



N° d'ordre :

UNIVERSITÉ * MOHAMED BOUDIAF * DE M'SILA
FACULTÉ DES SCIENCES ET DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de :

Magister

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

Par

Redha BABOURI

Thème

**STABILISATION DES SOLS ARGILEUX
PAR LA CHAUX
(CAS DU KAOLIN DU GISEMENT DE
DJEBEL DEBAGH-GUELMA-)**

Soutenu publiquement le 24 / 02 / 2008 devant le jury composé de :

Dr KHEMISSA M.,	M.C.,	Université de M'sila,	Président
Dr BENMALEK M.L.,	M.C.,	Université de Guelma,	Directeur de thèse
Dr NOUAOURIA M.S.,	M. C.,	Université de Guelma,	Examineur
Dr NACERI A.,	M.C.,	Université de M'sila,	Examineur
Dr RAHMOUNI Z.,	M.A.C.C.,	Université de M'sila,	Examineur

RESUMÉ L'Algérie, devant un développement économique important et rapide, vise à améliorer son réseau routier et d'autoroutier. Cependant, les matériaux pour couches de base et fondations habituellement utilisés se font de plus en plus rare et notamment dans la région de orientale du pays. Il devient donc impératif, pour ne pas bloquer cet élan formidable dans le développement, de faire appel à des substituts locaux sans pour autant greffer davantage le coût de la construction. La région de Guelma dispose de gisements importants d'argile possédant une grande résistance mais aussi un inconvénient de taille résidant dans sa sensibilité à l'eau. Si ce problème de sensibilité venait d'être techniquement résolu, les gisements d'argile locaux suffiraient largement pour construire routes, autoroutes et pistes agricoles à moyen et longs termes. Le travail réalisé et présenté dans ce mémoire est une contribution modeste à la résolution de ce problème. Il a consisté à stabiliser un type d'argile très présent dans la région de Guelma : le Kaolin, par une chaux éteinte provenant directement de l'usine de Saida. Il a été notamment prouvé que l'addition de la chaux dans le domaine humide de la courbe de compactage ($W_{OPM} \geq 31\%$) apporte une contribution très sensible dans la portance. Par ailleurs l'influence de l'addition de la chaux sur le gonflement linéaire du mélange Kaolin - $Ca(OH)_2$ est fort appréciable au delà de 7% et ce, pour toutes les valeurs de la teneur en eau.

Mots-clés : argile - essai de consistance- densité sèche –portance - l'indice CBR immédiat - l'indice CBR imbibe - gonflement linéaire.

SUMMARY Facing the fast and important economic development, Algeria aims to improve its network roads and express roads. However necessary materials to make basic layers and foundations usually used become scarce, in particularly at eastern region of the country. It becomes imperative to use substituting local materials in order to not jam this fantastic development run up. In GUELMA area, important clay deposits are available. This clay has an interesting resistance but also an appreciable sensitivity to water. If this problem of sensitivity is technically resolved, the clay local deposits will be widely sufficient to build same roads, express roads and farming tracks. The work realized and presented in this report is a modest contribution to stabilize a type of clay very present in GUELMA area called "kaolin" with a slaked lime manufactured in SAIDA factory. It has been not ably proved that addition of lime in the domain of compacting curve ($W_{OPM} \geq 31\%$) brings on appreciate contribution to the resistance. Moreover the influence of lime addition on the linear swelling of the kaolin - $Ca(OH)_2$ mix is very appreciable beyond 7% for every water contents.

Keywords : clay - test the consistency - dry density - portance - indice CBR immediate - indice CBR imbibe - swelling linear.

ملخص أمام التطور الاقتصادي المعترف و السريع تهدف أو تسعى الجزائر إلى تحسين شبكة طرقها و طرقاتها السيارة. في حين أن مواد الطبقات القاعدية و الأسس المستعملة في العادة أصبحت تتميز بالندرة أكثر فأكثر خاصة في المنطقة الشرقية للبلاد. إذن و لتفادي حالة الانسداد في هذا الجانب المنظم من التنمية أصبح من الضروري البحث على بدائل محلية أخرى دون المساس بتكاليف الانجاز والبناء. في هذا الإطار تتوفر منطقة قالمة على منجم جدا من الطين(كولين) الذي يتميز بمقاومته الكبيرة ولكن في نفس الوقت يتميز بحساسيته للماء. فإن تم حل هذا المشكل من الناحية التقنية أصبح في الإمكان استعمال هذه المادة الطينية المحلية لانجاز الطرق, الطرق السيارة و المسالك الفلاحية على المدى المتوسط و الطويل. إن العمل المنجز و المقدم في هذه المذكرة يعتبر مساهمة جذ متواضعة لحل مثل هذا المشكل. الذي يتمثل في استقرار نوع معين من الطين(كولين) المتواجدة بكثرة في منطقة قالمة باستخدام نوع من الجير المطفأ المتوفر بمصنع سعيدة. وقد تم تبيان على الخصوص أن إضافة الجير في المجال الرطب لمنحني الرص ($W_{OPM} \geq 31\%$) يجلب مساهمة جد حساسة في التحمل, ومن جانب آخر اتضح أن تأثير إضافة الجير على الانتفاخ الخطي لخليط الكولين - $Ca(OH)_2$ ذو قيمة عالية انطلاق من 7% فما أكثر, وهذا لأجل كل قيم الماء المضافة.

كلمات مفاتيح : الطين – تجربة القوامة – تجربة الرص – تجربة الحمولة – معامل "CBR" الفوري – معامل "CBR" المنغمس في الماء - الانتفاخ الخطي

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

TABLE DES MATIERES

Liste des notations-----	I
Liste des tableaux-----	IV
Liste des figures-----	VI
Liste des photos-----	VIII

-----PREMIÈRE PARTIE ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE-----

INTRODUCTION GENERALE -----	1
CHAPITRE I: RAPPEL SUR LES SOLS ARGILEUX-----	4
I. 1 RAPPEL SUR LES SOLS ARGILEUX-----	4
I. 2. MINERAUX ARGILEUX-----	4
I. 2.1. Différents types d'argiles-----	6
I. 2.2. Autres minéraux argileux-----	9
CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES CHAUX UTILISES DANS LE DOMAINE ROUTIER-----	11
II. 1. INTRODUCTION-----	11
II. 2. LA CHAUX-----	11
II. 2.1. Différents types de chaux-----	11
II. 2.2. Caractéristiques chimiques et physiques-----	12
II. 2.2.1. Composition chimique-----	12
1. Teneur en CaO-----	12
2. Teneur en MgO-----	13
3. Réactivité-----	13
II. 2.2.2. Caractéristiques physiques-----	14
a. Finesse-----	14
b. Surface spécifique-----	14
c. Masse volumique et densité-----	15
d. Solubilité-----	15
II. 2.3. Les spécifications des chaux à usage routier -----	15

CHAPITRE III : LA STABILISATION DE SOL ET LES STABILISANTS-----	16
III. 1. DEFINITION-----	16
III. 2. BUT DE LA STABILISATION-----	16
III. 3. LES TECHNIQUES DE STABILISATION-----	16
III. 4. STABILISATION AVEC DES ADDITIFS-----	18
III. 4.1. Les hydrophobants-----	18
III. 4.2. Les liants-----	18
III. 4.2.1. Liants hydrauliques-----	19
III. 4.2. 2. Liants organiques-----	20
III. 5. STABILISATION PAR AJOUT DE CHAUX-----	20
III. 5.1. Mécanisme de la stabilisation-----	20
III. 5.1.1. Modification de la teneur en eau-----	20
III. 5.1.2. Modification des propriétés géotechniques du sol-----	21
III. 5.1.2.1. Modifications immédiates-----	21
a. Augmentation significative de la limite de plasticité-----	21
b. Modification des caractéristiques de compactage du sol-----	22
c. Augmentation de la portance exprimée par l'indice CBR-----	22
d. Diminution de la sensibilité à l'eau-----	22
III. 5.1.2.2. Modification à long terme-----	23
III. 5.2. Echange cationique-----	25
III. 5.3. Floculation et agglomération des particules d'argiles-----	26
III. 5.4. Carbonatation de La Chaux-----	26
III. 5.5. Réaction Pouzzolanique-----	26
III. 6. UTILISATION DE CES REACTIONS-----	26
III. 6.1. Dans les terrassements-----	26
III. 6.1. a. La constitution de remblais-----	27
III. 6. 1. b. La constitution des couches de forme-----	27
III. 6. 2. Dans les assises de chaussées-----	27
III. 6. 2. 1. Couche de forme, couche de base-----	27
III. 6.3. Autres applications-----	28
III. 7. L'EXECUTION DU TRAITEMENT-----	29

-----DEUXIÈME PARTIE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE-----

CHAPITRE IV : METHODOLOGIE GENERALE DES ETUDES DE TRAITEMENT DES SOLS-----	31
INTRODUCTION-----	31
IV. 1. LES MATERIAUX UTILISES-----	31
IV. 1.1. Le sol-----	31
IV. 1.1.1. Caractérisations des sols étudiés-----	31
a. La granulométrie-----	32
a.1. Essai granulométrique-----	32
a.2. Essai Sédimentométrie-----	33
b. L'Argilosité-----	35
c. Limite d'Atterberg-----	35
c.1. Détermination de la limite de liquidité-----	35
c.2. Détermination de limite de plasticité-----	37
c.3. Détermination de l'indice de plasticité-----	39
d. Essai d'équivalent de sable-----	39
e. La composition chimique-----	39
f. L'état hydrique-----	40
IV. 1.1.2. Classification des matériaux et détermination de l'aptitude au Traitement-----	40
IV. 1.1.2.1. Classification géotechnique-----	40
IV. 1.1.2.1.1. Classification selon le système USCS-----	40
IV. 1.1.2.1.2. Classification minéralogique-----	43
IV.1.2. La chaux-----	45
IV.1.2.1. Caractérisation de la chaux utilisée-----	45
a. Essai Physique-----	45
b. Essais Chimiques-----	45
IV.2. ETUDE DE FORMULATION-----	46
IV.2.1. Essais mécaniques-----	48

IV. 2.1.1. Préparation des échantillons-----	48
IV. 2.1.1. a. Essai de compactage-----	50
IV. 2.1.1. b. Essai de portance C.B.R-----	52
IV. 2. 1.1. b.1. Exécution de l'essai-----	52
IV. 2. 1.1. b.2. Indice C.B.R immédiat-----	53
IV. 2. 1.1. b.3. Essai d'imbibition et mesure du gonflement-----	55
IV. 2. 1.1. b.4. Indice C.B.R imbibé-----	57
IV. 2.2. Essai effectuer sur le mélange (chaux - kaolin) -----	57
 CHAPITRE V : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS-----	 59
V. 1. MELANGE KAOLIN - CHAUX ETEINTE (CA (OH) ₂)-----	59
V. 1.1. Essais de limite d'Atterberg (de consistance) à différent temps-----	59
V. 2. ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS-----	62
V. 3. ESSAI DE COMPACTAGE-----	63
V. 3.1. Analyse et discussion des résultats-----	63
V. 3.1.1. Effet de la chaux sur les courbes de compactage du kaolin -----	63
V. 4. ESSAI CBR IMMEDIAT-----	68
V. 4.1. Analyse et discussion des résultats-----	76
V. 4.1.1. Influence de la teneur en eau de compactage sur le CBR Immédiat (Essai Témoin)-----	76
V. 4.1.2. Influence du dosage en chaux sur le CBR immédiat-----	76
V. 5. ESSAIS CBR IMBIBE-----	79
V. 5.1. Analyse et discussion des résultats-----	87
V. 5.1.1. Influence de la teneur en eau sur le CBR Imbibé-----	87
V. 5.1.2. Influence d'addition de chaux sur le CBR Imbibé (après émerision)-	87
V. 6. ESSAI DE GONFLEMENT-----	89
V. 6.1. Analyse et discussion des résultats-----	90
V. 6.1.1. Influence de la teneur en eau sur le gonflement-----	90
V. 6.1.2. Effet de chaux sur le gonflement du kaolin -----	90
 CONCLUSIONS GENERALES-----	 92
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES-----	94

LISTE DES NOTATIONS

USCS : System de Classification Unifiée des Sols

LTPE : Laboratoire des Travaux Publics de l'Est.

CBR : Californien Bearing Ratio.

Kaolin DD₃ : Kaolin Djebel Debagh troisième choix.

γ_w : Poids volumique de l'eau.

γ_s : Poids volumique des particules solides ($26.5 \cdot 10^3 \text{ N/m}^3$).

M : Masse de sol sec mis en suspension et prélevé sur le tamis à $80\mu\text{m}$ (Essai de Sédimentométrie).

P : Pourcentage des particules de diamètre inférieur ou égal à D (P/R à la masse de la prise d'essai à l'état sec).

P* : Pourcentage des éléments fins analysés P/R à l'échantillon total

Hr : Profondeur effective du centre de poussée.

R : Lecture du densimètre.

Rc : Lecture corrigée.

D : Diamanter équivalent.

T : Température °C.

W : Teneur en eau (exprimé en %).

Mt+c : Poids de l'échantillon humide y compris le bac.

Ms+c : Poids de l'échantillon sec y compris le bac.

Mc : Poids du bac.

Mw : Poids de l'eau.

Ms : Poids de l'échantillon sec.

N : Nombre de coups.

WL : Limite de liquidité.

WP : La limite de plasticité.

WP moy : La limite de plasticité moyenne.

IP : L'indice de plasticité.

t : Temps.

W : Teneur en eau de moulage de référence (essai de compactage).
 M_t : Poids total humide y compris le moule CBR.
 M_m : Poids de moule CBR vide.
 M_h : Poids total humide.
 D : Diamètre du moule CBR.
 V : Volume du moule CBR.
 ρ_h : Masse volumique humide.
 M_t : Poids total de l'échantillon humide y compris le bac (après compactage).
 M_s : Poids de l'échantillon sec y compris le bac (après compactage).
 M_b : Poids du bac.
 M_w : Poids de l'eau (après compactage).
 W^1 (%) : teneur en eau (après compactage).
 W^1 moy (%) : teneur en eau moyenne (après compactage).
 W_{OPT} : teneur en eau optimum
 ρ_d : (masse volumique sèche).
 ρ_{d*} : masse volumique sèche (d'écrasement).
 W_{OPM} : teneur en eau de l'Optimum Proctor Modifié.
 $W_{OPM \pm 2}$, W_{OPM} , $W_{OPM \pm 4}$: Les teneurs en eau de moulage de référence.
 W_1 , W_2 , W_3 , W_4 , W_5 : Les teneurs en eau de moulage de référence.
 W^* : teneur en eau du mélange kaolin DD₃ - chaux. (après écrasement).
 W^{**} : Teneur en eau du mélange kaolin DD₃ – chaux. (après immersion).
 W_n : Teneur en eau naturelle.
 Effor / Péné = Effort / Pénétration
 F_1 = Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement
 F_2 = Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement
 $CBR_{imm.}$ = CBR immédiat.
 $I_{CBR_{imm.}}$ = l'indice CBR immédiat.
 CBR_{imb} = CBR imbibé.
 $I_{CBR_{imb}}$ = l'indice CBR imbibé.

g = représente le gonflement linéaire mesuré sur les éprouvettes durant l'imbibition

Δh : gonflement mesuré.

h : Hauteur initiale

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 : Les spécifications des chaux à usage routier
- Tableau 2 : Avantage et Inconvénient des techniques de stabilisation couramment utilisées.
- Tableau 3 : Essai de granulométrie (Tamisage sous l'eau).
- Tableau 4 : Essai de Sédimentométrie.
- Tableau 5 : limite de liquidité WL (Essai. Témoin).
- Tableau 6 : Exemple de calcul de la limite de plasticité (Essai. Témoin).
- Tableau 7 : Récapitulation des résultats d'essais de limites d'Atterberg du sol étudié.
- Tableau 8 : La Composition Chimique du sol étudié.
- Tableau 9 : Classification unifiée des sols (USCS).
- Tableau 10 : Composition chimique de la chaux.
- Tableau 11 : Limite de liquidité, limite de plasticité, indice de plasticité au temps ($t = 24 \text{ h}$, $t = 48\text{h}$ et $t = 72\text{h}$).
- Tableau 12 : Exemple de calcul de la masse volumique sèche (Essai Témoin).
- Tableau 13 : Récapitulation des résultats de l'essai de compactage pour différents pourcentages de chaux.
- Tableau 14 : Essai de portance CBR Immédiat pour différents pourcentages de chaux ($W_{OPM-4}=27\%$).
- Tableau 15 : Essai de portance CBR Immédiat pour différents pourcentages de chaux ($W_{OPM-2}=29\%$).
- Tableau 16 : Essai de portance CBR Immédiat pour différent pourcentage de chaux ($W_{OPM}= 31\%$).
- Tableau 17 : Essai de portance CBR Immédiat pour différent pourcentage de chaux ($W_{OPM+2}=33\%$).
- Tableau 18 : Essai de portance CBR Immédiat pour différent pourcentage de chaux ($W_{OPM+4}=35\%$).
- Tableau 19 : Exemple de calcul (Indice CBR Immédiat, Essai Témoin).
- Tableau 20 : Récapitulation des résultats de l'essai de portance CBR Immédiat avec : $W_{OPM}=31\%$ et $\rho_d = 1.384 \text{ t} / \text{m}^3$.
- Tableau 21 : Récapitulation des résultats de l'Indice CBR Immédiat pour différents

pourcentages de chaux.

Tableau 22 : Essai de portance CBR Imbibé pour différents pourcentages de chaux ($W_{OPM-4}=27\%$).

Tableau 23 : Essai de portance CBR Imbibé pour différents pourcentages de chaux ($W_{OPM-2}=29\%$).

Tableau 24 : Essai de portance CBR Imbibé pour différents pourcentages de chaux ($W_{OPM}=31\%$).

Tableau 25 : Essai de portance CBR Imbibé pour différents pourcentages de chaux ($W_{OPM+2}=33\%$).

Tableau 26 : Essai de portance CBR Imbibé pour différents pourcentages de chaux ($W_{OPM+4}=35\%$).

Tableau 27 : Exemple de calcul (Indice CBR Imbibé, Essai Témoin)

Tableau 28 : Récapitulation des résultants de l'essai de portance (CBR imbibé) avec : ($W_{OPM}=31\%$ et $\rho_d=1.384\text{ t/m}^3$).

Tableau 29 : Récapitulation des résultats de l'Indice CBR Imbibé pour différents pourcentages de chaux.

Tableau 30 : Récapitulation de résultat de l'Essai de Gonflement pour différentes teneurs en eau et différents pourcentages de chaux.

LISTE DES FIGURES

- Figure 1a : Tétraèdre de silice d'après *Grim, (1959)*.
- Figure 1b : Feuillet de silice d'après *Lambe, (1953)*.
- Figure 2a : Octaèdre d'alumine ou de Magnésium d'après *Grim, (1959)*.
- Figure 2b : Feuillet en octaèdre d'Aluminium ou de Magnésium d'après *lambe, (1953)*.
- Figure 3 : Structure de la kaolinite d'après *Lambe, (1953)*.
- Figure 4 : Structure de la montmorillonite d'après *Lambe, (1953)*.
- Figure 5 : Structure d'illite d'après *Lambe, (1953)*.
- Figure 6 : Classification des liants.
- Figure 7 : Schéma montrant l'action de la chaux sur l'argile.
- Figure 8 : Courbe Granulométrique.
- Figure 9 : Courbe Exprimant la teneur en eau en fonction du nombre de coups (Essai Témoin).
- Figure 10 : Abaque de plasticité de Casagrande pour différents types de sols d'après *Casagrande, (1948), et Howard, (1977)*.
- Figure 11 : Classification du sol (Abaque de plasticité de Casagrande).
- Figure 12 : Position des minéraux argileux les plus communs sur l'abaque de plasticité de Casagrande (Inspiré de *Casagrande, (1948), et de Mitchell, (1976)*).
- Figure 13 : Effet du traitement à la chaux sur la consistance du kaolin
Pour $t = 24$ h.
- Figure 14 : Effet du traitement à la chaux sur la consistance du kaolin
Pour $t = 48$ h.
- Figure 15 : Effet de traitement à la chaux sur la consistance du kaolin
Pour $t = 72$ h.
- Figure 16 : Influence de l'addition de chaux sur les courbes de compactage du kaolin .
- Figure 17 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Immédiat) du kaolin ($W_{OPM-4}=27\%$).
- Figure 18 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Immédiat)

du kaolin ($W_{OPM-2}=29\%$).

Figure 19 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Immédiat) du kaolin ($W_{OPM}=31\%$).

Figure 20 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Immédiat) du kaolin ($W_{OPM+2}=33\%$).

Figure 21 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Immédiat) du kaolin ($W_{OPM+4}=35\%$).

Figure 22 : Influence de l'addition de chaux sur les courbes de l'Indice CBR Immédiat avec différentes teneurs en eau.

Figure 23 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Imbibé) du kaolin ($W_{OPM-4}=27\%$)

Figure 24 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Imbibé) du kaolin ($W_{OPM-2}=29\%$)

Figure 25 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Imbibé) du kaolin ($W_{OPM}=31\%$)

Figure 26 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Imbibé) du kaolin ($W_{OPM+2}=33\%$)

Figure 27 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Imbibé) du kaolin ($W_{OPM+4}=35\%$)

Figure 28 : Influence de l'addition de chaux sur les courbes de l'Indice CBR Imbibé avec différentes teneurs en eau .

Figure 29 : Influence de l'addition de chaux sur le gonflement pour différentes teneurs en eau.

LISTE DES PHOTOS

PHOTO 1 : Détermination de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande.

PHOTO 2 : Détermination de la limite de plasticité (bâtonnet de sol).

PHOTO 3 : Introduction de l'eau au sein du matériau lors de malaxage.

PHOTO 4 : Conservation du matériau dans un étui plastique.

PHOTO 5 : Compactage du matériau dans le moule CBR.

PHOTO 6 : Surplus du matériau à araser.

PHOTO 7 : Dispositif utilisé pour la confection des éprouvettes (Presse hydraulique).

PHOTO 8: Mesure des échantillons, après rasage.

PHOTO 9 : Immersion dans l'eau pendant 4 jours.

INTRODUCTION GENERALE

Suite à un développement économique important, l'Algérie vise à améliorer son réseau routier par la construction de milliers de kilomètres de routes, d'autoroutes et de pistes agricoles, ainsi que d'un certain nombre d'autoroutes. La réalisation de ces ouvrages nécessite d'importantes quantités de matériaux répondant à des caractéristiques techniques appropriées. Cependant, les matériaux routiers habituellement utilisés se font de plus en plus rares, surtout dans la région de l'est Algérien, ce qui nécessite la recherche d'un substitut local, de qualité supérieure, ou bien la recherche de solutions permettant de minimiser les emprunts aléatoires, et la réduction des coûts des projets.

L'argile de Guelma peut être utilisé comme matériau de construction des routes (en couche de forme ou de fondation), vu sa disponibilité et ses propriétés de résistance, mais à condition de palier à son inconvénient majeur qui est sa sensibilité à l'eau. En effet, lors de telles applications, il a été observé des changements de volume pouvant conduire à la dégradation de la chaussée. Une manière de lutter contre ce type de dégradation pourrait, à priori, être une stabilisation du matériau par traitement. L'utilisation de la chaux peut améliorer ou modifier partiellement tous les sols à grains fins dans une certaine mesure, mais l'amélioration la plus spectaculaire se produit dans les sols argileux de plasticité modérée à élevée [33].

Une recherche a été donc lancée pour examiner l'effet d'ajouter la chaux hydratée à une gamme d'argile pour s'assurer des mécanismes impliqués dans le changement des propriétés du sol, et pour établir le point auquel le processus serait utile dans la construction des routes en Algérie.

D'après Mateos, (1961) [31]; Mateos et Davidson, (1962) [32]: Les sols limoneux et argileux répondent bien à la stabilisation avec la chaux et les cendres volantes pourvu qu'il y ait des cendres volantes bon marché et de bonne qualité. Pourtant, les sols limoneux se stabilisent en général à meilleur marché avec du ciment et les sols argileux avec seulement de la chaux.

Le traitement à la chaux peut dans ce cas constituer un traitement en soi.

Lors du traitement des sols à la chaux, une question qui se pose d'elle-même :

Quand traiter un sol à la chaux ? A priori, la chaux n'est utile que pour les sols qui contiennent une certaine fraction d'argile.

Une étude de reconnaissance géotechnique préliminaire est donc nécessaire pour déterminer les caractéristiques du sol (limites d'Atterberg). La classe du sol peut être déterminée et on peut donc évaluer dans quelle mesure le sol convient pour traitement à la chaux. En cas de résultat positif, il faut déterminer le pourcentage de chaux à utiliser, car chaque sol réagit différemment au traitement. Il convient de noter dans cette introduction que beaucoup de réalisations remarquables en Algérie et dans le monde ont été effectuées utilisant la stabilisation à la chaux. Nous donnerons ci-après quelques exemples [19]:

a. En Algérie:

Stabilisation des sols de DAR-EL-BEIDA à la chaux (Aéroport d'Alger HOUARI BOUMEDIENE 1984).

b. En France:

Les premiers traitements à la chaux des limons du Nord de la France en 1962. Après 1970 d'autres techniques ont été utilisées et se sont développées comme le traitement mixte (chaux ciment), (limons de Normandie).

*Les argiles vertes de Romain ville (région parisienne) ont été traitées à la chaux (ou à la chaux et au ciment) pour réaliser des pistes de chantier ou pour constituer des couches de forme.

*(Autoroute A61, section Narbonne Toulouse) ont été traitées à la chaux (lait de chaux).

c. Aux Etat-Unis:

Ce traitement est recherché pour diminuer la plasticité, augmenter les résistances mécaniques, l'imperméabilité et réduire les retraits et les gonflements des argiles gonflantes. On utilise de la chaux ou du mélange chaux ciment. Plus de 100 millions de m² de routes comportent des couches de fondation en sol chaux ciment. La piste de l'aéroport de DALLAS-FORT-WORTH a été traitée à la chaux (lait de chaux).

Dans ce travail, nous nous sommes fixés comme objectif de stabiliser un sol argileux nommé Kaolin dont le gisement(très important) est situé à Djebel Debagh, a 15 km au nord ouest de la ville de Guelma. Les paramètres d'identification adoptés sont la granularité, l'argilosité, l'équivalent de sable, la composition chimique et l'état hydrique. Ceux-ci étant considérés comme représentatifs vis-à-vis du traitement. La chaux utilisée pour le traitement est une chaux hydratée Ca(OH)₂ de fabrication récente, ramenée directement de l'usine de fabrication sise à Saida, elle était théoriquement pourvue de toutes ses caractéristiques au moment des essais.

La première partie de ce travail, nous l'avons consacré à un rappel sur les sols argileux et sur les chaux utilisées dans le domaine routier et notamment leurs caractéristiques physiques et chimiques ainsi que leurs spécifications. Dans la seconde partie, essentiellement expérimentale, et après une étude de formulation qui nous a permis d'opter pour une plage de teneurs en eau variant entre 27% et 35% (par pas de 2%), nous avons réalisé des essais sur le mélange Kaolin – chaux éteinte qui ont porté sur :

- ✦ Limites d'Atterberg
- ✦ Essais de compactage
- ✦ Essais CBR immédiats
- ✦ Essais CBR imbibés
- ✦ Mesures de gonflement

Les résultats expérimentaux obtenus et leurs discussions sont présentés dans ce mémoire.

CHAPITRE I : RAPPEL SUR LES SOLS ARGILEUX

1.1 RAPPEL SUR LES SOLS ARGILEUX :

D'après sa définition classique l'argile sèche est un matériau cohérent qui happe à la langue; humide, elle devient plastique. C'est grâce à la forme lamellaire très dissymétrique de ses cristallites que l'argile fixe à sa surface des cations et de l'eau devenant ainsi plastique. Les particules reliées par un film liquide qui sert de lubrifiant, glissent les unes sur les autres sans perdre leur cohésion. Si l'eau s'évapore la plasticité disparaît et la cohésion croît. Ce comportement, qui est à la base de l'industrie céramique, est un des soucis des spécialistes de la mécanique des sols. Ceux-ci craignent, en effet, que les soubassements de leurs constructions s'effondrent [1].

En génie civil, argile veut dire sol argileux, c'est-à-dire un sol qui peut contenir certains minéraux argileux ou tout autre minéral. Les argiles sont des sols à grains fins, mais ça ne veut pas dire que les sols à grains fins sont forcément des argiles cohérents. Les silts sont des sols à grains fins mais ils ont le comportement des sols granulaires ils sont pulvérulents et non plastiques .

1.2. MINÉRAUX ARGILEUX :

Les minéraux argileux sont des substances cristallines qui tirent essentiellement leur origine de l'altération chimique de certains minéraux composant la roche. Sur le plan chimique, ce sont des silicates d'aluminium hydratés dont l'assemblage est constitué par des ions oxygène et des hydroxyles. En réalité il n'existe que deux types de feuillets de cristaux de base [3],[7] :

- les feuillets en tétraèdre ou de silice
- les feuillets en octaèdre ou d'alumine.

La neutralisation et le maintien de la structure sont assurés par des cations de faible dimension qui peuvent se loger dans les cavités situées entre les éléments oxygènes. Les ions oxygène et les hydroxyles OH^- sont disposés de façon jointive dans un même plan. Ils constituent un plan compact. Un autre plan composé par des ions O^{2-} comporte des lacunes limitées par six oxygènes disposés en hexagones que l'on nomme cavités hexagonales. La superposition de ces deux plans engendre des tétraèdres; ceux-ci sont formés par trois oxygènes du plan basal et par un oxygène du plan compact (dit apical). Entre ces quatre oxygène, il existe un vide occupé par un petit cation: Le plus souvent du silicium Si^{+4} [2].

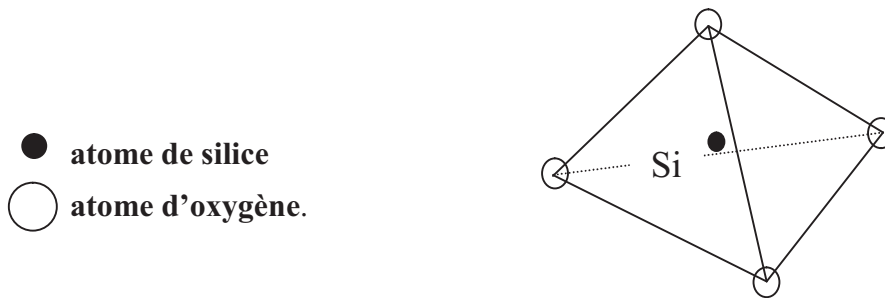


Figure 1.a : Tétraèdre de silice d'après *Grim, (1959)*. [4].

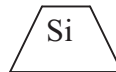


Figure 1.b : Feuillet de silice d'après *Lambe, (1953)* [5].

On remarque également que trois oxygènes appartenant à un plan compact correspondent à trois oxygènes du plan compact inférieur mais ils forment deux triangles tête-bêche limitant une cavité octaédrique au centre de laquelle se place un cation: Le plus souvent de l'aluminium AL^{+3} .

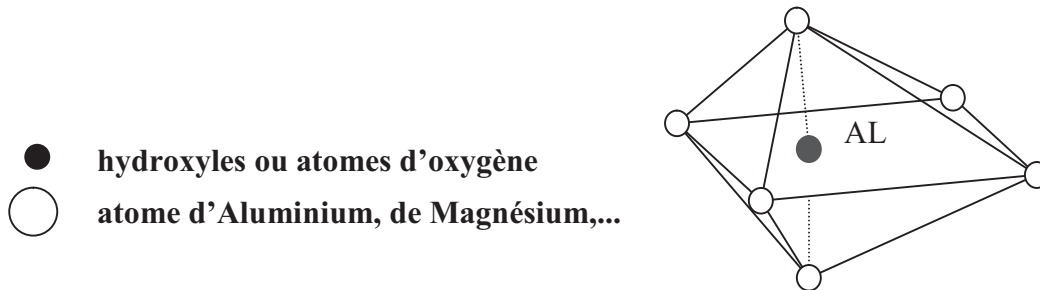


Figure 2.a : Octaèdre d'alumine ou de Magnésium d'après *Grim, (1959)* [4].



Figure 2.b : Feuillet en octaèdre d'Aluminium ou de Magnésium d'après *lambes,(1953)* [5].

I.2.1. Les différents types d'argiles :

Les types d'argiles les plus fréquents sont:

❖ **Kaolinite** : (Figure 3), (Minéral de type 1:1 ou Te – Oc).

La kaolinite est constituée d'une succession alternée de feuillets en tétraèdre (**silice**) et de feuillets en octaèdre (**aluminium ou gibbsite**). Les deux feuillets sont liés de telle manière que les sommets du feuillet de silice et ceux d'une des couches du feuillet en octaèdre ne forment qu'une seule et même couche. Les couches de bases successives sont maintenues ensemble par les liens d'hydrogène entre les hydroxyles du feuillet en octaèdre et les atomes d'oxygène du feuillet en tétraèdre. Les liens d'hydrogène étant très forts, ils

empêchent l'hydratation, ce qui permet un empilement relativement important de couches et la formation d'un cristal d'assez grandes dimensions. Les limites des feuillets empilés correspondent à des plans distants d'environ 7.1 Angströms.

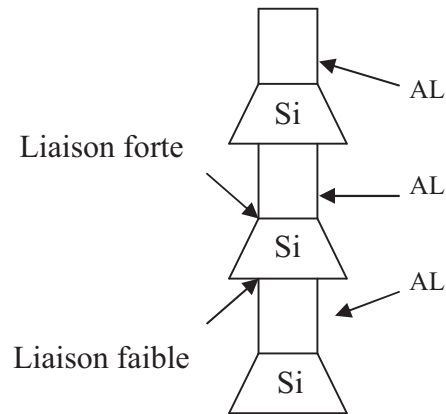


Figure 3: Structure de la kaolinite d'après *Lambe, (1953) [5]*.

❖ **Montmorillonite** : (Figure 4), (Minéral de type 2:1 Te – Oc – Te)

La montmorillonite, parfois appelée Smectite, est un minéral argileux important composé de deux feuillets de Silice et d'un feuillet d'Alumine (**Gibbsite**). Les feuillets en octaèdres se trouvent entre deux feuillets de Silice et les sommets des tétraèdres se confondent avec les hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former qu'une seule couche. Les forces de Van der Waal qui soudent les sommets des feuillets de Silice sont faibles, cela se traduit par une déficience en charge négative nette dans le feuillet en octaèdre. Pour cette raison, les ions échangeables peuvent pénétrer dans la structure et séparer les couches. Les cristaux de montmorillonite présentent des petites tailles ce qui donne une forte affinité avec l'eau.

Les sols qui contiennent de la montmorillonite peuvent être gonflants lorsque leur teneur en eau augmente, les pressions de gonflements qui en résultent peuvent facilement causer des dommages aux structures légères et pavages.

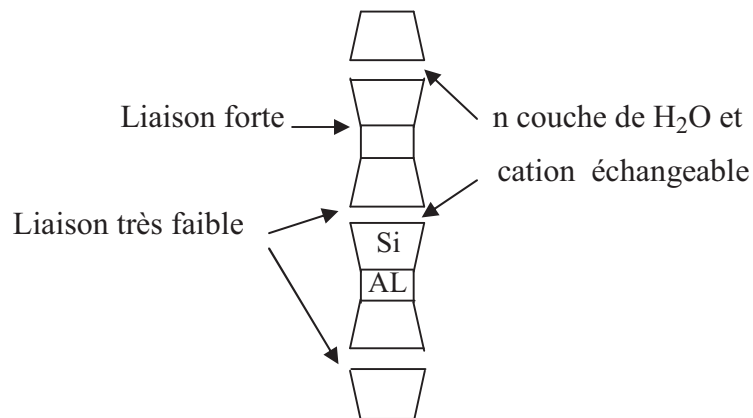


Figure 4: Structure de la montmorillonite d'après Lambe, (1953) [5].

❖ **Illite** : (Figure 5.), (Minéral type 2:1 semblable à la montmorillonite)

L'illite est une autre composante importante des sols argileux, elle a une structure analogue à la montmorillonite mais des ions de potassium intercalés entre les feuillets tétraédriques. Grâce à ces ions la liaison est relativement forte et les molécules d'eau ne peuvent pratiquement plus s'intercaler. L'atome d'Aluminium du feuillet octaédrique qui se trouve sous forme d'un AL^{+3} peut être remplacé par d'autres ions comme Mg^{+2} principalement dans la montmorillonite et dans l'illite. Il en résulte un déséquilibre électrique qui est composé par l'adsorption sur la surface de cations Ca^{+2} ; Li^{+2} ; K^{+1} ; Fe^{+2} . Aux extrémités de la particule d'argile, il y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations. Ces cations dits échangeables jouent un rôle important dans le comportement des argiles.

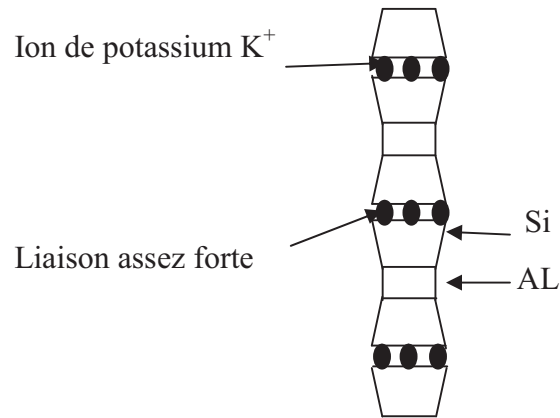


Figure 5: Structure d'illite d'après *Lambe, (1953)* [5].

I.2.2. Autres minéraux argileux :

Il existe des douzaines de minéraux argileux qui présentent pratiquement toutes les combinaisons possibles d'ions substituées d'eau dans l'espace entre les couches et les cations échangeables.

❖ Chlorite :

Est relativement fréquente dans les sols argileux; elle est constituée de la répétition des couches suivantes:

- Un feuillet de silice;
- Un feuillet d'alumine;
- Un autre feuillet de silice et finalement un feuillet de gibbsite (AL) ou de brucite (Mg).

❖ **Vermiculite:**

C'est un minéral 2:1 la couche octaédrique contient du (Fe) et du (Mg), elle est proche des illites et chlorite mais montre des propriétés gonflantes. La connaissance des propriétés de l'argile est fondamentale pour la stabilité des ouvrages. Celle-ci peut également servir de matériau pour l'édification de barrages. L'argile intervient dans la construction d'ouvrages d'importances très variables: Barrages, installations portuaires, ponts, tunnels, voies autoroutes, sans oublier les grands immeubles (tours). Tous ces travaux nécessitent une connaissance de la plasticité, de la capacité et de la résistance des matériaux (composés en partie ou en totalité par de l'argile crue) qui forme le sol et les fondations.

CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES CHAUX UTILISES DANS LE DOMAINE ROUTIER

II.1. INTRODUCTION :

Depuis fort longtemps, la chaux a été employée pour stabiliser les routes et chemins en milieu agricole et les voies forestières et autres chemins diversSon utilisation perdure encore aujourd'hui pour modifier les caractéristiques physiques du sol, elle sert à diminuer le pourcentage d'eau contenu dans un sol humide et à flocculer les argiles du sol provoquant ainsi une réaction physico-chimique qui permet le passage d'une structure plastique à une composition stable grumeleuse. Elle sert aussi à modifier les caractéristiques du sol, ainsi elle agit pour solubiliser la silice et l'alumine contenues dans l'argile et former un silicate et aluminat de calcium. Le liant ainsi composé agglomère les composants du sol et augmente la dureté

II.2. LA CHAUX :

II.2.1. Différents types de chaux :

La chaux est obtenue par calcination d'un calcaire (celui-ci représente 20% de la couche terrestre), selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs types de chaux [6] :

- * chaux aérienne provenant d'un calcaire pur.
- * chaux magnésienne provenant d'un mélange de calcaire et de carbonate de magnésium.
- * chaux hydraulique provenant d'un calcaire argileux.

Les chaux utilisées en technique routière sont essentiellement les chaux aériennes Elles se présentent sous deux formes:

❖ **Chaux vive :**

Constituée principalement d'oxyde de calcium CaO, généralement à plus de 90%. La calcination du calcaire (carbonate de calcium) entraîne la formation de chaux vive (oxyde de calcium) et de gaz carbonique (dioxyde carbonique).

Calcaire \longrightarrow .chaux vive + gaz carbonique

$\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.

Réaction endothermique nécessitant 425 kilocalories par kilogramme de calcaire.

Cette réaction s'effectue à une température voisine de 900°C et s'accompagne d'une perte

de poids d'environ 45% correspondant à la perte en gaz carbonique.

❖ **Chaux éteinte :**

Contient essentiellement de l'hydroxyde de calcium Ca (OH)₂. Elle est obtenue par extinction de la chaux vive selon la réaction d'hydratation suivante :

Chaux vive + eau \longrightarrow chaux éteinte + 15.5 Kcal.

$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + 15.5 \text{ Kcal}.$

II.2.2. Caractéristiques chimiques et physiques :

II.2.2.1. Composition chimique :

1. Teneur en CaO :

La teneur en CaO est évidemment la principale caractéristique d'une chaux mais ce CaO

peut être **libre**, c'est-à-dire sous forme d'oxyde CaO ou d'hydroxyde Ca(OH)₂, ou **combiné** sous forme [6] :

- De carbonate, soit parce que le calcaire d'origine n'a pas été complètement dissocié et qu'il reste des **incuits**; soit parce qu'il y a eu **recarbonation** de la chaux au contact de l'air. Le CaO ainsi combiné peut être considéré comme inerte pour la plupart des emplois routiers, on apprécie son importance grâce à la teneur en CO₂ de la chaux.
- De silicates et d'aluminates, comme nous l'avons vu ci-dessus.
- Eventuellement, mais plus rarement, d'autres sels (Sulfates, Phosphates, par exemple).

2. Teneur en MgO :

La teneur en MgO est également importante à connaître puisque la Magnésie a en général une action analogue à la chaux. Le MgO, comme le CaO, peut être **libre** ou **combiné**. Les principales indications données par l'analyse chimique d'une chaux seront donc les teneurs en :

* CaO total et CaO libre.

* MgO

* CO₂

* SiO₂, AL₂O₃ et FeO₃.

Il n'est pas nécessaire de connaître toutes ces valeurs, les teneurs en CaO et MgO sont souvent suffisantes.

3. Réactivité :

Cette propriété est essentiellement prise en compte dans les applications où la chaux est utilisée pour flocculer les argiles ou coaguler les impuretés (phénomène de floculation). La

réactivité définit la rapidité d'action d'une chaux, dans une réaction donnée, elle dépend essentiellement de :

- de la porosité de la chaux (qui diminue lorsque la température de cuisson augmente) ;
- de sa finesse et du mode de cuisson.

Dans le cas de chaux vive, la réactivité dépend de la température de calcination et de la composition du calcaire en cause. Pour la chaux éteinte, la réactivité est liée aux conditions d'extinction. Elle peut se déterminer directement en mesurant dans des conditions bien définies la vitesse de réaction d'un échantillon en présence d'eau (hydratation) ou d'un acide (neutralisation). La surface spécifique, et même la finesse de mouture, peuvent dans certains cas en donner une idée.

II.2.2.2. Caractéristiques physiques :

a. FINESSE :

C'est une caractéristique importante dans la mesure où elle intervient sur les conditions de transport, de stockage ou de mélange. Elle peut également intervenir sur la vitesse de réaction de la chaux, mais il faut se rappeler, dans le cas de la chaux vive, que la présence d'eau peut modifier profondément la finesse initiale puisque l'extinction entraîne une pulvérisation très fine (à l'inverse du ciment qui se prend en grumeaux et perd de son efficacité s'il est humidifié prématurément).

b. Surface spécifique :

La surface spécifique donne une indication sur l'importance des surfaces de contact entre la chaux et le produit avec lequel elle est mise en réaction par conséquent sur la vitesse

avec laquelle elle agira. La connaissance de la finesse ou surface spécifique est un élément fondamentale pour maîtriser la réactivité de la chaux, plus les grains sont fins, plus la surface de contact est étendue et plus les réactions de floculation sont rapides.

c. Masse volumique et Densité :

Ces deux notions aident à déterminer la masse de liant contenue dans un volume donné.

- la masse volumique est exprimée généralement en kilogramme par mètre cube;
- la densité correspond au rapport entre la masse d'un volume de matière donnée et la masse d'un même volume d'eau.

La masse volumique varie beaucoup suivant la nature de la chaux, sa granulométrie, son degré de saturation.

d. Solubilité :

La solubilité de la chaux est très faible et diminue lorsque la température augmente. Elle est de l'ordre de 1.2 g / L à 20 °C et de 0.67 g / L à 80 °C.

II.2.3. Les spécifications des chaux à usage routier :

Les spécifications relatives à la chaux que l'on peut trouver dans les diverses recommandations et directives officielles publiées par le SETRA et le L.C.P.C, peuvent se résumer dans le tableau 1 ci-dessous (norme française NF P 98-101) [8]:

Tableau 1 : Les spécifications des chaux à usage routier [9].

Chaux Vive	Chaux Eteinte (Hydratée)
Critères granulométriques	
1- Classe granulométriques 0-2 mm 2- Passant au tamis de 200 μm \geq 80 % 3- Passant au tamis de 80 μm \geq 50 %	Passant au tamis de 80 μm \geq 90 %
Critères chimiques et de réactivité	
1- Teneur en chaux libre > 80 %; 2- Teneur en MgO \leq 8%; 3- Test de réactivité à l'eau : température finale > 60 °C en moins de 25 mn.	Teneur en chaux libre > 50 % Teneur en MgO \leq 6%
	Teneur en eau libre \leq 2 %.

CHAPITRE III : LA STABILISATION DE SOL ET LES STABILISANTS

III.1. DEFINITION :

Malgré ses propriétés de résistance, le sol naturel lorsqu'elle est simplement compactée, puis mise en œuvre et soumise aux conditions extérieures est très sensible aux variations de températures et d'hygrométrie.

La stabilisation de le sol a pour objet essentiel de rendre ce matériau moins sensible aux variations de sa teneur en eau et de l'empêcher à la fois de se transformer en boue ou de s'effriter sous l'action de l'humidité.

III.2. BUT DE LA STABILISATION :

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

Ces trois objectifs permettent d'améliorer la résistance mécanique, et de diminuer la sensibilité à l'eau.

III.3. LES TECHNIQUES DE STABILISATION UTILISES :

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue [10]:

1. la stabilisation mécanique.
2. la stabilisation thermique.
3. la stabilisation chimique. (par additifs).

Dans le tableau suivant, on donne les principaux avantages et inconvénients de chaque technique.

Tableau 2 : Avantages et Inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées.

Technique	Procédés	Avantages	Inconvénient
Stabilisation mécanique	compactage	-Le compactage est le plus économique. -Réduire le potentiel expansif.	-Il faut une grande quantité d'eau.(compacter au-dessus de l'optimum avec une W_n élevée).
	Substitution	-	-L'épaisseur de la couche -La disponibilité du matériau.
	Préhumidification	-	-Le temps de l'opération. -La distribution uniforme de W_n
	Méthode de contrôle	-Minimiser l'humidification ou dessèchement.	-La sensibilité a la variation de la teneur en eau.
Stabilisation thermique	Augmenter la température	-Réduire la répulsion électrique entre les particules.	-Très coûteuse.
Stabilisation chimique (par ajout de matériaux)	Les sels	-Augmenter la concentration ionique de l'eau libre. -Réduire le phénomène d'échange.	-Le choix de type de dosage et de la méthode d'addition d'un produit. (Valence et rayon du cation)
	Le ciment	-augmenter la résistance. -diminuer la plasticité -réduire le potentiel de variation de volume. -Augmenter la limite de retrait.	-utilisation d'un dosage important.
	La chaux	-diminuer la plasticité, la densité sèche et la pression du gonflement. -Augmenter la résistance et W_{opt} . -utilisation d'un faible dosage.	-Carbonation de la chaux.

III.4. STABILISATION AVEC DES ADDITIFS :

Les propriétés d'un sol peuvent être modifiées par l'ajout de certains additifs. Ces derniers sont classés en deux grandes familles [10]:

1. les hydrophobants.
2. les liants.

III.4.1. les hydrophobants :

Les hydrophobants sont des produits dérivés amines des composés cationiques (par exemple : les amines aromatiques, les amines aliphatiques,...). Les caractéristiques des hydrophobants permettent les variations de la teneur en eau en rendant le sol insensible à l'eau quelles que soient les conditions extérieures. L'absorption d'un produit hydrophobant se traduit par deux effets :

- ❖ diminution momentanée ou définitive de l'affinité du sol pour l'eau. ce qui à pour conséquence d'accroître la résistance mécanique du sol et la réduction du gonflement.
- ❖ diminution de la structure microscopique du sol.

III.4.2. Les liants :

Les liants se divisent en deux grandes familles qui sont les liants hydrauliques et les liants organiques. Le schéma suivant donne les principaux liants existants dans l'industrie.

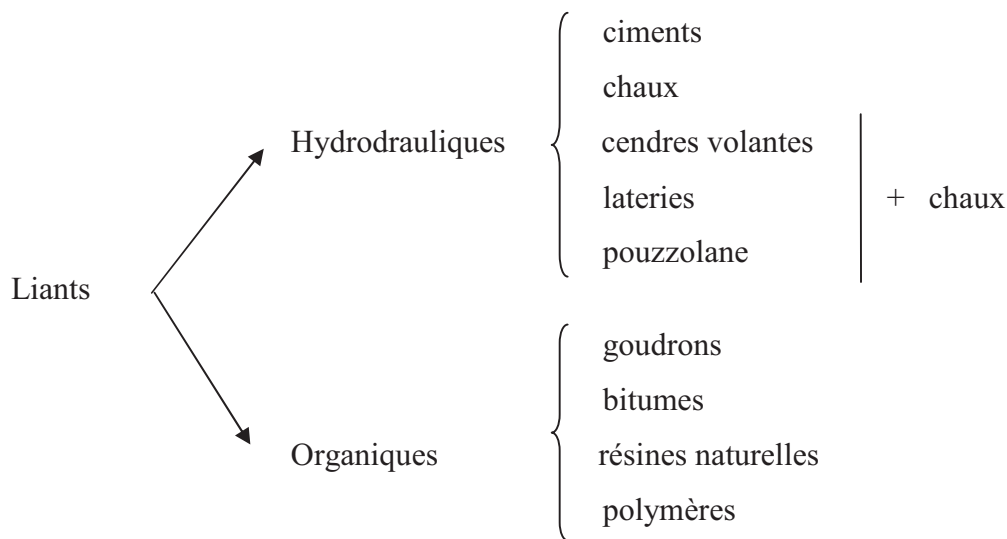


Figure 6 : Classification des liants [11].

III.4.2.1. Liants hydrauliques :

Ce sont des produits d'origine minérale qui par réaction avec l'eau donnent des réseaux cristallins enchevêtrés ayant une bonne cohésion et pouvant aboutir à des jonctions avec le squelette minéral. Ils sont tous à base de chaux qui réagit avec l'argile par :

- Echange cationique,
- Flocculation et agglomération,
- Carbonation,
- Réaction pouzzolanique.

Ces réactions se traduisent par :

- Une amélioration immédiate des propriétés mécaniques du sol et une diminution de la sensibilité à l'eau par flocculation et échange cationique.
- Une réaction lente produisant les matériaux cimentants. C'est la réaction pouzzolanique.

III.4.2. 2. Liants organiques :

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

- Les mono-composants (un seul constituant) ont un caractère thermoplastique, ce sont par exemple les bitumes de pétrole, les goudrons et les brais de houille.
- Les bi-composants (deux constituants) sont à mélanger au moment de la mise en œuvre. Le résultat est intermédiaire entre le collage thermique des mono-polymères, des résines ou des dopes.

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

III.5. STABILISATION PAR AJOUT DE CHAUX :

III.5.1. Mécanisme de la stabilisation:

Ce mécanisme peut se décomposer en actions élémentaires, dûes pour les unes aux réactions chimiques et pour les autres aux procédés de mise en œuvre du mélange. Chacune de ces actions pourrait être considérée comme indépendante des autres. Il y a cependant souvent superposition de plusieurs d'entre elles, selon le type de chaux utilisé et les conditions de mise en œuvre .

III.5.1.1. Modification de la teneur en eau :

La teneur en eau d'un mélange sol chaux est inférieure à celle du sol initial en raison de [12] :

- L'hydratation de la chaux (si elle est vive), qui est une réaction immédiate et fortement exothermique, ce qui a pour effet d'élever à l'extinction la température du mélange :



Réaction exothermique dégageant (15.5 kilocalories par mol) de chaux vive

- L'évaporation d'eau :

Deux phénomènes interviennent simultanément lors du mélange, d'une part la contribution d'une partie de la chaleur de réaction à la vaporisation d'une certaine quantité d'eau du sol, d'autre part l'aération du sol provoquée par le malaxage du mélange.

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

III.5.1.2. Modification des propriétés géotechniques du sol :

Cette modification se fait en deux étapes : l'une immédiate, l'autre, plus lente, peut durer plusieurs années. Elle est due à la réaction de la chaux sur les particules d'argile.

III.5.1.2.1. Modifications immédiates :

Elles sont dues aux réactions provoquées par l'apport d'ions Ca^{++} et OH^- : Échange de cations Na^+ et K^+ par des cations Ca^{++} et effet de floculation des particules argileuses provoqué par les forces électriques mises en jeu par cet échange. L'incidence de ces réactions sur les propriétés géotechniques sont les suivantes :

a. Augmentation significative de la limite de plasticité :

Dans la plupart des cas l'effet de la chaux sur la plasticité de l'argile est plus ou moins instantané [13], mais la limite de liquidité reste presque inchangée, ceci implique que l'indice de plasticité [12] :

$$\text{IP}(\%) = (\text{WL} - \text{WP}) \text{ diminue.}$$

Concernant la limite de plasticité, elle cessera d'augmenter lorsque le contenu de la chaux aura atteint un certain seuil. c'est le point de fixation de chaux [13].

Comme expliqué par *Davidson et Hand,y (1960)* les ions de calcium de chaux causent une réduction de la modification de la plasticité des sols cohérents , ainsi ils deviennent plus friable et plus faciles à travailler. Généralement la quantité requise varie de (1-3%) selon la quantité et le type de minéraux d'argile présent dans le sol [15].

b. Modification des caractéristiques de compactage du sol :

Le traitement à la chaux réduit la valeur maximale de la masse volumique apparente sèche et augmente la valeur de la teneur en eau permettant de l'obtenir.

Lees et al (1982) ont prouvé qu'au contenu d'argile de 30 et 50%, l'addition de la chaux a comme conséquences une baisse d'approximativement 5% en valeur de densité sèche maximum, en outre à une plus élevée en eau, mélangés de sol de chaux tendre à montrer une plus grande compactibilité que le sol non traité [16].

c. Augmentation de la portance exprimée par l'indice CBR :

Dans certains cas, à même compacité et à même teneur en eau, l'indice CBR d'un sol traité avec de la chaux est plus élevé que celui du même sol non traité. La circulation des engins s'en trouve fortement facilitée. C'est pourquoi cet effet est couramment utilisé pour le traitement des pistes de chantier.

d. Diminution de la sensibilité à l'eau :

L'argile sèche a une capacité considérable pour la prise d'humidité qui peut mener à une augmentation substantielle de volume [14]. La plupart des grandes augmentations de volumes se produisent en raison du gonflement intracrystallin [17] où les molécules d'eau et les cations échangeables occupent l'espace entre l'aluminosilicate [14]. Ce type de gonflement se produit avec les smectites, la vermiculite, quelque chlorite, le halloysite et quelques minéraux.

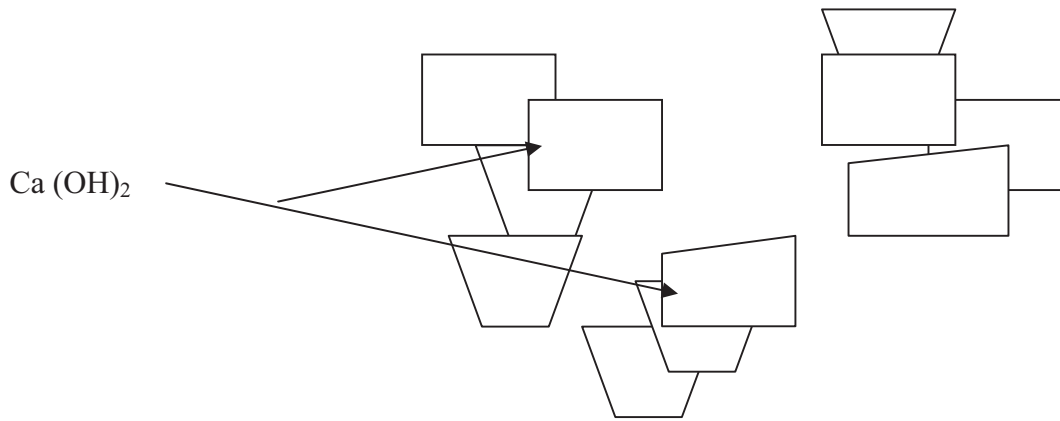
D'autres argiles qui montrent des changements de volumes plus restreints ne subissent pas le gonflement intracrystallin car les liaisons entre les couches sont très fortes qu'elles empêchent la pénétration des molécules d'eau. Il montre un gonflement intercrystallin où des molécules d'eau sont seulement adsorbées sur les surfaces de particules d'argile. Ce type de gonflement se produit dans illite et kaolinite. [14]

L'addition de la chaux modifie la double couche électrique réduisant l'épaisseur de la chaux

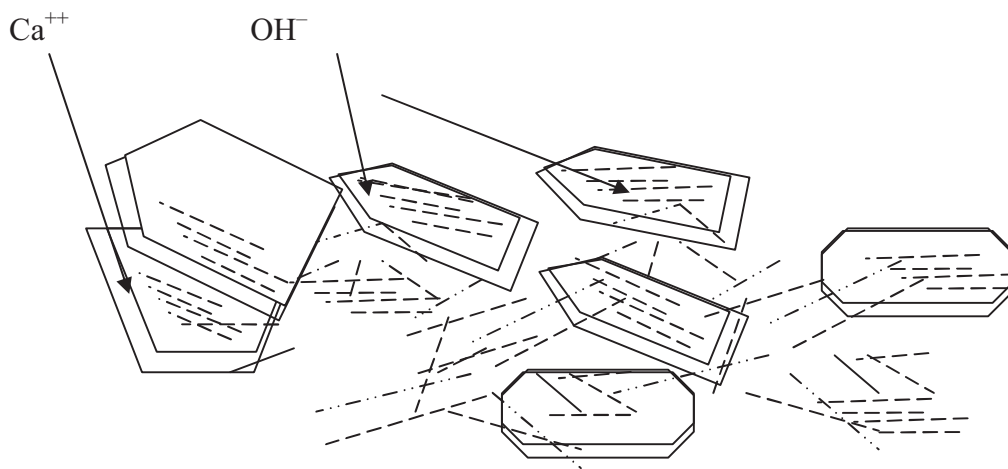
adsorbée de l'eau, il y a ainsi une diminution de l'absorption d'humidité des sols qui sont traités avec la chaux [14]. Un sol argileux humide passe ainsi et de manière quasi-instantanée d'un état plastique à un état solide, friable, facilement travaillable (workable) et perd partiellement sa sensibilité à l'eau.

III.5.1.2.2. Modification à long terme :

En plus de la réaction rapide d'échange ionique sur le traitement avec la chaux il y a une occurrence chimique très lente de réaction. Cette réaction se produit par un mécanisme de précipitation de solution par lequel des aluminosilicates de chaux sont lentement pris dans la solution et précipite en tant que produit de ciment hydraté de réaction, en particulier aux points de contact des particules d'argile, produits rapidement les floccs stables [18]. Il est généralement reconnu que le principal produit de ciment est un gel d'hydrate de silicate de calcium, et l'on a suggéré que le développement à long terme de la résistance du mélange chaux argile puisse être attribué à la cristallisation progressive de ce gel qui forme une structure (stable). Cette cristallisation peut être poursuivie très longtemps pendant des mois, voire des années, à une vitesse qui dépend avant tout de la température du sol et de la nature de l'argile. Ces modifications dans la nature des particules du sol ont pour effet de faire évoluer encore favorablement les propriétés géotechniques du matériau sol chaux et particulièrement la portance qui est exprimée par l'indice CBR , la stabilité à l'immersion et la stabilité au gel [8].

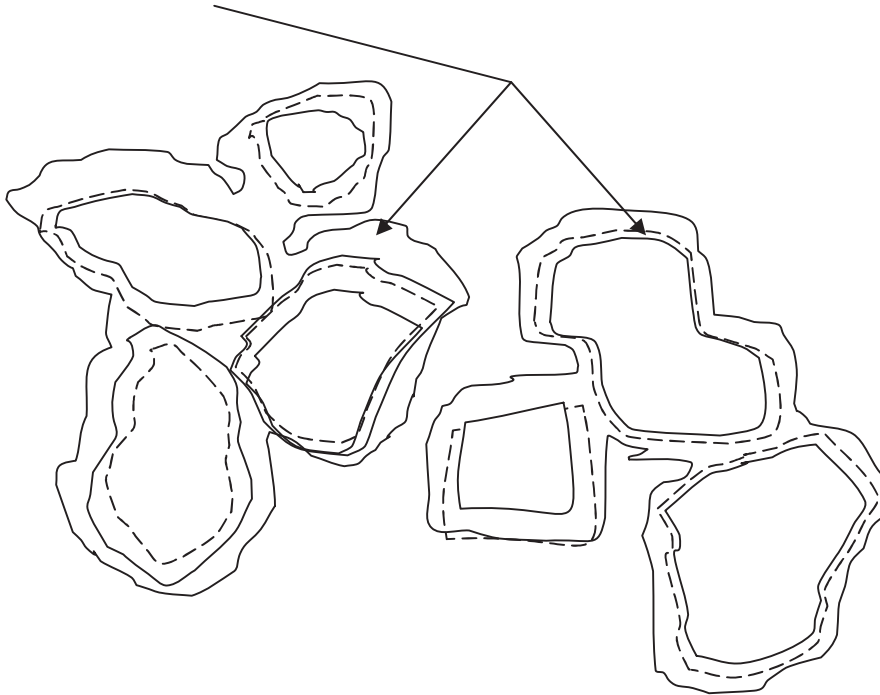


1-Mélange argile chaux anhydre.



2-En présence d'eau, dissociation de la chaux en Ca^{++} et OH^-

Ciment d'aluminates et de silicates de calcium hydraté



3- Attaque des particules argileuses et formation d'un ciment d'aluminates et de silicates de calcium hydraté reliant les particules argileuses corrodées.

Figure 7 : Schéma montrant l'action de la chaux sur l'argile.

De nombreuses études ont montré que la stabilisation des sols argileux par la chaux transforme ces derniers en sols fermes améliorant leur résistance et stabilisant leurs volumes. Les mécanismes responsables de ces changements se résument selon un grand nombre d'auteurs à [10] :

III.5.2. Echange cationique :

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

III.5.3. Floculation et agglomération des particules d'argiles :

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

III.5.4. Carbonatation de La Chaux :

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

III.5.5. Réaction Pouzzolanique :

Cette réaction se produit entre la silice et / ou l'alumine du sol et la chaux pour former certains types d'agents de cimentation ou de solidification. Le résultat de ces réactions donne la part la plus importante dans l'augmentation de la résistance du mélange sol chaux et les propriétés acquises par le sol peuvent durer des années. Ce phénomène est la cause principale qui assure la bonne stabilisation du mélange sol - chaux.

III.6. UTILISATION DE CES REACTIONS :

III.6.1. Dans les terrassements :

La stabilisation des sols peut être utilisée dans les terrassements pour construire des couches de remblais ou couches de formes [19].

III.6.1. a. La constitution de remblais :

La constitution de remblais avec des sols fins argileux trop humides traités à la chaux est rendue possible par l'amélioration des matériels et des techniques de terrassement. Les performances exigées du mélange sol chaux pour les remblais sont généralement exprimées par un indice C.B.R immédiat compris entre 5 et 15.

III.6. 1. b. La constitution des couches de forme :

La constitution des couches de forme exige un niveau de qualité supérieure aux remblais pour toutes les opérations (épandage, malaxage, compactage), souvent traité en place en une ou plusieurs couches. Le dosage en chaux est généralement supérieur à ceux que l'on utilise pour les remblais puisque les performances atteintes sont élevées (un indice C.B.R de 25 après quatre 4 jours d'immersion est souvent considéré comme un minimum). Il est parfois nécessaire de réaliser le malaxage en deux étapes espacées par exemple de 24 heures pour laisser à la chaux le temps d'agir sur les mottes argileuses et de provoquer leur désintégration. Le dosage en chaux est déterminé préalablement aux laboratoires.

III.6. 2. Dans les assises de chaussées :

III.6. 2. 1. Couche de forme, couche de base :

L'évolution à long terme des sols fins traités à la chaux doit permettre d'envisager l'emploi pour la constitution d'assises de chaussées. Des expériences sur ce sujet déjà faites aux Etats-Unis, des contrôles réalisés sur les routes et pistes d'aérodromes militaires créés dans ce pays au cours de la deuxième guerre mondiale et dans les années qui ont suivi ont montré l'excellente tenue et même l'amélioration dans le temps des assises constituées de sol traités à la chaux.

III.6. 3. Autres applications :

Le traitement des sols à la chaux a connu beaucoup d'applications là où il est nécessaire de stabiliser les sols fins, sensibles à l'eau et au gel. On peut citer par exemple :

✦ Les pistes et chemins divers, pistes cyclables ou pour piétons, chemins ruraux, pistes de chantiers.

✦ **les voiries urbaines.**

✦ **les plates-formes des voies ferrées** pour améliorer la portance des fonds de tranchées ou des remblais qui supportent le ballast.

✦ **les aires et plates-formes** pour les parkings et les stockages les plus divers mais aussi pour d'autres usages tels que les forages pétroliers.

✦ **les ouvrages hydrauliques** tels que les barrages ou les canaux en terre. les couches de sols à la chaux servent à protéger les berges contre l'action des vagues et des corps flottants, à faciliter l'écoulement des eaux tout en assurant une protection contre l'érosion et surtout elles contribuent à l'étanchéité et à la stabilité de l'ouvrage.

Le sol traité est en général mis en place en couche horizontale de 2 à 3 mètres de large, superposées en marches d'escalier. Les expériences américaines ont montré l'excellente tenue de surfaces ainsi traitées à la chaux, même après nombreuses années.

✦ **les fondations d'immeubles** de toutes natures, lorsqu'elles sont réalisées sur des sols plastiques.

Il existe de nombreuses expériences dans ce domaine, non seulement aux Etats-Unis, mais dans des pays tels que l'Australie ou la Suède.

✦ **des ouvrages très divers** : tels que par exemple :

En suisse, les plates-formes et les parois des Bassins dans lesquels sont placés les immenses réservoirs métalliques destinés à contenir les stocks de réserve de carburants liquides.

Le traitement à la chaux a donné aux parois de ces bassins la solidité et l'étanchéité requises.

III.7. L'EXECUTION DU TRAITEMENT :

Les différentes phases d'un chantier de traitement peuvent se présenter dans un ordre un peu différent suivant qu'il s'agit de traiter le sol en place ou que l'on prévoit des

- ❖ Préparer le sol pour que la couche traitée soit d'épaisseur uniforme et réglée aux niveaux et pentes convenables.
- ❖ Approvisionner la chaux en quantité suffisante dans des silos de chantier dont la capacité doit correspondre au minimum à une, voire deux journées de travail.
- ❖ Pour les petits chantiers on utilise parfois la chaux en sacs.
- ❖ Epancher avec le maximum de précision et de régularité la dose prescrite par l'étude préalable. Lorsque la couche est ensachée, il suffit de répartir convenablement les sacs sur le sol, cette méthode étant toutefois limitée à des petits chantiers.
- ❖ Malaxer pour diviser suffisamment le sol et lui incorporer la chaux de façon homogène.
- ❖ Eventuellement arroser si le sol est trop sec.
- ❖ Compacter avec une intensité suffisante pour atteindre la densité prévue par l'étude préalable.

Ces techniques sont maintenant devenues classiques, mais il existe d'autres possibilités qui ont été expérimentées à l'étranger et qui offrent des perspectives nouvelles aux techniques de traitement. L'épandage de la chaux sous forme de lait de chaux encore exceptionnel en France (autoroute A61, section Narbonne – Toulouse) est courant aux Etats-Unis même sur des chantiers très importants (Aéroport de Dallas – Fort –Worth).

L'injection de lait de chaux dans le sol, sous pression, à une profondeur courante de 1.50 mètre mais qui peut aller jusqu'à 6 et même 12 mètres. Cette technique américaine est très utilisée pour stabiliser des remblais ou des terrains naturels destinés à la construction des bâtiments.

Elle est également employée pour la stabilisation des plates –formes de voies ferrées existantes lorsqu'elles sont composées de matériaux plus ou moins argileux.

Ces opérations peuvent alors se faire sans interrompre le trafic, et les résultats obtenus sont tout à fait remarquables. La constitution de pieux en sol traité, par forage et mélange de chaux avec la terre remuée en place par une tarière. Un matériel suédois permet de travailler ainsi sur une profondeur qui peut atteindre 10mètres. Il est utilisé pour réaliser une stabilisation profonde de sols à très faible portance leur permettant ainsi de supporter la construction de bâtiments.

CHAPITRE IV : METHODOLOGIE GENERALE DES ETUDES DE TRAITEMENT DES SOLS

INTRODUCTION :

Outre l'étude économique indispensable dans tout projet de traitement des sols, une étude géotechnique s'impose. Dans ce travail, nous n'aborderons pas l'aspect économique, mais nous nous intéressons à l'étude géotechnique qui comprend deux parties distinctes : La caractérisation des sols, matériaux de traitement et l'étude de formulation.

IV.1. LES MATERIAUX UTILISES :

IV.1.1. Le Sol:

IV.1.1.1. Caractérisation des sols étudiés :

Nature et référence de l'échantillon : Argile nommée ' **Kaolin** ' ramenée directement du gisement de Djebel Debagh (Guelma). Le gisement de Djebel Debagh est une mine située à 35 Km du Nord-ouest de la ville de Guelma et est relié avec la route nationale RN 80 par un tronçon de piste de 6Km. Djebel Debagh se trouve à 1060 m au dessus de la mer, l' altitude du gisement est de 700 m. Les paramètres d'identification des sols reconnus comme représentatifs vis-à-vis du traitement sont : La granularité, l'argilosité, l'équivalent de sable, la composition chimique et l'état hydrique.

a. La granulométrie :

Elle se fait par tamisage par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments sont supérieurs a 80µm (**NF P94 – 056**) et par sédimentation pour les éléments inférieurs ou égaux

a 80 μ m (NF P94 – 057) qui exprime la finesse et oriente en grande partie le choix du matériau de traitement.

a.1. Essai granulométrique :

L'essai granulométrique du sol a été réalisé au sein du LTPE* antenne de Annaba, selon la norme : NF P 94-056. Les résultats sont présentés dans le tableau 3 qui suit ainsi que sur la courbe de la figure 8.

Tableau 3 : Essai de granulométrie (Tamisage sous l'eau).

Ouverture de tamis (mm)	Masse refus partiels (gr)	Masse refus cumulés (gr)	Pourcentage des refus cumulés	Tamisat (%)
16	0.00	0.00	0.00	100.0
12.5	6.00	6.00	0.60	99.4
10	24.30	30.30	3.03	97.0
6.3	49.90	80.20	8.02	92.0
5	16.00	96.20	9.62	90.4
4	38.00	134.20	13.42	86.6
3.15	33.40	167.60	16.76	83.2
2	53.00	220.60	22.06	77.9
1.000	67.00	287.60	28.76	71.2
0.400	81.30	368.90	36.89	63.1
0.200	43.20	412.10	41.21	58.8
0.100	33.80	445.90	44.59	55.4
0.080	9.50	455.40	45.54	54.5

a.2. Essai de Sédimentométrie :

L'essai sédimentométrique du sol a été réalisé au LTP E (*) de Annaba pendant 24 heures selon la norme **NF P 94-057**. Les résultats sont présentés dans le tableau 4 qui suit.

Tableau 4 : Essai de Sédimentométrie :

Temps (t).			Lecture du Densimètre R	Température T °C	Lecture corrigée (Rc)	Hr (cm)	D Equivalent µm	%des Grains<D P	P* % sur tamis à 80 µm
h	m	s							
-	-	30''	23.513	24.6	0.01290	13.5	67.03	94.1	51.22
-	1'	-	23.413	24.6	0.01290	13.5	47.40	93.7	51.00
-	2'	-	23.213	24.6	0.01290	13.5	33.52	92.9	50.57
-	5'	-	22.913	24.6	0.01290	12.8	20.64	91.7	49.91
-	10'	-	22.513	24.8	0.01286	13.2	14.78	90.1	49.04
-	20'	-	22.013	24.8	0.01286	13.2	10.45	88.1	47.95
-	40'	-	21.213	24.4	0.01294	13.6	7.54	84.9	46.21
-	80'	-	18.813	24.6	0.01290	14.3	5.45	75.3	40.98
-	160'	-	15.713	24.8	0.01286	15.5	4.00	62.9	34.23
-	320'	-	10.213	24.8	0.01286	17.8	3.03	40.9	22.25
24	-	-	4.013	24.4	0.01294	20.0	1.52	16.1	8.74

* LTPE = Laboratoire des Travaux Publics de l'Est.

NB :

γ_w : Poids volumique de l'eau ($10 \cdot \text{kN/m}^3$).

γ_s : Poids volumique des particules solides ($26.5 \cdot \text{kN/m}^3$).

M : masse de sol sec mis en suspension et prélevé sur le tamis à $80\mu\text{m}$
($40 \text{ gr} = 40 \times 10^{-2} \text{ N}$).

P : pourcentage des particules de diamètre inférieur ou égal à D (P/R à la masse de la prise d'essai à l'état sec).

P* : pourcentage des éléments fins analysés P/R à l'échantillon total

R : lecture de densimètre.

R : lecture corrigée.

D : diamètre équivalent.

Hr : profondeur effective du centre de poussée.

T : Température °C.

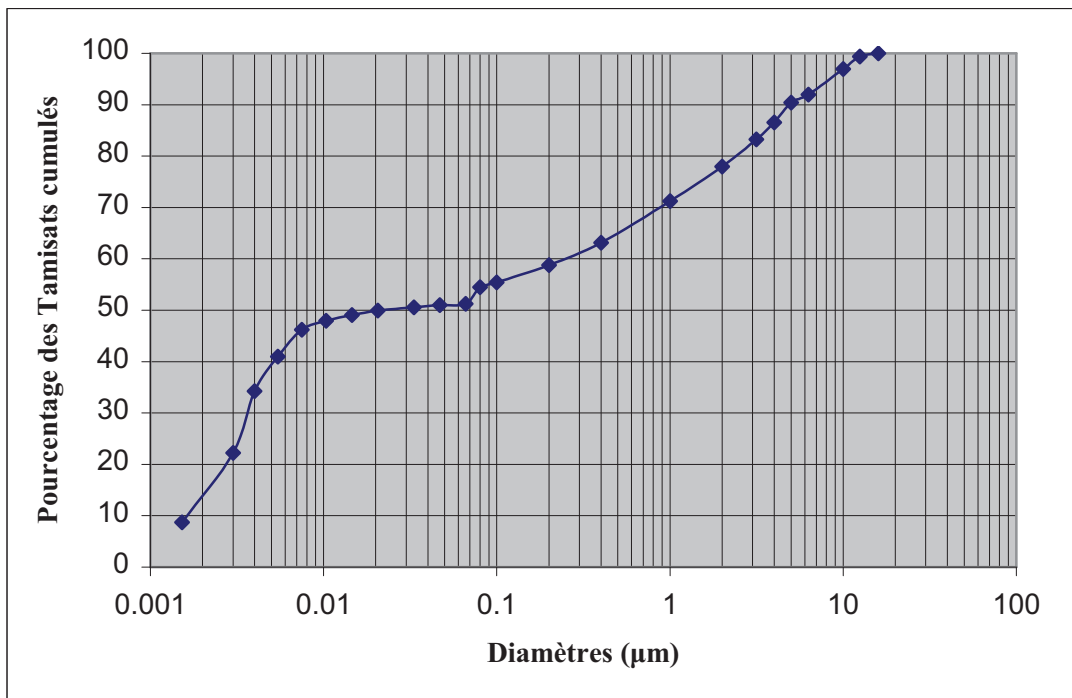


Figure 8 : Courbe Granulométrique du sol étudié.

✦ **Composition granulométrique:**

* Tamisat à 16 mm (%) = 100 (La valeur des plus gros éléments présents dans le sol).

* Tamisat à 2mm (%) = 77.9 (Le tamisat à 2mm qui constitue la fraction sableuse et les fines).

* Tamisat à 80 µm (%) = 54.5 (Le tamisat à 80 µm exprime la finesse et oriente en grande partie le choix du matériau de traitement).

b. L'Argilosité :

Elle reflète la quantité et l'activité de la fraction argileuse dans le sol. Elle est caractérisée soit par la plasticité (norme **NF P 94-051**) soit par la valeur au bleu de méthylène (norme **NF P 94-068**).

c. Limite d'Atterberg :

Les essais permettant la détermination des limites d'Atterberg ont été réalisés conformément à la norme **NF P 94-051**. Ils sont effectués sur la fraction inférieure à 400 µm du sol étudié.

c.1. Détermination de la limite de liquidité : (voire photo 1)

La limite de liquidité (WL) est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales (N, W). **WL** : est obtenue pour une valeur N égale à 25 coups exprimée en pourcentage (%). Les résultats sont récapitulés dans le tableau 5 suivant :

Tableau 5 : Exemple de détermination de la limite de liquidité WL (kaolin)

N° de bac	Nbr de coups (N)	Mt+c (gr)	Ms+c (gr)	Mc (gr)	Mw (gr)	Ms (gr)	W (%)
1	15	28.23	21.21	10.17	7.02	11.04	63.59
2	21	21.34	17.03	10.20	4.31	6.83	63.10
3	27	19.17	15.77	10.17	3.40	5.60	60.71
4	29	33.53	25.97	13.17	7.56	12.80	59.06
5	34	13.54	13.13	12.40	0.41	0.73	56.16

NB :

Mt+c Masse de l'échantillon humide y compris le bac.

Ms+c Masse de l'échantillon sec y compris le bac.

Mc Masse du bac

Mw Masse de l'eau

Ms Masse de l'échantillon sec

W Teneur en eau (exprimé en %)

N Nombre de coups

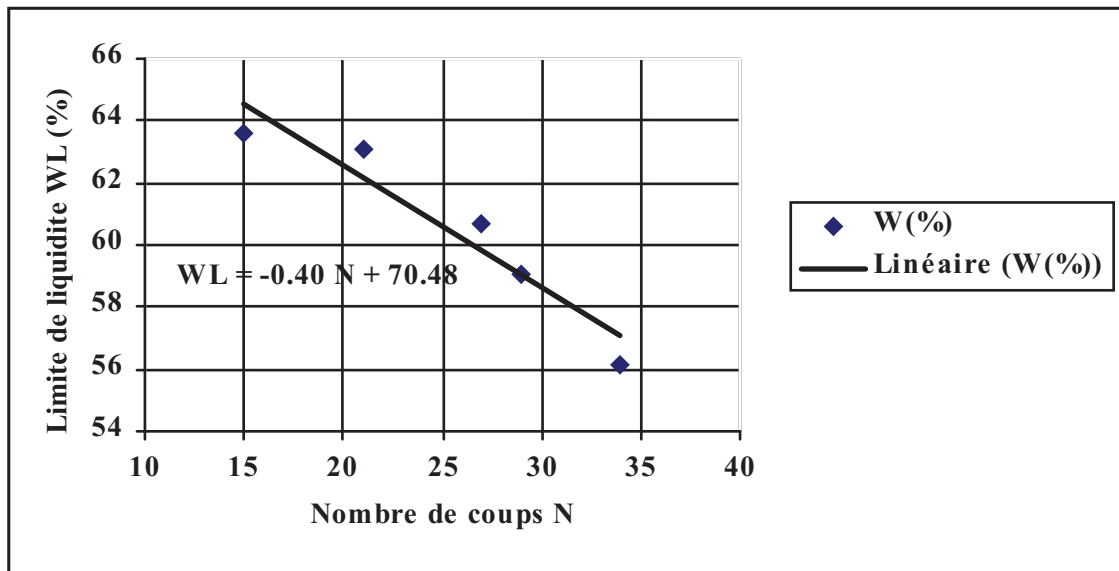


Figure 9 : Courbe expérimentale exprimant la relation entre la teneur en eau et le nombre de coups (kaolin).

NB:

WL correspond à 25 coups calculés à partir de l'équation mentionnée sur la courbe
WL=60.48%.

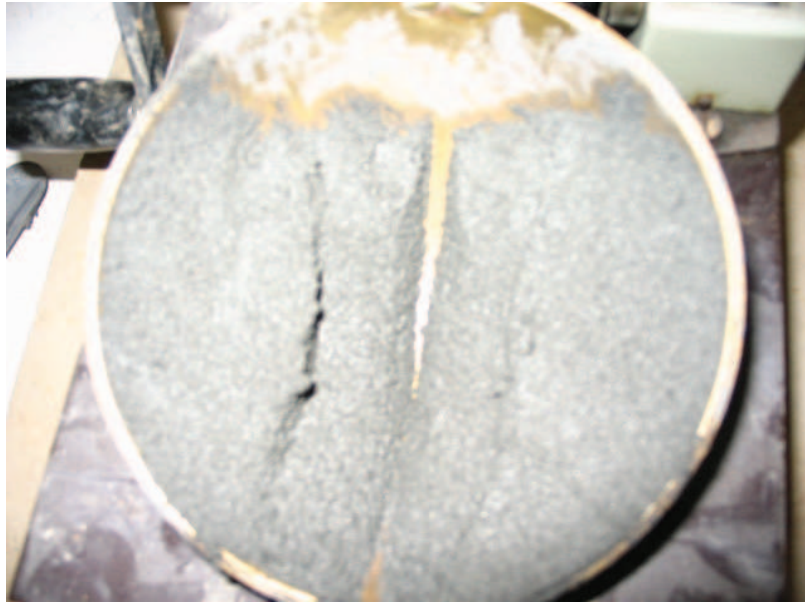


PHOTO 1 : Détermination de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande.

c.2. Détermination de limite de plasticité : (voir photo 2).

La limite de plasticité WP est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenus à partir de ces essais exprimée en pourcentage (%).

NB :

Si les valeurs s'écartent de plus de 2 % de la valeur moyenne un nouvel essai est nécessaire.
Les résultats sont récapitulés dans le tableau 6 suivant :

Tableau 6 : Exemple de détermination de la limite de plasticité (Essai Témoin).

N° d'essai	Mt+c (gr)	Ms+c (gr)	Mc (gr)	Mw (gr)	Ms (gr)	WP (%)	WP moy (%)
1	11.26	10.98	10.2	0.28	0.78	35.90	34.99
2	13.77	13.62	13.18	0.15	0.44	34.09	

NB :

Mt+c Masse de l'échantillon humide y compris le bac

Ms+c Masse de l'échantillon sec y compris le bac.

Mc Masse de bac..

Mw Masse de l'eau.

Ms Masse de l'échantillon sec.

WP La limite de plasticité (%).

WP moy La limite de plasticité moyenne. (%).



PHOTO 2 : Détermination de la limite de plasticité (bâtonnet de sol)

c.3. Détermination de l'indice de plasticité :

L'indice de plasticité est la différence entre les valeurs de WL et WP il est déterminé comme suit :

$$\text{IP (\%)} (\text{Essai Témoin } T = 24 \text{ heures}) = \text{WL} - \text{WP} = 60.48 - 34.99 = \mathbf{25.49\%}.$$

Tableau 7 : Récapitulation des résultats d'essais de limites d'Atterberg du sol étudié.

Limites D'Atterberg	Valeur (%)
Limite de liquidité	60.48
Limite de plasticité	34.99
Indice de plasticité	25.49

d. Essai d'équivalent de sable :

Cet essai est destiné à déterminer la proportion relative de fins dans la fraction d'éléments inférieurs à 5 mm. Son domaine d'application s'étend aux sols faiblement plastiques pour lesquels l'indice de plasticité est trop faible pour être significatif ($I_p < 7$).

e. La Composition Chimique :

La présence des matières organiques : nitrates, chlorures, sulfates, ...affecte le déroulement de la prise et les performances à long terme des sols traités.

Tableau 8 : La Composition chimique du sol étudié.

Composition Chimique	Teneur (%)
SiO ₂	41.97
AL ₂ O ₃	38.00
Fe ₂ O ₃	00.12
MgO	00.07
MnO	01.34
CaO	00.20
SO ₃	00.75
P-F	16.80

f. L'état hydrique :

Intervient dans le choix du ou des produits de traitement. Le bon déroulement des réactions de prise et de durcissement ainsi que les conditions de mise en œuvre.

Humidité : 16%.

IV.1.1.2. Classification des matériaux et détermination de l'aptitude au traitement :

IV.1.1.2.1. Classification géotechnique :

IV.1.1.2.1.1. Classification selon le système USCS :

Cette classification est basée sur l'abaque de plasticité de Casagrande (figure 10) et sur les valeurs du tableau 9. Selon cette classification, nous avons ce qui suit :

La courbe granulométrique de la figure 8 indique que plus de 50 % des particules passent au tamis 80 μm (54.5%). Il s'agit donc d'un sol à grains fins; les limites d'Atterberg indiquant le point de coordonnées $WL = 60.48 \%$, $IP = 25.49 \%$ qui se situe très près de la ligne A de coté inférieur, sans odeur, couleur entre grise / blanche. Donc notre sol aprioré du type **CH-OH**. D'après les résultats chimiques de notre sol, il n'y a aucune trace de minéraux organiques, ce qui veut dire que notre sol est de type **CH** Puisque la lettre **O** signifie sols organiques d'où :

Argile Inorganique de plasticité Elevée.

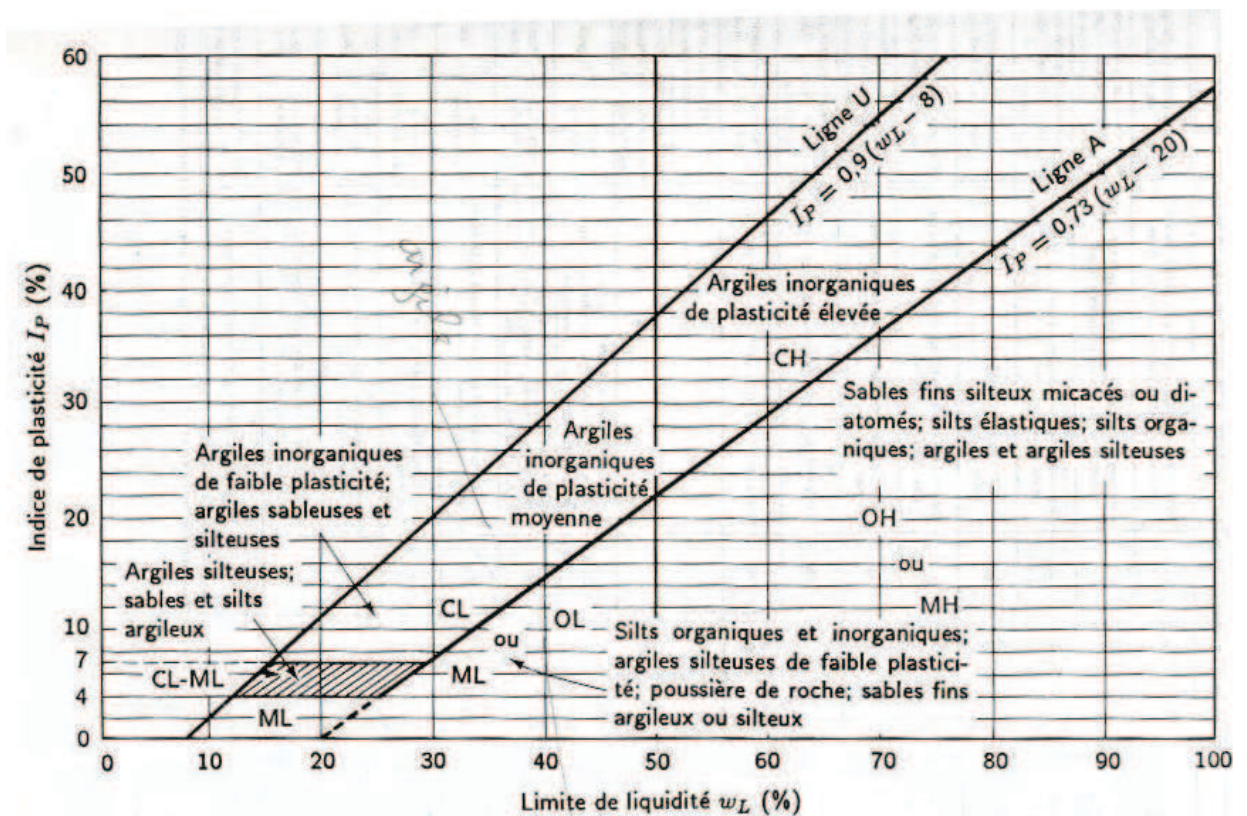


Figure 10 Abaque de plasticité de Casagrande, pour différents types de sols
 D'après Casagrande, (1948)[20], et Howard, (1977) [21].

Tableau 9 Classification unifiée des sols (USCS)

Principales catégories		Symbole ¹	Description	Processus d'identification sur le terrain (en enlevant les particules de plus de 75 mm et en évaluant les fractions des masses)				
1	2	3	4	5				
Sols à grains grossiers (plus de la moitié est recueillie sur le tamis n° 200) ²	Graviers (plus de la moitié de la fraction grossière est retenue sur le tamis n° 4)	Graviers propres contenant peu ou pas de particules fines	GW	Graviers bien étalés; mélanges de graviers et de sable; peu ou pas de particules fines.	Gamme granulométrique étendue; nombre élevé de grains de grosseurs intermédiaires.			
		Graviers contenant beaucoup de particules fines	GP	Graviers uniformes; mélanges de gravier et de sable; peu ou pas de particules fines.	Grosseur de grains prédominante ou gamme granulométrique étendue mais faible représentation de certaines grosseurs intermédiaires.			
		Graviers contiennent beaucoup de particules fines	GM	Graviers silteux; mélanges de gravier, de sable et de silt	Particules fines non plastiques ou de faible plasticité (pour l'identification, voir ML ci-dessous).			
			GC	Graviers argileux; mélanges de gravier, de sable et d'argile	Particules fines plastiques (pour l'identification, voir CL ci-dessous).			
	Sables (plus de la moitié de la fraction grossière passe par l'ouverture du tamis n° 4)	Sables propres contenant peu ou pas de particules fines	SW	Sables bien étalés; sables graveleux; peu ou pas de particules fines	Gamme granulométrique étendue; nombre élevé de grains de grosseurs intermédiaires.			
			SP	Sables uniformes; peu ou pas de particules fines	Grosseur de grains prédominante ou gamme granulométrique étendue mais faible représentation de certaines grosseurs intermédiaires.			
		Sables contiennent beaucoup de particules fines	SM	Sables silteux; mélanges de sable et de silt	Particules fines non plastiques ou de faible plasticité (pour l'identification, voir ML ci-dessous).			
			SC	Sables argileux; mélanges de sable et d'argile	Particules fines plastiques (pour l'identification, voir CL ci-dessous).			
	Sols à grains fins (plus de la moitié passe le tamis n° 200)	Sils et argiles (w _L inférieur à 50)				Processus d'identification de la fraction passant le tamis n° 40		
						Résistance à sec (résistance au broyage)	Dilatance (réaction aux vibrations)	Ténacité (consistance près de la limite de plasticité)
			ML	Sils inorganiques et sables très fins; poussière de roche; sables fins silteux ou argileux; silts argileux peu plastiques	Aucune à légère	Rapide à lente	Aucune	
			CL	Argiles inorganiques de plasticité faible à moyenne; argiles graveleuses; argiles sableuses; argiles silteuses	Moyenne à élevée	Aucune à très lente	Moyenne	
OL			Sils organiques et argiles silteuses organiques de faible plasticité	Légère à moyenne	Lente	Légère		
Sils et argiles (w _L supérieur à 50)			MH	Sils inorganiques; sables fins micacés ou diatomés	Légère à moyenne	Lente à aucune	Légère à moyenne	
		CH	Argiles inorganiques de plasticité élevée; argiles grasses	Élevée à très élevée	Aucune	Élevée		
		OH	Argiles organiques de plasticité moyenne à élevée; silts organiques	Moyenne à élevée	Aucune à très lente	Légère à moyenne		
		Sols fortement organiques		P _t	Tourbe et autres sols fortement organiques	Identifié d'après la couleur, l'odeur, la consistance spongieuse et la structure fibreuse.		

1. Dans les cas de sols présentant les caractéristiques de deux groupes, on utilise les deux symboles. Par exemple: GW-GC est un mélange à granulométrie étalée de graviers sableux et d'un liant argileux.

2. Les tamis sont désignés selon les normes américaines.

IV.1.1.2.1.2. Classification minéralogique :

L'identification des minéraux Argileux dans un échantillon de sol peut s'effectuer par la diffraction au rayon X ou par les méthodes thermiques, malheureusement on ne peut effectuer ces essais par manque de moyens. Pour faire cette classification minéralogique on a suivi les démarches simplifiées suggérées par Casagrande dans la figure 11 suivante :

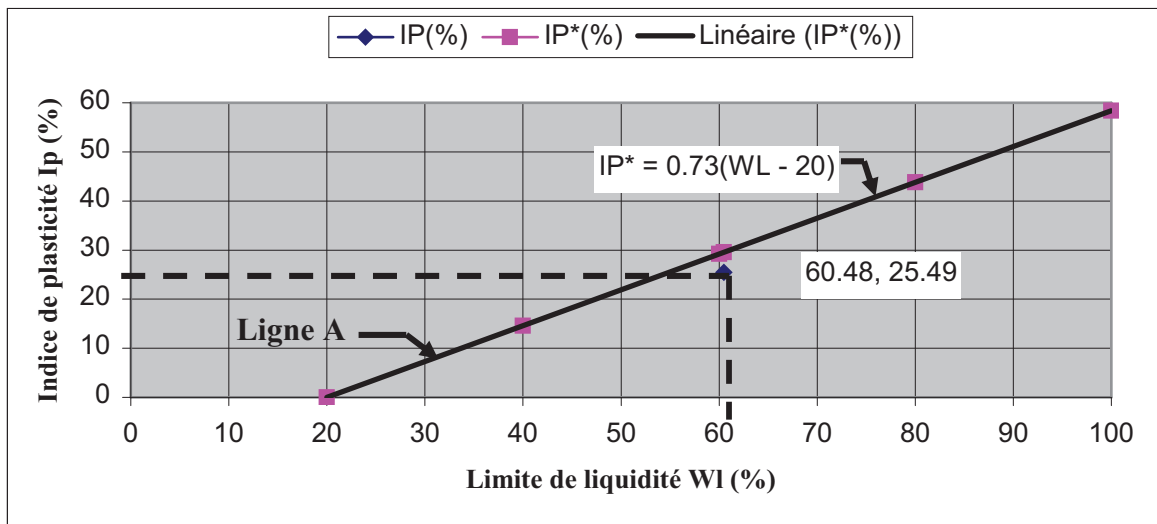


Figure 11 : Classification du sol (Abaque de plasticité de Casagrande)

Le point de coordonnées ($I_p = 25.49$, $W_L = 60.48\%$) est situé juste au-dessous de la ligne A dans la zone Hachurée qui indique la Kaolinite (voir figure 12), ceci indique que la fraction argileuse identifiée correspond au (Kaolinite)

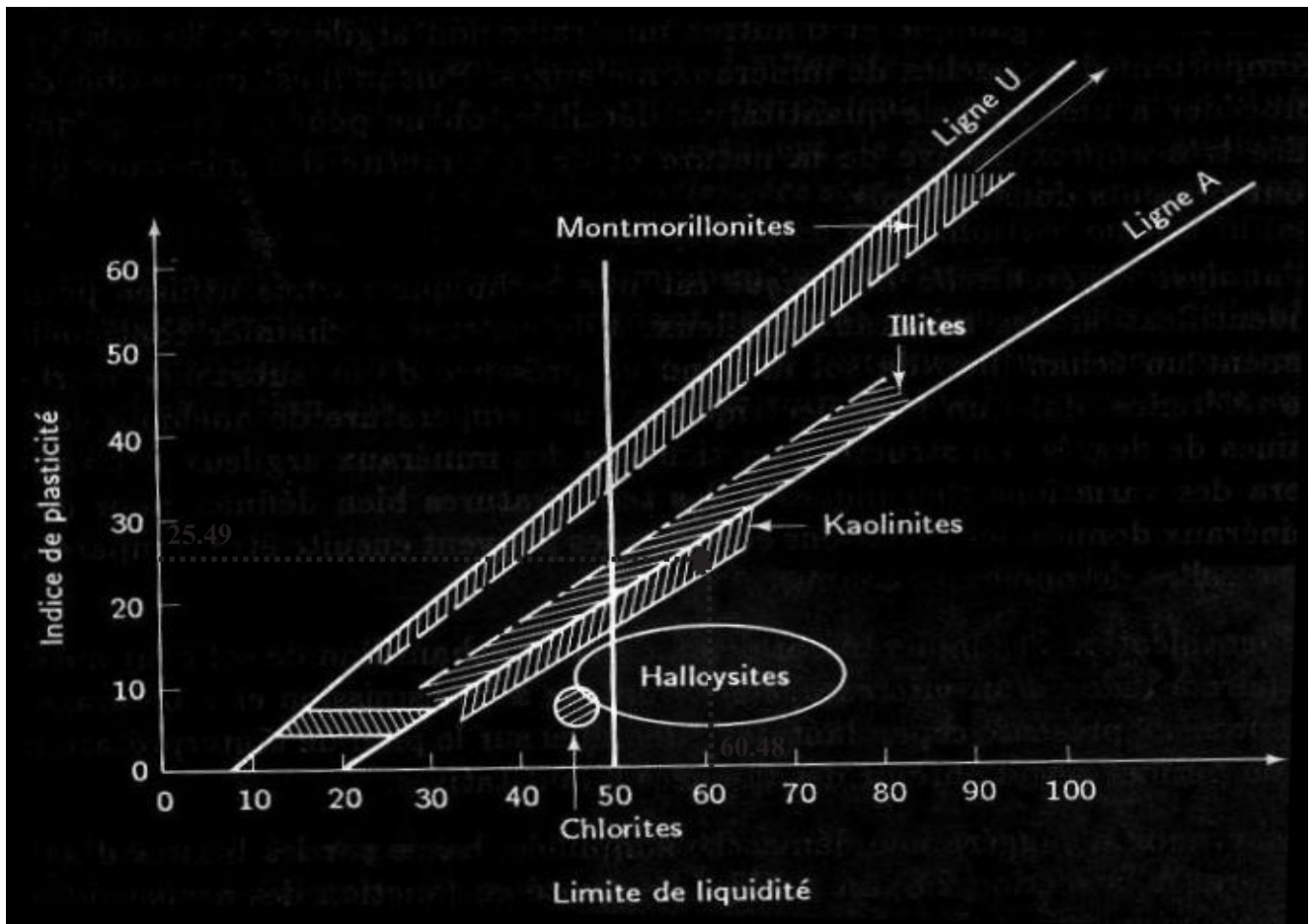


Figure 12 : Position des minéraux argileux les plus communs sur l'abaque de plasticité de Casagrande (Inspiré de *Casagrande, (1948)[20]*, et de *Mitchell, (1976)[21]*)

Conclusion :

D'après la classification USCS et la **Classification minéralogique**, le sol étudié est un **sol argileux de plasticité élevée (kaolinite)**.

Donc notre Sol ' Kaolin ' nécessite un traitement à la chaux, et pour cela on doit déterminer le pourcentage de chaux à utiliser.

IV.1.2. La chaux :

IV.1.2.1. Caractérisation de la chaux utilisée :

La chaux utilisée est une **Chaux Hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$** ramenée directement de l'usine de SAIDA située dans la région ouest de l'Algérie. Les résultats suivants nous ont été fournis par l'usine de fabrication :

a. Essai Physique :

Masse volumique non tassée -----	0.637 (g / cm ³)
Masse volumique tassée -----	0.869 (g / cm ³)
Masse volumique absolue -----	2.580 (g / cm ³)
Finesse suivant la méthode de Blaine -----	10189 (cm ³ /g)
Passant au tamis de 80 μm = 100% \geq 90 %.	

b. Essais Chimiques :

L'analyse élémentaire par spectrométrie de fluorescence X utilisée selon les modalités de la norme **NF P 15-467** a donné les résultats qui suivent :

Tableau 10 : Composition chimique de la chaux.

Composition Chimique	Teneur (%)
SiO ₂	2.93%
AL ₂ O ₃	0.58%
CO ₂	9.15 %
Fe ₂ O ₃	0.23%
SO ₃	0.25%
K ₂ O	0.10%
Na ₂ O	0.09%

Teneur en CaO = 72.27% > 50%.

Teneur en MgO = 0.30% ≤ 6%.

Il s'agit donc d'une chaux qui vérifie bien les spécifications de la norme **NF P 98-101 1991 [9]** (voir tableau 1).

IV.2. ETUDE DE FORMULATION :

Étude la formulation consiste à étudier les performances du sol traité pour différents dosages en agents de traitement, dans la plage de teneurs en eau prévisibles sur chantiers. Les résultats des études de formulation se traduisent par des abaques donnant, en fonction de l'état hydrique constaté à l'exécution, les dosages en agent de traitement à appliquer à un sol pour atteindre les caractéristiques recherchées (portance, compacité, etc.).

L'étude est composée de plusieurs étapes :

1. surveiller par l'essai de limite d'Atterberg le progrès de modification à différents pourcentages de chaux et à différents temps.
2. sur des matériaux non traités, détermination de :
 - ✦ la courbe Proctor Modifié (cinq points au minimum).
 - ✦ l'indice de portance (CBR pour l'application en couche de forme ou/ en couche de fondation) sur des éprouvettes ayant servi à l'établissement de la courbes Proctor.
3. pour des dosages différents en agent de traitement, cinq (5) teneurs en eau sont choisies dans la plage attendue lors du chantier, 24h après malaxage, avec conservation en étui étanche, des échantillons compactés à l'énergie PM.
4. l'indice CBR immédiat est mesuré après compactage sur chacune des éprouvettes compactées.
5. l'indice CBR imbibé est mesuré après immersion de chacune des éprouvettes compactées.
6. mesure de gonflement.

L'étude de formulation permet de :

- ✦ fixer la quantité d'agent de traitement à utiliser.
- ✦ la fourchette de teneur en eau dans laquelle le traitement peut s'effectuer.
- ✦ fixer la densité après compactage.
- ✦ vérifier les paramètres de :
 - ❖ la portance immédiate.
 - ❖ la portance après imbibition.
 - ❖ la résistance du sol en immersion.

IV.2.1. Essais Mécaniques :

IV.2.1.1. Préparation des échantillons :

La préparation des échantillons est faite pour la détermination concomitante des caractéristiques de compactage et l'indice CBR immédiat / imbibé (après immersion). L'échantillon de kaolin est desséché à l'étuve pendant 24 h à température $T = 105^{\circ}\text{C}$, ensuite pulvérisé par écrasement à l'aide d'un maillet sans briser les solides. L'échantillon de kaolin séché et éventuellement tamisé à un tamis d'ouverture égale à 20 mm est répandu dans un bac d'homogénéisation, ensuite l'échantillon est divisé en cinq (5) parts identique dans chaque part $M = 3.500 \text{ Kg}$. Chacune de ces cinq parts est humidifiée à une teneur en eau telle que :

- ✦ les teneurs en eaux de trois (3) parts et quatre parts au plus se situent dans l'intervalle.
- ✦ l'écart entre deux teneurs en eau de deux parts successives soit approximativement constant.

L'humidification de chacune des parts pratiquées après l'homogénéisation de l'échantillon constitue la phase la plus délicate de l'essai, deux difficultés peuvent se présenter :

❖ Choix des teneurs en eau :

Etant donné que l'on ne connaît pas la W_{OPT} du matériau, on doit donc envisager une détermination de la courbe Proctor. on choisit cinq teneurs en eau équidistantes telles que W_{OPT} soit située entre celles-ci.

Soit :

$$W_1 = 27\%, W_2 = 29 \%, W_3 = 31, W_4 = 33\%, W_5 = 35\%.$$

❖ **Les modalités d'incorporation de l'eau au sein du matériau :**

L'incorporation de l'eau au sein du matériau doit se faire très lentement à l'aide d'un pulvérisateur et en maintenant le malaxage (malheureusement le malaxage est fait manuellement pendant l'introduction de l'eau (voir photos 3)).



PHOTO 3 : Introduction de l'eau au sein du matériau lors de malaxage

Après introduction de l'eau et constatation visuelle d'une stabilisation du comportement du matériau sous l'action du malaxage; il est introduit dans des sachets étanches et conservés pendant 24 h pour permettre la diffusion de l'eau dans le matériau (voir photos 4).



PHOTO 4 : Conservation du matériau dans des sachets étanches.

IV.2.1.1. a. Essai de compactage : (Essai Proctor Modifié)

L'essai a été réalisé selon les prescriptions de la norme **NF P 94-093** (voir photo 5) Le moule standard C.B.R est constitué de :

- ✦ un moule cylindrique en métal de 152 mm de diamètre intérieur et de 152 mm de hauteur.
- ✦ une embase amovible perforée qui se fixe à l'une ou l'autre extrémité du moule.
- ✦ une hausse amovible qui s'adapte à la partie supérieure d'un moule.
- ✦ un disque d'espacement de 25,5mm de hauteur destiné à constituer un double fond pour le moule pendant le compactage.
- ✦ une dame.

- masse tombante de 4,5 kg.
 - hauteur de chute 0,458m.
- ✦ une plane pour araser la face supérieure de l'échantillon compacté.



PHOTO 5 : Compactage du matériau dans le moule CBR

IV.2.1.1. b. Essai de portance C.B.R :

L'essai a été réalisé selon les prescriptions de la norme **NF P 94-078**.

❖ Appareillage :

Presse hydraulique de capacité de 60 KN : Cette machine de grande capacité entre colonnes est destinée aux essais sur matériaux tendres et particulièrement aux sols. **Presse C.B.R munie d'un indicateur de cadence :** L'indicateur de cadence permet de suivre et de corriger les déplacements du plateau d'une presse commandé manuellement lorsqu'on veut faire des essais de vitesse constante. Il est spécialement étudié pour exécuter l'essai C.B.R. à 1.27 mm/minute. L'indicateur de cadence est constitué par un moteur autodémarrreur qui entraîne à 1.27 tour / minute, un cadran transparent muni de deux traits colorés. Un comparateur au 1/100° dont la touche repose sur le plateau prend place derrière ce cadran. pour obtenir la vitesse désirée, l'opérateur manœuvre la commande de presse de telle façon que l'aiguille reste toujours entre les deux traits tournants, le moteur électrique fonctionne sur courant alternatif monophasé 220 V .

IV.2. 1.1.b.1. Exécution de l'essai :

Amener les 3.500 Kg × 5 du matériau à leur optimum Proctor défini par l'essai de compactage puis choisit dans ce cas quatre (4) teneurs en eau qui enveloppent la teneur en eau optimum :

$$W_{OPM}; W_{OPM \pm 2}; W_{OPM \pm 4}$$

Mouiller le matériau et le malaxer, ensuite le mettre dans des sacs étanches pendant 24h.

1. Compacter avec l'énergie de Proctor Modifiée. A la fin de compactage de la couche

- supérieure qui doit dépasser la hausse de 10 mm au minimum.
2. Enlever la hausse et araser le surplus (voir la photo 6).
 3. Placer le papier filtre sur la surface arasée
 4. Dévisser et retirer la base perforée et la placer à la partie supérieure du moule, visser.
 5. Retourner l'ensemble.
 6. Retirer le disque d'espacement à l'aide de la béquille.
 7. Peser l'ensemble moule + matériau.



PHOTO 6 : Surplus du matériau à araser

IV.2. 1.1.b.2. Indice C.B.R immédiat :

On pose l'ensemble plaque de bas – moule - éprouvette sur la presse en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et on procède au poinçonnement de la manière suivante :

- Approcher la face supérieure de l'éprouvette vers le piston, à l'aide des dispositifs prévus sur la presse jusqu'à ce que le piston vienne affleurer le matériaux.

- Régler la mise à zéro du dispositif dynamométrique et celle du comparateur mesurant l'enfoncement du poinçon.
- Exécuter le poinçonnement (voire photo 7).
- Noter les efforts de poinçonnement correspondant aux enfoncements suivants :

0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 6, 7, 8, 9, et 10.

- Décharger la presse, retirer les surcharges et le moule, peser le contenu (L'échantillon), prendre (2) petits échantillons sur le dessus à l'endroit poinçonné pour faire un essai de teneur en eau (voir le photo 8).



**PHOTO 7 : Dispositif utilisé pour le poinçonnement des éprouvettes
(Presse hydraulique)**



PHOTO 8 : Mesure des échantillons, après rasage

On reporte sur un graphique **effort-déformation**, les valeurs des forces de poinçonnement. L'indice recherché est par conversion la plus grande des deux valeurs suivantes :

- Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (KN) $\times 100 / 13.35$
- Effort de pénétration à 5.0 mm d'enfoncement (KN) $\times 100 / 20$.

NB :

Les valeurs 13.35 et 20 KN sont respectivement les forces provoquant l'enfoncement du piston de 2.5 et 5 mm sur un matériau conventionnel. Cette procédure est répétée pour chaque couple de condition teneur en eau –masse volumique sèche considérée.

IV.2. 1.1.b.3. Essai d'imbibition et mesure du gonflement : (voir photo 9).

❖ **Appareillage :**

L'appareillage qui permet de mesurer le gonflement comprend :

- un trépied de comparateur qui s'adapte au moule (muni ou non de sa hausse) pendant l'essai de gonflement.
- un comparateur :
 - course 10mm.
 - précision 1/ 100° de mm.
- un plateau de gonflement constitué d'un disque plat perforé muni en son centre d'une tige à touche réglable.

Pour reproduire les conditions naturelles on sature l'échantillon sous la même charge que celle qui sera constitué par les couches superficielles et les ouvrages projetés. La surcharge sera dans tous les cas constituée par deux anneaux fondus de 2.25 Kg.

NB :

Après quatre (4) jours d'immersion ± 2 h on mesure la hauteur de gonflement Δh indiquée par le comparateur d'où :

$$g (\%) = (\Delta h / h) \times 100$$



PHOTO 9 : Immersion dans l'eau pendant 4 jours.

IV.2. 1.1.b.4. Indice C.B.R imbibé :

Après l'immersion et mesure de gonflement on extrait l'ensemble hors du bac d'immersion en observant un temps d'égouttage de 15 minutes puis on dépose le trépied le comparateur, les surcharges et le disque de gonflement. La même procédure que la détermination de l'indice C.B.R immédiat.

IV.2.2. Essai effectué sur le mélange (chaux - kaolin) :

Sur les mélanges nous avons procédé aux essais ci-après :

- Essai de limite de consistance (Atterberg).
- Essai CBR immédiat et imbibé avec une seule énergie de compactage.

Le mélange s'effectue par malaxage manuel de la manière suivante :

Tout d'abord, on procède à un prémalaxage à la truelle pour éviter que la chaux ne se colle aux parois du bac sans l'incorporation d'eau, puis on continue le malaxage tout en ajoutant de l'eau. Une fois le malaxage terminé, on met le mélange dans un sac étanche pendant 24h avant de réaliser les essais envisagés. La confection des éprouvettes s'est effectuée à l'énergie **Proctor Modifiée** dans le **Moule CBR**.

NB :

Le traitement de kaolin par la chaux a été réalisé dans les proportions variant de **1% à 7%** pour :

- Essai de consistance (limite d'Atterberg) : le progrès de modification à été surveillé par l'essai de limite d'Atterberg (24, 48, 72h) après le mélange à la chaux.
- Essais de compactage.

Et dans les proportions variant de **1% à 12%** pour :

- Essai de portance (détermination de l'indice CBR immédiat et l'indice CBR imbibé) et essai de gonflement.

Les teneurs en eau sont les mêmes que pour les essais sans traitement c'est-à-dire :

$$W_{OPM}; W_{OPM \pm 2}; W_{OPM \pm 4}$$

CHAPITRE V : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

V.1. MELANGE KAOLIN - CHAUX ETEINTE (Ca (OH)₂) :

La chaux éteinte a été mélangée au kaolin à raison de (1, 2, 3,5 et 7 %), (3, 5,7 et 12%) et (1, 3, 5,7 et 12%). Les essais effectués sont :

- *Essais de limites d'Atterberg (1, 2, 3,5 et 7%).
- *Essais de compactage (1, 3,5 et 7%).
- *Essais CBR immédiats (3, 5, 7 et 12%).
- *Essais CBR imbibés (1, 3, 5, 7 et 12%) et
- *Essais de mesure de gonflement (1, 3, 5, 7 et 12%).

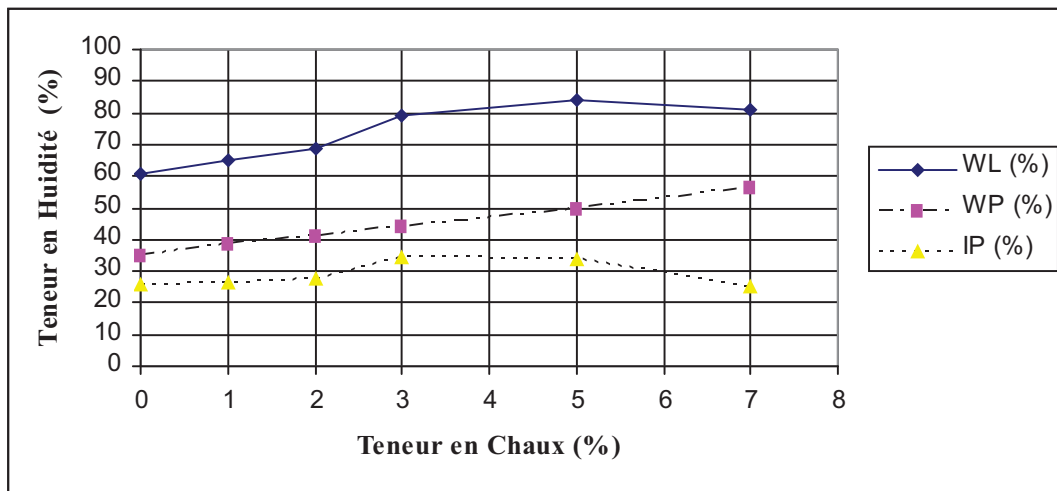
Nous présentons ci-après les résultats obtenus pour chaque essai et leurs interprétations.

V.1.1. Essais de limite d'Atterberg (de consistance) à différent temps :

Pour chaque teneur en chaux, nous avons effectué des mesures de limites d'Atterberg. Les tableaux ci-après indiquent les résultats obtenus.

**Tableau 11 : Limite de liquidité, limite de plasticité, Indice de plasticité au temps
t = 24h, t = 48h et t = 72h.**

Teneur en chaux (%)	t = 24 h			t = 48 h			t = 72 h		
	WL (%)	WP (%)	IP (%)	WL (%)	WP (%)	IP (%)	WL (%)	WP (%)	IP (%)
0	60.48	34.99	25.49	-	-	-	-	-	-
1	65.00	38.85	26.15	72.32	38.75	33.57	61.37	33.33	28.04
2	68.76	41.19	27.57	76.52	50.00	26.52	65.06	37.57	27.49
3	78.90	44.27	34.63	89.77	50.00	39.77	73.79	41.74	32.05
5	83.97	50.00	33.97	100.00	66.67	33.33	98.88	66.67	32.21
7	81.20	56.35	24.85	96.12	66.67	29.45	95.67	66.67	29.00



**Figure 13 : Effet du traitement à la chaux sur la consistance du kaolin
pour t = 24 h.**

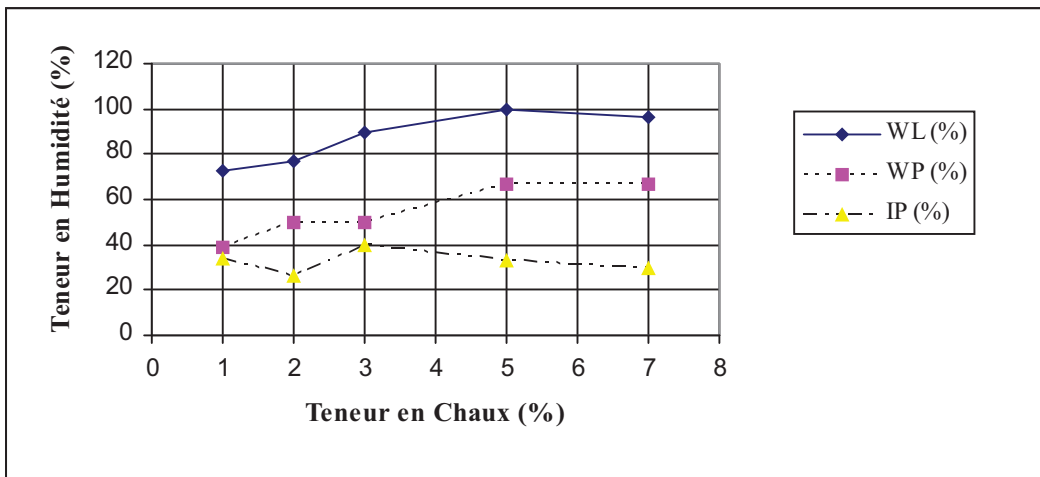


Figure 14 : Effet du traitement à la chaux sur la consistance du kaolin pour t = 48 h.

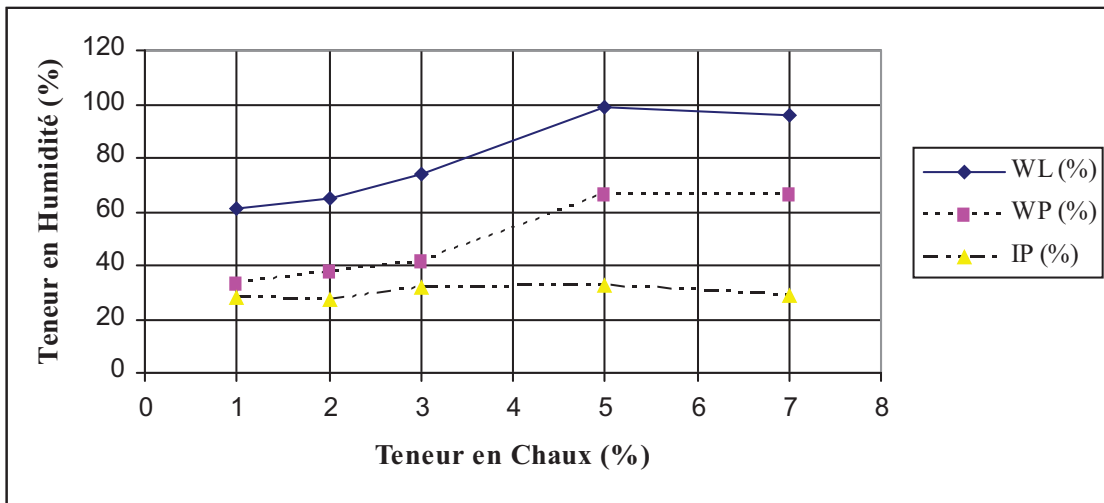


Figure 15 : Effet de traitement à la chaux sur la consistance du kaolin pour t = 72 h.

V.2. ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS :

Des changements de plasticité ont été obtenus après 24h, 48h et 72h tandis qu'une période de maturation de 24h était nécessaire pour la pleine modification. D'une façon générale la quantité de chaux requise pour modifier notre kaolin change de 1% à 5%, la pleine modification s'est produite avec 5% d'addition de chaux.

à t = 24h :

L'augmentation de 15% de limite plasticité et 32.49% de limite de liquidité ont comme conséquence une élévation de l'indice de plasticité PI (8.48%) à 5% d'addition de chaux. Au delà de 5% de chaux la limite de liquidité commence à diminuer par contre la limite de plasticité continue à augmenté, cela a influé directement sur la plasticité (IP) qui se trouve réduite.

D'après *Davidson et Handy (1960)*, [15] les ions de calcium de la chaux causent une réduction de la plasticité des sols cohérents; ainsi ils deviennent plus friable et plus faciles à travailler. Des quantités de chaux très petites sont exigées pour provoquer les changements de plasticité. Généralement la quantité requise change de 1 à 3% selon la quantité et le type de minéral d'argile dans le sol.

à t = 48h :

Les limites d'Atterberg changent avec la teneur en chaux est continue à augmenter jusqu'à l'addition de chaux de 5% où la limite de liquidité marque un maximum égale a 100%, et la limite de plasticité 66.67%. Au-delà de 5% de chaux la limite de liquidité diminue et la limite de plasticité reste inchangée, par conséquent l'indice de plasticité IP se trouve réduit.

à t = 72h :

La limite de liquidité et la limite de plasticité ont augmenté pour chaque contenu de Chaux. L'addition de 5% de chaux a élevé la limite de liquidité de 60.48% à 98.88%, mais au-delà de 5% la limite de liquidité se trouve réduite, par contre la limite de plasticité reste constante.

Concernant la limite de plasticité, elle cessera d'augmenter lorsque la teneur en chaux aura atteint un certain seuil. C'est le point de fixation de chaux [13].

On a découvert que la limite de liquidité et la limite de plasticité avaient augmenté pour chaque teneur en chaux, et au différent temps, cette augmentation varie de 1% à 5% mais des pourcentages plus grand a réduire la limite de liquidité par contre la limite de plasticité reste inchangé, ce qui a par conséquence une diminution de l'indice de plasticité IP ceci a été conclu pour être le point de la pleine modification.

Plusieurs auteurs reportent une réduction substantielle de plasticité (IP) pour des sols d'argile une fois mélangé a la chaux [23]. [24]. [25]. [26]. [27].

Notre kaolin a besoin de différentes périodes traitantes pour sa pleine modification. et comme les grands changements se produisent avec les petites additions de chaux (en général 5%) et que la majeure partie du changement se produit a moins de 48h, ce résultat peut d'être considéré comme importante de point de vue pratique.

V.3. ESSAI DE COMPACTAGE :

Pour chaque teneur en chaux, une série de cinq (5) éprouvettes compactées à l'énergie **Proctor Modifié** a été confectionnée , mais à des teneurs en eau variables.

$$\rho_h = M_h / V_t .$$

avec :

$$V_t = \pi D^2 h / 4 .$$

$$\rho_d = \rho_h / (1 + W) .$$

avec :

$$W = M_w / M_s .$$

$$M_w = M_t - M_s$$

Tableau 12 : Exemple de calcul de la masse volumique sèche (Essai Témoin).

W (%)	Mt (kg)	Mm (kg)	Mh (kg)	V (cm ³)	ρ_h (t/m ³)	N° bac	Mt (g)	Ms (g)	Mb (g)	W ¹ (%)	W ¹ moy (%)	ρ_d (t/m ³)
27	8.480	4.79	3.690	2297.26	1.606	1	11.40	10.30	6.30	27.50	28.04	1.255
						2	11.40	10.20	6.00	28.57		
29	11.210	7.365	3.845	2297.26	1.674	3	15.40	13.30	6.10	29.17	28.65	1.301
						4	14.40	12.60	6.20	28.13		
31	8.860	4.71	4.150	2297.26	1.806	5	13.70	11.80	5.70	31.15	30.57	1.384
						6	14.80	12.70	5.70	3.00		
33	11.480	7.365	4.115	2297.26	1.791	7	10.30	9.20	5.70	31.43	32.38	1.353
						8	11.80	10.40	6.20	33.33		
35	8.800	4.79	4.010	2297.26	1.746	9	13.80	11.90	6.30	33.93	35.15	1.292
						10	13.60	11.60	6.10	36.36		

NB :

- W (%) Teneur en eau initial (Teneur en eau de moulage)
- Mt (kg). Masse total humide. y compris le moule CBR.
- Mh (kg). Masse total humide du sol.
- Mm (kg). Masse de moule CBR vide.
- D(cm) Diamètre de moule CBR.
- V (cm³) Volume de moule CBR.
- ρ_h (t/m³) masse volumique apparent humide.
- Mt (g) Masse total de l'échantillon humide y compris le bac (après compactage).
- Ms (g) Masse de l'échantillon sec y compris le bac (après compactage).
- Mb (g) Masse de bac.
- Mw (g) Masse de l'eau (après compactage).
- W¹ (%) Teneur en eau (après compactage).
- W¹ moy (%) Teneur en eau moyenne (après compactage).
- ρ_d (t/m³) masse volumique sèche.

Tableau N°13 : Récapitulation des résultats de l'essai de compactage pour différents pourcentages de chaux .

W (%)	ρ_d (t/m ³)	ρ_d (t/m ³)	ρ_d (t/m ³)	ρ_d (t/m ³)	ρ_d (t/m ³)
	0%	1%	3%	5%	7%
27	1.255	1.231	1.245	1.207	1.253
29	1.301	1.267	1.315	1.310	1.268
31	1.384	1.305	1.333	1.320	1.308
33	1.353	1.347	1.333	1.348	1.319
35	1.292	1.236	1.215	1.299	1.294

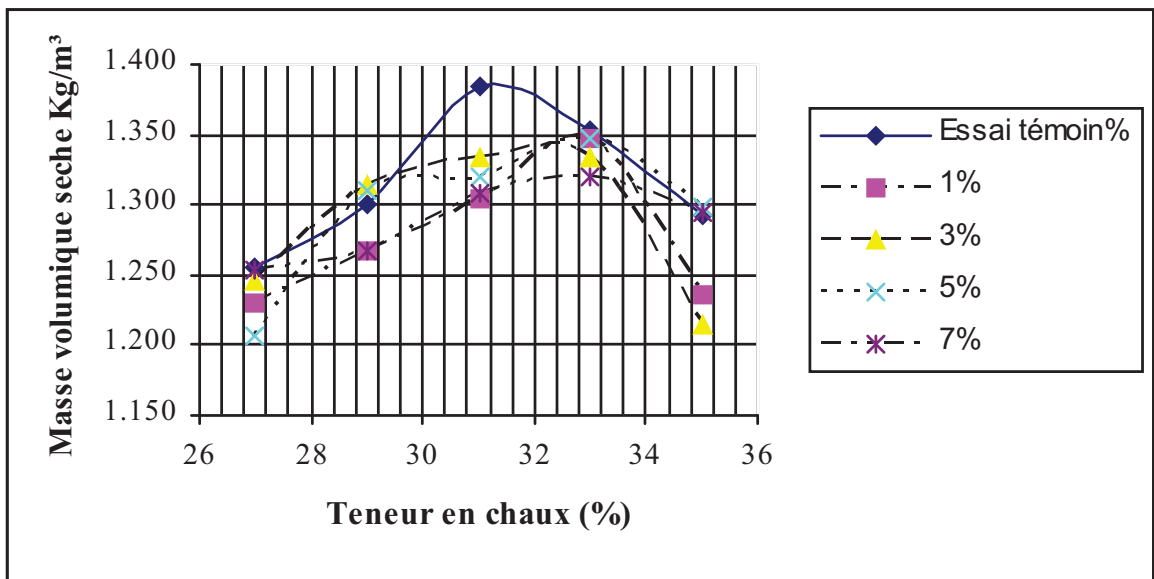


Figure 16 : Influence de l'addition de chaux sur les courbes de compactage du kaolin.

V.3.1. Analyse et discussion des résultats :

Nous commencerons notre analyse par la forme des courbes de la figure 16 ci-dessus. A mesure que les teneurs en eau augmentent, une pellicule d'eau de plus en plus épaisse se forme autour des particules, les lubrifie (les rend glissants) et facilite leur déplacement en les orientant de façon à former une structure plus dense et ce jusqu'à l'obtention d'une teneur en eau à laquelle le poids volumique ne peut plus augmenter. Lorsque cette limite est atteinte, l'eau remplace les particules dans le moule de volume donné et, comme $\rho_w \ll \rho_s$, la valeur de la masse volumique du matériau sec commence à diminuer .

V.3.1.1. Effet de la chaux sur les courbes de compactage du kaolin :

La figure 16 montre que la courbe Proctor du kaolin traité est déplacée vers la droite et vers le bas par rapport à la courbe du sol non traité (naturel), c'est-à-dire que le traitement à la chaux réduit la valeur maximale de la masse volumique sèche et augmente la valeur de la teneur en eau permettant de l'obtenir.

Plus de chaux fait diminuer la masse volumique sèche inférieure et augmenter la teneur en eau. On illustre cette conclusion par un exemple tiré de la figure 14. La courbe correspondant à 1% de chaux montre que toutes les masses volumiques sèches sont inférieures à celles de l'essai témoin, par contre toutes les teneurs en eau sont supérieures à celles de l'essai témoin.

ANDREWS et OFLAHERTY (1968) [28] soutiennent et affirment que la diminution de la masse volumique sèche était dépendante non seulement du pourcentage (%) de chaux, mais aussi de la présence élevée des minéraux d'argile, par exemple, la teneur en eau optimal augmente avec l'augmentation de la fraction d'argile et la masse volumique sèche maximum se trouve réduite.

L'addition de chaux modifie également les propriétés de compactages ; généralement une réduction de la masse volumique sèche maximum est obtenue par une augmentation de la teneur en chaux (avec l'augmentation de la teneur en eau optimum nécessaire pour obtenir la densité sèche maximum) [17], [18], [19].

L'addition de 7% de chaux a pour conséquence une baisse de plus de 4.7% en valeur de la masse volumique sèche maximum et une augmentation de 2% en valeur de teneur en eau optimum, ce déplacement des teneurs en eau vers des humidités plus grandes, permettant à des sols en état plus humide qu'original d'être rendus compacts, d'une manière satisfaisante et nous donne une plus grande latitude de mise en œuvre.

Lees et al (1982) [16] ont prouvé qu'au contenu d'argile de 30% et 50% l'addition de chaux a comme conséquence une baisse d'approximativement 5 % en valeur de densité sèche, en outre à une teneur plus élevée en eau, le mélange de sol - chaux tend à montrer une plus grande compactibilité que le sol non traité.

Le traitement à la chaux à aplatit la courbe de compactage assurant ainsi qu'un taux donné de la densité peut être envisagée peut être atteint sur un plus large étendue de en humidité (eau). En effet la qualité mieux est assurée par commande de teneur d'humidité que par des spécifications de densité sèche. Aussi l'optimum de la teneur en eau se déplace vers des valeurs plus élevées permettant aux sols plus humides que dans la condition d'origine d'être compacté de manière satisfaisante. [13]

Une plus grande quantité de chaux entraîne une masse volumique sèche maximum plus basse et une teneur en eau plus importante. Cependant, le gain de résistance dans le sol qui est normalement diminué a plutôt compensé les changements des optimums de compactage et celles-ci ne devraient pas être considérées comme inconvénient. [13]

En conclusion on peut dire que la chaux réagit efficacement avec notre kaolin.

V.4. ESSAI CBR IMMEDIAT :

Pour chaque teneur en chaux, une série de cinq (5) éprouvettes CBR compactées à l'énergie Proctor modifiée a été confectionnée, mais à des teneurs en eau variables. Les teneurs en eau de mouillage sont :

$$W_{OPM}, W_{OPM \pm 2\%}, W_{OPM \pm 4\%}.$$

NB : La teneur en eau de référence W_{OPM} correspond à la teneur en eau du matériau naturel c'est-à-dire sans chaux.

Tableau 14 : Essai de portance CBR Immédiat pour différents pourcentages de chaux ($W_{OPM-4}=27\%$)

Pénétration (mm)	E-T Charge (K N)	3% Charge (K N)	5% Charge (K N)	7% Charge (K N)	12% Charge (K N)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	3.05	4.25	4.15	4.00	2.20
1.00	5.55	7.00	6.10	6.95	4.70
1.50	7.30	8.80	7.85	9.00	7.30
2.00	8.65	9.95	9.15	10.25	9.00
2.50	9.75	11.20	9.85	11.40	10.25
3.00	10.55	11.80	10.65	12.25	11.25
3.50	11.35	12.80	11.30	13.15	12.10
4.00	12.00	13.45	12.05	14.00	12.90
4.50	12.55	14.25	12.70	14.70	13.75
5.00	13.17	14.80	13.25	15.50	14.30
6.00	14.40	16.00	14.30	16.75	15.70
7.00	15.40	16.95	15.20	17.75	17.00
8.00	16.30	17.80	16.15	18.75	18.00
9.00	17.21	18.50	17.00	19.55	19.10
10.00	17.80	19.25	17.65	20.30	20.20

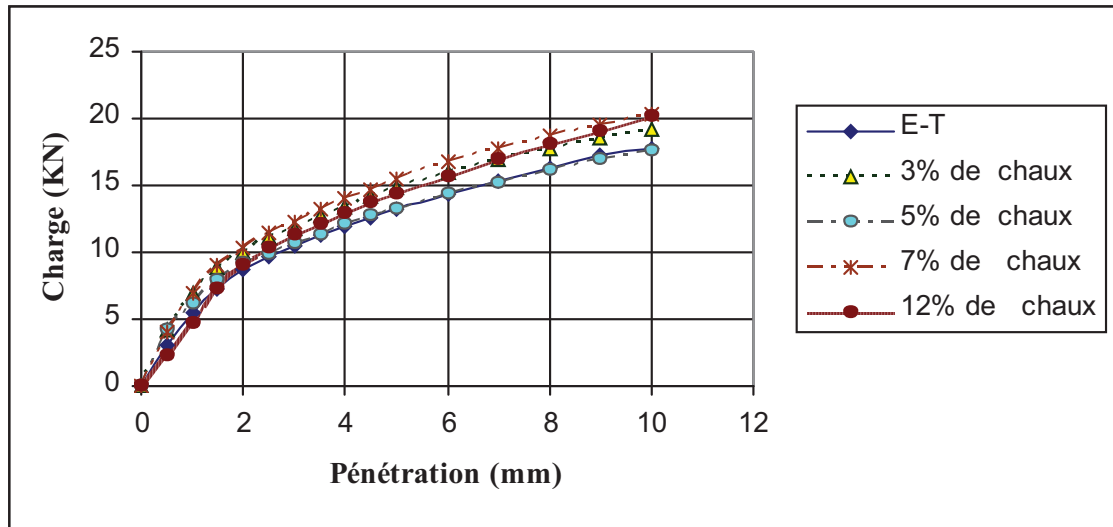


Figure 17 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Immédiat) du kaolin (W_{OPM-4}=27%).

Tableau 15 : Essai de portance CBR Immédiat pour différents pourcentages de chaux (W_{OPM-2}=29%)

Pénétration (mm)	E-T Charge (K N)	3% Charge (K N)	5% Charge (K N)	7% Charge (K N)	12% Charge (K N)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	4.81	3.80	4.45	5.00	4.85
1.00	7.00	6.40	7.20	7.30	9.45
1.50	8.50	8.20	9.30	8.95	11.50
2.00	9.50	9.50	10.75	9.90	12.85
2.50	10.35	10.50	11.90	11.00	14.00
3.00	11.21	11.40	12.55	11.70	14.90
3.50	11.77	12.00	13.25	12.40	16.00
4.00	12.30	12.50	14.00	13.00	16.20
4.50	13.00	13.30	14.50	13.80	17.30
5.00	13.50	13.90	15.00	14.30	18.05
6.00	14.50	14.90	15.75	15.30	19.55
7.00	15.25	15.60	16.50	16.30	20.70
8.00	16.15	16.40	16.80	16.70	22.10
9.00	16.65	17.10	16.20	17.70	22.90
10.00	17.25	17.90	14.85	18.30	24.90

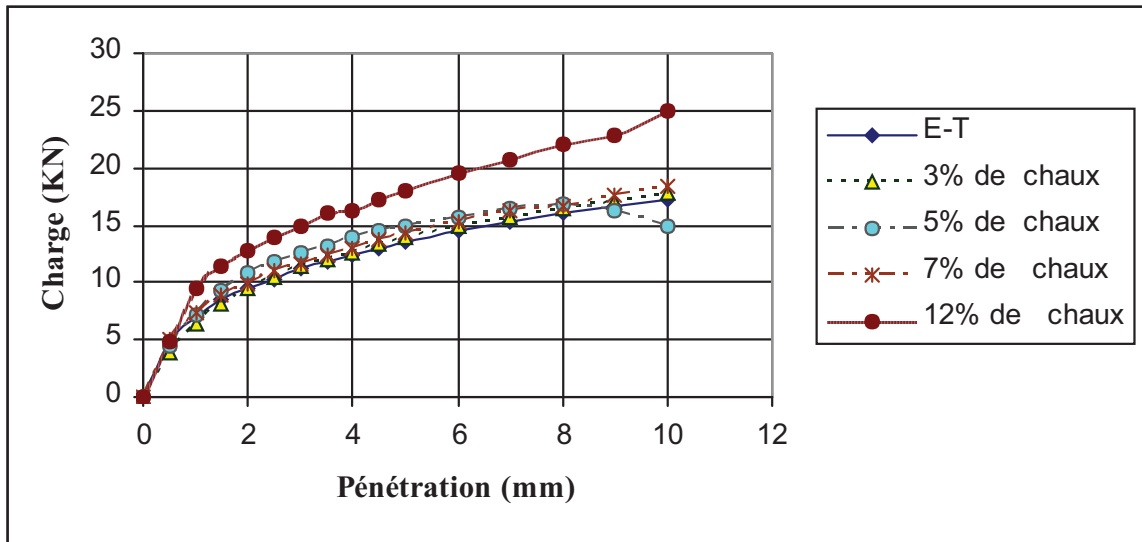


Figure 18 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Immédiat) du kaolin ($W_{OPM-2}=29\%$)

Tableau 16 : Essai de portance CBR Immédiat pour différents pourcentages de chaux ($W_{OPM}=31\%$)

Pénétration (mm)	E-T Charge (K N)	3% Charge (K N)	5% Charge (K N)	7% Charge (K N)	12% Charge (K N)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	1.00	5.30	2.50	3.30	5.70
1.00	3.20	6.50	4.50	5.45	9.00
1.50	4.90	7.45	5.80	7.00	11.10
2.00	5.80	8.20	7.00	8.20	12.15
2.50	6.90	8.70	7.90	9.00	13.50
3.00	7.60	9.00	8.50	9.80	14.30
3.50	8.10	9.25	9.00	10.40	15.20
4.00	8.50	9.50	9.40	10.90	15.85
4.50	9.10	9.55	9.90	11.30	16.55
5.00	9.50	9.70	10.20	11.50	17.20
6.00	10.20	9.65	10.50	11.75	18.25
7.00	10.40	9.50	10.60	11.30	19.30
8.00	10.50	9.25	10.40	10.80	20.30
9.00	10.60	9.20	10.10	10.60	21.25
10.00	11.00	9.20	9.85	10.55	21.70

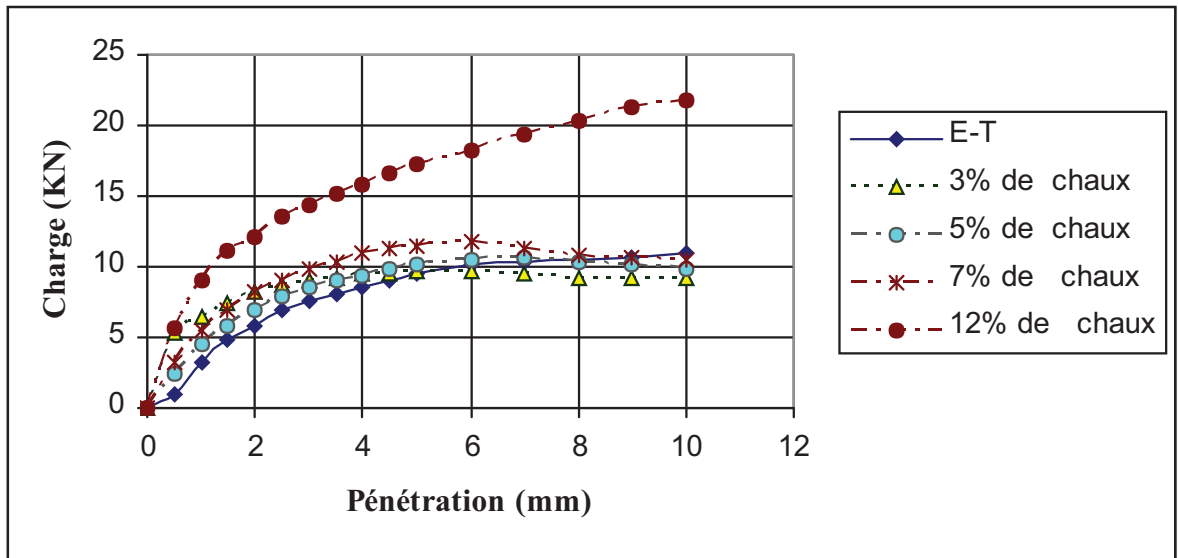


Figure 19 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Immédiat) du kaolin ($W_{OPM}=31\%$)

Tableau 17 : Essai de portance CBR Immédiat pour différents pourcentages de chaux ($W_{OPM+2}=33\%$)

Pénétration (mm)	E-T Charge (K N)	3% Charge (K N)	5% Charge (K N)	7% Charge (K N)	12% Charge (K N)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	0.50	0.20	1.20	0.17	5.25
1.00	0.77	0.42	2.50	2.25	6.80
1.50	1.20	0.50	3.60	3.60	8.10
2.00	1.60	0.75	4.50	4.50	8.85
2.50	2.00	0.98	5.20	5.20	9.70
3.00	2.30	1.10	5.60	5.60	10.25
3.50	2.60	1.32	6.00	6.10	10.75
4.00	2.80	1.50	6.50	6.50	11.20
4.50	3.05	1.60	6.80	6.90	11.70
5.00	3.21	1.80	7.10	7.20	11.90
6.00	3.50	2.00	7.60	7.50	12.10
7.00	3.77	2.18	8.00	7.75	12.25
8.00	4.05	2.42	8.20	7.85	12.00
9.00	4.25	2.50	8.30	8.00	11.75
10.00	4.45	2.72	8.40	8.20	11.50

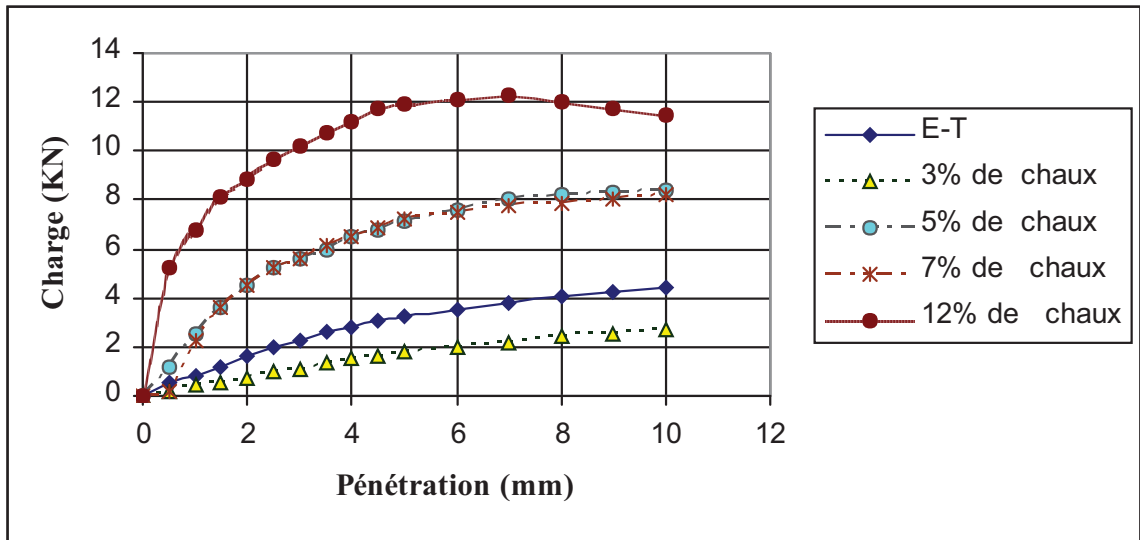


Figure 20 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Immédiat) du kaolin ($W_{OPM+2}=33\%$).

Tableau 18: Essai de portance CBR Immédiat pour différents pourcentages de chaux ($W_{OPM+4}=35\%$)

Pénétration (mm)	E-T Charge (K N)	3% Charge (K N)	5% Charge (K N)	7% Charge (K N)	12% Charge (K N)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	0.05	0.10	0.50	0.65	2.20
1.00	0.10	0.22	0.90	1.45	2.80
1.50	0.15	0.40	1.15	2.20	4.00
2.00	0.18	0.50	1.40	3.30	5.00
2.50	0.20	0.62	1.65	3.45	5.55
3.00	0.21	0.70	1.80	3.80	6.15
3.50	0.23	0.75	2.10	4.30	6.75
4.00	0.24	0.92	2.25	4.55	7.20
4.50	0.24	1.00	2.40	4.90	7.75
5.00	0.24	1.05	2.50	5.10	8.15
6.00	0.25	1.18	2.85	5.60	8.80
7.00	0.24	1.35	3.00	5.97	9.45
8.00	0.20	1.50	3.30	6.40	10.00
9.00	0.18	1.54	3.60	6.75	10.30
10.00	0.16	1.60	3.80	7.00	10.50

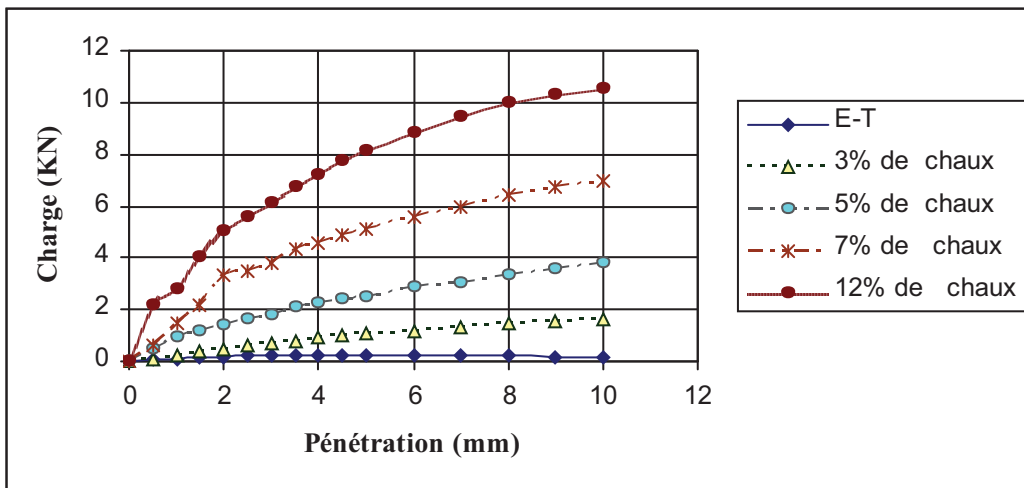


Figure 21 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Immédiat) du kaolin ($W_{OPM+4}=35\%$)

Tableau 19 : Exemple de calcul (Indice CBR Immédiat; Essai Témoin).

Essai Témoin	F1 (kN) 2.5mm	F2 (kN) 5mm	Effor/Péné à 2.5mm (kN)	Effor/Péné à 5mm (kN)	Indice CBR imm1	Indice CBR imm2	Indice CBR imm sup (1,2)
w=27%	13.35	20	9.75	13.17	73.03	65.85	73.03
w=29%	13.35	20	10.35	13.50	77.53	67.50	77.53
w=31%	13.35	20	6.9	9.60	51.69	48.00	51.69
w=33%	13.35	20	2	3.21	14.98	16.05	16.05
w=35%	13.35	20	0.2	0.24	1.50	1.20	1.50

NB :

F1= Effort de pénétration à 2.5 mm

F2= Effort de pénétration à 5 mm

Effor / Péné = Effort / Pénétration

Indice CBR imm1 = Indice CBR immédiat 1

Indice CBR imm2 = Indice CBR immédiat 2

Indice CBR imm. sup. (1,2) = Indice CBR immédiat supérieur (1, 2).

Tableau 20 : Récapitulation des résultats de l'essai de portance CBR Immédiat

Avec : $W_{OPM}=31\%$ et $\rho_d^* = 1.384 \text{ t / m}^3$.

(% de Chaux	WOPM - 4 =27 %			WOPM - 2 =29 %			WOPM = 31 %		
	I CBR imm	W* (%)	ρ_d^* Mg/m ³	I CBR imm	W* (%)	ρ_d^* Mg/m ³	I CBR imm	W* (%)	ρ_d^* Mg/m ³
0	73.03	26.16	1.306	77.53	28.70	1.320	51.69	30.16	1.375
3	84.59	28.87	1.306	79.31	29.45	1.335	65.71	30.58	1.360
5	73.78	27.53	1.331	89.14	30.14	1.323	59.18	31.39	1.353
7	85.39	24.47	1.298	82.40	30.91	1.299	67.42	31.18	1.316
12	76.78	26.88	1.276	104.87	29.86	1.325	101.12	28.66	1.323

(% de Chaux	WOPM +2 = 33 %			WOPM +4 =35 %		
	I CBR imm	W* (%)	ρ_d^* Mg/m ³	I CBR imm	W* (%)	ρ_d^* Mg/m ³
0	16.05	32.63	1.367	1.50	36.72	1.270
3	9.03	33.42	1.297	5.27	37.32	1.247
5	38.98	31.53	1.339	12.50	34.93	1.287
7	38.95	32.38	1.320	25.84	34.85	1.296
12	72.66	31.26	1.324	41.57	34.39	1.294

Tableau 21 : Récapitulation des résultats de l'Indice CBR Immédiat pour différents pourcentages de chaux .

Chaux (%)	I CBR Imm W*(27 %)	I CBR Imm W*(29 %)	I CBR Imm W*(31 %)	I CBR Imm W*(33 %)	I CBR Imm W*(35 %)
0	73.03	77.53	51.69	16.05	1.50
3	84.59	79.31	65.71	9.03	5.27
5	73.78	89.14	59.18	38.98	12.50
7	85.39	82.40	67.42	38.95	25.84
12	76.78	104.87	101.12	72.66	41.57

NB :

W* = teneur en eau de mélange kaolin - chaux (après écrasement)

ρ_{d*} = masse volumique sèche (d'écrasement).

I.CBR imm. = l'indice CBR immédiat.

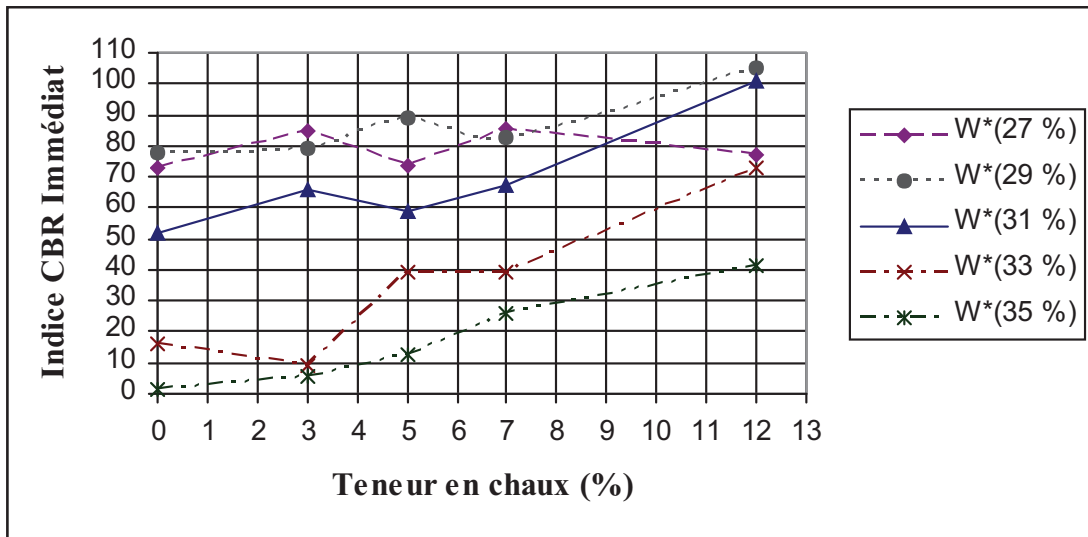


Figure 22 : Influence de l'addition de chaux sur les courbes de l'Indice CBR Immédiat avec différents teneurs en eau.

V.4.1. Analyse et discussion des résultats :

V.4.1.1. Influence de la teneur en eau de compactage sur le CBR Immédiat (E T) :

✦ Pour une teneur en eau inférieure à la teneur en eau W_{OPM} , l'échantillon montre une très grande résistance au poinçonnement qui est exprimée par l'indice CBR d'où :

à $W = 27\%$ $I_{CBR\ imm} = 73.03$.

$W = 29\%$ $I_{CBR\ imm} = 77.53$.

✦ Pour une teneur en eau égale à la teneur en eau W_{OPM} , la résistance de l'échantillon commence à diminuer pour donner un indice CBR ($W_{OPM} = 31\%$).

$I_{CBR\ imm} = 51.69 < \text{Indice } I_{CBR\ imm} (W = 27\%, 29\%)$.

✦ Au-delà de la teneur en eau W_{OPM} , on observe une chute remarquable de résistance :

à $W = 33\%$ $I_{CBR\ imm} = 16.05$.

$W = 35\%$ $I_{CBR\ imm} = 1.50$.

On conclue que la portance (résistance) du kaolin varie selon que celui-ci est sec au humide, donc la présence d'eau dans le kaolin fait baisser sa cohésion et par conséquent ses performances mécaniques notamment la portance qui est exprimée par l'Indice $I_{CBR\ imm}$. Donc le paramètre « teneur en eau » a une influence directe sur la portance du kaolin.

V.4.1.2. Influence du dosage en chaux sur le CBR immédiat :

D'après les courbes de la figure 22 on remarque que :

✦ pour les échantillons du kaolin compacté au coté sec de l'optimum

($W_{27\%} < W_{29\%}$) on a :

Le kaolin se comporte comme un solide, ce qui explique la grande résistance traduite par l'indice $I_{CBR\ imm}$ obtenu. L'effet de l'addition de chaux n'est pas très significatif. à

$W = 27\%$ (essai témoin) l'indice $CBR_{imm} = 73.03$, après addition de chaux jusqu'au 12% et à la même teneur en eau l' $ICBR_{imm}$ devient égale à $= 76.78$, donc une légère augmentation. Ce dernier ne réagit qu'en présence d'un optimum d'humidité.

Pour les résultats de l'indice CBR_{imm} : à $W = 27\%$ et $W = 29\%$ qui ont subi une perturbation, on peut expliquer cette perturbation (augmentation et diminution) comme suit :

On sait que notre échantillon après tamisage (à travers le tamis $\emptyset \leq 20$ mm), contient des pourcentages des grains de différentes dimensions variant de 20mm jusqu'au $2\mu m$. Cette variété de dimensions a une influence directe sur les résultats de l'essai CBR et notamment sur l' $ICBR_{imm}$.

Lors du mélange chaux - kaolin, le kaolin contient parfois un pourcentage élevée de gros diamètres et par conséquent de faible réaction entre la chaux et le kaolin, c'est à dire une grande quantité de chaux restent sans réaction, en plus cette quantité peut jouer un rôle néfaste sur les résultats de l' $ICBR_{imm}$ puisque d'après: [13].la chaux elle même n'a ni le frottement appréciable ni la cohésion. Cette dernière est un facteur majeur de la résistance du sol mais , la résistance du sol rendu compact au dessus de la teneur en eau optimum , généralement peut être augmentée par davantage d'addition d'eau après compactage .

✦ pour les échantillons du kaolin compacté au coté humide de l'optimum

Le fait d'augmenter la teneur en eau, le degré de saturation devient élevé (grande plasticité, cohésion très faible); les pressions interstitielles deviennent trop fortes (pour qu'après compactage les grains de sol restent dans l'état où les à mis le compacteur, ces pressions interstitielles écartent les grains de sol les uns des autres, c'est à dire qu'elle décompactent) .

Notre kaolin est difficile à compacter (l'indice CBR_{imm} étant en diminution), mais avec l'addition de chaux dont le taux varie de 3% jusqu'au 12% la plasticité augmente

par la floculation qui par suite le domaine solide s'étend est le sol ainsi devient facile à compacté, se qui résultent une amélioration de résistance, par augmentation de portance qui est exprimée par l'ICBR immédiat.

Les résultats du tableau 21 montre bien que pour :

$W = 35\%$ (E T) l'indice $CBR_{imm} = 1.5$ augmente pour atteindre une très grande valeur à 12% de traitement de la chaux de plus de 27% de la valeur de l'ICBR imm = 41.57.

❖ D'après les courbes de la figure 22 on remarque une chute de l'ICBRimm pour différent teneur en eau. Cette chute est probablement dûe au fait que la chaux parfois n'est pas uniformément répartie au cours du malaxage manuel et au fait que se produit dans un environnement traitant non homogène (température, humidité,..).

En plus cette diminution serait due à l'échantillonnage kaolin : lorsque l'échantillon prélevé contient beaucoup de gros grains, la réaction chaux - kaolin est moins active que lorsque l'échantillon prélevé est plus fin.

✦ pour les échantillons du kaolin compacté à l'optimum, les résultats de l'ICBRimm sont intermédiaires.

❖ En présence des sols plastiques, on a constaté qu'un traitement à la chaux permet d'obtenir non seulement l'avantage d'un développement plus rapide des prestations mécaniques mais aussi une réduction du temps nécessaire pour atteindre une résistance suffisante à la présence d'humidité (eau élevée).

Donc le paramètre teneur en eau a une influence majeure sur la résistance de notre kaolin.

- **Au-delà de W_{OPM} , la quantité de chaux nécessaire devient plus importante.**
- **Le CBR augmente juste après l'addition de chaux et continue à augmenter même au-delà de 12% de chaux.**

V.5. ESSAIS CBR IMBIBE :

Pour chaque teneur en chaux une série de cinq (5) éprouvettes compactées à l'énergie Proctor modifiée à des teneurs en eau correspondant à : W_{OPM} , $W_{OPM \pm 2\%}$, $W_{OPM \pm 4\%}$ a été confectionnée. La série a été imbibée durant 4 jours.

Les résultats des essais sont groupés dans les tableaux ci-après :

Tableau 22 : Essai de portance CBR Imbibé pour différents pourcentages de chaux ($W_{OPM-4}=27\%$)

Pénétration (mm)	E-T Charge (K N)	1% Charge (K N)	3% Charge (K N)	5% Charge (K N)	7% Charge (K N)	12% Charge (K N)
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.01	0.20	1.05	0.90	2.90	9.70
1.0	0.05	0.40	2.10	3.00	5.30	14.50
1.5	0.11	0.51	3.35	4.65	7.30	18.00
2.0	0.20	0.57	4.10	5.65	8.90	22.30
2.5	0.21	0.61	4.60	6.00	10.25	23.80
3.0	0.23	0.67	5.10	6.00	11.30	24.75
3.5	0.27	0.73	5.50	6.45	12.25	26.50
4.0	0.30	0.75	5.60	6.50	12.90	28.00
4.5	0.40	0.75	5.90	6.85	13.30	29.75
5.0	0.41	0.76	6.10	7.00	13.85	30.75
6.0	0.45	0.80	6.50	7.45	14.30	30.90
7.0	0.50	0.80	6.90	7.70	14.50	26.75
8.0	0.60	0.85	7.25	7.90	14.60	23.00
9.0	0.73	0.85	7.50	8.10	14.95	21.20
10.0	0.80	0.87	7.90	8.10	15.25	20.90

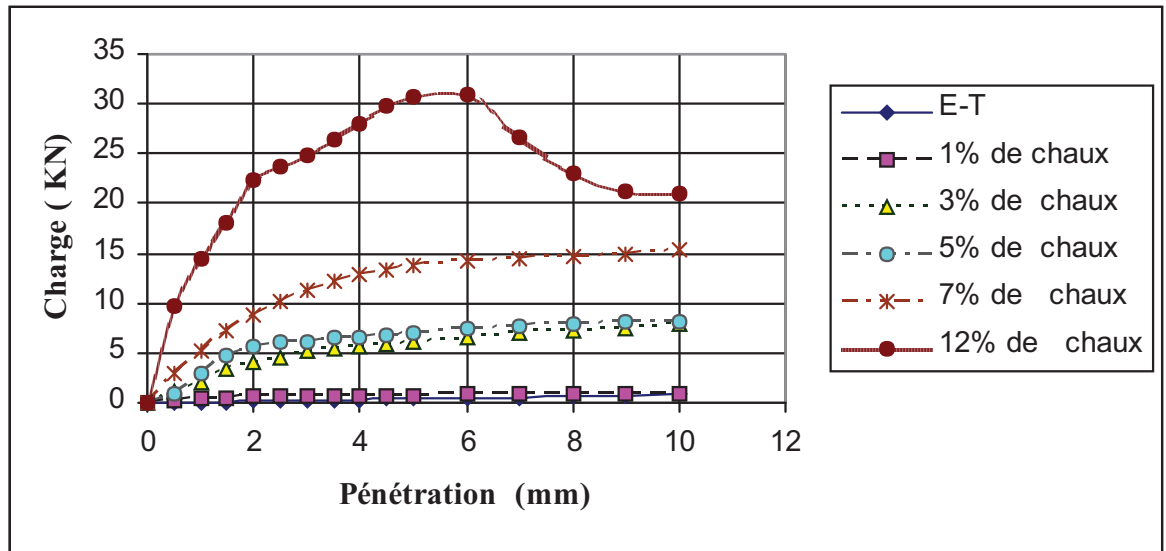


Figure 23 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Imbibé) du kaolin ($W_{OPM-4}=27\%$)

Tableau 23 : Essai de portance CBR Imbibé pour différents pourcentages de chaux ($W_{OPM-2}=29\%$)

Pénétration (mm)	E-T Charge (K N)	1% Charge (K N)	3% Charge (K N)	5% Charge (K N)	7% Charge (K N)	12% Charge (K N)
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.05	0.23	2.20	6.00	3.90	15.00
1.0	0.10	0.45	4.60	11.75	4.90	19.80
1.5	0.15	0.51	5.85	14.25	6.45	23.50
2.0	0.20	0.70	6.45	15.75	7.70	26.30
2.5	0.25	0.77	6.70	16.50	8.50	28.80
3.0	0.35	0.90	6.50	17.75	9.45	31.00
3.5	0.37	0.97	6.30	17.00	10.25	32.75
4.0	0.37	1.05	6.10	16.50	10.75	33.75
4.5	0.39	1.15	5.90	16.50	11.00	33.20
5.0	0.40	1.23	5.80	16.25	10.90	31.75
6.0	0.43	1.30	5.70	17.00	10.70	28.10
7.0	0.47	1.45	5.80	17.75	10.50	25.50
8.0	0.49	1.50	5.90	18.25	10.30	23.75
9.0	0.50	1.57	5.90	19.00	10.30	22.50
10.0	0.51	1.63	6.00	17.50	11.10	22.90

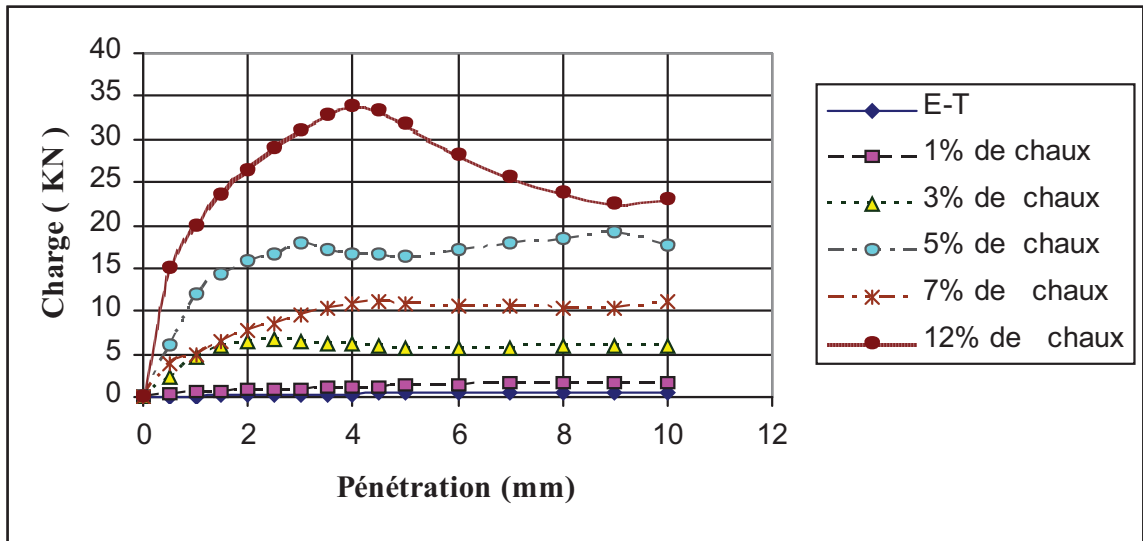


Figure 24 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Imbibé) du kaolin ($W_{OPM-2}=29\%$)

Tableau 24 : Essai de portance CBR Imbibé pour différents pourcentages de chaux ($W_{OPM}=31\%$)

Pénétration (mm)	E-T Charge (K N)	1% Charge (K N)	3% Charge (K N)	5% Charge (K N)	7% Charge (K N)	12% Charge (K N)
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.10	0.40	4.50	7.90	10.50	16.30
1.0	0.20	0.55	7.75	12.70	17.20	25.00
1.5	0.45	0.75	9.75	16.70	21.55	29.50
2.0	0.60	0.80	10.50	16.90	24.50	32.50
2.5	0.80	1.05	10.50	17.70	25.75	35.35
3.0	0.95	1.20	10.00	17.10	25.90	37.00
3.5	1.05	1.35	9.00	15.30	24.60	38.75
4.0	1.15	1.40	8.50	13.90	23.00	39.75
4.5	1.35	1.45	8.00	12.70	20.50	40.75
5.0	1.45	1.50	7.50	12.30	18.00	38.50
6.0	1.60	1.65	7.00	11.50	16.50	29.00
7.0	1.80	1.80	6.95	11.30	16.50	22.50
8.0	2.00	1.87	6.95	11.40	17.25	22.00
9.0	2.10	2.00	6.75	12.10	18.80	26.00
10.0	2.25	2.15	7.00	13.10	21.50	26.50

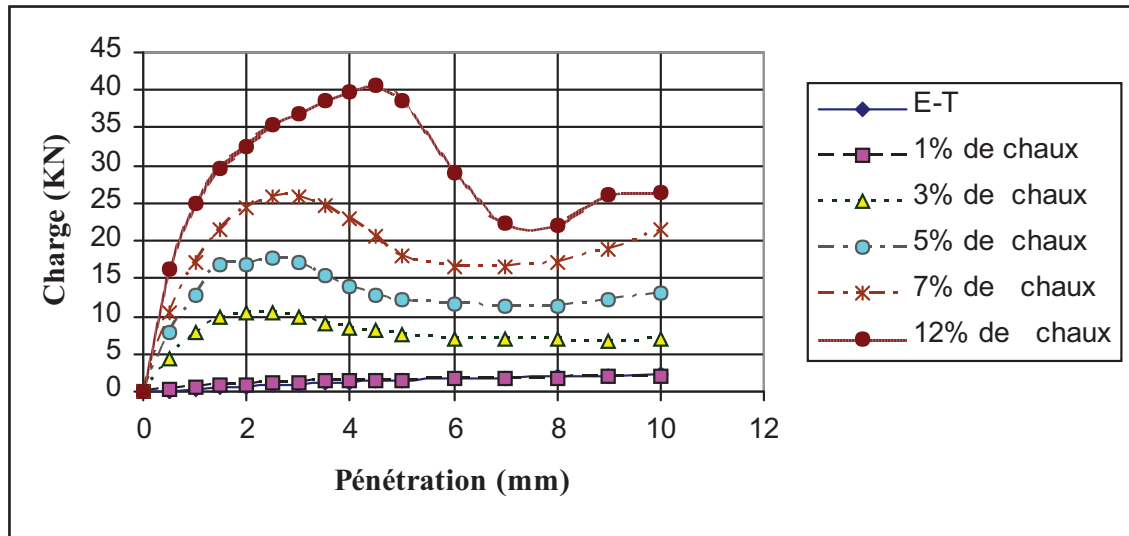


Figure 25 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Imbibé) du kaolin ($W_{OPM}=31\%$)

Tableau 25 : Essai de portance CBR Imbibé pour différents pourcentages de chaux ($W_{OPM+2}=33\%$)

Pénétration (mm)	E-T Charge (K N)	1% Charge (K N)	3% Charge (K N)	5% Charge (K N)	7% Charge (K N)	12% Charge (K N)
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.75	0.17	1.00	9.50	10.00	7.10
1.0	1.45	0.25	5.50	15.00	16.00	12.25
1.5	2.05	0.40	9.00	18.00	20.25	15.10
2.0	2.50	0.45	10.50	18.50	23.50	18.50
2.5	2.87	0.50	11.50	14.00	25.25	21.45
3.0	3.10	0.61	11.75	12.00	26.00	23.25
3.5	3.40	0.75	11.00	11.00	21.00	25.00
4.0	3.50	0.77	10.50	10.25	14.50	26.20
4.5	3.65	0.85	10.00	10.00	13.00	27.20
5.0	3.70	0.90	10.00	10.00	13.00	27.90
6.0	3.95	1.10	9.98	10.50	14.00	27.00
7.0	4.20	1.23	9.50	11.25	14.50	23.75
8.0	4.30	1.40	9.50	12.75	15.00	21.75
9.0	4.40	1.47	9.50	14.25	16.50	20.00
10.0	4.57	1.50	10.00	15.75	17.00	19.50

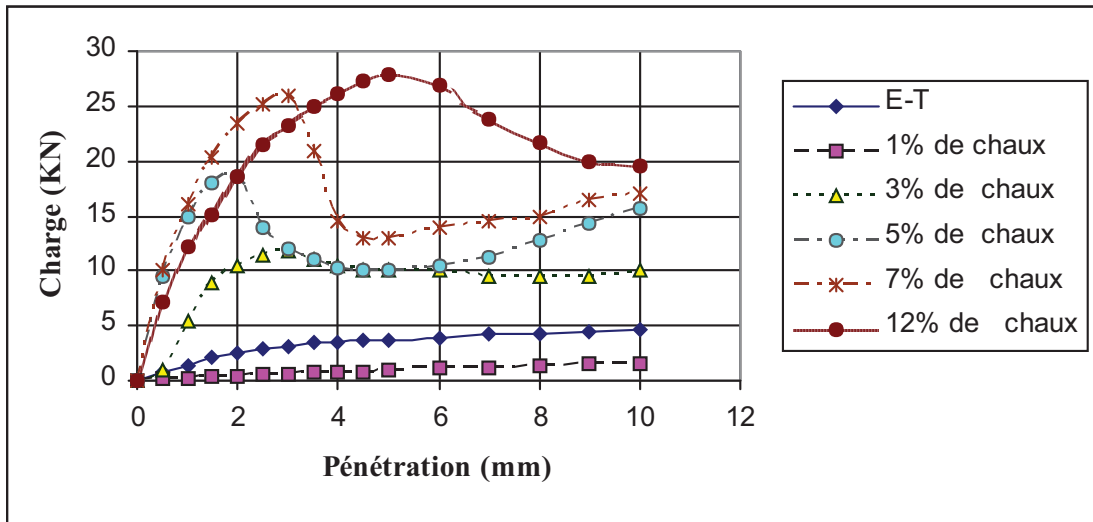


Figure 26 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Imbibé) du kaolin $W_{OPM+2}=33\%$)

Tableau 26 : Essai de portance CBR Imbibé pour différents pourcentages de chaux ($W_{OPM+4}=35\%$)

Pénétration (mm)	E-T Charge (K N)	1% Charge (K N)	3% Charge (K N)	5% Charge (K N)	7% Charge (K N)	12% Charge (K N)
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.10	0.17	0.10	2.70	3.70	5.75
1.0	0.15	0.20	0.20	5.40	7.10	20.00
1.5	0.20	0.23	0.25	7.30	10.90	29.15
2.0	0.25	0.25	0.35	8.00	13.25	33.50
2.5	0.30	0.25	0.45	9.75	15.30	36.00
3.0	0.35	0.27	0.47	10.60	16.35	37.50
3.5	0.40	0.35	0.53	11.50	17.30	36.00
4.0	0.45	0.35	0.55	11.80	17.25	32.50
4.5	0.50	0.35	0.63	12.20	16.10	28.50
5.0	0.50	0.37	0.70	12.25	14.30	26.50
6.0	0.50	0.43	0.80	12.20	13.75	23.50
7.0	0.50	0.45	0.80	12.00	12.25	22.90
8.0	0.50	0.45	0.90	12.10	12.27	23.80
9.0	0.55	0.47	0.90	12.05	12.30	28.50
10.0	0.55	0.50	0.97	11.90	12.60	32.50

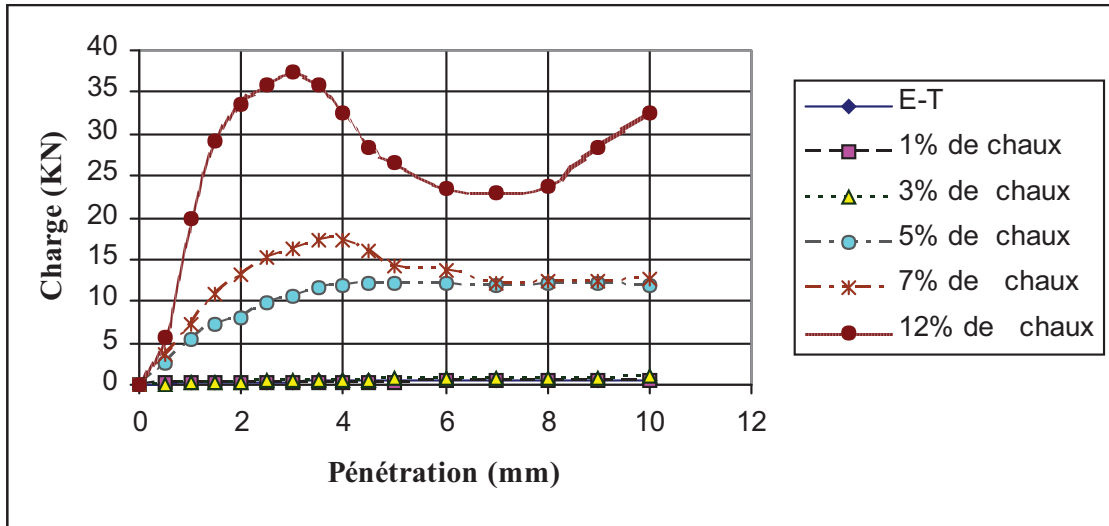


Figure 27 : Influence de l'addition de chaux sur la portance (CBR Imbibé) du kaolin $W_{OPM+4}=35\%$

Tableau 27 : Exemple de calcul (Indice CBR Imbibé; Essai Témoin)

Essai témoin	F1 (kN) 2.5mm	F2 (kN) 5mm	Effor / Péné à 2.5mm (kN)	Effor / Péné à 5mm (kN)	Indice CBR imb1	Indice CBR imb2	Indice CBR imb sup (1,2)
w=27%	13.35	20	0.21	0.41	1.57	2.05	2.05
w=29%	13.35	20	0.25	0.40	1.87	2.00	2.00
w=31%	13.35	20	0.8	1.45	5.99	7.25	7.25
w=33%	13.35	20	2.87	3.70	21.50	18.50	21.50
w=35%	13.35	20	0.3	0.50	2.25	2.50	2.50

NB :

F1= Effort de pénétration à 2.5 mm

F2= Effort de pénétration à 5 mm

Effor / Péné = Effort / Pénétration

Indice CBR imb1= Indice CBR imbibé 1

Indice CBR imb2= Indice CBR imbibé 2

Indice CBR imb sup (1,2) = Indice CBR imbibé supérieur (1, 2).

Tableau 28 : Récapitulation des résultats de l'essai de portance (CBR imbibé)
avec (WOPM =31 % et $\rho_d^* = 1.384 \text{ t/m}^3$).

(% de Chaux	WOPM - 4 =27 %			WOPM - 2 =29 %			WOPM = 31 %		
	I CBR imb	W** (%)	g (%)	I CBR imb	W** (%)	g (%)	I CBR imb	W** (%)	g (%)
0	2.05	39.51	3.381	2.00	37.57	3.942	7.25	34.35	1.671
1	4.57	38.30	2.076	6.15	38.66	2.660	7.87	37.04	0.043
3	34.46	34.78	1.367	50.19	36.10	0.468	78.65	33.87	0.078
5	44.94	34.12	1.305	123.60	34.04	0.435	132.58	37.60	0.024
7	76.67	31.06	1.461	63.67	36.00	1.611	192.88	33.33	0.033
12	178.28	33.01	0.562	215.73	33.31	0.235	264.79	32.59	0.141

(% de Chaux	WOPM +2 = 33 %			WOPM +4 =35 %		
	I CBR imb	W** (%)	g (%)	I CBR imb	W** (%)	g (%)
0	21.50	32.81	0.861	2.50	37.53	0.130
1	4.50	39.40	1.840	1.87	42.22	0.026
3	86.14	36.92	0.149	3.52	41.38	0.018
5	104.87	33.33	0.062	73.03	35.62	0.002
7	189.14	32.58	0.083	114.61	38.28	0.007
12	160.67	37.78	0.006	269.66	35.63	0.041

Tableau 29 : Récapitulation des résultats de l'Indice CBR Imbibé pour différents pourcentages de chaux .

% chaux	I CBR Imb W*(27 %)	I CBR Imb W*(29 %)	I CBR Imb W*(31 %)	I CBR Imb W*(33 %)	I CBR Imb W*(35 %)
0	2.05	2.00	7.25	21.50	2.50
1	4.57	6.15	7.87	4.50	1.87
3	34.46	50.19	78.65	86.14	3.52
5	44.94	123.90	132.58	104.87	73.03
7	76.78	63.67	192.88	189.14	114.61
12	178.28	215.73	264.79	160.67	269.66

NB :

I CBR imb. = l'indice CBR imbibé.

W** : Teneur en eau du mélange kaolin- chaux. (Après immersion).

g = représente le gonflement linéaire mesuré sur les éprouvettes durant l'imbibition.

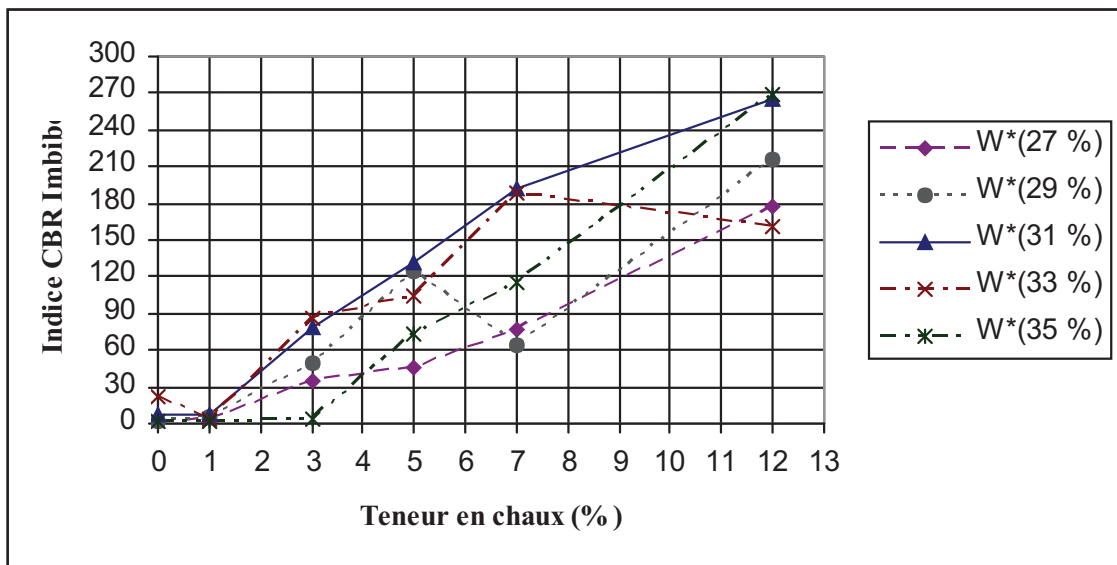


Figure 28 : Influence de l'addition de chaux sur les courbes de l'Indice CBR Imbibé avec différents teneurs en eau.

V.5.1. Analyse et discussion des résultats :

V.5.1.1. Influence de la teneur en eau sur le CBR Imbibé :

La résistance des sols argileux est un phénomène complexe, cependant pour comprendre ce phénomène plus facilement, il suffit de se rappeler que les échantillons compactés du côté secs de l'optimum sont plus résistants que les échantillons compactés du côté humides. Si les échantillons sont immergés, le comportement est modifié par le gonflement qui apparaît en particulier du côté sec, puisque l'argile sèche a une capacité considérable pour la prise d'humidité qui peut mener à une augmentation substantielle de volume. D'après la figure 28 on constate ce qui suit :

- ✦ pour les échantillons de teneurs en eau inférieure ou égale à la teneur en eau

W_{OPM} on remarque :

Une chute de résistance (Par comparaison avec les résultats de l'ICBR immédiat), cette dernière est due à l'absorption d'eau, puisque la saturation des échantillons de sol avec l'eau avant la détermination de la résistance (portance) simule certaines des plus mauvaises conditions auxquelles un sol peut être soumis.

- ✦ pour les échantillons de teneur en eau supérieur à la teneur en eau W_{OPM} on

remarque :

Pas de changement notable c'est à dire une légère variation si on la compare avec les résultats de l'ICBR immédiat. Donc l'immersion n'influe pas sur les échantillons déjà saturés.

On conclue que la teneur en eau est un facteur majeur sur le comportement mécanique, notamment la portance du sol avec ou sans immersion.

V.5.1.2. Influence de l'addition de chaux sur le CBR Imbibé (après immersion) :

La constatation générale est que toutes les courbes obtenues (avant apport de chaux) se situent au dessous de celle correspondant au sol ayant une teneur en eau égale à la teneur en eau $W_{OPM} = 31\%$ (voir tableau 28), ce qui laisse supposer que la portance la plus forte

sera obtenue pour des sols dont le degré d'imbibition avant l'incorporation de la chaux est proche de la teneur en eau W_{OPM} .

- ✦ L'allure des courbes de la figure 28 est presque identique.
- ✦ Les teneurs en eau après imbibition se situent entre 31% et 43% (voir le tableau 28) et elles sont décroissantes en fonction du dosage en chaux.

Les résultats obtenus (voir tableau 29) de la portance (exprimé par l'ICBR imbibé) indique que ce dernier augmente avec le dosage en chaux pour atteindre une valeur maximale à la teneur en eau W_{OPM} , et a un dosage égale a 12% de chaux (de I CBR imbibé = 7.25 à ICBRimbibé = 264.79).

- ✦ pour les échantillons de sol (kaolin) immergé du coté sec de l'optimum ($W_{27\%}$ et $W_{29\%}$ inférieure < a W_{OPM}) on a :
 - Une chute de résistance qui est dûe à la saturation des échantillons d'où on peut lire d'après *AL-RAWI, (1981)* la quantité de perte dans la force change mais une perte de plus de 50% dûe à la saturation [29].

Dès que la chaux est ajoutée au sol, une augmentation significative de portance (résistance) exprimée par l'ICBR imbibé (voir figure 28) pour différents teneurs en eau utilisée est constatée.

On constate que toutes les courbes obtenues ont tendance à accroître avec l'addition de la chaux, même à une teneur en eau élevée (voir l'allure de la figure 28).

D'après *Mateous (1964)* [26] Le CBR des sols argileux est amélioré par addition de chaux, en effet le CBR augmente juste après addition de la chaux et continue à augmenter avec le temps jusqu'au de point de fixation.

La portance du kaolin du coté humide est meilleure que du coté sec.

De ce qui précède on conclue que la réponse immédiate du kaolin à l'addition de chaux est que le mélange devient plus facilement travaillable (maniable) et facilement compactable donc plus résistant.

V.6. ESSAI DE GONFLEMENT :

Tableau 30 : Récapitulation de résultat de l'Essai de Gonflement pour différentes teneurs en eau et différents pourcentages en chaux.

Teneur de chaux en (%)	g(%)				
	W**=27%	W**=29%	W**= 31%	W**= 33%	W**=35%
0	3.381	3.942	1.671	0.861	0.130
1	2.076	2.660	0.043	1.840	0.026
3	1.367	0.468	0.078	0.149	0.018
5	1.305	0.435	0.024	0.062	0.002
7	1.461	1.611	0.033	0.083	0.007
12	0.562	0.235	0.141	0.006	0.041

NB:

W** : Teneur en eau du mélange kaolin – chaux. (Après immersion).

g = représente le gonflement linéaire mesuré sur les éprouvettes durant l'imbibition.

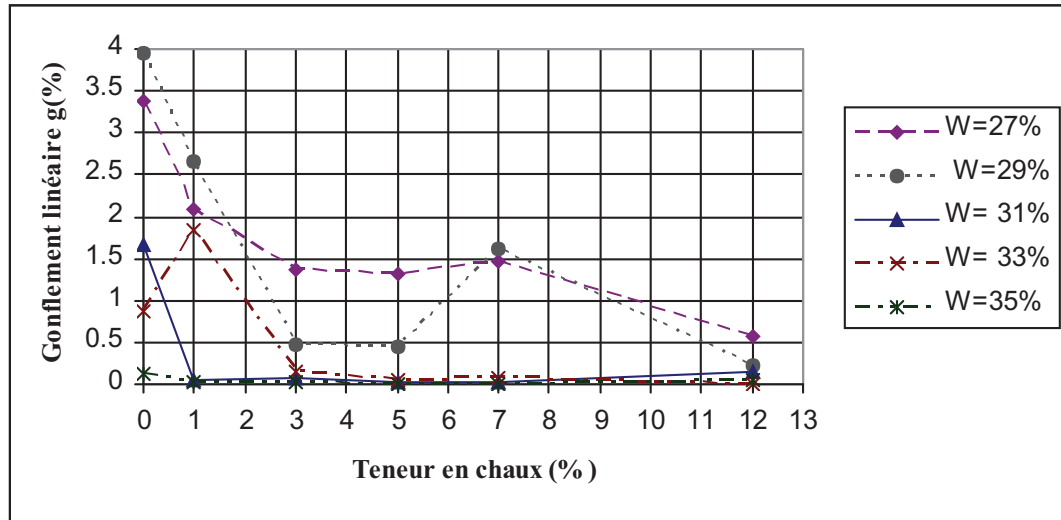


Figure 29 : Influence de l'addition de chaux sur le gonflement, pour différents teneurs en eau.

V.6. 1. Analyse et discussion des résultats :

V.6.1.1. Influence de la teneur en eau sur le gonflement :

Suivant la teneur en eau du sol compacté, on obtient les gonflements suivants :

$$W_{\text{faible}} < W_{\text{OPM}} \longrightarrow g \text{ fort}$$

$$W_{\text{fort}} < W_{\text{OPM}} \longrightarrow g \text{ faible}$$

Le gonflement est plus fort du côté sec de l'optimum :

Cela est dû au fait que les sols argileux ont un déficit plus marqué en eau, ce qui leur confère une capacité d'adsorption plus grande et les fait gonfler davantage. Le gonflement diminue au fur et à mesure avec la teneur en eau augmente, c'est-à-dire à une teneur en eau élevée (W) supérieure que la teneur en eau (W_{OPM}), la capacité d'adsorption devient inférieure, puisque le sol devient très humide (saturé) et il n'accepte que peu d'eau.

V.6.1.2. Effet de chaux sur le gonflement du kaolin :

Bhasin et al, (1978) ont prouvé que l'addition de la chaux aux sols argileux réduit leurs potentiels pour gonfler [30].

Suivant les données du tableaux 30 et la figure 29 on constate que :

Le gonflement diminue avec l'addition de la chaux, cette diminution est due au fait que la chaux modifie la double couche électrique réduisant l'épaisseur de la couche adsorbée de l'eau, il y a ainsi une diminution de l'absorption d'humidité des sols qui sont traités par la chaux.

La diminution de gonflement pour des teneurs en eau inférieures à la teneur en eau W_{OPM} reste insuffisante, par contre au-delà de la teneur en eau W_{OPM} et à partir du 7% de chaux les résultats obtenus sont très positifs puisque le gonflement est presque négligeable.

- pour les points ayant subi une perturbation :

A $W=27\%$ ($g(3\% \text{ de chaux}) = 1.367$) il décroît pour $g(5\% \text{ de chaux}) = 1.305$ puis il augmente pour atteindre une valeur $g(7\% \text{ de chaux}) = 1.461$ et enfin une diminution remarquable $g(12\% \text{ de chaux}) = 0.562$). Cette perturbation est due probablement à :

- 1- La non uniformité des grains (la présence d'un pourcentage des gros grains élevée par rapport au pourcentage des fines).
- 2- mauvais épandage de chaux lors du malaxage manuel.
- 3- la variation de température à l'intérieur du laboratoire pendant l'immersion qui a varié entre 16°C et 31°C .

CONCLUSIONS GENERALES

Les essais de stabilisation par la chaux éteinte réalisés sur l'argile dénommée Kaolin de Djebel Debagh (Guelma) nous permettent de conclure essentiellement ce qui suit :

1. L'influence du temps sur la plasticité aux temps (24h, 48h, 72h) a été étudiée et a, montre, qu'une période de maturation de 24 heures était nécessaire pour la pleine modification.
2. Pour le Kaolin étudié, il a été montré qu'une addition de 5% de chaux donne, à moins de 48 heures, des résultats importants du point de vue pratique vis à vis de la plasticité.
3. La valeur maximale de la masse volumique apparente sèche du mélange Kaolin – Ca(OH)_2 est réduite lorsque la quantité de chaux mise en œuvre est augmentée. Ce résultats conforte les travaux réalisés par *Andrews et O'Flaherty (1968)*.
4. La réduction de la masse volumique apparente sèche maximum du mélange nécessite une augmentation de 2% dans la teneur en eau pour obtenir une nouvelle masse volumique apparente sèche maximum.
5. La teneur en eau de compactage sur la portance (CBR immédiat). En effet les grandes résistances sont obtenues dans le domaine sec de la courbe de compactage. Ces résultats sont obtenus dans le cas du Kaolin à des valeurs inférieures à 31%.
6. Concernant l'addition de la chaux dans le domaine sec de la courbe de compactage ($W_{OPM} < 31\%$), il a été montré que celle-ci n'est pas très significative vis-à-vis de la portance.

7. Par contre dans le domaine humide de la courbe de compactage, il a été montré que l'addition de la chaux apporte une contribution très sensible dans la portance (Elle atteint à titre d'exemple à 12% de chaux la valeur de 41.57%, la valeur à 0% de chaux étant de 1.5%).
8. L'influence de l'addition de la chaux sur le gonflement linéaire du mélange est appréciable au delà de 7% (jusqu'à 12% dans le cas de notre étude) et ceci est valable pour toutes les teneurs en eau.

Ce travail de stabilisation réalisé dans le cadre de ce mémoire n'est pas une fin en soi mais nous recommandons fortement pour la poursuite de cette étude de la recherche sur les points suivants :

- ✦ Elargissement de l'étude au delà de 12% d'addition de chaux. En effet notre travail ne permet pas de boucler définitivement la fourchette à 12%.
- ✦ A 12% d'addition de chaux (pourcentage déjà important) notre étude a conclu que le gonflement linéaire est toujours présent dans le domaine sec de la courbe de compactage, il conviendra d'étudier la possibilité d'introduire un autre stabilisant pour éliminer ce phénomène avec un taux plus petit d'addition de chaux (3 à 5% par exemple).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Holtz, R.D, Kovacs, W (1991)**. Introduction a La Geotechnique. Editions de l'Ecole polytechnique de Monteriel. PP 87-98.
- [2] **Caillere S, Henin S, Rautureau M. (1989)**. Les Argiles. Editions SEPTIMA. PP 21-25.
- [3] **Schlosser F, (1988)**. Elément de Mécanique des Sols. Presses de L'école Nationale des Ponts. PP 19-22.
- [4] **Grim, R.E (1959)**. Physico-Chemical Properties of Soils : Clay Mineral. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASGE, Vol.85, n° SM₂, PP 1-17.
- [5] **Lambe, T.W. (1953)**. The Structure of Inorganic Soil. Proceedings. New York (Am Soc Civ Eng), V.79. Separate N° 315, P 49.
- [6] Techniques et Pratique de La Chaux. Ecole D'avignon. Editions Eyrolles (1995). ISBN 2-212-07216-3. PP 17-18, PP 38-41
- [7] **Philipponnat, G (1979)**, Fondations et Ouvrages en Terre, Editions Eyrolles. Paris. PP18-20.
- [8] **Felfoul S. H, Rahali L, Mahmoudi M.A. Chedly S.** Traitement des Sols à la Chaux et au Ciment en Technique Routiere Tunisienne. Séminaire International de Géomatériaux GEOMAT'02. Université Mohamed Boudhief de M'sila – Algérie, les 10-11 Mars 2003
- [9] Chaux Aérienne Calcique Pour Sols et Routes Spécification Norme française (1991). NF P 98-101.

- [10] *Aissa Mamoune S.M., Djedid A. A., Bekkouche A.* Techniques de Stabilisation des Sols Expansifs. Journées d'études sur les sols gonflants. Université AbouBekr Belkaid deTlemcen – Algérie, les 27 et 28 Octobre 2002.
- [11] *Livet M. (1990).* Sols Argileux Gonflants – Site Expérimental de Waza-Maltman. Rapport de Synthèse, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont- Ferrand, Lyon.
- [12] *Venstermans G.,Guelton B, Verfaillie D., Janssens M.* Amélioration des Sols à la Chaux. Centre de recherches routières. Bulletin CRR. n°47. 2 / 2001. ISSN : 0777-2572 PP 2-7
- [13] *Bell F.G. (1988).* Stabilization and Treatment of Clay Soils with Lime. Part 1. basic principles. Ground Engineering.Vol 21 n° 1 PP 10-15.
- [14] *Arabi M. and Wild S (1989).* Property Changes Induced In Clay Soils When Using Lime Stabilization. Municipal Engineer. 6. Apr. 85-99.
- [15] *Davidson D.T. and Handy,R.L.(1960).* Lime and Lime-Pozzolan. in Highway Engineering Handbook. Ed by Woods, K.B.Mc Graw Hill. New York, 23-98.
- [16] *Lees, G, Abdelkater ,M O. and Hamdani, S K (1982).* Effect of The Clay Fraction on Some Mécanique Properties of Lime –Soil Mixtures. Jour Inst Highway Engrs, 29, N° 11 .3-9.
- [17] *Gillot J.E.(1968).* Clay in Engineering Geology. Elsevier Amsterdam. Ch .5-6.
- [18] *Brandl. H (1981).* Alteration of Soil Parameters by Stabilization with Lime. Proc .10th int. Conf soil Mech Stockholm. 3. 587-594.
- [19] *Venuat M. (1978).* Le Traitement des Sols à La Chaux et au Ciment. Édite par l'auteur chapitre 10 , pp .194-199 .

- [20] **Casagrande A.**(1948). Classification and Identification of Soils. Transactions, ASCE, Vol. 113. PP 901-930.
- [21] **Mitchell J.K.** (1976). Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley and Sons, Inc., New York, P 422.
- [22] **Howard A.K.** (1977) Laboratory Classification of Soils Unified Soil Classification System, Earth Sciences Training Manual n° 4 U.S.Bureau of Reclamation Denver, P56.
- [23] **Sherwood P.** (1993). Soil Stabilization with Cement and Lime. State of art review. HMSO. London.
- [24] Buxton Lime Industries. Lime Stabilization Manual. 2nd edn 1990.
- [25] **Clarke K.E. and Cruchley A.E** (1957). Laboratory Experiments in The Stabilization of clays with hydrated lime Geotechnique.Edition 1957, 7, N° 2, PP 97-111.
- [26] **Mateos M.** (1964). Soil-Lime Research at Iowa State University. Proc. ASCE. SM₂.Vol 90 PP.127-153.
- [27] Transportation Research Board. Lime Stabilization State-of-The-Art Report : Reactions, Properties, Design and Construction. National Research Council, Washington, DC,1987.
- [28] **Andrews D.C. and O'Flaherty C.A.** (1968). Lime Type and Quality in Relation to The Stabilization of Soils With Different Gradations and Clay Minerals. Proc. Aust. Road Res. Board, Vol. 4. Part 2.1285-1306.
- [29] **Al-Rawi N.M. and Awad A.A.A.** (1981). Permeability of Lime Stabilized Soils. Proc. ASCE Trans. Engng. Div. 107. TE 1. 25-35.

- [30] **Bhasin N.K, Dhawan P.K and Mehta H.S. (1978).** Lime Requirement in Soil Stabilization. Highway Research board, Bulletin no7, Washington DC, 15-26.
- [31] **Mateos M. (1961).** Physical and Mineralogical Factors in Stabilization of Iowa Soils With Lime and Fly ash. Ph. D thesis, Iowa State University Ames. Iowa.
- [32] **Mateos M. and D.T.Davidson (1962).** Lime and Fly ash Proportions In Soil-Lime-Fly ash Mixtures and Some Aspects of Soil-Lime Stabilization. Highway Research Board of the National Academy of Sciences, National Research Council, Washington, DC- Bulletin n°.335, PP.40-64.
- [33] **Afès M. and G. Didier (2000).** Stabilisation des Sols Gonflants: Cas d'une Argile en Provenance de Mila (Algérie). Bulletin of Engineering and the Environment. ISSE: volume 59, PP.75-83.