

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Ben Bouali de Chlef



(Faculté de Génie Civil et d'Architecture)  
(Département de Génie Civil)

# Mémoire

En vue de l'obtention du  
Diplôme de **Magister**  
Spécialité: **Génie civil**  
Option: **Géomatériaux**

Présenté par:

Mm: **Wiem KHEBIZI**

Ingénieur en Génie Civil

Thème

**Etude de la durabilité des sols argileux  
améliorés avec des ajouts minéraux**

*Soutenu le 04/12/2011 devant les membres de jury:*

Mr:

<b>Karim. EZZIANE</b>	Maitre de conférences A, UHB de Chlef	Président
<b>Mohamed. GHRICI</b>	Maître de Conférences A, UHB de Chlef	Encadreur
<b>Khelifa.HARICHANE</b>	Maître Assistant A, UHB de Chlef	Co-Encadreur
<b>Said.KENAI</b>	Professeur, USD de Blida	Examineur
<b>Khaled.GRINE</b>	Maître de Conférences A, USD de Blida	Examineur



# *Dédicace*

*A mes très chers parents*

*Qui n'ont jamais cessé de nous soutenir et encourager dans les études.*

*Que le Seigneur vous bénisse et vous accorde une longue vie !*

*A Ma mère qui grâce à sa collaboration m'a inscrit*

*dans cette branche et je soutiens maintenant*

*devant elle ...Je ne vous remercierais*

*jamais assez.*

*A mon mari, Farouk*

*A ma nièce, Anaïs.*

*A ma cousine, Emilie*

*Avec tous mes sentiments*

*de reconnaissance et de gratitude.*

## Remerciements

*Nous rendons tout d'abord grâce à Dieu qui nous a donné la santé, la sagesse et la force pour accomplir ce travail, avant de nous acquitter d'un devoir agréable qui est celui de témoigner notre reconnaissance à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.*

*Je voudrais saisir l'occasion qui m'est offerte pour exprimer ma profonde gratitude et tous mes remerciements à mes promoteurs Dr Mohamed Ghrici, Maître de Conférences et Mr Khelifa HARICHANE, Maitre Assistant à l'Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, pour leur dévouement, leurs précieux conseils, leurs critiques constructives et leur intérêt qu'ils ont porté toute au long de l'élaboration de ce travail.*

*Il m'est particulièrement agréable de remercier sincèrement Dr Karim EZZIANE, Maitre de conférences et Chef de Département d'Hydraulique à l'Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, d'avoir accepté de présider le jury d'examen ainsi que pour m'avoir autorisé l'accès au laboratoire d'hydraulique et avoir mis à ma disposition le matériel indispensable à la réalisation des essais.*

*Je tiens à remercier et à exprimer toute ma gratitude au Dr Said KENAI, Professeur à l'Université Saad Dahlab de Blida pour avoir accepté la tache d'être examinateur de ce travail*

*J'adresse également mes vifs remerciements au Dr Khaled GRINE, Maître de Conférences à l'Université Saad Dahlab de Blida, pour avoir accepté d'examiner avec toute l'attention voulue le présent travail.*

*J'exprime également mes remerciements à Mr Hossain .....Technicien de laboratoire d'hydraulique pour leurs aides précieuses et leurs compréhensions durant toute la période de l'exécution des essais.*

*Je tiens aussi à exprimer mes sincères remerciements à l'ensemble des enseignants du Département de Génie Civil à l'Université Hassiba Ben Bouali de Chlef et en particulier les enseignants de post graduation qui ont contribué à ma formation de Magister.*

*Merci aux étudiants de ma promotion, pour leurs aides et leurs soutiens durant toute la période de ma formation de Magister.*

*Enfin, je souhaite adresser mes remerciements à tous ceux qui par leur aide et leur soutien m'ont permis de réaliser cette étude.*

**Résumé:** Le fondement de cette étude est basé sur l'efficacité d'employer la pouzzolane naturelle (PN) comme un matériau pouzzolanique pour augmenter les propriétés mécaniques du traitement des sols argileux avec la chaux. Cette investigation présente l'influence de différentes proportions de mélange de (0-8%) de chaux et de (0-20%) de PN sur la résistance à la compression (UCS) avant et après durabilité des cycles de saturation-séchage du sol à 7 et 28 jours et sur la sorptivité. Durant le processus des cycles de saturation-séchage, l'influence du mécanisme des nombres de cycles mouillage-séchage, la variation de perte de poids, et la résistance à la compression ( $R_c$ ), le coefficient de sorptivité ont été examinés. La quantité de n'importe quel stabilisateur utilisé pour modifier les caractéristiques d'un sol argileux est généralement sélectionné sur la base des valeurs de la résistance à la compression de la couche traitée. Des études récentes ont constaté qu'une haute résistance initiale ne garantit pas nécessairement une performance acceptable à long terme. Cependant, les résultats prouvent que l'addition de PN n'augmente pas uniquement le développement de la résistance mais également la durabilité du sol stabilisé par la chaux.

**Mots clé :** Chaux, Pouzzolane naturelle, Argile, Cycles de saturation-séchage, Résistance, Stabilisation des sols.

**Abstract:** the focus of this study is based on the effectiveness of using the natural pozzolana (NP) as a pouzzolana material to enhance the engineering properties of the lime treatment of clayey soil. This investigation presents the influence of different mix proportions of lime (0-8%) and (0-20%) NP on strength properties before and after wetting-drying durability tests of soil cured at 7 and 28 days. During the process of drying and wetting cycles, the influencing mechanism of numbers of drying-wetting cycles, weight loss, the unconfined compressive strength and coefficient of sorptivity were tested. The amount of any stabilizer used to modify a base material is generally selected based on the unconfined compressive strength of the treated layer. Recent studies have found that high initial strength does not necessarily guarantee acceptable long-term performance. However, the results show that addition of NP enhances not only the strength development but also the durability of lime stabilized soil.

**Key Words:** lime, natural pouzzolana, clay, wet-dry cycle, strength, soil stabilization.

# *Table des matières*

<b>Dédicace</b> .....	I
<b>Remerciement</b> .....	II
<b>Résumé</b> .....	III
<b>Table des matières</b> .....	IV
<b>Liste des tableaux</b> .....	V
<b>Liste des figures</b> .....	VI
<b>Liste de notation</b> .....	VII
<b>Introduction Générale</b> .....	01
<b>1. Revue bibliographique sur l'amélioration des sols</b>	
1.1 Introduction .....	07
1.2 Caractérisation des mauvais sols .....	07
1.3 Technique d'amélioration des sols .....	08
1.3.1 Amélioration des sols par compactage .....	08
1.3.2 Amélioration des sols par drainage .....	09
1.3.3 Amélioration des sols par renforcement des terres .....	10
1.3.3.1 Terre renforcé .....	10
1.3.3.2 Terre ancré .....	11
1.3.3.3 Technique de renforcement in situ .....	11
1.3.3.4 Matériaux synthétique .....	12
1.3.4 Amélioration des sols par inclusion .....	12
1.3.4.1 Colonnes à module contrôlé .....	12
1.3.4.2 Colonnes ballastées .....	14
1.3.4.5 Inclusion rigide .....	15
1.3.5 Amélioration des sols par injection .....	16
1.3.5.1 Injections classiques .....	16
1.3.6 Amélioration des sols par addition d'ajouts minéraux .....	18
1.3.7 Autre technique d'amélioration .....	19
1.3.7.1 Electro-osmose .....	19
1.3.7.2 Electrochimie .....	20
1.3.7.3 Amélioration temporaire par congélation .....	20
1.3.7.4 Rabattement .....	21

1.4 Conclusion .....	22
<b>2. Effet des ajouts minéraux sur l'amélioration des sols</b>	
2.1 Introduction .....	24
2.2 Effet des ajouts minéraux sur la plasticité .....	24
2.2.1 Effet de la chaux sur la plasticité .....	24
2.2.2 Effet du ciment sur la plasticité .....	26
2.2.3 Effet des ajouts minéraux sur la plasticité .....	27
2.2.3.1 Effet de la poussière de four du ciment (CKD) sur la plasticité .....	27
2.2.3.2 Effet de la cendre de calcaire (limestone ash) sur la plasticité .....	29
2.2.3.3 Effet de la cendre de noyau d'olive sur la plasticité .....	29
2.2.3.4 Effet de la pouzzolane artificielle (Sarooj) sur la plasticité .....	30
2.2.3.5 Effet de la cendre de l'écorce de riz (RHA) sur la plasticité .....	31
2.2.3.6 Effet de la cendre volante sur la plasticité .....	31
2.2.4 Effet des combinaisons des ajouts minéraux sur la plasticité .....	32
2.3 Effet des ajouts minéraux sur le compactage .....	34
2.3.1 Effet de la chaux sur le compactage .....	34
2.3.2 Effet du ciment sur le compactage .....	36
2.3.3 Effet des ajouts minéraux sur le compactage .....	36
2.3.3.1 Effet de la cendre volante sur le compactage .....	36
2.3.3.2 Effet de la poussière de four du ciment (CKD) sur le compactage .....	36
2.3.3.3 Effet de la cendre de calcaire (limestone ash) sur le compactage .....	37
2.2.3.4 Effet de la cendre de noyau d'olive sur le compactage .....	37
2.2.3.5 Effet de la cendre du canna sucre sur le compactage .....	37
2.3.4 Effet des combinaisons des ajouts minéraux sur le compactage .....	37
2.4 Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression .....	38
2.4.1 Effet de la chaux sur la résistance .....	39
2.4.2 Effet du ciment sur la résistance .....	39
2.4.3 Effet des ajouts minéraux sur la résistance .....	41
2.4.3.1 Effet de la cendre volante sur la résistance .....	41
2.4.3.2 Effet de la poussière de four du ciment (CKD) sur la résistance .....	41
2.4.3.3 Effet de la cendre de calcaire (limestone ash) sur la résistance .....	64
2.4.3.4 Effet de la cendre de noyau d'olive sur la résistance .....	42
2.4.4 Effet des combinaisons des ajouts minéraux sur la résistance .....	42

2.5 Effet des ajouts minéraux sur la durabilité .....	43
2.5.1 Effet des ajouts minéraux sur les cycles de Mouillage-Séchage .....	43
2.5.2 Effet des ajouts minéraux sur l'immersion d'eau .....	52
2.5.3 Effet des ajouts minéraux sur l'Absorption d'eau « la sorptivité » .....	54
2.6 Conclusion .....	57
<b>3. Méthodes expérimentales</b>	
3.1 Introduction .....	59
3.2 Matériaux utilisées.....	59
3.2.1 Sol.....	59
3.2.2 Chaux.....	61
3.2.3 Pouzzolane naturelle.....	61
3.3 Méthodes expérimentales .....	63
3.3.1 Préparation des mélanges Sol/ajouts .....	63
3.3.2 Confections du compactage et conservation des éprouvettes.....	69
3.3.3 Mode de réalisation des essais.....	74
3.3.3.1 Résistance à la compression .....	74
3.3.3.2 Tests de cycles de séchage-saturation .....	75
3.3.3.3 Tests de durabilité, Sorptivité .....	78
3.4 Conclusion .....	82
<b>4. Résultats et Discussion</b>	
4.1 Introduction .....	84
4.2 Résistance à la compression avant durabilité .....	84
4.3 Essai de « saturation-séchage » .....	86
4.3.1 Cycle complétés par les combinaisons .....	86
4.3.2 Perte du poids durant les cycles de saturation-séchage .....	102
4.3.3 Résistance à la compression après durabilité .....	107
4.4 Etude de la Sorptivité .....	115
4.5 Conclusion .....	118
<b>Conclusions générales et perspectives.....</b>	<b>120</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>123</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>130</b>

## *Liste des Tableaux*

<b>Tableau 2.1</b> Effet du ciment sur les limites d'ATTERBERG [ <i>Okagbue</i> et <i>Ochulor</i> , 2007] ..	27
<b>Tableau 2.2</b> –Effet du CKD sur les limites d'ATTERBERG [ <i>Sreeknishenavilasam</i> et al., 2007] .....	28
<b>Tableau 2.3</b> –Effet de la cendre du calcaire sur les limites d'ATTERBERG [ <i>Okagbue</i> et <i>Yakubu</i> 2000] .....	29
<b>Tableau 2.4</b> –Effet du Sarooj sur les limites d'ATTERBERG [ <i>Al-Rawas</i> et al., 2005] .....	30
<b>Tableau 2.5</b> –Effet de la chaux sur le compactage, CBR sur la kaolinite, montmorillonite, quartz [ <i>Bell</i> , 1996] .....	35
<b>Tableau 2.6</b> –Effet du ciment sur la résistance à la compression à l'état sec et après immersion[ <i>Kenai</i> et al., 2006] .....	41
<b>Tableau 2.7</b> Résultats des essais de Mouillage-Séchage des sols Texas 1 et Texas 2 avec le ciment et de la chaux [ <i>Bhattacharja</i> et <i>Bhatty</i> 2003] .....	49
<b>Tableau 2.8</b> – Réduction de la résistance à la compression% du sol stabilisé durant la saturation [ <i>Khattab</i> et al., 2008] .....	53
<b>Tableau 2.9</b> –Effet des combinaisons des ajouts sur l'absorption d'eau par sorptivité [ <i>Hossain</i> et al, 2007] .....	56
<b>Tableau 2.10</b> –Effet des combinaisons des ajouts sur l'absorption d'eau par sorptivité [ <i>Hossain</i> et al, 2007] .....	56
<b>Tableau 3.1</b> – Caractéristiques géotechniques des sols étudié .....	60
<b>Tableau 3.2</b> –Propriétés physico-chimiques de la chaux .....	61
<b>Tableau 3.3</b> – composition chimique de la pouzzolane naturelle .....	63
<b>Tableau 3.4-</b> Formulation des combinaisons .....	64
<b>Tableau 3.5-</b> Quantités des sols et des additifs utilisés pour la confection des éprouvettes destinées pour la détermination de la résistance et le test "séchage-saturation" .....	65
<b>Tableau 3.6-</b> Quantités des sols et des additifs utilisés pour les éprouvettes destinées pour l'essai de sorptivité.....	66
<b>Tableau 4.1</b> Variation de la résistance à la compression des sols étudiés .....	84
<b>Tableau 4.2</b> Cycles complétés pour les deux sols durant saturation-séchage .....	88
<b>Tableau 4.3</b> Variation de la résistance à la compression avant et après 12 cycles .....	107
<b>Tableau 4.4</b> Evolution de la résistance. ....	111
<b>Tableau 4.5-</b> Sorptivité des sols améliorés après 7 et 28 jours de cure .....	115

## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b> Compactage de surface.....	8
<b>Figure 1.2</b> Drain filtre .....	11
<b>Figure 1.3</b> Diverses applications de tirants d’ancrage en confortement.....	11
<b>Figure 1.4</b> Colonnes à module contrôlé.....	13
<b>Figure 1.5</b> Mise en œuvre colonnes à module contrôlé.....	13
<b>Figure 1.6</b> Colonnes ballasté.....	15
<b>Figure 1.7</b> Principe du renforcement de sol compressible par inclusions rigides.....	16
<b>Figure 1.8</b> principe de réalisation d’une colonne de jet grouting .....	17
<b>Figure 1.9</b> Amélioration des sols par injection.....	18
<b>Figure 1.10</b> Stabilisation chimique.....	19
<b>Figure 1.11</b> Eléctro-osmose.....	19
<b>Figure 1.12</b> Electrochimie .....	20
<b>Figure 2.1</b> Variation de limite d’Atterberg avec le dosage du CKD pour 03 types du sol a) limite de liquidité et de plasticité et b) Indice de plasticité [ <i>Miller et Azad</i> , 2000]. .....	29
<b>Figure 2.2</b> Effet de la cendre du noyau d’olive sur les limites d’ATTERBERG [ <i>Nalbatoglu et Tawfiq</i> , 2006] .....	30
<b>Figure 2.3</b> Effet du RHA sur des limites d’Atterberg des sols [ <i>Basha et al.</i> , 2002].....	31
<b>Figure 2.4</b> Effet des cendres volantes sur l’indice de plasticité de trois type de sol [ <i>Parsons et Kneebone</i> , 2005] .....	32
<b>Figure 2.5</b> Effet d’addition de stabilisateur sur l’indice de plasticité [ <i>AL-Rawas et al.</i> , 2005] .....	34
<b>Figure 2.6</b> Effet de la chaux sur la résistance à la compression pour (a) montmorillonite (b) kaolinite (c) quartz [ <i>Bell</i> , 1996] .....	39
<b>Figure 2.7</b> Variation de la résistance à la compression en fonction: a) du mode de conservation et b) de la durée de cure [ <i>Aiban et al.</i> (1998)]. .....	40
<b>Figure 2.8</b> effet du dosage de la chaux sur la durabilité du sol A a) potentiel du gonflement et b) pression gonflement [ <i>Guney et al.</i> , 2005]. .....	44
<b>Figure 2.9</b> effet du dosage de la chaux sur la durabilité du sol B a) potentiel du gonflement et b) pression gonflement [ <i>Guney et al.</i> , 2005].....	44
<b>Figure 2.10</b> effet du dosage de la chaux sur la durabilité du sol C a) potentiel du gonflement et b) pression gonflement [ <i>Guney et al.</i> , 2005].....	45

<b>Figure 2.11</b> Variation du gonflement libre avec les cycles mouillage-séchage [Mollamahmutoglu et al., 2009].....	47
<b>Figure 2.12</b> Perte du poids du sol CAL (IP= 25) dans le test de Mouillage-Séchage [Bhattacharja et Bhatta 2003].....	48
<b>Figure 2.13</b> Résultats obtenus par le test de mouillage-séchage après 12 cycles [Zhang et Tao 2008].....	51
<b>Figure 2.14</b> Effet d'immersion sur la résistance à la compression à 91jours avec des combinaisons de (cendre volcanique, ciment, chaux) [Hossain et al., 2007]. ....	53
<b>Figure 2.15</b> Effet du dosage en ciment sur l'absorption d'eau a) type de cure et b) type de compactage [Kenai et al, 2006] .....	55
<b>Figure 3.1</b> Sol fin gris .....	59
<b>Figure 3.2</b> Sol fin rouge .....	60
<b>Figure 3.3</b> Chaux vive de Saida.....	61
<b>Figure 3.4</b> Pouzzolane naturelle de Beni-Saf .....	62
<b>Figure 3.5</b> Pouzzolane naturelle défragmentée et broyée .....	62
<b>Figure 3. 6</b> Broyeurs à disque (a) concasseur (b) broyeur.....	63
<b>Figure 3. 7</b> Sol après broyage et tamisage (a) Sol gris (b) Sol rouge .....	64
<b>Figure 3. 8</b> Stockage des échantillons après pesage .....	66
<b>Figure 3. 9</b> Matériel utilisé pour le compactage (a) mesurette d'eau (b) Dame et moule de compactage (c) Balance électrique .....	67
<b>Figure 3. 10</b> Préparation des combinaisons pour le compactage (a) homogénéisation (b) humidification (c) malaxage (d) conservation.....	68
<b>Figure 3.11</b> Confection des éprouvettes par compactage .....	70
<b>Figure 3. 12</b> Préparation des éprouvettes pour la cure.....	71
<b>Figure 3.13</b> Presse CBR.....	72
<b>Figure 3.14</b> Accessoire nécessaire pour l'exécution du compactage .....	72
<b>Figure 3. 15</b> Mode opératoire du compactage des éprouvettes pour le test de sorptivité.....	74
<b>Figure 3. 16</b> Presse hydraulique Utilisée .....	75
<b>Figure 3. 17</b> Saturation des échantillons.....	76
<b>Figure 3. 18</b> (a) Séchage des échantillons à l'étuve (b) pesage après séchage.....	76
<b>Figure 3. 19</b> Éprouvette après écrasement.....	77
<b>Figure 3. 20</b> Eprouvettes destiné pour le test de sorptivité.....	78
<b>Figure 3.21</b> Eprouvettes recouvert par une bande adhésive à la base.....	78
<b>Figure 3. 22</b> Pesage après cure. ....	79

<b>Figure 3.23</b> Déroulement de test de sorptivité.....	81
<b>Figure 3.24</b> Schéma du dispositif de l'essai d'absorption .....	82
<b>Figure 4.1</b> Variation de la résistance à la compression des sols à 7 et 28 jours .....	87
<b>Figure 4.2</b> Cycles de saturation-séchage complétés après traitement des sols à 07 jours .....	89
<b>Figure 4.3</b> Cycles de saturation-séchage complétés après traitement des sols à 28 jours .....	89
<b>Figure 4.4</b> Effondrement des échantillons P0L P10L0 P20L0 après la 1 <sup>ière</sup> saturation.....	91
<b>Figure 4.5</b> Etat final des combinaisons du sol gris après 12 cycles.....	96
<b>Figure 4.6</b> Etat final des combinaisons du sol rouge après 12 cycles.....	101
<b>Figure 4.7</b> Perte de masse dans les cycles de saturation-séchage à 7 jours .....	103
<b>Figure 4.8</b> Perte de masse dans les cycles de saturation-séchage à 28jours .....	104
<b>Figure 4.9</b> Variation de la résistance finale par rapport à la résistance initiale à 07 jours ...	108
<b>Figure 4.10</b> Variation de la résistance finale par rapport à la résistance initiale à 28 jours ..	109
<b>Figure 4.11</b> Evolution de la résistance à 7 jours .....	112
<b>Figure 4.12</b> Evolution de la résistance à 28 jours .....	112
<b>Figure 4.13</b> Variation de la résistance résiduelle à 7 jours .....	113
<b>Figure 4.14</b> Variation de la résistance résiduelle à 28 jours .....	113
<b>Figure 4.15-</b> Effondrement de surface des échantillons du sol rouge pendant l'essai de sorptivité .....	118

## *Liste des Notations*

**W (%)** : Teneur en eau

**W<sub>opt</sub> (%)** : Teneur en eau à l'Optimum de Proctor Normal

**OPN** : Optimum de Proctor Normal

**$\gamma_d$  (kN/m<sup>3</sup>)**: Poids volumique sec

**OMC** : Optimum moisture contents

**MMD** : Maximum dry densities

**LL (%)** : Limite de liquidité

**LP (%)** : Limite de plasticité

**IP (%)** : Indice de plasticité

**Cc** : Indice de compression

**Cr** : Indice d'expansion (rebond, gonflement)

**CBR** : California Bearing Ratio

**E/C** : Eau/Ciment

**Rc** : Résistance à la compression

**R<sub>r</sub>** : Résistance résiduelle

**R<sub>i</sub>** : Résistance initiale avant les cycles

**R<sub>f</sub>** : Résistance finale après les cycles

**$\Psi$** : Coefficient de sorptivité.

**$\Delta Q$** : quantité d'eau absorbé.

**A**: surface d'échantillon.

**[Ca]** : Proportion atomique en calcium

**Si/Al** : Rapport des proportions atomiques silicium sur aluminium

**CAH** : Hydrate d'Aluminate de Calcium

**CSH** : Hydrate de Silicate de Calcium

**CSH** : Compactage statique horizontale

**DDP** : Différence de potentiel

**CEC** : Capacité d'échange Cationique

**CKD**: Cement Kiln Dust

**RHA**: Rice Husk Ash

**PFA:** Pulverized Fly Ash

**VA:** Volcanic Ash

**P, PN :** Pouzzolane naturelle

**C, L :** Chaux

**UCS :** Unconfined Compressive Strength

**URS :** Unconfined Résiduelle Strength

**AASHTO:** American Association of State Highway and Transportations Officials

A-6 et A-7-6 :

**USCS :** (System de Classification Unifiée des Sols)

**CL:** clay low

**CH:** clay high

**ML:** m low

**SM:**

**SP :**

**Foca :** sol argileux plastique, majoritairement calcique (**f**ourgues and **c**ahaignes).

# *Introduction Générale*

---

---

## Généralités

Le traitement des sols argileux est une pratique courante et ancienne reconnue dans le monde entier, lors des travaux de génie civil, notamment les travaux routiers (remblais, couches de forme, ou d'assises autoroutiers, routiers, ferroviaires,...etc.). En effet, le traitement limite les dégradations dues au gonflement ou à des caractéristiques mécaniques insuffisantes des sols argileux sensibles à l'eau. De plus, élargir les possibilités de réemploi des matériaux du site grâce au traitement des sols est une exigence du développement durable afin de limiter les dépôts de matériaux, leurs emprunts et l'énergie de transport associée.

Plusieurs procédures ont été développées pour améliorer le comportement physique du sol par l'incorporation de plusieurs agents stabilisateurs tel que les additifs. L'efficacité de tels agents est basée sur la formation des liaisons de cimentation entre les particules du sol. Les deux agents stabilisants les plus appliqués sont le ciment et la chaux. Les conditions climatiques peuvent affecter le comportement des matériaux stabilisés de sol aussi bien que les procédures d'exécution.

La chaux comme additif, apporte plusieurs changements efficaces des propriétés du sol, telles que l'amélioration de la résistance. La stabilisation du sol par la chaux est accomplie par l'échange cationique, la floculation et l'agglomération, et la réaction pozzolanique. La réaction d'échange cationique, la floculation et l'agglomération commencent à avoir lieu immédiatement et apporte un changement immédiat des propriétés du sol. Cependant, la réaction pozzolanique a une cinétique lente qui nécessite, à température ordinaire, plusieurs jours avant que ses effets puissent être appréciés.

Cette réaction implique l'interaction entre la silice et (ou) l'alumine de sol et la chaux pour former divers types d'agents de cimentation qui augmente la résistance. Ces processus chimiques modifient la structure du sol de ce fait de plus grands agrégats soient formés, menant à plusieurs avantages dans la stabilisation du sol dans le domaine routier. Certaines substances naturelles, telle que les cendres volcaniques ont une meilleure réaction avec l'addition de la chaux qu'un sol ordinaire (Hossain et al., 2007). Si de tels matériaux sont ajoutés au sol, l'efficacité de la stabilisation avec la chaux peut être considérablement accrue. Récemment, des sous-produits industriels ont été ajoutés et mélangés aux sols argileux avec la chaux pour améliorer leurs propriétés. Tel que l'utilisation des additifs de cimentation: les

endres volantes, RHA, Fumée de silice, déchets de la chaux, grâce à leurs avantages environnementaux et économiques

En outre, des études (Sezer et al., 2006; Koliass et al., 2005; Senol et al., 2006; Basha et al., 2005) indiquent que la résistance (cisaillement et compression) des sols argileux peuvent être améliorée en ajoutant les additifs de cimentation mentionnés ci-dessus. D'autre part, la stabilisation des sols peut être considérablement augmentée par la combinaison de la chaux avec les additifs. Quelques investigateurs (Goswami and Singh, 2005; Muntohar and Hantoro, 2000; Bagherpour and Choobbasti, 2003) ont trouvé que la maniabilité et le comportement de résistance des sols ont été considérablement améliorés par un traitement combiné.

La pouzzolane naturelle se trouve en abondance et largement dans la région de Beni-Saf dans l'ouest de l'Algérie (Ghrichi et al., 2007). L'utilisation de la pouzzolane naturelle et sa combinaison avec la chaux en conjonction avec les sols argileux a besoin d'être étudiée. Car le sol a une bonne source d'alumine, les effets du traitement de la chaux peuvent être augmentés en grande partie si le manque apparent de la silice peut être complété par l'addition de la pouzzolane naturelle, qui a une haute réactivité et riche en silice. La pouzzolane naturelle seule ne peut pas être employée pour la stabilisation du sol en raison du manque de propriétés de cimentation. Le pourcentage élevé de matériaux siliceux en pouzzolane naturelle indique qu'il a un potentiel élevé de propriété pouzzolonique.

La résistance et la durabilité sont les deux intensivement propriétés employées pour caractériser les propriétés mécaniques du mélange sol-ajouts. La durabilité, qui peut être définie comme une capacité d'un matériau de maintenir la stabilité au cours des années et d'intégrité sous des conditions climatique sévère, c'est l'une des propriétés les plus importantes (Shihata et Baghdadi, 2001). Les sols stabilisés doivent être résistant et durable afin de supporter les charges physiques sous différentes conditions climatiques. Les sols stabilisés devraient maintenir leur stabilité sous des changements environnementaux cycliques. Ces conditions causent la perte de poids et créent des efforts dans les sols stabilisé et contribuent directement à la perte de la résistance. Il est donc nécessaire de savoir si le traitement avec la chaux et la PN ont des effets bénéfiques de façon à ce que leurs ingrédients arrivent à compenser leurs faiblesses mutuelles.

Plusieurs études de recherches ont été entreprises pour comprendre mieux la durabilité de la chaux et/ou des cendres volantes a stabilisé les sols argileux (Rao et al., 2001; Shihata et al., 2001; Guney et al., 2007; Khattab et al., 2007; Khattab et al., 2008; Zhang et

al., 2008; Mollanahmutoglu et al., 2009; Bin-Shafique et al., 2010). Cependant, les études relatives à la compréhension des caractéristiques à court ou à long terme en ce qui concerne l'influence des facteurs environnementaux tels que les cycles de saturation-séchage sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression) des sols argileux traités par la chaux/pouzzolane sont très limitées.

## Objectif de l'étude

L'objectif de notre travail consiste en l'étude des effets de l'incorporation d'ajouts minéraux tels que: la chaux et la Pouzzolan, sur les propriétés mécaniques et la durabilité des sols argileux selon des différentes combinaisons à base de ces ajouts. Ceci permettra de sélectionner les dosages optimaux, aussi bien du point de vue résistance mécanique que du point de vue durabilité.

Le principe est d'étudier l'effet des cycles de saturation-séchage sur la durabilité, la sorptivité et la résistance de deux sols argileux de provenance locale stabilisés avec la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle. Tout en apportant un programme expérimental effectué pour évaluer l'efficacité d'employer la pouzzolane naturelle pour augmenter le traitement du sol/chaux.

## Plan des chapitres

La présentation des travaux de recherche réalisés s'organise en quatre chapitres:

**Le premier chapitre** décrit toutes les techniques d'amélioration et de renforcement des sols médiocres afin de mieux comprendre les principes, les applications et les procédures de conception pour les différentes méthodes d'amélioration.

**Le deuxième chapitre** présente une étude bibliographique en mentionnant l'état d'avancement des recherches dans le domaine de la stabilisation chimique des sols argileux expansifs afin d'améliorer leurs caractéristiques géotechniques: mise en œuvre, plasticité, compactage, CBR, résistance et durabilité.

**Le troisième chapitre** présente la caractérisation des matériaux de l'étude et les protocoles expérimentaux des expériences effectuées. Les caractéristiques géotechniques et les propriétés physico-chimiques des sols étudiés. Les propriétés des deux additifs ajoutés sont déterminées, notamment leur minéralogie et leur composition chimique. Les protocoles expérimentaux employés s'appuient sur des normes connues et identifiées ou sur l'expérience acquise dans les laboratoires des recherches.

**Le quatrième chapitre** est consacré à la présentation et la discussion des résultats expérimentales des effets de la combinaison chaux et pouzzolane sur la résistance à la compression avant et après durabilité, perte du poids durant les cycles, nombres complété des cycles, absorption capillaire. Afin d'en déduire l'efficacité du traitement.

Enfin, ce mémoire est clôturé par une conclusion générale qui rappelle les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives pour de futurs travaux de recherche.

Chapitre 1

---

---

*Revue bibliographique sur  
l'amélioration des sols.*

## 1.1 Introduction

La nécessité d'utiliser des terrains de plus en plus médiocres pour les constructions de génie civil n'a fait que croître au cours des dernières décennies. D'une part le développement imposé de réaliser dans les zones de terrains en place non encore construite, qui sont souvent les plus médiocres, des fondations, des grandes excavations, des tunnels. D'autre part le sol, matériaux peu coûteux, est devenu de plus en plus un matériau de construction et l'on cherche, pour des raisons souvent économiques, à pouvoir utiliser les sols de qualité médiocre.

Il en a résulté le développement d'un très grand nombre de techniques destinées à augmenter les caractéristiques mécaniques globales des sols en place ou rapportés. On peut distinguer deux grandes catégories de techniques:

- celle où la structure du sol est améliorée, notamment au niveau des contacts entre les grains, par un additif, un liant, un coulis, ou modifiée par réduction des vides entre les grains. Pour atteindre un état plus dense : ce sont les techniques d'amélioration des sols;
- celles où l'on place dans le sol des éléments structuraux pour augmenter principalement la résistance mécanique: ce sont les techniques de renforcement des sols.

L'amélioration et le renforcement des sols ont été de plus en plus utilisés pour des ouvrages définitifs, dans des zones sismiques et pour la réparation des ouvrages anciens (reprise en sous-œuvre, confortations, etc.) il est à noter également que les mécanismes de comportement et la connaissance de l'amélioration apportée ont nécessité de nombreuses expérimentations en vraie grandeur, lesquelles ont constitué un élément essentiel de la recherche.

## 1.2 Caractérisation des mauvais sols

Il est bien connu que le sol supporte les fondations d'ouvrages, sert comme matériaux de construction (barrages, remblai), Contient des ouvrages souterrains (tunnels), Reçoit des matériaux à stocker (déchets industriels et nucléaires) et sert à extraire des minéraux et autres ressources de production de l'énergie et des matériaux, donc il est important de savoir les problèmes typiques des mauvais sols pour qu'on puisse l'améliorer, en générale les sols fins et les sols grenus ce sont les deux types de sol qui cause l'instabilité des structures.

### 1.3 Technique d'amélioration des sols

Les méthodes d'amélioration des sols grenus font appel à des processus très divers :

- densification par augmentation statique de la contrainte à la surface du sol (préchargement) ou en profondeur (compactage par injection solide) ;
- remplissage des vides (injection) ;
- dislocation de la structure du sol, puis restructuration par des actions externes au massif (chocs du pilonnage intensif) ou internes au massif (vibrations, explosions) ;
- mélange avec un liant pour constituer des colonnes plus résistantes (colonnes de sol traité).

Elles sont, de façon générale, de mise en œuvre rapide et relativement facile. Comme dans le cas des sols fins, seules les méthodes les plus couramment utilisées seront décrites: préchargement, vibrocompactage, pilonnage, compactage statique en profondeur, colonnes de sol traité, etc. Les techniques d'injection de la masse du sol, les différents moyens de drainage, les renforcements des terre.....etc. sont décrites dans ce chapitre.

#### 1.3.1 Amélioration des sols par compactage

Il peut être exécuté sur des sols excavés ou des remblais placés en des couches minces. La vibration peut produire une densification additionnelle dans les sols présentant une cohésion. Le compactage provient d'un accroissement de la compacité du sol, et celui-ci est dû à un meilleur arrangement des grains et élimination des vides. Des études expérimentales et un compactage appropriés des sols réalisé sur des remblais qui ne tasseront pas ou tasseront très peu. Il ya donc un optimum de compactage à réaliser, c'est cet optimum que laboratoire se propose de déterminer.

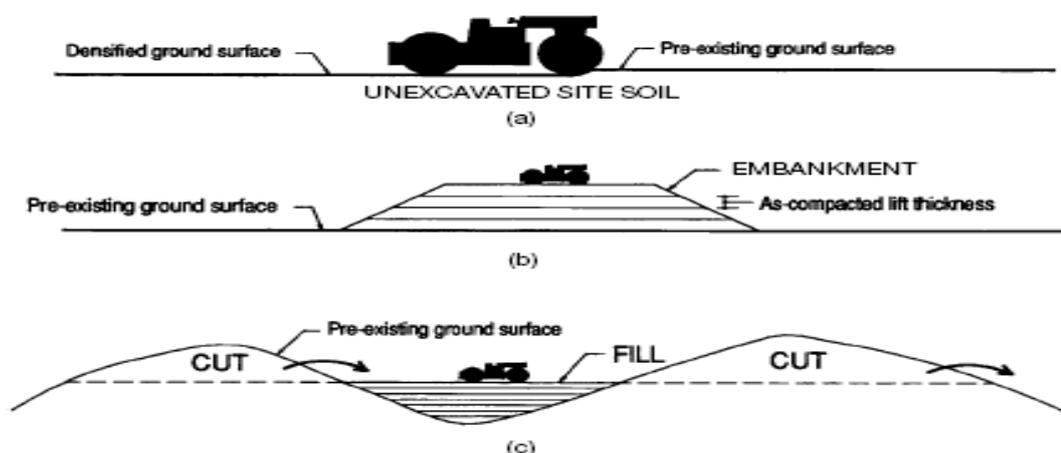


Fig. 1.1- Compactage de surface

Le compactage de surface est utilisé généralement pour une profondeur maximale d'environ 3m. Pour des profondeurs supérieures on utilise les types de compactage profond suivants: Compactage dynamique, Vibro compactage

### 1.3.2 Amélioration des sols par drainage

Si le but du drainage est le même que celui du rabattement, les moyens sont différents. Le drainage ne comporte généralement pas de pompage mécanique, car on utilise uniquement l'écoulement gravitaire. Son domaine d'application est surtout celui des terrains peu à très peu perméables.

Les systèmes de drainage sont fabriqués de filtres d'agrégats poreux pour collecter l'eau et ensuite la drainer ailleurs. Les drains doivent être capables de drainer toute l'eau qui s'y infiltre sans provoquer une accumulation excessive de la charge.

Les drains doivent être aussi conçus pour prévenir la migration des fines des sols adjacents et par la suite colmater les vides. Il est donc désirable de réduire la perte de charge due au flux à travers le filtre à une valeur basse compatible avec la granulométrie dictée. Le drain filtre d'agrégats peut être conçu par une couche d'agrégat fin gradué pour filtrer et d'une couche d'agrégat grossier à forte perméabilité pour drainer l'eau.

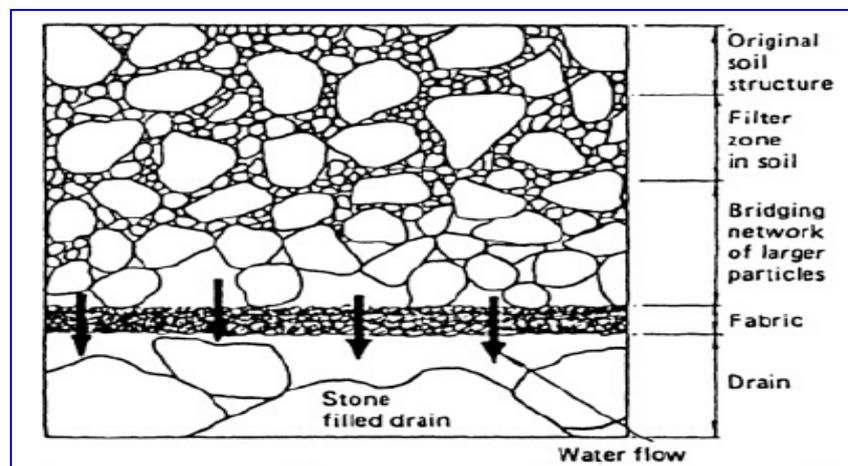


Fig. 1.2- Drain filtre

Le drain vertical vise à diminuer le temps requis pour la consolidation de sols mous en accélérant, à l'aide d'une surcharge, l'expulsion de l'eau qu'ils contiennent. Il est constitué d'une plaquette ondulée ou surmontée de "chevilles" en polymère flexible. Cette plaquette, mesurant 100 mm de largeur sur 6 mm d'épaisseur, est enrobée d'une membrane géotextile

synthétique, choisie en fonction des propriétés de filtration recherchées et de sa capacité à résister à l'abrasion lors de son installation.

Le drain est inséré dans le sol à l'aide d'un mandrin creux fixé à une flèche verticale rattachée à une rétrocaveuse ou à une grue sur chenilles. Une force statique est utilisée pour enfoncer le mandrin et ancrer le drain à la profondeur désirée. En présence de couches de matériaux raides, un vibreur est ajouté au mandrin, ou des avant-trous sont pratiqués pour passer à travers des couches très raides.

Après leur installation, un coussin de sable filtrant et une surcharge, qui peut dans le cas d'approches de viaducs constituer une partie des remblais permanents, sont placés au-dessus de la surface de travail pour provoquer l'acheminement de l'eau interstitielle vers les drains qui, à leur tour, l'amèneront vers la surface, accélérant dès lors la consolidation des sols mous.

### **1.3.3 Amélioration des sols par renforcement des terres**

#### **1.3.3.1 Terre renforcé**

La terre renforcée est un matériau composite qui consiste en un sol contenant des éléments le renforcement (bandes d'acier galvanisé ou des géogrids plastiques)

Le sol grenu est généralement faible en traction en plaçant à l'intérieur de celui-ci des éléments de renforcement alors les forces de traction peuvent être transmises du sol aux éléments. Le matériau composite possède alors une résistance à la traction dans la direction où le renforcement commence à travailler (frottement)

Pour les sols fins où l'adhésion entre le remblai et le renforcement est mauvaise et peut être réduite par l'augmentation de  $U$  on utilisera donc des matériaux sandwichs (couche de sable en contact avec les éléments renforçant). L'efficacité du renforcement est commandée par sa résistance à la traction et la liaison qu'il développe avec le sol adjacent. Les éléments de renforcement sont:

- ❖ Bandes d'acier ou d'aluminium,
- ❖ Câbles d'acier,
- ❖ Matériau polymère, geosynthétiques ,
- ❖ Treillis métalliques,
- ❖ Les grilles sont des éléments métalliques ou en polymère arrangés en réseaux rectangulaires (maillages),
- ❖ Les fibres sont en géotextiles, métalliques ou en fibres naturelles.

Le mécanisme de transfert de charge entre le sol et l'élément renforçant est gouverné par le frottement qui se développe à l'interface entre les deux constituants. Dans le cas des murs en terre renforcée, les deux éléments sont considérés comme un bloc cohérent dans l'analyse de la stabilité, avec une pression des terres active actionnant derrière le bloc (analyse contre le glissement, renversement et rupture de la capacité portante). La rupture interne peut arriver uniquement s'il y a une perte du frottement entre le sol et le renforcement, ou par rupture de la traction des éléments renforçant.

### 1.3.3.2 Terre ancré

Dans les terres ancrées la résistance est survenue par le développement des pressions de portance autour de l'ancrage à la fin du membre tendu lequel est en contact avec la force.

### 1.3.3.3 Technique de renforcement in situ

Le principe de base consiste à mobiliser un certain volume de terrain ou de rocher encaissant de façon à rétablir ou à renforcer la stabilité d'une fondation au renversement, au glissement ou au soulèvement.

Les domaines d'application les plus courants sont donc le renforcement des murs de soutènement sous-dimensionnés, des massifs de fondation de poids insuffisant, des radiers soumis à des sous-pressions, etc.

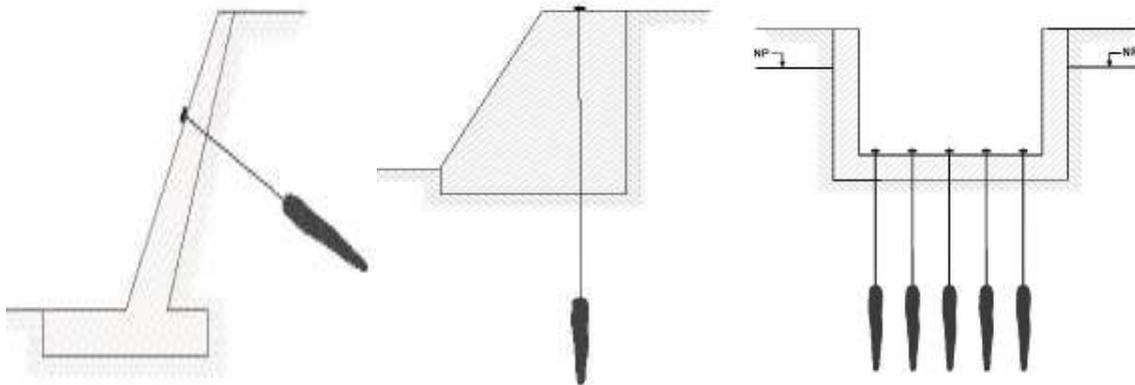


Fig. 1.3- Diverses applications de tirants d'ancrage en confortement.

Il ya 02 techniques de renforcement des sols in situ pour stabiliser les pentes et les excavations: clouage des sols, micro pieux réticulés.

Renforcer le sol (grenu dense, argile raide) par de petites inclusions sous forme de barres en acier ( $\Phi = 20-30\text{mm}$ ) installées horizontalement pour améliorer la résistance au cisaillement des sols et actionnant en traction.

La méthode consiste à sceller des barres d'acier dans les masses de rochers fracturés rendant ainsi au "rocher" son monolithisme. Elle vise à stabiliser les déplacements différentiels des parois de la faille par un clouage multidirectionnel à 45° à 60° environ (barres d'acier de 5-6m de long qui "arment le terrain"). Ces méthodes sont comparables à celles de clouage des parois rocheuses fracturées.

#### **1.3.3.4 Matériaux synthétique**

La construction de remblais sur sols compressibles constitue un enjeu majeur. Dans ce contexte, l'utilisation de nappes géosynthétiques pour améliorer la stabilité de ces remblais est une des techniques de renforcement de sol parmi les plus efficaces et largement éprouvée. Les différents Types de matériaux geosynthétiques sont:

- Produits polymériques (polypropylène, polyester, polyéthylène, polyamide, polyvinyle chloride, polystyrène)
- Géotextiles
- Geogrids
- Geonets
- Geomembranes
- Geocomposites

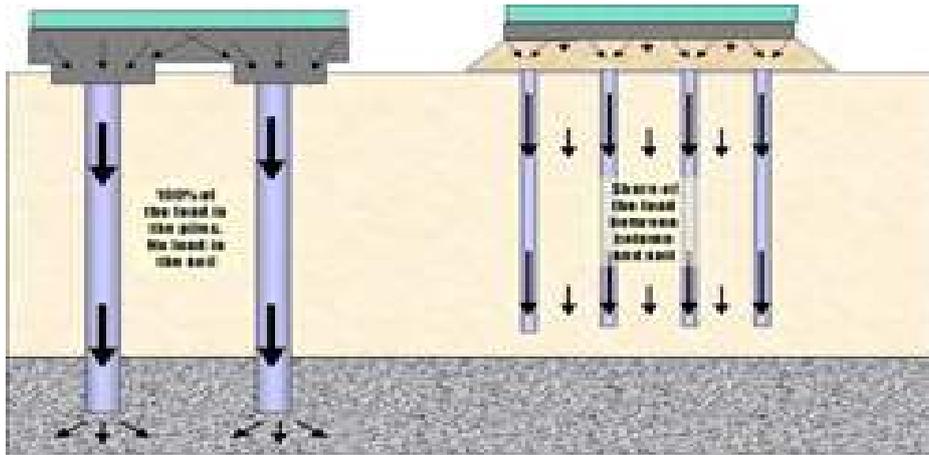
#### **1.3.4 Amélioration des sols par inclusion**

##### **1.3.4.1 Colonnes à module contrôlé**

Les colonnes à module contrôlé sont des inclusions semi-rigides et cimentées dont les modules de déformation peuvent varier de 500 à 12,000 MPa, ou de l'ordre de 5 à 30 fois plus faibles que ceux du béton. Elles sont mises en œuvre comme procédé de renforcement de sol. Ce type de traitement ne vise donc pas à réaliser des pieux devant supporter la totalité de la charge apportée par l'ouvrage, mais à réduire la déformabilité globale du sol à l'aide d'éléments semi-rigides régulièrement répartis.

Le principe des colonnes à module contrôlé trouve son origine dans la méthode des inclusions au sens le plus large. Les procédés de réalisation, de dimensionnement et de contrôle ont cependant été développés par pour optimiser les résultats. Cette technique est préférable aux colonnes ballastées, réalisées par **Vibro-Remplacement**, lorsque :

- le sol est trop mou ou organique et n'offre pas d'étreinte latérale suffisante;
- les charges sont élevées ou les tolérances de tassement sévères.



**Fig. 1.4-** Colonnes à module contrôlé.

Les colonnes à module contrôlé sont généralement réalisées à l'aide d'une vis spécialement conçue par MÉNARD SOLTRAITEMENT pour refouler le sol. L'outil est vissé dans le sol jusqu'à la profondeur désirée puis remontée lentement sans déblais vers la surface. Simultanément, un coulis ou mortier est injecté dans le sol par l'âme de la tarière creuse de la vis spéciale en utilisant des pressions modérées. Ainsi, l'on constitue une colonne de 450 à 600 cm de diamètre de matériau cimenté qui admet des contraintes de 10 à 50 bars, selon les dosages.

Les colonnes à module contrôlé sont toujours coiffées d'un matelas permettant la répartition des charges lorsqu'elles doivent supporter un dallage sur sol. Cette technique est sans incidence sur l'environnement, ne comportant ni vibration ni battage



**Fig. 1.5-** Mise en œuvre colonnes à module contrôlé.

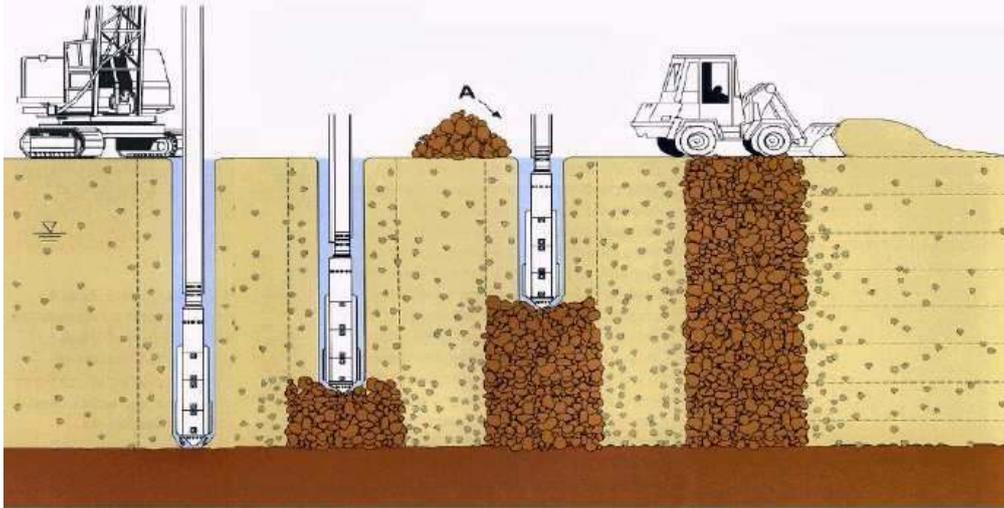
#### **1.3.4.2 Colonnes ballastées**

Les colonnes ballastées sont des colonnes constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement dans le sol et compactés par passes successives. Ces colonnes ne comportent en particulier aucun liant sur leur hauteur. Elles peuvent être réalisées en maillages réguliers ou variables, en lignes, en groupes ou même de manière isolée. Leur dimensionnement tient compte du type d'ouvrage, de la nature des charges, des tassements absolus et différentiels ainsi que de la nature du sol à traiter.

Cette technique est utilisée dans les sols cohérents tels limons et argiles. Le dispositif de forage est composé d'un tube prolongé en partie basse par un vibreur électrique ou hydraulique. Ce dispositif est foncé dans le sol à l'aide du vibreur et crée ainsi une empreinte en refoulant le terrain jusqu'à la base du massif à consolider. L'introduction latérale du ballast à la base du vibreur est réalisée soit gravitairement soit à l'aide d'une pompe à graviers. Ce remplissage est effectué par couches successives tout en maintenant la vibration afin de compacter le ballast et de continuer à refouler le sol. Dans certains cas particuliers, il est possible de procéder à un remplissage complémentaire de coulis bentonite-ciment simultanément à la mise en place du ballast à l'aide d'un tube latéral. L'ensemble de ces opérations est réalisé par passes remontantes sur la totalité de la hauteur de terrain à consolider.

L'amélioration de sol par colonnes ballastées consiste à mettre en œuvre un «maillage» de colonnes constituées de matériaux ou graveleux, amenant une densification des couches compressibles et les rendant aptes à reprendre des charges issues de fondations. Le traitement d'un sol par colonnes ballastées conjugue les actions suivantes :

- augmenter la capacité portante du sol;
- diminuer les tassements totaux et différentiels;
- diminuer le temps de consolidation par création d'éléments drainant;
- diminuer les risques induits par les phénomènes de liquéfaction lors des séismes.



**Fig. 1.6-** Colonnes ballasté

#### 1.3.4.5 Inclusion rigide

Le renforcement des sols compressibles par inclusions rigides permet de réaliser la fondation d'ouvrages de grandes longueurs (remblais routiers, ferroviaires) ou de grandes dimensions (bâtiments industriels, réservoir de stockage...) sur des sols à caractéristiques médiocres tout en étant économiquement intéressants. Ce procédé, en superposant un matelas granulaire à un réseau d'inclusions rigides verticales, tire parti des transferts de charges se mettant en place dans tout matériau granulaire.

Cette technologie, par la mise en œuvre d'un matelas granulaire associé ou non à un dallage ou un géosynthétique sur un sol compressible renforcé d'un réseau d'inclusions rigides permet de reporter vers le réseau de pieux un maximum de charge. L'efficacité  $E$  du renforcement peut ainsi être quantifiée par le rapport de la charge transmise aux inclusions à la charge totale des sollicitations (poids du remblai, surcharge éventuelle). En tirant ainsi parti de l'effet d'arche se produisant dans le matelas granulaire, on peut espérer obtenir une réduction significative des tassements de surface, qui seraient inadmissible sans renforcement. Au cours des années 1990, la complexité de ce type d'amélioration de sols s'est accrue en incluant dans certains cas des dallages ou encore des renforcements horizontaux de type géotextile. Toutefois, l'absence de réglementation relative à ce type d'ouvrage en fait une technologie qui demeure expérimentale.

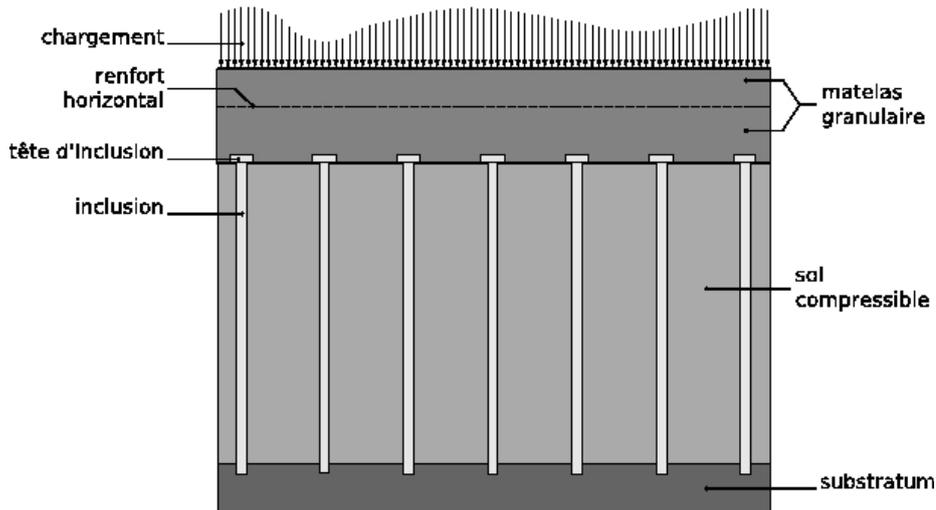


Fig. 1.7- Principe du renforcement de sol compressible par inclusions rigides.

### 1.3.5 Amélioration des sols par injection

L'injection des sols est un procédé largement utilisé dans les travaux de traitement des terrains dont les caractéristiques mécaniques et/ou hydrauliques initiales sont médiocres insuffisante, et ce, en vue de l'implantation d'ouvrages de génie civil (barrages, tunnels, ouvrages d'art, etc.). Le procédé consiste à injecter dans le sol, à l'aide d'une technique appropriée, en général à partir de forages, un coulis dont la composition et les caractéristiques sont bien déterminées, suffisamment fluide pour pénétrer dans le réseau poreux du sol. Son rôle va être de « faire prise » avec celui-ci, formant ainsi un matériau composite présentant des caractéristiques améliorées par rapport au sol initial.

#### 1.3.5.1 Injections classiques

Une injection classique est une injection qui agit a priori sans déplacement des terrains ; sa mise en œuvre n'est en tout cas pas destinée à resserrer ceux-ci. C'est donc une technique de comblement et d'imprégnation, destinée à remplir des vides naturels, qui sont, soit des fissures (terrains cohérents, rocher), soit les vides des terrains granulaires. Le remplissage se fait avec un coulis sans déformation intentionnelle du sol.

Le résultat de l'injection est donc une diminution de la perméabilité du massif, ce qui est le plus souvent le but recherché. Mais une amélioration des caractéristiques de résistance et de déformabilité est également obtenue. Dans cette optique, l'injection, telle que définie, peut stabiliser un ouvrage en stoppant des déformations. Cette technique de confortement est

donc envisageable dans la mesure où l'ouvrage présente des désordres encore acceptables et où le simple arrêt de leur évolution est suffisant.

Le jet grouting est un procédé de traitement des sols par une injection à grande vitesse et pression, de fluides et coulis. Effectué de manière continue ou discontinue, il permet la réalisation de colonnes, demi-colonnes, lamelles ou parois. Il est applicable à tous les terrains meubles, hormis les sols très organiques. Le traitement par jet grouting conduit à réaliser des éléments rigides d'un mélange de sol ciment, dont la mise en œuvre fait appel à trois phénomènes distincts intervenant indépendamment ou en combinaison:

- une déstructuration des terrains en place sous un jet à très grande vitesse;
- une extraction d'une partie des éléments constitutifs du sol en place, additionnée de coulis (rejets de découpage ou spoil);
- une incorporation de matériaux d'apport sous la forme d'un jet de coulis de composition adaptée à la résistance recherchée.

Le jet grouting conduit à un renforcement du sol et c'est l'obtention de caractéristiques géométriques et mécaniques qui est recherchée. Le sol hors colonne ne subit pas ou peu d'amélioration. Cette méthode d'injection se distingue donc fondamentalement des injections classiques ou de claquage. Dans le domaine des fondations ou soutènements, le jet conduit donc à de véritables éléments porteurs ou de soutiens assimilables à leurs équivalents traditionnels. Le jet grouting permet également de remplir des fonctions d'étanchéité.

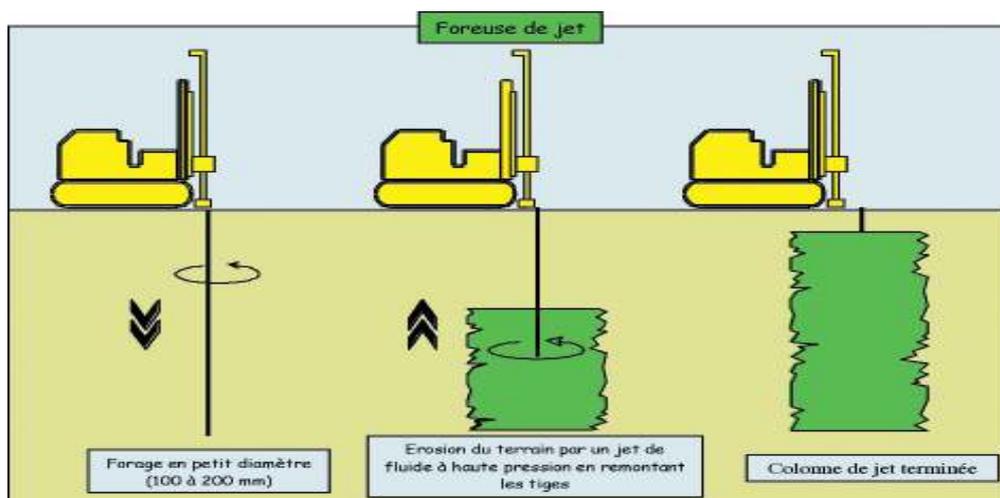
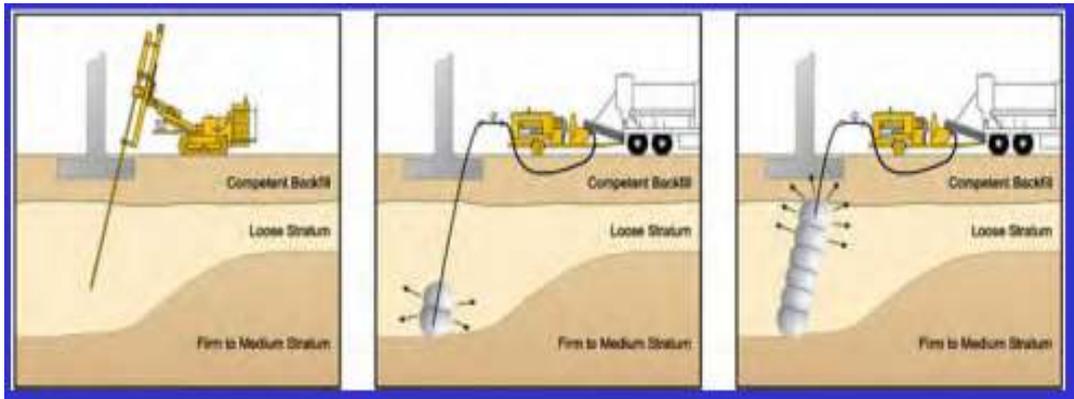


Fig. 1.8- Principe de réalisation d'une colonne de jet grouting



**Fig. 1.9-** Amélioration des sols par injection.

### 1.3.6 Amélioration des sols par addition d'ajouts minéraux

Traiter un sol consiste à mélanger intimement ses éléments à une certaine quantité d'addition. Cette opération provoque une modification physico-chimique qui intervient dans la stabilisation du sol tel que réactions d'échange de base avec les particules d'argile (cation) et les réactions pouzzolaniques (cimentation), qui corrige ses défauts de perméabilité et améliore ses qualités de résistance (capacité portante) et de durabilité. Pratiquement tous les sols peuvent être traités. La stabilisation peut être utilisée, avant compactage, in situ ou avec des sols excavés ou amenés d'ailleurs. Cependant une analyse préalable de leur nature est nécessaire avant chaque traitement. Elle détermine la technique et les moyens les plus appropriés à mettre en œuvre, en fonction des spécificités du terrain :

- utilisation d'addition (chaux, ciment, ajouts minéraux.....);
- dosages à respecter;
- épaisseur du sol à traiter.

Le traitement des sols en place ou rapportés est aujourd'hui très largement employé sur tout le territoire. Il est par ailleurs d'une grande simplicité de mise en œuvre. Les ajouts minéraux les plus utilisés:

- le ciment,
- la chaux,
- les ajouts cimentaires (laitier, pouzzolane naturelle, cendres volantes et fumée de silice.....etc),
- le bitume,
- les sels.

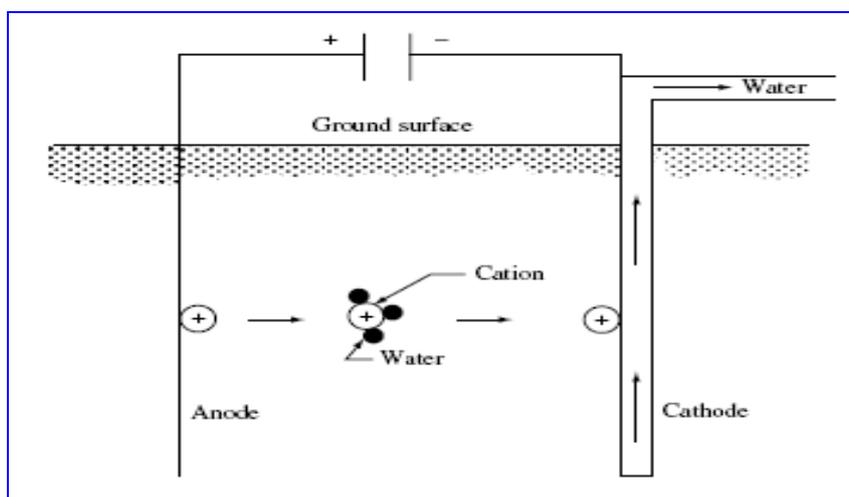


**Fig. 1.10-** Stabilisation chimique.

### 1.3.7 Autre technique d'amélioration

#### 1.3.7.1 Electro-osmose

L'électro osmose a été initialement mise au point par CASAGRANDE (1947) pour éliminer l'eau contenue dans les argiles actives à faible perméabilité. Cette technique s'est révélée efficace lorsqu'elle a été employée pour introduire un agent chimique dans le sol, soit par dissolution de l'anode, soit par utilisation directe d'un électrolyte. Cette opération améliore la stabilité du sol soit par modification chimique dans les matériaux argileux par déplacement d'ions, soit par cimentation partielle des vides interstitiels. Cette variante d'électro osmose est connue sous le nom de stabilisation électrochimique. Le Phénomène d'Electro-osmose sert à appliquer une DDP dans un matériau poreux saturé, l'électrolyte se déplace de l'anode vers la cathode.



**Fig. 1.11-** Electro-osmose.

### 1.3.7.2 Electrochimie

L'électro osmose a en général pour effet de réduire suffisamment la teneur en eau des sols en conséquence d'augmenter leur résistance au cisaillement. La consolidation électrochimique est une variante de l'électro osmose. Elle repose sur le fait que si l'on met à l'anode une solution salée, on peut arriver à la faire migrer dans le sol. Si la solution est bien choisie, cette migration créera une consolidation par imprégnation d'ions.

Les cations associés aux argiles sont interchangeables; en conséquence l'introduction dans une argile riche en cations faiblement retenus et ayant une haute capacité d'échange, de solutions contenant un excès de cations mieux retenus conduira à un échange d'ions et améliorera les propriétés du sol. Tel est le fondement de la stabilisation de surface des montmorillonites par addition de chaux, de ciment ou d'autres composants. Il ya deux méthodes principales d'introduction d'électrolytes stabilisants dans un sol argileux:

- ❖ Par solution et dispersion du matériau composant l'anode par électrolyte;
- ❖ Par introduction directe d'éléments complémentaires à l'anode.

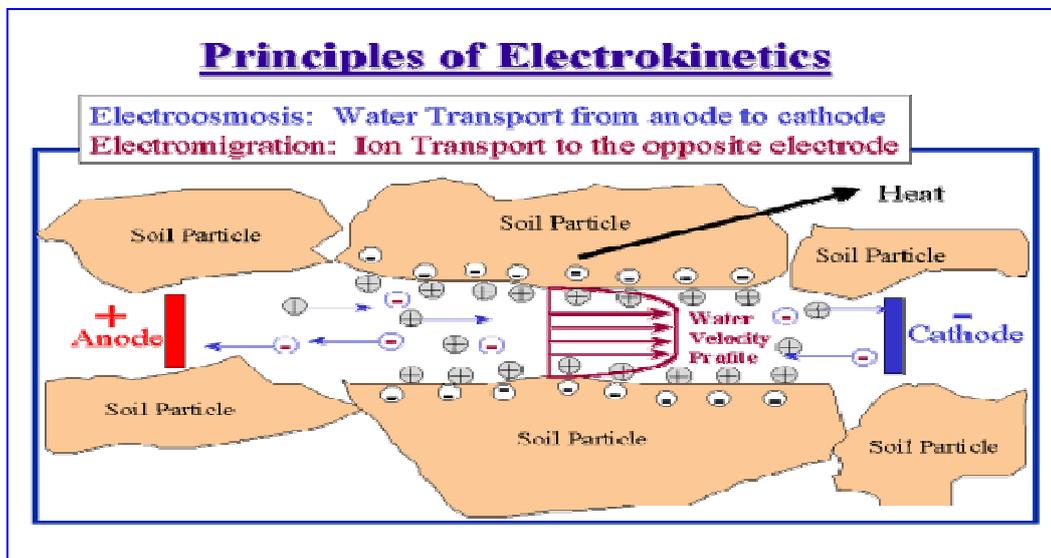


Fig. 1.12- Electrochimie

### 1.3.7.3 Amélioration temporaire par congélation

Pour les sols fin : La méthode de renforcement temporaire des sols par congélation, développée principalement pour les matériaux grenus (sables, graviers), peut être appliquée aux argiles molles et aux limons, lorsqu'aucune autre solution n'est possible. L'effet de la

congélation dépend de la température (il augmente quand la température diminue). Par ailleurs, il faut réaliser la congélation le plus rapidement possible pour limiter le gonflement du sol et il faut tenir compte de la déstabilisation du massif de sol au dégel.

Les techniques de refroidissement utilisées reposent, comme pour les sables et les graviers, sur la circulation d'un fluide froid (azote liquide, habituellement) dans des tubes enfoncés dans le massif de sol

Pour les sols grenus : La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé.

La congélation est réalisée par circulation de saumure ou d'un gaz réfrigérant (azote liquide, habituellement) dans des tubes mis en place dans le sol à traiter. L'utilisation d'azote liquide permet une progression rapide du front de gel et une plus grande souplesse dans le maintien de la zone gelée.

L'augmentation de volume de l'eau lors de sa transformation en glace peut provoquer des désordres dans le voisinage de la zone traitée et doit être prise en compte lors de l'élaboration du projet de traitement.

#### **1.3.7.4 Le rabattement**

Il consiste à abaisser la pression des nappes à l'intérieur d'un volume de terrain déterminé, en dessous de la surface extérieure du volume considéré. Il est obtenu par un nombre approprié de captages disposés autour du volume à rabattre et dans lesquels un pompage permanent est assuré. Plusieurs procédés de rabattement peuvent être distingués, en fonction de la nature des terrains rencontrés:

- le rabattement à pleine fouille, qui consiste à pomper l'eau dans un puisard aménagé au fond de la fouille et surcreusé d'environ 0,5 à 1 m par rapport à ce dernier;

■ le rabattement par puits filtrant est employé pour les terrains perméables; les puits sont perforés au moyen d'une technique appropriée, adaptée au terrain, à l'eau claire, à la boue autodestructrice ou tubés.

#### **1.4 Conclusion**

Les différentes techniques pour l'amélioration des sols sont largement utilisées à travers le monde afin de prévenir les risques sismiques ou pour consolider des terrains à la structure hétérogène, inconstructibles en l'état: l'utilisation intensive de remblais sableux pour gagner des terrains sur la mer en est sans doute l'exemple le plus représentatif. Dans ce but, différentes techniques ont été développées et sans cesse améliorées depuis deux décennies.

Grâce à une large gamme de solutions disponibles pour le traitement des sols, qui sont sans cesse maintenues à la pointe de la technologie, en mesure d'apporter une solution globale de traitement pour chaque cas. Les nombreuses références acquises mettent en avant la pérennité et l'efficacité de ces solutions, s'agissant de délais et de qualité du traitement mis en œuvre.

Ces choix doivent toujours être guidés par le souci constant de ne pas aggraver les désordres d'une autre structure qui présente déjà des insuffisances, ou de ne pas mettre en péril la bonne tenue des ouvrages voisins.

Chapitre 2

---

---

*Effet des ajouts minéraux sur  
l'amélioration des sols.*

## 2.1 Introduction

L'amélioration des sols est appliquée aux sols ayant une grande plasticité (limon, argile), afin d'améliorer leurs caractéristiques géotechniques: facilité de mise en œuvre et de compactage, portance et résistance au poinçonnement.

Plusieurs produits sont employés aujourd'hui avec les sols pour obtenir un matériau de construction avec des propriétés meilleures que celles du sol original. Les additions couramment utilisés sont le ciment, la chaux et les sous produits (ajouts minéraux) sont considérés comme une pouzzolane artificielle.

De nombreuses études et recherches expérimentales ont été menées sur l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés physique et mécaniques des sols argileux. Le potentiel de la stabilisation s'est avéré dépendre du type de sol, la quantité des stabilisateurs, des combinaisons de stabilisateur et de l'âge [*Hossain et al.*, 2007].

Dans ce chapitre, on présente une synthèse des travaux de recherche effectués par plusieurs chercheurs sur les effets induits par les ajouts minéraux aux sols argileux.

## 2.2 Effets des ajouts minéraux sur la Plasticité

En générale, les caractéristiques de plasticités du sol sont contrôlées principalement par la quantité et le type de minerai d'argile présent. La pertinence des minerais d'argile surgit en raison de leur petite particule, grande superficie, texture et les effets des forces d'interactions extérieurs.

Les minerais d'argile ont une nette charge négative, et, dépend d'eau interstitielle, adsorbe des cations afin d'équilibrer la charge déficit. Dans un état sec, les cations adsorbés sont étroite par la force électrostatique négative de particules d'argile. En présence d'eau interstitielle, les énergies d'hydratations de cation sont suffisamment grandes pour surmonter des forces d'attraction d'interparticule, et les cations adsorbés tendent à diffusé en dehors de la surface d'argile envers une solution à masse dilué pour que les concentrations soient les mêmes, afin d'équilibré leurs concentrations. Cependant, cette diffusion est limitée par le champ électrique négatif de la surface d'argile. La charge négative sur la surface d'argile et la distribution des cations adjacents forment ensemble ce qui est référencié de diffusion de double couche. Le rôle de cette double couche dépend du type de l'argile (montmorillonite ou kaolinite) [*Goswami et Singh*, 2005].

### 2.2.1 Effet de la chaux sur la plasticité

La chaux est généralement utilisée pour les sols où la plasticité est élevée, tous les auteurs s'accordent que l'addition de la chaux entraîne une amélioration de la consistance à cause d'une réduction significative de l'indice de plasticité qui se traduit par une augmentation de la limite de plasticité s'accompagne par une diminution de la limite de liquidité, cela est prouvé même à long terme. Ainsi, la surface spécifique est réduite immédiatement après l'incorporation de la chaux à l'issue de la floculation des argiles. Ces résultats ont été confirmés par de nombreux chercheurs.

*Ola* (1977), *Osula* (1996), *Attoh-Okine* (1995), *Guney et al*(2007), *Kavak et Kyarah* (2007), *Manassah et Olufemi* (2008), démontrent dans leurs investigations que la limite de liquidité LL varie selon le dosage de chaux et la nature du sol argileux traité, en ce qui concerne la limite de plasticité LP une grande augmentation est toujours observée.

*Ola* (1977), *Attoh-Okine* (1995), *Bel* (1996) ont noté que l'augmentation ou la réduction dans les limites d'ATTERBERG dépend du type de sol. Pour les sols « Illite et Kaolinite » il y a une augmentation de la limite de liquidité, pour le sol « Montmorillonite » il y a une diminution de limite de liquidité. Ce comportement peut être dû à la formation de minéraux de cimentation et donc au changement de la surface spécifique avec la maturation.

*George et al.* (1992) ont conclu que l'indice de plasticité du sol diminue avec l'addition de la chaux et cette diminution est associée avec l'augmentation de la limite de plasticité plutôt que la diminution de la limite de liquidité.

*Sakr et al.* (2007) ont exprimé leurs résultats après un traitement avec la chaux d'un sol argileux d'une grande teneur en matière organique à 7, 15, 30 et 60 jours. Ils ont trouvé que la limite de liquidité et de plasticité ont montré le même comportement. Les deux limites augmentent avec la chaux et diminuent avec l'âge, ceci est attribué par l'effet hygroscopique « adsorption d'eau intergranulaire par le sol), qui est graduellement diminuée avec l'âge due à la réaction pouzzolanique. D'autre part, l'augmentation de la chaux et la diminution de LL avec l'âge est due probablement à la substitution des ions de  $Ca^{2+}$  avec des ions de  $Na^+$  et de  $K^+$  du sol, causant une réduction de la teneur en eau dans le sol.

*Yong et Ouhadi* (2007) ont trouvé que la limite de plasticité augmente et l'indice de plasticité diminue après 1 jour de cure dans un sol marneux à cause de l'effet d'échange ionique dans le sol avec l'addition de la chaux, cette échange induit une réduction de la double couche d'eau diffuse et par conséquent la formation d'agent de cimentation pendant la stabilisation « agrégation et coagulation » de sorte que la quantité d'eau emprisonnée dans la structure du sol augmente et mène à un accroissement de la limite de liquidité.

**Bell** (1996) a réalisé une étude de l'évolution de la plasticité lors du traitement à la chaux du quartz de deux types de sols argileux, composés en majorité de kaolinite pour le premier et de montmorillonite pour le second. Les résultats indiquent que la limite de plasticité et la limite de liquidité de la kaolinite traitée augmentent légèrement avec l'addition de 2% de chaux. Pour l'argile montmorillonite traitée, la limite de plasticité augmentent avec la chaux jusqu'à 4% puis se stabilise alors que la limite de liquidité diminue progressivement jusqu'à 8% de chaux. Ces résultats mènent l'auteur à conclure que la chaux modifie l'affinité à l'eau des particules de la kaolinite et cela se traduit par l'augmentation de la capacité d'échange cationique et en conséquence de la capacité d'absorption d'eau et donc LL augmente. Au contraire dans le cas de la montmorillonite, l'ajout de la chaux diminue considérablement la limite de liquidité avec l'augmentation de la limite de plasticité. Cette différence de comportement de Kaolinite est expliquée par la différence dans l'échange cationique et les différents niveaux d'activité sur la surface de la particule d'argile. De plus, **Bell** a conclu que la quantité de chaux nécessaire à une modification «maximale» à court terme pour les trois matériaux testés est entre 1% et 3% de chaux.

**Siva Pullaiah** et **Lakshmikantha** (2005) ont étudié l'effet de la consistance de la bentonite sur l'illite plus l'effet de la chaux sur le mélange illite-bentonite. Les résultats montrent que l'addition de 20% de bentonite à l'illite augmente la limite de liquidité de 134 à 160, et la limite de plasticité est inférieure a celle de l'illite seule, par conséquent l'indice de plasticité du mélange est élevée par rapport à l'illite seule. Avec l'addition de chaux aux mélange bentonite-illite il n'ya pas de changement immédiat dans les limites d'ATTERBERG, excepté une faible augmentation du LP, et une légère diminution de l'indice de plasticité. Par contre la limite de liquidité reste constante et indique que l'effet de floculation et les échanges cationiques s'opposent, d'où aucun changement de limite de liquidité. Avec le temps les particules sont cimentées par la réaction sol-chaux et la limite de liquidité diminue graduellement. Par contre il n'ya aucun effet apparent sur la limite de plasticité du mélange. Ainsi que la plasticité du mélange n'était pas affecté par 1% de chaux immédiatement, mais elle diminue avec le temps.

### **2.2.2 Effet du ciment sur la plasticité**

Le ciment est généralement utilisé pour les sols de faible plasticité, et la teneur en eau est élevée dans le sol. Tous les auteurs s'accordent que l'addition du ciment cause une réduction dans l'indice de plasticité. L'incorporation du ciment réduit la plasticité des sols.

Ces résultats ont été confirmés par de nombreux chercheurs [Degirmenci et al., 2007; Basha et al., 2002].

L'efficacité du ciment portland sur l'amélioration des rejets de charbon sur les limites d'ATTERBERG sont montrés dans le tableau 2.1:

**Tableau 2.1** – Effet du ciment sur les limites d'ATTERBERG [Okagbue et Ochulor, 2007].

Ciment%	Limite de liquidité	Limite de plasticité	Indice de plasticité
0	32	21	12
2	37	22	15
6	38	25	13
10	39	29	10

Une augmentation pour les deux limites de liquidité et de plasticités a été observée avec l'augmentation du dosage du ciment, cependant, l'indice de plasticité diminue. Ces résultats sont apparus désirable pour la stabilisation, ça signifie qu'une réaction a eu lieu entre le ciment et le sol. Postulé que la modification des particules d'argile par le ciment et la dissolution des silicates et aluminates de particule d'argile du à un PH élevé produit par la réaction de chaux et d'hydratation du ciment. Les matières dissout vont associer avec  $Ca^{+2}$  pour produire des agents de cimentation c'est de cette façon les particules d'argile adjacente seront lié [Okagbue et Ochulor, 2007]. Osula (1996) conclu que cette réaction mène à la formation de particules grossières, par conséquent, la réduction des fines particules mène à une réduction dans la surface superficielle et fait réduire la plasticité.

### 2.2.3 Effet des ajouts cimentaires sur la plasticité

De très peu études ont été publiées qui se sont concentrées spécifiquement sur l'influence des ajouts cimentaires. Bien qu'il y ait peu de littérature existante, il y a une bonne concordance que les ajouts cimentaires améliorent la plasticité du sol.

#### 2.2.3.1 Effet de poussière de four du ciment (CKD) sur la plasticité

*Sreeknishnavilasam et al.* (2007) ont utilisés le sous produit de la cimenterie (CKD) pour améliorer 03 sols de différents indices de plasticité. Les résultats d'essais sur les limites d'ATTERBERG sont mentionnés dans le tableau 2.2. Pour toutes les combinaisons du sol+CKD, il ya une clair augmentation de limite de liquidité et une légère petite augmentation de limite de plasticité. Les deux augmentations des limites sont proportionnelles à la quantité ajoutée du CKD. L'indice de plasticité  $I_p$  augmente légèrement, cette différence de réactivité

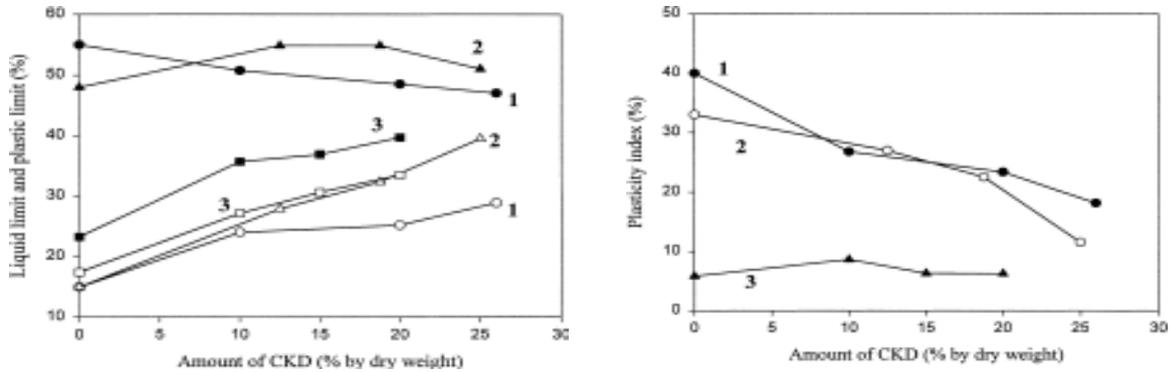
dépend du sol et le type du CKD utilisé. Le CKD le plus réactif produit un changement significatif dans la limite de plasticité, le changement de PL et non pas de LL peut être c'est un indicateur de potentiel de stabilisation. Les limites d'ATTERBERG sont déterminées même après 1,3 et 7 jours, toutes les données n'indiquent aucun changement significatif dans les limites avec le temps.

**Tableau 2.2** –Effet du CKD sur les limites d'ATTERBERG [Sreeknishnavilasam et al., 2007].

	LL (%)	PL (%)	IP (%)
<b>Sol G</b>			
0% fresh I	33.7	21.0	12.7
8% fresh I	37.7	21.3	16.4
15% fresh I	41.6	24.9	16.7
20% fresh I	41.0	25.9	15.1
<b>Sol W</b>			
0% fresh I	36.0	20.0	16.0
15% fresh I	41.0	24.6	16.4
<b>Sol S</b>			
0% fresh I	41.8	18.0	23.8
5% fresh I	41.0	17.8	23.2
10% fresh I	44.5	19.2	25.3
15% fresh I	46.5	19.3	27.2
20% fresh I	-	-	-

Par contre, les résultats de *Miller* et *Azad* (2000) montrent qu'il y a une réduction d'indice de plasticité avec l'augmentation du dosage de CKD pour deux sols 1 et 2. Pour le sol 1, la réduction d'IP est liée par l'augmentation du PL et la diminution du LL avec l'augmentation du CKD. Pour le sol 2, la réduction d'IP est liée à l'augmentation du PL. pour le sol 3, les deux limites LL et PL sont restées constante. L'augmentation ou la diminution observée de la limite de liquidité due au traitement aux CKD, dépend de la nature de l'échange cationique complexe tandis que la limite de plasticité augmente significativement. Les argiles saturées en calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) tendent à montrer une augmentation de la limite de liquidité quand elles sont traitées avec la chaux, tandis que les argiles présentant des cations à faible valence tels que le sodium ( $\text{Na}^+$ ), elles montrent cependant un échange cationique significatif et une réduction considérable de la limite de liquidité, en augmentant la teneur en chaux. La différence de comportement de LL montré pour les sols 1,2 est due à la différence

d'échange cationique complexe pour chaque type du sol. Pour le sol 3, l'addition du CKD a eu comme conséquence une augmentation presque équivalente de LL et de PL qui a probablement résulté de l'augmentation des fines de CKD qui augmente l'attraction de l'eau.



**Fig. 2.1** Variation des limites d'Atterberg avec le dosage du CKD pour 03 types du sol  
a) limite de liquidité et de plasticité et b) Indice de plasticité [Miller et Azad, 2000].

### 2.2.3.2 Effet de cendre du calcaire sur la plasticité

Les résultats de l'étude effectuée par *Okagbue* et *Yakubu* (2000) sur la stabilisation d'un sol latérique par le sous produit cendre de calcaire sont montrés dans le tableau 2.3

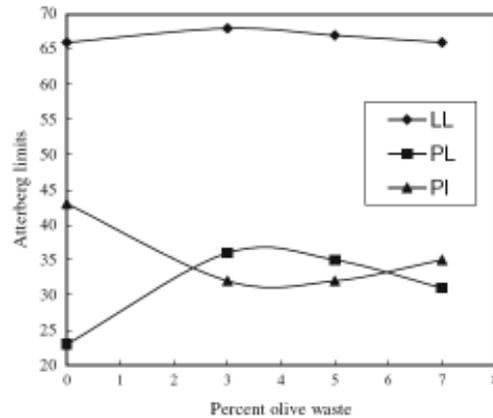
**Tableau 2.3** –Effet de la cendre du calcaire sur les limites d'ATTERBERG [Okagbue et Yakubu 2000]

Cendre du calcaire %	Limite de liquidité %	Limite de plasticité %	Indice de plasticité
0	41.5	21.6	19.9
2	42.3	23.8	18.5
4	44.2	26.4	17.8
6	45.0	28.1	16.9
8	46.5	31.0	15.5
10	48.0	33.6	14.4

Ils ont rapporté que la limite de liquidité et de plasticité augmente avec l'augmentation du calcaire, cependant l'indice de plasticité diminue ce qui est acceptable de remplacé la chaux par la cendre de calcaire. Cela indique que les échanges cationiques, floculation d'argile, agglomération et réaction pouzzolanique ont été produite. Premièrement deux réaction prennent place rapidement et produite immédiatement un changement de plasticité. Le gel de silicate de calcium qui a été produit par le biais des réactions chimiques des couches d'argile, les liants se relie s'associe entre eux et remplissent les pores, de cette façon l'eau absorbé est diminué cela mènent à une amélioration d'ouvrabilité et le sol traité devient plus friable.

### 2.2.3.3 Effets de cendre du noyau d'olive sur la plasticité

Dans le but de déterminer la possibilité d'utiliser la cendre du noyau d'olive pour stabiliser un sol, leur effet sur les limites d'ATTERBERG est montré dans la figure 2.2.



**Fig. 2.2-** Effet des cendres du noyau d'olive sur les limites d'ATTERBERG [*Nalbatoglu et Tawfiq*, 2006].

L'addition des cendres du noyau d'olive dans le sol cause de faibles changements dans la limite de liquidité et une augmentation dans la limite de plasticité, cependant, l'indice de plasticité du sol diminue avec l'augmentation du dosage de cendre de noyau d'olive. Le changement d'IP indique qu'il y a un changement dans le sol, et la réduction du IP indique qu'il y a une réduction dans le volume du sol ce qui rend la cendre du noyau d'olive efficace pour la stabilisation [*Nalbatoglu et Tawfiq*, 2006].

### 2.2.3.4 Effet de la pouzzolane artificielle (Sarooj) sur la plasticité

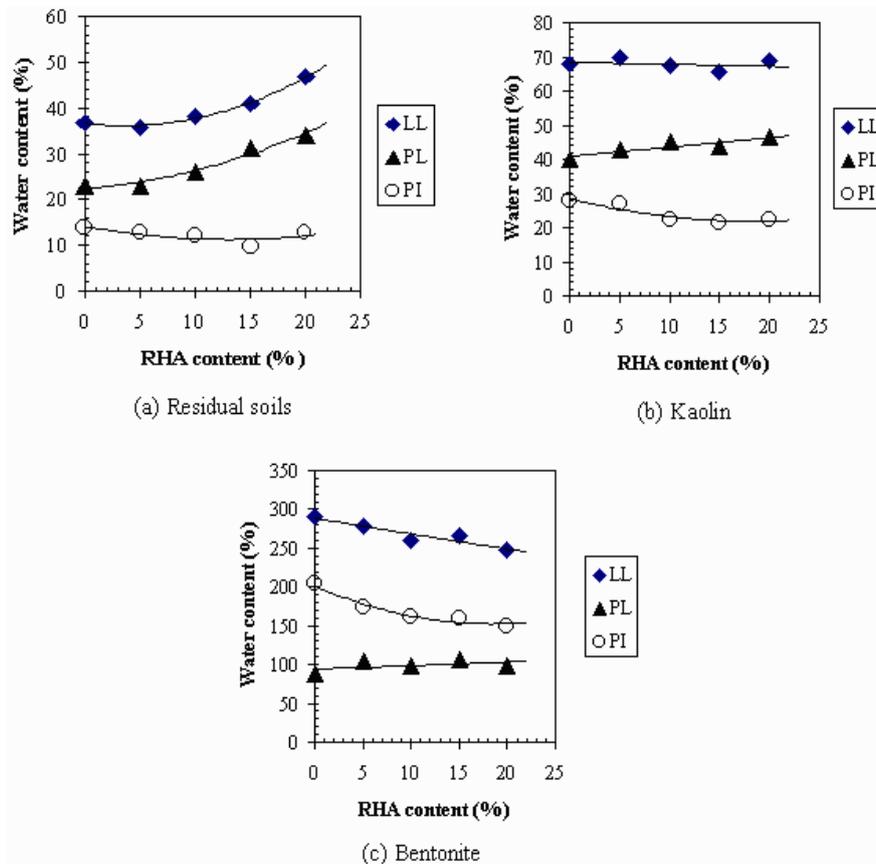
Le Sarooj est un produit issu par la calcination d'argile mélangée avec la chaux et l'eau, il est utilisé comme un matériau de construction (agent de cimentation). Les résultats d'Al-Rawas et al. (2005), voir Tableau 2-4, montrent que la limite de liquidité augmente légèrement avec le dosage du sarooj, la limite de plasticité augmente sauf pour 9 et 12% de Sarooj et l'indice de plasticité augmente pour l'addition 3 et 6% de sarooj.

**Tableau 2.4** –Effet du Sarooj sur les limites d'ATTERBERG [Al-Rawas et al., 2005].

Sarooj %	Limite de liquidité %	Limite de plasticité %	Indice de plasticité
0	50	30	20
3	61	28	33
6	54	19	35
9	55	40	15
10	53	39	14

**2.2.3.5 Effet de la cendre de l'écorce de riz RHA sur la plasticité**

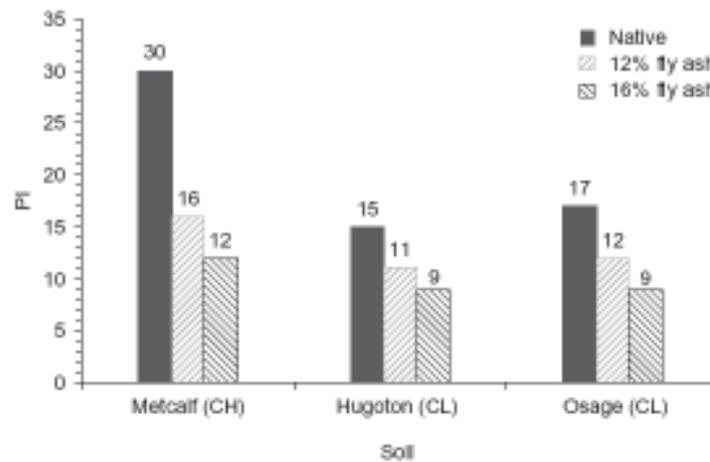
Les résultats de l'étude de *Basha et al* (2002) sur l'effet du RHA sur les limites d'ATTERBERG pour 03 types des sols argileux (sol résiduel, kaolinite et bentonite) sont montrés dans la figure 2.3. Une réduction de plasticité dans tous les types du sol. Cette réduction est un paramètre d'amélioration et chaque type à un caractère de réduction. Le sol (a) résulte une augmentation de LL et de LP. Tandis que pour les sols (b) et (c) résulte une diminution de LL et une augmentation de LP.



**Fig. 2.3-** Effet du RHA sur des limites d'Atterberg des sols [*Basha et al.*, 2002].

### 2.2.3.6 Effet de la cendre volante sur la plasticité

L'étude de *Parsons et Kneebone* (2005) quantifiée le niveau d'amélioration produite par la cendre volante de classe C et son degré pour avoir une amélioration efficace et permanente. Trois (03) types de sol ont été utilisés avec 12 et 16% de cendre volante. Les résultats sont montrés dans la figure 2.4. Un changement d'indice de plasticité a été observé, l'addition des cendres volantes a causé la diminution de l'indice de plasticité pour tous les types de sol.



**Fig. 2.4-** effet des cendres volantes sur l'indice de plasticité de trois type de sol [*Parsons et Kneebone*, 2005].

*Kolias et al.* (2005) ont constaté que pour plusieurs types de sols étudié deviennent non plastiques après 24 h de malaxage avec 5, 10 et 20% de cendres volantes. En plus, tous les sols deviennent friables au début de malaxage et l'ouvrabilité sera réduite après le malaxage.

L'addition des cendres volantes, en général, diminue l'indice de plasticité. Elles réduisent l'indice de plasticité des sols de plasticité élevée. Tandisque, elles ont peu d'influence sur l'indice de plasticité des sols de faible plasticité [*Dégirmenci et al.*, 2007; *Bin-Shafique et al.*, 2009].

### 2.2.4 Effet de la combinaison des ajouts minéraux sur la plasticité

La principale raison d'utiliser les combinaisons ciment plus ajouts ou chaux plus ajouts c'est leur économie pour stabiliser les sols. Car les ajouts sont moins chers, plus disponibles et ont plus de réaction pozzolanique que le ciment et la chaux.

**Bagherpour** et **Choobbasti** (2003) ont combinés le ciment avec la fumée de silice et la chaux avec la fumée de silice ont trouvé que l'addition de la fumée de silice n'a pas d'influence sur l'indice de plasticité du mélange "chaux-fumée de silice" car l'adhésion entre la chaux et la fumée de silice était incomplète. Par contre la fumée de silice influe sur l'indice de plasticité du mélange "ciment-fumée de silice", elle diminue l'indice de plasticité par l'adhésion entre le ciment et la fumée de silice. L'indice de plasticité du sol était 7.5%, avec l'addition de 4% de chaux diminue à 4.2%. Et l'addition de 8% de ciment l'IP est réduit à 2%.

**Degirmenci et al.** (2007) ont montré le phosphogypse et le ciment en générale réduisent la plasticité des sols argileux. Ils ont trouvé que 2.5 à 5% du ciment ou de phosphogypse représentent les quantités optimales pour la réduction de l'indice de plasticité. La combinaison de 7.5% des cendres volantes avec 7.5% de phosphogypse réduit l'IP du sol de faible plasticité. Par contre, la combinaison des cendres volantes avec du phosphogypse n'a aucun effet remarquable sur les sols de plasticité élevée.

**Muntohar** et **Hantoro** (2002) ont utilisé des combinaisons "chaux+RHA" les pourcentages de la chaux sont 2, 4, 6, 8, 10 et 12%, et de RHA sont 7.5, 10 et 12.5%. Ils ont confirmé que l'indice de plasticité diminue de 41.25% à 0.96% dans le mélange de (12%chaux+12.5%RHA) et que l'IP diminue avec l'augmentation de chaux.

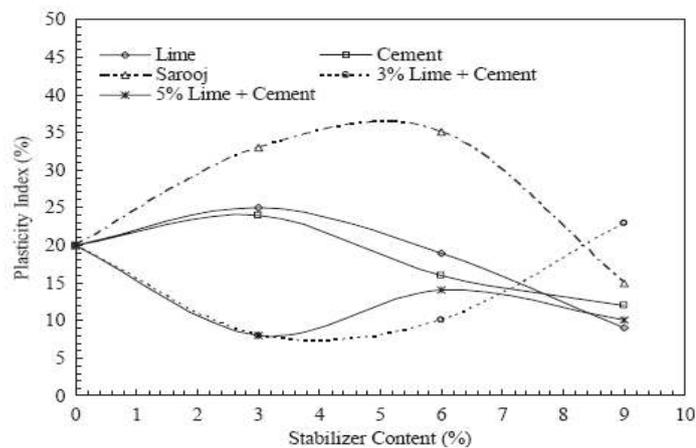
L'addition de 6 à 8% de ciment et de 10 à 15% de RHA c'est la quantité optimale pour réduire la plasticité des sols. Cependant, la réduction considérable de plasticité a été atteinte par le ciment d'après (**Basha et al**, 2002).

Les cendres volantes ont été combinée avec la chaux par **Ansary et al.**, (2006) pour stabiliser deux types de sol. Lorsque le dosage des ajouts minéraux augmente la limite de plasticité augmente, tandis que, l'indice de plasticité diminue. Ils ont constaté que les limites de liquidité et de plasticité augmentent pour le sol A (LL=30 IP=7) tandis que pour le sol B (LL=44 IP=19) la limite de liquidité diminue et la limite de plasticité augmente avec l'augmentation du dosage des cendres volantes.

**Goswami** et **Singh** (2005) ont étudié le comportement de plasticité d'un sol latérique résiduel mélangé avec la cendre volante à faible teneur en calcium et de chaux. Trois proportions de sol et de cendre volante ont été utilisées, le volume maximum de sol remplacé

par la cendre volante se limite à 50%. La chaux a été ajoutée en quantités de 1 à 8% du poids sec du sol ou du mélange cendre-sol. Ils ont déterminé les limites d'atterberg des mélanges après diverses périodes de durcissement allant jusqu'à 56 jours. En raison de la présence de sesquioxides dans le sol latérique résiduel, contrairement aux autres sols, l'adjonction de cendre volante à faible teneur en calcium a causé une réduction de la limite de plasticité. Ce n'est que lorsque la chaux a été ajoutée que la limite de plasticité des mélanges cendre-sol a augmenté, provoquant une amélioration de l'ouvrabilité.

D'après *AL-Rawas et al.* (2005) l'effet de plasticité sur la combinaison de la chaux avec du ciment cause une réduction d'indice de plasticité des deux combinaisons "3%chaux+3% ciment" et "5%chaux+3%ciment". Pour les autres combinaisons une augmentation a été observé (Fig. 2.5). Ce comportement est attribué par le processus d'échange cationique entre les cations du sol et les additions de stabilisations.



**Fig. 2.5-** Effet d'addition de stabilisateur sur l'indice de plasticité [*AL-Rawas et al.*, 2005].

La floculation et l'agrégation des sols traités avec la chaux et la cendre volante cause une réduction de la plasticité et une augmentation de la contrainte effective verticale. La contrainte effective verticale augmente avec la diminution de l'indice de plasticité [*Nalbantolgu et Tuncer*, 2001].

### 2.3 Effet des ajouts minéraux sur le compactage

Les caractéristiques de compactage dépendent de deux paramètres, la distribution de la granulométrie des grains et le poids spécifique du sol et des ajouts minéraux stabilisateurs. Ces stabilisateurs réagit initialement avec le sol pour former des grands agrégats par conséquent ils occupent un grand espace. Cependant, les fines du sol tendent à diminuer la

densité sèche, les stabilisateurs (qui tendent à augmenter la densité sèche) compensent les espaces plus grands.

### 2.3.1 Effet de la chaux sur le compactage

D'après *Bell* (1996) l'addition de la chaux avec les sols argileux augmente leur teneur en eau optimale et réduit leur densité sèche maximale ce qui est conforme avec les résultats de plusieurs chercheurs [*George et al.*, 1992; *Ola*, 1977; *Gay et Schad*, 2000; *Kavak et Akyarh*, 2007; *Hossain et al.*, 2007; *Manasseh et Olufmi*, 2008]. *Yong et Ouhadi* (2007) ont expliqué que cela est dû à la formation immédiate des produits de cimentation. *Bell* (1996) a constaté (tableau 2.5) une densité de compactage plus élevée a été obtenue par l'argile de kaolinite, que par les argiles expansibles tel que la montmorillonite. Dans les trois sols étudiés le quartz a développé la densité la plus élevée. Le CBR, aussi, a été amélioré pour les trois types de sol avec l'addition de la chaux, il augmente immédiatement après l'addition et continue d'augmenter avec le temps.

**Tableau 2.5** – Effet de la chaux sur le compactage, CBR sur la kaolinite, montmorillonite, quartz [*Bell*, 1996].

matériaux	Teneur en chaux optimale (%)	Teneur en eau optimale (%)	La densité sèche maximale (Mg/m <sup>3</sup> )	CBR (%)
Kaolinite	0	29	1.4	1
	6	31	1.33	14
Montmorillonite	0	20	1.29	9
	4	25	1.15	18
quartz	0	28	1.41	1
	6	32	1.40	22

*Attoh-Okine* (1995) a expliqué que la réduction de la densité sèche maximale est due premièrement, à la formation des particules d'agrégat de sorte qu'elle va occuper un large espace et par conséquent la graduation des sols. Deuxièmement, la densité spécifique de la chaux est plus faible que la densité spécifique du sol latérique, ce qui a été confirmé par *Ola* (1977). Troisièmement, l'augmentation de la teneur en eau optimal avec l'augmentation de la chaux est due à l'eau supplémentaire exigée pour les réactions pozzolanique [*Manassah et Olufmi*, 2008].

*Sivapullaiah* et *Lakshmikantha* (2005) ont trouvé dans leur investigations sur les caractéristiques du compactage que la teneur en eau optimal et la densité sèche maximale de l'illite n'a pas était changé avec l'addition de 20% de bentonite. Par contre, l'addition de la chaux au mélange illite-bentonite modifie la structure de l'argile, forme la floculation et permet la formation des vides de l'eau. L'addition de 1% de la chaux augmente la teneur en eau optimal et diminue la densité sèche maximale. La teneur en eau optimale augmente avec le temps.

### **2.3.2 Effet du ciment sur le compactage**

*Gay* et *Schad* (2000) ont prouvé que l'addition du ciment dans un sol argileux de haute plasticité augmente la teneur en eau optimale et réduit la densité sèche maximale. Cependant, les résultats de *Okagbue* et *Ochulor* (2007) montrent que l'addition de 0, 2, 6 et 10% de ciment au sol cause une augmentation de la densité sèche maximale, avec une légère réduction de la teneur en eau optimale. L'augmentation de la densité sèche peut être attribuée par la nature du sol étudié «sol graveleux bien gradué», la présence du composants du gravier et l'indice de vide élevé permet un compactage plus efficace. L'addition du ciment améliore et modifie les caractéristiques du sol, menant encore à un compactage performant avec une augmentation de la densité sèche. L'agglomération du ciment autour des grains de sol, causes une augmentation de la taille des particules fines, peut aussi avoir une légère réduction de la teneur en eau optimale. C'est parce que l'addition du ciment affecte la distribution des particules du sol en augmentant la taille des particules fines et de ce fait une réduction de l'attraction d'eau.

Les résultats de *Osula* (1996) suggère que la réaction pozzolanique du mélange "sol-ciment" semble débiter à environ une heure après le malaxage, mais ne contribue pas dans la modification. En outre, la chaux fortement réactive produite dans l'hydratation du ciment devient plus efficace avec le temps qu'avec le contenu de ciment.

### **2.3.3 Effet des ajouts cimentaires sur le compactage**

#### **2.3.3.1 Effet des cendres volantes sur le compactage**

*Prabakar* et *al.* (2004) ont constaté que l'addition des cendres volantes change la porosité et l'indice de vide des sols argileux, elles varient avec l'augmentation du dosage des cendres volantes. Pour tous les échantillons étudiés, la densité sèche diminue avec l'augmentation des cendres volantes due à la faible densité spécifique et le poids du sol, la

réduction est de l'ordre de 15 à 20% et la teneur en eau optimal augmente avec l'addition de cendre volante. L'augmentation de la teneur en eau réduit les densités sèches des sols.

### **2.3.3.2 Effet de poussière CKD sur le compactage**

*Miller et Azad* (2000) ont trouvé que la teneur en eau optimale augmente et la densité sèche diminue avec l'augmentation du CKD pour 03 types de sols testés. Des résultats identiques ont été obtenus par *Sreekrishnavilasam et al.* (2007). L'augmentation de la teneur en eau en raison de l'attraction du CKD à l'eau, et la diminution de la densité sèche est due à l'agrégation des particules.

### **2.3.3.3 Effet des cendres de calcaire sur le compactage**

*Okagbue et Yakubu* (2000) ont trouvé que l'addition des cendres du calcaire diminue la densité sèche et augmente la teneur en eau. Ceci est dû à la floculation et l'agrégation des particules d'argile en raison de la réaction d'échange cationique. La diminution de la densité le dosage des cendres du calcaire augmente est due au remplacement des particules du sol par les particules des cendres du calcaire qui ont un faible poids spécifique.

### **2.3.3.4 Effet des cendres du noyau d'olive sur le compactage**

*Nalbantoglu et Tawfiq* (2006) ont indiqué que la densité sèche maximale du sol traité diminue avec l'augmentation du dosage des cendres du noyau d'olive, due aux particules plus légères de ce dernier que le sol étudié. La valeur très faible de la densité des cendres du noyau d'olive réduit la masse du sol pour le même volume, ayant pour résultat des valeurs plus faible de la densité sèche.

### **2.3.4 Effet des combinaisons des ajouts minéraux sur le compactage**

*Hossain et al.* (2007) ont effectué 38 combinaisons des cendres volcaniques (0-20%) plus le ciment et la chaux (0-4%) sur deux sols argileux de classification (A-7-6, A-6). L'addition des cendres volcaniques et la chaux au sol augmente la teneur en eau optimale. La réaction pouzzolanique des cendres volcanique et la chaux avec les constituants du sol tends à augmenté la teneur en eau optimale. L'augmentation de la teneur en eau optimale avec l'addition des cendres volcaniques et le ciment est attribuée par l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment. La densité sèche maximale diminue avec l'augmentation des cendres volcaniques et avec le contenu du ciment/chaux.

**Attom** (2007) a étudié l'addition de filler de fer seule (2.5, 5, 7.5 et 10%) et les fillers de fer plus le ciment sur un sol argileux, l'effet de ces combinaisons sur le compactage montrent que l'augmentation des pourcentages de filler de fer et filler de fer plus ciment au delà de 10% augmente la densité sèche maximale des sols. Il est à noter que l'augmentation de densité sèche maximale des sols due à l'addition de filler de fer seule sont plus grand que l'addition avec le mélange "filler de fer + ciment".

**Muntohar et al** (2002) ont étudié l'effet de compactage d'un sol argileux mélangé avec la chaux et le RHA, une série d'échantillon a été effectué dont les pourcentages sont 2, 4, 6, 8, 10 et 12% de chaux et 7.5, 10 et 12.5% de RHA. La densité sèche maximale tend a diminué, tandis que, la teneur en eau optimale augmente. La diminution de MDD indique que l'énergie de compactage et plus faible que l'état naturel. L'augmentation de l'OMC tend à être répandue quand la chaux est ajoutée.

**Kolias et al.** (2005) ont étudié l'efficacité des cendres volantes de type C (5, 10 et 20%) plus du ciment (2-4%) sur un sol argileux. Ils ont trouvé que la densité sèche maximale diminue et la teneur en eau optimale augmente avec l'augmentation des cendres volantes. Il est à noter que la teneur en eau optimale plus élevé peut être difficile et coûteux à réaliser pendant des saisons sèches, durant une saison d'hiver facilite le compactage. Ces résultats de compactage sont en concordance avec les résultats de **Basha et al.** (2002).

**Bell** (1994) a démontré que la densité sèche maximale diminue et la teneur en eau optimale augmente avec la combinaison du ciment avec des cendres volantes pour trois types du sol (kaolinite, montmorillonite et le quartz). Les même résultats ont été obtenue avec le mélange "chaux- cendres volantes".

**Degirmenci et al.** (2007) ont montré l'effet de la combinaison du ciment avec du phosphogypse sur les caractéristiques de compactage des sols. Une augmentation de la densité sèche et une diminution de la teneur en eau ont été constatées. Une augmentation de la densité sèche est généralement acceptée comme un indicateur d'amélioration. Ils Ont étudié aussi l'effet de la combinaison des cendres volantes avec le phosphogypse sur les caractéristiques de compactage des sols. La densité sèche maximale et la teneur en eau optimale diminue avec l'augmentation des dosages des cendres volantes et du phosphogypse.

## 2.4 Effet des ajouts minéraux sur la résistance à la compression

La réaction immédiate du sol argileux avec les ajouts minéraux provoque des modifications du comportement rhéologique des sols traités qui est dû au phénomène de floculation entraînant un changement de la granulométrie par la formation d'agrégats [Kavak et Akyarh, 2007; Sakr et al., 2008; Okagbue et Ocholor, 2005; Osula, 1996 et Ansary et al., 2007], et induisant une amélioration des propriétés d'usage des sols traités. Même si l'optimum de compactage est décalé vers des teneurs en eau plus importantes et si la densité de compactage est plus faible, les propriétés mécaniques s'améliorent avec le traitement des ajouts minéraux [Ormsby et Kinter, 1973; Ola, 1977; Moussa et al., 1989; Attoh-Okine, 1995; Bell, 1996; Khattab, 2002; Osinubi et al., 2006; Guney et al., 2007].

### 2.4.1 Effet de la chaux sur la résistance à la compression

Selon Bell (1996) la résistance mécanique des sols argileux augmente avec l'addition de la chaux ce qui est conforme avec les résultats de [Attoh-Okine, 1995 et Ola, 1977]. Bell (1996) a remarqué que la résistance dépend de la présence de pozzolane, quand la pozzolane est disponible, elle réagit avec la chaux, elle améliore la résistance. Bell (1996) s'avérerait que la quantité absolue de silice et d'alumine requise pour soutenir la réaction pouzzolanique dans les sols argileux est relativement faible. Par conséquent les argiles montrent généralement une augmentation significative de la résistance quand la chaux (4 à 6%) est ajoutée pour la stabilisation. La Montmorillonite répond beaucoup et plus rapidement, et ainsi montre un gain de résistance précoce que la kaolinite. Cependant, après un certain temps, la résistance de la montmorillonite n'est pas aussi élevée que la kaolinite. Concernant les résistances mécaniques, c'est la kaolinite qui permet l'acquisition des meilleures caractéristiques par rapport à l'illite et à la montmorillonite. Toutes les argiles (kaolinite, illite et montmorillonite) réagissent avec la chaux mais de manières différentes.

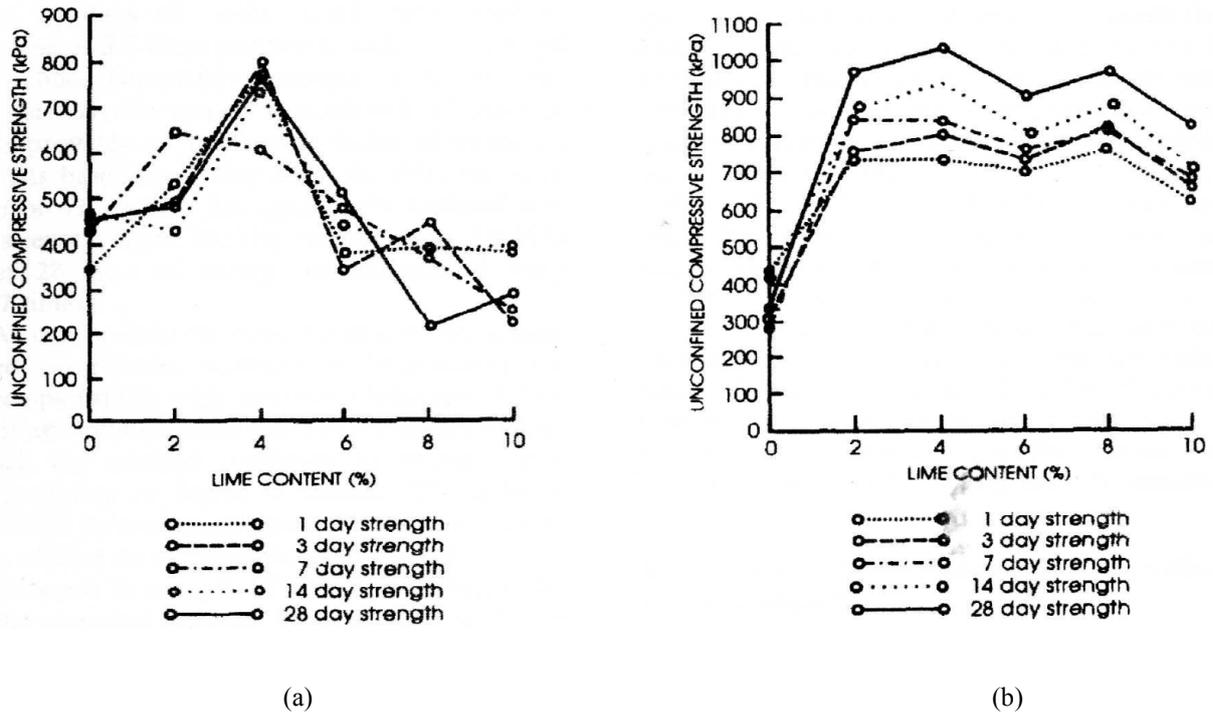


Fig. 2.6- Effet de la chaux sur la résistance à la compression pour (a) montmorillonite (b) kaolinite [Bell, 1996].

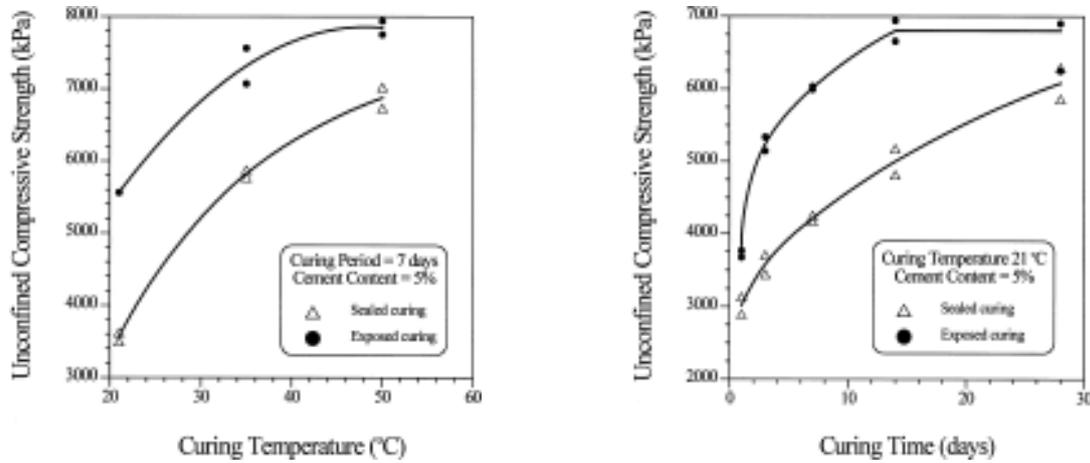
*Manasseh et Olufmi* (2008) ont obtenu une valeur optimale de la chaux de 8%, pour laquelle la résistance à la compression augmente de 126 KN/m<sup>3</sup>, à 1400 KN/m<sup>3</sup> et 1480KN/m<sup>3</sup> à 7, 14 et 28 jours respectivement.

#### 2.4.2 Effet du ciment sur la résistance à la compression

Les résultats des essais de *Okagbue et Ochulor* (2007) indiquent que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation des dosages du ciment. L'augmentation de la résistance est attribuée aux composantes actives du ciment portland. Par l'hydratation, ces composés actifs (silicate tricalcique, silicate dicalcique et l'aluminate tricalcique) cristallisent et lient ensemble les particules du sol, de ce fait en les transformant en masse dure. Les résultats obtenus suggèrent que l'efficacité du ciment dans l'amélioration de la résistance du sol peut également être attribuée à la composition du sol.

*Aiban et al.* (1998) ont employé deux régimes de traitement: fermé (les spécimens ont été enveloppés et dans quatre couches de feuilles en plastique pour empêcher la perte d'humidité) et exposé à l'air libre (par lequel les spécimens ont été directement exposés à l'air libre de laboratoire à une température de 21±2°C). Les résultats indiquent clairement qu'il y a une augmentation presque linéaire de  $q_u$  dans les sept premiers jours avec le dosage

du ciment pour les deux méthodes de traitement (Fig. 2.7a). Ainsi, ils ont choisi 5% du ciment comme dosage d'un sol marneux, pour étudier l'effet de la température et la période de cure (Fig. 2.7b).



**Fig. 2.7-** Variation de la résistance à la compression en fonction: a) du mode de conservation et b) de la durée de cure [Aiban et al. (1998)].

Les résultats indiquent qu'après seulement 28 jours le sol marneux traité subit une augmentation de résistance jusqu'à 6800 kPa (c-à-d une augmentation de 13% par rapport à 7 jours). En outre, à 50°C la résistance augmenterait jusqu'à 7845 kPa (c-à-d une augmentation de 41% par rapport à la valeur obtenue de la température ambiante).

*Kenai et al.* (2006) ont étudié la résistance à la compression à l'état sec et la résistance à la compression après immersion dans l'eau pendant 48 heures à 28 jours. Les essais ont été faits sur une argile sableuse avec l'addition de 0, 4, 6, 8, 10, 12, 15 et 20% du ciment portland de type CEMI 32.5. Les résultats sont montrés dans le tableau suivant:

**Tableau 2.6** –Effet du ciment sur la résistance à la compression à l'état sec et après immersion [Kenai et al., 2006].

Contenu du Ciment %	0	4	6	8	10	12	15	20
Résistance à la compression à l'état sec (MPa)	1.67	2.34	3.28	4.02	4.20	5.19	6.14	6.5
Résistance à la compression résiduelle relative (%)	0	52.06	54.79	50.54	50.52	40.58	39.55	40.92

Les résultats obtenus (Tableau 2.6) montrent que l'augmentation du dosage du ciment augmente de la résistance à la compression. Ceci est dû à l'hydratation suffisante du ciment dans les pores de la matrice et la rigidité élevée de sa structure par la formation d'un grand nombre de liant rigide dans le sol. Ces liants qui lient les particules d'argile ont pu attribuer

des produits de cimentation tels que les hydrates de calcium silicate (CSH), hydrates calcium aluminate (CAH) et hydrates calcium alumino-silicate (CASH). L'immersion dans l'eau pendant 48h réduit la résistance à la compression jusqu'à 60% et la désintégration complète des spécimens non stabilisés était observée en quelques minutes.

### **2.4.3 Effet des ajouts cimentaires sur la résistance**

#### **2.4.3.1 Effet des cendres volantes sur la résistance**

*Bin-Shafique et al.* (2009) ont trouvé que l'addition de 20% des cendres volantes a augmenté la résistance à la compression de 210 à 800KPa pour un sol de faible plasticité et de 180 à 560KPa pour un sol expansive.

#### **2.4.3.2 Effet de poussière de four du ciment (CKD) sur la résistance**

*Miller et Azad* (2000) ont montré que l'addition du CKD dans le sol peut sensiblement et rapidement améliorer la résistance à la compression. Cette amélioration est plus significative pour les sols de faible indice de plasticité. Le CKD augmente la résistance à la compression pour 7 et 14 jours après le compactage, et après plus lentement. Pour le même dosage du CKD le taux d'augmentation de la résistance est plus grand pour les sols de faible plasticité. Cela suggère qu'une certaine quantité de CKD est nécessaire pour satisfaire les différentes réactions qui peuvent se produire avec les minéraux d'argile, et un excès de cette quantité de CKD contribue principalement aux réactions de cimentations. L'efficacité du CKD diminue avec l'augmentation du PI du sol.

*Sreekrishnavilasam et al.* (2007) ont noté que le CKD présente une certaine réactivité, un dosage égale ou plus grand à 15%, est nécessaire pour augmenter la résistance du sol. Grâce à la petite dimension des particules et ainsi la haute surface spécifique, leur utilisation pourrait être avantageuse pour l'économie, le temps et les coûts dans la construction sur les sols humides. En présence de 10 à 20% de CKD, le sol contient une teneur en eau très élevée à cet effet, rendue compacte sans difficultés et sans avoir besoin de tout séchage. Tandis que, la résistance mesurait dans ces conditions était limité, l'addition de 1% de ciment Portland a augmenté de manière significative la résistance. Ceci suggère que l'utilisation combinée du CKD avec du ciment Portland pourrait s'avérer un efficace moyens d'adresser la construction sur les sols humides.

#### **2.4.3.3 Effet des cendres du noyau d'olive sur la résistance**

Les résultats de *Nalbantoglu* et *Tawfiq* (2006) indiquent que 3% de cendres du noyau d'olive augmente la résistance à la compression. Au delà de cette valeur l'ajout aucun de résistance n'a été constaté.

#### **2.4.4 Effet de la combinaison des ajouts cimentaires sur la résistance**

Les essais réalisés par *Al Hassan* et *Mustapha* (2007) sur l'amélioration d'un sol latérique de classification A-7-6 par la combinaison du RHA (2-8%) avec du ciment (4-6%) ont montré l'amélioration énorme de la résistance du sol traité par rapport au sol naturel. La résistance augmente avec l'augmentation de RHA à un dosage spécifique du ciment et un pic a été atteint à 4-6% de RHA. La résistance à la compression augmente avec l'âge et avec l'augmentation des dosages du ciment et du RHA. L'amélioration de la résistance est due à l'augmentation de RHA qui provient par la réaction pouzzolanique entre la chaux libérée de l'hydratation du ciment et le RHA comme un second matériau.

*Kolias* et *al* (2005) ont étudié l'efficacité des cendres volantes de classe C (5, 10 et 20%) avec du ciment (2-4%) sur l'amélioration d'un sol argileux. L'addition du ciment et les cendres volantes engendrent un meilleur arrangement des particules et la combinaison de ces ajouts en liant augmente la résistance au jeune âge du matériau. La chaux libre des cendres volantes réagit avec l'argile et tend à la formation des hydrates de silicate d'aluminium (CAH) et de calcium (CSH). Les propriétés mécaniques telles que la compression, la flexion et la traction, le module d'élasticité et le CBR sont considérablement élevées. Ils ont signalé aussi que l'effet des cendres volantes sur la résistance n'est pas dû uniquement à la chaux libre qui la contient mais aussi à la réaction pouzzolanique.

*Degirmenci* et *al.* (2007) ont étudié l'effet de l'addition du ciment et du ciment avec du phosphogypse, ils ont étudié aussi l'effet de l'addition des cendres volantes et des cendres volantes avec du phosphogypse. Une nette augmentation de la résistance à la compression du sol traité par rapport à celle du sol non traité a été constatée de cette étude. Ils ont constaté, aussi, que le dosage du ciment a une grande influence que le dosage des cendres volantes.

*Bagherpour* et *Choobbasti* (2003) ont effectué des essais de résistance à la compression sur une argile limoneuse à faible plasticité, ils ont trouvé que l'addition de la fumée de silice améliore la réactivité des sols et augmente les liens de cimentation. Leurs

résultats montrent, aussi, que la fumée de silice augmente considérablement la résistance à la compression du sol par rapport à la combinaison "fumée de silice-ciment".

*Hossain et al* (2007) ils ont conclu que la résistance à la compression dépend du type du sol, du dosage des stabilisateurs, de la combinaison des stabilisatrices et de l'âge. Ils ont trouvé que la résistance des sols augmente avec l'augmentation des cendres volcaniques et l'âge. Et que la combinaison "ciment-VA" produit plus de résistance que la combinaison "chaux-VA". Ils ont indiqué aussi que le type du sol a une grande influence sur les propriétés mécaniques. L'augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation des stabilisateurs indique que la cohésion du sol argileux augmente due à l'addition des cendres volcaniques, de la chaux et du ciment. La haute résistance des cendres volcaniques comparée avec la chaux est attribuée à la propriété pouzzolanique des cendres volcaniques.

*Bell* (1994) a traité la kaolinite, la montmorillonite et le quartz avec le ciment et la chaux mélangés avec différentes proportions de cendres volantes (PFA), l'addition du ciment-PFA apporte une augmentation de la résistance et le module d'élasticité pour les trois sols étudiés, cette augmentation s'accroît avec des grandes proportions du ciment. Le quartz et la kaolinite ont développé plus de résistance. Pour le mélange chaux-PFA la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de quantité de chaux mais pas autant que les mélanges de ciment-PFA.

## **2.5 Effet des ajouts minéraux sur la durabilité**

### **2.5.1 Effet des ajouts minéraux sur les cycles de Mouillage-Séchage**

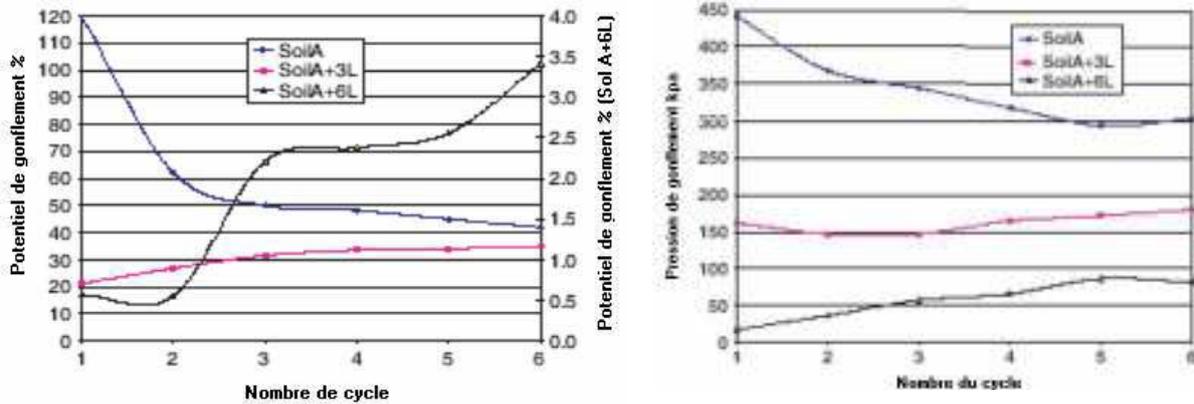
*Güney et al.* (2005) ont étudié l'impact des cycles de mouillage et du séchage sur le comportement des sols argileux gonflants avec l'addition de la chaux. Ils ont effectué des essais de gonflement sur des mélanges de sol avec de diverses quantités d'argiles (kaolinite-bentonite), selon différentes plasticités. Pour cela ils ont utilisé trois types des sols argileux :

1. le premier mélange (Sol A) est composé de 70% de bentonite + 30% de kaolinite;
2. le deuxième mélange (Sol B) est constitué de 30% de bentonite + 70% de kaolinite;
3. le troisième mélange (Sol C) est un sol argileux de plasticité moyennement élevée.

Il s'agit de l'argile de Turkmen.

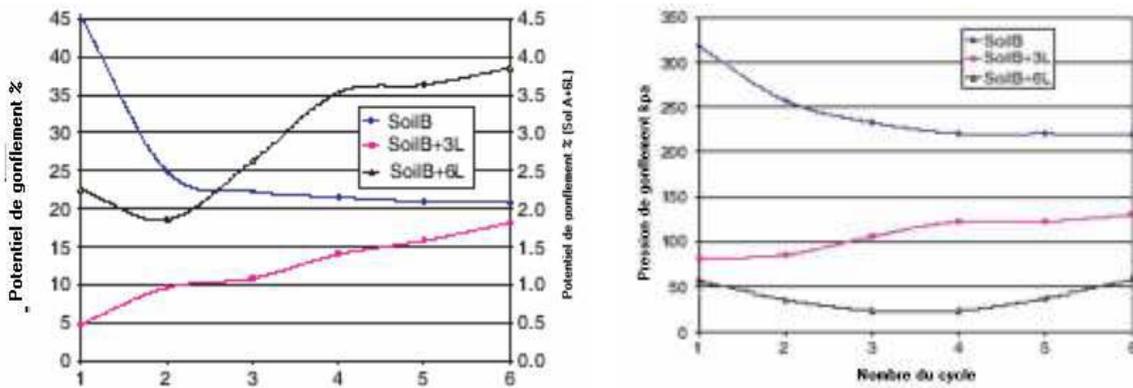
Les essais de gonflement ont été effectués selon ASTM D4546 pour chaque type du sol avec deux dosages différents de la chaux (3 et de 6%). Les résultats ont montré que l'effet bénéfique de la chaux a été perdu après les cycles pour les sols de grande plasticité (sol A et B)

ce qui est le contraire pour le sol C de faible plasticité ou l'effet bénéfique de la chaux a été préservé. D'autre part, le potentiel de gonflement et la pression de gonflement du sol non traité ont commencé à diminuer après le premier cycle. L'équilibre a été atteint après le quatrième cycle.



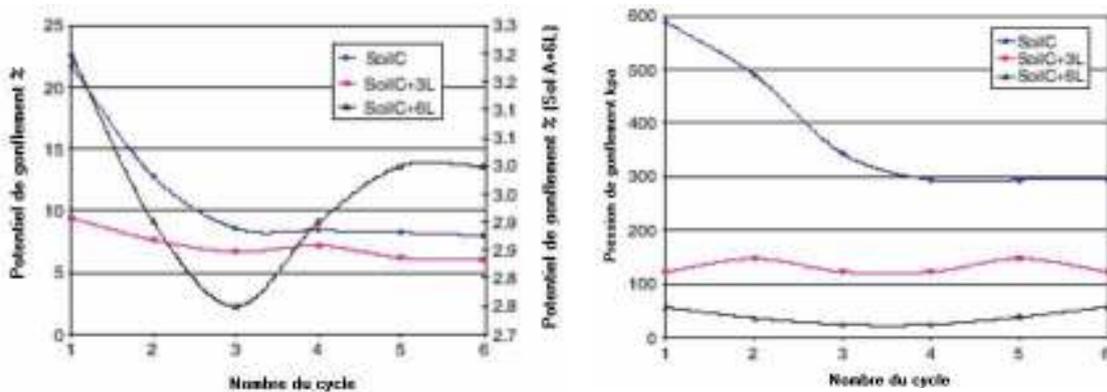
**Fig. 2.8-** effet du dosage de la chaux sur la durabilité du sol A

a) potentiel du gonflement et b) pression gonflement [Guney et al., 2005].



**Fig. 2.9-** effet du dosage de la chaux sur la durabilité du sol B

a) potentiel du gonflement et b) pression gonflement [Guney et al., 2005].



**Fig. 2.10-** effet du dosage de la chaux sur la durabilité du sol C

a) potentiel du gonflement et b) pression gonflement [Guney et al., 2005].

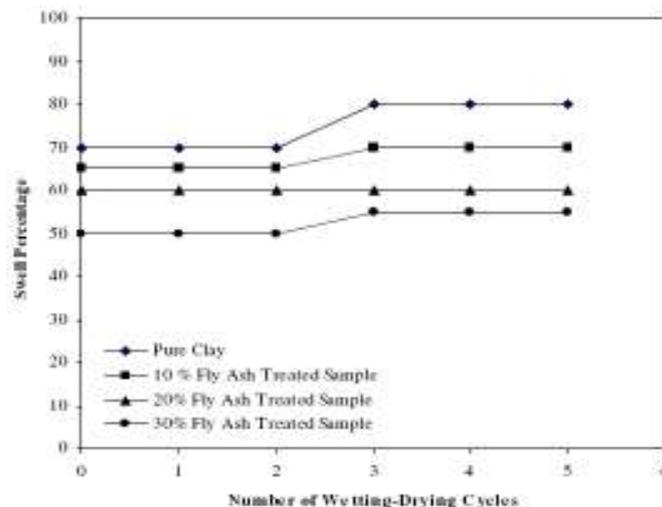
Ils ont conclu, que pour des applications de cycles mouillage-séchage sur les sols non stabilisés, le potentiel de gonflement est réduits. Tandis que le potentiel de gonflement maximum subit une réduction après le premier cycle, il diminue graduellement aux cycles suivants et l'équilibre est atteint après 4 à 6 cycles. La stabilisation par la chaux est négativement affectée par les cycles mouillage-séchage. En d'autres termes, l'effet bénéfique de la chaux sur le potentiel de gonflement est partiellement perdu dans les conditions de mouillage-séchage. Ces résultats amènent à déconseiller ce genre de traitement dans les régions à saisons variables (humidification /séchage).

*Khattab et Mukhtar* (2003) ont étudié l'influence du pré-séchage d'un sol argileux plastique traité avec 4% de chaux. Deux types d'échantillon ont été préparés. Le premier a été saturée immédiatement après 7jours de murissement aux humidités relatives de 76%, 44% et finalement 32%. Le second a été séché à 60°C après 7jours de murissement. Le retrait-gonflement libre est un processus tridimensionnel; donc, la hauteur et le diamètre des échantillons lors du séchage ont été mesurés pour évaluer les changements volumiques. Les résultats de la variation d'indice des vides des échantillons non traités et traités lors de 7 cycles de séchage-mouillage (commençant par le séchage ou par le mouillage), indiquent qu'après 7 cycles et à la fin de la saturation, ils ont obtenu une diminution d'indice de vide après traitement à la chaux. Cependant, l'indice de vide finale des échantillons initialement séché est plus élevé que les échantillons initialement saturé. Cet effet montre l'effet négatif du pré-séchage des échantillons traité. Pour analyser ces résultats ils ont étudié l'effet du traitement à la chaux sur le gonflement libre. Le retrait enregistré est diminué de 20.5% à 4.5% après le premier cycle grâce au traitement. Dans l'échantillon traité et pré-séché subi un important gonflement lors du premier cycle de saturation due à un indice de vide initial plus faible. Ils ont observé aussi des variations volumiques (gonflement-retrait) plus importante pour l'échantillon qui commence par le premier cycle de séchage que pour l'échantillon du premier cycle de mouillage. Pour l'échantillon traité initialement saturé, le gonflement tend à augmenter légèrement avec le nombre de cycles de séchage-mouillage. Ceci peut être attribué à la rupture et à l'endommagement de quelques liaisons de cimentation créées par le traitement à la chaux. Dans le cas de l'échantillon pré-séché, une augmentation constante du gonflement a été observée, avec une valeur finale qui s'approche de celle de l'échantillon non traité. Ceci pourrait être expliqué par le fait que le séchage interrompe les réactions chaux/argile et mène à la destruction des premières liaisons créées par le traitement, dans la matrice stabilisée. Pour

l'échantillon initialement saturé le gonflement est réduit par rapport au sol non traité de 95% à 34% au dernier cycle. Tandis que, le gonflement d'échantillon initialement séché par rapport au sol non traité est réduit de 39% à 10% au dernier cycle. Ils ont conclu que le séchage prématuré interrompt le mécanisme de réaction chaux-argile et mène, semble-t-il, à la destruction des liaisons fragiles naissantes issues de la réaction pouzolanique dans le sol traité.

*Bin-Shafique et al* (2009) ont suggéré que les cycles mouillage-séchage, dans l'eau douce, n'ont pas d'effet significatif sur la plasticité, la résistance à la compression et le potentiel de gonflement des sols traités avec des cendres volantes. Cependant, les cycles mouillage-séchage dans l'eau saline réduit la plasticité mais n'ont aucun effet sur la résistance. Une légère diminution du gonflement a été ainsi observée après l'utilisation des cycles de mouillage-séchage dans l'eau saline.

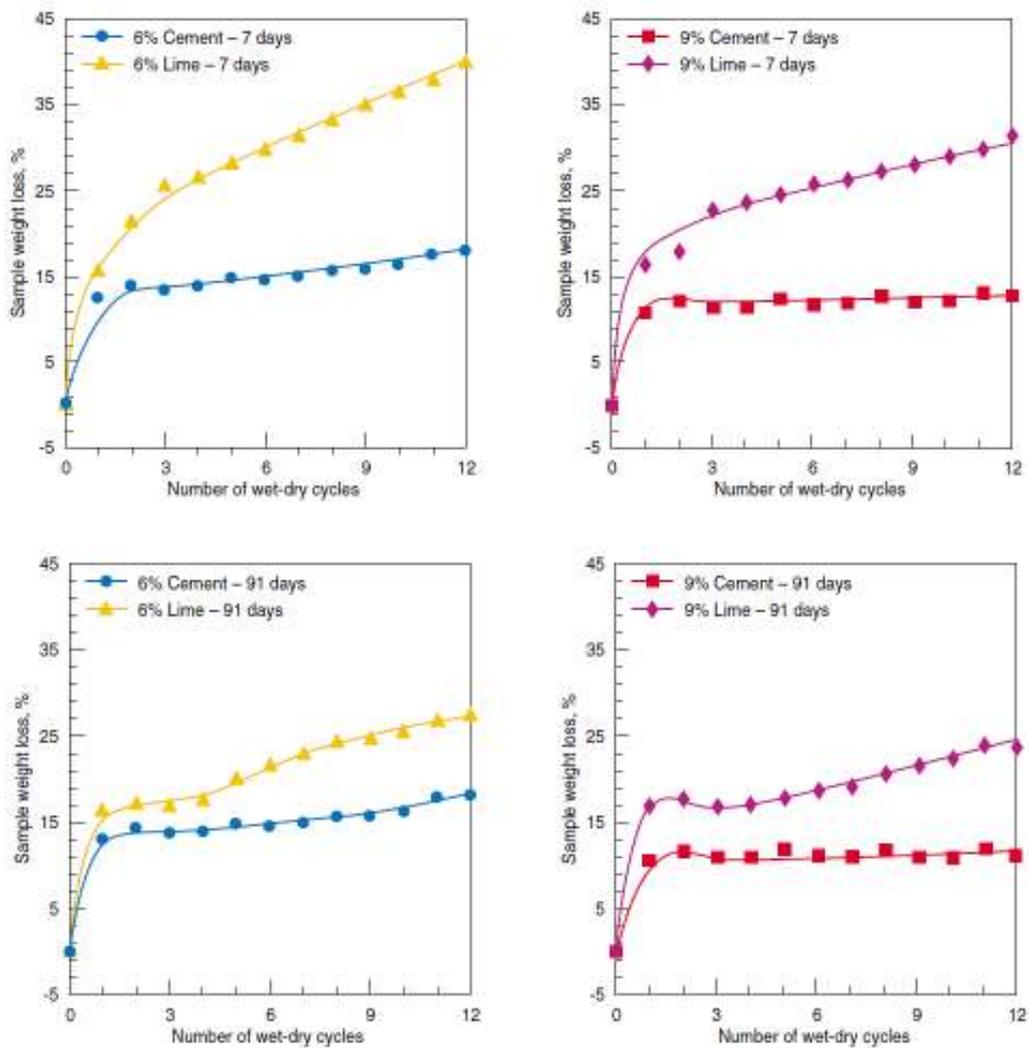
*Mollamahmutoglu et al* (2009) ont examiné l'effet du mouillage-séchage sur le potentiel de gonflement d'un sol expansif contenant 10, 20 et 30% de cendres volantes. Les échantillons ont été séchés dans un four pendant 48 heures et puis soumis au test de gonflement libre jusqu'à cinq cycles. Les résultats indiquent que, pour les sols sans ou avec traitement, le gonflement libre augment légèrement avec l'augmentation dans le nombre des cycles de mouillage-séchage et après trois cycles devient stable légèrement (Fig. 2.11).



**Fig. 2.11-** Variation du gonflement libre avec les cycles mouillage-séchage  
[*Mollamahmutoglu et al.*, 2009].

L'étude réalisée par **Parsons et al.** (2004) pour l'évaluation de la performance du CKD dans la stabilisation des sols; ils ont utilisé le test de durabilité (mouillage-séchage) pour évaluer la performance à long terme de chaque combinaisons étudié. La durabilité des sols traités par du CKD a été comparé avec celle du sol traité par d'autre additifs. Cette étude a ort a conduit de confirmer que le CKD augmente la performance et la durabilité des sols étudié, mais cette amélioration n'est pas aussi grande que celles des autres additifs utilisé (la chaux, les cendres volantes de classe C et le ciment.), la plupart des échantillons n'ont pas survécu et maintenu jusqu'à 12 cycles. Cela accorde le comportement observé avec la chaux, les cendres volantes et le ciment dans le traitement des échantillons. Les échantillons scarifiés traités par CKD ont montré un comportement semblable par rapport aux autres additifs en ce qui concerne le nombre de cycles survécu.

**Milburn et Parsons** (2004) ont utilisé le ciment Portland, la chaux, les cendres volantes et un stabilisateur chimique permazyme dans le but d'évaluer leur performance à stabiliser les sols argileux de classification CL, CH, ML, SM et SP. D'après le test de Mouillage-Séchage, ils ont trouvé que le traitement du sol de classe CL avec la chaux complète la majorité des cycles. Le ciment et les cendres volantes avec le sol CL ont une performance comparable des cycles. Le traitement des sols CH avec le ciment complète la majorité des cycles et les sols silteux. Ils ont conclu que: le test de Mouillage-Séchage montre que le traitement avec le ciment est plus efficace que le traitement avec la chaux et les cendres volantes pour les sols grenu et les sols silteux. La chaux donnera de meilleurs résultats que les cendres volantes et le ciment pour les sols fins. Par contre, **Bhattacharja, et Bhatta** (2003) ont rapporté que la durabilité du sol lors du mouillage et du séchage répété dépend principalement de la structure de pore et la résistance à la traction du matériau. D'autre paramètre tel que: le frottement entre les particules et la cohésion peuvent également influencer la perte du matériau durant le test. Le mouvement d'eau à l'intérieur et à l'extérieur des pores peut résulter une pression capillaire dans le réseau des pores et l'échantillon peut s'effondrer. En conséquence, les sols stabilisés ont subit des pertes de masse du matériau pendant l'essai, et dans la plupart des cas, désagrégées avant l'achèvement de 12 cycles.



**Fig. 2.12-** Perte du poids du sol CAL (IP= 25) dans le test de Mouillage-Séchage [Bhattacharja et Bhattu 2003].

**Tableau 2.7-** Résultats des essais de Mouillage-Séchage des sols Texas 1 et Texas 2  
**[Bhattacharja et Bhatta 2003].**

Soil	Stabilizer	Testing age (day)	Stabilizer dosage (%)	Percent weight loss at the end of failing cycle	End of the cycle when sample failed
Texas 1	Cement	7	6	52	3
			9	55	10
		91	6	45	4
			9	53	11
	Lime	7	6	58	4
			9	46	7
		91	6	34	3
			9	33	5
Texas 2	Cement	7	6	36	2
			9	53	10
		91	6	40	3
			9	51	12
	Lime	7	6	57	6
			9	53	10
		91	6	49	5
			9	55	10

Texas1: IP=42 et Texas2: IP=37

Les résultats indiquent que le traitement avec le ciment portland exhibe une performance supérieure que le traitement avec la chaux dans le sol argile sableuse (CAL). Par rapport au sol CAL (argile sableuse), le sol Texas 1 a montré une faible stabilisation et la plupart des échantillons n'ont pas complété les 12 cycles, il est apparent que le sol de grande plasticité a subi une souffrance sévère dans le test de Mouillage-Séchage. Cette faible performance a été observée pour les 02 stabilisateurs (chaux et ciment). Le tableau 2.7 montre que l'augmentation des stabilisateurs minimise les dégradations et cela est plus applicable dans le ciment que dans la chaux, l'augmentation du dosage de 6 à 9% a augmenté le nombre des cycles de 07 fois dans le traitement avec le ciment et de 02 à 03 fois dans le traitement avec la chaux. Les données du sol TEXAS 2 ont montré le même comportement et les mêmes constatations du sol TEXAS 1 à 07 et 91 jours, cette ressemblance de performance est due à la plasticité identique de ces deux sols. Il est à noter que pour les sols de plasticité élevée la contribution du dosage des additifs est plus significative que la durée de cure. Dans ce test de mouillage-séchage, la résistance à la traction est appliquée seulement sur les parois des vides ou l'eau se met en mouvement à l'intérieur et à l'extérieur des réseaux poreux. Pour les deux sols argileux du Texas à 9% du ciment, montrent une meilleure performance que la chaux. Comme mentionné ci-dessus, une tendance semblable était également observée pour le sol argile sableuse CAL. L'observation relative d'une meilleure exécution pour le ciment Portland

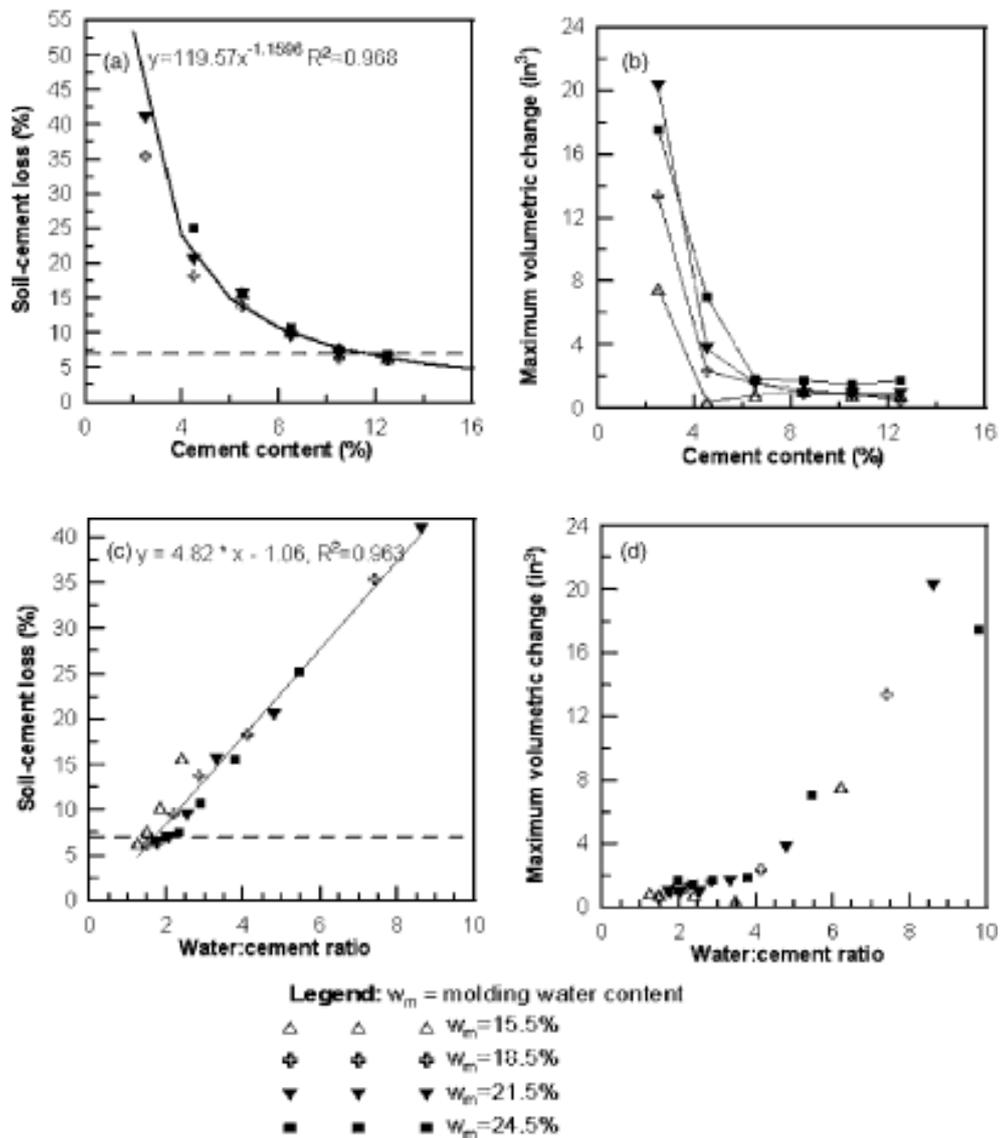
que la chaux suggère bien que l'approvisionnement des ions  $\text{Ca}^{2+}$ , l'ingrédient nécessaire pour la stabilisation, les processus physico-chimique impliqués ne sont pas entièrement semblable, et la durabilité (Mouillage-séchage) est très probablement, dictée par cette différence. Ils ont conclu que la nature physico-chimique du sol traité avec du ciment, en particulier le sol à moyenne plasticité, résulte une performance considérable de durabilité. Pour les sols de grande plasticité, à un faible dosage du ciment et de la chaux, ont des performances similaires.

**Al-Ayedi** (1996) a étudié le comportement du sol de Sabkha qui a été stabilisé avec 0, 3, 5, 7 et 10% du ciment. Le test de durabilité mouillage-séchage mesure la perte du poids et la variation du volume en fonction des nombres de cycles. Les résultats mènent à : 0% du ciment l'échantillon s'effondre complètement, à 3% du ciment le spécimen se divise indépendamment du tiers supérieur de sa taille réelle après 2 cycles. Après les 12 cycles la perte du poids était entre 14% et 3.5%. Il a conclu que la perte du poids diminue lorsque le dosage du ciment augmente ce qui indique que le ciment est le stabilisateur désiré dans cette étude non seulement pour la résistance mais aussi pour la durabilité, l'auteur a considéré que 7% du ciment représente un dosage optimale pour la durabilité.

**Khatab et al.** (2007) ont étudié l'efficacité à long terme d'un sol expansif en utilisant la chaux basé sur l'effet de mouillage-séchage sur le gonflement. Tous les essais ont été effectués sur des spécimens compactés à une teneur en eau optimale et à une densité sèche maximale pour simuler l'exposition possible d'un sol expansif aux changements climatiques dans la construction des routes ou d'autres applications de génie civil. L'influence des cycles de mouillage-séchage sur le sol expansif traité à la chaux montrent une réduction du gonflement. Cependant, l'efficacité maximale était pour les spécimens qui ont subit une saturation initiale, et elle était moins importante pour les sols qui ont subit un séchage initial. Les spécimens initialement saturé, le gonflement semble a être stabilisé après un très peu nombre de cycle à une valeur significative inférieur que le sol non traité. Le gonflement diminue de 75 à 49%. Cependant, Les spécimens initialement séché, le gonflement augmente progressivement durant les cycles et le traitement semble a perdre la majorité des effets bénéfique. Ce comportement est attribué par l'interruption de principale réaction pouzzolanique chaux-argile durant l'initial séchage. L'essai de porosité à mercure confirme ce comportement ou la proportion des grands/petit pores est identique à celle du sol non traité. Au contraire ou l'addition de la chaux augmente significativement le volume total des pores, avec des proportions similaires de grands/petit pores. Le traitement par la chaux induit une

plus d'homogénéisation et une meilleure distribution des grandeurs des pores ce qui a été obtenu par le test de porosité à mercure.

*Zhang et Tao* (2008) ont utilisé 03 procédures d'essais (le Tube section, la résistance à la compression à 07 jours et le test de durabilité mouillage-séchage) dans le but d'évaluer et comparer la prédiction de la durabilité d'un sol stabilisé par le ciment. Les essais ont été exécutés sur une argile silteuse de faible plasticité. Une série d'échantillon a été compacté à différents dosages du ciment (2.5, 4.5, 6.5, 8.5, 10.5 et 12.5%) et à 04 différents teneurs en eau (15.5, 18.5, 21.5 et 24.5%). Les résultats des tests indiquent que le rapport E/C influe de manière considérable la durabilité du sol stabilisé.



**Fig. 2.13-** Résultats obtenus par le test de mouillage-séchage après 12 cycles [*Zhang et Tao* 2008].

Les figures 2.25a et 2.25c montrent que la perte du sol diminue avec l'augmentation du dosage du ciment. Cependant, elle augmente avec l'augmentation du rapport E/C. A 10.5% du ciment et E/C=1.5 c'est avéré les valeurs satisfaisant à leur critères. Et que la densité sèche a une influence négligeable sur la perte du poids. Les figures 2.25b et 2.25d montrent que les changements volumétriques maximales généralement diminue avec l'augmentation du dosage du ciment, mais elle augmente avec l'augmentation du rapport E/C. il est apparent que à faible dosage du ciment moins de 6%, les échantillons compacté avec des grandes teneurs en eau ont montré le plus grand changement volumétrique ce qui correspond à un grand rapport E/C. et à un grand dosage du ciment plus de 6% et un rapport E/C moins de 4, tous les échantillons ont les mêmes changements volumétriques.

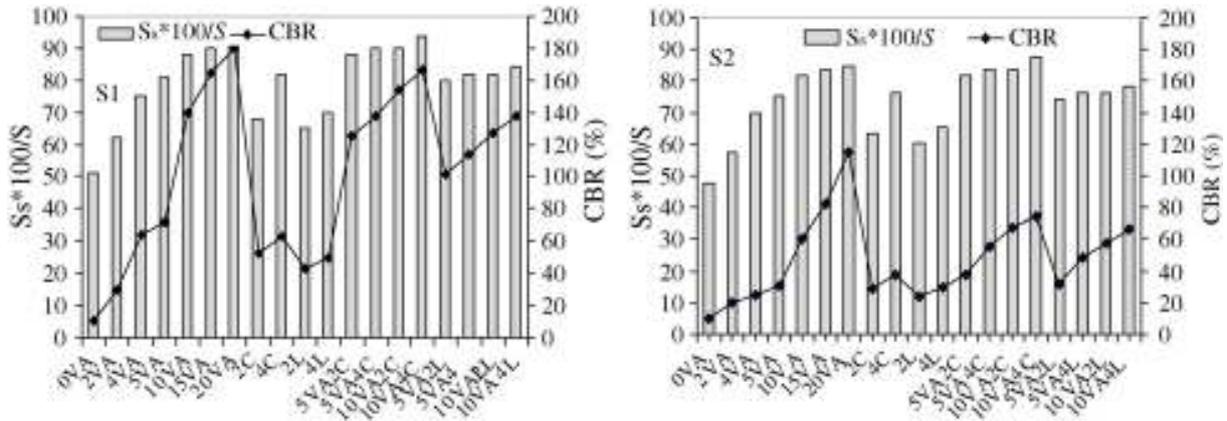
### **2.5.2 Effet des ajouts minéraux sur l'immersion d'eau**

*Osinubi et al.* (2009) ont évalué la durabilité du mélange de sol latérique-cendre de canna sucre, l'essai de durabilité a été fait par immersion des spécimens dans l'eau afin de mesurer la perte de résistance. La résistance des spécimens traités avec 2% des cendres de canna sucre était 9% (c-à-d une perte de 91% de la résistance). La perte de la résistance enregistrée est plus que 20% en maximum pour tous les échantillons traités. Ils ont conclu que les spécimens n'ont pas résisté à l'essai de durabilité. Ce sera donc nécessaire d'incorporer d'autres additifs efficaces tels que le ciment ou la chaux dans le sol pour améliorer leur durabilité.

*Hossain et al.* (2007) ont utilisé des spécimens cylindriques de (39 mm de diamètre and 78 mm de longueur) pour effectuer les essais de la résistance à la compression les spécimens ont été examiné pour étudier l'effet d'immersion d'eau sur la résistance à la compression ( $S_s$ ) à 91jours les 02 types du sol étudié était: S1 de classification A-6 et S2 de classification A-7-6.

Le rapport de la résistance exprimé en pourcentage ( $100S_s/S$ ) augmente avec l'augmentation des cendres volcaniques (VA), du ciment et de la chaux. En général, pour les même dosages d'additifs, l'ajout du ciment montre le plus grand rapport de résistance que l'ajout du VA ou de la chaux. Pour le sol S1, le rapport de la résistance était supérieur à 80% pour tous les mélanges sauf pour 0VA, 2VA, 4VA, 2C, 2L et 4L. Par contre, pour le sol S2, le

rapport de résistance était inférieur à 80% pour tous les mélanges sauf pour 10VA, 15VA, 20VA, 5VA2C, 5V4C, 10VA2C et 10VA4C.



**Fig. 2.14-** Effet d'immersion sur la résistance à la compression à 91 jours avec des combinaisons de (cendre volcanique, ciment, chaux) [Hossain et al., 2007].

*Khattab et al.* (2008) ont étudié l'effet d'immersion sur la résistance à la compression. 02 échantillons ont été préparés avec 2, 4, 6 et 8% de la chaux et de déchet de la chaux. Le premier échantillon a été testé après 09 jours de cure, l'autre échantillon, après 7 jours, a été immergé dans l'eau pendant 02 jours. Les résultats sont montrés dans les tableaux suivant 2.10.

**Tableau 2.8** – Réduction de la résistance à la compression% du sol stabilisé durant la saturation [Khattab et al., 2008].

Addition % (chaux, déchet)	Réduction de la résistance à la compression % (7jours de cure+2jours d'immersion)	
	Chaux	Déchet
2	-30	-81
4	-13	-72
6	-6	-27
8	-	-9

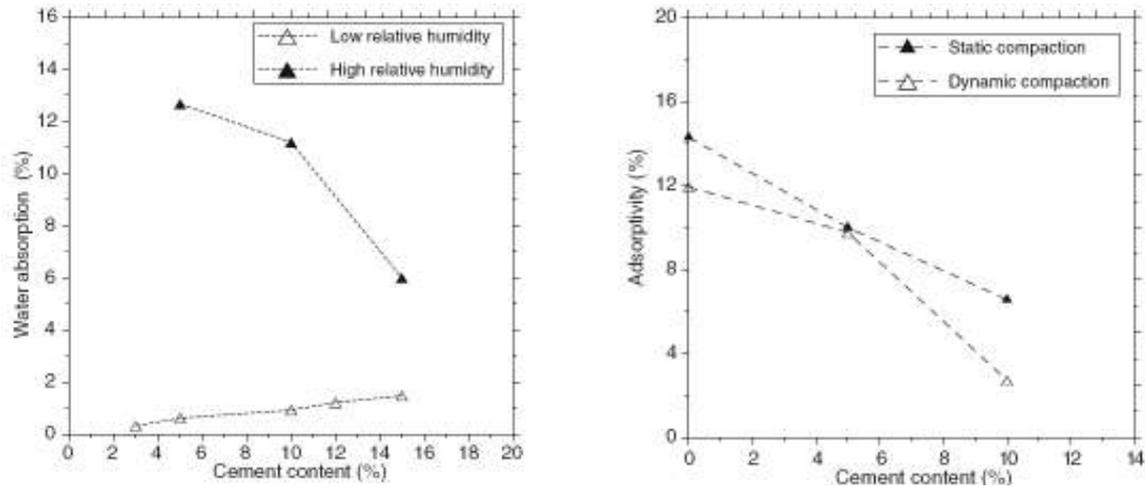
Ces résultats montrent que la réduction de la résistance à la compression pendant l'immersion varie de 6 à 30% pour le sol stabilisé avec la chaux. Tandis que, des réductions élevées ont été obtenues par le traitement avec le déchet de la chaux (de 9% à 81%). D'autre part, la réduction diminue avec l'augmentation du contenu de déchet de la chaux, c.-à-d. un

mélange plus durable pourrait être obtenu quand un plus grand pourcentage du stabilisateur est ajouté. Cependant, les résultats ont montré que la durabilité du sol traité donne une bonne indication de la performance. En conséquence, les sols stabilisés ne devraient pas dépendre seulement du dosage optimum de stabilisateur basé sur UCS seulement mais la durabilité devrait aussi être considérée.

### **2.5.3 Effet des ajouts minéraux sur l'Absorption d'eau par capillarité « la sorptivité »**

*Kenai et al.* (2006) ont présenté des résultats d'une étude expérimentale sur l'effet de différentes méthodes de compactage sur la résistance à l'eau. Ils ont utilisé une argile sableuse avec l'addition de 0, 4, 6, 8, 10, 12, 15 et 20% de ciment portland de type CEMI 32.5. La résistance à l'eau a été étudiée en mesurant la pénétration de l'eau par l'action capillaire. La combinaison du compactage dynamique et la stabilisation chimique réduit sensiblement l'absorption de l'eau par l'action capillaire de 11.9% pour 0% du ciment à 9.8 et 2.7% pour 5% et 10% du ciment, respectivement. Une tendance semblable a été observée quand le compactage statique a été utilisé. L'absorption de l'eau a diminué de 14.3 à 10 et 6.6% pour, respectivement, 0, 5 et 10% du ciment. Cependant, le compactage statique était moins efficace que le compactage dynamique dans la réduction de l'absorption de l'eau.

L'ajout du ciment d'une part a cimenté les particules de sol et complété l'espace des pores dans le sol et d'autre part a empêché la réorientation et la floculation des particules du sol, qui ont éliminé la formation des grands pores et les fissures. L'absorption d'eau a été mesurée sur des spécimens conservés à l'intérieur du laboratoire ( $T = 10$  à  $25^{\circ}\text{C}$ , R.H = 70 – 90%) ou en dehors du laboratoire ( $T = 35$ – $45^{\circ}\text{C}$ , R.H = 40 –60%). L'absorption d'eau est très faible dans le climat sec mais un certain soin a été pris dans le climat humide l'absorption est tout à fait haute. Bien que l'absorption de l'eau diminue avec l'augmentation du ciment, le traitement de surface avec l'enduit du ciment ou polymère modifié par l'enduit du ciment peut être nécessaire pour augmenter la résistance à la pénétration de l'eau. C'est pour cette raison, la conception de bâtiment devrait toujours éviter un contact direct des blocs stabilisés de sol avec l'eau et l'eau de pluie dans les régions humides.



**Fig. 2.15-** Effet du dosage en ciment sur l'absorption d'eau  
a) type de cure et b) type de compactage [Kenai et al, 2006]

*Hossain et al.* (2007) Ont observé (tableau 2.9) que tous les ajouts (VA, chaux, ciment) ont réduit sensiblement la sorptivité des sols. Le coefficient d'absorption d'eau ( $\psi$ ) le plus élevé était à 14 jours comparant avec les résultats de 7 jours. En général, L'ajout du ciment a produit une sorptivité inférieure que la cendre volcanique (VA) et la chaux qui ont montré des valeurs plus élevées. L'augmentation du dosage la cendre volcanique (VA) semble réduire la sorptivité des sols. L'effet positif de la réduction de la sorptivité des sols peut être attribué à la cimentation dans les particules du sol, le remplissage des vides de pore dans le sol et la prévention contre la réorientation et la floculation des particules du sol qui élimine la formation des grands pores.

*Hossain et al* (2011) ont refait la même étude précédente mais cette fois si ils ont changé la combinaison, ils ont utilisé des combinaisons de VA avec le CKD. Le tableau 2.10 montre les résultats de la sorptivité à 14 jours. Ils ont bien montré et confirmé que la stabilisation avec des matériaux pouzzolanique peut lier les particules du sol et réduit l'absorption d'eau par capillarité. La sorptivité a été diminué à 59% avec le VA et 64% avec le CKD.

**Tableau 2.9** –Effet des combinaisons des ajouts sur l'absorption d'eau par sorptivité

[Hossain et al., 2007]

Mélanges du sol	Coefficient d'absorption, $\psi$ (%)			
	7jours		14jours	
	S1	S2	S1	S2
0VA	12.2	12.7	20.7	22.9
2VA	-	-	-	-
4VA	8.5	8.6	14.5	15.5
5VA	8.3	8.3	14.1	14.9
10VA	6.1	6.2	10.4	11.2
15VA	-	-	-	-
20VA	5.1	5.1	8.7	9.2
2C	-	-	-	-
4C	8.1	8.6	13.8	15.5
2L	-	-	-	-
4L	9.2	9.4	15.6	16.9
5VA2C	-	-	-	-
5VA4C	7.1	7.3	12.1	13.1
10VA2C	-	-	-	-
10VA4C	5.3	5.5	9.0	9.9
5VA2L	-	-	-	-
5VA4L	7.6	7.8	12.9	14.0
10VA2L	-	-	-	-
10VA4L	5.8	5.8	9.9	10.4

**Tableau 2.10** –Effet des combinaisons des ajouts sur l'absorption d'eau par sorptivité

[Hossain et al, 2011]

Soil mix	Coefficient d'absorption $\psi$ (%), à 14j
0VA/CKD (control)	20.7
5VA	14.1
10VA	10.4
15VA	9.3
20VA	8.5
2CKD	13.4
5CKD	11.1
10CKD	8.7
15CKD	8.1
20CKD	7.5
Combinaisons	
5VA2CKD	12.1
5VA5CKD	9.4
10VA2CKD	9.0
10VA5CKD	8.4

Ils ont postulé que l'effet positif de la réduction de la sorptivité du sol combiné (avec plusieurs additifs) peut être attribué à la prévention de formation des grands pores et la rupture des particules cimenté.

## **2.6 Conclusion**

Le traitement des sols argileux pour améliorer leurs propriétés géotechniques à court terme est bien identifié et largement analysé par les auteurs. Mais, récemment, plusieurs chercheurs s'intéressent à étudier le comportement des sols traité à long terme et à évaluer leur durabilité.

Par la stabilisation, la plasticité du sol est réduite, il devient résistant et plus durable. De telles améliorations sont le résultat d'un certain nombre de processus chimiques qui prennent endroit en présence d'un stabilisateur.

Plusieurs facteurs tels que la plasticité du sol, types du sol, dosage du stabilisateur, les conditions du mélange et les méthodes de compactage, l'âge etc..., affecte la durabilité d'un sol stabilisé.

Chapitre 3

---

---

# *Méthodes Expérimentales*

### 3.1 Introduction

Dans l'objectif de mieux comprendre l'effet de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des traitements des sols argileux, un programme expérimental a été réalisé. Deux sols argileux de caractéristiques géotechniques différentes sont sélectionnés. Les caractéristiques de la chaux et de la pouzzolane employées dans le traitement des sols sont également présentées.

Ce chapitre présente la caractérisation des matériaux de l'étude et les protocoles expérimentaux des expériences effectuées. Toutes les analyses ont été réalisées avec des matériaux argileux réduits en poudre de granulométrie inférieure à 0.2mm. Les protocoles expérimentaux employés s'appuient sur des normes ASTM et sur l'expérience acquise dans le laboratoire de recherche de géomatériaux de l'université de chlef.

### 3.2 Matériaux utilisés

#### 3.2.1 Le Sol

Les deux principaux matériaux argileux étudiés dans ce mémoire sont l'argile rouge et l'argile grise qui ont été nommées suite à leur couleur naturelle. Le choix de ces matériaux pour cette étude est que l'argile grise possède un grand indice de plasticité. L'autre sol argileux (argile rouge) de faible plasticité est également étudié pour comparer et bien comprendre les effets de la durabilité.

L'argile nommée « **Argile Grise** » ramenée directement d'un site (projet de remblai), situé approximativement à 18Km au Nord-est de la ville de Chlef (Fig. 3.1)



**Fig. 3.1-** Sol fin gris

L'argile nommée «**Argile Rouge**» a été obtenue à partir d'un site (projet de l'autoroute Est-Ouest) situé approximativement à 25 Km à l'Est de la ville de Chlef (Fig. 3.2)



**Fig. 3.2-** Sol fin rouge.

Ces deux sols ont été extraits à une profondeur d'environ 4 à 5 m et après leurs extractions, les sols ont été placés dans des sachets en plastique et transportés au laboratoire de la mécanique des sols de l'université Hassiba Ben Bouali de Chlef.

Les différentes caractéristiques physiques et mécaniques ainsi que leur classification suivant l'USCS (Unifed Soil Classification System), ont été déterminées au laboratoire selon les normes américaines ASTM. Les propriétés géotechniques des deux sols sont rapportées dans le tableau 3.1.

**Tableau 3.1** – Caractéristiques géotechniques des sols étudié.

<b>Caractéristiques</b>	<b>Sol fin 1</b>	<b>Sol fin 2</b>
<b>Couleur</b>	gris	Rouge
<b>Teneur en eau naturelle (%)</b>	32.87	13.77
<b>Densité spécifique</b>	2.71	2.84
<b>Eléments &lt;80µm (%)</b>	85	97.5
<b>Limite de liquidité (%)</b>	78.81	47.7
<b>Limite de plasticité (%)</b>	36.16	23.1
<b>Indice de plasticité (%)</b>	52.02	24.56
<b>Classification USCS</b>	CH	CL
<b>Propriétés de compactage</b>	Proctor standard	
<b><math>\omega_{opt}</math> (%)</b>	28.3	15.3
<b><math>\gamma d_{max}</math> (KN/m<sup>3</sup>)</b>	13.8	16.9

### 3.2.2 La chaux

La chaux utilisée (Fig. 3.3) est une **Chaux Hydratée  $\text{Ca}(\text{OH})_2$**  ramenée directement de l'usine de SAIDA située dans la région ouest de l'Algérie, livrée en sac. Ses Propriétés physico-chimiques ont été fournies par l'usine de fabrication (Tableau 3.2).



Fig. 3.3- Chaux vive de Saida.

Tableau 3.2 – Propriétés physico-chimiques de la chaux.

Nom chimique	Chaux (%)
Apparence physique	Poudre blanche sèche
CaO	> 83.3
MgO	< 0.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 1.5
SiO <sub>2</sub>	< 2.5
SO <sub>3</sub>	< 0.5
Na <sub>2</sub> O	0.4 - 0.5
CO <sub>2</sub>	< 5
CaCO <sub>3</sub>	< 10
Densité spécifique	2
Plus de 90 μm (%)	< 10
Plus de 630 μm (%)	0
Materiau insoluble (%)	< 1
Densité apparente	0.6-0.9

### 3.2.3 La pouzzolane naturelle

La pouzzolane utilisée dans cette étude est une roche d'origine volcanique. Elle a été prélevée de la carrière de Beni-Saf situé dans l'Ouest du territoire national (Fig. 3.4). La roche a été

broyée au laboratoire jusqu'à une surface spécifique de  $420\text{m}^2/\text{Kg}$  (Fig. 3.5). Sa composition chimique est représentée dans le tableau 3.3



**Fig. 3.4-** Pouzzolane naturelle de Beni-Saf.



**Fig. 3.5-** Pouzzolane naturelle défragmentée et broyée.

**Tableau 3.3** – Composition chimique de la pouzzolane naturelle.

Composition chimique	Pouzzolane naturelle (%)
SiO <sub>2</sub>	46.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.69
CaO	9.90
MgO	2.42
CaO libre	-
SO <sub>3</sub>	0.83
Na <sub>2</sub> O	3.30
K <sub>2</sub> O	1.51
TiO <sub>2</sub>	2.10
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.80
Perte au feu	5.34

### 3.3 Méthodes expérimentales

#### 3.3.1 Préparation des mélanges Sol/ajouts

Après l'extraction des pierres argileuses, on les met à l'étuve à 60°C pendant 24h, et il a été procédé ensuite au broyage dans un broyeur à disques (Fig. 3.6), puis au tamisage pour avoir une mouture inférieure à 0.2mm (Fig. 3.7)



(a)



(b)

**Fig. 3. 6-** Broyeurs à disque (a) concasseur (b) broyeur.



**Fig. 3.7-** Sol après broyage et tamisage (a) Sol gris (b) Sol rouge.

La même étape sera effectuée pour la préparation de la pouzzolane mais la poudre est de granulométrie inférieure à 80  $\mu\text{m}$ . La chaux sera tamisée directement est de granulométrie inférieure à 80  $\mu\text{m}$  afin d'éviter les grumeaux.

Les échantillons d'argile sont traités par différents pourcentages de chaux et de pouzzolane, de 0, 4 et 8% de chaux et de 10-20% de pouzzolane naturelle. Les éprouvettes étudiées sont confectionnées à partir de différentes formulations de combinaisons sol-ajouts minéraux et sont données dans le tableau 3.4 :

**Tableau 3.4-** Formulation des combinaisons.

<b>Désignation</b>	<b>Sol (%)</b>	<b>Chaux (%)</b>	<b>Pouzzolane naturelle (%)</b>
<b>P0L0</b>	100	0	0
<b>P0L4</b>	96	4	0
<b>P0L8</b>	92	8	0
<b>P10L0</b>	90	0	10
<b>P20L0</b>	80	0	20
<b>P10L4</b>	86	4	10
<b>P20L4</b>	76	4	20
<b>P10L8</b>	82	8	10
<b>P20L8</b>	72	8	20

Le pourcentage de chaux était 0%, 4% et 8%, cependant, le pourcentage de la PN était 0%, 10% et 20%. Un total de neuf combinaisons des stabilisateurs basés sur ajouts seul ou mélangés ont été étudiés.

Les quantités de sols et ajouts ont été pesés et mélangés manuellement à l'état sec jusqu'à obtenir une uniformité de couleur du mélange. Le poids des échantillons (Tableaux 3.5 et 3.6) ont été obtenues à partir des résultats de compactage [Harichane et al., 2011].

**Tableau 3.5-** Quantités des sols et des additifs utilisés pour la confection des éprouvettes destinées pour la détermination de la résistance et le test "séchage-saturation".

N°	Combinaison	SOL GRIS				SOL ROUGE			
		Sol (g)	Chaux (g)	PN (g)	Eau (g)	Sol (g)	Chaux (g)	PN (g)	Eau (g)
1	<b>P0L0</b>	1501	-	-	424	1833	-	-	279
2	<b>P0L4</b>	1379	58	-	436	1711	71	-	316
3	<b>P0L8</b>	1290	113	-	436	1622	141	-	306
4	<b>P10L0</b>	1371	-	152	421	1674	-	186	266
5	<b>P20L0</b>	1244	-	312	401	1487	-	371	258
6	<b>P10L4</b>	1244	58	145	388	1540	71	179	297
7	<b>P20L4</b>	1126	59	296	430	1352	71	355	334
8	<b>P10L8</b>	1186	116	145	430	1440	140	176	312
9	<b>P20L8</b>	1066	118	296	416	1252	139	347	316

**Tableau 3.6-** Quantités des sols et des additifs utilisés pour les éprouvettes  
Destinées pour l'essai de sorptivité.

N°	Combinaison	Sol Gris				Sol Rouge			
		Sol (g)	Chaux (g)	PN (g)	Eau (g)	Sol (g)	Chaux (g)	PN (g)	Eau (g)
1	P0L0	478	-	-	135	583	-	-	89
2	P0L4	439	18	-	139	544	23	-	101
3	P0L8	411	36	-	139	516	45	-	97
4	P10L0	436	-	49	134	533	-	59	84
5	P20L0	396	-	99	128	473	-	118	82
6	P10L4	396	18	46	123	490	23	57	95
7	P20L4	358	19	94	137	430	23	113	106
8	P10L8	377	37	46	137	458	45	56	99
9	P20L8	339	38	94	133	398	44	111	101

Le mélange sol/ajouts a été mis dans des sachets en plastique puis stocké dans un endroit sec, en attendant la phase de compactage de ce dernier comme indique la figure 3.8.



**Fig. 3.8-** Stockage des échantillons après pesage.

Les échantillons non traités et traités sont préparés avec une teneur en eau optimale ( $w=28.3\%$ ,  $w=15.3\%$ ) et compactés à la densité sèche maximale ( $\gamma_d=13.8$ ,  $\gamma_d=16.9$ ) respectivement pour le sol gris et rouge. Les valeurs de  $w$  et de  $\gamma_d$  correspondent à l'optimum de compactage Proctor normal (OPN) de ces sols argileux non traité. La figure 3.9 montre le matériel nécessaire pour confectionner le compactage des éprouvettes.



(a)



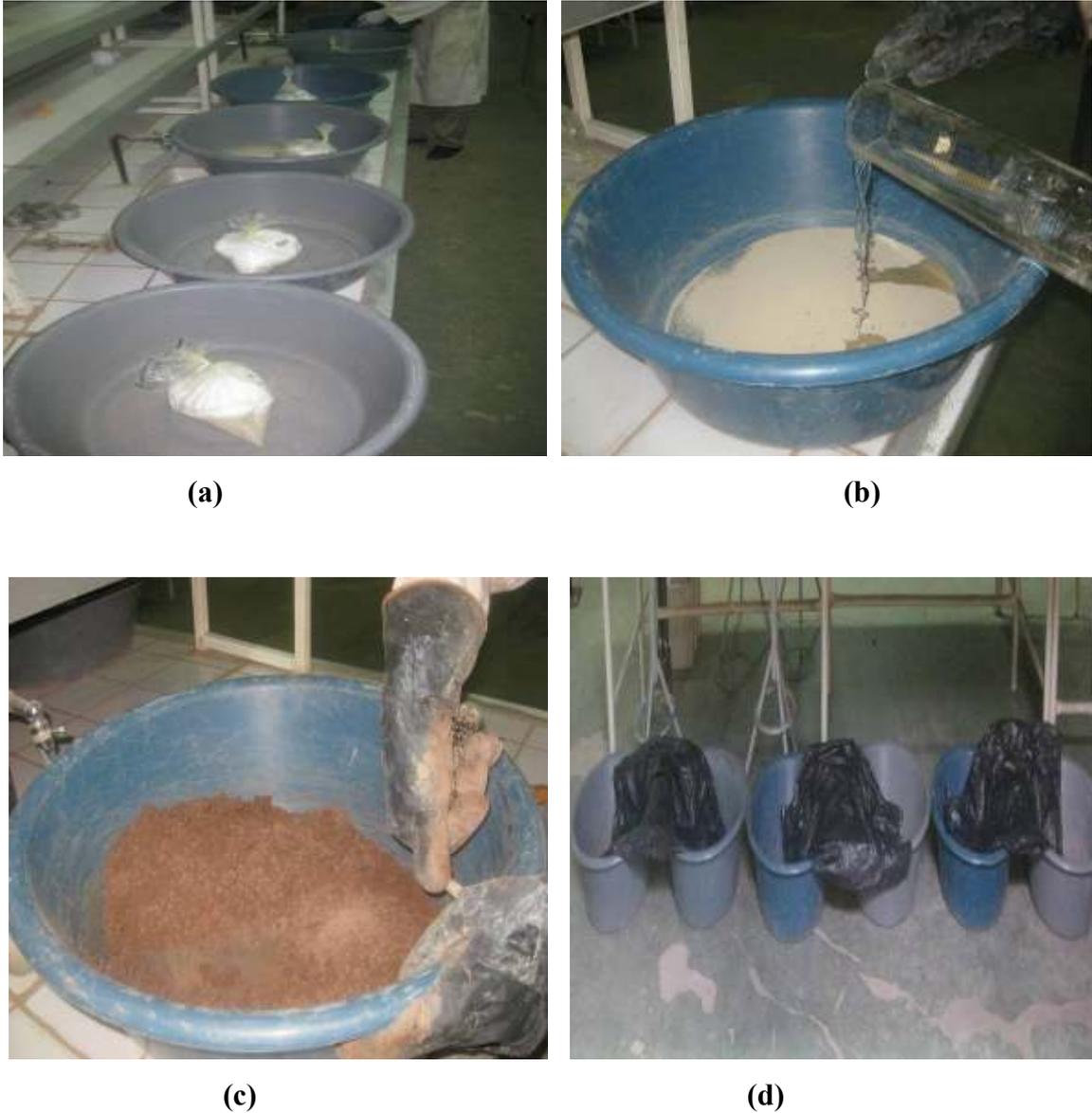
(b)



(c)

**Fig. 3.9-** Matériel utilisé pour le compactage (a) mesurette d'eau (b) Dame et moule de compactage et (c) Balance électrique.

Les mélanges sol-ajouts ont été directement mélangés avec la quantité d'eau désirée et ils ont été bien mixés manuellement jusqu'à ce que le mélange devienne homogène. Ensuite, les mélanges ont été conservés dans des sacs en plastique hermétiques et stockés à température ambiante pendant 01 heure. Ces dispositions garantissent l'homogénéité de la teneur en eau dans le mélange. La figure 3.10 montre les étapes de préparation du sol avant d'entamer la phase de compactage.



**Fig. 3.10-** Préparation des combinaisons pour le compactage  
(a) homogénéisation (b) humidification (c) malaxage (d) conservation.

### **3.3.2 Confections du compactage et conservation des éprouvettes**

Pour obtenir la densité désirée, le mélange a été compacté manuellement par la dame de compactage à raison de 25 coups par couche dans un moule de Proctor normal de 944 cm<sup>3</sup> le compactage a été réalisé selon la norme (ASTM D 698).

Les spécimens compactés pour les différents tests réalisés (résistance à la compression, test de Cycles séchage-saturation) ont été enlevés de la rehausse, démoulés et immédiatement placé et fermé dans des sachets en plastique. Ceci pour réduire la perte d'humidification et la carbonatation de la chaux pendant la maturation. Les échantillons préparés ont été recouverts par un double sachet pour éviter la perte d'eau. La période de cure était de 07 et 28 jours. La maturation à 20°C est assurée dans un laboratoire à température contrôlée. La figure 3.11 montre le mode opératoire de compactage.



(a) Introduction du matériau dans le moule



(b) compactage



(c) Fin de compactage



(d) enlèvement de la hausse



(e) arasement de l'éprouvette



(f) démoulage

**Fig. 3.11-** Confection des éprouvettes par compactage.



(a) éprouvette après démoulage

(b) conservation des éprouvettes



(c) cure

**Fig. 3.12-** Préparation des éprouvettes pour la cure.

Le compactage des échantillons destinés pour le test de sorptivité a été réalisé par compression statique à l'aide de la presse CBR (Fig. 3.13) dans des moules de 70 mm de diamètre et de 90 mm de hauteur (Fig. 3.14). La figure 3.15 montre en détail le mode opératoire du compactage et la confection des éprouvettes à différents dosage d'additifs à un optimum proctor bien déterminé. Après démoulage, les éprouvettes ont immédiatement placé et fermé dans des sachets en plastique et stocké dans un endroit où la maturation à 20°C est assurée au laboratoire à température contrôlée. La période de cure était de 07 et 28 jours.



**Fig. 3. 13** Presse CBR.



**Fig. 3. 14** Accessoire nécessaire pour l'exécution du compactage par CBR.



(a) Malaxage du matériau manuellement a une teneur en eau optimal



(b) Introduction du matériau dans le moule



(c) Compression d'échantillon à l'aide de la presse CBR



(d) Démoulage des éprouvettes après compactage



(e) Conservation des éprouvettes pour la cure

**Fig. 3. 15** Mode opératoire du compactage des éprouvettes pour le test de sorptivité.

### 3.3.3 Mode de réalisation des essais

Les différents tests utilisés dans cette étude sont:

- la résistance mécanique;
- les tests de durabilité ont été conduits pour étudier l'effet des cycles de Séchage-humidification sur la résistance à la compression et l'absorption d'eau par capillarité (sorptivité).

#### 3.3.3.1 Résistance à la compression

L'évolution de la résistance à la compression simple est étudiée en fonction de la quantité des ajouts utilisés (0, 4 et 8% de la chaux et 10-20% de PN), du temps de maturation (7 et 28

jours). Les dimensions des échantillons testés sont : 101mm de diamètre et 100mm de hauteur. La résistance à la compression statique a été déterminée à l'aide d'une presse hydraulique avec une vitesse de chargement de 0,5 mm/min.



**Fig. 3. 16** Presse hydraulique Utilisée.

### **3.3.3.2 Test de cycles "séchage-saturation"**

Le test est effectué sur des échantillons compactés du sol non traité et traité de 101 mm de diamètre et de 110 mm de hauteur. Le test consiste à appliquer des cycles de saturation-séchage selon la norme (ASTM D 559), après une maturation de 7 et 28 jours. L'application des cycles consiste à immerger toutes les éprouvettes dans l'eau (Fig. 3.17) pendant 05 heures puis les enlever et les peser. Puis, le séchage des spécimens à l'étuve à une température de  $71\pm 3^{\circ}\text{C}$  pendant 42 heures puis les retiré et les peser (Fig. 3.18). Un cycle consiste 05heures d'immersion, 42 heures de séchage, 1 heure pour la manipulation. On répète l'opération pour un totale de 12 cycles pour les échantillons.



(a) Sol gris

(b) sol rouge

**Fig. 3.17-** Saturation des échantillons.



**Fig. 3. 18** (a) Séchage des échantillons à l'étuve (b) pesage après séchage.

La perte du poids après chaque cycle est déterminée par la relation suivante :

$$\text{Perte du masse (\%)} = \frac{\text{Masse après cure} - \text{Masse après cycle}}{\text{Masse après la cure}}$$

Après les 12 cycles de test les spécimens qui tiennent subissent un essai de compression unidimensionnelle afin de déterminer le gain de résistance et la résistance résiduelle, l'essai a

été réalisé à l'aide d'une presse hydraulique de 200 kN (Fig. 3.19) avec une vitesse de chargement de 0.5 (N/mm<sup>2</sup>.S).

La résistance résiduelle est calculé comme la relation suivante :  $R_r = 100 \times (R_i/R_f)$

Le gain de résistance est calculé de la relation suivante : **Gain de résistance** =  $\frac{R_i - R_f}{R_i}$



**Fig. 3.19-** Éprouvette après écrasement.

### 3.3.3.3 Test de durabilité, Sorptivité

Après 07 et 28 jours de cure, les échantillons ont été découverts de leur sachet afin de les préparer pour le test de sorptivité (Fig. 3.20). Puis recouverts à la base par une bande adhésive étanche sur une hauteur d'environ 5cm (Fig. 3.21). Les valeurs de la masse des échantillons après la cure sont déterminées (Fig. 3.22) et les diamètres ont été pris à partir de la surface sphérique de l'échantillon.



Fig. 3. 20- Eprouvettes destiné pour l'essai de la sorptivité.



Fig. 3. 21- Eprouvettes recouverts par une bande adhésive à la base.



Fig. 3. 22- Pesage après cure.

L'expérimentation de l'essai de sorptivité est montrée dans la figure 3.23. Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succions capillaires des éprouvettes, non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique.

L'essai de Sorptivité détermine le taux ou vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette cylindrique de 90mm de hauteur et de 70mm de diamètre. placée sur de petits supports dans un bac contenant de l'eau afin que l'eau pénètre que par la surface désirée suivant le schéma indiqué à la figure 3. 24. On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps (t) et le pesage des échantillons chaque 15, 30, 45 et 60 minute à l'aide d'un chronomètre.

La quantité d'eau absorbée ( $\Delta Q$ ) sera déterminée. Le test de durabilité consiste à calculer le coefficient d'absorption d'eau par sorptivité ( $\Psi$ ) comme suit:

$$\Psi = \frac{\Delta Q}{A \sqrt{t}} \quad \text{ou : } A \text{ est la surface immergé dans l'eau.}$$

- Les résultats de l'essai d'absorptivité des différentes combinaisons, sont présentés en traçant toutes les droites lissées sur les segments d'augmentation des masses des éprouvettes en fonction de la racine carrée du temps.

L'équation de ces droites a la forme :  $\Delta Q/A = \Psi \sqrt{t}$

$\Delta Q$ : La quantité d'eau absorbée en ( $\text{cm}^3$ ) ;

$A$ : La surface du spécimen en contact avec l'eau ( $\text{cm}^2$ ) ;

$t$ : Le temps (S) ;

$\Psi$ : Le coefficient de Sorptivité du spécimen ( $\text{Cm/S}^{1/2}$ ).

- La mesure de la Sorptivité est un moyen simple et facile qui permet de caractériser la cinétique d'absorption des matériaux. Plus la sorptivité est élevée, plus le matériau est susceptible à être rapidement envahi par le liquide en contact. C'est aussi une propriété qui caractérise la disposition des pores du matériau qui absorbent et transmettent l'eau par capillarité.



(a) Support des éprouvettes

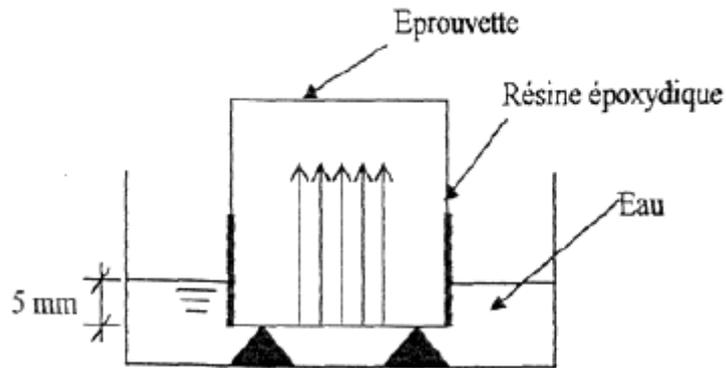


(b) Emplacement des éprouvettes sur les supports.



(c) enlèvement et assèchement d'éprouvette après un temps (t) avant le pesage.

**Fig. 3. 23-** Déroulement de test de sorptivité.



**Fig. 3.24-** Schéma du dispositif de l'essai d'absorption.

### 3.4 Conclusion

Dans ce travail de recherche, on a sélectionné deux sols argileux naturels afin d'étudier les effets de traitement sur la durabilité. Ces sols sont clairement identifiés comme des sols argileux ayant un comportement mécanique très médiocre (forte plasticité, faible résistance mécanique et très fort gonflement). Les résultats des différents essais réalisés seront présentés et discutés dans le chapitre 4 suivant.

Chapitre 4

*Présentation et*

---

---

*Discussion des Résultats*

#### 4.1 Introduction

Le but de l'étude présentée dans ce chapitre est le suivi de la progression de la résistance mécanique impliquée entre les additifs ajoutée et les sols utilisé à court terme et à long terme et évalué la durabilité par l'essai de saturation-séchage. Quatre valeurs (nombre de cycle complété, perte de masse, Résistance à la compression et sorptivité) ont été mesurées pour investiguer les changements provoqués par le traitement des sols par les additifs.

L'analyse de l'ensemble des échantillons traités permet de suivre: la durabilité des échantillons pendant les essais, la destruction en fonction du dosage des additifs ajoutée et la durée de maturation.

La comparaison des résultats des échantillons traités et non traités permet de quantifier l'effet du traitement et de suivre l'évolution du comportement du sol en fonction de la durée du traitement.

#### 4.2 Résistance à la compression

Le tableau 4.1 et la figure 4.1 présentent l'évolution de la résistance à la compression avec la période de cure pour tous les échantillons traités avec la chaux (0-4-8%) et/ou la PN (0-10-20%). Comparant avec le sol non traité, la résistance mécanique des sols augmente progressivement avec l'augmentation de la période de cure et de la quantité des additifs (chaux + PN) ajoutés.

**Tableau 4.1-** Variation de la résistance à la compression des sols étudiés.

Combinaisons	Résistance à la compression (KPa)			
	7 Jours		28 Jours	
	Sol Gris	Sol Rouge	Sol Gris	Sol Rouge
P0L0	55.6	222.5	55.6	222.5
P0L4	568.6	482.1	1032.2	692.2
P0L8	519.2	460.5	1050.7	716.9
P10L0	74.2	247.2	80.4	265.8
P20L0	98.9	259.6	98.9	278.1
P10L4	1001.3	1155.8	1878.9	2045.8
P20L4	1112.5	1631.7	1662.6	2886.3
P10L8	883.8	1100.1	1742.9	2002.5
P20L8	1415.4	1681.1	2620.5	2775.1

D'après le tableau 4.1, On observe que les résultats obtenus après 7 jours de maturation montrent un changement important et significatif de la résistance à la compression sauf pour les échantillons traités avec la PN seule, de ce fait l'ajout de la PN seule n'a participé à aucun gain de résistance, ce dernier possède une résistance quasi similaire que le sol non traité. La résistance du sol gris augmente progressivement de 55.6 kPa à 568.6, 1001.3, 1112.5 et 1415.4 kPa pour les échantillons P0L4, P10L4, P20L4 et P20L8 respectivement. La résistance du sol rouge augmente de 222.5 kPa à 482.6, 1155.8, 1631.7 et 1681.1 kPa pour P0L4, P10L4, P20L4 et P20L8 respectivement. D'après ces résultats, le gain de résistance augmente de 922% avec la chaux seule à 1900% avec la combinaison chaux+PN pour le sol gris, et de 111% avec la chaux seule à 526% avec la combinaison chaux+PN pour le sol rouge. La pouzzolane naturelle montre bien leur efficacité en présence de la chaux et contribue d'une façon importante sur la résistance à la compression. On peut remarquer qu'à 07 jours la réaction pouzzolanique n'a pas été complètement réalisée pour fournir un gain élevé de la résistance qu'à 28jours.

La résistance à la compression continue à augmenter d'une manière significative et atteinte des valeurs maximales après 28jours de maturation. Dans ce cas les résultats confirment la résistance importante des sols traités, la résistance augmente progressivement avec le temps de maturation et avec la quantité de chaux+PN ajoutés.

L'augmentation de la résistance à la compression, est due au changement de la structure et de la minéralogie à court terme (modification de la granulométrie et augmentation de l'angle de frottement) et à la cimentation des particules (augmentation de la cohésion) produite avec le temps. La première modification instantané à 7 jours induit des augmentations limitées de la résistance et de ce fait nécessite une quantité suffisante des additifs. En revanche, la formation des hydrates (CSH et CAH) et donc la cimentation des particules augmente avec la quantité des additifs ajoutés et induit des résistances mécaniques qui évoluent progressivement avec une cinétique lente de la réaction pouzzolanique à température ambiante [Lasledj, 2009].

Et particulièrement, on observe que la résistance se développe rapidement avec l'addition de la PN jusqu'à l'atteinte d'un état optimum, le maximum a été observé à 20% de PN et 8% de chaux. Il est à noter que la période de cure a une importante influence sur la

résistance à la compression pour un dosage donné d'additif. L'optimum de la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la période de cure. On sait que le traitement avec la chaux améliore les caractéristiques de la résistance du sol. Toute fois l'addition de la PN améliore encore la résistance du mélange chaux/sol. Par exemple, le sol gris a une résistance sans aucun ajout 55.6 kPa. À 28 jours avec 8% de chaux et sans PN la résistance était 1050.7 kPa avec l'ajout de 10% de PN la résistance augmente à 1742.9 kPa c-à-d un gain de 3034% de résistance et avec l'ajout de 20% de PN la résistance augmente encore à 2620.5 kPa c-à-d un gain de résistance de 4613%. Cela indique que dans un mélange de sol-chaux-PN, une quantité de chaux est requise pour atteindre une résistance donnée par rapport au mélange sol-chaux. Le gain dans la résistance de sol-chaux est premièrement dû à la réaction pouzzolanique entre la silice et l'alumine du sol, et la chaux pour former divers types d'agents de cimentation. Par l'introduction de la PN dans le sol, des quantités supplémentaires de silice sont disponibles pour la réaction avec la chaux ayant pour résultat un accroissement ultérieur de la résistance. La présence de la PN dans le sol sans chaux ne mène pas à un développement de la résistance. La raison peut être attribuée au manque de la chaux pour provoquer la réaction pouzzolanique.

### 4.3 Essais de "Saturation-Séchage"

#### 4.3.1 Cycles complétés par les combinaisons après traitement

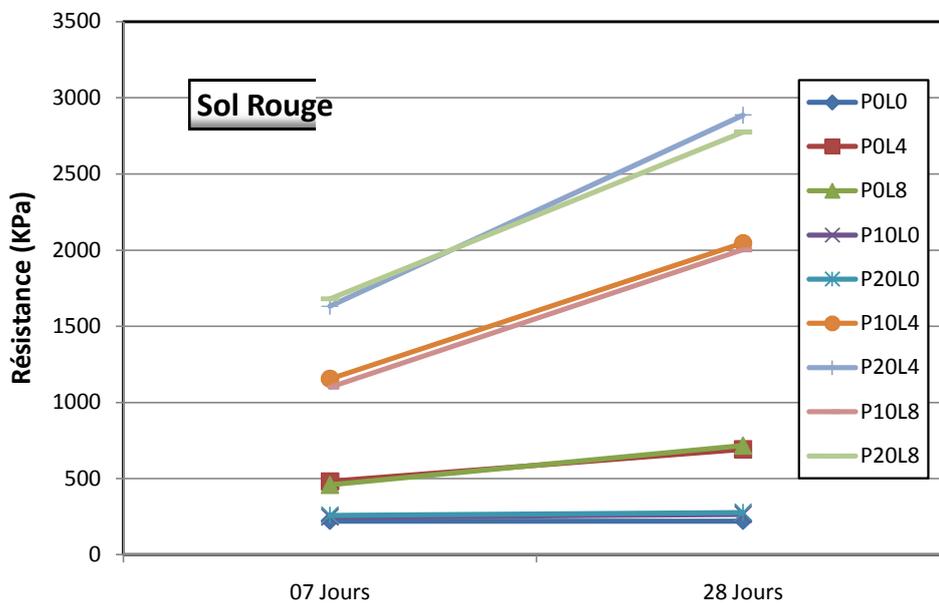
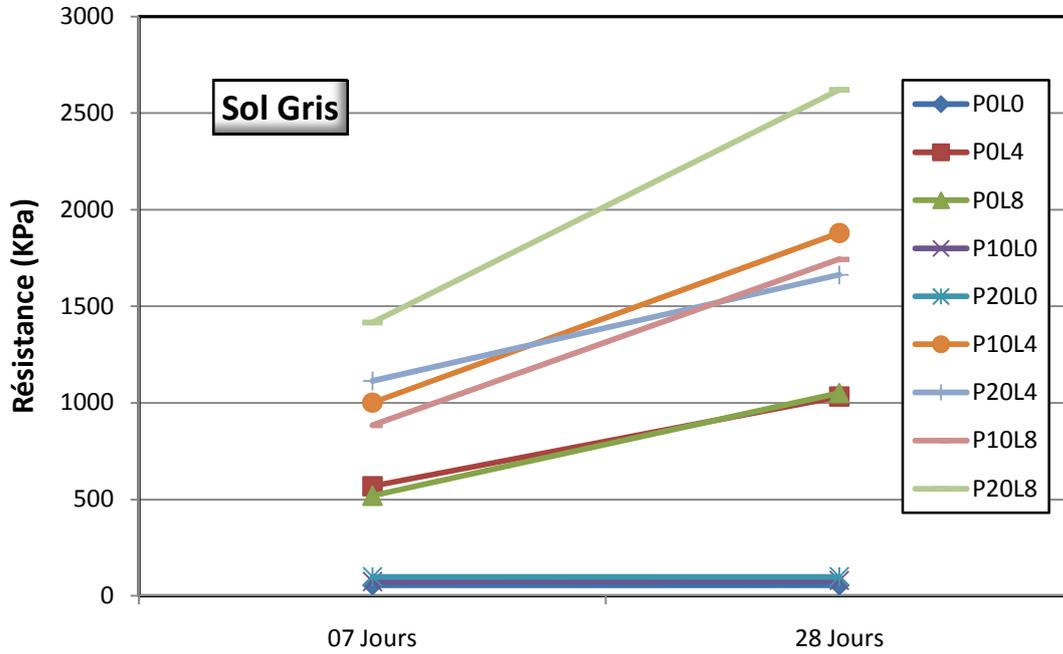


Fig. 4.1- Variation de la résistance à la compression des sols à 7 et 28 jours.

L'effet des cycles climatiques sur les sols normaux et les sols stabilisés avec différents ajouts cimentaires fait l'objet de plusieurs investigations, tels que la chaux [Rao et al., 2000; Gunny et al., 2005; Khattab et al., 2007], le ciment [Shihata et al., 2001; Kenai et al., 2006; Zhang et Tao, 2008], les cendres volantes [Mollamahmutoglu et al., 2009; Bin-Shafique et al., 2009], Cependant, il est à signaler qu'à l'exception de l'étude réalisée Hossain et Lachemi (2006) aucune étude n'a été réalisée la combinaison chaux+PN dans la stabilisation des sols argileux.

Le Tableau 4.2 et les figures 4.2 et 4.3 présentent les données rassemblées pendant l'essai de saturation-séchage. Les vides dans le tableau et l'absence de quelques barres dans la figure représentent les données qui n'étaient pas mesurées dues à la détérioration des spécimens. Dans les cas où les spécimens ont été détériorés l'essai de résistance à la compression UCS ne pourrait pas être réalisé, les résistances des spécimens sont négligeables.

**Tableau 4.2-** Cycles complétés par les deux sols durant le test de saturation-séchage.

Cure (jours)	Sol Gris		Sol Rouge	
	7	28	7	28
<b>P0L0</b>	1	2	-	-
<b>P0L4</b>	4	5	12	12
<b>P0L8</b>	12	12	12	12
<b>P10L0</b>	1	2	-	-
<b>P20L0</b>	1	2	-	-
<b>P10L4</b>	4	6	12	12
<b>P20L4</b>	12	12	12	12
<b>P10L8</b>	12	12	12	12
<b>P20L8</b>	12	12	12	12

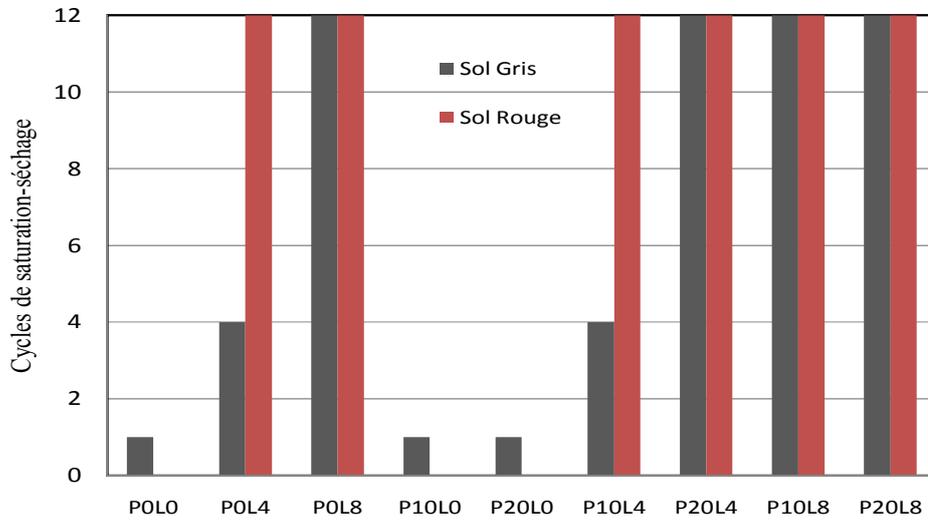


Fig. 4.2- Cycles de saturation-séchage complétés après traitement des sols à 07 jours.

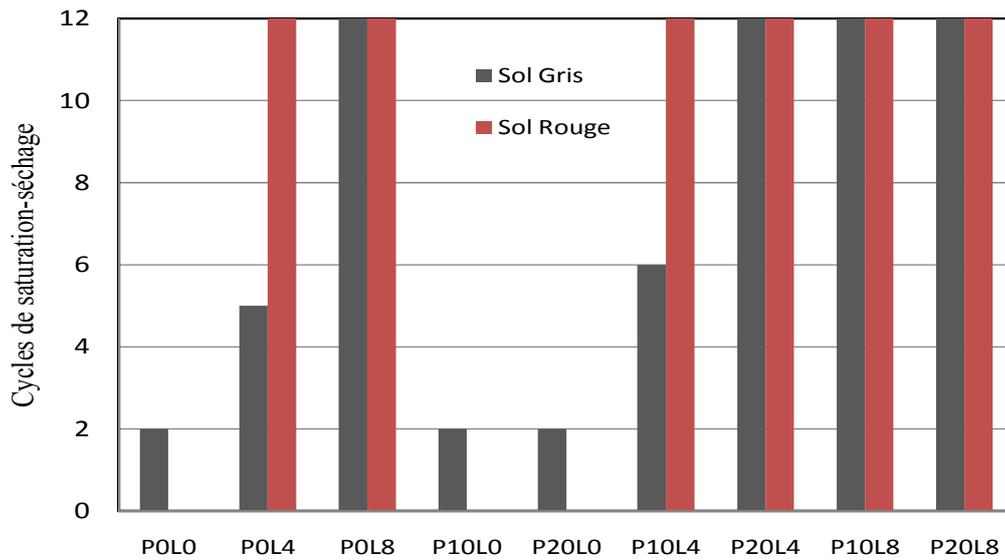


Fig. 4.3- Cycles de saturation-séchage complétés après traitement des sols à 28 jours.

La figure 4.2 montre les cycles complétés par les combinaisons dans le test de saturation-séchage des 02 sols étudié à 7jours. On remarque que le sol fin gris n'a survécu la majorité des cycles que pour les quatre combinaisons: P0L8, P20L4, P10L8 et P20L8 parmi les 09 combinaisons étudiées. Cependant, le sol rouge, a survécu la majorité des cycles pour les six combinaisons : P0L4, P0L8, P10L4, P20L4, P10L8et P20L8 parmi les 09 étudiées.

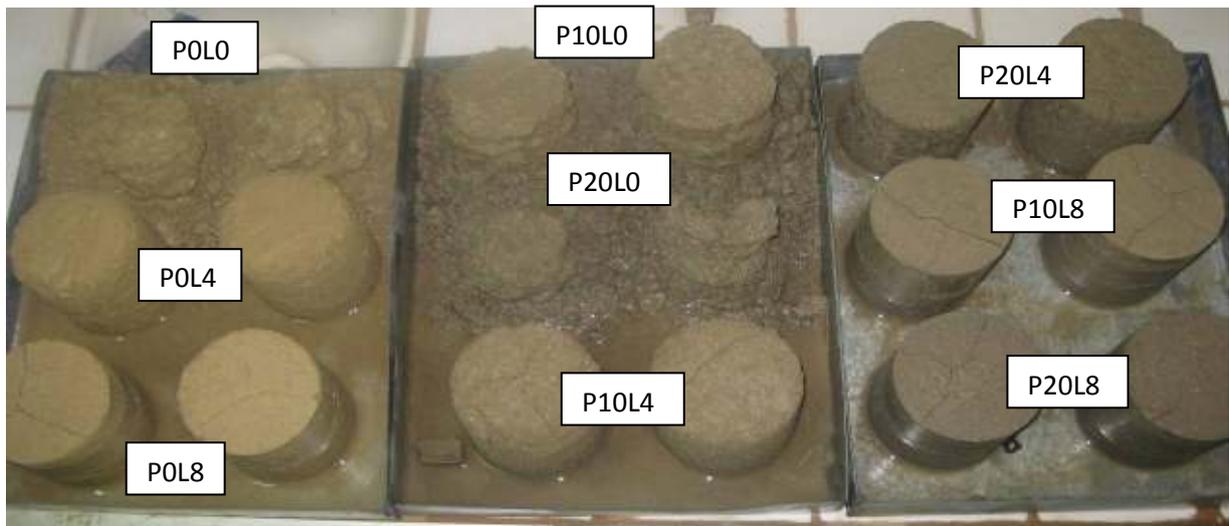
La figure 4.3 montre les cycles complétés par les combinaisons dans le test de saturation-séchage des 02 sols étudiés après 28 jours de cure. Le sol rouge n'a montré aucun changement, l'effet de la cure n'a pas influencé sur ce type du sol. Toutes les combinaisons ont montré un même comportement sur un même nombre de cycle. Le sol gris a subit un changement faible dans le nombre de cycles, les échantillons P0L0, P0L4, P10L0, P20L0 et P10L4 ont augmenté d'un cycle (tableau 4.2). On note que la cure n'a pas d'effet sur les cycles de saturation-séchage, ainsi les combinaisons chaux+PN montrent une performance élevée et résistent à tout les cycles de saturation-séchage, la cause exacte de ce comportement n'a pas encore été prouvée, il semble que la réaction pouzzolanique s'est développée durant la phase de saturation d'après [Bin-Shafique et al., 2009]. Cette performance est due au réarrangement continu et la remise en ordre continue des particules d'argile pendant les cycles du mouillage-séchage et la cimentation de particules pendant le séchage.

Durant la phase de séchage, le sol se sèche et forme des fissures. La présence de la fissure dans la phase de séchage aide l'eau à s'infiltrer dans le sol d'une façon rapide dans le prochain cycle de mouillage.

Le sol gris stabilisé a une faible performance par rapport au sol rouge stabilisé voir (Fig. 4.4), et en plus la majorité des spécimens s'effondrent avant l'achèvement du 12<sup>ième</sup> cycle. Comparant avec le sol rouge, il est apparent que le sol qui possède un indice de plasticité très élevé souffre plus sévèrement dans le test de saturation-séchage. L'essai de saturation-séchage est un essai très agressif. Pour les deux sols, les échantillons traités avec la PN seule et les échantillons non traité n'ont complété aucun cycle, et se sont effondrés juste après la 1<sup>ère</sup> phase de saturation avant l'achèvement du 1<sup>ière</sup> cycle. L'effondrement des échantillons pour les deux sols s'est produit toujours dans la phase de saturation.



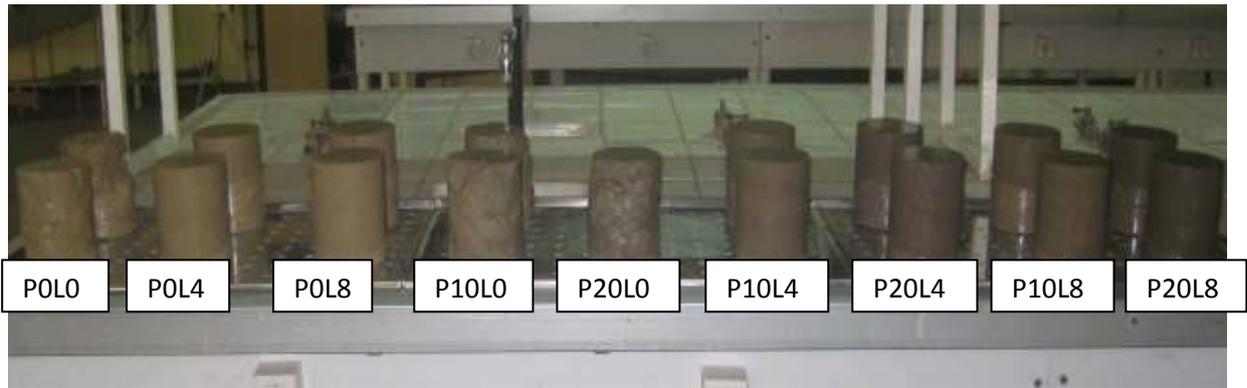
(a) Sol Rouge



(b) Sol Gris

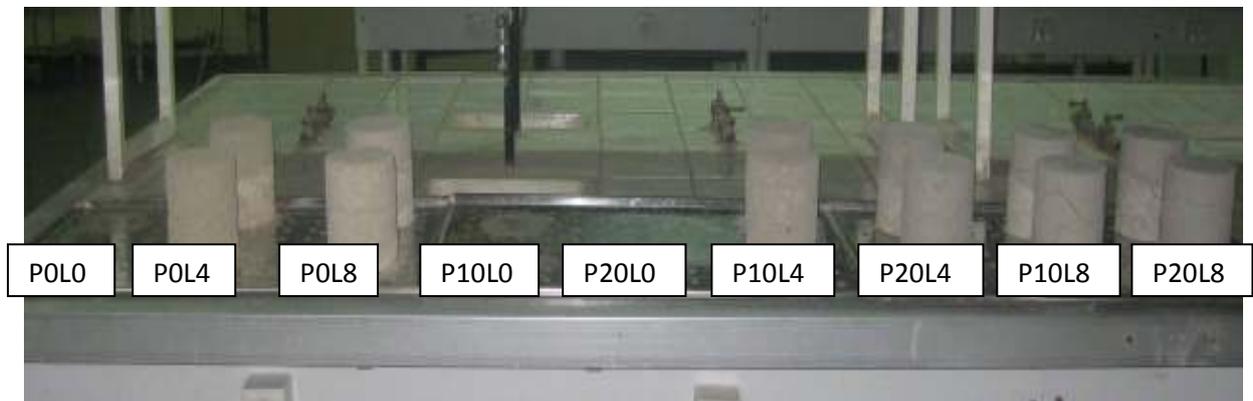
**Fig. 4.4-** Effondrement des échantillons P0L0, P10L0 et P20L0 après la première saturation.

### Evolution des combinaisons pour le Sol Gris



**1<sup>ière</sup> Cycle**

1<sup>ière</sup> cycle subit une dégradation partielle et peu importante de P0L0, P10L0 et P20L0.



**2<sup>ième</sup> cycle**

2<sup>ième</sup> cycle la disparition complète des échantillons P0L0, P10L0 et P20L0 qui ont souffert pendant le 1<sup>ière</sup> cycle.



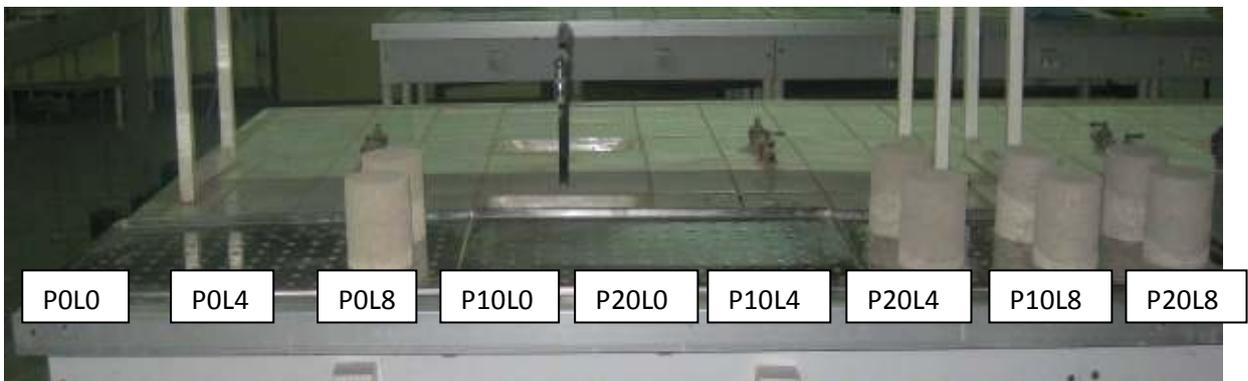
**3<sup>ième</sup> cycle**

3<sup>ième</sup> cycle début de dégradation négligeable de P0L4 et P10L4.



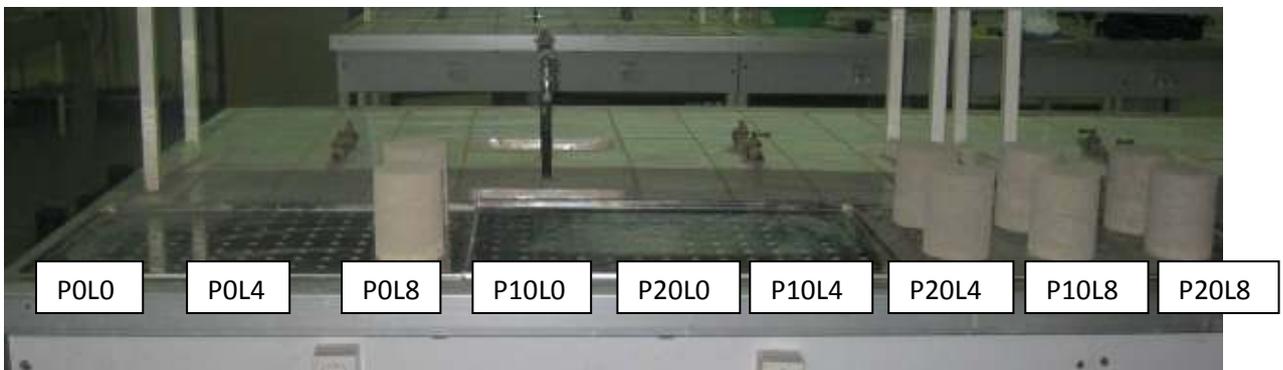
**4<sup>ème</sup> cycle**

4<sup>ème</sup> cycle dégradation remarquable pour les deux échantillons POL4 et P10L4.

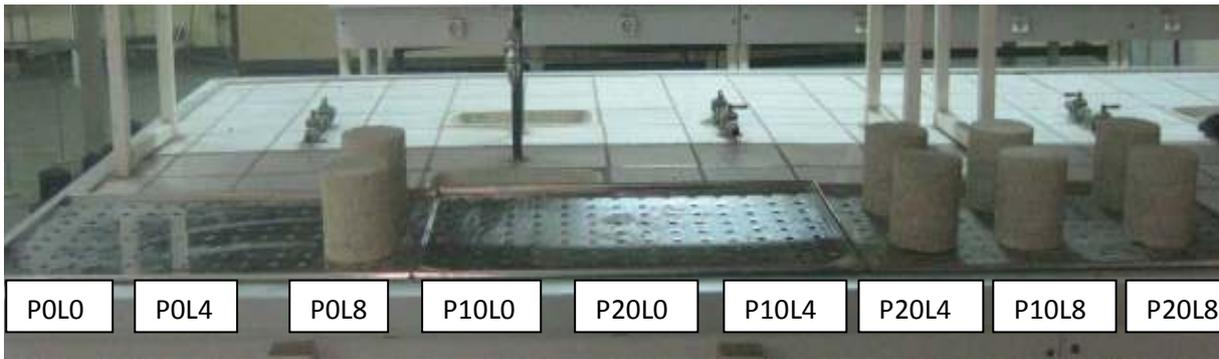


**5<sup>ème</sup> cycle**

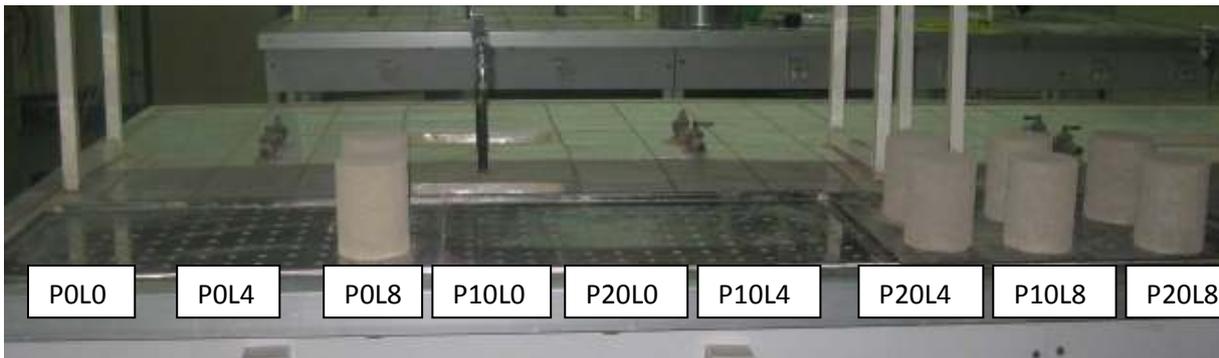
5<sup>ème</sup> cycle la disparition complète de POL4 et P10L4, donc le tout est de 5 échantillons défaillant dans cette phase, les échantillons qui reste POL8, P20L4, P10L8 et P20L8 résistent tous jusqu'au 12<sup>ème</sup> cycle.



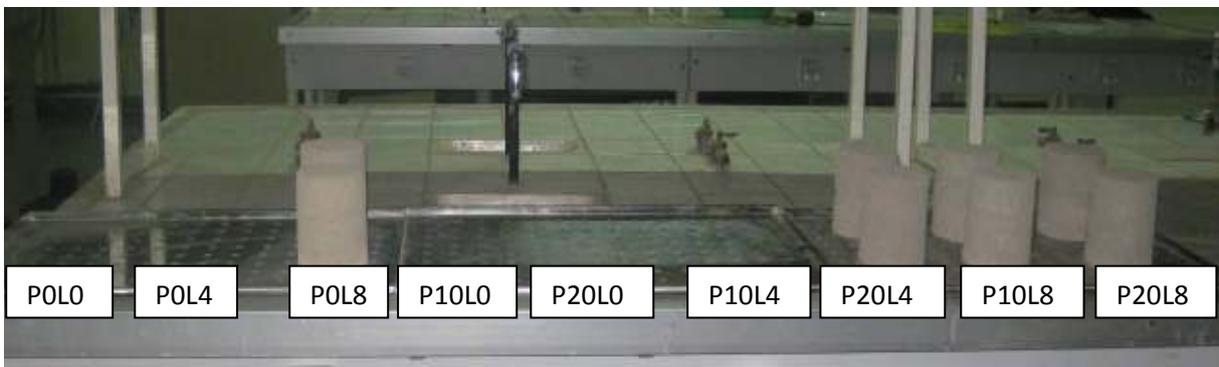
**6<sup>ème</sup> cycle aucun changement**



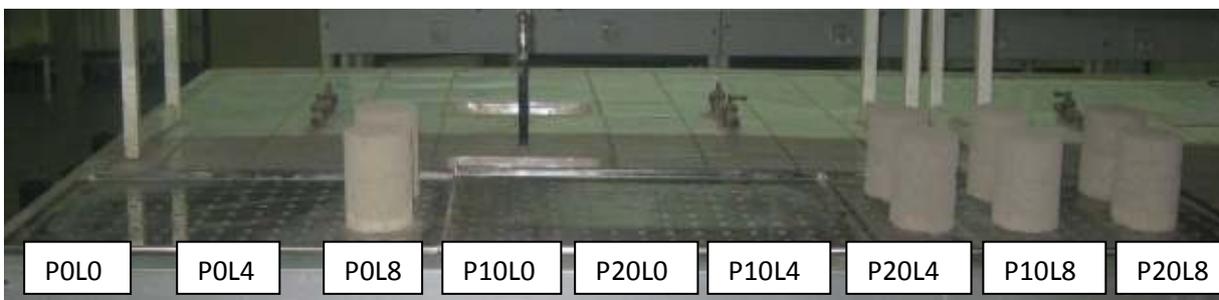
7<sup>ième</sup> cycle aucun changement



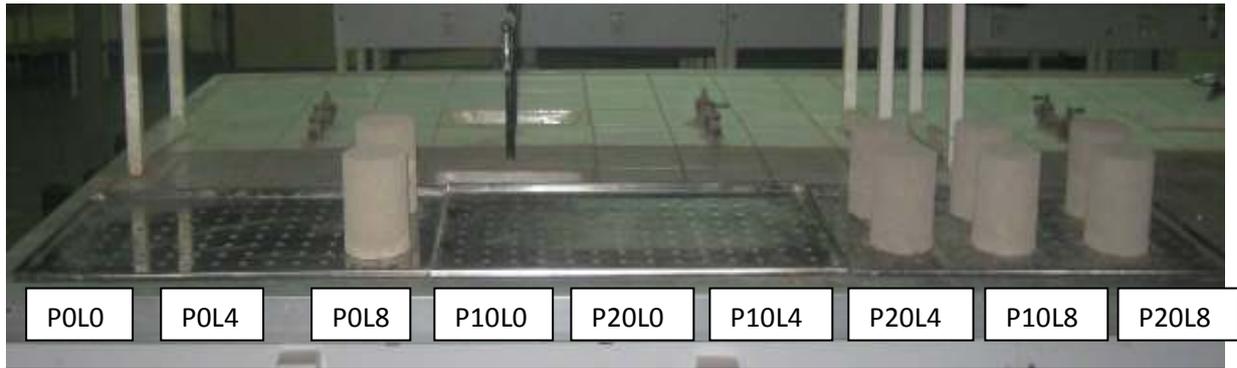
8<sup>ième</sup> cycle aucun changement



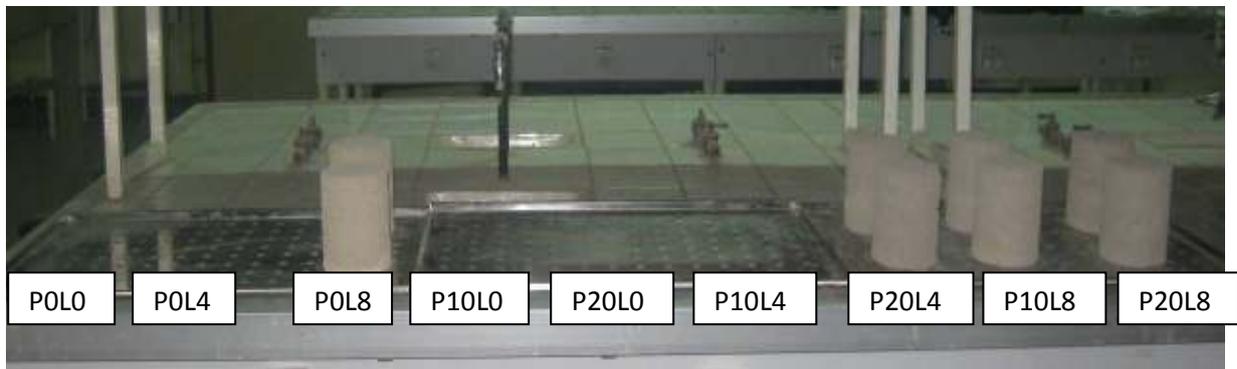
9<sup>ième</sup> cycle aucun changement



10<sup>ième</sup> cycle aucun changement



**11<sup>ième</sup> cycle gris** aucun changement



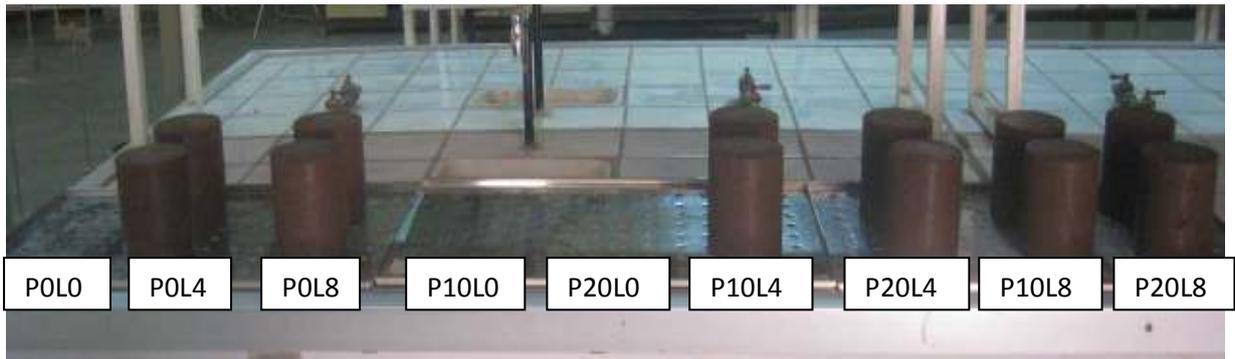
**12<sup>ième</sup> cycle gris**

Les échantillons POL8, P20L4, P10L8 et P20L8 survécu au 12<sup>ième</sup> cycle ont un état final qui diffère d'un échantillon à un autre tel que le P20L4 et le P20L8 n'ont pas la même apparence (Fig. 4.5).



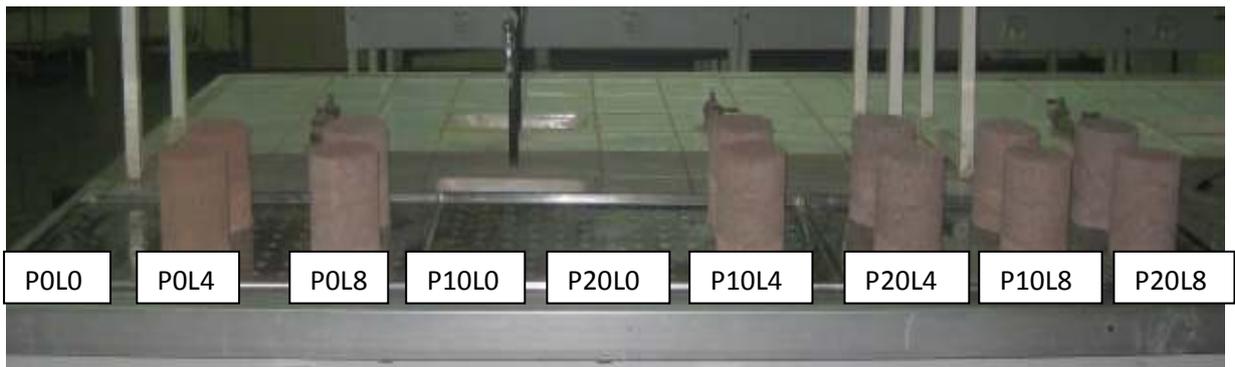
**Fig. 4.5-** Etat finale des échantillons du sol gris après 12 cycles.

### Evolution des combinaisons pour le Sol Rouge

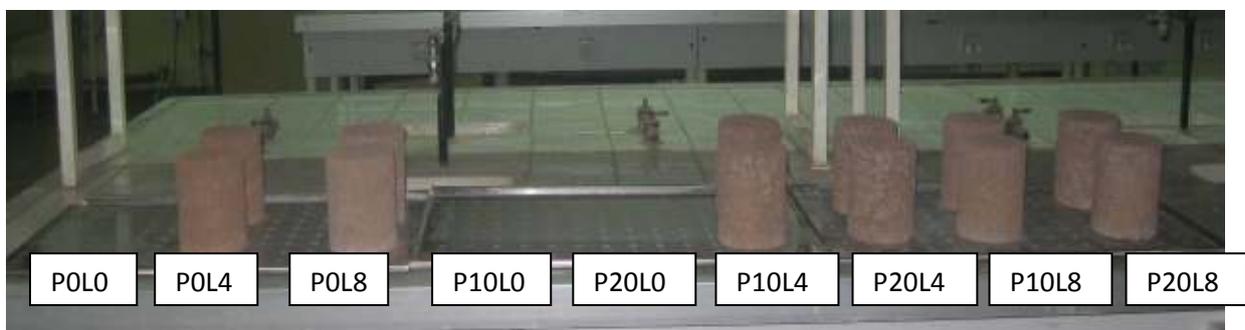


**1<sup>ère</sup> cycle**

1<sup>ère</sup> cycle dissolution complète des échantillons POLO P10L0 et P20L0 dès la première phase de saturation.



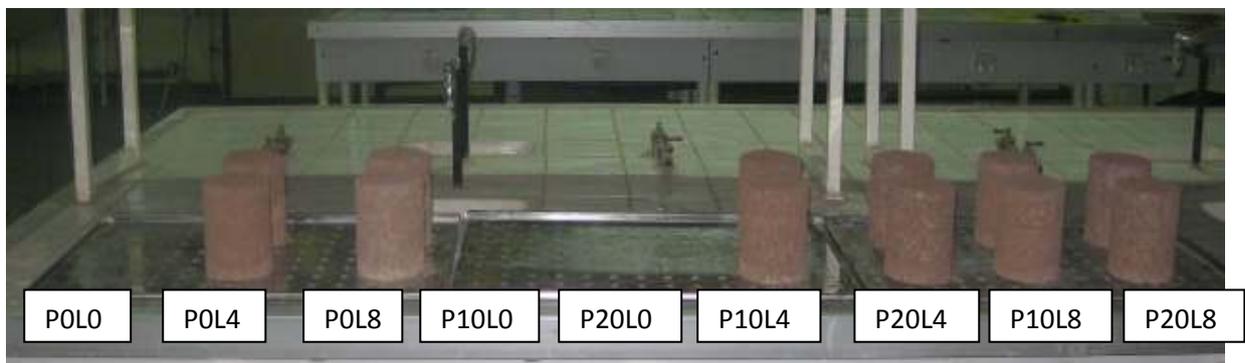
**2<sup>ème</sup> cycle aucun changement**



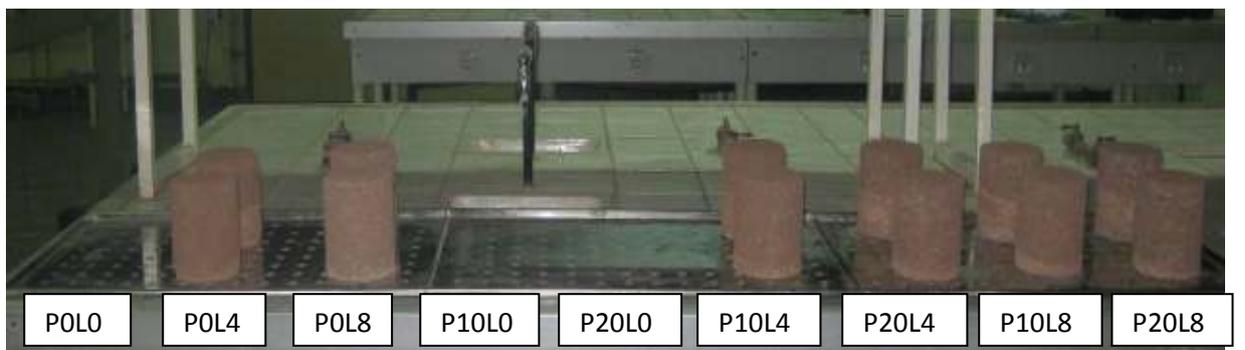
**3<sup>ème</sup> cycle aucun changement**



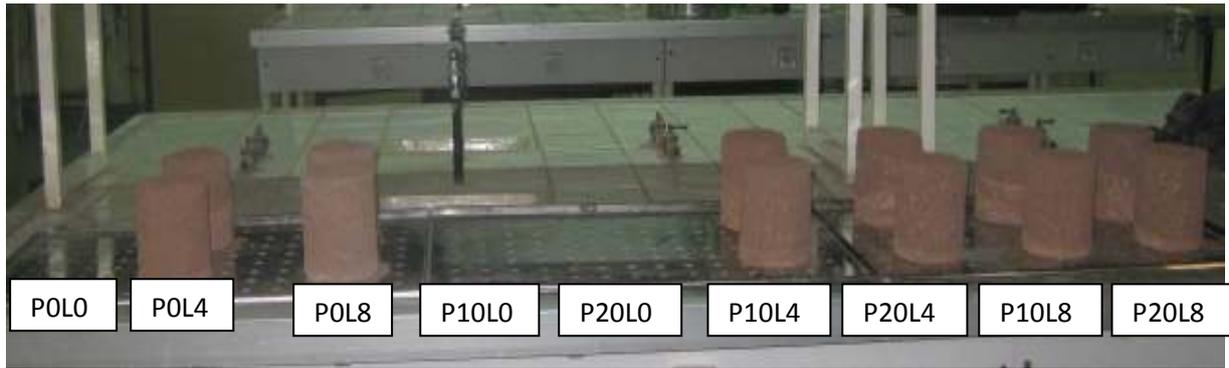
**4<sup>ème</sup> cycle** aucun changement



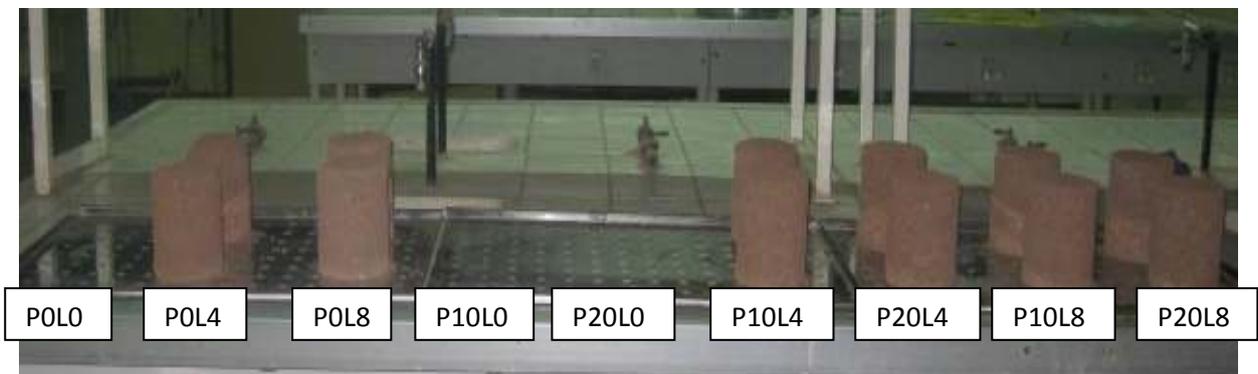
**5<sup>ème</sup> cycle** aucun changement



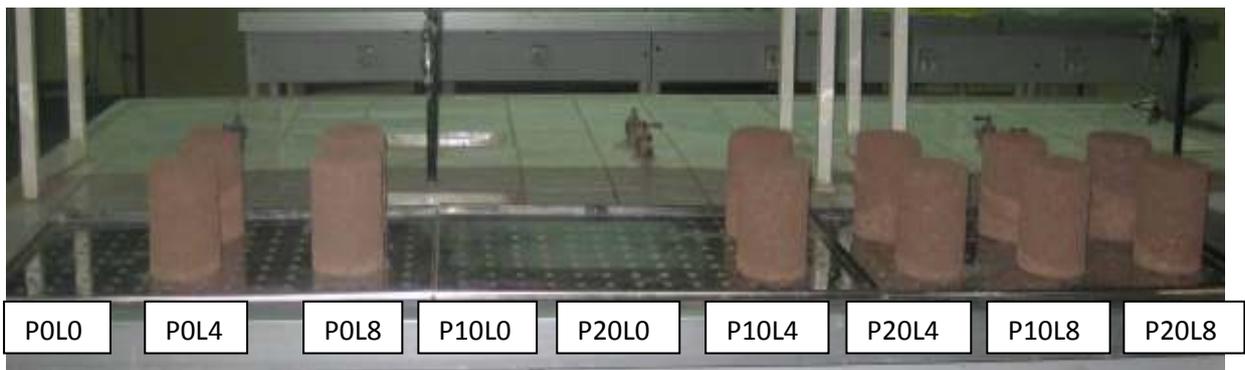
**6<sup>ème</sup> cycle** aucun changement



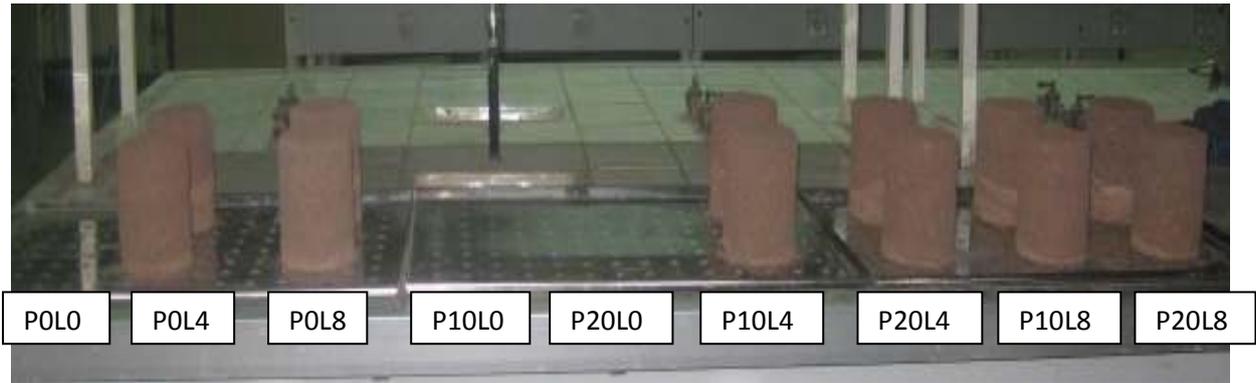
7<sup>ème</sup> cycle aucun changement



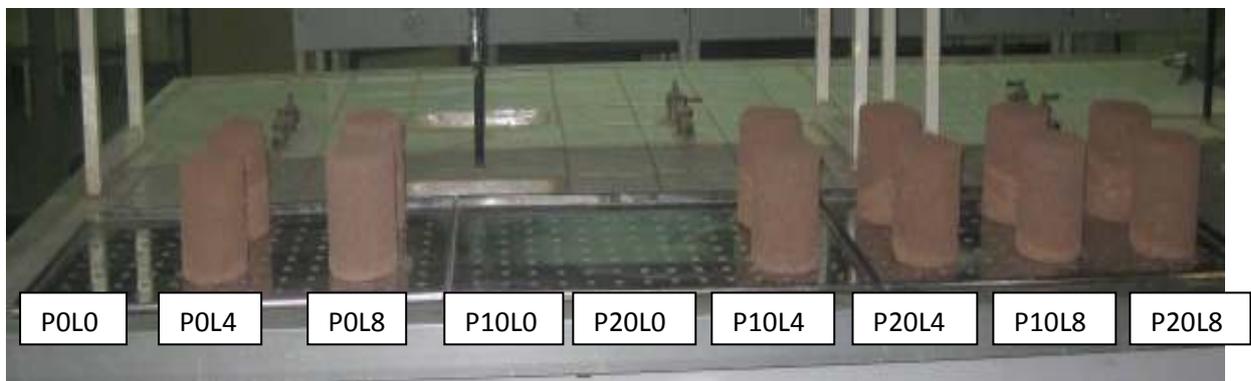
8<sup>ème</sup> cycle aucun changement



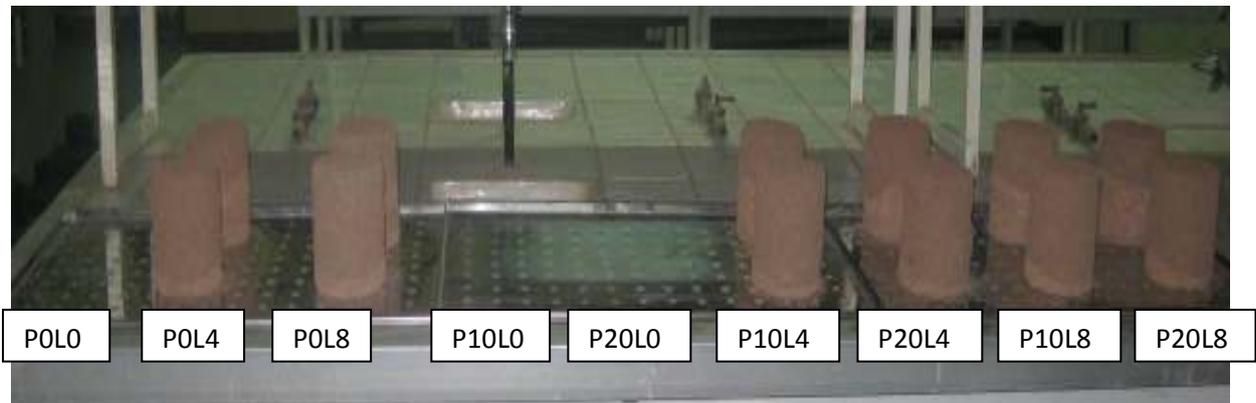
9<sup>ème</sup> cycle aucun changement.



**10<sup>ième</sup> cycle aucun changement.**

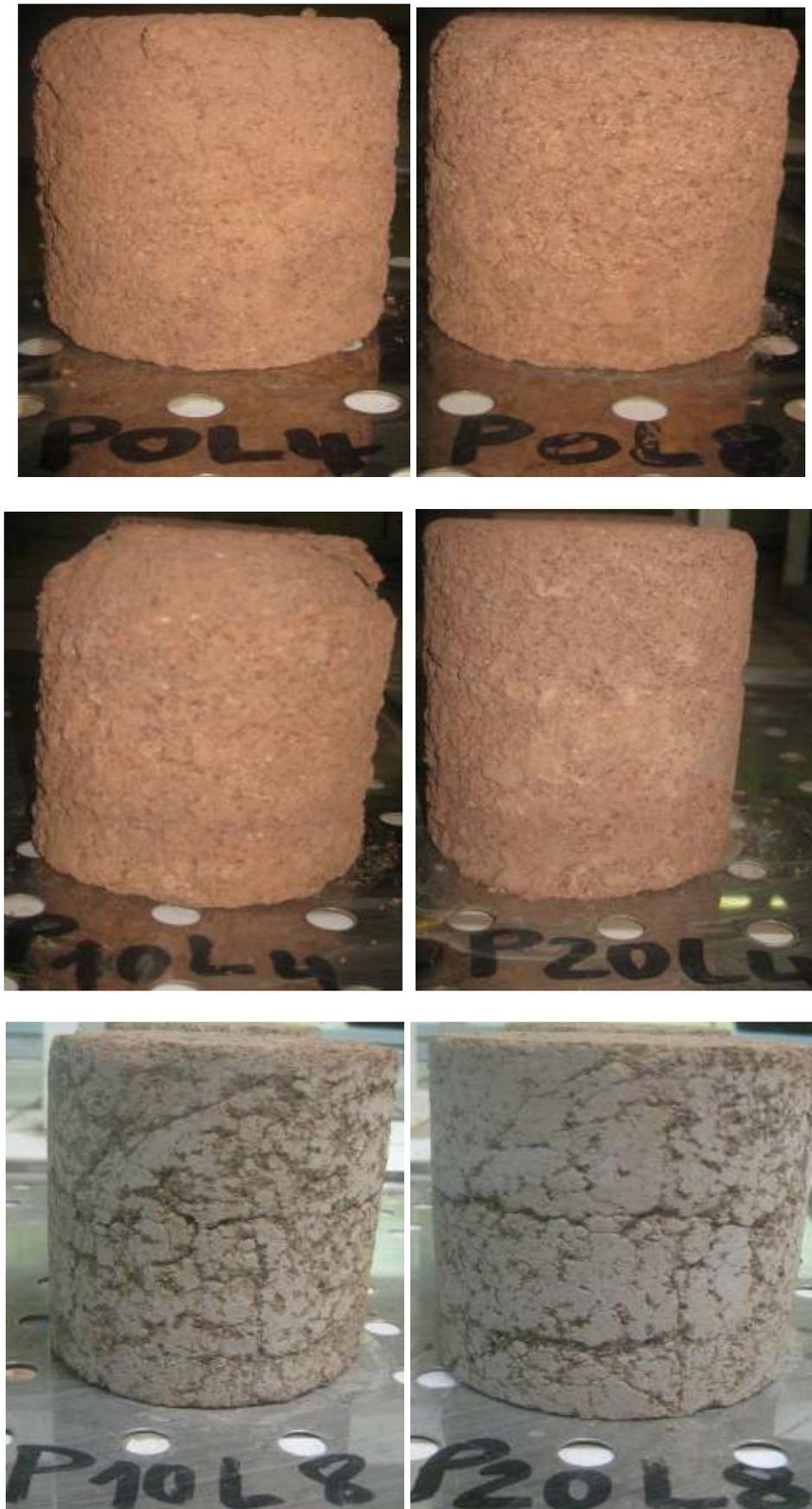


**11<sup>ième</sup> cycle aucun changement.**



**12<sup>ième</sup> cycle aucun changement.**

Les échantillons POL4, POL8, P10L4, P20L4, P10L8 et P20L8 survécu au 12<sup>ième</sup> cycle ont un état final qui diffère d'un échantillon à un autre tel que le P10L4 et le P20L8 n'ont pas la même apparence (Fig. 4.6).



**Fig. 4.6-** Etat finale des échantillons du sol rouge après 12 cycles.

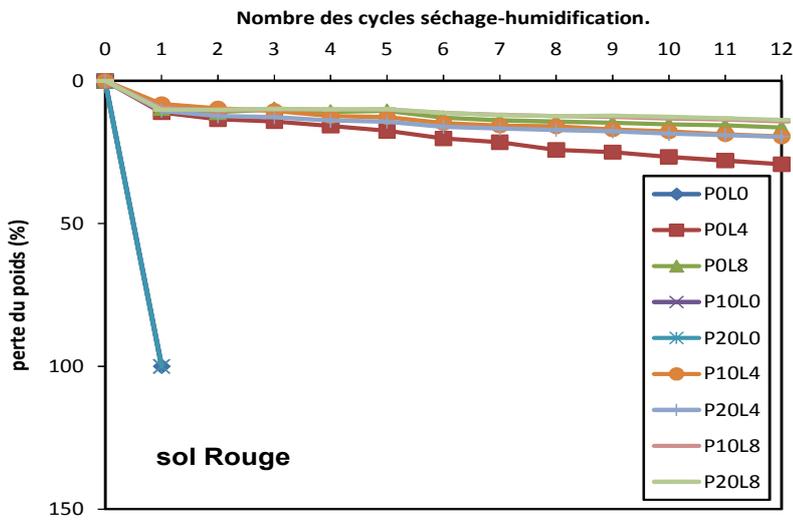
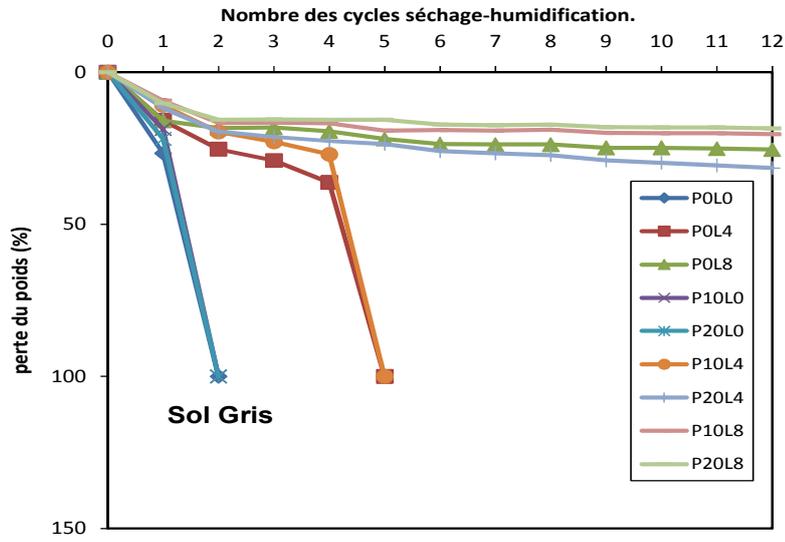
Les figures ci-dessus permettant de bien voir l'évolution le nombre des cycles des combinaisons qui ont été accomplis avant l'effondrement et d'analyser l'état de comportement des échantillons du sol gris et rouge traité et non traité durant les cycles de saturation-séchage. La plupart des échantillons ont survécu les 12 cycles malgré l'agressivité de ce test, Ce qui est conforme avec le comportement observé des échantillons traité avec la chaux et la pouzzolane. Les sols non traités et traité avec la pouzzolane seule ont survécu uniquement un cycle. Cependant, les sols traités avec la chaux et la pouzzolane ont survécu les 12 cycles. L'ajout de la pouzzolane seule a un comportement similaire avec les échantillons non traités. Tout en regardant le nombre de cycle complété.

D'après les photos, On remarque bien la disparition des échantillons non traité pour les deux sols ainsi les échantillons traités avec la pouzzolane naturelle seule dès les premiers cycles de saturation-séchage. En conséquence, dans la présente étude, les sols stabilisés ont souffert de petite à une significatif perte de matériaux « perte de masse » pendant l'essai de saturation-séchage, à cette raison on a mesuré la perte de masse après chaque cycle. Les échantillons qui ont une faible perte de poids dans les essais "saturation-séchage" résistent à la compression qui pourrait décomposer graduellement les liaisons de la cimentation. La quantité d'additifs qui résiste aux essais de durabilité est typiquement considérée comme un dosage optimum.

Il est à signaler que pour les deux types de sol, la plupart des spécimens qui ont résisté à 12 cycles sont des combinaisons sol/ (chaux+PN) et sol/chaux sauf que l'état final des spécimens traités avec la chaux seule présentent un aspect extérieur irrégulier, par contre les spécimens traités avec la chaux+la PN sont restés quasiment intactes voir (Fig. 4.5 et Fig. 4.6). On a constaté aussi que les sols non traités et les sols traités avec la PN seule ont le même nombre de cycles et le même comportement d'effondrement pour les deux sols étudiés d'après les figures 4.2 et 4.3.

#### **4.3.2 Perte du poids durant les cycles de saturation-séchage**

Les résultats des tests de durabilité en termes de perte du poids après chaque cycle sont reportés dans les figures 4.7 et 4.8. Les spécimens pour cet essai ont été divisés en deux périodes de cure 7 et 28 jours.



**Fig. 4.7-** Perte de masse dans les cycles de saturation-séchage à 7 jours.

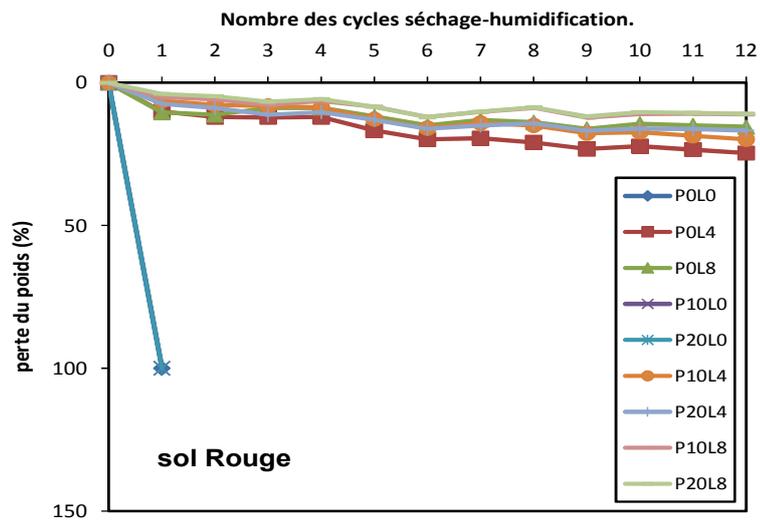
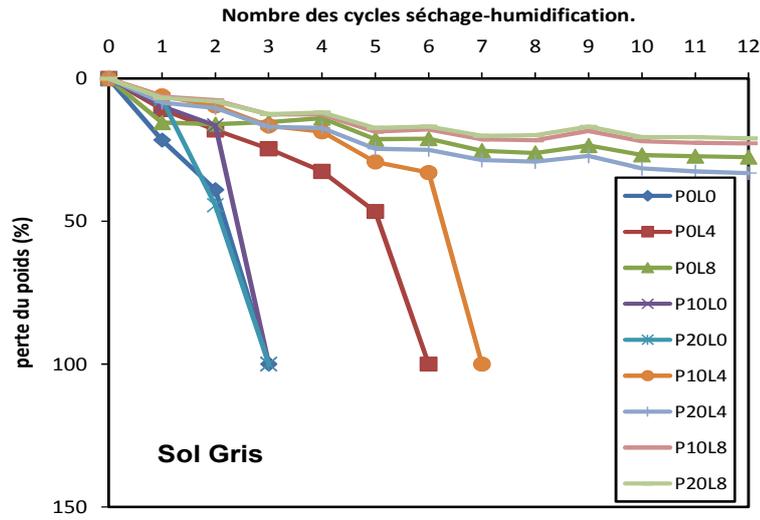


Fig. 4.8- Perte de masse dans les cycles de saturation-séchage à 28 jours.

La figure 4.7 montre les résultats de la perte de poids lors du test de saturation-séchage sur les sols à 07 jours. Les essais montrent que les échantillons: P0L0, P10L0 et P20L0 du sol rouge ont une perte de 100% dès le premier cycle à 7. Cependant, les échantillons: P0L0, P10L0 et P20L0 du sol gris subissent une perte de 100% au 2<sup>ième</sup> cycle à 7. La combinaison P10L4 subit une perte de 100% au 5<sup>ième</sup> cycle à 7 jours.

Les quatre combinaisons P20L8, P10L8, P0L8 et P20L4 montrent une tendance semblable dans la perte du poids pour les deux types de sol. Les cinq autres combinaisons P0L0, P10L0, P20L0 et P10L4 subissent une perte de poids de 100% avant de terminer les 12 cycles pour les deux types du sol. La figure 4.7 montre que la perte de poids tend à augmenter légèrement avec le nombre des cycles de saturation-séchage pour les deux types de sol. Cela est attribué peut être à la rupture et l'endommagement des liaisons de cimentation créés par le traitement de chaux+PN.

L'effet de la saturation était dépendant du niveau de la résistance conçu par la réaction pouzzolanique avant de commencer les phases de saturation. La perte de poids des spécimens soumis à l'immersion est possible et causée par l'absorption d'eau durant l'immersion.

La figure 4.7 montrent aussi que la combinaison chaux-PN montre une meilleure performance de perte de poids et ayant survécu aux 12 cycles de saturation-séchage. Ce qui est le contraire pour les spécimens traité avec la pouzzolane seule s'effondrant dès le 1<sup>ier</sup> cycle avec 100% de perte. Le traitement chaux-PN diminue la perte de poids au maximum et améliore la durabilité des sols argileux de 70 à 80%.

Il est à remarquer que le sol qui contient une grande quantité de fines particules tel que le sol gris montre une grande perte de poids par rapport au sol rouge. Ces résultats indiquent que l'effet bénéfique du traitement a été perdu après les cycles de saturation-séchage dans le sol gris à plasticité élevée. Cependant, cet effet bénéfique du traitement a été préservé avec le sol rouge de faible plasticité. Le traitement du sol rouge est plus performant et donne des valeurs plus basses de perte de poids que le sol gris.

La perte du poids est toujours associée avec la pouzzolane seule, cet effet confirme que la pouzzolane seule dans le sol n'augmente pas les liaisons entre la matrice du sol

stabilisé. L'addition de la chaux fraîchement préparée améliore la capacité de liaison de la pouzzolane. Néanmoins la Pouzzolane est encore utile, comme indiqué, car elle augmente la distribution de la chaux dans le sol [Hossain et al., 2007; Koliass et al., 2005]. Le mélange PN seul dans le sol n'est pas recommandé.

L'observation d'une meilleure performance des échantillons stabilisés avec la combinaison chaux-PN que les échantillons avec la PN seule. Cela suggère bien l'approvisionnement des ions de  $Ca^{+2}$ , ingrédient nécessaire pour la stabilisation, les processus physico-chimiques sont impliqués et c'est la cause recherchée et, la durabilité humide-séchage est dictée par ce comportement.

La durabilité du sol sous des conditions répétées de saturation-séchage dépend premièrement de la structure des pores et la résistance à la traction du matériau. D'autres paramètres, tel que le frottement entre les particules et la cohésion peut également influencer la perte du matériel dans ce test.

D'après la figure 4.8 montrant l'évolution de perte de poids à 28 jours, on constate une légère différence de performance entre les deux périodes de cure à 7 et 28 jours. Le sol gris a montré une augmentation légère de perte du poids tandis que le sol rouge a montré une diminution légère de perte par rapport aux résultats de 7 jours.

On résumé, l'augmentation du dosage des additifs diminue la perte de masse. Ceci indique que la combinaison des additifs utilisés n'augmente pas uniquement la résistance mécanique mais augmente aussi la durabilité.

La perte de masse est marginale avec l'ajout de la chaux seule par rapport à la combinaison chaux+PN cela indique que la performance sera atteinte avec la combinaison chaux+PN.

### 4.3.3 Résistance après durabilité

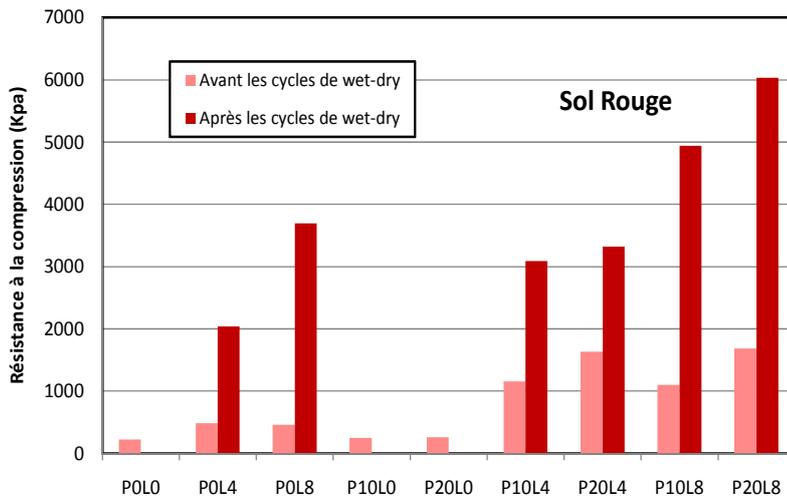
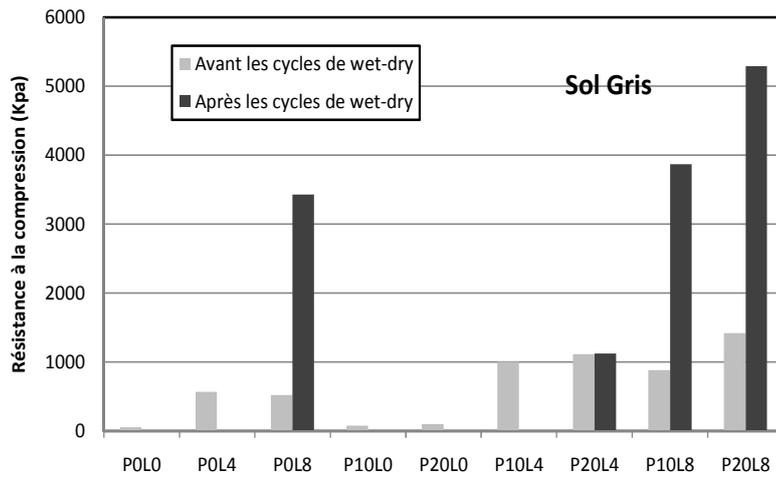
La durabilité du sol est évaluée par la perte de la stabilité. Dans cette investigation, la perte de la stabilité a été réalisée à travers la perte de la résistance à la compression du sol stabilisé. La résistance était le critère préliminaire employé pour évaluer la performance potentielle des spécimens pour identifier des mélanges pour d'avantage d'évaluation. Les résultats sont représentés dans les tableaux suivants 4.3 et 4.4.

**Tableau 4.3-** Variation de la résistance à la compression avant et après 12 cycles.

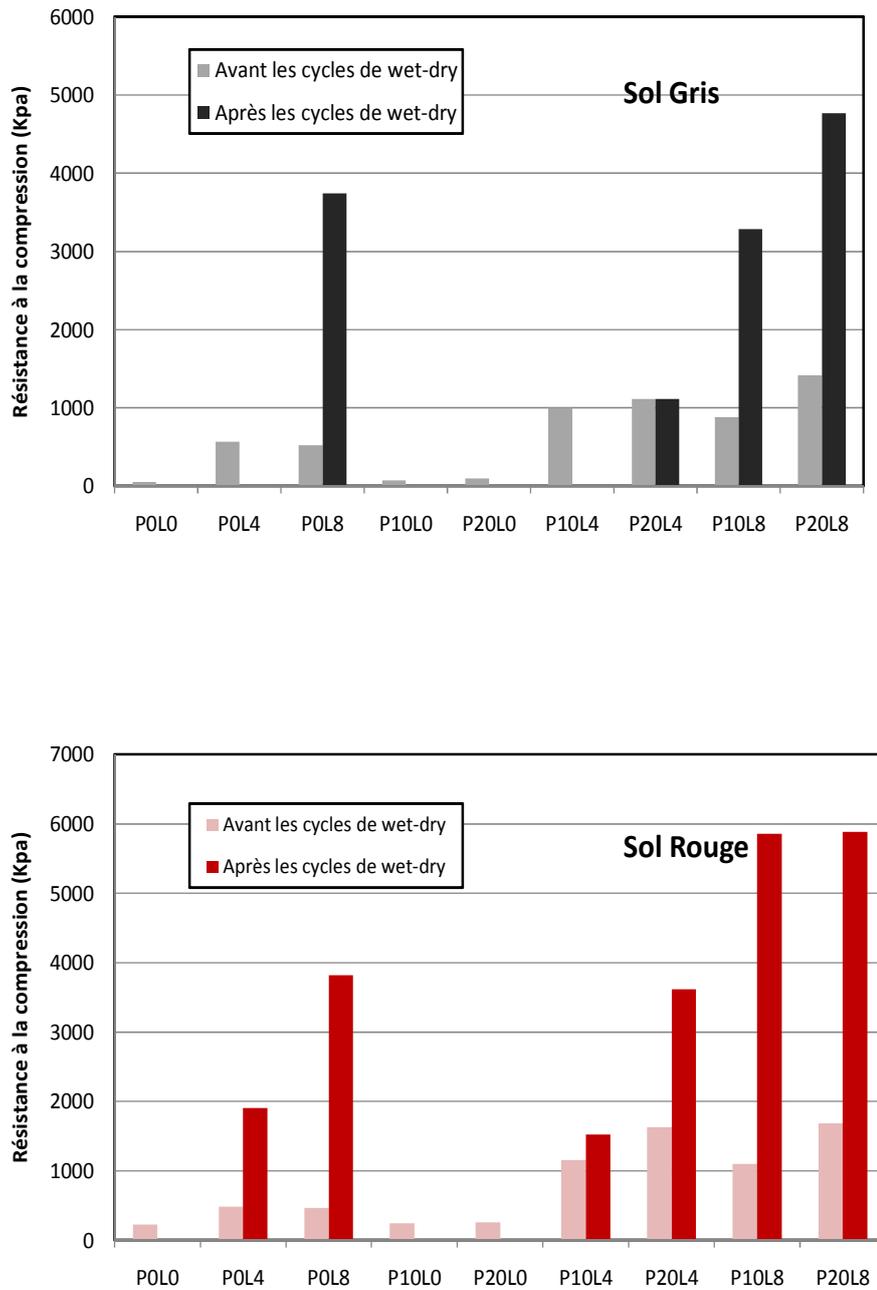
Combinaisons	Résistance à la compression (MPa)							
	07 Jours				28 Jours			
	Sol Gris		Sol Rouge		Sol Gris		Sol Rouge	
	R <sub>i</sub>	R <sub>f</sub>	R <sub>i</sub>	R <sub>f</sub>	R <sub>i</sub>	R <sub>f</sub>	R <sub>i</sub>	R <sub>f</sub>
P0L0	55.6	/	222.5	/	55.6	/	222.5	/
P0L4	568.6	/	482.1	2039.55	1032.2	/	692.2	1903.55
P0L8	519.2	3430.16	460.5	3695.92	1050.7	3745.4	716.9	3819.5
P10L0	74.2	/	247.2	/	80.4	/	265.8	/
P20L0	98.9	/	259.6	/	98.9	/	278.1	/
P10L4	1001.3	/	1155.8	3090.23	1878.9	/	2045.8	1520.4
P20L4	1112.5	1124.84	1631.7	3318.91	1662.6	1116.45	2886.3	3615.6
P10L8	883.8	3868.97	1100.1	4938.19	1742.9	3288	2002.5	5859.1
P20L8	1415.4	5290.5	1681.1	6032.14	2620.5	4771.35	2775.1	5883.8

**R<sub>i</sub>** : Résistance initiale avant l'application des cycles.

**R<sub>f</sub>** : Résistance finale après l'application des cycles.



**Fig. 4.9-** Variation de la résistance finale par rapport à la résistance initiale à 07 jours.



**Fig. 4.10-** Variation de la résistance finale par rapport à la résistance initiale à 28 jours.

Le Tableau 4.3 et les figures 4.9 et schéma 4.10 présentent les données de l'essai saturation-séchage. Les traits dans le tableau et l'absence de quelques barres dans la figure représentent les données qui n'ont pas été mesurées, cela est dû à la détérioration du spécimen. Dans le cas où les spécimens sont détériorés l'essai de la compression ne pourrait pas être réalisé, les résistances de ces spécimens sont négligeables. De même que les spécimens non traités, se sont effondrés pendant la période de saturation avant le commencement du premier cycle saturation-séchage, la résistance de ces spécimens ne pourraient pas être mesurée. C'est également le cas pour les spécimens traités avec la pouzzolane seule. Seulement les spécimens traités à la chaux ou traité avec la chaux+PN pourraient être examinés pour la résistance à la compression à la fin du cycle saturation-séchage, et ceux-ci ont donné un gain significatif de la résistance comparée aux spécimens non traités.

La résistance après chaque cycle augmente d'une manière progressive quatre fois pour le sol gris et deux fois pour le sol rouge par rapport à la résistance initiale à 7 et 28 jours. Cette performance suggère que la réaction de la stabilisation a été relativement permanente et que certaines réactions peuvent être continues pendant les cycles.

Le traitement avec la chaux+PN a une plus grande résistance que le traitement avec la chaux seule. Cela montre l'effet bénéfique de la PN et ses caractéristiques minéralogiques. L'augmentation de la résistance est liée à la progression de la formation des CSH et CAH de ces deux hydrates avec le temps. L'augmentation de la résistance même après les cycles est due aux changements de taille et d'organisation (augmentation du frottement) provoqués par l'échange cationique et la formation des liens de cimentation (augmentation de cohésion) qui améliorent la rigidité des sols.

Plus les quantités ajoutées de chaux et de PN sont importantes; plus la résistance des échantillons traités est importante. Ce comportement est dû à l'augmentation de la quantité de liens de cimentation formés et issues de la réaction pouzzolanique notamment avec les forts dosages en chaux+PN. La silice et l'alumine libérées lors de la dissolution des minéraux argileux sous l'effet de la chaux vive réagissent avec le calcium en solution pour former par précipitation des silicates calciques hydratés (CSH) et des aluminates calciques hydratés (CAH). Ces hydrates formés par la chaux vont être en grande quantité avec la présence de la PN.

En générale, selon le tableau 4.4 tous les échantillons perdent leurs résistances excepté les combinaisons (chaux+PN). Au cours de l'essai, ces combinaisons ont obtenu un gain de résistance considérable qui dépasse les 100%. Ce gain de résistance peut être attribué relativement à la longue durée de l'essai [Bin-Shafique et al., 2009]. La réaction pouzzolanique produite par la chaux et la PN pourrait continuer tout au long des 03 semaines exigées pour compléter l'essai de saturation-séchage, ayant pour résultat le gain observé de résistance. L'eau devient aussi un milieu favorable à la cinétique de la réaction pouzzolanique. Il est important de noter que ses combinaisons à base de chaux et PN après 03 semaines de cycle résistent parfaitement à l'action de l'eau.

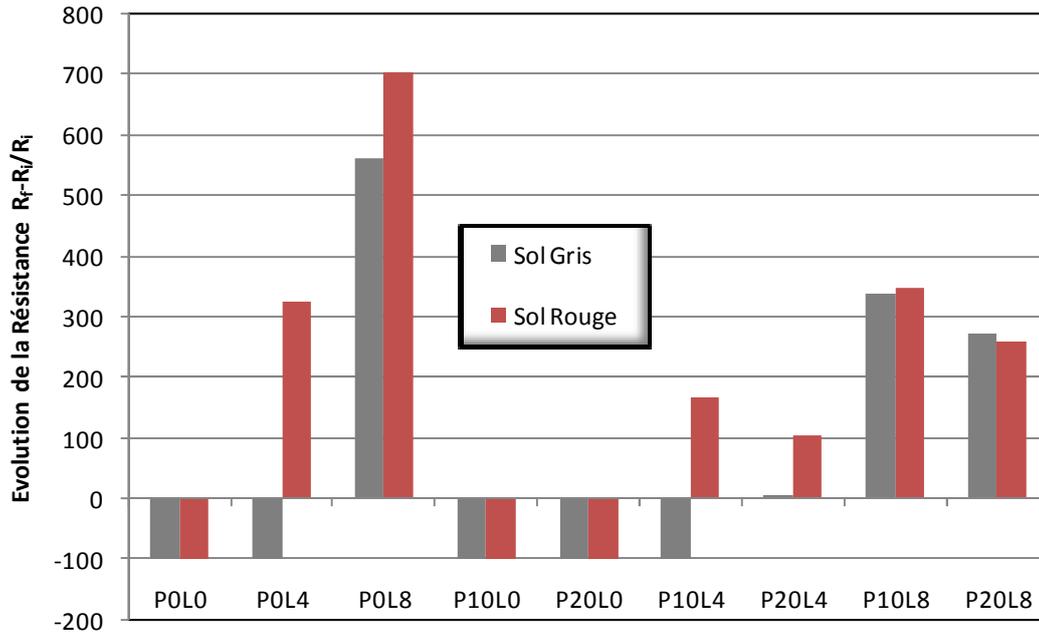
L'apport de la PN accélère considérablement la réaction pouzzolanique et induit un gain de résistance qui dépasse 100% (voir tableau 4.4) permettant l'utilisation des sols fins en géotechnique routière et pour la construction. L'activité pouzzolanique potentielle d'un matériau réside dans sa teneur en silice, une proportion importante de phase vitreuse et une grande surface spécifique. Ces caractéristiques chimiques, minéralogiques et physiques sont retrouvées dans la PN. Une teneur de 8% de chaux correspond à la réaction pouzzolanique la plus effective ce qui confirme les résultats.

**Tableau 4.4-** Evolution du gain de la résistance.

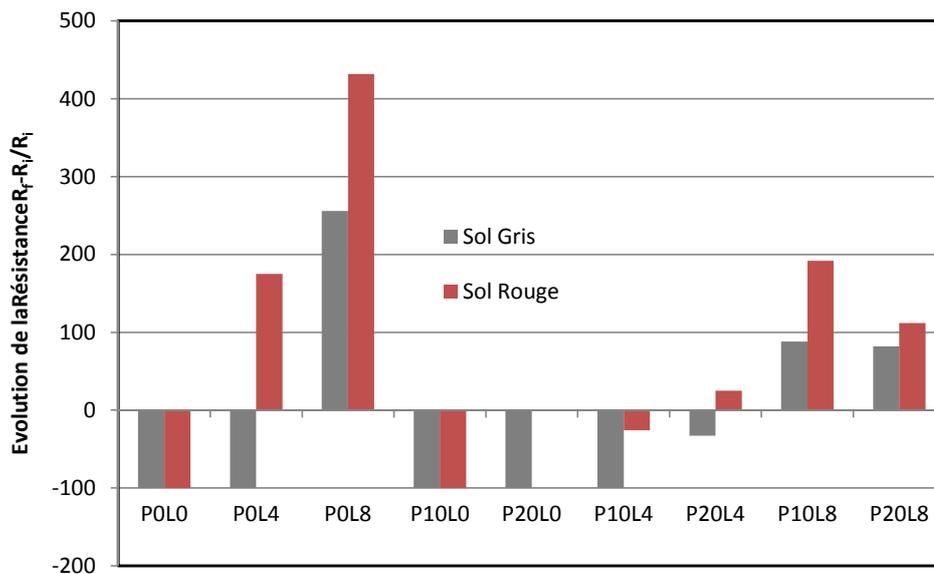
Echantillon	Gain de résistance $(R_f - R_i) / R_i \times 100$ (%)			
	07 Jours		28 jours	
	Sol Gris	Sol Rouge	Sol Gris	Sol Rouge
P0L0	-100	-100	-100	-100
P0L4	-100	323	-100	175
P0L8	560	702	256	432
P10L0	-100	-100	-100	-100
P20L0	-100	-100	-100	-100
P10L4	-100	167	-100	-26
P20L4	1	103	-33	25
P10L8	337	348	88	192
P20L8	273	258	82	112

Le signe négatif (-) signifie une perte de résistance.

Le signe positif (+) signifie un gain de résistance.



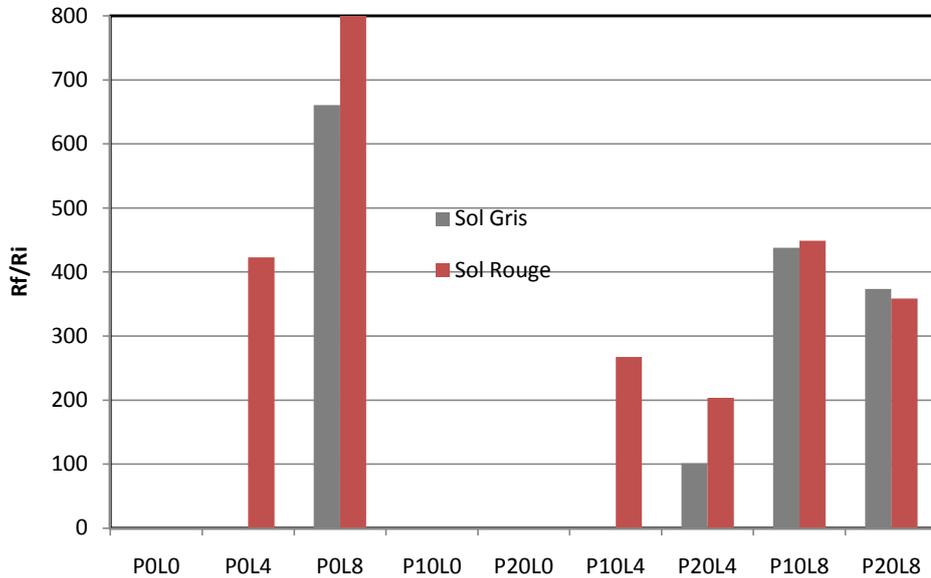
**Fig. 4.11-** Le gain de la résistance à 7J.



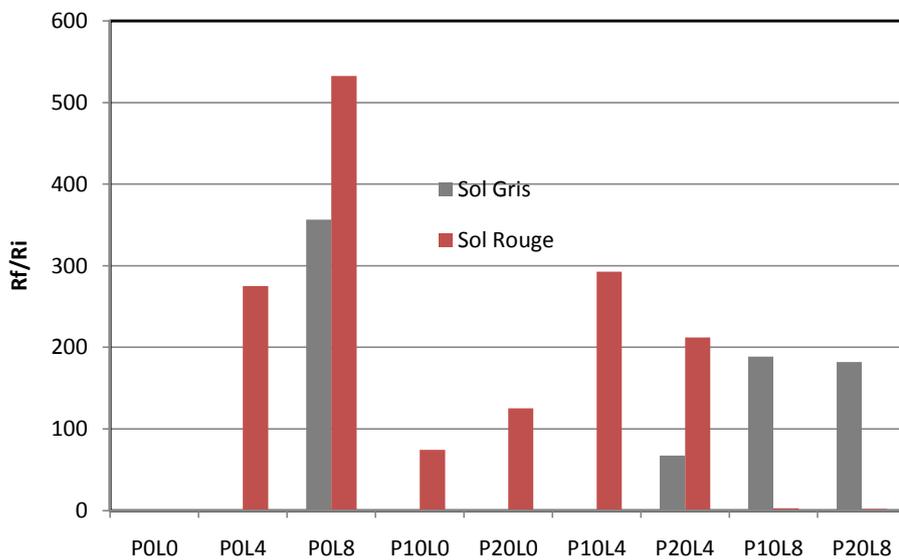
**Fig. 4.12-** Le gain de la résistance à 28J.

Les valeurs de la résistance résiduelle (URS) pour les deux sols argileux stabilisés avec la chaux et la pouzzolane sont illustrées sur les figures 4.13 et 4.14. Il est évident qu'une significative perte de résistance à la compression était expérimentée par les échantillons traités avec la pouzzolane seule et les échantillons non traités pour les deux sols étudiés, une

autre perte a été produite de 100% de P0L4, P10L4 pour le sol gris. La résistance à la compression du sol rouge stabilisé avec la chaux et la pouzzolane est sensiblement plus haute que ceux du sol gris stabilisé après les cycles (voir les schémas, tableau). Les échantillons traités par la chaux et la pouzzolane ont le plus grand gain de résistance après les cycles.



**Fig. 4.13-** Variation de la résistance résiduelle à 7J.



**Fig. 4.14-** Variation de la résistance résiduelle à 28 jours.

Le test de mouillage-séchage lui-même est un essai agressif, ou on immerge l'échantillon dans l'eau pendant l'étape de saturation, l'eau pénètre dans le sol par une force qui s'exerce sur les parois. Saturer un spécimen peut faire des dommages significatifs. Durant la phase de séchage, le sol se dessique et forme des fissures. La présence des fissures dans la période de séchage permet à l'eau de s'infiltrer rapidement dans le sol au cours du prochain mouillage. La résistance à la compression mesurée après les cycles est influencée sensiblement par la structure du pore et la résistance mécanique (résistances à la compression) de l'échantillon. (Pore walls) l'écran poreux peut s'effondrer pendant le transfert de la saturation vers le séchage répété 12 fois. Par conséquent, tous ces paramètres affectent individuellement les résultats.

La résistance à la compression du sol rouge est plus élevée que la résistance à la compression du sol gris avant et après les cycles, cela provient de ces propriétés qui dépendent de la résistance mécanique du matériau lui-même. La formation d'hydrate silicate de calcium (C-S-H) et hydrate d'alumine de calcium (C-A-H) dans le sol stabilisé contribue au développement de la résistance. Dans le cas de la combinaison chaux+PN, ces hydrates sont produits en double à partir de la réaction pozzolanique, et peuvent continuer même à long terme, la PN qui elle-même est riche en Si et Al. Cette réaction qui a été effectuée sert à compenser les hydrates de CSH et CAH. Par conséquent, une grande augmentation de la résistance. Cependant, dans le cas de la chaux seule, les hydrates sont issus de la réaction pozzolanique qui provient du Si et Al du sol seul. Cette réaction est un processus relativement lent, la PN a accéléré la réaction au jeune âge (7 jours) et a permis de fournir plus d'hydrates.

Un sol stabilisé devrait avoir une capacité de gain de résistance sous des conditions "In-Situ". Les résultats de la durabilité après les 12 cycles de saturation-séchage présentés dans le tableau 4.4 indiquent une augmentation considérable de la résistance des spécimens, comparés avec la résistance initiale pour une même période de cure. D'après ces résultats, il est bien prouvé que le gain de résistance se développe successivement après chaque cycle.

On peut constater aussi d'après la figure 4.14 que la résistance résiduelle (URS) augmente à 7 jours, ensuite elle diminue à 28 jours, le taux de réduction de la résistance résiduelle est minimal. Après que le processus d'hydratation soit presque complet, l'effet de la détérioration devient plus exprimé après 28 jours. La résistance résiduelle à 28 jours peut être

considérée comme une résistance à long terme du sol soumis à des conditions de saturation-séchage. La résistance dépend aussi des propriétés du sol.

L'augmentation initiale (à 7 jours) dans la résistance (URS) peut être expliquée par la continuité de la formation des hydrates et le taux de gain de résistance est plus haut que le taux de la détérioration. La résistance résiduelle tend à se converger, contrairement à la grande variation de la résistance au jeune âge [Sabry et al., 2001].

#### 4.4 Etude de la Sorptivité

Cette recherche consiste aussi à étudier un deuxième paramètre important de la durabilité par la mesure de la pénétration de l'eau par action capillaire « sorptivité ». Le tableau 4.5 montre l'effet des combinaisons du sol chaux-PN sur la sorptivité à 7 et 28 jours. Les traits dans le tableau indiquent que la surface de l'échantillon s'effondre dès le contact avec l'eau (voir figure 4.15).

**Tableau 4.5-** Sorptivité des sols améliorés après 7 et 28 jours de cure.

	Sorptivité ( $\text{cm.s}^{-0,5}$ ) $\times 10^{-2}$			
	Sol rouge		Sol gris	
	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
<b>P0L0</b>	-	-	3,30	1,42
<b>P0L4</b>	3,46	0,84	1,90	0,65
<b>P0L8</b>	6,35	2,29	1,55	0,54
<b>P10L0</b>	-	-	2,47	1,34
<b>P20L0</b>	-	-	2,07	1,40
<b>P10L4</b>	7,64	1,32	1,92	0,86
<b>P20L4</b>	4,74	0,36	0,46	0,00
<b>P10L8</b>	7,12	1,17	0,42	0,00
<b>P20L8</b>	6,78	0,38	0,31	0,00

On peut voir clairement d'après le tableau 4.5 que l'addition des ajouts (chaux-pouzzolane) diminue l'absorption capillaire par rapport au sol non traité pour les deux sols. Par exemple, à 8% de la chaux le sol gris a une sorptivité de  $1.55 \times 10^{-2}$  après 7 jours qui

représente une réduction comparé avec le sol non traité de 3.3% (c.-à-d. une réduction de 53%). En générale, la combinaison des ajouts ou ajouts seule avec la chaux et la pouzzolane réduit sensiblement la sorptivité. Cette réduction est en accord avec des résultats récents de *Hossain et al* (2007). On peut aussi constaté que la sorptivité diminue encore avec l'augmentation de la cure pour les deux sols. Par exemple, pour le sol gris à 7 jours et à 8% de la chaux la sorptivité était 1.55% devient 0.54% à 28jours (c.à.d. une diminution de 65%). Il est à remarqué que le sol gris a une grande diminution de la sorptivité par rapport au sol rouge. Par exemple, pour le sol rouge à 8% de la chaux le sol gris a une sorptivité de 6.35% après 7jours alors que le sol rouge atteint 1.55% de sorptivité pour le même dosage de chaux et de cure.

En revanche, l'addition de la pouzzolane naturelle diminue légèrement la sorptivité pour le sol gris par contre le sol rouge résiste pas à la sorptivité avec la PN seule. Par exemple à 20% de PN pour le sol gris montre une réduction marginale par rapport au sol non traité de 3.3% à 2.07% après 7 jours de cure (c.à.d. une réduction de 37%). Hossain et al (2007) ont trouvé que 20% de la cendre volcanique (VA) diminue la sorptivité à 58%. Une augmentation du dosage du PN réduit la sorptivité des sols stabilisés.

La combinaison des ajouts chaux+PN avec un grand pourcentage produit une réduction maximale de la sorptivité. On peut voir qu'à 7 jours avec la combinaison 10% de PN +4% de la chaux pour le sol gris représente une diminution de 42% comparant avec le sol non traité. *Hossain et al* (2007) ont observé que la combinaison de 10%PN+4%L réduit la sorptivité jusqu'à 52% par rapport au sol non traité. Ainsi, on peut noter qu'à 28 jours, la combinaison PN+8%L produit des diminutions extrême de sorptivité jusqu'à annulation complète de l'absorption d'eau et ceci se voit clairement pour le sol gris. Par exemple, avec la combinaison 20%PN+8%L et à 28 jours, aucune absorption développé la sorptivité s'annule 0%. Pour le sol rouge pour le même dosage et la même période de cure la sorptivité diminue jusqu'à 0.38%.

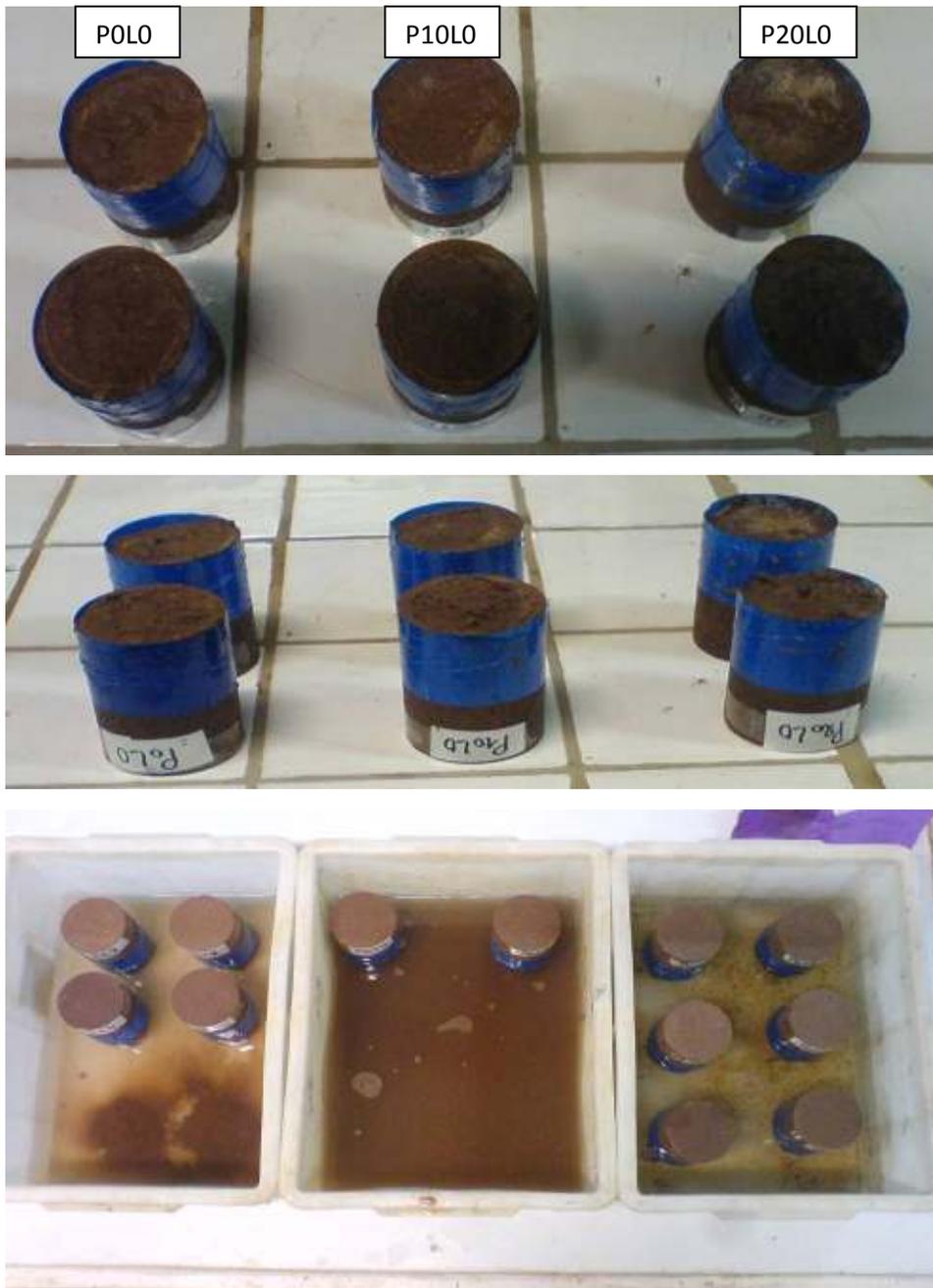
Pour les deux sols, la sorptivité diminue d'une manière significative avec l'augmentation de la cure et le dosage des additifs. Cette augmentation de réduction d'absorption d'eau à 28 jours peut être attribuée au développement de la réaction pouzzolanique des ajouts dans le temps. Par exemple, pour le sol rouge à 7 jours et au dosage de P20L8 la sorptivité était 6.78% et devient 0.38% à 28 jours (c.à.d. une réduction d'absorption de 94%). Ces résultats ne coïncident pas avec les résultats de Hossain et al

(2007), ils ont trouvé que la sorptivité ( $\psi$ ) augmente avec le temps à 14 jours comparant avec les résultats de 7 jours.

On remarque que l'incorporation du couple (pouzzolane/chaux) est très efficace comparativement au couple (pouzzolane seule/ chaux seule) à court et à long terme. De plus, on remarque qu'il ya une réduction importante de la sorptivité avec la durée de cure, spécialement pour les échantillons stabilisés avec la combinaison chaux-pouzzolane naturelle. Ces résultats témoignent clairement que l'incorporation de 20% PN et 8% de la chaux améliore considérablement l'absorption d'eau des sols argileux confectionnés selon cette combinaison à court et à long terme. L'incorporation de la pouzzolane à la chaux est très avantageuse puis qu'elle permet une réduction importante d'absorption capillaire. Dans ce cas, les pores dans la pâte sont remplis et les interfaces entre cette dernière par ces ajouts et les pores capillaires sont réduites [Hossain et al, 2007]..

Par ailleurs, l'évolution de la sorptivité pour les deux sols suit la même tendance que l'évolution des cycles de séchage-saturation. Pour le sol argileux rouge, les échantillons naturels et ceux traités à la chaux seule ou à la pouzzolane naturelle seule n'ont pas résistés à l'essai de sorptivité. Cependant, un comportement contraire est observé pour les échantillons du sol argileux gris. Cette tendance est due principalement à la plasticité du sol argileux traité. Une plasticité élevée contribue efficacement à la résistance des échantillons aux différents essais de durabilité qui prennent souvent la notion d'essais agressifs.

La figure 4.15 montre la dissolution du sol rouge P0L0, P10L0 et P20L0 dès leur contact avec l'eau.



**Fig. 4.15-** Effondrement de surface des échantillons du sol rouge pendant l'essai de sorptivité.

#### 4.5 Conclusion

A la lumière de ce qui précède, on remarque que l'incorporation de la combinaison "pouzzolane+chaux" aux sols argileux, contribue d'une façon positive sur les performances mécaniques et la durabilité des spécimens. Ils permettent l'amélioration de la résistance mécanique des sols argileux à court et à long terme, la diminution de l'absorption capillaire et l'augmentation de la durabilité des sols du sol.

*Conclusions Générales*

---

---

*et Recommandations*

# Conclusions générales et prospectives

## Introduction

L'étude entreprise dans ce mémoire, nous indique qu'il est possible d'exploiter les gisements de ressources naturelles telles que la pouzzolane naturelle de Béni-Saf et les différents gisements existant en Algérie pour le traitement des sols argileux dans notre pays. Ces derniers présentent des intérêts incontestables du point de vue technique et économique et du point de vue de durabilité envers les différents changements climatiques. Cette approche qui consiste à traiter et à améliorer les sols médiocres se montre de plus en plus réceptive à la nouvelle façon d'élaborer des matériaux plus résistant et plus durable. Les résultats expérimentaux menés à travers cette étude permettent de dégager les conclusions générales et les perspectives pour des futurs travaux de recherche suivants.

## Conclusions générales

Cette étude montre l'effet bénéfique de la pouzzolane naturelle, de la chaux et de leurs combinaisons sur la résistance à la compression, les cycles de saturation-séchage et la sorptivité des sols argileux stabilisés. Sur la base de résultats de ces tests, les conclusions suivantes peuvent être dégagées:

- le dosage "8%chaux+20%PN" est suffisant pour améliorer considérablement les propriétés géotechniques des sols argileux;
- pour la combinaison "8%chaux+20%PN" la résistance à la compression à 7 jours est 25 fois la valeur de sol gris non traité, et 7 fois la valeur du sol rouge non traité;
- la durabilité du sol traité donne une bonne indication de performance. En conséquence, le mélange des additifs (chaux+PN) au sol stabilisé ne devrait pas dépendre du dosage optimum du stabilisateur basé sur la résistance (UCS) seulement, mais sur la durabilité du sol stabilisé qui devrait être aussi considérée;
- l'addition de la chaux améliore la sorptivité. Cette amélioration est plus significative avec la cure et avec la combinaison chaux-PN que la chaux seule ou PN seule;

- la combinaison de la pouzzolane naturelle avec la chaux affecte positivement l'absorption capillaire des deux sols à long terme. Cette amélioration peut être attribuée à l'effet filler suite à sa surface spécifique et à la formation des gels C-S-H par la réaction pouzzolanique à long terme d'où la réduction de la porosité de la matrice du sol et par conséquent la diminution de l'absorption capillaire. Il y'a donc création d'une cimentation des particules du sol en réduisant ainsi la porosité de l'échantillon et par la suite une réduction importante de l'absorption par capillarité ou sorptivité;
- la combinaison de deux matériaux locaux (pouzzolane naturelle et la chaux) peut efficacement améliorer les propriétés des sols cohérents et augmente la disponibilité des terrains pour des projets de construction;
- vu l'efficacité de la pouzzolane naturelle dans la stabilisation des sol/chaux, il est bien recommandé dans le domaine des constructions.

### **Prospectives et recommandations**

A la lumière des conclusions rapportées précédemment, nous recommandons quelques les perspectives suivantes:

- l'étude de l'influence d'autres types d'ajouts minéraux disponibles en Algérie sur la résistance mécanique et la durabilité des sols argileux,
- suivi de la réaction chaux-PN au niveau de la texture et de la microstructure pour indiquer les mécanismes de cimentation;
- étude d'autre type d'argiles de la région et faire établir un program pour traiter ces dits sols;
- les essais doivent être aussi réalisés hors laboratoire sous des conditions réelles sous des surcharges de la route etc. Sachant, que sur chantier on ne peut pas attendre jusqu'à 28 jours pour que le sol traité atteint sa durabilité maximal;
- établir une carte de distribution des sols argileux dans la région de chlef avec les modes de traitement efficaces. Et la mettre à la disposition des entreprises de réalisation.

## *Références Bibliographiques*

---

---

## *Référence Bibliographique*

Aiban, S.A., Al-Abdul Wahhab, H.I., Al-Amoudi, O.S. and Habibur, R.A., (1998), *Performance of a Stabilized Marl Base: a Case Study*, Construction and Building Materials, Vol. 12, pp.329-340.

Akinlabi Ola, S., (1977), *the Potentials of Lime Stabilization of Lateritic Soils*, Engineering Geology, Vol. 60, pp.223-233.

Al Hassan, M. and MUSTAPHA, A.M., (2007), *Effect of Rice Husk Ash on Cement Stabilized Laterite*, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies ISSN 1583-1078, pp.47-58.

Al-Rawas, A.A., Hago, A.W. and Al-Sarmi, H., (2005), *Effect of Lime, Cement and Sarooj (Artificial Pozzolan) on the Swelling Potential of an Expansive Soil from Oman*, Building and Environnement, Vol. 40, pp.681-687.

Ansary, M.A., Noor, M.A. and Islam, M., (2006), *Effect of Fly Ash Stabilization on Geotechnical Properties of Chittagong Coastal Soil*, Soil Stress-Strain Behavior: Measurements, Modeling and Analysis, pp.443-454.

Attoh-Okine, N.O., (1995), *Lime Treatment of Laterite Soils and Gravels-Revisited*, Construction and Building Materials, Vol. 9, No. 5, pp.283-287.

Attom, M.F., (2008), *Shear Strength Characteristics of Irbid Clayey Soil Mixed with Iron Filling and Iron Filling–Cement Mixture*, Environnement Geology.

ASTM D698 (2000) Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. ASTM International

ASTM D2166 (2000) Standard test methods for unconfined compressive strength of cohesive soil. ASTM International

ASTM D559 (2003) Standard test methods for wetting and drying compacted soils-cement Mixtures. ASTM International

Bagherpour, I. and Choobbasti, A.J., (2003), *Stabilization of Fine-grained Soils by Adding Microsilica and Lime or Microsilica and Cement*, EJGE.

Basha, E.A., Hashim, R. and Munthar, A.S., (2002), *Effect of the Cement–Rice Husk Ash on the Plasticity and Compaction of Soil*, EJGE.

Bhattacharja, S. and Bhatta, J.I., (2003), *Comparative Performance of Portland Cement and Lime Stabilisation of Moderate to High Plasticity Clay Soils*, RD125, Portland Cement Association, USA, 26 Pages.

Bell, F.G., (1994), *An Assessment of Cement-PFA and Lime-PFA Used to Stabilize Clay-Size Materials*, Bulletin International Association of Engineering Geology, No. 49, pp.25-32.

Bell, F.G., (1996), *Lime stabilization of clay minerals and soils*, Engineering Geology, Vol. 42, pp.223-237.

Bin-Shafique, S., Rahman, K., Yaykiran, M. and Azfar, I., (2009), *the Long-Term Performance of Two Fly Ash Stabilized Fine-Grained Soil Subbases*, Resources, Conservation and Recycling, Article in press.

Degirmenci, N., Okucu, A. and Turabi, A., (2007), *Application of Phosphogypsum in Soil Stabilization*, Building and Environment, Vol. 42, pp.3393-3398.

Du, Y., Li, S. and Hayashi, S., (1999), *Swelling–Shrinkage Properties and Soil Improvement of Compacted Expansive Soil, Ning-Liang Highway, China*, Engineering Geology, Vol. 53, pp.351-358.

Gay, G. and Schad, Herman., (2000), *Influence of Cement and Lime Additives on the Compaction Properties and Shear Parameters of Fine Grained Soils*, Otto-Graf-Journal, Vol. 11.

George, S.Z., Ponniah, D.A. and Little, J.A., (1992), *Effect of Temperature on Lime-Soil Stabilization*, Construction and Building Materials, Vol. 6, No.4, pp.247-252.

Goswami, R.K. and Singh. B., (2005), *Influence of Fly Ash and Lime on Plasticity characteristics of Residual Lateritic Soil*, Ground Improvement, Vol. 9, No. 4, pp.175-182.

Guney, Y., Sari, D., Cetin, M. and Tuncan, M., (2007), *Impact of Cyclic Wetting–Drying on Swelling Behavior of Lime-Stabilized Soil*, Building and Environnement, Vol. 42, pp.681-688.

Hensley, T.T., Jensen, W.G. and Berryman, C.W., (2007), *Pozzolan Stabilized Subgrades*, Nebraska Departement of Roads, 133 pages.

Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S. and Grine, K., (2011), *Use of Pouzzolana and Lime for Stabilization of Cohesive Soils*, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 11.

Hossain, K.M.A., Lachemi, M. and Easa, S., (2006), *Characteristics of Volcanic Ash and Natural Lime Based Stabilized Clayey Soils*, Civil Engineering, Vol. 33, pp.1455-1458.

Hossain, K.M.A., Lachemi, M. and Easa, S., (2007), *Stabilized Soils for Construction Applications Incorporating Natural Resources of Papua New Guinea*, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 51, pp.711-731.

Hossain, K.M.A. et Mol, L., (2011), *Some Engineering Properties of Stabilized Clayey Soils Incorporating Natural Pozzolans and Industrial Wastes*, Construction and Building MatériaIs, Vol. 25, pp.3495-3501.

Kaniraj, S.R. and Havanagi, V.G., (1999), *Compressive Strength of Cement Stabilized Fly Ash-Soil Mixtures*, Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp.673-677.

Kavak, A. and Akyarh, A., (2007), *A Field Application for Lime Stabilization*, Environnement Geology, Vol. 51, pp.987-997.

Kenai, S., Bahar, R. and Benazzoug, M., (2006), *Experimental Analysis of the Effect of some Compaction Methods on Mechanical Properties and Durability of Cement Stabilized Soil*, j Mater Sci, Vol. 41, pp. 6956-6964.

Khatab, S.A., Al-Juari, K. A. and Al-Kiki, I., (2008), *Strength, Durability and Hydraulic of Clayey Soil*, Al-Rafidain Engineering, Vol. 16, No 1, pp. 102-116.

Khattab, S.A et Al-Mukhtar, M., (2003), *Durabilité du Traitement à la Chaux d'un Sol Argileux Plastique*, XXI<sup>èmes</sup> Rencontre Universitaires de Génie Civil, Université d'Orléans.

Khattab, S.A., Al-Mukhtar, M. and Fleureau, J-M., (2007), *Long-Term Stability Characteristics of Lime-Treated Plastic Soil*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 19, No. 4, pp. 358-366.

Kolias, S., Kasselouri-Rigopoulou, V. and Karahalios, A., (2005), *Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement*, Cement and Concrete Composites, Vol. 27, pp.301-313.

Lasledj, Abdelmadjid., (2009), *Traitement des sols argileux à la chaux: processus physico-chimique et propriétés géotechniques*, Thèse, University d'Orleans. [ftp://ftp.univ-orleans.fr/theses/abdelmadjid.lasledj\\_1914.pdf](ftp://ftp.univ-orleans.fr/theses/abdelmadjid.lasledj_1914.pdf)

Lopez-Lara, T., Hernandez, Zaragoza, J.B., Serrano Gutierrez, G.R. and Castano, M.V., (2005), *Study of Curing Time Of Stabilized Soils*, EJGE.

Manasseh, J. and Olufemi, A.T., (2008), *Effect of Lime on Some Geotechnical Properties of Igumale Shale*, EJGE, Vol. 13.

Milburn, J.P., Parsons, R.L. and Kansas, L., (2004), *Performance of Soil Stabilisation Agents*, Kansas Department of Transportation, Final report No. K-TRAN: KU-01-8, 117 pages.

Miller, G.A. and Azad, S., (2000), *Influence of Soil Type on Stabilization with Cement Kiln Dust*, Construction and Building Engineering, Vol. 14, pp.89-97.

Mollamahmutoglu, M., Yilmaz, Y. and Gungor, A.G., (2009), *Effect of a Class C Fly Ash on the Geotechnical Properties of an Expansive Soil*, International Journal engineering Research and Development, Vol. 1, No. 1.

Mu'azu, M.A., (2007), *Influence of Compactive Effort on Bagasse Ash with Cement Treated Lateritic Soil*, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies ISSN 1583-1078, pp.79-92.

Muntohar, A.S. and Hantoro, G., (2002), *Influence of Rice Husk Ash and Lime on Engineering Properties of a Clayey Subgrade*, EJGE.

Nalbantoglu, Z. and Tawfiq, S., (2006), *Evaluation of the Effectiveness of Olive Cake Residue as an Expansive Soil Stabilizer*, *Environnement Geology*, Vol. 50, pp. 803-807.

Nalbantoglu, Z. and Tuncer, E.R., (2001), *Compressibility and Hydraulic Conductivity of a Chemically Treated Expansive Clay*, *Geotechnical*, Vol. 38, pp.154-160.

Okagbue, C.O. and Ochulor, O.H., (2007), *the Potential of Cement-Stabilized Coal-Reject as a Construction Material*, *Bull Engineering Geology Environnement*, Vol. 66, PP.143-151.

Okagbue, C.O. and Yakubu, J.A., (2000), *Limestone Ash Waste as A Substitute for Lime in Soil Improvement for Engineering Construction*, *Bulletin International Association of Engineering Geology and Environnement*, Vol. 58, pp.107-113.

Ola, S.A., (1977), *The Potentials of Lime Stabilization of Lateritic Soils*, *Engineering Geology*, Vol. 11, pp.305-317.

Osinubi, K.J., Bafyau, V. and Eberemu, A.O., (2009), *Bagasse Ash Stabilization of Lateritic Soil*, pp. 271-280.

Osula, D.O.A., (1996), *A Comparative Evaluation of Cement and Lime Modification of Laterite*, *Engineering Geology*, Vol. 42, pp.71-81.

Parsons, R.L. and Milburn, J.P., (2004), *Use of Cement Kiln Dust for Subgrade Stabilisation*, *Kansas Department of Transportation*, Final report No. KS-04-3, 65 pages.

Parsons, R.L. and Kneebone, E., (2005), *Field Performance of Fly Ash Stabilised Subgrades*, *Ground Improvement*, Vol. 9, No. 1, pp.33-38.

Prabakar, j., Dendokar, N. and Morchhale, R.K., (2004), *Influence of Fly Ash on Strength Behavior of Typical Soils*, *Construction and Building MatériaIs*, Vol. 18, pp.263-267.

Rao, S.M., Reddy, B.V.V. and Muttharam, M., (2001), *the Impact of Cyclic Wetting and Drying on the Swelling Behaviour of Stabilized Expansive Soils*, *Engineering Geology*, Vol. 60, pp.223-233.

Rao, S.M. and Shivananda, P., (2005), *Compressibility Behaviour of Lime-Stabilized Clay*, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 23, pp.309-319.

Sakr, M.A., Shahin, M.A. and Metwally, Y.M, (2008), *Utilization of Lime for Stabilizing Soft Clay Soil of High Organic Content*, Geotechnical Geology Engineering.

Shihata, S. and Baghdadi, Z. (2001), *Long-Term Strength and Durability of Soil Cement*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 13, No. 3, pp. 161-165.

Sivapullaiah, P.V. and Lakshmikantha, H., (2005), *Lime-Stabilised Illite as a Liner*, Ground Improvemzent, Vol 9, No.1, pp.39-45.

Sreekrishnavilasam, A., Rahardja, S., Kmetz, R. and Santagata, M., (2007), *Soil treatment using fresh and landfilled cement kiln dust*, Construction and Building Matérials, Vol. 21, pp.318-327.

Yong, R.N. and Ouhadi, V.R., (2007), *Experimental Study on Instability of Bases on Natural and Lime/Cement-Stabilized Clayey Soils*, Applied Clay Science, Vol. 35, pp. 238-249.

Zhang, Z. and Tao, M. (2008), *Durability of Cement Stabilized Low Plasticity Soils*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 134, No. 2, pp. 203-213.

# *Annexe*



## Compression non Confinée

### ARGILE GRISE

N°	Combinaison	Sol (g)	Chaux(g)	Pouzzolane (g)	Eau (g)	Masse totale Sèche (g)	Masse totale Humide (g)
1	P0L0	<b>1501</b>	-	-	<b>424</b>	<b>1501</b>	<b>1925</b>
2	P0L4	<b>1379</b>	<b>58</b>	-	<b>436</b>	<b>1437</b>	<b>1873</b>
3	P0L8	<b>1290</b>	<b>113</b>	-	<b>436</b>	<b>1403</b>	<b>1839</b>
4	P10L0	<b>1371</b>	-	<b>152</b>	<b>421</b>	<b>1523</b>	<b>1944</b>
5	P20L0	<b>1244</b>	-	<b>312</b>	<b>401</b>	<b>1556</b>	<b>1957</b>
6	P10L4	<b>1244</b>	<b>58</b>	<b>145</b>	<b>388</b>	<b>1447</b>	<b>1835</b>
7	P20L4	<b>1126</b>	<b>59</b>	<b>296</b>	<b>430</b>	<b>1481</b>	<b>1911</b>
8	P10L8	<b>1186</b>	<b>116</b>	<b>145</b>	<b>430</b>	<b>1447</b>	<b>1877</b>
9	P20L8	<b>1066</b>	<b>118</b>	<b>296</b>	<b>416</b>	<b>1480</b>	<b>1896</b>

## Compression non Confinée

### ARGILE ROUGE

N°	Combinaison	Sol (g)	Chaux(g)	Pouzzolane (g)	Eau (g)	Masse totale Sèche (g)	Masse totale Humide (g)
1	P0L0	1833	-	-	279	1833	2112
2	P0L4	1711	71	-	316	1782	2098
3	P0L8	1622	141	-	306	1763	2069
4	P10L0	1674	-	186	266	1860	2126
5	P20L0	1487	-	371	258	1858	2116
6	P10L4	1540	71	179	297	1790	2087
7	P20L4	1352	71	355	334	1778	2112
8	P10L8	1440	140	176	312	1756	2068
9	P20L8	1252	139	347	316	1738	2054

## Shear Strength\_TRIAXIAL

### ARGILE GRISE

Désignation	Sol (g)	Chaux(g)	Pouzzolane (g)	Eau (g)	Masse totale Sèche (g)	Masse totale Humide (g)
<b>POLO</b>	<b>478</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>135</b>	<b>478</b>	<b>613</b>
<b>POL4</b>	<b>439</b>	<b>18</b>	<b>-</b>	<b>139</b>	<b>457</b>	<b>596</b>
<b>POL8</b>	<b>411</b>	<b>36</b>	<b>-</b>	<b>139</b>	<b>447</b>	<b>586</b>
<b>P10L0</b>	<b>436</b>	<b>-</b>	<b>49</b>	<b>134</b>	<b>485</b>	<b>619</b>
<b>P20L0</b>	<b>396</b>	<b>-</b>	<b>99</b>	<b>128</b>	<b>495</b>	<b>623</b>
<b>P10L4</b>	<b>396</b>	<b>18</b>	<b>46</b>	<b>123</b>	<b>460</b>	<b>583</b>
<b>P20L4</b>	<b>358</b>	<b>19</b>	<b>94</b>	<b>137</b>	<b>471</b>	<b>608</b>
<b>P10L8</b>	<b>377</b>	<b>37</b>	<b>46</b>	<b>137</b>	<b>460</b>	<b>597</b>
<b>P20L8</b>	<b>339</b>	<b>38</b>	<b>94</b>	<b>133</b>	<b>471</b>	<b>604</b>
<b>TOTAL</b>	<b>3630</b>	<b>166</b>	<b>428</b>			

## Shear Strength\_TRIAXIAL

### ARGILE ROUGE

Désignation	Sol (g)	Chaux(g)	Pouzzolane (g)	Eau (g)	Masse totale Sèche (g)	Masse totale Humide (g)
P0L0	<b>583</b>	-	-	<b>89</b>	<b>583</b>	<b>672</b>
P0L4	<b>544</b>	<b>23</b>	-	<b>101</b>	<b>567</b>	<b>668</b>
P0L8	<b>516</b>	<b>45</b>	-	<b>97</b>	<b>561</b>	<b>658</b>
P10L0	<b>533</b>	-	<b>59</b>	<b>84</b>	<b>592</b>	<b>676</b>
P20L0	<b>473</b>	-	<b>118</b>	<b>82</b>	<b>591</b>	<b>673</b>
P10L4	<b>490</b>	<b>23</b>	<b>57</b>	<b>95</b>	<b>570</b>	<b>665</b>
P20L4	<b>430</b>	<b>23</b>	<b>113</b>	<b>106</b>	<b>566</b>	<b>672</b>
P10L8	<b>458</b>	<b>45</b>	<b>56</b>	<b>99</b>	<b>559</b>	<b>658</b>
P20L8	<b>398</b>	<b>44</b>	<b>111</b>	<b>101</b>	<b>553</b>	<b>654</b>
TOTAL	<b>4425</b>	<b>203</b>	<b>514</b>			

Dimensions du moule :

**Diamètre : 70 mm**

**Hauteur : 90 mm**