et du temps de cure.

**Tableau 2.9 Caractéristiques physiques du sol en fonction du pourcentage de chaux et du temps de cure (M. Afès 1999).**

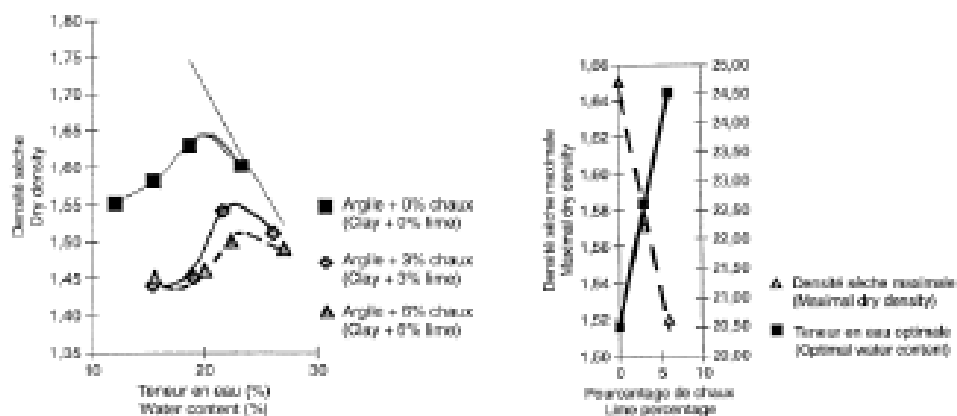
	3% chaux/lime			6% chaux/lime		
	7 jours 7 days	28 jours 28 days	90 jours 90 days	7 jours 7 days	28 jours 28 days	90 jours 90 days
ML (%)	46,4	44,9	39,7	42,7	42,4	48,1
MP (%)	33,6	33,5	32,1	32,4	34	34,8
Ip	12,8	11,4	7,6	10,3	8,4	6,3
VBS	5,4	4,46	4,2	4,96	4,71	3,85
CC (meq/100 g)	23,8	23,7	22,8	19,6	18,4	17,6



**Figure 2.20 Variation de l'indice de plasticité en fonction de la limite de liquidité (M. Afès 1999).**

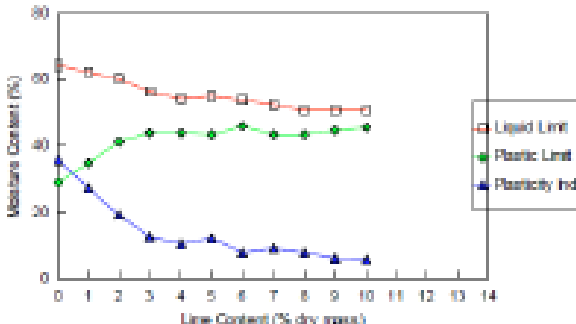
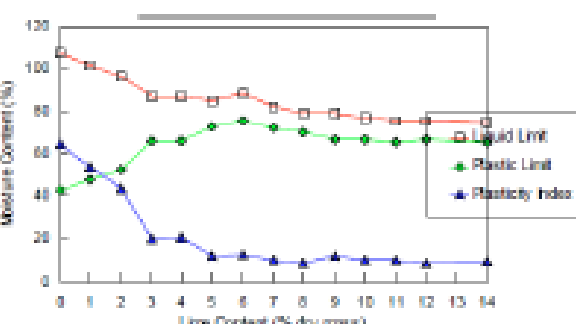
### Essai de compactage (Proctor).

L'argile traitée à 3 et 6% de chaux est compactée à l'énergie Proctor normal 30 min après l'adjonction de chaux. La courbe Proctor obtenue s'aplatit à mesure que le pourcentage de chaux augmente. Le traitement à la chaux conduit à une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche maximale (voir figures ci-dessous).



**Figure 2.21 Courbe Proctor de l'argile non traitée et traitée à la chaux, Evolution des caractéristiques de compactage en fonction du pourcentage de chaux (M. Afès 1999).**

- En 1997 Peter Evans (Queensland) a fait une étude sous le titre « *Update on lime stabilisation* ». Cette étude a été faite sur deux types d'argile nommées Warwick-Killarney et Cunningham. Les résultats obtenus après traitement à la chaux hydratée des deux argiles à la chaux sont présenté ci-dessous.

Argile 1 Warwick-Killarney	Argile 2 Cunningham
<b>Limite d'Atterberg et Pourcentage de Fixation de Chaux.</b>	
L'addition de la chaux diminue la limite de liquidité progressivement, augmente la limite de plasticité jusqu'à une valeur qui n'est que le point de fixation de chaux où elle devient constante, et par conséquent diminue instantanément l'indice de plasticité.	
	
Figure 2.22 Effet de l'addition de chaux sur les limites d'Atterberg, argile Warwick-Killarney (Peter Evans 1997).	Figure 2.23 Effet de l'addition de chaux sur les limites d'Atterberg, argile Cunningham (Peter Evans 1997).
Le pourcentage de fixation de chaux est entre 3 et 4% de chaux hydratée.	Le pourcentage de fixation de chaux est entre 5 et 6% de chaux hydratée.
<b>Influence de la chaux sur le pH (Teneur en chaux initiale)</b>	
L'addition de la chaux augmente le pH jusqu'à une valeur de 12.4 et le pourcentage de chaux correspondant à cette valeur est la teneur en chaux initiale.	

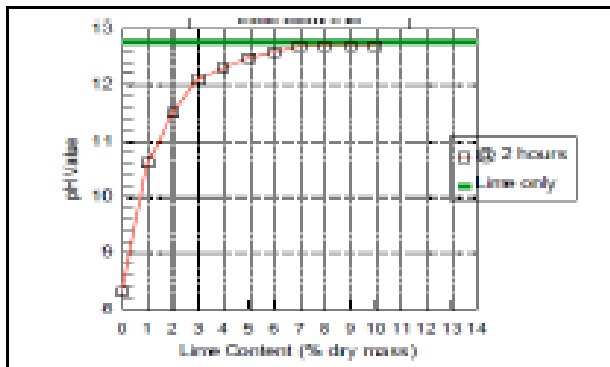


Figure 2.24 Effet de l'addition de chaux sur le pH de l'argile Warwick-Killarney (Peter Evans 1997).

Le pourcentage initiale de chaux est de 8%.

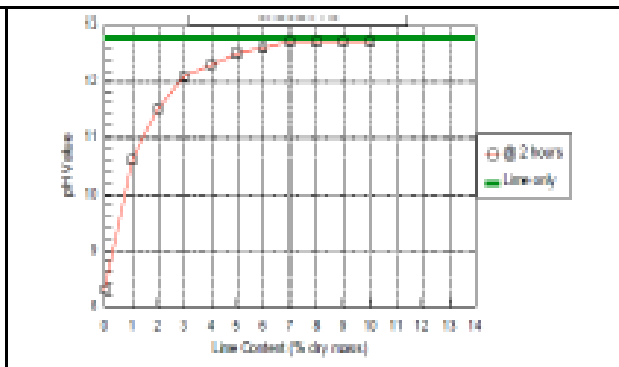


Figure 2.25 Effet de l'addition de chaux sur le pH de l'argile Warwick-Killarney (Peter Evans 1997).

Le pourcentage initiale de chaux est de 7%.

### Essai de compression simple

Des essais effectués au laboratoire pour la détermination de teneur optimale de chaux basant sur la résistance UCS à 28 jours. Les résultats sont montrés sur la figure suivante.

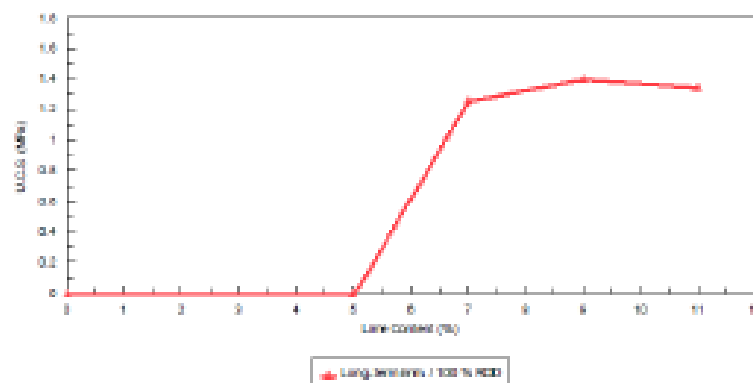


Figure 2.26 Influence du temps de cure sur l'UCS (Peter Evans 1997).

D'après la comparaison des figures présentées ci-dessus, il est facilement évident que la conception basé sur la méthode traditionnelle (Lime Fixation), ou la méthode récente (Eades et Grim) ce rendre considérablement moins de chaux (environ 4% chaux hydratée pour atteindre un pH de 12.4) que la méthode actuelle recommandée de Thompson (basant sur 28 jours UCS). Pour la méthode de Thompson, le pic 28 jours UCS résulte l'effet avec 9% de chaux hydratée donc 6.81% chaux vive.

- En 1996 et en 1989 F.G. Bell (UK) a fait une étude sous le titre « *Lime stabilization of clay minerals and soils* ». D'où il a étudié cinq types d'argiles en deux séries, la kaolinite, la montmorillonite, et le quartz dans la première série, le Till et laminated clay dans la deuxième série.

## Première série.

Trois argiles ont été utilisées dans cette étude, la kaolinite, la montmorillonite et le quartz. Les propriétés des argiles sont illustrées sur le tableau ci-dessous.

**Tableau 2.10 Composition chimique, propriétés physiques et mécaniques pour Kaolinite, Montmorillonite et quartz (F. G. Bell 1989-1996).**

	Kaolinite	Montmorillonite	Quartz
<b>1. Chemical composition</b>			
SiO <sub>2</sub>	47.0%	60.4%	98.15%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38.3%	18.2%	0.2%
Alkali (K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O)	0.8%	1.1%	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5%	1.7%	0.01%
TiO <sub>2</sub>	-	-	0.04%
CaO	-	1.9%	0.07%
MgO	-	5.6%	Trace
Loss of ignition	11.3%	8.4%	0.55%
pH at 10% solids	10.0 ± 0.3	8.6 ± 0.5	3.8 ± 0.3
Cation exchange capacity (meq/100 g)	2-16	80-120	-
<b>2. Physical properties</b>			
Particle size distribution			
0.06-0.002 mm	6%	24%	32%
Less than 0.002 mm	94%	76%	68%
Specific gravity	2.57	2.63	2.65
Liquid limit (%)	75	114	52
Plastic limit (%)	42	67	38
Plasticity index (%)	33	47	14
Activity	0.35	0.47	0.27
Unconfined compressive strength (MPa) <sup>a</sup>	150	127	388
Modulus of elasticity (MPa)	35	26	24
Optimum moisture content (%)	19.5	26.0	18.5
Maximum dry density (Mg/m <sup>3</sup> )	1.40	1.29	1.41
CBR	1	9	1

<sup>a</sup>At optimum moisture content.

## Limites de consistance.

La limite de plasticité de la montmorillonite augmente jusqu'à 4% de chaux (voir figure ci-dessous). Au dessus de 2% de chaux ajoutée, la limite de plasticité de la kaolinite subir une légère réduction. Le quartz subir une augmentation de la limite de plasticité jusqu'à 2% de chaux, après elle reste plus ou moins constante ou diminue légèrement. Quand la kaolinite a été traitée à 2% de chaux, elle subit une augmentation de 28% dans la limite de liquidité. L'indice de plasticité résultant de la kaolinite montre globalement une augmentation. Par contraste, la valeur de la limite de liquidité de la montmorillonite diminue avec l'augmentation du pourcentage de chaux. La réduction dans la limite de liquidité avec l'augmentation de la limite de plasticité, produit une réduction considérable dans l'indice de plasticité de la montmorillonite. La limite de liquidité du quartz augmente brusquement avec des petites additions de la chaux. Cependant, la plasticité du quartz aussi augmente avec l'addition de la chaux.

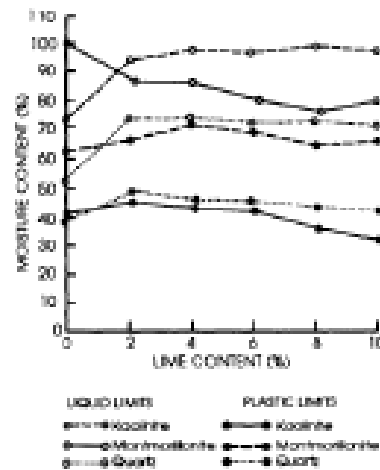


Figure 2.27 Limites de plasticité, de liquidité pour Kaolinite, Montmorillonite et Quartz avec l'addition de la chaux (F. G. Bell 1989-1996).

### Essai de compactage (Proctor normal).

L'addition de la chaux aux argiles augmente la teneur en eau optimale et réduit la densité sèche maximale pour le même effort de compactage (voir le Tableau ci-dessous). Evidemment la conception du sol stabilisé à la chaux doit tenir compte ces changements en compactage optimum, qui est en fait proportionnel avec la quantité de chaux ajoutée (plus de chaux, moindre de densité sèche maximale et teneur en eau optimale élevée). Les densités de compactage les plus élevées sont celle obtenues des argiles kaolinites traitées à la chaux, plus que les sols où les minéraux argileux expansifs sont prédominants. Parmi les trois minéraux étudiés, le quartz a développé les densités de compactage les plus élevées.

Tableau 2.11 Comparaison des résultats de l'essai de compactage pour Kaolinite, Montmorillonite et Quartz avec l'addition de la chaux (F. G. Bell 1989-1996).

Material	Optimum lime content (%)	Optimum moisture content (%)	Maximum dry density (Mg/m <sup>3</sup> )
Kaolinite	0	29	1.4
	6	31	1.33
Montmorillonite	0	20	1.29
	4	25	1.15
Quartz	0	28	1.41
	6	32	1.48

### Essai de compression simple.

La montmorillonite montre une augmentation initiale rapide dans la résistance à la compression simple avec des petits pourcentages de chaux (figures ci-dessous). La valeur du pourcentage de chaux pour la résistance optimale de la montmorillonite est de 4%, pour la kaolinite le pourcentage varie entre 4 et 6% de chaux, tandis que le pourcentage pour le quartz est entre 4 et 8%. L'addition des petites quantités de chaux à la kaolinite et le quartz donne

aussi une augmentation notable dans la résistance à la compression non confinée (figures ci-dessous). Par ailleurs, la montmorillonite mélangée avec une faible teneur en chaux atteinte une résistance maximale dans un moindre du temps que celle mélangée avec une teneur en chaux plus élevée. La résistance augmente rapidement au début, généralement durant les 7 premiers jours de conservation, puis augmente plus lentement avec une vitesse plus ou moins constante. Par exemple, avec une teneur en chaux optimale de 6% la kaolinite a développé une résistance de 1.05MPa après 28 jours de conservation qui représente une augmentation de 3.5 fois que celle de kaolinite non traitée. Ce lent gain progressif dans la résistance des argiles kaolinites offre un facteur de sécurité appréciable pour une conception basée sur une résistance de 28 jours. Avec l'addition de 4% de chaux au quartz, la résistance du matériau augmente de 300kPa non traité à 5.0MPa après 28 jours de conservation, une augmentation d'environ de 16.7 fois plus.

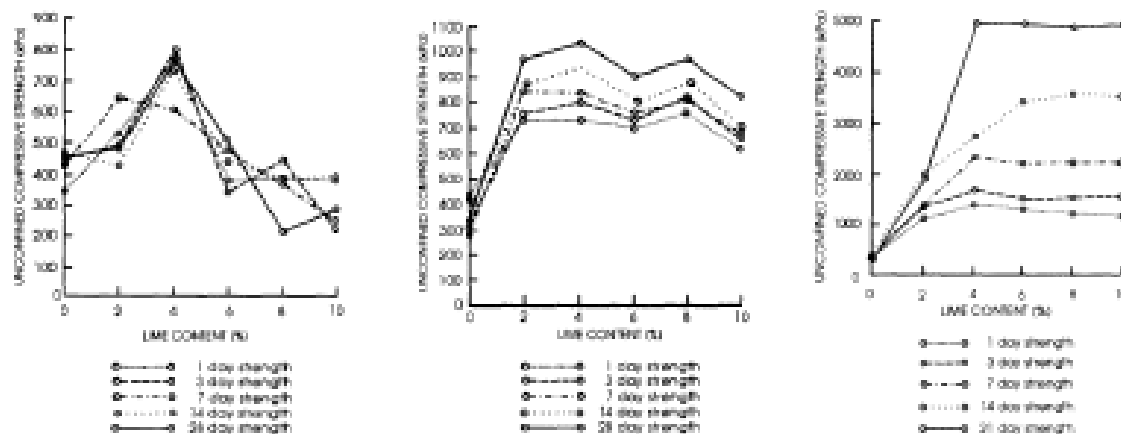


Figure 2.28 Variation de la compression simple avec l'addition de la chaux pour (1) Montmorillonite (2) Kaolinite et (3) Quartz (F. G. Bell 1989-1996).

La kaolinite montre une augmentation rapide du module d'Young avec les additions d'environ 2 et 4% de chaux qui provoque des augmentations de plusieurs cents pourcent. Au dessus de 4% de chaux l'augmentation est faible dans le module d'Young et en effet il diminue un peu (figure ci-dessous). De même façon, la montmorillonite subir une faible augmentation dans le module d'Young avec plus de 4% de chaux ajoutée, après qu'il y a une diminution globale. Les additions jusqu'à 6 ou 8% de chaux donnent des augmentations régulières dans la valeur du module d'Young pour les quartzs (encore plusieurs cents pourcent), après que la valeur sera plus ou moins constante. La valeur du module d'Young augmente avec l'accroissement du temps de cure pour la kaolinite et le quartz. Cependant, la valeur maximale du module d'Young celle de la montmorillonite qui a été atteinte après 14 jours, après qu'une diminution progressive s'est produit.

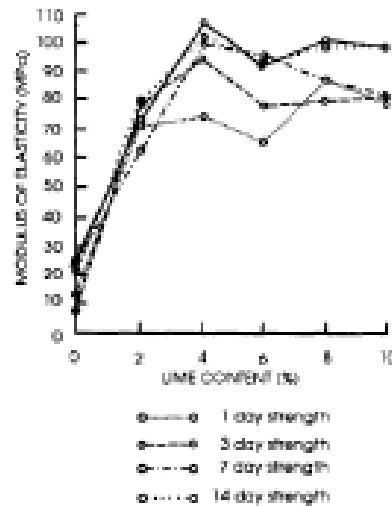


Figure 2.29 Variation du module d'élasticité avec l'addition de la chaux (F. G. Bell 1989-1996).

Deuxième série.

Deux autres types d'argile Upper Boulder Clay et Tees Laminated Clay ont été étudiés par F. G. Bell.

Limites d'Atterberg.

Tableau 2.12 Variation des limites d'Atterberg avec l'addition de la chaux (F. G. Bell 1989-1996).

Soil	Property	Amount of lime added (%)				
		0	2	4	6	8
Upper Boulder Clay	PL (%)	14	23	23	21	18
	LL (%)	30	42	40	41	37
	PI (%)	16	17	17	20	19
	LS (%)	6	2	1	1	1
Tees Laminated Clay	PL (%)	26	36	34	33	31
	LL (%)	58	57	53	50	49
	PI (%)	32	19	19	17	18
	LS (%)	10	4	3	2	2

Dans le cas de l'argile Upper Boulder Clay l'addition de la chaux a une légère influence sur sa plasticité puisque la chaux a augmenté la limite de liquidité ainsi que la limite de plasticité pour les mêmes quantités ajoutées. Le plus grand changement dans la plasticité a été fait juste pour 2% de chaux. La limite de liquidité, de plasticité et l'indice de plasticité de l'argile Tees Laminated Clay sont plus grands que ceux de l'argile Upper Boulder Clay. L'addition de la chaux à cette argile développe une réduction notable dans la plasticité, qui est principalement dû à l'augmentation de la limite de plasticité et la valeur constante de la limite de liquidité avec l'ajout de la chaux.

## Essai de compactage.

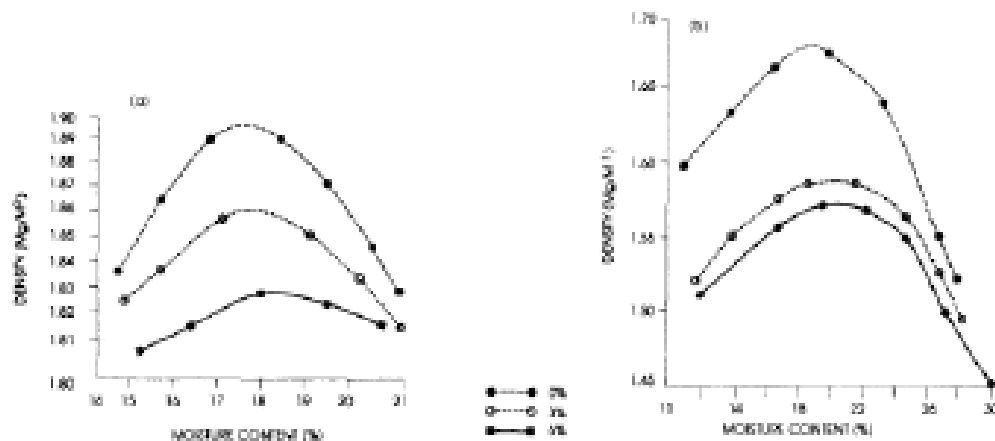


Figure 2.30 Courbes de compactage de (a) Upper Boulder clay (b) Tees Laminated Clay à 0, 3 et 6% de chaux (F. G. Bell 1989-1996).

L'addition de la chaux aplatit la courbe de compactage, augmente la teneur en eau optimale, et diminue la densité sèche maximale.

## Essai de compression simple (UCST).

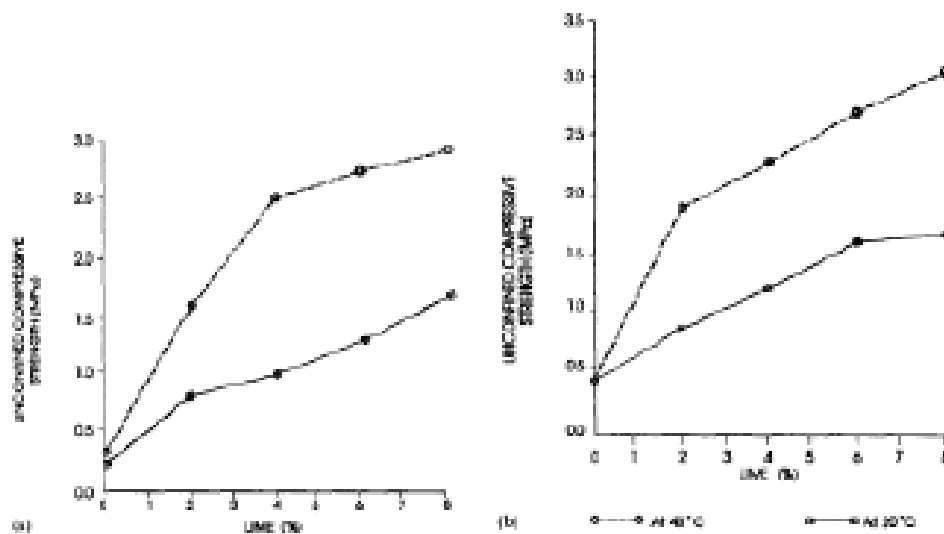


Figure 2.31 Variation de la compression simple avec l'addition de la chaux pour (a) Tees Laminated Clay (b) Upper Boulder Clay. Avec l'influence de la température (F. G. Bell 1989-1996).

Pour les deux argiles Upper Boulder Clay et Tees Laminated Clay la résistance et le module d'Elasticité augmente avec l'addition de la chaux. La résistance max a été atteinte pour l'argile Upper Boulder Clay à 6% de chaux et à 4% pour l'argile Tees Laminated Clay. Ces pourcentages aussi donnent la valeur max dans le module d'élasticité.

• En 1988 K. E. Clare (UK) a fait une étude sous le titre « *Laboratory experiments in the stabilization of clays with hydrated lime* ». Cette étude a été effectuée sur dix types d'argile dont l'auteur a présenté un seul type puisque les résultats trouvés pour les autres argiles ont été semblable avec les résultats obtenus pour l'argile présentée (argile Kimmeridge clay). Les résultats des essais physiques sont présentés sur le tableau suivant.

Tableau 2.13 Résultats des essais physiques de l'argile étudiée (K. E. Clare 1988).

Formation	Particle-size distribution			Surface area (m <sup>2</sup> /g)	Plasticity tests		Specific gravity
	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)		Liquid limit (%)	Plasticity index (%)	
Woold Clay .. .. .	0	66	35	47	47	24	2.71
Gault Clay .. .. .	3	39	58	79	76	49	2.58
Kimmeridge Clay .. .. .	1	38	61	84	72	50	2.73
Lower Lias Clay .. .. .	5	62	43	64	48	35	2.72
Oxford Clay .. .. .	2	53	45	42	50	31	2.74
Lower London Tertiary Clay ..	5	52	43	95	71	39	2.62
Keuper Marl .. .. .	20	76	16	60	38	7	2.74
Marl in Keuper Sandstone .. ..	15	69	25	37	36	17	2.74
Upper Coal Measures Clay .. ..	10	69	30	38	37	18	2.62
London Clay .. .. .	3	28	69	88	81	55	2.76

### Limites d'Atterberg.

Les courbes des limites de liquidité et de plasticité pour l'argile Kimmeridge non traitée et traitée à 1, 2, 4, 7, et 10% sont présentées sur les figures suivantes.

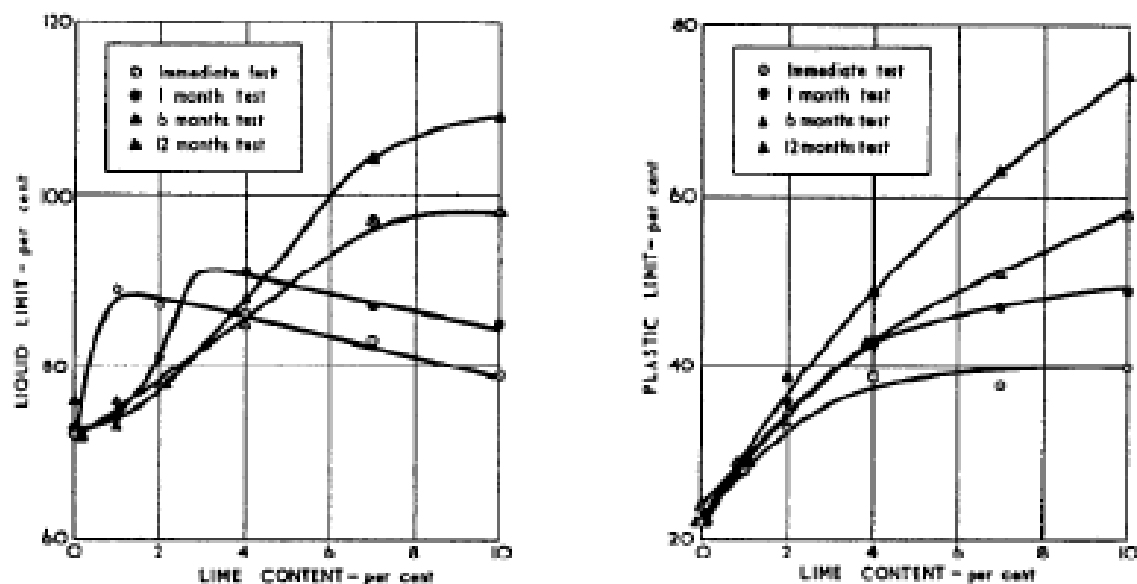


Figure 2.32 Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg pour l'argile Kimmeridge Clay en fonction du temps de cure (K. E. Clare 1988).

Un pourcentage de 1% de chaux augmente la limite de liquidité considérablement puis elle diminue progressivement avec l'addition de la chaux. Cependant, la limite de plasticité augmente jusqu'à une valeur où elle devient constante et le point de fixation de chaux est entre 6 et 8% de chaux.

### Influence de la chaux sur le pH.

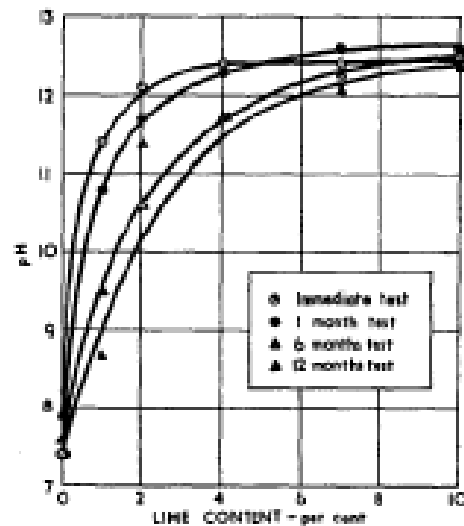


Figure 2.33 Influence de la chaux sur le pH de l'argile Kimmeridge Clay (K. E. Clare 1988).

La valeur du pH augmente considérablement avec l'addition de la chaux jusqu'à un pourcentage de 4% où elle reste constante. Le pourcentage de 4% est la teneur en chaux initiale de stabilisation.

## Chapitre 3

# MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS.

### 3.1. INTRODUCTION.

Ce chapitre présente les matériaux utilisés et le mode opératoire concernant les différents essais : procédures et techniques employées pour préparer les différentes éprouvettes et les déroulements des essais expérimentaux.

La première partie contient l'identification et la caractérisation des matériaux utilisés dans cette étude ainsi que les résumés des essais réalisés et la discussion de leurs résultats. Le matériau principal étant le sol originaire du gisement de Djebel DEBBAGH de la wilaya de Guelma. Ce dernier a été caractérisé par, *des analyses chimiques, minéralogiques, la teneur en matière organique (TMO), le poids spécifique ( $G_s$ ), la granulométrie, les limites d'Atterberg ( $W_L$ ,  $W_p$ ,  $I_p$ ), la classification selon l'USCS, le compactage au Proctor normal, le cisaillement direct et la compression simple*. Cette première partie contient aussi l'identification et la caractérisation physico-chimique de la chaux utilisée comme additif.

La deuxième partie présente *les méthodes pour la préparation des éprouvettes (sol-chaux), le malaxage, la conservation, la détermination des pourcentages de chaux à ajouter et la réalisation des essais mécaniques*.

### 3.2. MATERIAUX.

#### 3.2.1. Matériau: Sol.

Le sol utilisé dans ce travail de recherche provient de la mine SOALKA de Djebel DEBBAGH située à 35Km du Nord-Ouest de la ville de Guelma à une altitude au dessus de la mer varie de 700 à 1060m. La mine est mise en exploitation par l'Entreprise Nationale des Produits Miniers Non-Ferreux et des Substances Utiles (ENOF) du ministère de l'énergie et des mines. SOALKA extrait trois types d'argiles en vue de leur utilisation dans l'industrie de la céramique. Le gisement est encaissé dans 74 cavités karstiques. Trois produits sont actuellement exploités, à savoir :

- DD1 Kaolins de première qualité (utilisé pour la fabrication de la porcelaine) ;
- DD2 Kaolins de deuxième qualité (utilisé pour la fabrication des faïences) ;
- Et la troisième qualité Kaolinite DD3, cette argile est de couleur grise dû à un fort pourcentage de magnésium et par conséquent ne trouve pas preneur en vue de son utilisation dans l'industrie et reste alors en tant que déchet industriel en grandes quantités sur site.

Les Kaolins sont des argiles primaires formées par la décomposition du feldspath sur place. Ils sont déposés dans des poches plutôt qu'en vastes couches stratifiées et ils sont relativement exempts d'impuretés minérales comme le fer.

Les réserves géologiques sont estimées à 106 285 tonnes. Ainsi que les réserves exploitables sont estimées à 99 325 tonnes.

L'Argile Kaolinite DD3 est méconnue de point de vue géotechnique, et son utilisation dans la construction routière nécessite sa caractérisation par une série d'essais au laboratoire de mécanique des sols:

### Analyses Chimiques.

L'analyse chimique de la Kaolinite DD3 a été effectuée par l'entreprise même de production SOALKA, les teneurs en Alumine ( $Al_2O_3$ ), Silice ( $SiO_2$ ), Oxyde de Calcium ( $CaO$ ), Oxyde de Fer ( $Fe_2O_3$ ), Oxyde de Magnésium ( $MgO$ ), Oxyde de Manganèse ( $MnO$ ), Perte au Feu (P.A.F) ainsi que la teneur en Sulfates ( $SO_3$ ) ont été effectués selon les normes internationales. Les résultats obtenus sont présentés sur le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Composition Chimique de la Kaolinite DD3.

Désignations		% en poids
Alumine	$Al_2O_3$	38
Silice	$SiO_2$	41,97
Oxyde de Calcium	$CaO$	0,2
Oxyde de Fer	$Fe_2O_3$	0,12
Oxyde de Magnésium	$MgO$	0,07
Oxyde de Manganèse	$MnO$	1,34
Perte au Feu	P.A.F	16,8
Sulfates	$SO_3$	0,75

La teneur en sulfate est inférieure au seuil limité pour une stabilisation de l'argile à la chaux.

### Analyse Minéralogique (XRD).

L'analyse minéralogique a été obtenue par diffraction aux rayons-X (XRD : X-Ray Diffraction) à l'Université de Laghouat au département de physique sur la fraction argileuse inférieure à 2  $\mu\text{m}$ . La matière organique a été éliminée par un prétraitement de 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$  avec un pH de 5. L'échantillon obtenu a été scanné par étape pendant 4 secondes à  $0.072^\circ$  à un angle de  $2\theta$  en utilisant le  $\text{CuK}\alpha$  (20 MA, 40 kV). Les quantités minérales ont été estimées en intégrant les intensités des pics respectives. La figure 3.1 illustre le spectre obtenu.

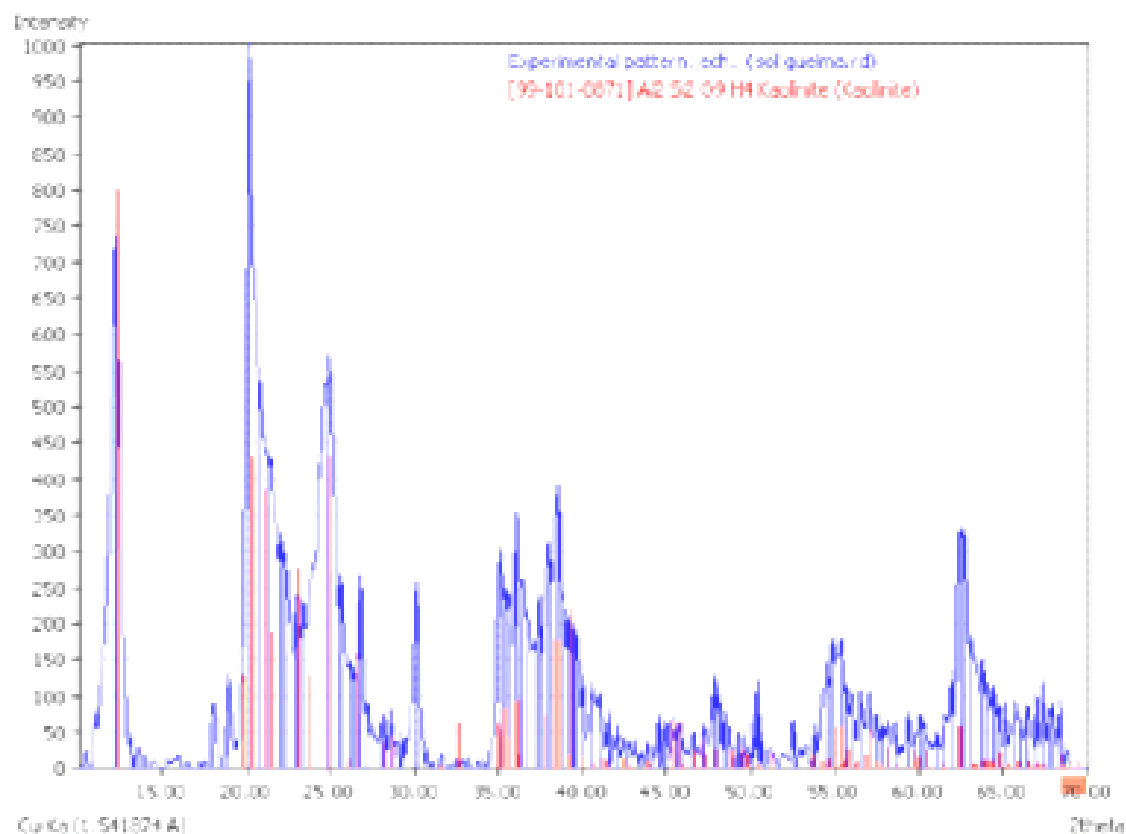


Figure 3.1 Spectre de Réponse XRD.

Selon le spectre la composition minéralogique de la Kaolinite DD3 est donnée sur le tableau 3.2.

Tableau 3.2 Composition Minéralogique de la Kaolinite DD3.

composants	Formules	Références	Nbre de Pics	Facteur de l'échèle d'intensité
Kaolinite	$Al_2Si_2O_5H_4$	99-101-0867	254	0.75
Montmorillonite	$Al_2Si_4O_{12}Ca_3$	99-100-2864	92	1.60
Quartz	$SiO_2$	99-100-8244	35	0.25
Gypse	$CaSO_4D_2$	99-100-7501	257	0.06
Chaux	$CaO$	99-100-7552	8	0.07
Dolomite	$CaMgC_2O_6$	99-100-0084	53	0.25
Chlorite	$Mg_{6.7}Fe_{0.7}Al_{1.44}Si_{7.16}O_{18}H_8$	99-100-4247	253	0.16
Dickite	$Si_2Al_2O_5H_4$	99-100-3166	290	0.20
Augelite	$Al_2PO_7H_3$	99-100-0174	282	0.18

Le sol appelé Kaolinite DD3 est composée principalement de la kaolinite, du quartz ainsi que la montmorillonite et autres composants de faibles quantités.

#### Analyse du pH.

La stabilisation à la chaux d'un sol nécessite des réactions chimiques. La détermination de la valeur de pH de l'argile Kaolinite DD3 est donc très importante puisqu'elle permet de déterminer la solubilité des minéraux et la mobilité des ions dans le sol. Le mesure du pH a été effectuée en utilisant un pH mètre de marque HANNA instruments HI 931401 selon la norme ASTM D 4972-95a au laboratoire du Département de Génie des Procédés de l'université d'Annaba. Une valeur de 9.83 supérieur à 7 a été obtenue indiquent que l'argile est de forme basique.

#### Teneur en Matière Organique.

La teneur en matière organique est obtenue premièrement par le séchage d'un échantillon d'argile Kaolinite DD3 dans l'étuve à 60°C pendant 24 heures, pour assurer l'élimination de l'eau dans le sol. Et après il été placé dans le four à une température de 440°C selon la méthode standard ASTM D 2974-87. La perte du poids après brûle divisé par le poids sec initial donne la valeur de la teneur en matière organique.

La valeur de la teneur en matière organique a été trouvée égale à :  $T.M.O = 6,64\%$  et par conséquent cette valeur indique que l'argile nommée Kaolinite DD3 est un *sol organique* selon la classification des sols organiques.

### Poids Spécifique (Gs).

Trois valeurs du poids spécifique des particules solides du sol ont été déterminé en plaçant un poids connu du sol séché dans l'étuve à  $60^{\circ}\text{C}$  dans une fiole et la remplir avec de l'eau distillée. Le poids de l'eau déplacée est calculé en comparant le poids du sol et d'eau dans la fiole avec le poids de la fiole contient l'eau seulement. Le poids spécifique est calculé par une division du poids du sol sec par le poids de l'eau déplacé. La norme utilisée pour la détermination du poids spécifique est la norme ASTM D 854-98 dont la valeur trouvée est  $G_s = 2,7$ . Cette valeur étant la moyenne de trois essais successive avec une différence inférieure à 1%.

### Analyse Granulométrique.

L'analyse granulométrique a été effectuée dans le laboratoire LNHC (Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction du sud) sur un échantillon de 500g du sol **Kaolinite DD3** passant par une série de tamis de la norme ASTM C 136-96a et en utilisant la méthode de tamisage par lavage. Environ 50g du sol séché à  $60^{\circ}\text{C}$  et passant par le tamis de  $75\mu\text{m}$  de maille, a été traité avec un agent de dispersion pour 18 heures. Une analyse sédimentaire a été effectuée pour mesurer les quantités et les tailles des particules inférieures à  $75\mu\text{m}$  selon la norme ASTM C 117-95.

La courbe granulométrique obtenue est présentée sur la figure 3.2.

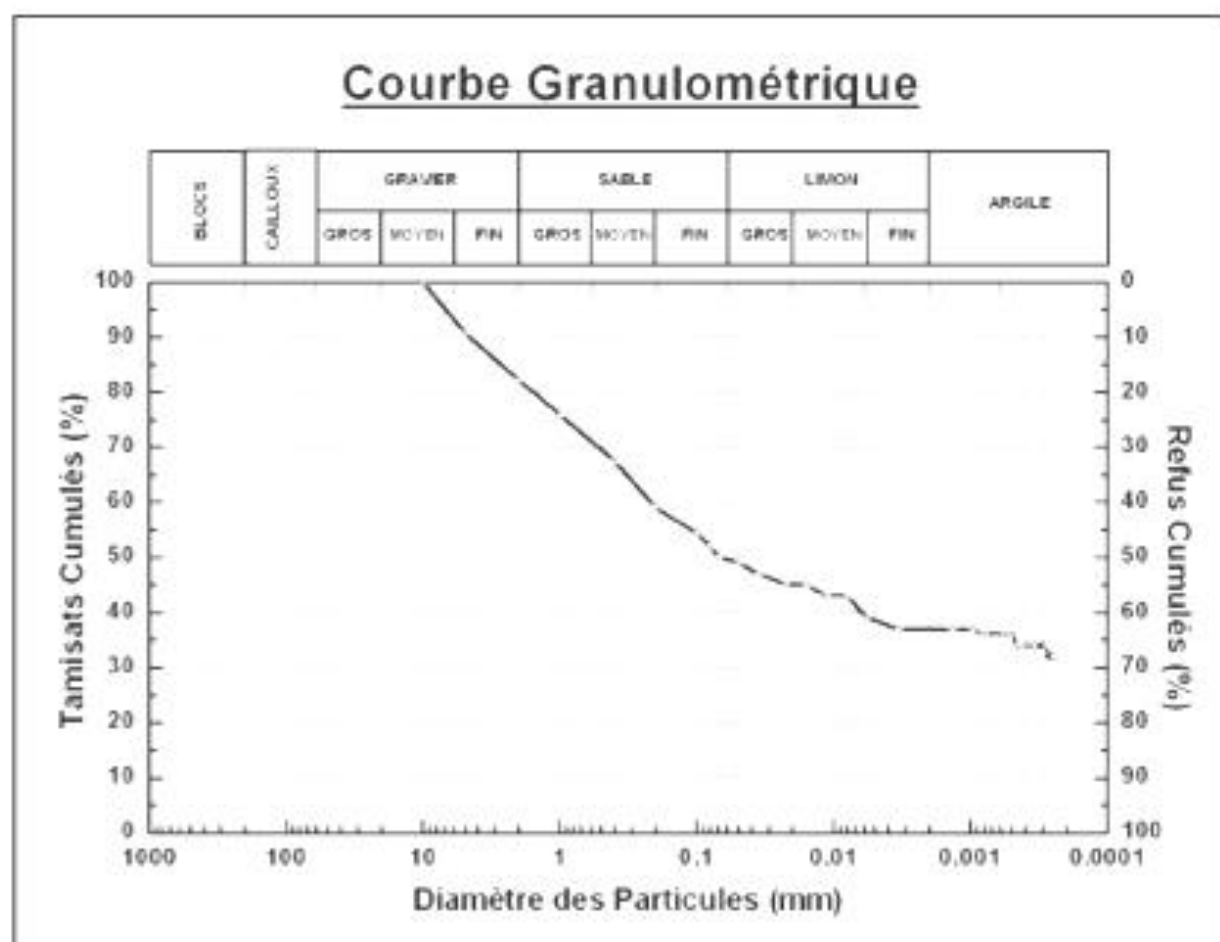


Figure 3.2 Courbe Granulométrique.

Les arrangements des dimensions des grains sont indiqués dans le tableau 3.3. D'après ce tableau le sol contient 17.35% de gravier, 32.25% de sable, 13.10% de limon et 37.30% d'argile. Le pourcentage des fines passant par le tamis N°200 (75µm) est environ de 50.40%.

Tableau 3.3 Pourcentages des Fractions du Sol.

Description du Sol		$D_{min} - D_{max}$	Fraction (%)	
BLOCS		>200	0%	
CAILLOUX		60 - 200	0%	
GRAVIER	GROS	20 - 60	17.35%	0
	MOYEN	6 - 20		06.30
	FIN	2 - 6		11.05
SABLE	GROS	0.6 - 2	32.25%	11.00
	MOYEN	0.2 - 0.6		12.10
	FIN	0.06 - 0.2		09.15
LIMON	GROS	0.02 - 0.06	13.10%	04.75
	MOYEN	0.006 - 0.02		05.40
	FIN	0.002 - 0.006		02.95
ARGILE		<0.002	37.30%	

La quantité d'argile présente dans ce sol est de 37.30% supérieur à une valeur minimale qui permet le sol être candidat pour la stabilisation à la chaux.

### Limites d'Atterberg.

Un échantillon représentatif a été utilisé dans les essais des limites d'Atterberg pour déterminer la liquidité de l'argile, ainsi que sa plasticité. En utilisant les passants à travers le tamis N°40 (425 $\mu$ m) la limite de liquidité, ainsi que la limite de plasticité de l'argile Kaolinite DD3 ont été déterminés selon la norme ASTM D 4318-00. Ces valeurs ont été utilisées pour calculer l'indice de plasticité et par suite la classification de l'argile.

### Limite de Liquidité.

La limite de liquidité désignée par  $W_L$  a été déterminée par la coupelle de Casagrande. La limite de liquidité est la teneur en eau correspondant à une fermeture de 1cm pour un nombre de 25 coups. La figure 3.3 montre la limite de liquidité déterminée pour la Kaolinite DD3.

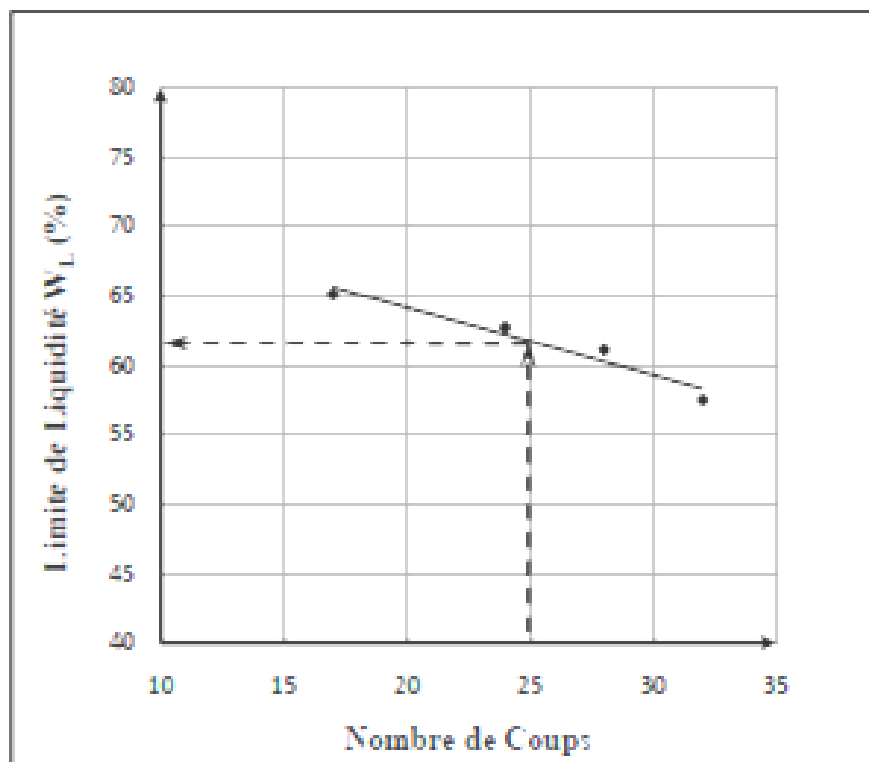


Figure 3.3 Limite de Liquidité pour l'Argile Kaolinite DD3.

La valeur de la limite de liquidité est de  $W_L = 61.74 \%$

### Limite de Plasticité.

La limite de plasticité a été déterminée par la préparation d'un fuseau d'argile de 3.2mm et se brise en morceaux de 1 à 2cm de longueur. Trois essais ont été effectués pour l'obtention de  $W_p$ . Le tableau 3.4 présente les résultats obtenus.

Tableau 3.4 Limite de Plasticité.

N° Tare	Tare Vide (g)	Tare + Sol Humide (g)	Tare + Sol Sec (g)	$W_p$ (%)
1	16.0	21.2	20.1	26.16
2	16.3	21.7	20.6	24.80
3	16.2	21.6	20.5	25.58

La limite de plasticité qui est la moyenne des trois valeurs obtenus est de  $W_p = 25.52 \%$ .

### Indice de Plasticité.

L'indice de plasticité est calculé par l'équation de Skempton et dont le résultat est :

$$I_p = W_L - W_p = 36.22\%$$

### Indice d'activité.

Le ratio de l'indice de plasticité au pourcentage d'argile présent dans le sol est la corrélation entre ces deux propriétés et l'aptitude du sol pour être stabilisé à la chaux. Cette corrélation est donnée par l'équation ci-dessous.

$$A_c = \frac{\text{Indice de Plasticité (Ip)}}{\% \text{ de fraction Argileuse}}$$

La valeur calculée de l'activité d'argile Kaolinite DD3 est de **0.971**.

Cette valeur montre que l'argile a une activité *normale* et par conséquent la Kaolinite DD3 est apte d'être stabilisée à la chaux. Une réaction pouzzolanique peut donc être développée entre les particules de l'argile et la chaux.

Cette aptitude est aussi confirmée selon le guide technique de l'Association Nationale de la Chaux (NLA) aux Etats Unies réalisé par le Pr. Dallas Little, qui a suggéré que « les sols qui contiennent 25% de passant à travers le tamis N°200 (75µm) avec un indice de plasticité PI supérieur ou égal à 10 sont aptes d'être stabilisés à la chaux ».

### Classification selon l'USCS.

Suite aux résultats obtenus par l'analyse granulométrique, la limite de liquidité ainsi que l'indice de plasticité, la Kaolinite DD3 a été classée selon l'Unified Soil Classification System (USCS) comme suggéré par la norme ASTM D 2487-98.

L'analyse granulométrique montre que le sol nommé Kaolinite DD3 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 N° 200 (75µm).

Le diagramme de Casagrande montré sur la figure 3.4 donne comme désignation à la Kaolinite DD3 dont la limite de liquidité 61.74% supérieur à 50% et l'indice de plasticité 36.22%, le symbole OH correspondant à *une argile organique de plasticité élevée*. Dont l'argile est classée comme *argile grasse « fat clay »*.

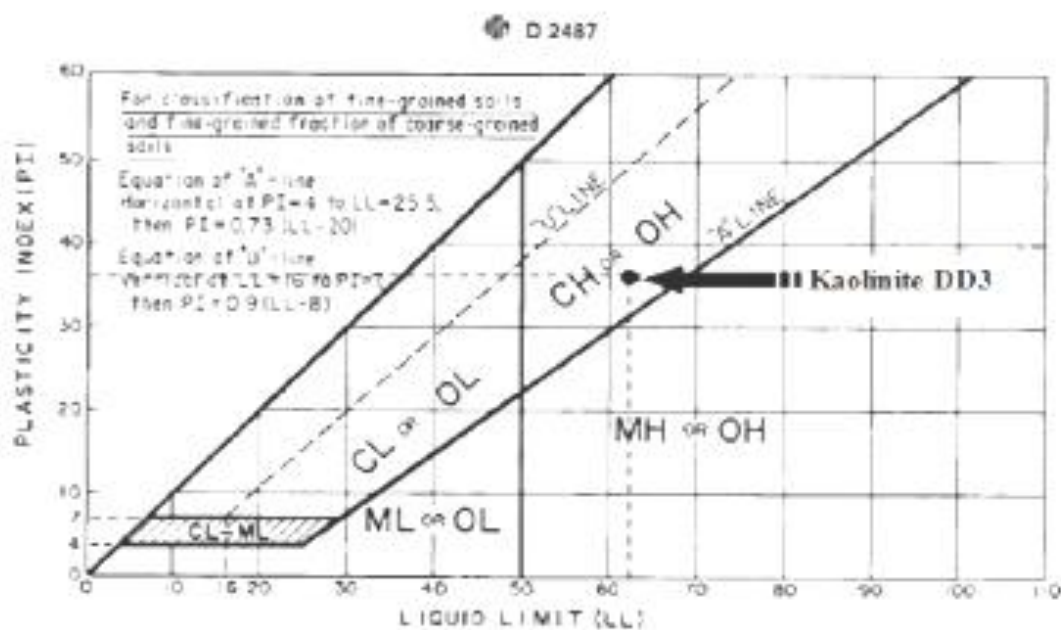


Figure 3.4 Situation du Sol Kaolinite DD3 sur le Diagramme de Casagrande.

### Essai de Compactage - Proctor Normal.

Afin de caractériser cette argile de point de vue compactage et déterminer la teneur en eau optimale et sa densité sèche maximale, une série d'essais Proctor normal a été entrepris selon la norme ASTM D 698-91. Les résultats obtenus pour l'argile Kaolinite DD3 sont montrés sur la figure 3.5. Une teneur en eau optimale de 41.5% et une masse volumique sèche de 1210kg/m<sup>3</sup> ont été obtenus.

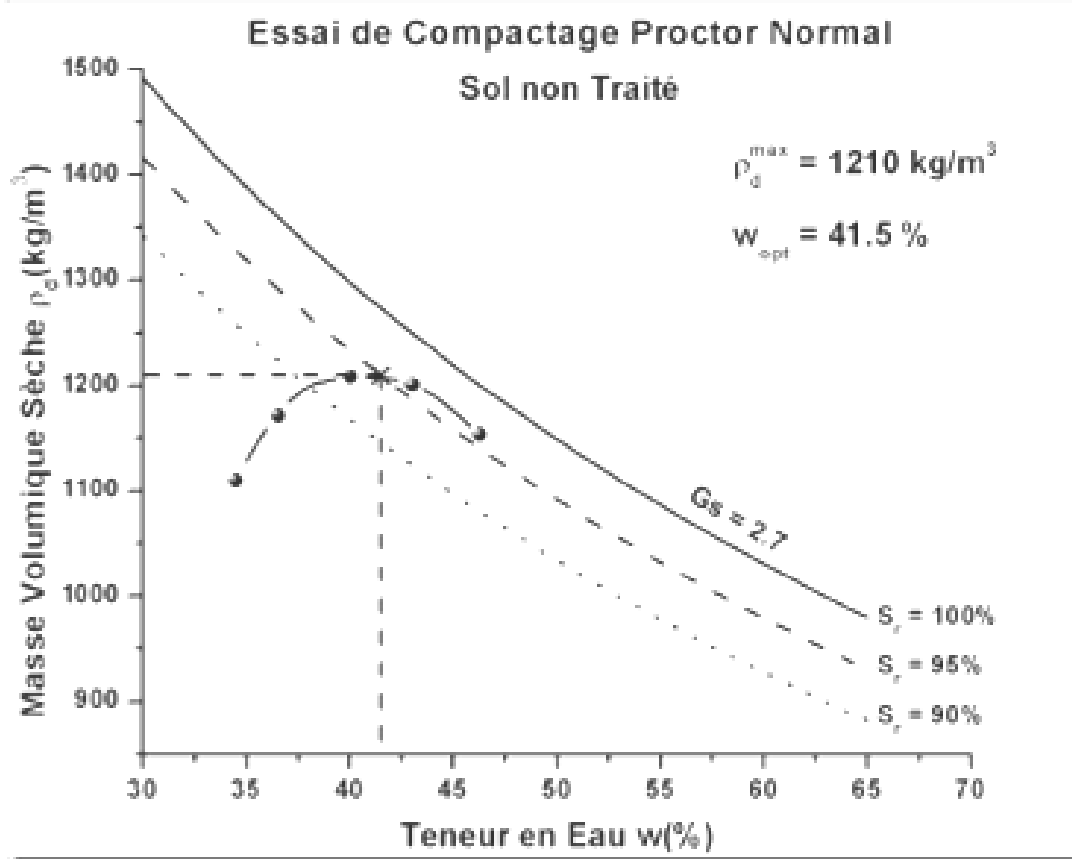


Figure 3.5 Courbe de Compactage pour l'Argile Kaolinite DD3.

### Essai de Compression Simple.

La résistance à la compression simple concernant cette argile a été déterminée par l'essai de compression simple (UCST) selon la norme ASTM 2166-98a pour les conditions de masse volumique sèche maximale et la teneur en eau optimale du Proctor normal. La figure 3.6 donne l'évolution de la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale. Un déviateur maximum de 92.4kPa correspondant une déformation de 9%.

Le module d'élasticité qui correspond à la partie linéaire de la courbe initiale est de 20.87kPa. La représentation du cercle de Mohr illustrée sur la figure 3.7 a donnée une cohésion non drainée de 46.2kPa. Pour cette essai, non drainée effectuée en moins de 15 minutes afin d'éviter toute dissipation d'excès de pression interstitielle est toute perte de teneur en eau. D'après la valeur de la contrainte axiale et la cohésion non drainée l'argile Kaolinite DD3 est classée comme *Argile de Consistance Moyenne (Medium)*.

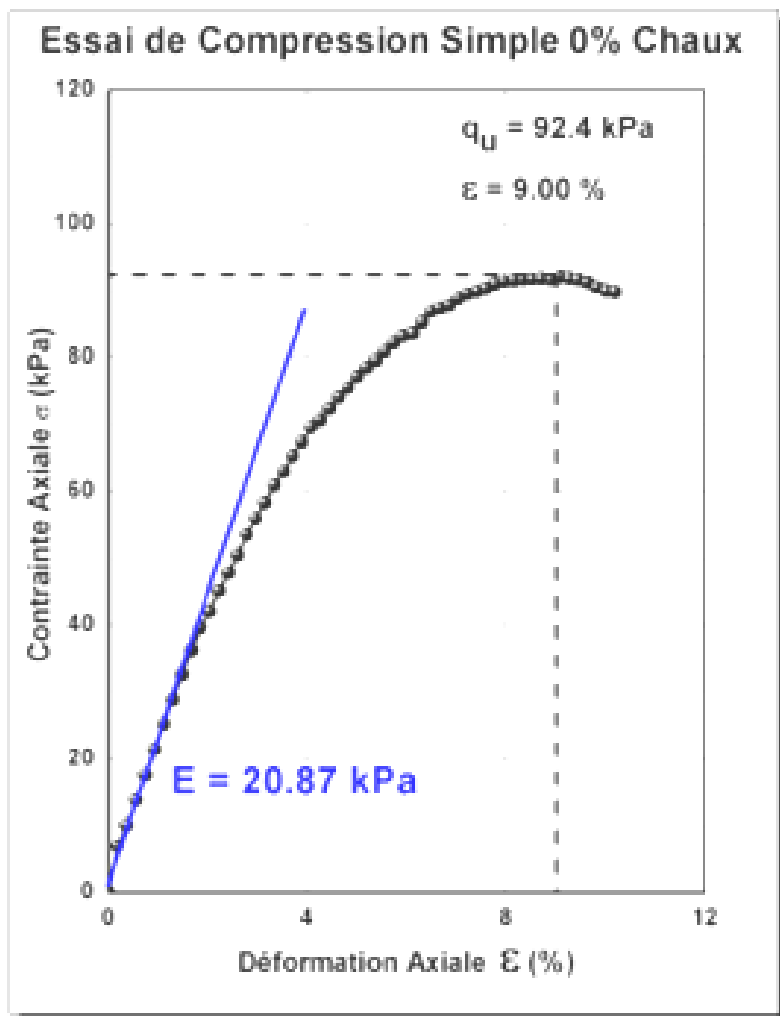


Figure 3.6 Essai de Compression Simple (UCST) pour l'Argile Kaolinite DD3.

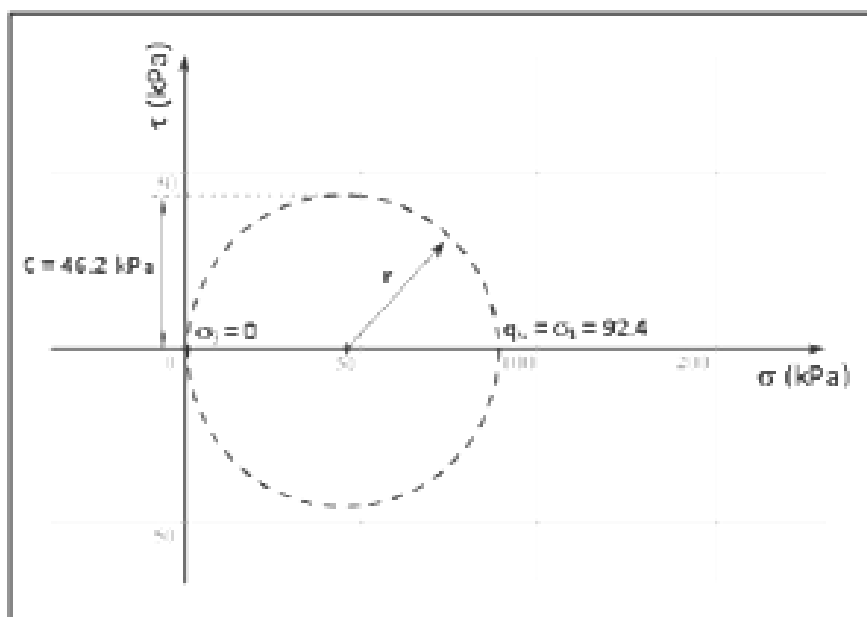


Figure 3.7 Cercle de Mohr pour l'argile Kaolinite DD3.

### Essai de Cisaillement Direct (ASTM D 3080).

Afin de déterminer les paramètres de résistance de la Kaolinite DD3 une campagne d'essais de cisaillement direct a été conduite. Trois contraintes normales ont été sélectionnées pour les trois essais effectués à la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale correspondante. La figure 3.8 présente la variation de la contrainte de cisaillement  $\tau$  en fonction du déplacement horizontal  $\delta_h$  pour l'argile soumise à des contraintes normales de 100, 200 et 300kPa.

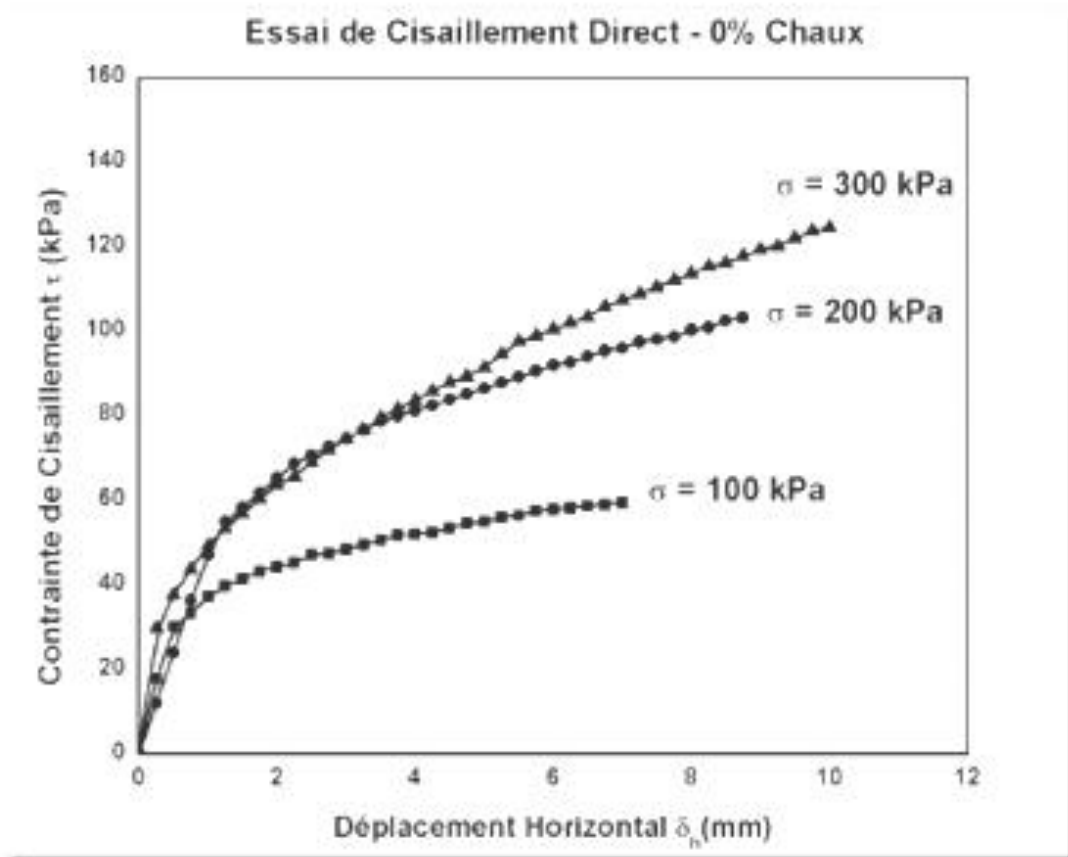


Figure 3.8 Courbes: Contrainte de Cisaillement - Déplacement Horizontal.

Le tableau 3.5 montre les contraintes de cisaillement max respectives 57.53, 102.42 et 123.64kPa ainsi que les déplacements linéaires de 5.75, 8.50 et 9.75mm pour les contraintes normales appliquées.

Tableau 3.5 Contrainte de Cisaillement Max et le Déplacement Horizontal.

0% Chaux	$\sigma=100$ kPa	$\sigma=200$ kPa	$\sigma=300$ kPa
$\tau_{max}$ (kPa)	57,53	102,42	123,64
$\delta_h$ (mm)	5,75	8,50	9,75

La figure 3.9 montre le diagramme de Mohr-Coulomb qui indique que l'argile a pour cohésion 28.42kPa et un angle de frottement interne 18.26°.

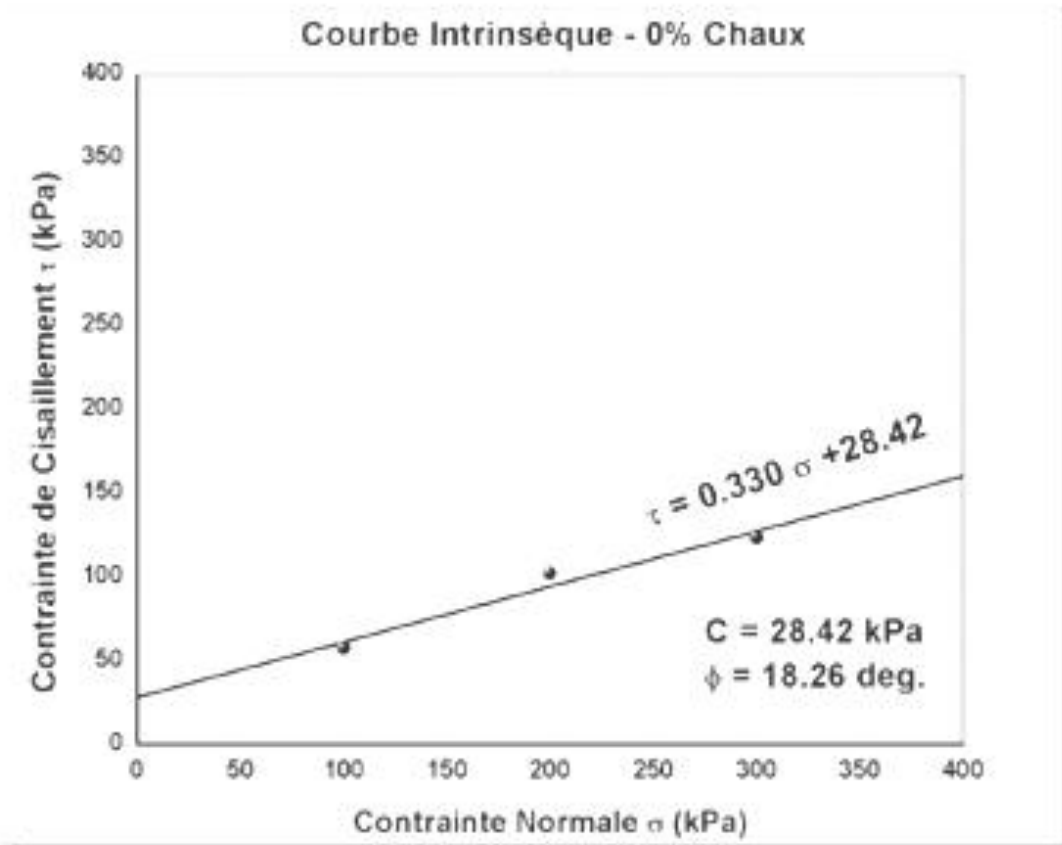


Figure 3.9 Courbe Intrinsèque de l'Argile Kaolinite DD3.

### 3.2.2. Matériau: Chaux.

La chaux utilisée dans cette étude étant la chaux vive exploitée d'après l'unité SODEPAC Filiale ERCO situé à Oum DJERANE wilaya de SAIDA. Les analyses chimiques et les caractéristiques physiques de la chaux effectués selon la norme « DIN 1060 » ont été obtenus de l'unité de production.

Les tableaux 3.6 et 3.7 montrent respectivement la composition chimique ainsi que les caractéristiques physiques de la chaux vive utilisée comme stabilisateur pour l'argile Kaolinite DD3.

Tableau 3.6 Composition chimique de la chaux vive.

Caractéristiques de base	Fiche technique de la chaux
CaO [%]	> 73.3
MgO [%]	< 0.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	< 2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	< 1.5
SiO <sub>2</sub> [%]	< 2.5
SO <sub>2</sub> [%]	< 0.5
Na <sub>2</sub> O [%]	0.4 - 0.5
CO <sub>2</sub> [%]	< 5
CaCO <sub>3</sub> [%]	< 10
Matériau insoluble dans la HCl [%]	< 1

Tableau 3.7 Caractéristiques physiques de la chaux vive.

Paramètre	Valeur spécifique
Densité Spécifique [g/cm <sup>3</sup> ]	2
Plus de 90 µm [%]	< 10
Plus de 630 µm [%]	0
Densité Apparente [g/l]	600 - 900
Concentration volumique	Bonne
Apparence physique	Poudre blanche sèche

### 3.3. METHODES.

#### 3.1.1 Préparation du Mélange (Sol-Chaux).

##### Malaxage.

La méthode standard ASTM D3551-90 a été utilisée pour préparer les mélanges Sol-Chaux pour les essais au laboratoire (Limites d'Atterberg, Proctor, UCST, Cisaillement Direct). Le malaxeur mécanique présenté sur la figure 3.10 de la marque NJ-160A (Cement Paste Mixer) et d'une vitesse de  $125 \pm 10$  tour/min a été utilisé pour le malaxage. Une quantité suffisante d'argile séchée à l'étuve à une température de  $60^\circ\text{C}$  a été mélangée avec la quantité nécessaire de la chaux à voie sec pendant une minute ou jusqu'à l'homogénéité du mélange (couleur uniforme). La quantité nécessaire d'eau plus 1% (pour récupérer l'effet d'évaporation) a été ajoutée au mélange et le malaxeur est en marche. Environ 2.5 min après l'ajout d'eau, le malaxage a été arrêté pour ajuster le mélange. Le malaxage a été débuté une autre fois pour une période de 2.5 min. les mélanges des échantillons préparés ont été conservés dans des récipients bien étanche pour réduire les pertes d'eau.



Figure 3.10 Malaxeur Mécanique (Laboratoire de Mécanique des Sols).

##### Conservation.

Après malaxage, les échantillons ont été emballés dans des sachets étanches et conservés dans l'humidificateur à une température de  $23 \pm 1.7^\circ\text{C}$  et un taux d'humidité de 100%. Cette conservation a été effectuée soit pour *le temps de maturation (Mellowing Time)* ou pour *la durée de conservation (Curing Time)*.

### *Temps de Maturation.*

Le temps de maturation (*Mellowing Time*) est la période du temps entre le malaxage du mélange (sol, chaux et eau) et l'utilisation des échantillons soit pour les limites d'Atterberg ou le compactage pour les différents essais mécaniques (Proctor, UCST, et Cisaillement Direct).

### *Durée de Conservation -Temps de Cure.*

La durée de Conservation (*Curing Time*) est le temps entre le compactage du mélange (sol, chaux et eau) et la mesure des paramètres de l'essai Proctor, ou la rupture de l'éprouvette pour l'essai de Compression Simple (UCST) et le Cisaillement Direct.

## **3.1.2 Mode Opérateur des Essais.**

### **Limites d'Atterberg.**

La littérature montre que traitement des argiles à la chaux améliore leurs maniabilité. Ce qui explique l'importance de l'étude de la variation des limites d'Atterberg de la Kaolinite DD3 avec l'addition de la chaux. Pour cette raison une campagne d'essais a été conduite. Dont 8 échantillons d'argile traitée à 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, et 8% de chaux ont été préparés pour l'essai de limite de liquidité à la coupelle de Casagrande. Chaque échantillon a été préparé en utilisant une fraction de 150g à 200g d'argile sèche passée à travers le tamis N°40 (425µm) avec l'addition du pourcentage de chaux correspondant. Le malaxage du mélange argile-chaux a été effectué selon la méthode de malaxage citée au dessus (ASTM D3551-90). Le mélange a été conservé dans un récipient bien étanche pour éviter toute évaporation d'eau, à un temps de maturation de 1 à 4h pour laisser le temps à la réaction entre l'argile et la chaux de se produire.

Après le temps de maturation chaque échantillon préparé à été mélangé une autre fois en utilisant une spatule. Les essais de la limite de liquidité ont été effectués sur une fraction du mélange préparé en utilisant la méthode de la coupelle de Casagrande. Le reste de la fraction du mélange utilisé pour chaque essai de limite de liquidité a été utilisé pour l'essai de limite de plasticité. Cette dernière a été déterminée par la préparation d'un fuseau d'argile traitée de 3mm de diamètre et se brise en morceaux de 1 à 2cm de longueur. Au minimum trois essais ont été effectués sur chaque échantillon préparé pour l'obtention de la limite de liquidité ainsi que la limite de plasticité de l'échantillon. La limite de liquidité a été obtenue

en traçant une droite de la teneur en eau en fonction de nombre de coups. D'après cette droite, la limite de liquidité est la teneur en eau correspondante à 25 coups. La valeur de la limite de plasticité a été calculée comme étant la moyenne des trois valeurs obtenues pour chaque pourcentage de chaux ajoutée. L'indice de plasticité a été calculé par l'équation de Skempton.

La série des essais effectués a comme but de voir la variation de la limite de liquidité, la limite de plasticité ainsi que l'indice de plasticité avec les différents pourcentages de chaux ajoutés. La variation de la limite de plasticité avec le pourcentage de chaux permet d'obtenir *le point de fixation de chaux* (Dallas Little 1995). Cependant, la variation de l'indice de plasticité montre l'effet de la chaux sur la maniabilité de l'argile.

#### Essai de pH (Méthode Eades & Grim).

La méthode d'Eades et Grim adoptée par la norme ASTM D 6276 a été utilisée pour déterminer le pourcentage initial de chaux qui correspond à un pH du mélange Sol-Chaux de 12.4.

Une série d'échantillons a été préparé contenant les pourcentages de chaux mélangés avec le sol passant par le tamis N° 40 (425  $\mu\text{m}$ ). La mesure du pH a été effectuée en injectant la cathode du pH mètre dans le mélange émergé par l'eau distillé. La figure 3.11 présente la méthode de mesure des valeurs de pH pour les mélanges à différents pourcentages de chaux.



Figure 3.11 Mesure du pH (Méthode de Eades et Grim).

## Essai de Compactage (Proctor Normal).

L'essai de compactage au laboratoire a pour but de déterminer la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche pour chaque échantillon de l'argile Kaolinite DD3 traitée à 1, 2, 3, 4, 5 et 6% de chaux, et voir la variation de ces deux paramètres avec l'addition de la chaux. Les paramètres de l'essai de compactage sont aussi utilisés dans la préparation des échantillons pour les essais de Compression Simple (UCST) et de Cisaillement Direct. Les six échantillons ont été préparés à différents pourcentages de chaux en utilisant le passant à travers le tamis N°4 (4.75mm) de l'argile Kaolinite DD3 séché à l'étuve. Le malaxage des mélanges sol-chaux a été effectué en utilisant un malaxeur mécanique selon la méthode de la norme ASTM D3551-90 présentée ci-dessus. Le mélange a été conservé dans des sachets bien étanches et laissé dans l'humidificateur pendant un temps de maturation de 24h comme recommandé dans le guide technique réalisé par Dallas Little (2006) de l'Association Nationale de la Chaux (NLA) aux Etats Unies. En suite, chaque échantillon a été compacté dans un moule d'un diamètre de 101.6mm et de volume de 944cm<sup>3</sup> en utilisant un marteau tombé d'une hauteur de 305mm qui produit un effort de compactage de 600kN-m/m<sup>2</sup>. D'après l'analyse granulométrique moins de 20% du sol a été retenue par le tamis N°4 (4.75mm) et par conséquent la méthode utilisée est la méthode A de l'essai Proctor normal de la norme ASTM D 698-91/98. Après la détermination de la teneur en eau de l'échantillon compacté ainsi que sa masse, la masse volumique sèche a été calculée aisément.

## Essai de Compression Simple (UCST).

### *Influence de la Chaux sur la Compression Simple.*

La variation de la consistance de l'argile Kaolinite DD3 avec l'addition de la chaux ainsi que le pourcentage qui donne une résistance maximale sont les buts de cette campagne d'essais de Compression Simple. Trois échantillons pour chacun des pourcentages 1, 2, 3, 4, 5, et 6% de chaux ajoutée à l'argile ont été préparés de même façon que la préparation des échantillons de l'essai de compactage. Les échantillons préparés ont été placés dans des sachets étanches dans l'humidificateur à une température contrôlée de 23±1.7°C et un taux d'humidité vérifié de 100% pendant 24h comme temps de maturation.

Le compactage de différentes éprouvettes a été effectué dans un moule réduit d'un diamètre de 51.7mm et hauteur de 106.6 mm. Chaque éprouvette a été compactée en trois couches en utilisant un marteau de 1.3479kg de masse.

La figure 3.12 montre que le compactage en trois couches dans le moule réduit en utilisant 22 coups par couche donne presque les mêmes résultats de l'essai Proctor normal effectué sur l'argile Kaolinite DD3. Ce qui permet d'utiliser le moule réduit pour le compactage des échantillons préparés pour l'essai de compression simple.

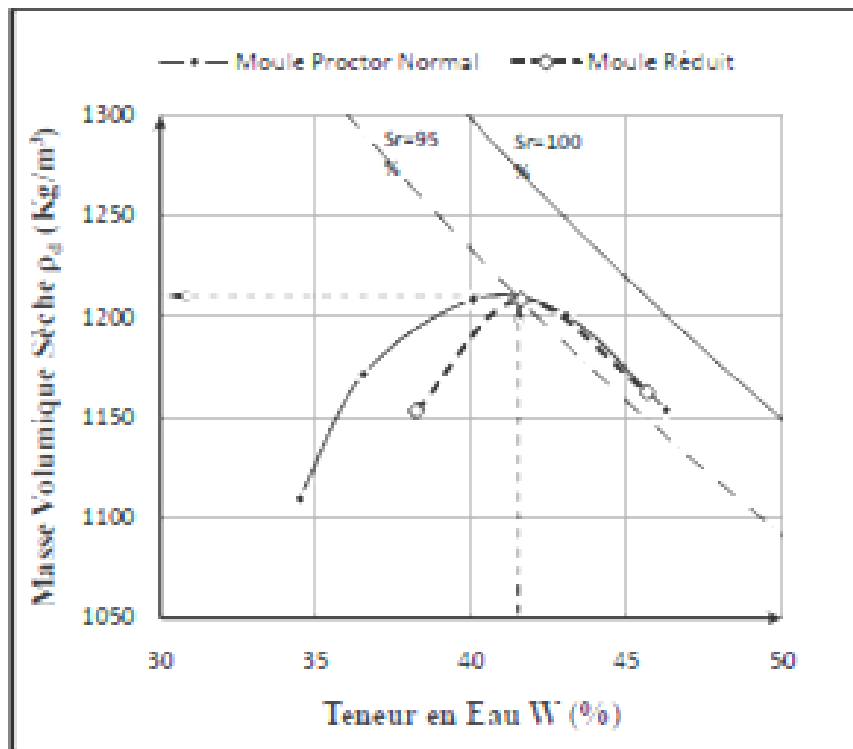


Figure 3.12 Courbe de Compactage Proctor Normal – Moule Réduit (Kaolinite DD3).

Les éprouvettes préparées et compactées dans le moule réduit ont été bien filmées et conservées dans l'humidificateur. Après 24h de conservation, l'écrasement des éprouvettes a été effectué en utilisant l'appareil triaxial sans pression latérale. L'essai de compression non confiné (UCST) a été réalisé au maximum dans 15min afin d'éviter la dissipation de la pression interstitielle et échappement d'eau. La vitesse de déformation été de 1mm/min et l'essai a été effectué selon la norme ASTM D 5102-96.

#### *Influence du Temps de Cure sur la Compression Simple.*

Une deuxième série d'essai de compression simple a été effectuée, mais cette fois pour le pourcentage de chaux qui donne la résistance maximale. Ce pourcentage a été trouvé de 3% de chaux. Le paramètre étudié dans cette campagne d'essai étant l'effet du temps de conservation (*Curing Time*) sur la compression simple. Pour chaque temps de cure (3jrs, 7jrs, 14jrs, 21jrs, et 28jrs) trois éprouvettes ont été préparées et conservées dans l'humidificateur.

Selon la même méthode utilisée précédemment ASTM D 5102-96 ces éprouvettes ont été écrasées.

### **Essai de Cisaillement Direct.**

Le but de cet essai est d'étudier l'influence du traitement à la chaux sur les paramètres de cisaillement direct. Trois échantillons ont été préparés pour chaque pourcentage de chaux utilisé pour le traitement de la Kaolinite DD3. Les pourcentages de chaux sont de 2, 4 et 6%. Les échantillons ont été préparés au laboratoire selon la méthode de préparation ci-dessus. La quantité d'eau ajoutée est correspondante à la teneur en eau optimale obtenue de l'essai Proctor normal et majorée de 1%. Les mélanges ont été conservés dans des sachets étanches pendant 24h comme temps de maturation. La densité sèche maximale pour chaque pourcentage de chaux a été atteinte en utilisant une presse de confection. Les dimensions des éprouvettes après démoulage sont de 130mm de hauteur et 80mm de diamètre. Le moule cylindrique d'une hauteur de 21.9mm et d'un diamètre de 60mm a été utilisé pour obtenir les échantillons pour l'essai de cisaillement.

L'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande a été réalisé selon la norme ASTM D 3080-98 et en utilisant une appareil de marque « SHEARTRONIC ». Cette appareil est équipée d'un anneau dynamométrique de 3kN et un comparateur à un centième de millimètre pour mesurer le déplacement horizontal. La vitesse de déplacement est fixée à 1mm/min. Les lectures des efforts horizontaux et des déplacements linéaires permettent de tracer la courbe contrainte-déplacement.

## Chapitre 4

# RESULTATS ET INTERPRETATIONS.

Le présent chapitre présente les résultats obtenus des essais effectués en laboratoire selon les méthodes résumées dans le chapitre 3. L'objectif de ce chapitre est de suivre la variation des limites d'Atterberg, de la valeur du pH, des paramètres de compactage, de la compression simple et les paramètres de cisaillement direct avec l'addition des différents pourcentages de chaux. L'influence du temps de cure sur la compression simple de l'argile Kaolinite DD3 traitée à un pourcentage rationnel a aussi fait l'objet d'une étude. Ces essais permettent de mieux comprendre le comportement de la Kaolinite DD3 vis-à-vis le traitement à la chaux et le temps de cure.

Les limites d'Atterberg ont comme but de voir l'influence de la chaux sur la maniabilité de l'argile ainsi que la détermination du *point de fixation de chaux*. Le pH conduit selon la méthode d'Eades & Grim permet d'obtenir *le pourcentage initial de la chaux*. La variation des paramètres de compactage avec les pourcentages de chaux ajoutée a une grande importance sur site et la préparation des échantillons pour la conduction des essais de compression simple. Ce dernier a été réalisé pour étudier le développement de la résistance de compression non confiné des éprouvettes traitées et l'influence du temps de cure. Le cisaillement direct a été entrepris pour voir l'influence du taux de chaux sur les paramètres de résistance.

Ces différents résultats sont présentés, discutés et commentés dans des sections à venir.

## 4.1. Influence de la Chaux sur les Limites d'Atterberg.

### 4.1.1. Limite de Liquidité.

Comme indiqué dans le chapitre précédant la limite de liquidité a été déterminée au laboratoire par l'utilisation de la méthode de la coupelle de Casagrande pour l'argile non traitée ainsi que l'argile traitée à des pourcentages de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, et 8% de chaux.

La figure 4.1 montre la ligne de variation de la limite de liquidité en fonction de nombre de coups pour l'argile Kaolinite DD3 non traitée. La valeur de la limite de liquidité correspondante à 25 coups est de 61.74%.

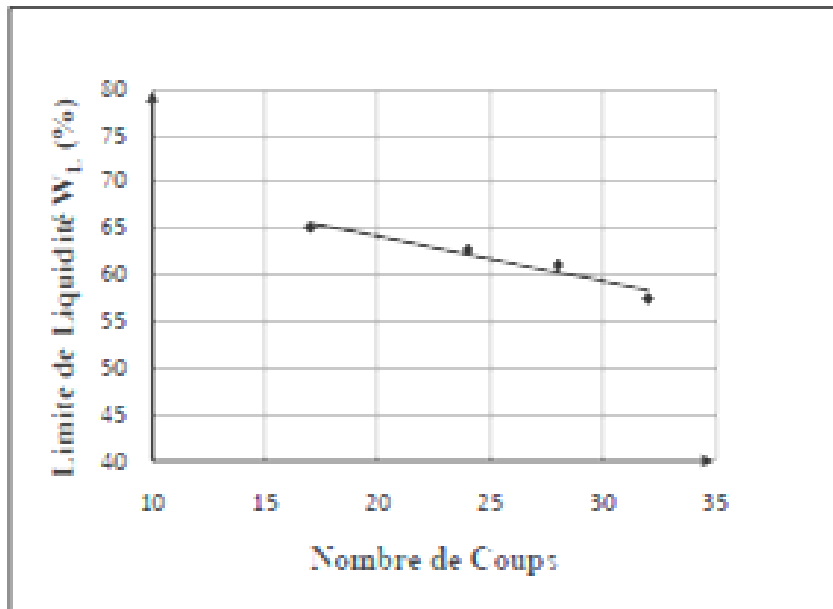


Figure 4.1 Limite de Liquidité pour l'Argile non Traitée.

La limite de liquidité pour l'argile traitée à 1% de chaux est illustrée sur la figure 4.2 qui donne une limite de 64.73% pour 25 coups à la coupelle de Casagrande.

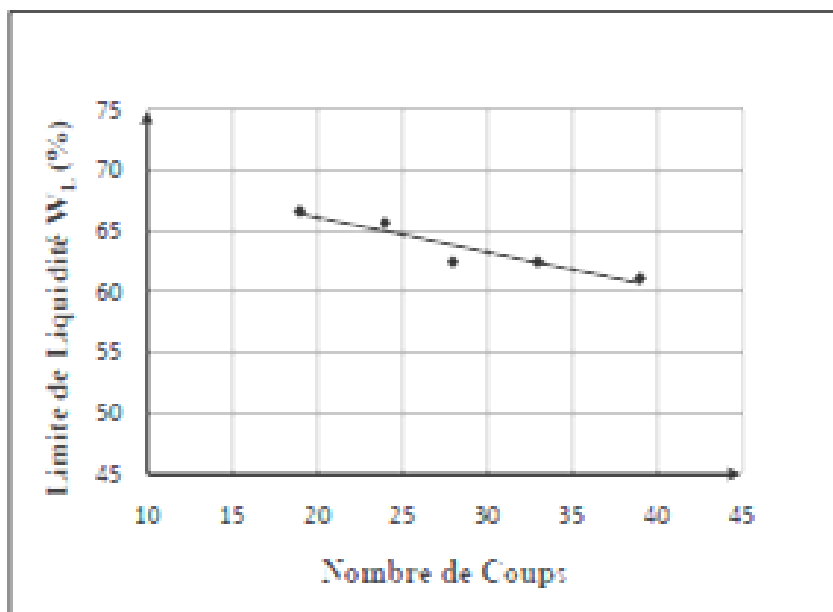


Figure 4.2 Limite de Liquidité pour l'Argile Traitée à 1% de Chaux.

A 25 coups la limite de liquidité pour l'argile traitée à 2% de chaux est de l'ordre de 69.48%. La droite montrée sur la figure 4.3 donne la variation de la limite de liquidité en fonction de nombre de coups.

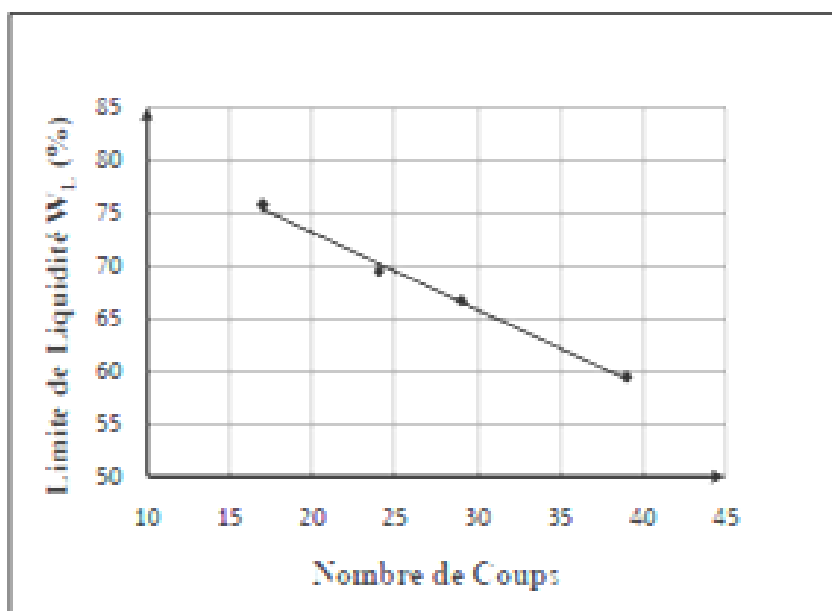


Figure 4.3 Limite de Liquidité pour l'Argile Traitée à 2% de Chaux.

La variation de la limite de liquidité pour l'argile traitée à 3% de chaux avec le nombre de coups est présentée sous forme d'une droite sur la figure 4.4. La valeur de la limite de liquidité correspondante à 25 coups est de 74.92%

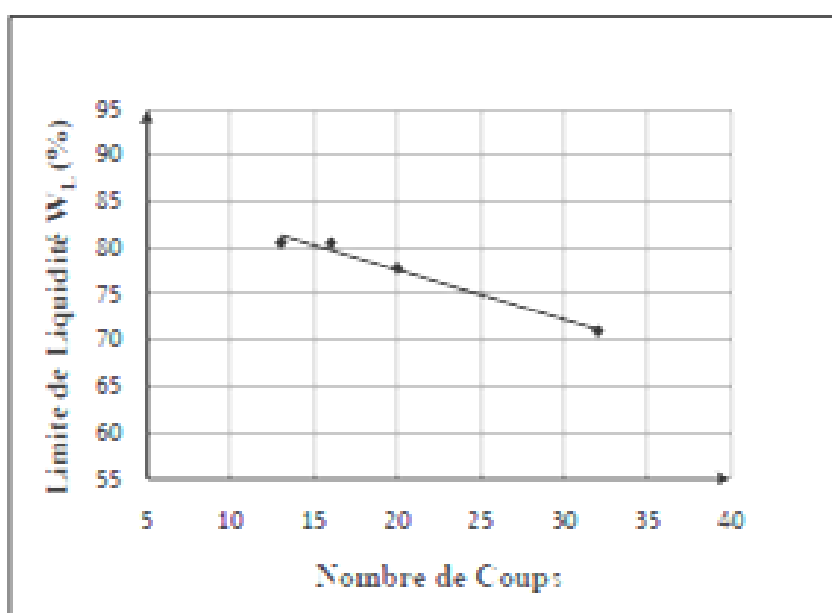


Figure 4.4 Limite de Liquidité pour l'Argile Traitée à 3% de Chaux.

A 4% de chaux ajoutée à l'argile Kaolinite DD3, la limite de liquidité à 25 coups est de 73.92%. La figure 4.5 montre la variation de cette limite avec le nombre de coups.

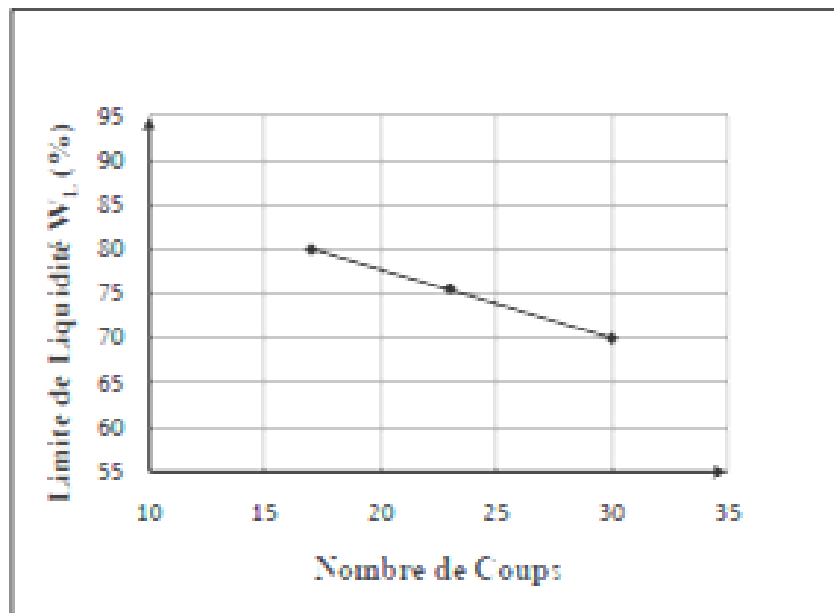


Figure 4.5 Limite de Liquidité pour l'Argile Traitée à 4% de Chaux.

Un pourcentage de 5% de chaux ajoutée à l'argile Kaolinite DD3 augmente la limite de liquidité à 72.71%. Cette valeur a été déduite de la droite illustrée sur la figure 4.6.

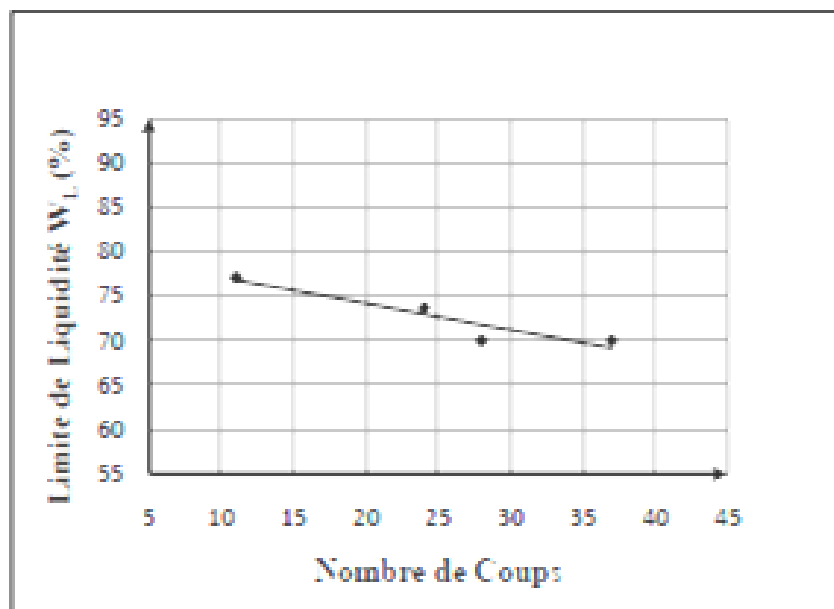


Figure 4.6 Limite de Liquidité pour l'Argile Traitée à 5% de Chaux.

La figure 4.7 montre que la limite de liquidité pour l'argile traitée à 6% de chaux correspondante à 25 coups à la Coupelle de Casagrande est de 72.63%.

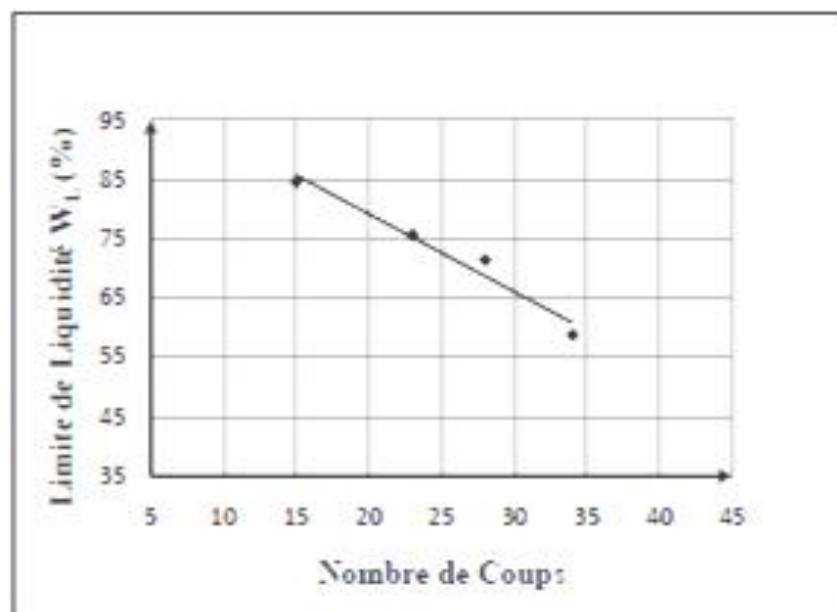


Figure 4.7 Limite de Liquidité pour l'Argile Traitée à 6% de Chaux.

La courbe de la variation de la limite de liquidité en fonction de nombre de coups illustrée sur la figure 4.8 donne une valeur de limite de liquidité de 70.36% pour 25 coups. Cette valeur est pour l'argile traitée à 7% de chaux.

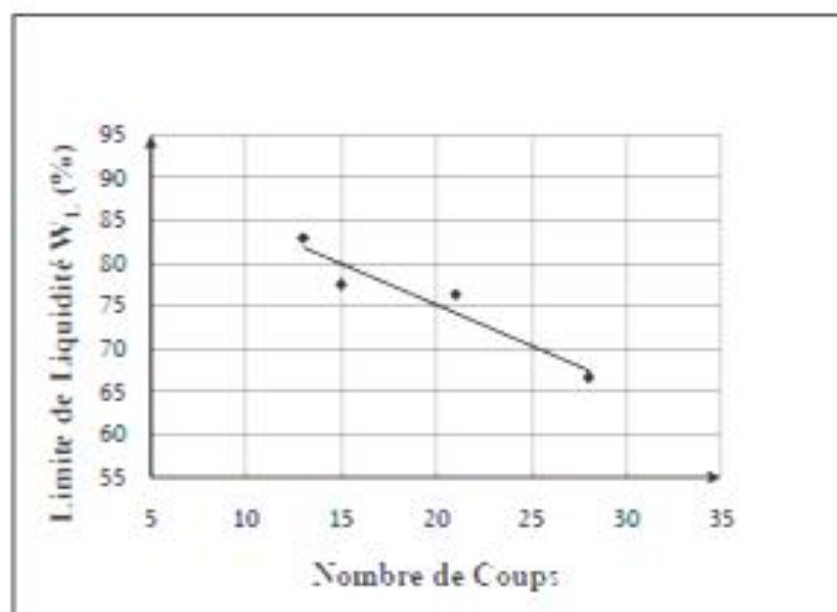


Figure 4.8 Limite de Liquidité pour l'Argile Traitée à 7% de Chaux.

La valeur 70.27% est la limite de liquidité correspondante à 25 coups. Cette valeur a été déduite de la courbe présentée sur la figure 4.9 qui montre l'effet de nombre de coups sur la limite de liquidité pour l'argile traitée à 8% de chaux.

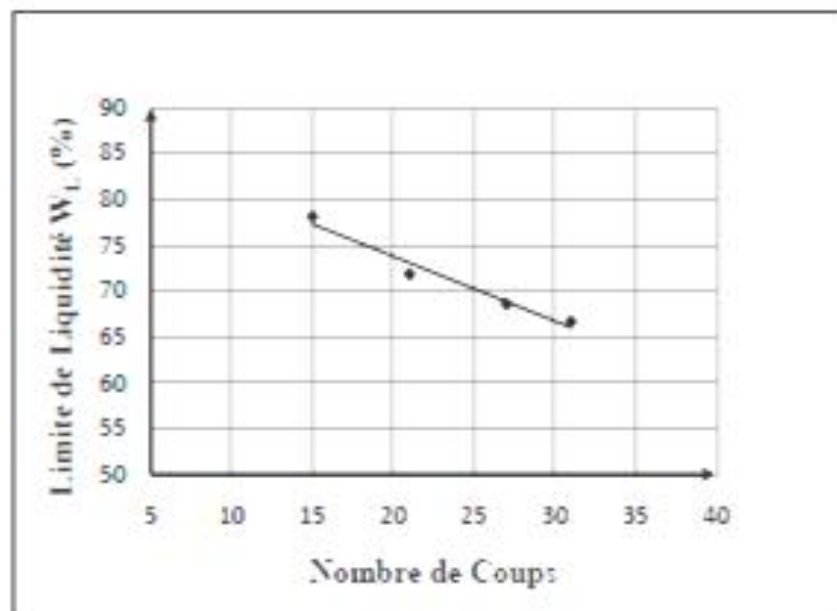


Figure 4.9 Limite de Liquidité pour l'Argile Traitée à 8% de Chaux.

Les pourcentages de chaux ajoutée sont donnés ensemble avec les limites de liquidité obtenues pour chaque échantillon traité sur le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Valeurs des Limites de Liquidité vs Pourcentages de Chaux.

Chaux (%)	WL (%)
0	61,74
1	64,73
2	69,48
3	74,92
4	73,92
5	72,71
6	72,63
7	70,36
8	70,27

A partir de ces valeurs la variation de la limite de liquidité en fonction du pourcentage de chaux a été tracée puis représenté sur la figure 4.10.

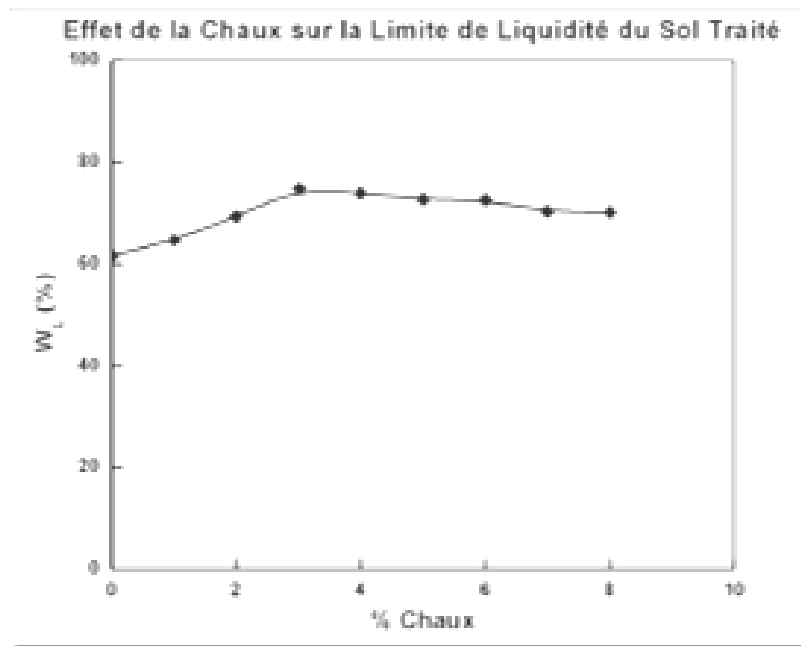


Figure 4.10 Influence de la Chaux sur la Limite de Liquidité.

La courbe montre qu'avec l'accroissement du pourcentage de chaux la limite de liquidité augmente jusqu'à une valeur de 74.92% correspondant à un pourcentage de chaux de 3%. Après ce pic la limite de liquidité semble légèrement diminuée avec l'accroissement progressif de pourcentage de chaux correspondant. Cette tendance dont le comportement de l'argile en fonction du pourcentage de la chaux en ce qui concerne la limite de liquidité a été déjà observée par plusieurs chercheurs dont K. E. Clare (1988), F.G. Bell (1989 et 1996) pour deux types d'argile (Kaolinite et le Quartz), CDF Rogers et al. (1997) pour quatre types d'argile composés principalement de kaolinite, illite et quartz (Keuper Marl, English china clay, lower Lias clay et London Clay), Al-Rawas et al. (2006) et Paul Quigley et al. (2006). Ce qui n'est pas le cas pour Mohamed A. Sakr (2008) qui a trouvé pour une argile OH d'une teneur en matière organique élevée que la limite de liquidité augmente avec l'accroissement du pourcentage de chaux. Au contraire Peter Evans (1997) a trouvé pour deux argiles (WarWick-Killarney et Cunningham) que la limite de liquidité diminue graduellement avec l'addition de 1 à 10% de chaux et de même façon la montmorillonite étudiée par F. G Bell (1996) présente une diminution dans la limite de liquidité.

Croft (1964) évoque l'augmentation de la limite de liquidité pour la kaolinite à l'action des ions d'hydroxyle qui modifie l'affinité des surfaces des particules d'argile à l'eau ce qui n'est pas le cas pour la montmorillonite et autres argiles.

#### 4.1.2. Limite de Plasticité.

L'ajout des pourcentages de chaux a été aussi étudié sur la variation de la limite de plasticité de la Kaolinite DD3. Cet essai a été conduit par la préparation d'un fuseau de 3.2mm et se brise en morceaux de 1 à 2cm de longueur. Les valeurs obtenues correspondant aux pourcentages de chaux utilisées sont présentées sur le tableau 4.2.

Tableau 4.2 Valeurs de la Limite de Plasticité vs Pourcentages de Chaux.

% Chaux	Wp (%)
0	25,52
1	30,92
2	35,38
3	38,14
4	43,87
5	47,61
6	49,12
7	49,77
8	49,90

La variation de la limite de plasticité avec l'addition de la chaux est montrée par la courbe présentée sur la figure 4.11.

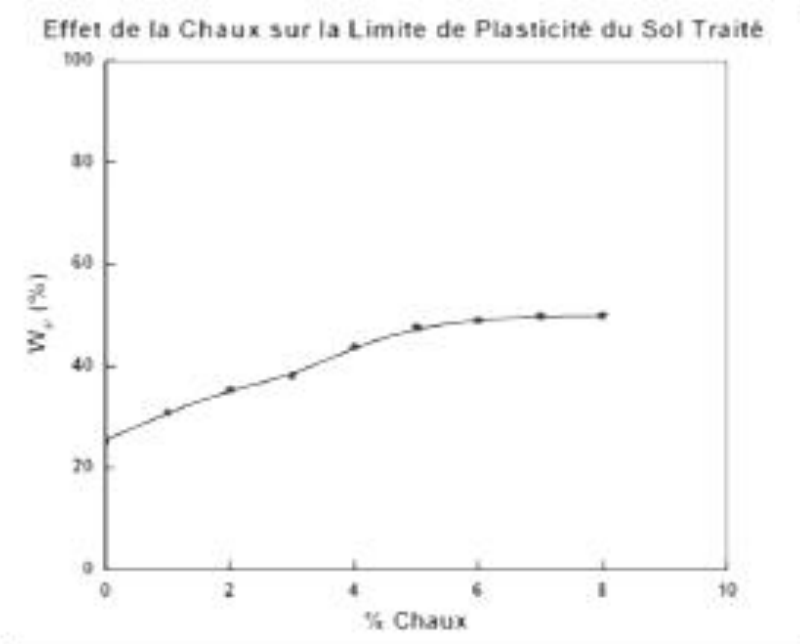


Figure 4.11 Influence de la Chaux sur la Limite de Plasticité.

La courbe montre un accroissement de la limite de plasticité en fonction de l'augmentation du pourcentage de chaux jusqu'à un pourcentage de 5% où la limite de plasticité semble constante avec l'addition de la chaux. Ce pourcentage correspond à une limite de plasticité maximale d'une valeur environ de 48% présente *le point de fixation de la chaux*. Plusieurs chercheurs ont trouvés cette variation dans la limite de plasticité dont K. E. Clare (1988), F.G. Bell (1989 et 1996) pour le quartz et la montmorillonite, Peter Evans (1997) pour deux types d'argile (WarWick-Killarney et Cunningham), CDF Rogers et al. (1997) pour quatre types d'argile composés principalement de kaolinite, illite et quartz (Keuper Marl, English china clay, lower Lias clay et London Clay), Khairul Anuar Kassim (2004) pour cinq différentes argiles, Al-Rawas et al. (2006) et Paul Quigley et al. (2006) avec des différences dans le point de fixation qui dépendent de la fraction argileuse et sa capacité d'échange cationique. Cependant, Mohamed A. Sakr et al. (2008) a trouvé que la limite de plasticité augmente avec l'addition de la chaux sans atteinte d'un palier. Aux contraire F. G. Bell (1996) a trouvé pour la kaolinite que la limite de liquidité augmentation jusqu'à 2% de chaux puis elle diminue progressivement.

#### 4.1.3. Indice de Plasticité.

Les valeurs obtenues après calcul de l'indice de plasticité pour les pourcentages de chaux utilisés dans la campagne d'essai sont données sur le tableau 4.3.

Tableau 4.3 Valeurs de l'Indice de Plasticité vs Pourcentage de Chaux.

Chaux (%)	Ip
0	36,22
1	33,81
2	34,10
3	36,78
4	30,05
5	25,10
6	23,50
7	20,59
8	20,37

L'influence du pourcentage d'ajout de la chaux sur l'indice de plasticité de la Kaolinite DD3 a été étudiée et représentée sur la figure 4.12. La courbe montre un décroissement de l'indice de plasticité avec l'augmentation du pourcentage de chaux. Ce ci est bien évident puisque la limite de liquidité a tendance a augmentée puis elle diminue et la

limite de plasticité augmente avec l'accroissement du pourcentage de chaux. Ces observations ont été aussi faites par F. G. Bell (1989 et 1996) a trouvé pour la montmorillonite, Peter Evans (1997) a trouvé pour deux argiles (WarWick-Killarney et Cunningham), CDF Rogers et al. (1997) pour quatre types d'argile composés principalement de kaolinite, illite et quartz (Keuper Marl, English china clay, lower Lias clay et London Clay), M. Afes (1999), A. M El Sharief (2000) a trouvé pour trois types d'argile (Sennar-Singa-km 56, Sennar-Singa-km 112 et El mujalad-Highieg-km143), Al-Rawas et al. (2006) et Paul Quigley Beng (2006) qui a trouvé que l'indice de plasticité augmente considérablement après l'ajout de 1% de chaux puis diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux. Cependant, F. G. Bell (1989 et 1996) pour la kaolinite et le quartz et Mohamed A. Sakr et al. (2008) pour l'argile organique, ont trouvé que l'indice de plasticité augmente avec l'addition de la chaux.

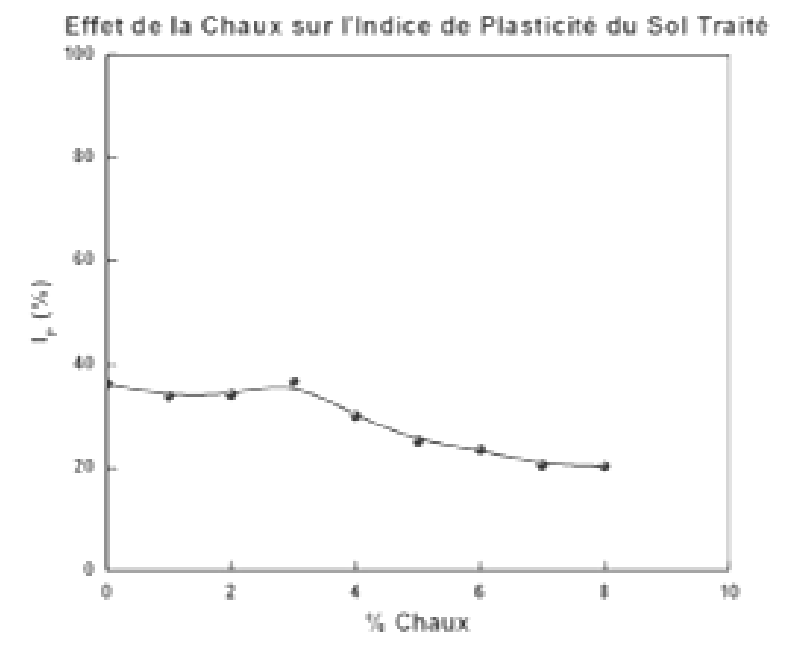


Figure 4.12 Influence de la Chaux sur l'Indice de Plasticité.

### Conclusion

Les courbes des limites de liquidité, de plasticité, et de l'indice de plasticité sont représentées sur un même graphique donné par la figure 4.13. Cette figure montre les observations faites au paravent en ce qui concerne les limites d'Atterberg en fonction du pourcentage d'ajout de la chaux. Il en ressort que l'effet de la chaux est instantané sur la plasticité de l'argile, car après malaxage du mélange sol-chaux-eau, les ions de calcium ( $Ca^{2+}$ ) provenant de la chaux se déplacent vers les surfaces des particules d'argile et remplacent les

molécules d'eau et d'autres ions. C'est le processus de *floculation et agglomération* où l'argile devient friable et granulaire avec un comportement similaire que celui des particules du limon. Ce qui diminue la plasticité de l'argile et par conséquent améliore sa maniabilité ce qui permet de prolonger la durée des travaux sur une longue période pendant l'année au lieu que ça soit uniquement durant les saisons sèches.

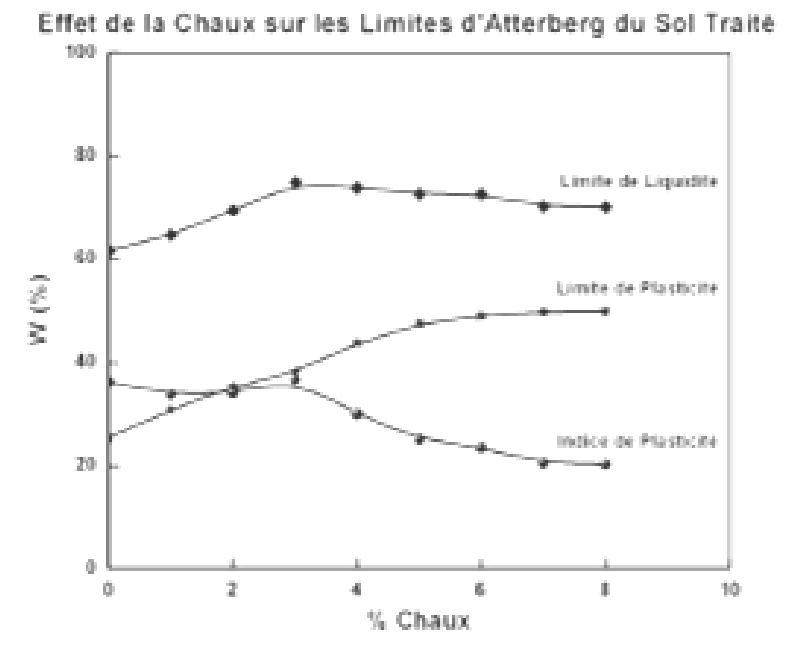


Figure 4.13 Influence de la Chaux sur les Limites d'Atterberg.

## 4.2. Influence de la Chaux sur le pH.

L'étude de l'influence des pourcentages de la chaux sur le pH de l'argile Kaolinite DD3 est très importante pour la détermination de la teneur en chaux initiale pour assurer la modification de l'argile traitée.

Le tableau 4.4 montre les valeurs du pH pour l'argile Kaolinite DD3 non traitée et traitée à 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, et 9% de chaux.

Tableau 4.4 Variation du pH avec l'Addition de la Chaux.

Chaux (%)	pH
0	9,83
2	13,31
3	13,29
4	13,3
5	13,3
6	13,32
7	13,34
8	13,34
9	13,33

La courbe de la valeur du pH en fonction des différents pourcentages de chaux est présentée sur la figure 4.14. La valeur du pH augmente de 9.83 pour l'argile non traitée à 13.31 pour l'argile traitée à 2% de chaux où la courbe semble reste constante avec l'addition de la chaux.

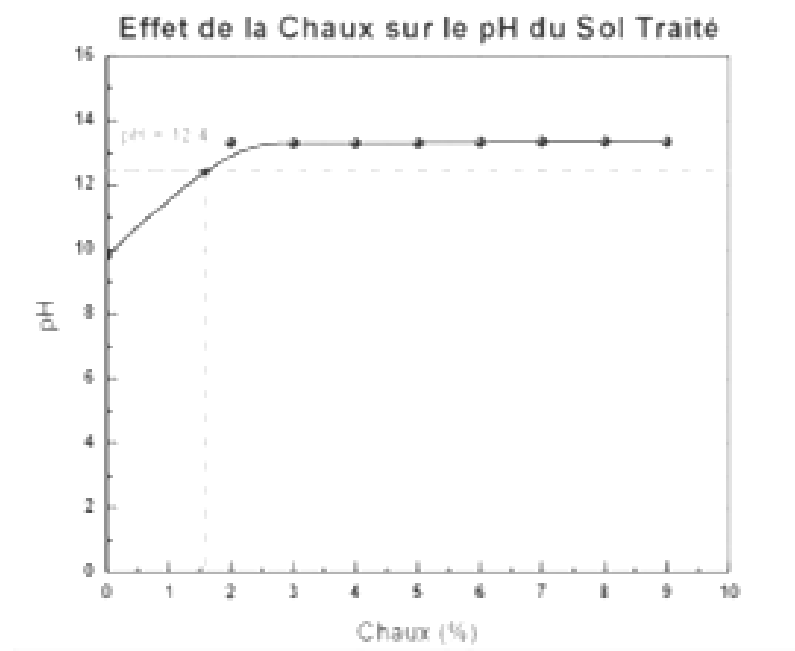


Figure 4.14 Influence de la Chaux sur la Valeur du pH.

#### Conclusion.

Le pourcentage recommandé selon la méthode d'Eades et Grim comme pourcentage initiale pour la modification de l'argile Kaolinite DD3 est d'environ de 1.6% de chaux.

### 4.3. Influence de la Chaux sur les Paramètres de Compactage.

L'essai Proctor normal a été conduit sur des échantillons non traités et des échantillons traités à 1, 2, 3, 4, 5, et 6% de chaux après un temps de maturation de 24h comme recommandé dans le guide technique réalisé par Dallas Little (2006). Les résultats obtenus sont présentés sur les figures ci-dessous.

La relation entre la masse volumique sèche et teneur en eau pour le sol non traité est donnée sur la figure 4.15. Celle-ci montre une teneur en eau optimale de 41.5% correspondant à une masse volumique sèche maximale de  $1210\text{kg/m}^3$ . Cette courbe se situe du côté gauche de la ligne de saturation.

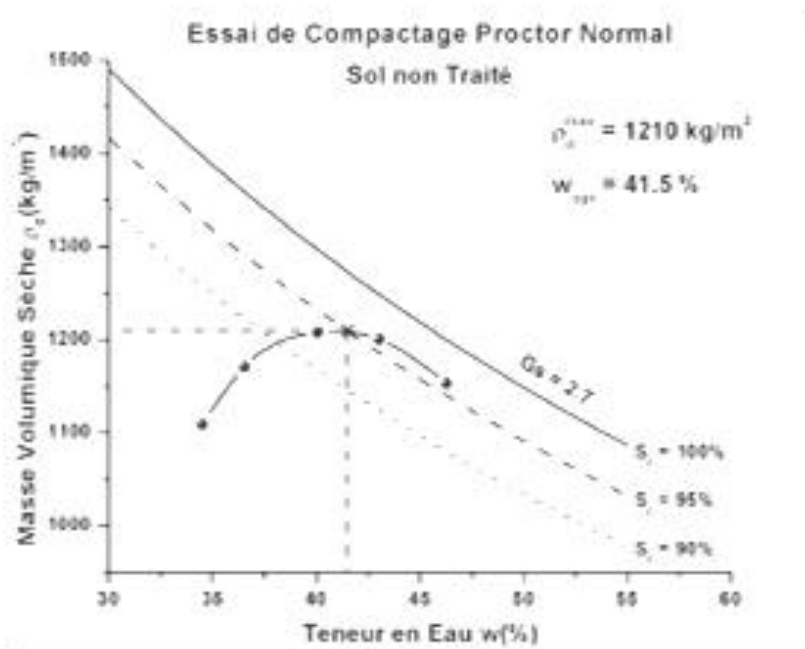


Figure 4.15 Courbe de Compactage (Proctor Normal) - Sol non Traité.

La courbe présentée sur la figure 4.16 montre la relation entre la masse volumique sèche et teneur en eau pour le sol traité à 1% de chaux et donne une teneur en eau optimale de 44% correspondant à une masse volumique sèche maximale de  $1151\text{kg/m}^3$ .

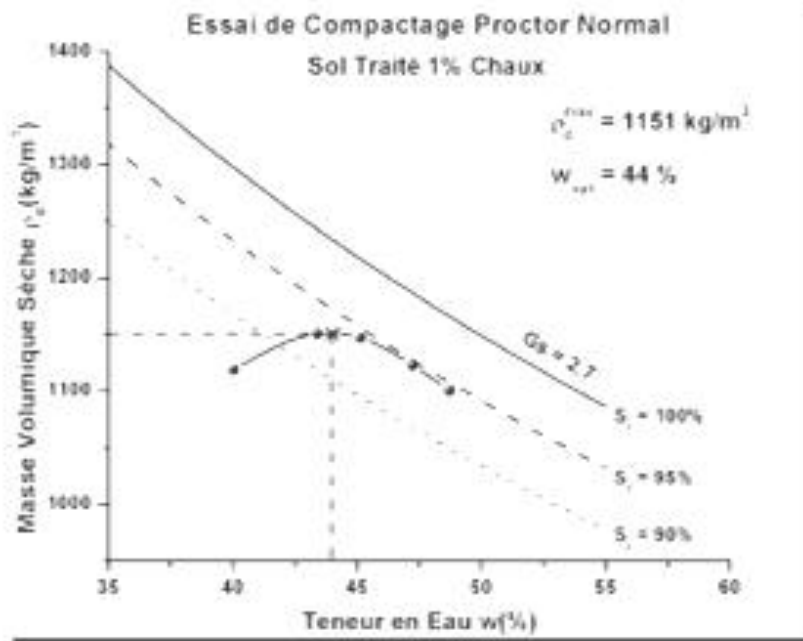


Figure 4.16 Courbe de Compactage (Proctor Normal) - Sol Traité avec 1% de Chaux.

La figure 4.17 présente la relation entre la masse volumique sèche et teneur en eau pour le sol traité à 2%. Une teneur en eau optimale de 46.6% correspondant à une masse volumique sèche maximale de 1109.7kg/m<sup>3</sup> est obtenue.

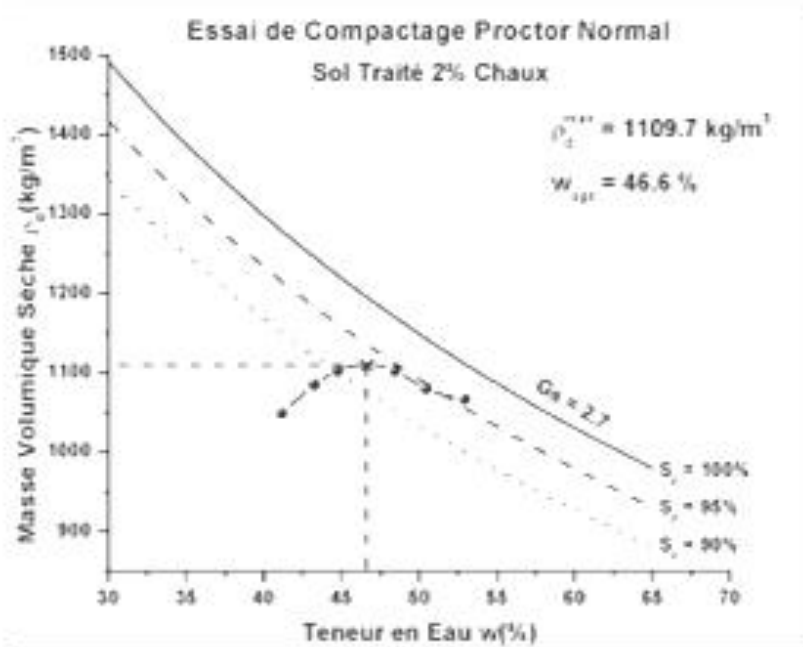


Figure 4.17 Courbe de Compactage (Proctor Normal) - Sol Traité avec 2% de Chaux.

La relation entre la masse volumique sèche et teneur en eau pour le sol traité à 3% est donnée sur la figure 4.18. La courbe de compactage montre une teneur en eau optimale de 47.2% correspondant à une masse volumique sèche maximale de 1071kg/m<sup>3</sup>.

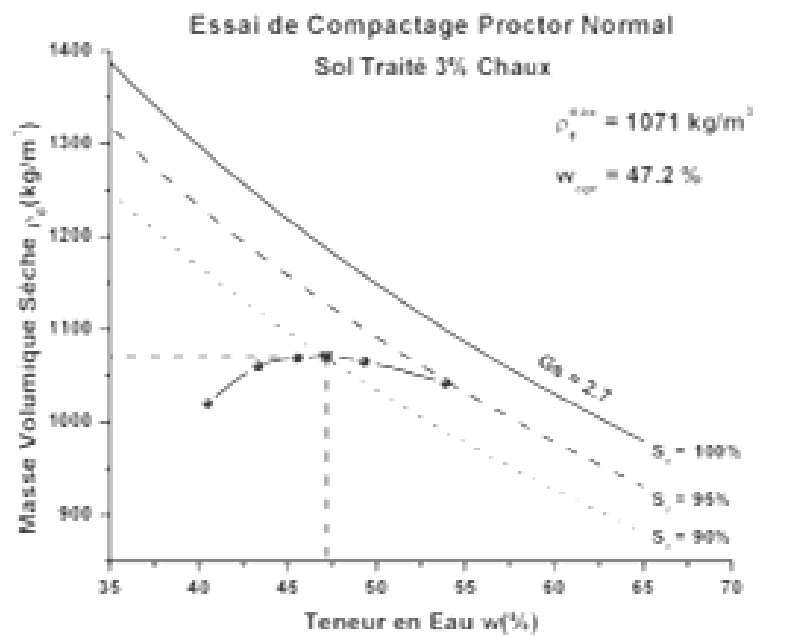


Figure 4.18 Courbe de Compactage (Proctor Normal) - Sol Traité avec 3% de Chaux.

La courbe de compactage qui montre la relation entre la masse volumique sèche et teneur en eau pour le sol traité à 4% est donnée sur la figure 4.9. Celle-ci montre une teneur en eau optimale de 50.3% correspondant à une masse volumique sèche maximale de 1067.3kg/m<sup>3</sup>.

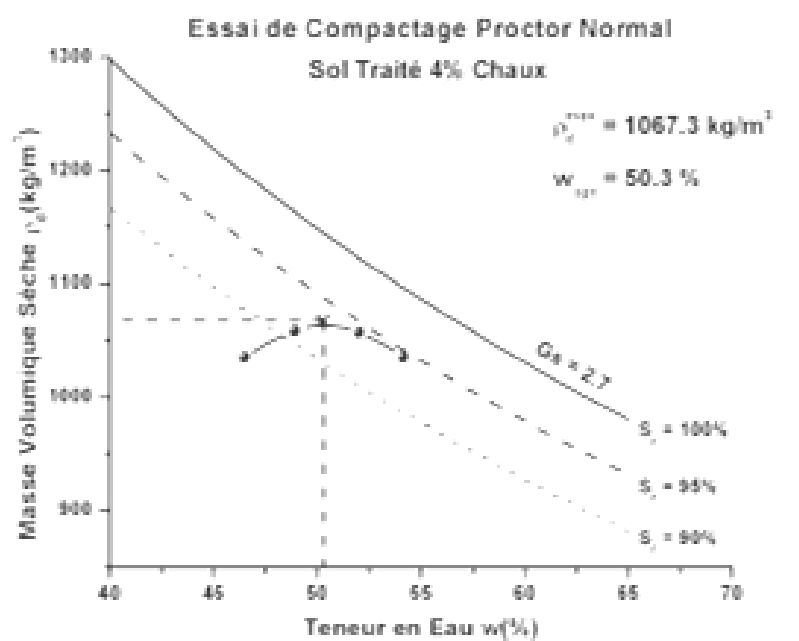


Figure 4.19 Courbe de Compactage (Proctor Normal) - Sol Traité avec 4% de Chaux.

La figure 4.20 donne la relation entre la masse volumique sèche et teneur en eau pour le sol traité à 5%. La courbe de compactage montre une teneur en eau optimale de 52.7% correspondant à une masse volumique sèche maximale de 1036.5kg/m<sup>3</sup>.

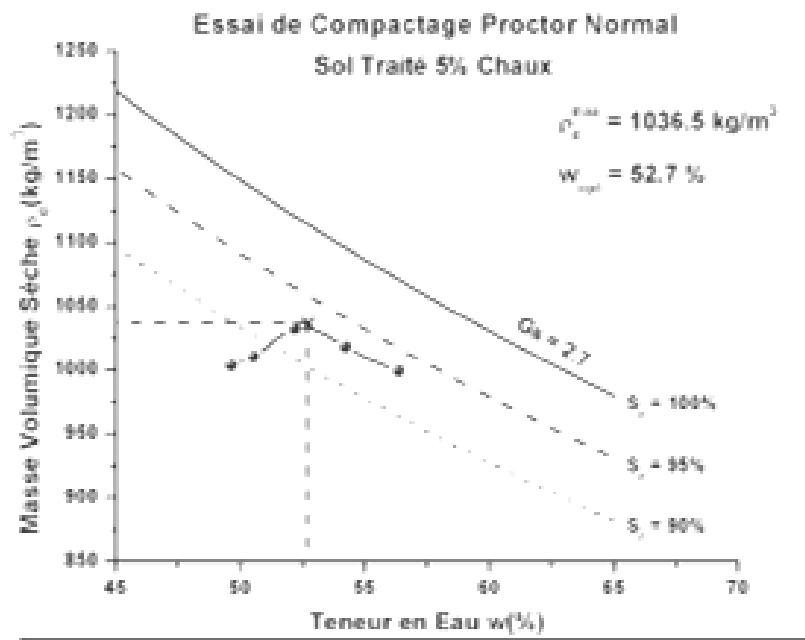


Figure 4.20 Courbe de Compactage (Proctor Normal) - Sol Traité avec 5% de Chaux.

La courbe de la relation entre la masse volumique sèche et la teneur en eau pour le sol traité à 6% de chaux est donnée sur la figure 4.21. Celle-ci montre une teneur en eau optimale de 54.5% correspondant à une masse volumique sèche maximale de 1003.8kg/m<sup>3</sup>.

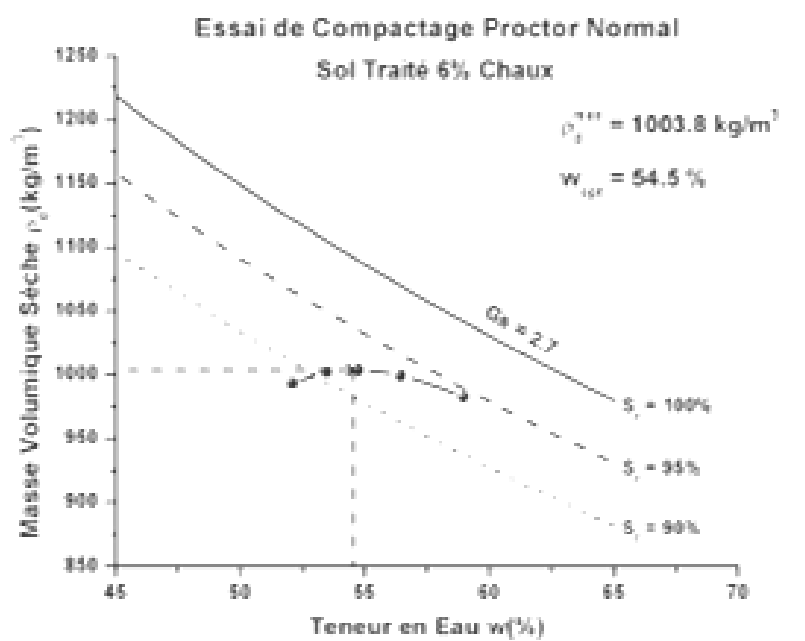


Figure 4.21 Courbe de Compactage (Proctor Normal) - Sol Traité avec 6% de Chaux.

### Conclusion.

La comparaison des courbes de compactages obtenues pour les différents pourcentages de chaux ajoutée est donnée sur la figure 4.22. Le graphe montre qu'avec l'accroissement du pourcentage de chaux la courbe de compactage devient étalée, la masse volumique sèche diminue et la teneur en eau optimale augmente voir.

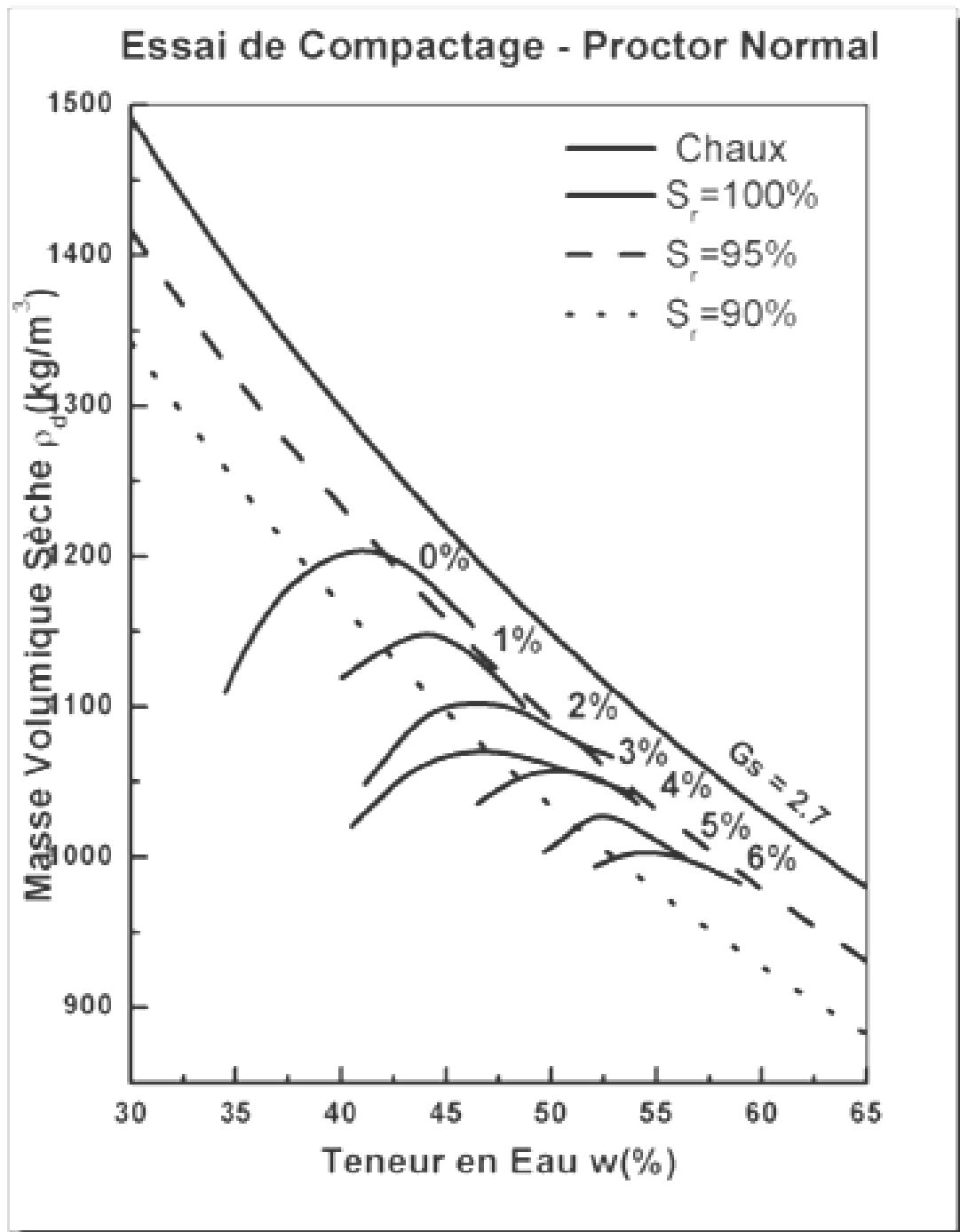


Figure 4.22 Influence d'Addition de la Chaux sur la Courbe de Compactage.

Ces observations sont mieux représentées sur les figures 4.23 et 4.24 en forme d'histogrammes. Elles semblent être très bénéfiques pour la Kaolinite DD3. Ainsi sur site, la teneur en eau optimale peut être mieux contrôlée puisque il s'agit d'une plage où la teneur en eau optimale peut varier. La diminution de la densité sèche entraîne une augmentation du coefficient de sécurité et par conséquent une meilleure stabilité de l'ouvrage. Ces variations de la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale ont été faites par F. G Bell (1996) pour deux types d'argiles (Upper Boulder Clay et Tees Laminated Clay), M. Afès (1999), A. M. El Sharief (2000) et Giacomo Russo (2004) qui aboutit aux mêmes conclusions.

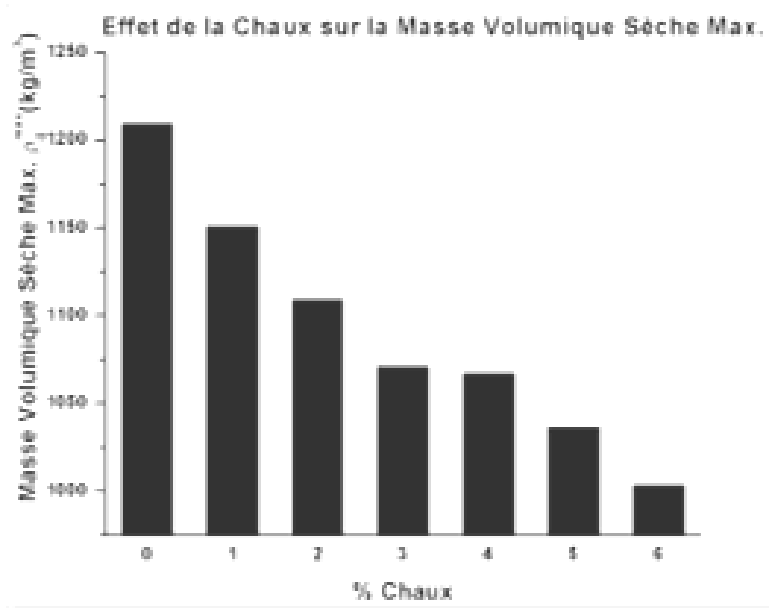


Figure 4.23 Influence de la Chaux sur la Masse Volumique Sèche Maximale  $\rho_d^{\max}$ .

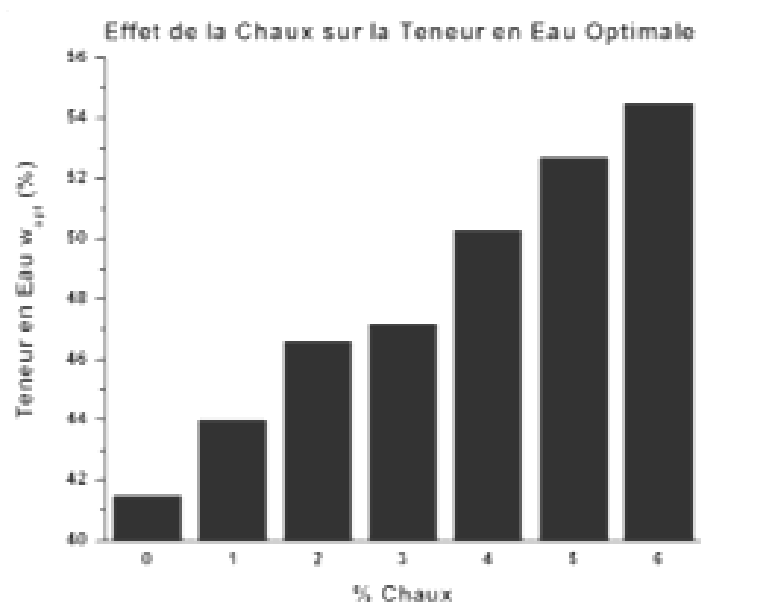


Figure 4.24 Influence de la Chaux sur la Teneur en Eau Optimale  $w_{opt}$ .

#### 4.4. Influence de la Chaux sur la Compression Simple.

L'essai à la compression simple dénommé universellement UCST a été conduit pour l'étude de l'influence du pourcentage d'ajout de la chaux sur la résistance simple  $q_u$  de la Kaolinite DD3 dont la procédure a été donnée au chapitre 3. Un temps de maturation (Mellowing Time) de 24h comme recommandé à ASTM D 5102-96 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 (Curing Time) de 24h 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.

La relation entre la contrainte axiale qui est tout simplement le déviateur, puisque la contrainte horizontale étant nulle, en fonction de la déformation axiale principale pour un pourcentage de chaux égale à zéro est donnée sur la figure 4.25. Celle-ci montre que le déviateur à la rupture de la Kaolinite DD3 est d'une magnitude de 92.4kPa. Cette contrainte est atteinte pour une déformation de 9% et correspond à une argile de consistance *moyenne* (Medium). Cette courbe donne comme tangente initiale le module d'élasticité  $E = 20.87\text{kPa}$  et une cohésion non drainée de 46.2kPa.

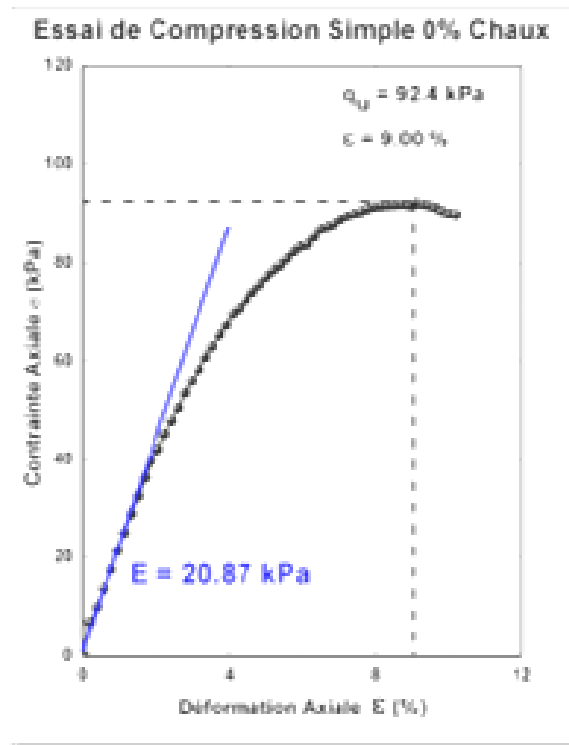


Figure 4.25 Courbe Contrainte-Déformation pour le Sol non Traité.

Le comportement de la Kaolinite DD3 traité à 1% de chaux est donné sur la figure 4.26. La courbe montre une mobilisation de la résistance jusqu'à une valeur de 104.3kPa suivie d'un écrouissage. Cette valeur classifie de point de vue consistance l'argile comme étant une *argile ferme* (Stiff). Ce pic de valeur est atteint à une déformation axiale de 4.79%. La tangente à la courbe initiale montre un module d'élasticité de 34.64kPa. La cohésion non drainée qui n'est autre que la moitié de la compression simple est égale à 52.15kPa.

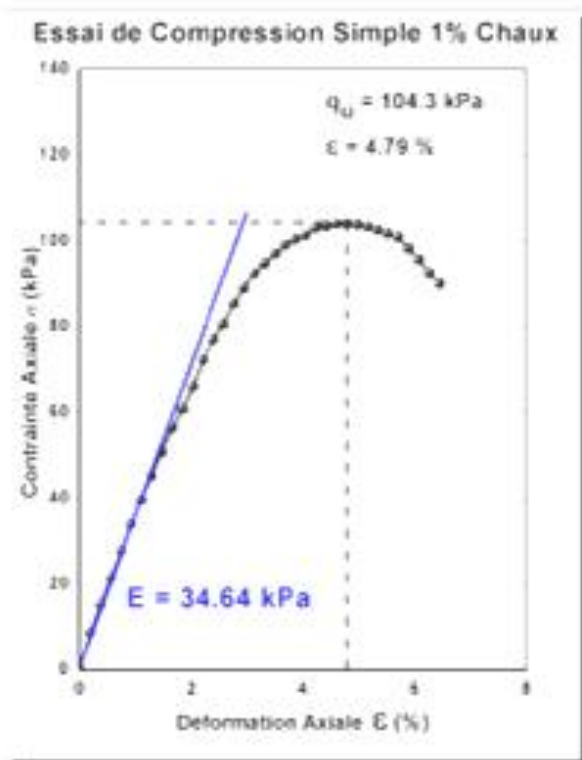


Figure 4.26 Courbe Contrainte-Déformation pour le Sol Traité avec 1% de Chaux.

La variation de la compression simple en fonction de la déformation axiale pour l'argile traitée à 2% de chaux est donnée sur la figure 4.27. Celle-ci montre une compression simple d'une magnitude de 162.2kPa obtenue à une déformation axiale principale de 3.56%. Vu cette valeur l'argile est de consistance *ferme* (Stiff). Le module d'élasticité correspondant égal à 53.76kPa et la cohésion non drainée est de 81.1kPa

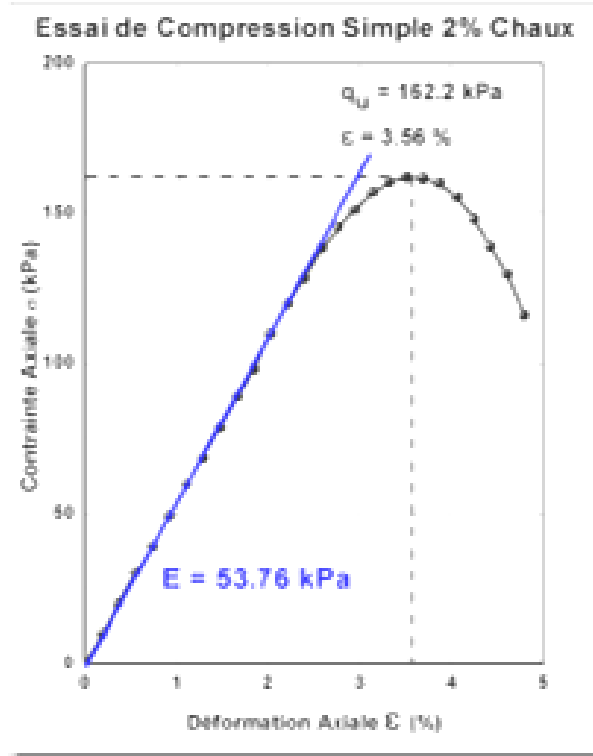


Figure 4.27 Courbe Contrainte-Déformation pour le Sol Traité avec 2% de Chaux.

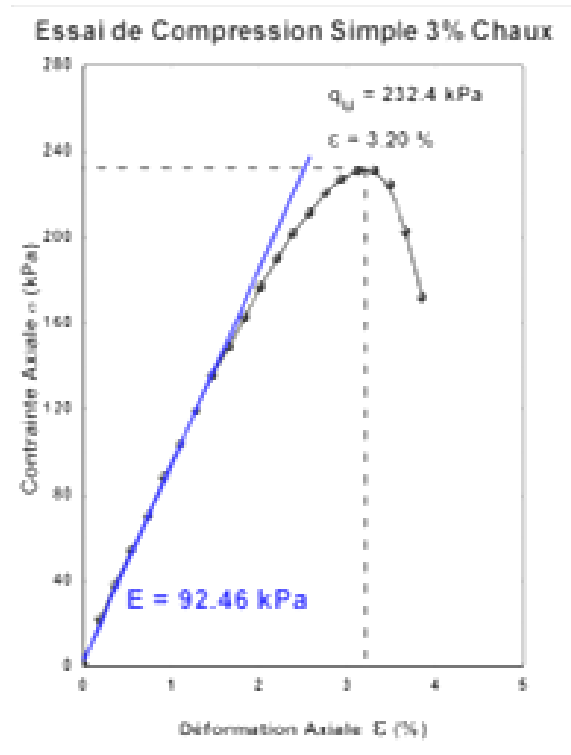


Figure 4.28 Courbe Contrainte-Déformation pour le Sol Traité avec 3% de Chaux.

La figure 4.28 donne le comportement de la Kaolinite DD3 stabilisée à 3% de chaux. La courbe montre que la résistance au pic est de 232.4kPa correspondant à une argile de consistance *très ferme* (Very Stiff). La déformation axiale à la rupture correspondant à cette valeur de résistance est aux environs de 3.20%. La droite de la courbe initiale donne un module d'élasticité de 92.46kPa. La cohésion non drainée de ce mélange d'argile et 3% de chaux est de l'ordre de 116.2kPa.

L'effet de l'ajout de 4% de chaux à la Kaolinite DD3 sur la compression simple est montré sur la figure 4.29. En effet cette augmentation à 4% de chaux entraine une compression simple à la rupture de 186.6kPa indiquant une consistance *ferme* (Stiff) à une déformation axiale de 3.21%. Le module d'élasticité a atteint une valeur de 76.44kPa alors que la cohésion non drainée obtenue est de l'ordre de 93.3kPa.

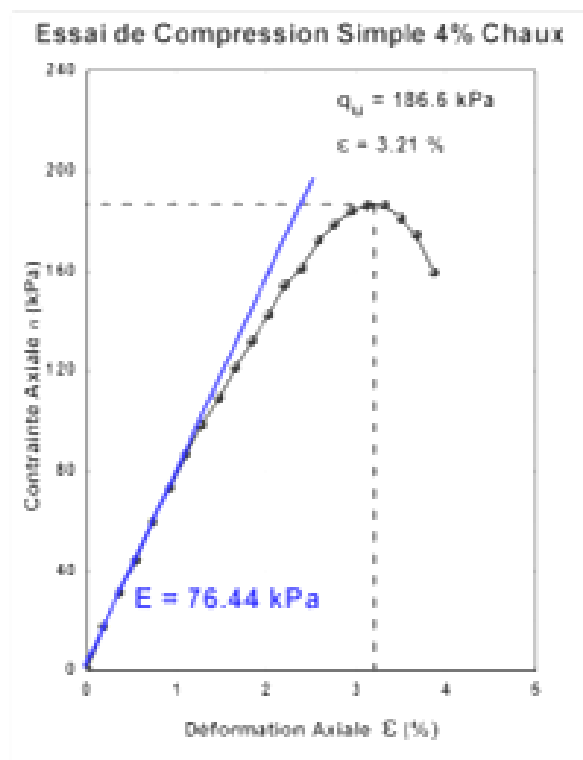


Figure 4.29 Courbe Contrainte-Déformation pour le Sol Traité avec 4% de Chaux.

Le comportement mécanique de la Kaolinite DD3 stabilisée à 5% de chaux est montré sur la figure 4.30. A la rupture la compression simple atteinte est de 122kPa pour une déformation axiale principale de 2.63%. L'argile est alors de consistance *ferme* (Stiff). Ce mélange a pu atteindre un module d'élasticité de 67.56kPa et une cohésion non drainée de 61kPa.

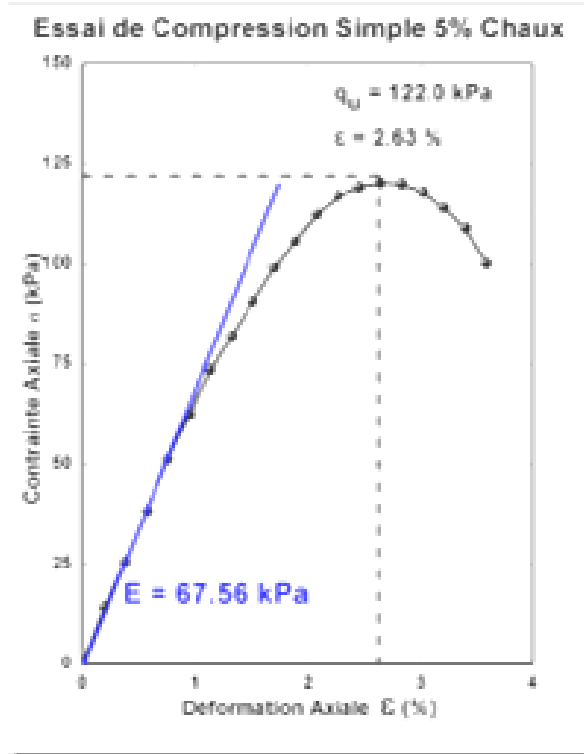


Figure 4.30 Courbe Contrainte-Déformation pour le Sol Traité avec 5% de Chaux.

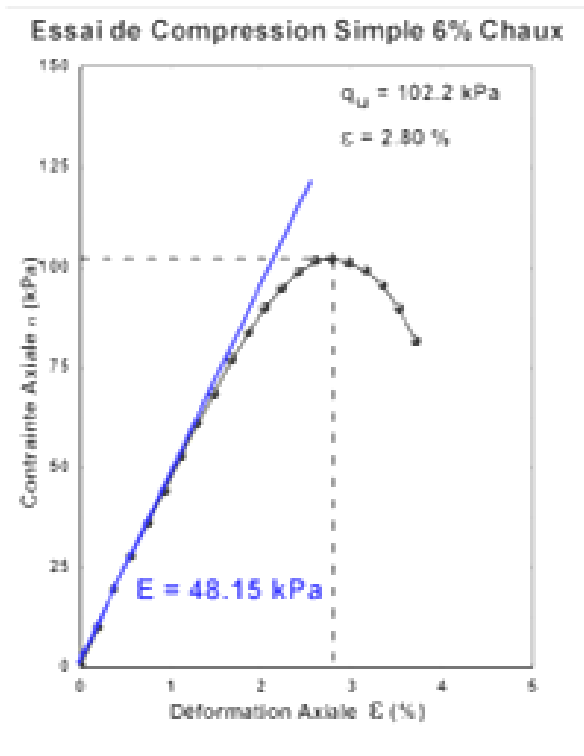


Figure 4.31 Courbe Contrainte-Déformation pour le Sol Traité avec 6% de Chaux.

Un 6% de chaux ajoutée à la Kaolinite DD3 provoque une résistance à la rupture de 102.2kPa pour une déformation axiale principale de 2.80% comme présenté sur la figure 4.31. Cette valeur de compression simple indique que l'argile est de consistance *ferme* (Stiff). Cet essai de compression simple non drainée a permis d'avoir pour ce mélange une cohésion non drainée de 51.1kPa et un module d'élasticité correspondant à la courbe initiale de l'ordre de 48.15kPa.

### *Conclusion.*

La comparaison des courbes de compression simple pour les argiles non traitées et traitées à 1, 2, 3, 4, 5, et 6% est présentée sur la figure 4.32. Le graphe montre que lorsque le pourcentage de chaux est faible la courbe de compression simple est très étirée et la désignation du pic correspondant à la rupture s'avère difficilement à repérer. Cette difficulté semble disparaître avec l'augmentation du pourcentage de chaux. Mieux encore, le graphe montre qu'avec l'accroissement du pourcentage de chaux la valeur de la compression simple  $q_u$  augmente de 92.4kPa pour l'argile non traitée à 104.3kPa pour une argile traitée à 1%, à 162.2kPa pour l'argile traitée à 2% et à 232.4kPa pour l'argile traitée à 3%. Cette tendance semble s'estomper et l'argile traitée à un pourcentage plus élevé que 3% semble avoir une compression simple à la rupture qui diminue.

La même tendance de la compression simple en fonction de la chaux a été trouvée aussi par F. G. Bell (1989 et 1996) pour la montmorillonite et la kaolinite, Kairul Amuar Kassim (2004) pour quatre types d'argiles parmi les cinq étudiées. Mais pour d'autres auteurs la compression simple augmente sans apparition d'une valeur optimale, tels que F. G. Bell (1989 et 1996) pour le quartz, Tees Laminated Clay et Upper Boulder Clay, Dallas Little (1999), A. Al Rawas (2006) et M. Arabani (2006).

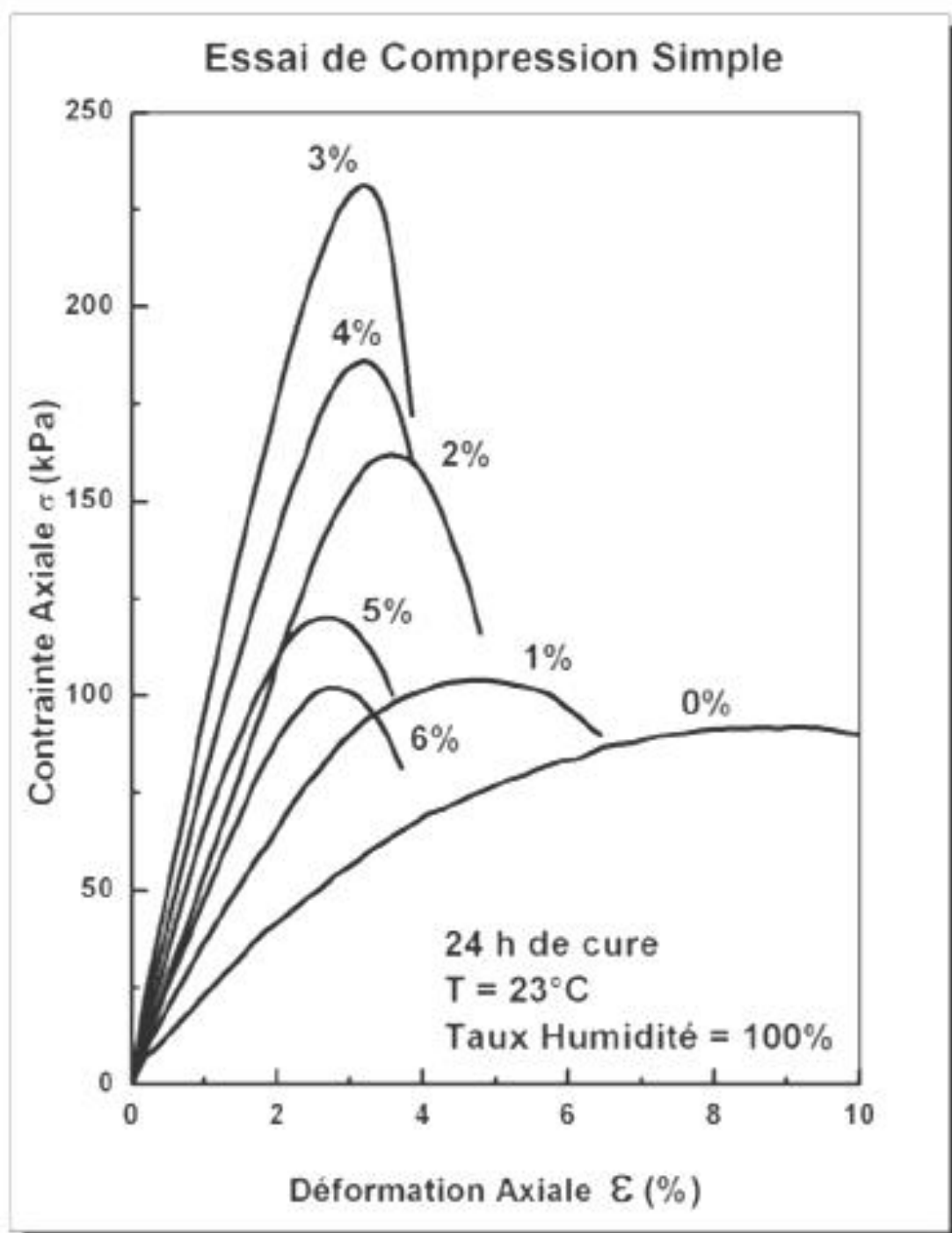


Figure 4.32 Influence de l'Addition de la Chaux sur la Courbe Contrainte-Déformation.

L'observation faite ci-dessus est mieux montrée par la représentation de la compression simple en fonction du pourcentage d'ajout de chaux sous forme d'histogramme donné sur la figure 4.33. Celui-ci montre clairement l'amélioration de la consistance de la Kaolinite DD3 avec l'accroissement du pourcentage de chaux. En effet l'argile de consistance initiale

*moyenne* devient de consistance *ferme* à 1% et 2% puis s'améliore encore mieux à 3% où elle devient de consistance *très ferme*. Au-delà de 3% l'argile semble perdre un peu de sa consistance pour devenir *ferme* à 4%, 5%, et 6%.

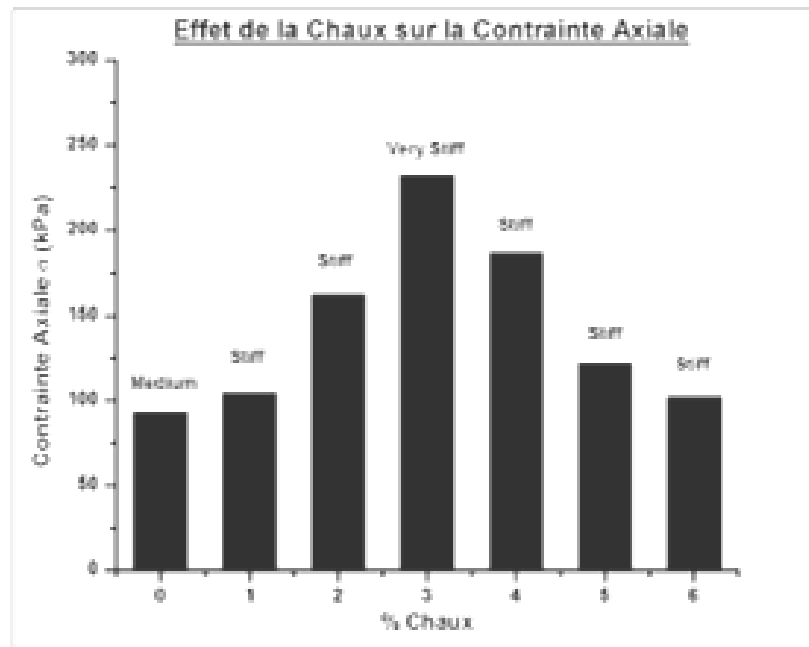


Figure 4.33 Influence de l'Addition de la Chaux sur la Contrainte Axiale.

La variation de la déformation axiale à la rupture en fonction du pourcentage de chaux ajoutée est donnée sur la figure 4.34 sous forme d'histogramme. Celle-ci montre clairement que la déformation axiale à la rupture diminue avec l'augmentation du pourcentage de chaux.

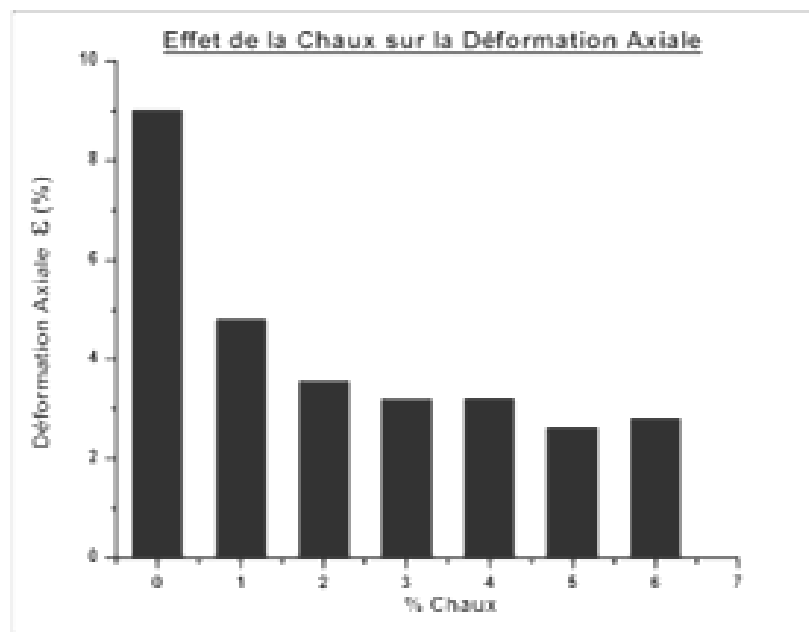


Figure 4.34 Influence de l'Addition de la Chaux sur la Déformation Axiale.

En effet elle passe de 9% pour une argile non traitée à 4.79, 3.56, 3.20, 3.21, 2.63 et 2.80% pour les argiles traitées successivement à 1, 2, 3, 4, 5, et 6% de chaux.

La variation du module d'élasticité de l'argile non traitée et traitée à différents pourcentages de chaux est donnée sur la figure 4.35. Cette figure montre que le module d'élasticité croit lorsque le pourcentage de chaux passe de 0 à 1, 2, et 3%. Au-delà le module d'élasticité semble diminuer avec l'accroissement du pourcentage de chaux. Cette variation est très proche que celle de la compression simple.

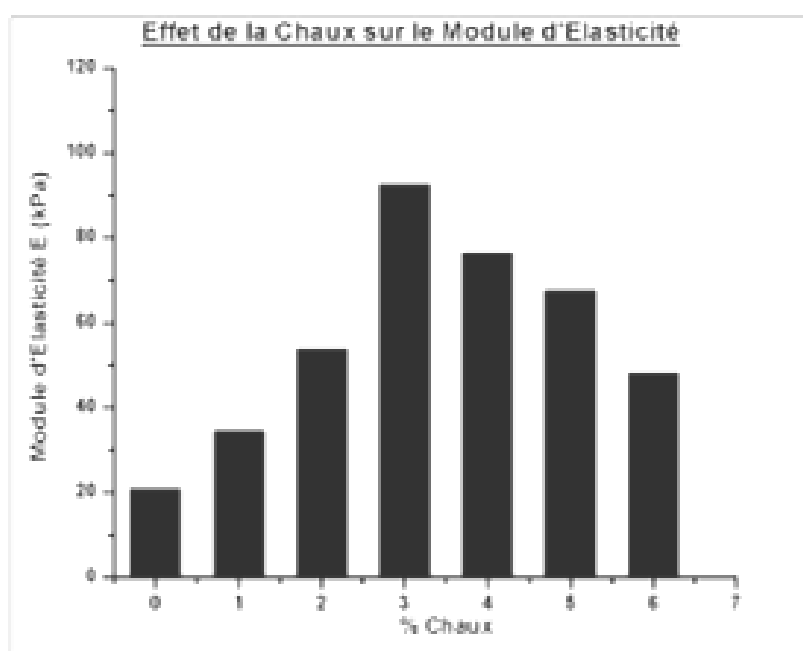


Figure 4.35 Influence de l'Addition de la Chaux sur le Module d'Elasticité.

Le tableau 4.5 est un résumé de valeurs trouvées pour la déformation, la compression simple, la cohésion non drainée, le module d'élasticité et la consistance pour les argiles non traitées, et traitée à différents pourcentages.

Tableau 4.5 Variation des Paramètres de l'Essai UCS avec l'Addition de la Chaux.

Chaux (%)	c (%)	$q_u$ (kPa)	$c_u$ (kPa)	E (kPa)	Consistance
0	9,00	92,4	46,2	20,87	Medium
1	4,79	104,3	52,2	34,64	Stiff
2	3,56	162,2	81,1	53,76	Stiff
3	3,20	232,4	116,2	92,46	Very Stiff
4	3,21	186,6	93,3	76,44	Stiff
5	2,63	122,0	61,0	67,56	Stiff
6	2,80	102,2	51,1	48,15	Stiff

## 4.5. Influence de la Chaux sur l'Essai de Cisaillement Direct.

Afin d'étudier l'influence du traitement à la chaux sur les paramètres de résistance de la Kaolinite DD3, une campagne d'essais au cisaillement direct à la boîte de Casagrande a été conduite pour une argile non traitée, et les argiles traitées à 2, 4 et 6% de chaux à leurs teneurs en eau optimales et leurs densités sèches max respectives obtenues lors des essais de compactage au Proctor normal. Pour chaque argile trois essais de cisaillement direct ont été conduits pour des contraintes normales de 100, 200 et 300kPa, valeurs généralement considérées pour la géotechnique routière. La figure 4.36 présente la variation de la contrainte de cisaillement  $\tau$  en fonction du déplacement horizontal  $\delta_h$  pour l'argile non traitée soumise à des contraintes normales de 100, 200 et 300kPa.

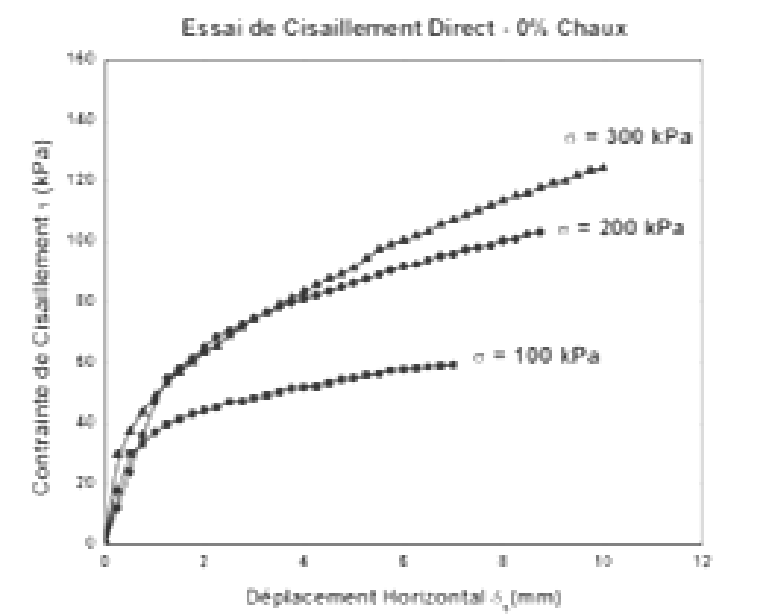


Figure 4.36 Courbe Contrainte de Cisaillement – Déplacement (Sol non Traité).

Les courbes obtenues montrent un accroissement de la contrainte au cisaillement et le déplacement linéaire à la rupture lorsque la contrainte normale augmente. Ces valeurs sont données sur le tableau 4.6. Ce tableau montre les contraintes de cisaillement max respectives 57.53, 102.42 et 123.64kPa ainsi que les déplacements linéaires de 5.75, 8.50 et 9.75mm pour les contraintes normales appliquées. Les essais ont été conduits jusqu'à la rupture des spécimens.

Tableau 4.6 Contrainte  $\tau_{max}$  et Déplacement  $\delta_h$  pour le Sol non Traité.

0% Chaux	$\sigma=100$ kPa	$\sigma=200$ kPa	$\sigma=300$ kPa
$\tau_{max}$ (kPa)	57,53	102,42	123,64
$\delta_h$ (mm)	5,75	8,50	9,75

Les contraintes normales et de cisaillement à la rupture ont permis de tracer l'enveloppe de Mohr-Coulomb et déduire les paramètres de résistance de l'argile. Celle-ci est donnée sur la figure 4.37 où la cohésion obtenue est de l'ordre de 28.42kPa et l'angle de frottement interne égale à 18.26°.

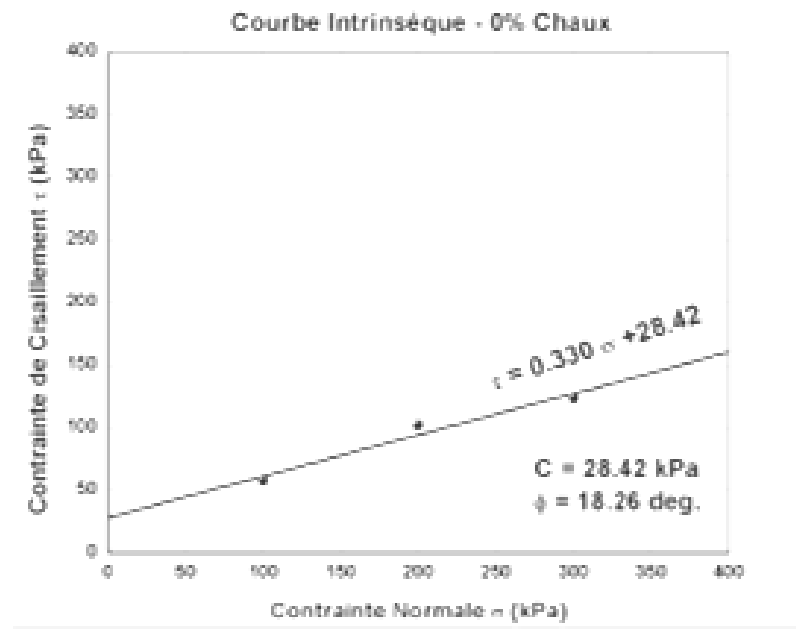


Figure 4.37 Courbe Intrinsèque pour le Sol non Traité.

Lorsque l'argile est stabilisée à 2% de chaux les courbes de cisaillement obtenues sont données sur la figure 4.38.

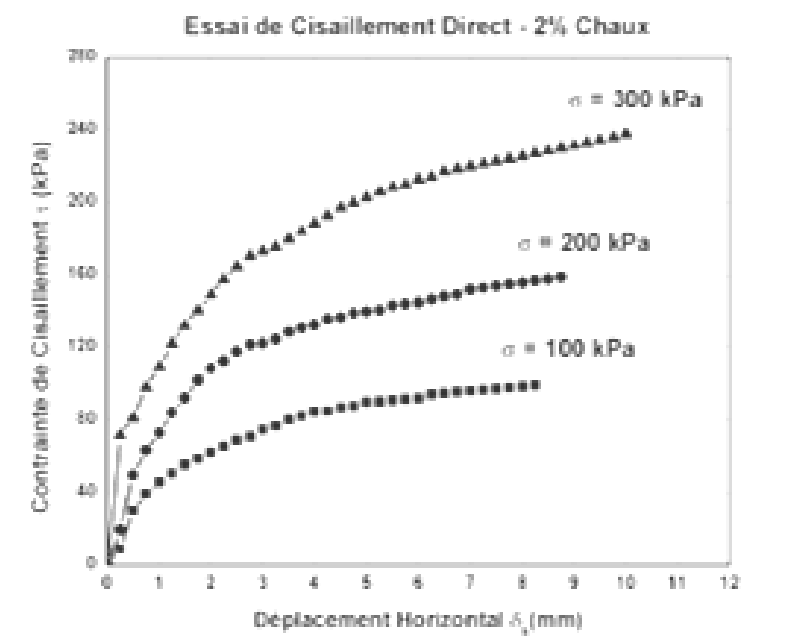


Figure 4.38 Courbe Contrainte de Cisaillement – Déplacement (Sol + 2% Chaux).

Celle-ci montre aussi que l'augmentation de la contrainte normale résulte en l'augmentation de la contrainte tangentielle et le déplacement linéaire à la rupture. En effet la contrainte de cisaillement max passe de 94.21kPa et un déplacement linéaire de 6.25mm pour une contrainte normale de 100kPa à une valeur de 151.81kPa et un déplacement linéaire de 7mm pour une contrainte normale de 200kPa et à 217.15kPa et un déplacement linéaire de 6.50mm pour une contrainte normale de 300kPa. Ces résultats sont donnés sur le tableau 4.7.

Tableau 4.7 Contrainte  $\tau_{max}$  et Déplacement  $\delta_h$  pour le Sol Traité à 2% de Chaux.

2% Chaux	$\sigma=100$ kPa	$\sigma=200$ kPa	$\sigma=300$ kPa
$\tau_{max}$ (kPa)	94,21	151,81	217,15
$\delta_h$ (mm)	6,25	7,00	6,50

La représentation de l'enveloppe de Mohr-Coulomb sur un repère cartésien tracée sur la figure 4.39 a donné une cohésion de 31.44kPa et l'angle de frottement interne de 31.55°.

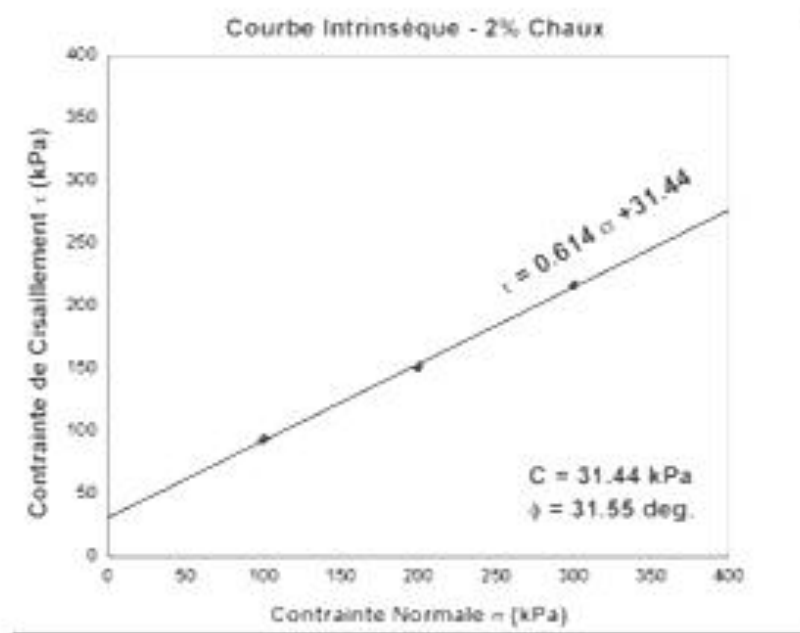


Figure 4.39 Courbe Intrinsèque pour le Sol Traité avec 2% de Chaux.

Le cisaillement de l'argile stabilisée à 4% de chaux donnée sur la figure 4.40 montre une augmentation de la contrainte de cisaillement max. de 104kPa à 145.66kPa et 206.81kPa respectivement pour les contraintes normales utilisées. Le déplacement linéaire à la rupture diminue légèrement de 8.75mm pour une contrainte normale de 100kPa à 6.75mm pour une contrainte normale de 200kPa et à 6.50mm pour une contrainte normale de 300kPa.

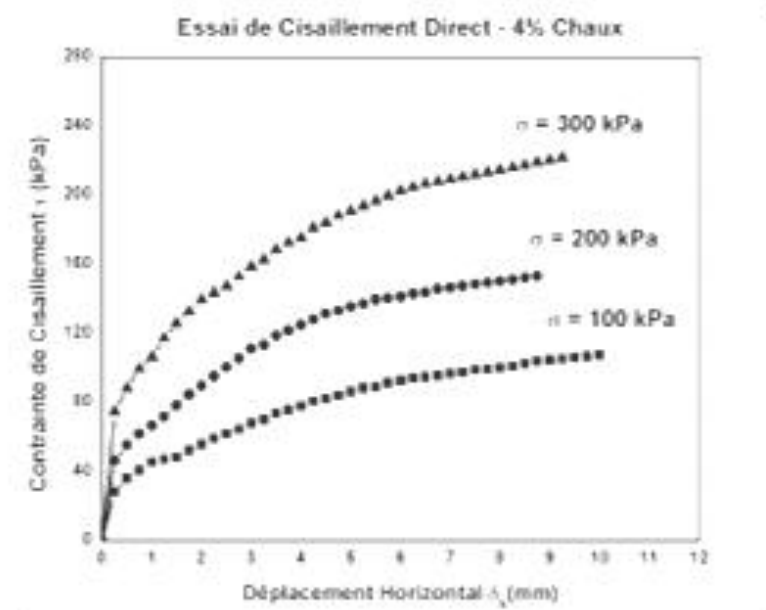


Figure 4.40 : Courbe Contrainte de Cisaillement – Déplacement (Sol + 4% Chaux).

Les valeurs commentées ci-dessus sont bien spécifiées sur le tableau 4.8.

Tableau 4.8 Contrainte  $\tau_{max}$  et Déplacement  $\delta_h$  pour le Sol Traité à 4% de Chaux.

4% Chaux	$\sigma=100$ kPa	$\sigma=200$ kPa	$\sigma=300$ kPa
$\tau_{max}$ (kPa)	104,00	145,66	206,81
$\delta_h$ (mm)	8,75	6,75	6,50

L'enveloppe de Mohr-Coulomb obtenue sur la figure 4.41 montre une cohésion de 49.34kPa et un angle de frottement interne de 27.20°.

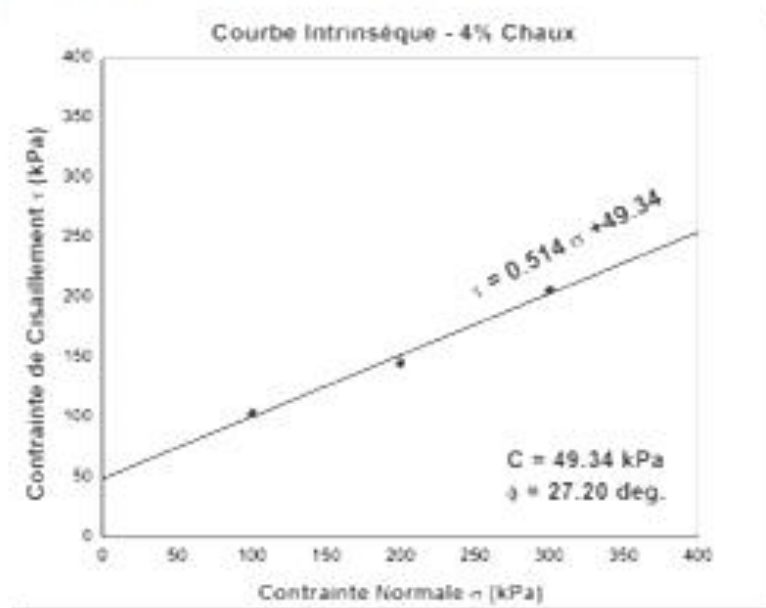


Figure 4.41 Courbe Intrinsèque pour le Sol Traité avec 4% de Chaux.

Le traitement à 6% de chaux de l'argile Kaolinite DD3 semble montrer d'une manière plus claire le pic des courbes de cisaillement pour les contraintes normales de 100, 200 et 300kPa. Ces courbes données sur la figure 4.42 montrent les contraintes de cisaillement de 100.85, 158.67 et 227.70kPa pour des déplacements respectives à la rupture de 2.00, 3.00 et 5.00mm pour les contraintes normales appliquées dans un ordre croissant.

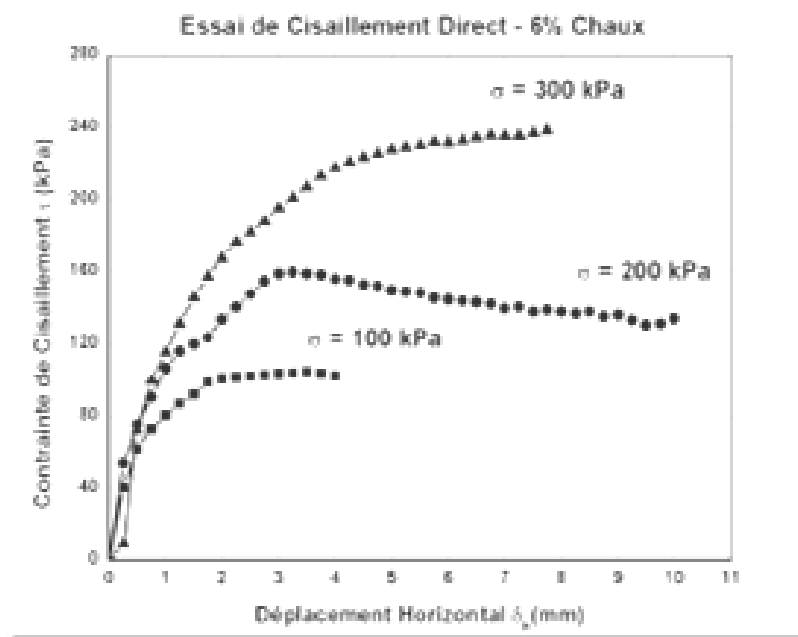


Figure 4.42 Courbe Contrainte de Cisaillement – Déplacement (Sol + 6% Chaux).

Le tableau 4.9 donne un résumé des valeurs obtenues et la courbe 4.43 qui n'est autre que la courbe de Mohr-Coulomb a donné un angle de frottement interne de  $32.37^\circ$  et une cohésion égale 35.55kPa.

Tableau 4.9 Contrainte  $\tau_{max}$  et Déplacement  $\delta_h$  pour le Sol Traité à 6% de Chaux.

6% Chaux	$\sigma=100$ kPa	$\sigma=200$ kPa	$\sigma=300$ kPa
$\tau_{max}$ (kPa)	100,85	158,67	227,70
$\delta_h$ (mm)	2,00	3,00	5,00

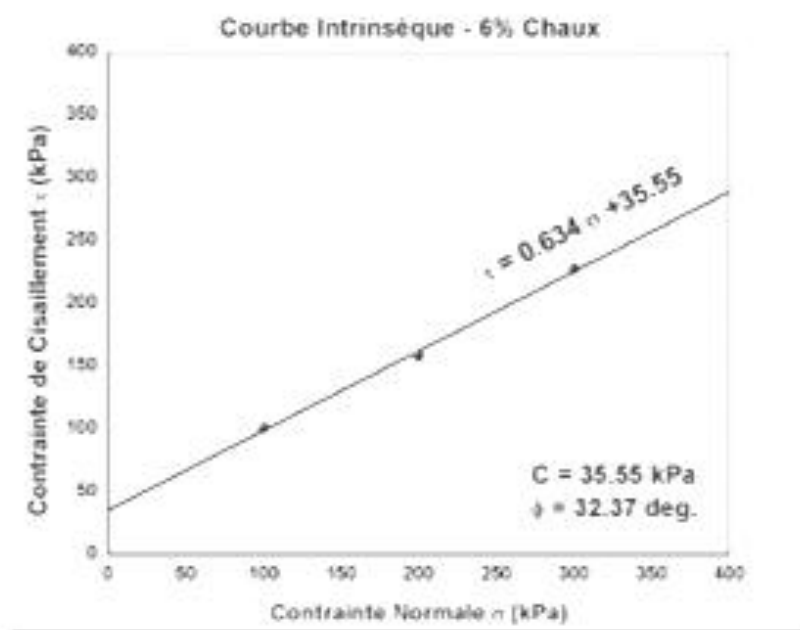


Figure 4.43 Courbe Intrinsèque pour le Sol Traité avec 6% de Chaux.

### Conclusion.

La comparaison des résultats obtenus tel que la contrainte de cisaillement et le déplacement linéaire à la rupture ainsi que les paramètres de résistance à savoir la cohésion et l'angle de frottement interne avec l'accroissement du pourcentage d'ajout de chaux sont données par les histogrammes ci-dessous.

La figure 4.44 montre l'évolution de la contrainte de cisaillement à la rupture pour les trois contraintes normales appliquées lors de l'essai de cisaillement direct en fonction du pourcentage d'ajout de chaux. La figure montre que pour un même pourcentage de chaux la contrainte de cisaillement à la rupture augmente avec l'accroissement de la contrainte normale. L'augmentation du pourcentage de chaux engendre une augmentation appréciable de la contrainte de cisaillement à la rupture lorsque celle-ci passe de 0 à 2%. Au-delà de 2% de chaux la quantité de chaux ajoutée semble ne pas avoir une grande influence sur cette contrainte et par conséquent demeure constante. Cette augmentation de la contrainte de cisaillement à la rupture a été aussi observée par FZ Aissiou (2009) pour les deux argiles de Chéraga et Ouled Fayet.

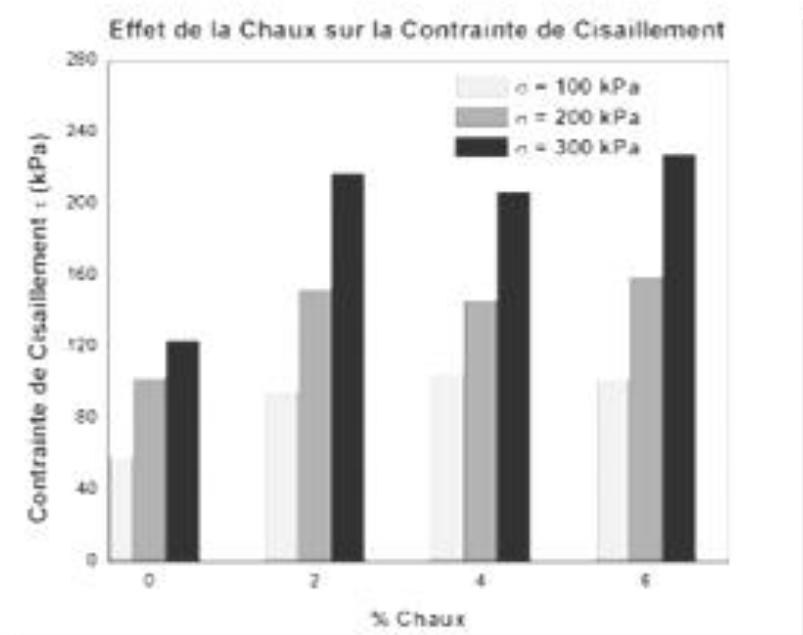


Figure 4.44 Influence de la Chaux sur la Contrainte de Cisaillement Maximale.

La variation du déplacement linéaire à la rupture pour les différents pourcentages d'ajouts de chaux est présentée par les histogrammes de la figure 4.45 et le tableau 4.10. L'augmentation du pourcentage de chaux à la même contrainte normale appliquée semble réduire le déplacement à la rupture. À un même pourcentage de chaux le déplacement à la rupture semble très variable lors de l'accroissement de la contrainte normale. Ce ci est probablement dû au non uniformité de la réaction pouzzolanique dans la nouvelle matrice. Une étude minéralogique plus poussée s'impose.

Tableau 4.10 Variation du Déplacement  $\delta_R$  avec l'Addition de la Chaux.

% Chaux	$\sigma=100$ kPa	$\sigma=200$ kPa	$\sigma=300$ kPa
	$\delta_R$ (mm)	$\delta_R$ (mm)	$\delta_R$ (mm)
0	5,75	8,50	9,75
2	6,25	7,00	6,50
4	8,75	6,75	6,50
6	2,00	3,00	5,00

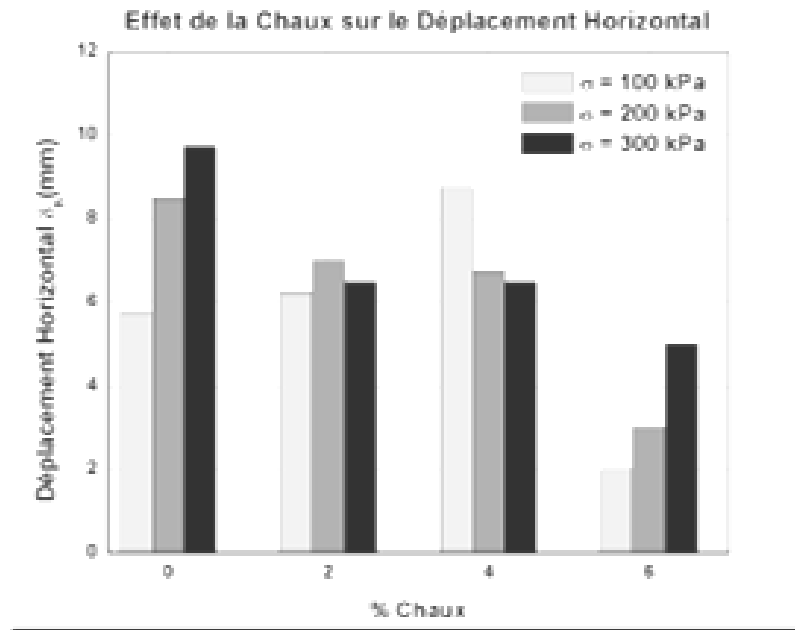


Figure 4.45 Influence de la Chaux sur le Déplacement Horizontal.

Les histogrammes de la figure 4.46 et le tableau 4.11 donnent la variation de la cohésion non drainée en fonction du pourcentage d'ajout de chaux. Ces derniers montrent une amélioration de la cohésion lorsque le pourcentage d'ajout augmente jusqu'à 4%. Au-delà cette cohésion semble perdre un peu de valeur. Cette observation confirme les résultats obtenus lors des essais de compression simple.

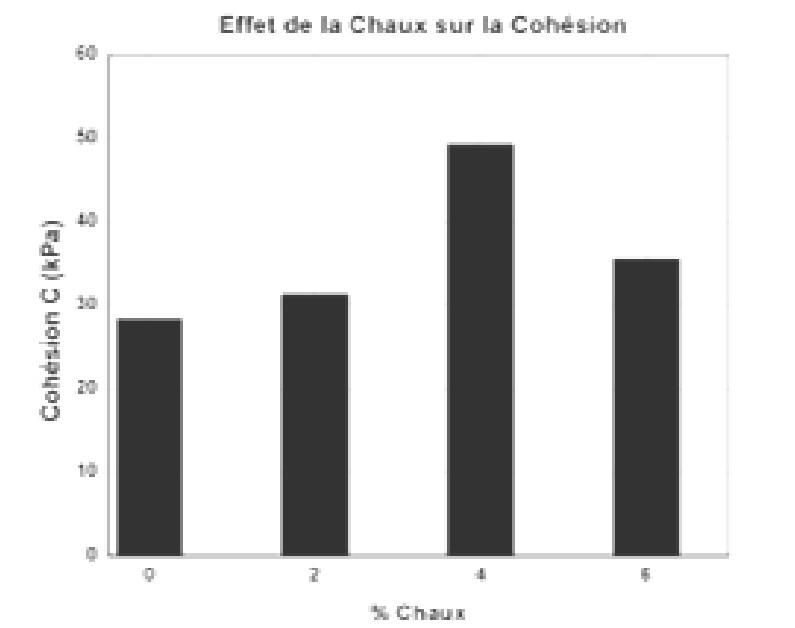


Figure 4.46 Influence de la Chaux sur la Cohésion.

Tableau 4.11 Variation de la Cohésion avec l'Addition de la Chaux.

% Chaux	c (kPa)
0	28,42
2	31,44
4	49,34
6	35,55

Le tableau 4.12 ainsi que la figure 4.47 qui donnent la variation de l'angle de frottement interne en fonction de l'accroissement du pourcentage de chaux ajoutée lors du traitement montrent tous les deux un accroissement dans l'angle de frottement interne jusqu'à une valeur d'environ 31° à 2% de chaux. Au-delà cette valeur demeure constante indépendamment de la quantité de chaux ajoutée. Cette tendance de l'angle de frottement interne a été trouvée aussi par FZ Aissiou (2009) pour les deux argiles étudiées de Chéraga et Ouled Fayet.

Tableau 4.12 Variation de l'Angle de Frottement Interne avec l'Addition de la Chaux.

% Chaux	$\phi$ (°)
0	18,26
2	31,55
4	27,20
6	32,37

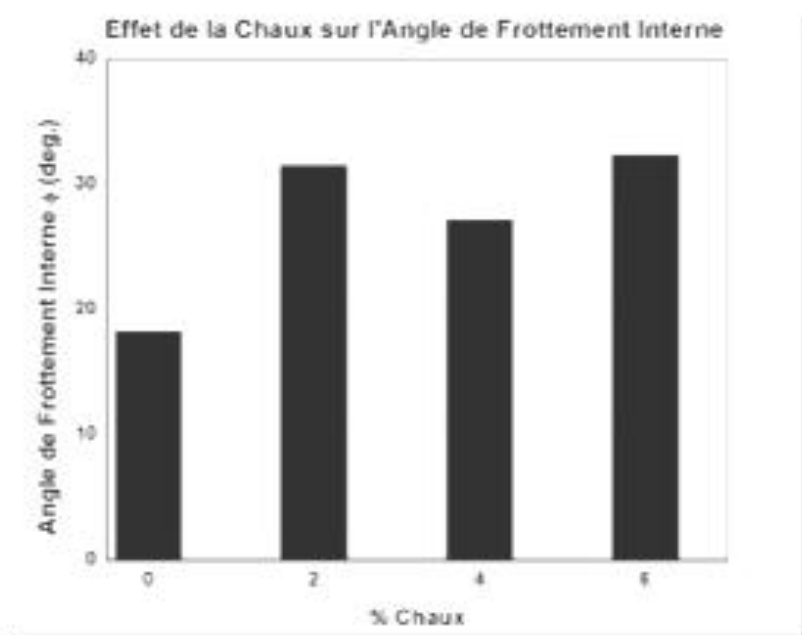


Figure 4.47 Influence de la Chaux sur l'Angle de Frottement Interne.

## 4.6. Influence du Temps de Cure sur l'UCS pour 3% de Chaux.

Une campagne d'essai à la compression simple (UCST) selon la norme ASTM D 5102-96 et dont la procédure a été donnée au *chapitre 3* a été conduite pour l'étude de l'influence du temps de conservation sur les paramètres de cet essai pour la Kaolinite DD3 traitée à 3% de chaux comme pourcentage optimum. Les *périodes de conservation* (Curing Times) de 1, 3, 7, 14, 21 et 28 jours ont été donnés aux échantillons pour subir la réaction pouzzolanique. Les différents résultats montrant cette influence sur la compression simple  $q_u$ , la déformation  $\epsilon$ , le module d'élasticité  $E$  et la cohésion non drainée  $c$  sont donnés ci-dessous.

La relation entre la compression simple et la déformation axiale principale pour un pourcentage de chaux de 3% et un temps de cure d'une journée est donnée sur la figure 4.48. Celle-ci montre que la compression simple à la rupture de la Kaolinite DD3 traitée est d'une magnitude de 232.4kPa. Cette contrainte est atteinte pour une déformation de 3.20% et correspond à une argile de consistance *très ferme* (Very Stiff). Cette courbe donne comme tangente initiale le module d'élasticité  $E = 92.46\text{kPa}$  et une cohésion non drainée de 116.2kPa.

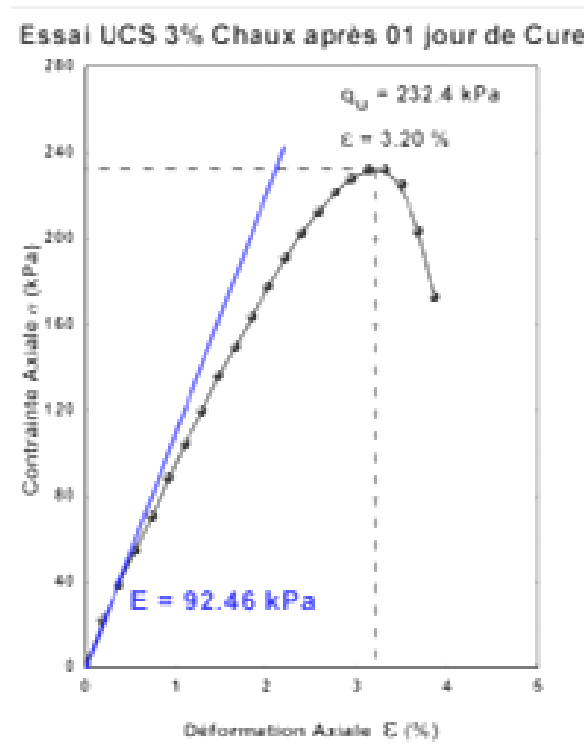


Figure 4.48 Courbe Contrainte-Déformation (Sol Traité à 3% et Conservé pour 1 jour).

Le comportement de la Kaolinite DD3 traitée à 3% de chaux et conservée pour 3 jours est donné sur la figure 4.49. La courbe montre une mobilisation de la résistance jusqu'à une valeur de 286.2kPa suivie d'un écrouissage. Cette valeur classifie de point de vue consistance l'argile comme étant une *argile très ferme* (Very Stiff). Ce pic de valeur est atteint à une déformation axiale de 2.77%. La tangente à la courbe initiale montre un module d'élasticité de 132.05kPa. La cohésion non drainée qui n'est autre que la moitié de la compression simple est égale à 143.1kPa.

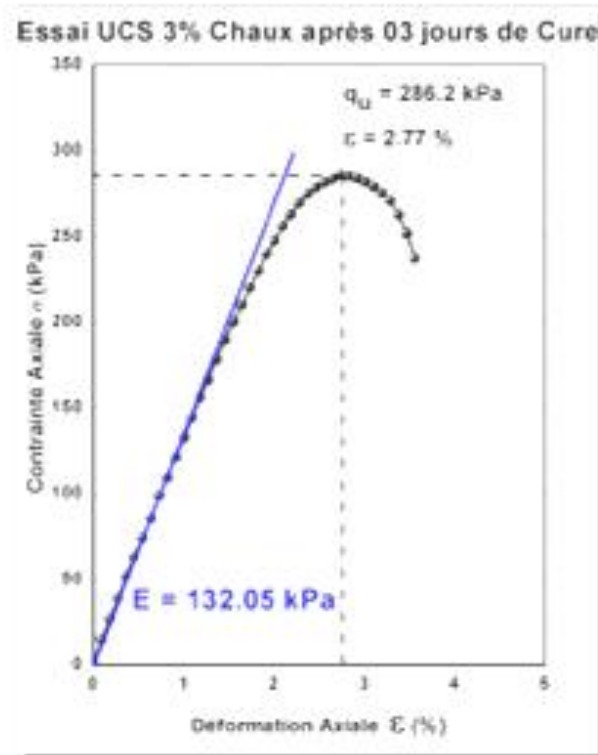


Figure 4.49 Courbe Contrainte-Déformation (Sol Traité à 3% et Conservé pour 3 jrs).

La conservation pendant 7 jours de la Kaolinite DD3 traitée à 3% de chaux produit la variation de la contrainte de compression simple en fonction de la déformation axiale montrée sur la figure 4.50. En effet cette augmentation dans la période de conservation entraine une compression simple à la rupture de 457.8kPa indiquant une consistance *dure* (Hard) à une déformation axiale de 2.86%. Le module d'élasticité a atteint une valeur de 183.57kPa alors que la cohésion obtenue est de l'ordre de 228.9kPa.

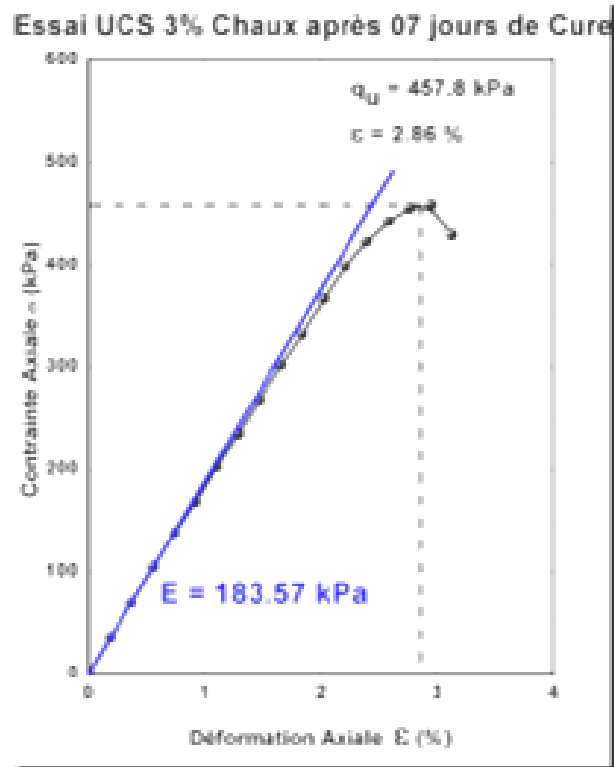


Figure 4.50 Courbe Contrainte-Déformation (Sol Traité à 3% et Conservé pour 7 jrs).

La figure 4.51 donne le comportement de la Kaolinite DD3 stabilisée à 3% de chaux et conservé pendant 14 jours.

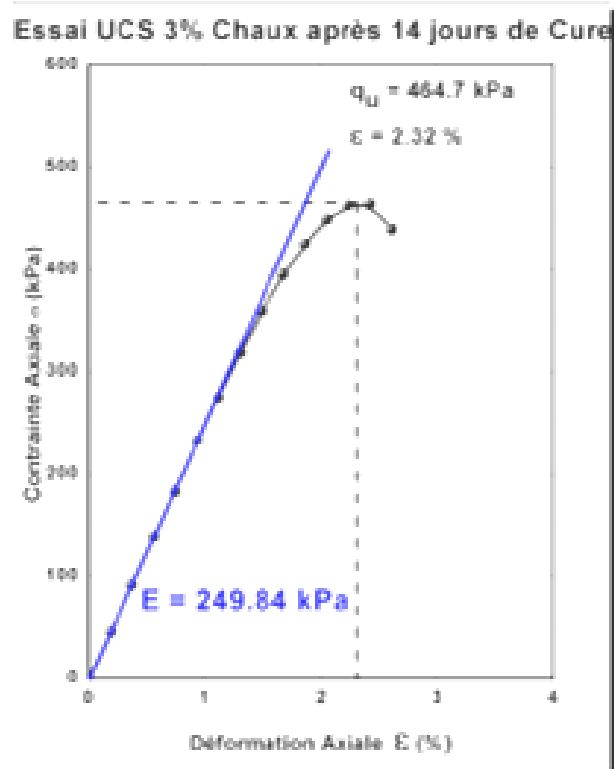


Figure 4.51 Courbe Contrainte-Déformation (Sol Traité à 3% et Conservé pour 14 jrs).

La courbe montre que le déviateur au pic est de 464.7kPa correspondant à une argile de consistance *dure* (Hard). La déformation axiale à la rupture correspondant à cette valeur de déviateur est aux environs de 2.32%. La droite de la courbe initiale donne un module d'élasticité de 249.84kPa. La cohésion non drainée de ce mélange d'argile et 3% de chaux est de l'ordre de 232.4kPa.

Le temps de 21 jours de cure de la Kaolinite DD3 traitée à 3% de chaux provoque une compression simple à la rupture de 491.2kPa pour une déformation axiale principale de 2.20%. Cette valeur de résistance indique que l'argile est de consistance *dure* (Hard). Cet essai de compression simple non drainée a permis d'avoir pour ce mélange une cohésion non drainée de 245.6kPa et un module d'élasticité correspondant à la courbe initiale de l'ordre de 269.16kPa. La figure 4.52 présente ces résultats clairement.

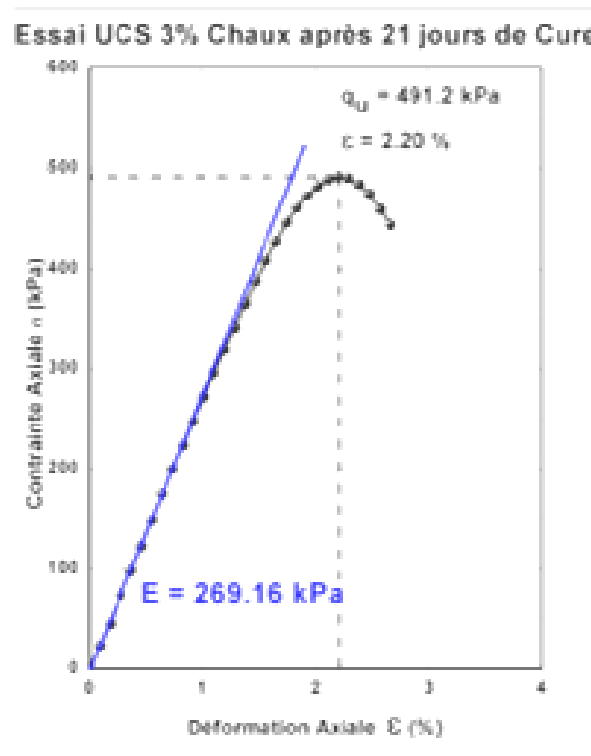


Figure 4.52 Courbe Contrainte-Déformation (Sol Traité à 3% et Conservé pour 21 jrs).

La figure 4.53 donne la courbe qui montre le comportement de la Kaolinite DD3 stabilisée à 3% de chaux et conservé pendant 28 jours. La courbe montre que la résistance de compression simple au pic est de 532.4kPa correspondante à une argile de consistance *dure* (Hard). La déformation axiale à la rupture correspondante à cette valeur de résistance est aux environs de 1.85%. La droite de la courbe initiale donne un module d'élasticité de 359.85kPa. La cohésion non drainée du mélange d'argile-chaux est de l'ordre de 266.2kPa.

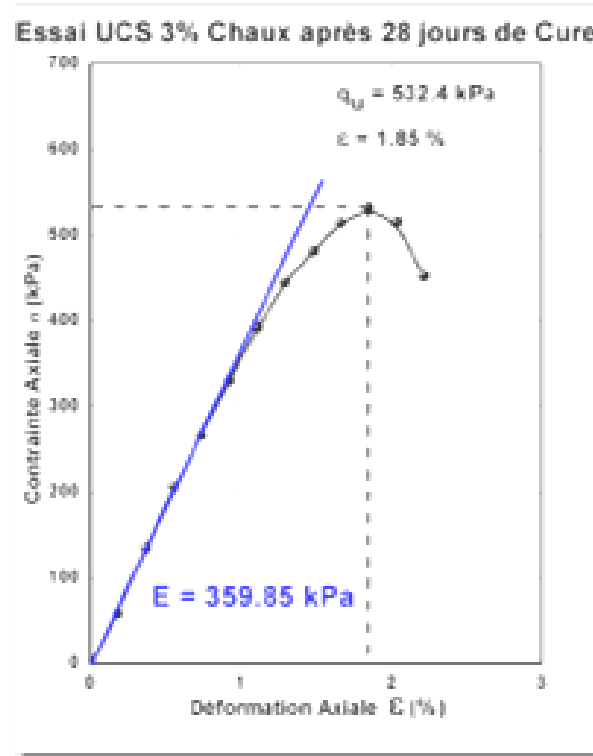


Figure 4.53 Courbe Contrainte-Déformation (Sol Traité à 3% et Conservé pour 28 jrs).

### Conclusion.

La figure 4.54 présente la comparaison entre les courbes de contrainte-déformation de l'essai de compression simple pour l'argile Kaolinite DD3 traitée à 3% de chaux pendant les périodes de conservation de 1, 3, 7, 14, 21, et 28jours. Le graphe montre que les deux courbes de 1 et 3jours de conservation apparaissent étrées ce qui n'est pas le cas pour les autres courbes de 7 à 28jours de cure. Celle-ci montre aussi que l'accroissement de la durée de conservation augmente la valeur de la compression simple. L'augmentation apparaît moyennement vite entre 1 et 3jours où la résistance au pic augmente de 232.4 à 286.2kPa respectivement, mais elle devient plus rapide entre 3 et 7jours où la contrainte devient 457.8kPa, ce qui explique une accélération de la réaction pouzzolanique entre l'argile et la chaux dans cette période du temps. Entre 7 et 14jours de cure la vitesse d'augmentation de la compression simple apparaît très faible et la résistance augmente difficilement à 464.7kPa à 14jours, mais après 14jours l'augmentation devient remarquable à 21 et 28jours. La résistance de compression simple après 28jours de conservation atteint une valeur de 532.4kPa.

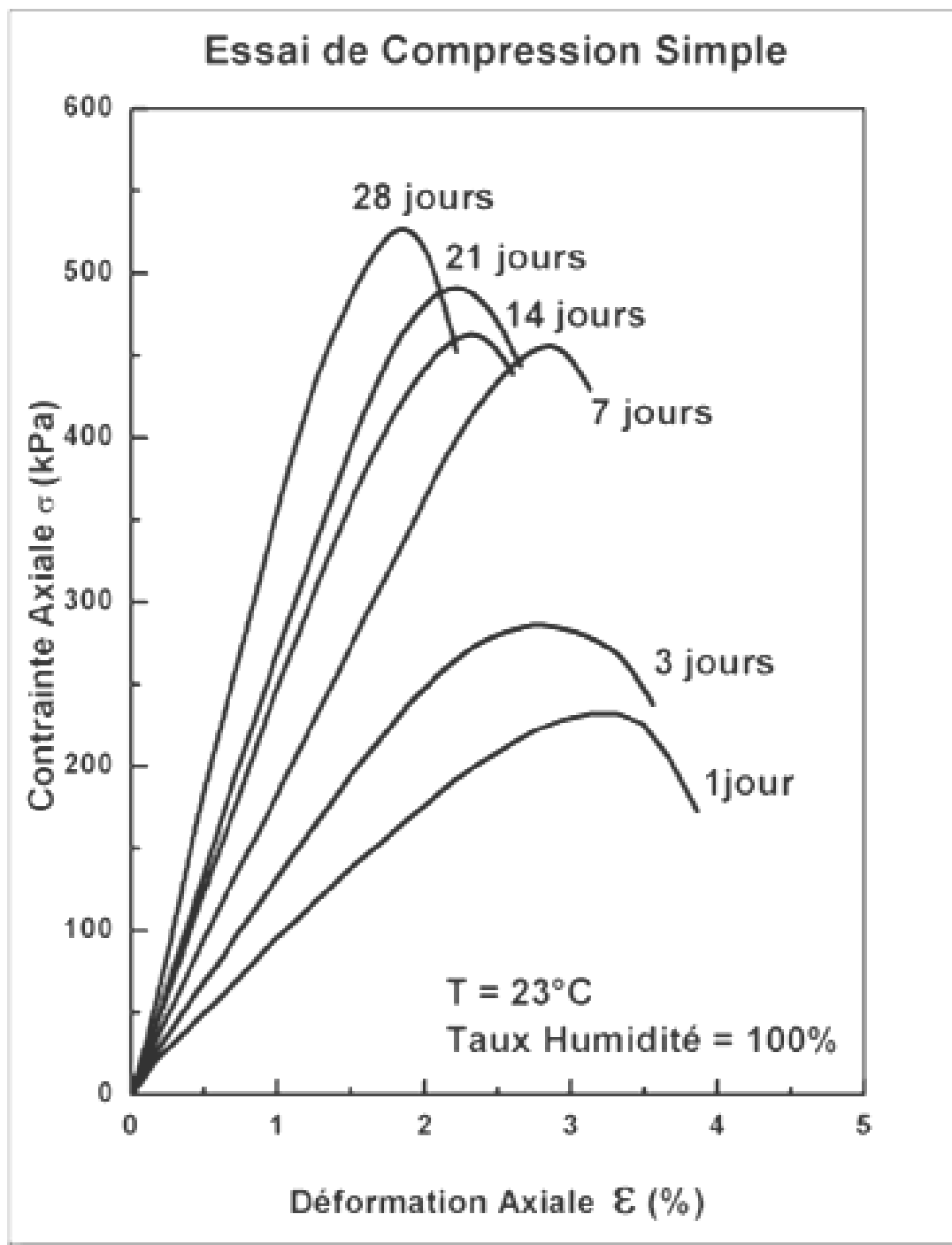


Figure 4.54 Influence du Temps de Cure sur l'Essai UCST (Sol Traité à 3% de Chaux).

L'augmentation de la compression simple est présentée aussi sous forme d'un histogramme présenté sur la figure 4.55. L'historgramme montre clairement l'augmentation de la résistance de compression simple à la rupture en fonction du temps de cure. Cette observation a été faite aussi par d'autres chercheurs tels que F. G. Bell (1989 et 1996), Peter Evans (1997), Dallas Little (1999), Khairul Anuar Kassim (2004), C. M. Geiman (2005), A. Al Rawas (2006), M. Arabani (2006), M. A. Sakr et al. (2008) et F. Z. Aissiou et al. (2009).

Cet accroissement de la résistance conduit à l'augmentation de même façon de la cohésion non drainée qui n'est que la moitié de la compression simple. Cette cohésion augmente de 116.2kPa pour 1jr à 143.1kPa pour 3jrs à 228.9kPa pour 7jrs à 232.4kPa pour 14jrs à 245.6kPa pour 21jrs et à 266.2kPa pour 28jrs.

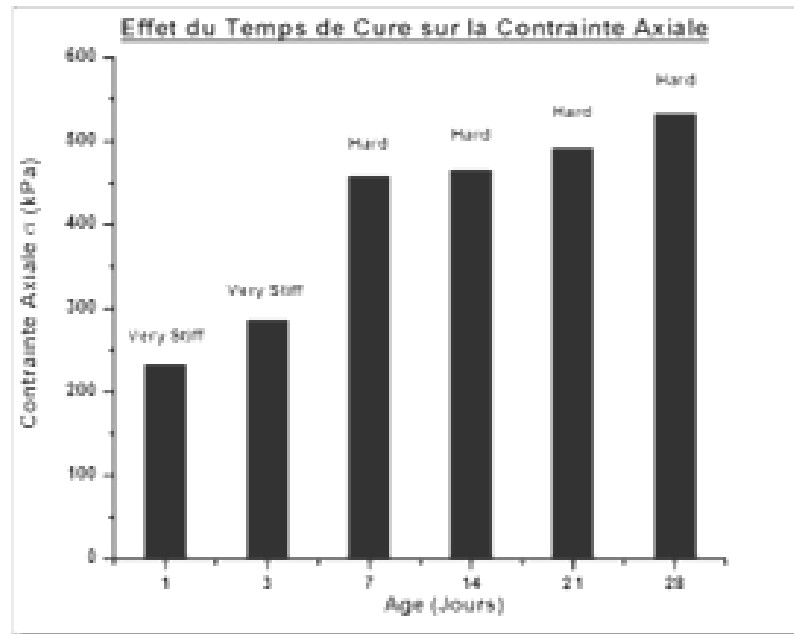


Figure 4.55 Influence du Temps de Cure sur la Contrainte Axiale.

L'histogramme présenté sur la figure 4.56 donne la variation de la déformation axiale principale avec la durée de conservation de l'argile Kaolinite DD3 traitée à 3% de chaux. Celle-ci montre que l'accroissement du temps de cure diminue la déformation axiale.

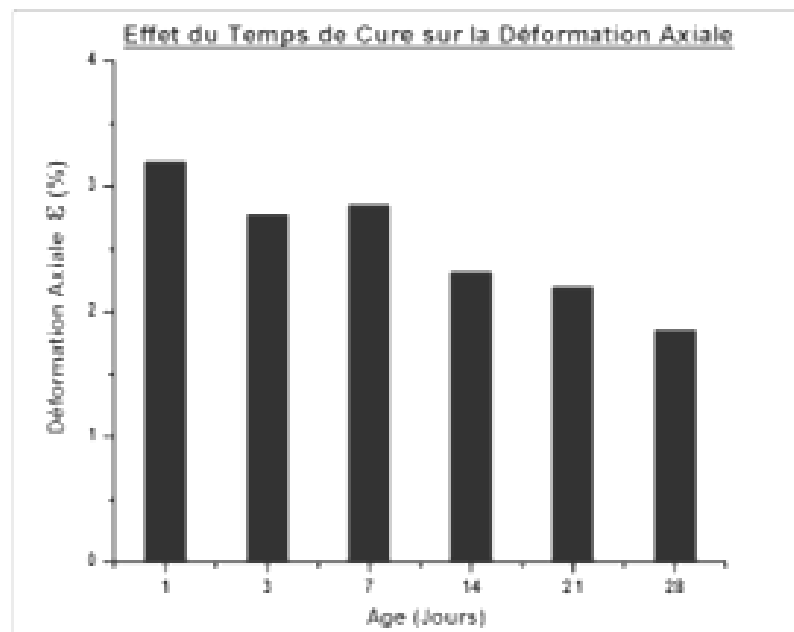


Figure 4.56 Influence du Temps de Cure sur la Déformation Axiale.

La variation du module d'élasticité pour l'argile Kaolinite DD3 traitée à 3% de chaux qui est la tangente initiale de la courbe de compression simple avec accroissement du temps de cure est présentée sous forme d'histogramme donné sur la figure 4.57 et sous forme des droites à l'échelle réel sur la figure 4.58. Ces figures montrent que l'accroissement du temps de cure augmente le module d'élasticité de même façon que la résistance à la compression simple.

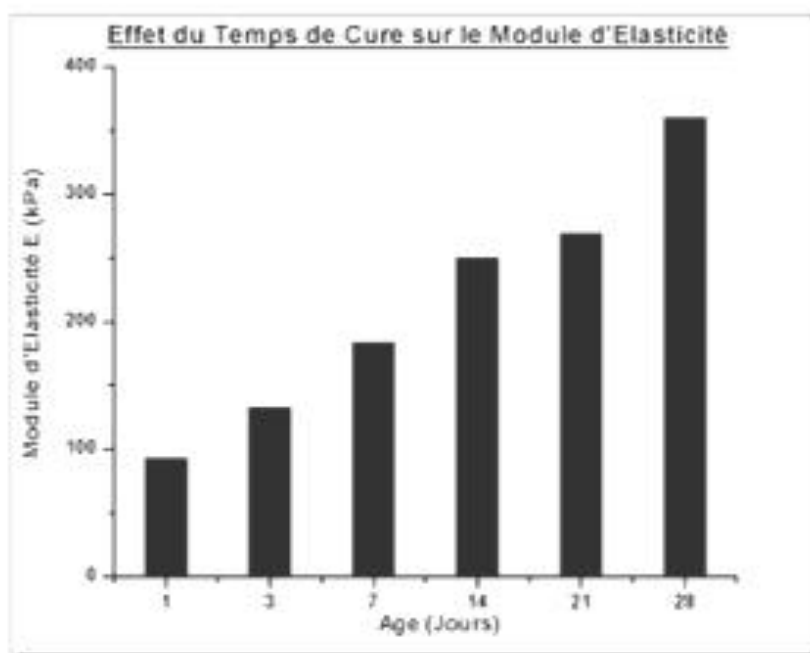


Figure 4.57 Influence du Temps de Cure sur le Module d'Elasticité.

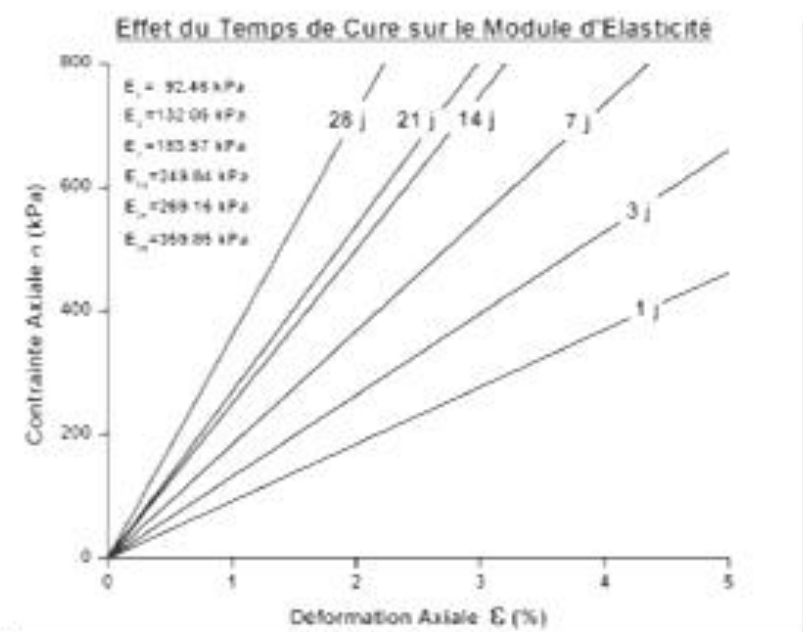


Figure 4.58 Variation de la Droite Initiale (E) avec le Temps de Conservation.

Le tableau 4.17 est un résumé de valeurs trouvées pour la déformation, la compression simple, la cohésion non drainée, le module d'élasticité et la consistance pour les argiles traitées à 3% de chaux et à différents âge de conservation.

Tableau 4.13 Variation des Paramètres de l'Essai UCS avec le Temps de Cure.

Age (jrs)	$\varepsilon$ (%)	$q_u$ (kPa)	$c_u$ (kPa)	E (kPa)	Consistance
1	3,20	232,4	116,2	92,46	Very Stiff
3	2,77	286,2	143,1	132,05	Very Stiff
7	2,86	457,8	228,9	183,57	Hard
14	2,32	464,7	232,4	249,84	Hard
21	2,20	491,2	245,6	269,16	Hard
28	1,85	532,4	266,2	359,85	Hard

La résistance de compression simple à la rupture de l'argile Kaolinite DD3 trouvée de 92.4kPa correspondante à une consistance *moyenne* a été augmentée à 532.4kPa correspondante à une consistance *dure* pour cette argile traitée à 3% de chaux et conservée durant 28jours. Ce gain de résistance à la rupture de 440kPa indique que la teneur en chaux optimale pour la stabilisation de l'argile Kaolinite DD3 pour son utilisation dans la construction des ouvrages linéaires est de 3%.

## Chapitre 5

### CONCLUSIONS & RECOMMANDATIONS.

Ce chapitre résume toutes les conclusions des résultats et interprétations obtenus et propose des recommandations.

#### CONCLUSIONS.

- a. Les essais d'identification et de caractérisation montrent que le sol nommé Kaolinite DD3 est un *sol à grains fins* classée comme *argile grasse* « fat clay » et prend le symbole *OH* « *argile organique de plasticité élevée* ». Cette argile est de *consistance moyenne*.
- b. La teneur en fines, l'indice de plasticité et la teneur en sulfates montrent que l'argile Kaolinite DD3 est apte d'être stabilisée à la chaux et qu'elle répond aux conditions de traitement à la chaux. Plus loin, la chaux est *le meilleur et le seul* stabilisateur recommandé pour ce type d'argile selon la classification MIL-STD-6198.
- c. La Kaolinite DD3 a une *activité normale*, ce qui lui permet de réagir avec la chaux.
- d. L'ajout de la chaux augmente la limite de plasticité jusqu'à *un point de fixation* de 5% de chaux où elle reste constante, augmente la limite de liquidité jusqu'à 3% de chaux puis elle diminue légèrement avec l'accroissement du pourcentage de chaux et par conséquent diminue l'indice de plasticité ce qui améliore la *maniabilité* de l'argile et prolonge la durée des travaux sur une longue période pendant l'année au lieu que ça soit uniquement durant les saisons sèches.
- e. La Kaolinite DD3 est de forme basique et après traitement à la chaux, la valeur du pH augmente au dessus de 12.4 et par conséquent le pourcentage initial recommandé pour le traitement est de 1.6% de chaux dont le taux de *modification* est basé sur cette valeur.
- f. Le compactage au Proctor normale de la Kaolinite DD3 montre que l'accroissement du pourcentage de chaux : aplatit la courbe de compactage permettant ainsi un meilleur contrôle de la teneur en eau sur chantier puisqu'il s'agit d'une plage où la teneur en eau optimale peut varier, diminue la masse volumique sèche maximale ce qui résulte une amélioration du coefficient de sécurité et par conséquent une meilleure

stabilité de l'ouvrage et augmente la teneur en eau optimale. Ces changements ont produit de l'échange ionique et la floculation des particules du sol que lui rendre plus friable pour le compactage.

- g. Le processus de *stabilisation* a demandé un pourcentage de chaux plus élevé que celui de *modification*, ce pourcentage a été déterminé par l'essai de compression simple UCST. Ce dernier a montré que l'accroissement du pourcentage de chaux jusqu'à 3% après 24h de cure améliore considérablement la consistance de la Kaolinite DD3 d'une consistance initiale *moyenne* (Medium) à *très ferme* (Very Stiff) pour 3% de chaux. Au-delà de cette valeur l'argile perd légèrement de consistance pour devenir *ferme* (Stiff). Un 3% de chaux est par conséquent un pourcentage optimum. Le module d'élasticité a suivi la variation de la compression simple. Cependant, les déformations axiales à la rupture diminuent avec le traitement de l'argile à la chaux pour tous les pourcentages utilisés.
- h. Lors de l'essai de cisaillement direct l'accroissement du pourcentage de chaux produit : une augmentation appréciable de la contrainte de cisaillement à la rupture et l'angle de frottement interne jusqu'à 2% d'ajout puis ils demeurent constants avec l'addition de la chaux, une réduction du déplacement à la rupture, une amélioration de la cohésion lorsque le pourcentage d'ajout augmente jusqu'à 4% puis elle diminue ce qui confirme les résultats obtenus lors des essais de compression simple.
- i. L'argile Kaolinite DD3 traitée à un pourcentage optimum de 3% de chaux présente une augmentation dans résistance à la compression simple avec l'accroissement de la durée de conservation, cette augmentation apparaît très rapide dans les sept premiers jours ce qui explique l'accélération de la réaction pouzzolanique entre l'argile et la chaux dans cette période du temps. La vitesse d'augmentation apparaît moins rapide après le septième jour mais la résistance continue son accroissement avec le temps de conservation jusqu'au 28<sup>ème</sup> jour où elle atteint une valeur de 532.4kPa. Cet accroissement dans la résistance qui permet de réduire l'épaisseur de la couche de fondation conduit aussi à l'augmentation de même façon du module d'élasticité et de la cohésion non drainée qui n'est que la moitié de la compression simple. Le prolongement de la durée de conservation provoque une diminution dans la déformation axiale principale, donc une diminution dans le tassement de l'ouvrage.
- j. Suite aux résultats obtenus la résistance la Kaolinite DD3 passe d'une consistance *moyenne* (Medium) pour l'argile non traité à une consistance *très ferme* (Very Stiff)

pour l'argile traitée à 3% et après 24h de cure à une consistance *dur* (Hard) à 3% de chaux et après 28jours de conservation.

- k. Finalement, le gain de résistance obtenue est d'une valeur de 440kPa, ce qui permet de dire que l'argile Kaolinite DD3 stabilisée à un pourcentage de 3% de chaux est certainement recommandée pour la construction des ouvrages linéaires.

## RECOMMANDATIONS.

- Une étude minéralogique approfondie sur cette argile traitée à la chaux pour mieux comprendre les développements de la réaction pouzzolanique.
- Étude de la stabilisation à long terme.
- Étude de l'effet de la température sur le sol stabilisé à la chaux.
- Un model physique, des essais in situ tels qu'une planche d'essai et des essais à la plaque sont nécessaire pour appliqué ses résultats.
- Corrélation entre la résistance au laboratoire et celle in situ.
- L'effet de l'eau sur le sol stabilisé à la chaux (essais d'imbibition).
- Étude des essais cyclique gel et dégel (Freeze & Thaw), cycles de saturation et séchage (Wet & Dry cycles).

# REFERENCES

## ARTICLES ET PUBLICATIONS

1. ROSSI P.L Etude des transformations structurales et minéralogiques provoquées par compactage avec ou sans addition de chaux a des argiles latéritiques brésiliennes, Brésil, 1983.
2. K. E. CLARE Laboratory experiments in the stabilization of clays with hydrated lime, USA, 1988.
3. F.G. BELL Lime stabilisation of clay soils, Paris, 1989.
4. M. Mateos Recherches sur la stabilisation des sols par la chaux et les cendres volantes, France, 1993.
5. F.G. BELL Lime stabilization of clay minerals and soils, South Africa, 1996.
6. Update on lime stabilization, USA, 1997.
7. M. Afès Stabilisation des sols gonflants cas d'une argile en provenance de Mila, Algérie, 1999.
8. Emad Akawwi Lime stabilization effects on geotechnical properties of expansive soils in Amman, Amman (Jordan), 1999.
9. A. M. ELSharief Technical and economical viability of lime stabilization of expansive soils for road construction in Sudan, Sudan, 2000.
10. LCPC\_GTR Contrôle de travaux de traitement des sols, Paris, 2001.
11. Durabilité du traitement a la chaux d'un sol argileux plastique Voli-session\_7, France, 2003.
12. Khairul Amuar Kassim Lime stabilized Malaysian cohesive soils, Malaysia, 2004.
13. Giacomo Russo Microstructure of a lime stabilised compacted silt, Italy, 2004.
14. M. B. DIOP Comportement des tufs volcaniques du Sénégal oriental au traitement á la chaux et au ciment, Sénégal, 2005.
15. SUDHAKAR M. RAO Compressibility behaviour of lime-stabilized clay, India, 2005.
16. Pr. Dave S.P Effect of salt on CBR value of lime treated soil, India, 2005.
17. S.O. Faluyi Effects of lime stabilization on the ph values of lateritic soils in Ado-Ekiti, Nigeria, 2005.
18. P. PAUMELLE Le godet cribleur un outil léger mobile pour valoriser les excédents de déblais de chantier, France, 2005.
19. M. Arabani Geomechanical properties of lime stabilized clayey sands, Jordan, 2006.
20. Paul Quigley BEng Modification-stabilisation of low strength cohesive soils under foundations and floor slabs, Ireland, 2006.
21. TAMADHER T. ABOOD Stabilisation of silty clay soil using chloride compounds, Malaysia, 2007.
22. IS.M. Marandi Strength and ductility of randomly distributed palm fibers reinforced silty-sand soils, Iran, 2008.

23. Bujang B.K. Huat Evaluation, selection and assessment of guidelines for chemical stabilization of tropical residual soils, Malaysia, 2008.
24. O.O. Amu Stabilization characteristics of lime on palm kernel blended lateritic soil, Nigeria, 2008.
25. Mouhamad ou Bassir Diop Traitement a la chaux des tufs volcaniques du Sénégal oriental activation de la réaction pouzzolanique par du phosphogypse, Sénégal, 2008.
26. Mohamed A.Sakr Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content, Egypt, 2008.
27. F. Z. AISSOUS Amélioration de caractéristiques mécaniques d'un sol argileux par incorporation de chaux, Algérie, 2009.

### **LIVRES & THÈSES**

28. C.D.F Rogers Lime stabilization, UK, 1996.
29. LCPC Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Guide technique, France, 2000.
30. Department of the army, the navy, and the air force Soil stabilization for pavements, USA, 1994.
31. KHAIRUL ANUAR KASSIM Lime stabilization for marginal sub-grade as capping layer for road construction, Malaysia, 2003.
32. PER LINDH Compaction- and strength properties of stabilised and unstabilised fine-grained tills (Doctoral Thesis), Suede, 2004.
33. Justin P. Milburn Performance of soil stabilization agents, Kansas (USA), 2004.
34. Hyung Jun Choi Soil stabilization using optimum quantity of calcium chloride with class f fly ash, Texas, USA, 2005.
35. Christopher M. Geiman Stabilization of soft clay subgrades in Virginia phase I laboratory study, Virginia, USA, 2005.
36. Nicolas CABANE Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques (thèse doctorat génie procédé), France, 2005.
37. F. Z. AZZOUZ Contribution a l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen, Algérie, 2006.
38. nor zurairahetty binti mohd yunus Stabilisation of organic clay using lime-added salt, Malaysia, 2007.

### **RAPORTS ET PAPIERS**

39. The Tensar Corporation Chemical and mechanical stabilization of subgrades and flexible pavement sections\_TTN BR10 (Tensar technical note), USA, 1998.
40. Thomas M. Petry, Khaled Sobhan Evaluation of Chemical Stabilizers -State of the Practice Report \_TRB, USA, 2005.
41. Caterpillar Introduction to Soil Stabilization, USA, 2006.
42. Marshall R. Thompson Admixture Stabilization\_ TN14, USA, 2005.
43. NLA Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil, USA, 2006.

- |     |                                |  |
|-----|--------------------------------|--|
| 44. | Dallas N. Little (NLA)         | Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates v1, USA, 1999.   |
| 45. | Dallas N. Little (NLA)         | Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates v3, USA, 2000.   |
| 46. | NLA                            | Lime-treated soil construction manual lime stabilization & lime modification, USA, 2004.     |
| 47. | Centre de recherches routières | Guide pratique -2- Stabilisation des sols pour couches de sous-fondation, France, 2004.      |
| 48. | Centre de recherches routières | Guide pratique -3- Amélioration des sols pour terrassements et fond de coffre, France, 2004. |

### NORMES ASTM

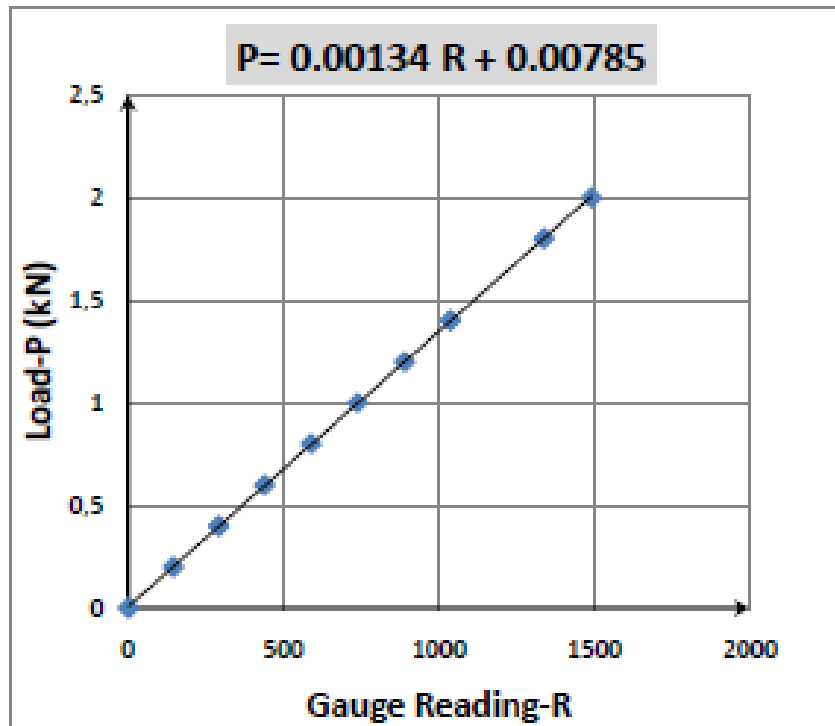
- |     |                   |   |
|-----|-------------------|---|
| 49. | ASTM D 497-95a    | Standard Test Methods for pH of Soils   |
| 50. | ASTM D 2974-87/95 | Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils               |
| 51. | ASTM D 854-98     | Standard Test Methods for Specific Gravity of Soils   |
| 52. | ASTM C 136-96a    | Standard Test Methods for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates                                    |
| 53. | ASTM C 117-95     | Standard Test Methods for Materials Finer Than 75 $\mu$ m (N°200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing  |
| 54. | ASTM D 4318-00    | Standard Test Methods for Liquid Limit, and Plasticity Index of Soils                                     |
| 55. | ASTM D 2487-98    | Standard Test Methods for Classification of Soils for Engineering Purposes (USCS)                         |
| 56. | ASTM D 698-91/98  | Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort              |
| 57. | ASTM D 2166-98a   | Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil                                 |
| 58. | ASTM D 3080-98    | Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions                 |
| 59. | ASTM D 3551-90/96 | Standard Practice for Laboratory Preparation of Soil-Lime Mixtures Using a Mechanical Mixer               |
| 60. | ASTM D 6276-99a   | Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization |
| 61. | ASTM D 5102-96    | Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures                  |
| 62. | ASTM C 25-99      | Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime                    |
| 63. | ASTM C 110-00     | Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone                     |
| 64. | ASTM C 977-00     | Standard Specification for Quicklime and Hydrated Lime for Soil Stabilization                             |

# ANNEX

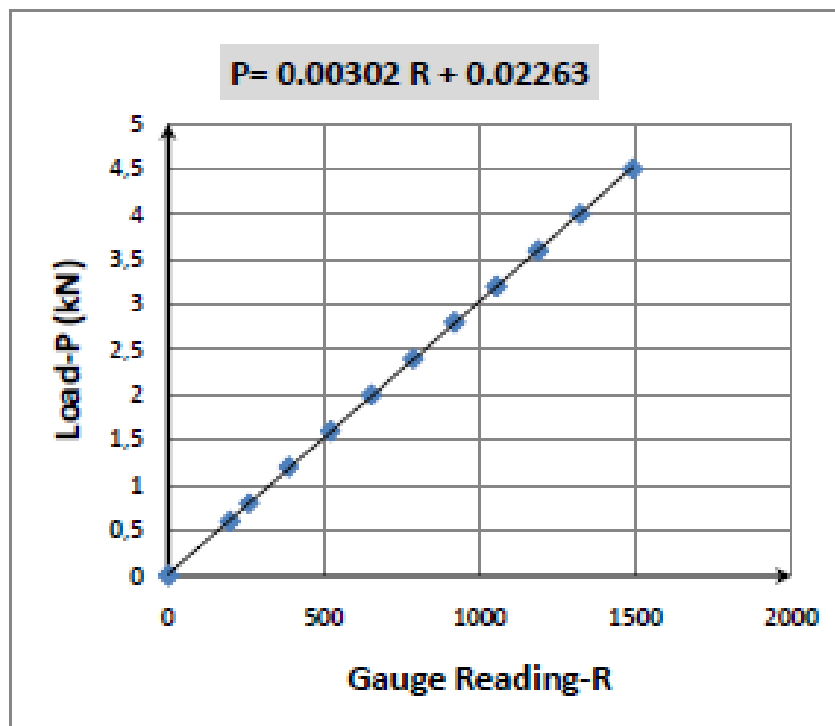
## Tableau : Résultats d'Analyse Granulométrique.

<b>Granulométrie par tamisage :</b> Date d'essai : ..... 16/02/2009 ..... Poids de l'échantillon : ..... 100 ..... (g) température de séchage : <input type="checkbox"/> 50°C <input type="checkbox"/> 105°C  <b>Sédimentométrie :</b> Date de Début d'essai : ..... 22/02/2009 ..... Fin d'essai : ..... 24/02/2009 ..... Poids utilisé : ..... 50 ..... (g) Poids spécifique de sol : $\gamma_s = 2.70 \text{ t/m}^3$ (conventionnelle) section de l'éprouvette : A = ..... cm <sup>2</sup> Densimètre : $h_0$ ..... cm $h_1$ ..... cm $h_2$ ..... cm $V_0$ ..... cm <sup>3</sup>  Balance N° : ..... Etalon N° : .....										Tamis (mm)	Poids des refus (g)	Poids des refus cumulés (g)	Refus cumulé (%)	Passant (%)
	80													
	50													
	41.5													
	20													
	10	0	0	0	100									
	5	46	46	46	50									
	2	45	45	45	46									
	1	32	13	24	76									
	0.4	4	1	2	98									
	0.2	4	2	4	96									
	0.1	2	2	4	96									
	0.08	1	2	4	96									
Date	Heure	t (mm)	LECTURE R	Temp. (°C)	C.M C.B C.T	Loisenc corrigée RL	% Passant	Profondeur Effective HR	$\sqrt{\frac{HR}{t}}$	F	D (mm)	% Passant		
22/02/2009	09:10	30(3)	28	17	0.7	27.3	86.814	12.03	5.006	0.0129	0.0696	10		
	09:11	1	27	17	0.7	28.3	83.894	12.09	3.369	0.0129	0.0426	49		
	09:12	1	26	17	0.7	25.3	80.494	12.02	2.549	0.0129	0.0354	37		
	09:15	5	21	17	0.7	24.3	77.274	12.16	1.832	0.0129	0.0276	47		
	09:20	10	21	17	0.7	24.3	77.274	12.16	1.147	0.0129	0.0159	47		
	09:30	20	24	17	0.7	25.3	74.094	12.27	0.818	0.0129	0.0134	48		
	09:50	40	26	17	0.7	28.3	74.094	12.27	0.678	0.0129	0.0080	47		
	10:30	80	22	17	0.7	21.3	67.794	12.03	0.415	0.0129	0.0058	29		
	12:10	240	21	17	0.7	20.3	64.594	12	0.242	0.0129	0.0034	27		
23/02/2009	09:10	1440	21	17	0.7	20.3	64.594	12	0.099	0.0129	0.0014	27		
24/02/2009	09:10	1880	21	17	0.7	20.3	64.594	12	0.070	0.0129	0.0010	27		
25/02/2009	09:10	4320	20	17	0.7	19.3	61.374	12.27	0.057	0.0129	0.0008	26		
26/02/2009	09:10	8940	20	17	0.7	19.3	61.374	12.27	0.041	0.0129	0.0006	26		
01/03/2009	09:10	10080	20	17	0.7	19.3	61.374	12.27	0.038	0.0129	0.0006	26		
02/03/2009	09:10	11520	20	17	0.7	19.3	61.374	12.27	0.035	0.0129	0.0006	26		
03/03/2009	09:10	12960	19	17	0.7	18.3	58.194	12.42	0.033	0.0129	0.0006	26		
04/03/2009	09:10	14400	19	17	0.7	18.3	58.194	12.42	0.032	0.0129	0.0004	26		
07/03/2009	09:10	18720	19	17	0.7	18.3	58.194	12.42	0.028	0.0129	0.0004	26		
08/03/2009	09:10	20160	19	17	0.7	18.3	58.194	12.42	0.027	0.0129	0.0004	26		
10/03/2009	09:10	25040	19	17	0.7	18.3	58.194	12.42	0.025	0.0129	0.0003	26		
11/03/2009	09:10	24480	19	17	0.7	18.3	58.194	12.42	0.024	0.0129	0.0003	26		
14/03/2009	09:10	28800	19	17	0.7	18.3	58.194	12.42	0.022	0.0129	0.0003	26		
15/03/2009	09:10	30240	19	17	0.7	18.3	58.194	12.42	0.022	0.0129	0.0003	26		
16/03/2009	09:10	31680	19	17	0.7	18.3	58.194	12.42	0.021	0.0129	0.0003	26		
17/03/2009	09:10	33120	19	17	0.7	18.3	58.194	12.42	0.021	0.0129	0.0003	26		
18/03/2009	09:10	34560	19	17	0.7	18.3	58.194	12.42	0.020	0.0129	0.0003	26		
21/03/2009	09:10	38880	18	17	0.7	17.3	55.014	12.63	0.019	0.0129	0.0003	25		
22/03/2009	09:10	40320	18	17	0.7	17.3	55.014	12.63	0.019	0.0129	0.0003	25		
23/03/2009	09:10	41760	18	17	0.7	17.3	55.014	12.63	0.019	0.0129	0.0003	25		
24/03/2009	09:10	43200	18	17	0.7	17.3	55.014	12.63	0.018	0.0129	0.0003	25		
25/03/2009	09:10	44640	18	17	0.7	17.3	55.014	12.63	0.018	0.0129	0.0003	25		
26/03/2009	09:10	46080	18	17	0.7	17.3	55.014	12.63	0.0178	0.0129	0.0003	25		

**Courbes d'étalonnages des anneaux de mesure.**



**Figure A1 : Courbe d'étalonnage anneau de mesure N° 1155-13-11668.  
Capacité 2 kN.**



**Figure A1 : Courbe d'étalonnage anneau de mesure N° 1155-14-13641.  
Capacité 4.5 kN.**