

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur 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:

Mr: **Walid ZOUBIR**

Ingénieur d'état en Génie Civil

Thème

Effet des résidus minéraux sur
l'amélioration des sols fins argileux

Soutenue publiquement le 22/11/2012 devant le jury composé de:

Zamila HARICHANE	Professeur, UHB de Chlef	Présidente
Mohamed GHRICI	Professeur, UHB de Chlef	Encadreur
Khelifa HARICHANE	Maître de Conférences (A), UHB de Chlef	Co-Encadreur
Djilali AMMAR-BOUZID	Maître de Conférences (A), U. de Médéa	Examineur
Noureddine DELLA	Maître de Conférences (A), UHB de Chlef	Examineur

Dédicaces

Ce mémoire est dédiée à toutes celles et ceux qui ont choisi de se consacrer, en génie civil, Une petite minorité d'entre eux a brillamment réussi leur carrière et je suis fier d'avoir des membres de cette "caste" dans mon jury de thèse. Grâce à leurs compétences techniques et informatiques, on a pu réaliser ce travail. Ma pensée va particulièrement à ceux qui n'ont pas complètement abandonné leur carrière académique et qui essayent de trouver de temps en temps quelques jours pour travailler à leur thèse.

Mon père qui a été le premier à m'encourager de passer le concours national de magister, et que c'est grâce à lui que je n'ai pas trouvé de difficultés pour assumer les deux responsabilités en même temps, travail et études en m'offrant tous les moyens matériels et moraux.

Ma mère qui a représenté toujours pour moi une source de tendresse et de soutien moral, c'est grâce à elle que j'ai pu garder toujours l'esprit de travail même très tard la nuit.

Mon frère et mes sœurs qui ont été à coté de moi et qui m'ont encouragés et aidés pour aboutir ce travail.

Mes amis *Badereddine hocine, Khaled Bilek et Zekhemi Toufik*

A Muamera Mesikic et à tous mes collègues au ministère des travaux publics

Remerciements

Je tiens à remercier vivement en premier lieu mon encadreur Monsieur Mohamed GHRICI, Professeur à l'Université de Chlef, pour m'avoir transmis de précieuses connaissances en matière de géomatériaux et pour m'avoir conseillé et guidé avec bienveillance tout au long de mon travail de recherche.

J'adresse un grand merci à mon co-encadreur Dr Khelifa HARICHANE, Maître de Conférences (A) à l'Université de Chlef, qui est à l'origine de ce sujet et qui a collaboré à ce travail, pour ses précieux conseils et encouragements, ainsi que pour son énorme aide et ses conseils tout au long de ce parcours.

Je voudrais remercier également Madame Zamila HARICHANE, Professeur à l'Université de Chlef, d'avoir accepté de présider le jury d'examen

Je tiens à remercier aussi et à exprimer toute ma gratitude au Dr Djilali AMMAR-BOUZID, Maître de Conférences à l'Université de Médéa et Dr Noureddine DELLA, Maître de conférences à l'Université de Chlef, pour avoir accepté d'examiner avec toute l'attention voulue le présent travail.

J'exprime également mes remerciements à Mr. Farid MEZAACHE, Directeur général du laboratoire LCTP d'Alger pour m'avoir accepté au sein de ses laboratoires et son aide précieuse et sa compréhension durant toute la période de la préparation de ma thèse, et à tous les ingénieurs et les techniciens pour leurs aides et compréhensions. Je n'oublierai non plus à exprimer mes remerciements à Melle Amina SAHLI, sous directrice au niveau du ministère de transport qui n'a pas hésité à me conseiller et m'aider à concilier entre le travail et les études.

Merci pour tous ce qui ont collaboré de près où de loin pour me faciliter la tâche afin que je puisse achever mon travail de recherche.

Résumé

L'envasement des retenues Algériennes constitue sans doute la conséquence la plus grave de l'érosion hydrique, et un défi à surmonter pour l'Algérie. Le potentiel hydraulique perd annuellement environ 30 millions de mètres cubes, ce qui est énorme. Pour certaines retenues, la sédimentation annuelle peut représenter des valeurs de l'ordre de 6 % du volume total. Les effets néfastes de ce phénomène sont nombreux, allant de la réduction considérable de la capacité d'emmagasinement et de stockage du barrage, jusqu'à la dégradation nette de la qualité de l'eau du barrage.

Actuellement, les boues de dragage des retenues de barrage constituent un problème majeur avec l'importance de leur volume. Il est nécessaire de gérer ces déchets car ils constituent d'une part une contrainte pour l'environnement (inondation des berges avec nuisance esthétique ou un danger toxique) et d'autre part, un gisement de matières premières où de matériaux à valoriser.

Des travaux antérieurs faits par de nombreux chercheurs sur la stabilisation des sols argileux médiocres avec les ajouts minéraux tels que la chaux, le ciment, les cendres volantes... etc. ont montrés une amélioration significative des propriétés physiques et mécaniques de ces sols.

Notre étude s'inscrit dans le contexte de la valorisation des sédiments de dragage des barrages avec l'utilisation de la chaux, la pouzzolane naturelle (PN), où la combinaison des deux pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques de la vase étudiée. Cette investigation présente l'influence de différentes proportions de mélange de (0-8%) de chaux et de (0-20%) de PN sur les limites de consistance, les paramètres de compactage, la résistance à la compression et la résistance au cisaillement à l'appareil triaxial.

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que l'utilisation de la chaux où la combinaison chaux-pouzzolane ont montrés des effets significatifs sur le développement des propriétés physique et mécaniques de la vase étudiée à court et long terme.

Mots clé: chaux, pouzzolane naturelle, argile, vase, résistance, stabilisation des sols, cure, Plasticité, dragage.

Abstract

The Algerian silting is probably the most serious consequence of erosion in Algeria. The hydraulic potential loses annually about 30 million cubic meters, which is huge. For some reservoirs, sedimentation may represent annual values of about 6% of the total volume. The adverse effects of this are many, ranging from the dramatic reduction in storage capacity and storage dam to the degradation of the water quality of the dam.

Currently, dredged sludge constitutes a major problem with the importance of their volume. It is necessary to manage these wastes because they are on one hand a constraint for the environment, and a deposit of raw materials in other hand.

Previous works done by many researchers on the stabilization of clayey soils with mineral additives such as lime, cement, fly ash ... etc. have shown a significant improvement in the physical and mechanical properties of these soils.

Our study enters in the context of the valorization of dam's dredged sludge from with the use of lime, natural pozzolana (NP), or a combination of both to improve its physical and mechanical properties. This investigation shows the influence of different mixture proportions (0, 4, and 8%) of lime and (0, 10, and 20%) of PN on consistency limits, compaction parameters, the compressive strength and the shear strength in the triaxial apparatus.

According to the results, we conclude that the use of lime or lime-pozzolana combination have shown significant effects on the development of physical and mechanical properties of the dredged sludge studied in short and long term.

Key Words: lime, natural pozzolana, clay, sludge, strength, soil stabilization, dredged.

ملخص

في الجيوتقنية البيئية ، إعادة تـمـين الرواسب المستخرجة من السدود واستخدامها في تحقيق انجاز بعض أعمال الإشغال العمومية هو مسار استكشاف متزايد من قبل الباحثين في السنوات الأخيرة ، وبالتالي فهو يشكل محور الأبحاث في مسانيرة مفهوم التنمية المستدامة. في الجزائر، ظاهرة ترسب التربة تؤثر على جميع السدود حيث يوجد أكثر من 32 مليون م³ من الرواسب سنويا على الجزء السفلي من هذه الحواجز. حيث كان من الأنسب إعادة تـمـين الرواسب المنجرفة.

هذه الدراسة هي جزء من منهجية البحث لإدارة الرواسب المستخرجة من المنطقة الغربية في الجزائر.

والهدف هو تقديم صيغ قادرة على المنافسة اقتصاديا وسهولة التنفيذ في المواقع والتي تسمح باسترداد هذه

المواد في جيوتقنية الطريق. تحقيقا لهذه الغاية، أجرينا سلسلة من التجارب الفيزيائية والميكانيكية على عينات من الرواسب المأخوذة من سد واد الفضة بالشلف.

نعرض في هذه الدراسة تأثير إضافة الكلس و البوزولان الطبيعية على العوامل الجيوتقنية لهذه الرواسب.

على ضوء النتائج المستخلصة، يمكن القول إن إضافة الكلس أو مزجه مع البوزولان الطبيعية إلى هذه الرواسب له تأثير ايجابي في تحسين الخصائص الجيوتقنية لهذه الأخيرة.

الكلمات الرئيسية: الرواسب المستخرجة، تـمـين، هندسة الطرق وتجهيزها، المعالجة، المقاومة، والسلوك الميكانيكية، الكلس، البوزولان.

Table des matières

Dédicaces	
Remerciements	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	

Introduction Générale

1. Généralités	2
2. But de projet.....	2
3. Plan de travail.....	3

Chapitre 1

Caractérisations et conséquences des sols évolutifs

1.1 Introduction.....	5
1.2 Les sédiments.....	6
1.2.1 Composition structurale des sédiments	7
1.2.1.1 Les argiles.....	8
1.2.1.2 Les limons	9
1.2.1.3 Les marness	9
1.3 La vase	10
1.4 Principaux problèmes des sols argileux	12
1.4.1 Phénomène de gonflement.....	12
1.4.2 Tassements.....	12
1.4.3 Glissements	13
1.5 Quelques cas pathologiques	13
1.5.1 Cas des bâtiments	13

1.5.2 Cas des chaussées	14
1.6 Conclusion	14

Chapitre 2

Techniques d'amélioration des sols

2.1 Introduction.....	17
2.2 Technique d'amélioration des sols.....	17
2.3 Méthodes Mécaniques.....	17
2.3.1 Compactage de surface	17
2.3.2 Compactage dynamique.....	18
2.3.3 Vibrocompactage	19
2.3.4. Colonnes ballastées.....	20
2.4 Méthodes hydromécaniques.....	21
2.4.1 Préchargement ou Précompression.....	21
2.4.2 Amélioration des sols par drainage.....	22
2.4.3 Le rabattement.....	23
2.5 Méthodes thermiques	24
2.5.1 Déshydratation.....	24
2.5.2 Amélioration temporaire par congélation	24
2.6 Méthodes chimiques	25
2.6.1 Amélioration des sols par injection.....	25
2.6.2 Amélioration des sols par addition d'ajouts minéraux	27
2.6.2.1 Utilisation de la chaux	27
2.6.2.2 Utilisation du ciment.....	28
2.6.2.3 Utilisation des ajouts cimentaires	30
2.7 Conclusion	32

Chapitre 3

Effets des ajouts minéraux sur les propriétés géotechniques des sols instables

3.1 Introduction.....	34
3.2 Influence de la chaux	34
3.2.1 Effet de la chaux sur la Plasticité.....	34
3.2.2 Effet de la chaux sur le compactage.....	36
3.2.3 Effet de la chaux sur la résistance à la compression.....	37
3.2.4 Effet de la chaux sur la résistance au cisaillement.....	38
3.3 Influence du ciment.....	39
3.3.1 Effet du ciment sur la plasticité.....	39
3.3.2 Effet du ciment sur le compactage	40
3.3.3 Effet du ciment sur la résistance à la compression.....	41
3.3.4 Effet du ciment sur la résistance au cisaillement.....	43
3.4 Influence des ajouts cimentaires	43
3.4.1 Effet des ajouts cimentaires sur la plasticité.....	43
3.4.2 Effet des ajouts cimentaires sur le compactage	46
3.4.3 Effet des ajouts cimentaires sur la résistance à la compression.....	47
3.4.4 Effet des ajouts cimentaires sur la résistance au cisaillement.....	48
3.5 Influence de la combinaison des ajouts minéraux	50
3.5.1 Effet de la combinaison des ajouts minéraux sur la plasticité.....	50
3.5.2 Effet des combinaisons des ajouts minéraux sur le compactage	51
3.5.3 Effet de la combinaison des ajouts cimentaires sur la résistance à la compression	53
3.5.4 Effet des ajouts minéraux sur le cisaillement	54

3.6 Conclusion	56
----------------------	----

Chapitre 4

Etude expérimentale

4.1 Introduction	58
4.2 Matériaux utilisés	58
4.2.1 Le Sol.....	58
4.2.1.1 Propriétés chimiques	59
4.2.1.2 Propriétés physiques et mécaniques.....	59
4.2.2 La chaux.....	60
4.2.3 La pouzzolane naturelle	61
4.3 Méthodes expérimentales.....	62
4.3.1 Préparation des mélanges Sol/ajouts	62
4.3.2 Détermination des limites d'Atterberg	65
4.3.2.1 Détermination de la limite de liquidité	65
4.3.2.2 Détermination de la limite de plasticité	65
4.3.2.3 Détermination de l'indice de plasticité	66
4.3.3 Détermination des caractéristiques de compactages.....	66
4.3.4 Confections des éprouvettes destinées à la résistance à la compression et au cisaillement	68
4.3.4.1 Résistance à la compression.....	73
4.3.4.2 La résistance au cisaillement	74
4.4 Conclusion	76

Chapitre 5

Présentation et interprétation des résultats

5.1 Introduction.....	78
-----------------------	----

5.2 Les limites d'Atterberg	78
5.2.1 Variation de la limite de liquidité	79
5.2.2 Variation de la limite de plasticité.....	80
5.2.3 Variation de l'indice de plasticité	81
5.3 Variation des caractéristiques de compactage	83
5.4 Résistance à la compression.....	85
5.5 Résistance au cisaillement	88
5.6 Paramètres du cisaillement.....	91
5.6.1 Variation de la cohésion.....	92
5.6.2 Variation de l'angle de frottement interne.....	93
5.7 Conclusion	94

Conclusions Générales et Recommandations futures

1. Conclusions générales.....	96
2. Recommandations futures.....	97
Références bibliographiques.....	98

LISTE DES TABLEAUX

1.1– Classification granulométrique [Costet et Sanglera, 1981]	8
1.2– Les plus simples définitions des faciès d’après Allen (cite par Boutin, 2000).....	11
2.1– Composants principaux du ciment Portland [Lawton, 2004]	29
2.2– Composition chimique en pourcentage des cendres volantes et du ciment Portland [Lav et al. 1997]	5
3.1– Influence de la chaux sur les limites d’Atterberg [George et al. 1992].....	35
3.2– Effet de la chaux sur les limites d’Atterberg [Ola 1977]	35
3.3– Effet de la chaux sur le compactage, CBR sur la kaolinite, montmorillonite, quartz [Bell, 1996]	36
3.4– Effet de l’ajout du ciment sur le compactage [Okagbue et al. 2007].....	41
3.5– Effet du ciment sur la résistance à la compression à l’état sec et après immersion [Kenai et al. 2006]	42
3.6– Effet des cendres volantes sur le compactage [Prabakar et al. (2004)].....	46
3.7– Effet des cendres volantes sur les caractéristiques de cisaillement [Senol et al. 2006]	49
3.8– Effet de la combinaison des cendres volantes, du ciment et de la chaux sur le compactage [Hossain et al. (2007)].....	52
3.9– Paramètres de résistance au cisaillement des mélanges vase-chaux.....	55
3.10– Paramètres de résistance au cisaillement des mélanges vase-ciment	55
3.11– Influence des cendres de calcaire sur les paramètres de cisaillement (UU)	55
4.1– Composition chimique de la vase	59
4.2 – Caractéristiques géotechniques de la vase étudiée.....	60
4.3– Propriétés physico-chimiques de la chaux	61
4.4– Composition chimique de la pouzzolane naturelle	62
4.5– Formulation des combinaisons.....	64
4.6– Quantités des sols et des additifs utilisés pour la confection des éprouvettes destinées pour la détermination de la résistance à la compression et au cisaillement	69
5.1– Effet des additifs utilisés sur les limites de consistance de la vase.....	78
5.2– Caractéristiques de compactage Proctor standard.....	83
5.3– Résultats de la résistance à la compression.....	86
5.4– Résultats des paramètres de cisaillement	91

LISTE DES FIGURES

1 .1- Envasement du barrage de BAKHADDA à Tiaret en 2008	5
1 .2- Importance de l'envasement des barrages Algériens:Mardja Sidi Abed Ghilizane [ANB, 2001]	6
1. 3- Traversée de la vallée de la Charente par l'autoroute A10 (Scetauroute, 1986)	10
1. 4- Schéma de la composition simplifiée des sédiments	12
1.5- Déformation structurelle due au gonflement du sol à Al-Khod(Oman)	13
1.6 - Déformation d'une chaussée de sol instable	14
2.1- Compactage de surface	18
2.2- Chantier d'un compactage dynamique profond	19
2.3- Vibrocompactage [Lawton, 2004]	19
2.3- Colonnes ballasté	21
2.4- Principe du préchargement pour le contrôle des tassements	22
2.5- Drain filtre	23
2.6- Principe de réalisation d'une colonne de jet grouting	26
2.7- Amélioration des sols par injection	26
2.8- Chantier de traitement d'un sol à la chaux [Bell, 1978]	28
2.9- Chantier de traitement du sol au ciment	29
3.1- Variation des limites d'Atterberg [Osula 1991]	35
3.2- Effet de la chaux sur la résistance à la compression pour (a) montmorillonite (b) kaolinite [Bell, 1996]	38
3.3- Variation des paramètres de cisaillement des sols traités à la chaux [Osula 1991].....	39
3.4- Effet du ciment sur les limites d'Atterberg [Osula1991].....	40
3.5- Evolution des limites d'Atterberg [Basha et al. 2005]	40
3.6- Effet du ciment sur les caractéristiques de cisaillement [Gay and Schad 2000]	43
3.7- Effet des cendres volantes sur la plasticité de trois sols instables [Parsons and Kneebone 2005]	44
3.8- Influence de la poussière de ciment sur les limites d'Atterberg de l'argile traitée [Peethampanan and Olek 2008].....	45
3.9- Variation de l'indice de plasticité en fonction de la période de cure pour différentes teneurs du rapport vase calcinée/chaux [Lin et al., 2007]	46
3.10- Effet de la chaux sur la résistance à la compression [Bin-Shafique et al. (2009)]	47
3.11- Variation des caractéristiques de cisaillement [Sezer et al. 2006].....	48

3.12- Variation du Déviateur en fonction des déformations pour des mélanges sol-chaux-cendre de vase calcinée [Lin et al. 2007]	49
3.13- Effet d'addition de stabilisateur sur l'indice de plasticité [AL-Rawas et al. 2005]	51
3.14- Effet de la combinaison du ciment avec RHA sur la résistance à la compression [Al Hassan et el. (2007)].....	53
4.1– Dépôt de la vase draguée	55
4.2– Prélèvement des échantillons à étudier	58
4.3– Chaux vive de Saida.....	60
4.4– Pouzzolane naturelle de Beni-Saf	61
4.5– Pouzzolane naturelle défragmentée et broyée.....	62
4. 6– Concasseur (a), Broyeurs à disque (b).....	63
4.7– Vase après concassage (a), vase après broyage et tamisage (b).....	63
4.8– Stockage des échantillons après pesage et malaxage.....	64
4.9- Procédures de préparation des échantillons pour le compactage.....	67
4 .10- Compactage des éprouvettes.....	68
4.11- Préparation des échantillons pour la résistance à la compression et au cisaillement	70
4.12- Système de double pistonnage.....	71
4.13- Confection des éprouvettes par compactage statique	72
4. 14- Procédure d'écrasement des éprouvettes destinées à la résistance à la compression	73
4.15- Procédures de cisaillement à l'appareil triaxial	75
4.16- Organigramme des essais effectués au laboratoire	76
5.1- Effet des additifs sur la limite de liquidité de la vase	79
5. 2- Effet des additifs sur la limite de plasticité de la vase	80
5.3- Effet des additifs sur l'indice de plasticité de la vase	82
5. 4- Variation des caractéristiques de compactage de la vase traité	84
5. 5- Influence des stabilisants sur la résistance à la compression.....	87
5.6- Influence des ajouts minéraux sur la résistance au cisaillement de la vase.....	89
5.7- Influence des ajouts minéraux sur la résistance au cisaillement maximale de la vase	90
5 .8- Evolution de la cohésion de la vase pour différentes teneurs des stabilisants.....	92
5 .9- Evolution de l'angle de frottement interne de la vase pour différentes teneurs des stabilisants.....	93

1. Généralités

Actuellement, les boues de dragage des retenues de barrage constituent un problème majeur avec l'importance de leur volume. Il est nécessaire de gérer ces déchets car ils constituent d'une part une contrainte pour l'environnement (inondation des berges avec nuisance esthétique où un danger toxique) et d'autre part, un gisement de matières premières où de matériaux à valoriser.

Le Barrage d'Oued el fouda est un barrage poids implanté au nord ouest de l'Algérie, envasé à plus de 70%. L'ouvrage victime de son environnement en amont par l'érosion du bassin versant a réagi par l'entraînement en aval des sédiments dragués. La situation écologique est catastrophique. La récupération des matériaux issus des dragages pour un traitement les valorisant est une voie concrète pour transformer les vases de déchets gênants en matières premières potentielles et aussi pour augmenter la durée de vie de ce barrage.

Les méthodes d'amélioration mécaniques et hydromécaniques des sols sont coûteuses et demandent un savoir faire élevé ce qui n'est pas toujours permis dans les pays en voie de développement comme l'Algérie. De plus, les méthodes d'amélioration thermiques des sols restent elles aussi efficaces mais dont l'emploi reste limité en raison de leurs coûts très élevés.

Par ailleurs, la méthode d'amélioration chimique des sols par addition de la chaux, du ciment où d'autres ajouts cimentaires reste la plus utilisée et la moins onéreuse. Cette technique s'est développée très rapidement à travers le monde et qui est encore menée à connaître une importante croissance.

La stabilisation des sols avec les ajouts minéraux et hydrauliques (ciment, chaux, cendre volante ...ect.), est une technique aisée à mettre en oeuvre, économique et efficace. Elle permet surtout d'éviter de lourds travaux de terrassement destinés à rejeter les sols inadéquats et à faire appel à des matériaux d'emprunt de bonne qualité. Elle permet d'améliorer les caractéristiques physiques et chimiques des sols médiocres et les réutiliser, afin d'assurer le bon fonctionnement et la pérennité des ouvrages de génie civil.

2. But du projet

Les objectifs fixés dans le cadre de ce programme sont :

- Etude et caractérisation de la vase (sédiment de dragage)
- Analyse les effets des modifications apportées par la PN, la chaux et leurs combinaisons à la physico-chimie de la vase traitée afin de mieux comprendre les comportements physiques et mécaniques tels que la plasticité, le compactage, la résistance à la compression ainsi que la résistance au cisaillement.

3. Plan de travail

Le mémoire est structuré en 05 chapitres:

Après une introduction générale exposant la problématique et définissant les objectifs et le plan de travail, le premier chapitre présente une caractérisation et conséquences des sols évolutifs.

Le deuxième chapitre présente un panorama sur les différentes méthodes d'amélioration des sols instables.

Le troisième chapitre présente une synthèse bibliographique sur les effets des ajouts cimentaires sur les propriétés géotechniques des mauvais sols à traiter.

Dans le quatrième chapitre, un programme expérimental est établi pour effectuer des essais au laboratoire (physiques et mécaniques) sur la vase à améliorer. Les propriétés étudiées sont la plasticité, le compactage, la résistance à la compression non confinée et la résistance au cisaillement (triaxial). Le but principal de cette partie vise l'analyse des modifications de certaines propriétés des vases lorsqu'elles sont traitées par la pouzzolane naturelle, par la chaux ou par leurs combinaisons.

Le cinquième chapitre consiste en la présentation des résultats et de leurs confrontations avec d'autres travaux de recherche effectués. De plus, ce chapitre discute l'efficacité du traitement par les ajouts cimentaires (pouzzolane naturelle, chaux) sur le comportement de la vase améliorée.

Enfin, en dernier lieu, sont exposées les principales conclusions, les perspectives et les recommandations des futurs travaux à proposer.

1.1. Introduction

Le problème d'envasement cause essentiellement aux forts taux d'érosion des bassins versants dont les particules solides sont drainées directement par des cours d'eaux, elles se déposent au fond de la retenue. Les conséquences de cette forte sédimentation sont extrêmement gênantes.

En Algérie, le taux d'érosion spécifique atteint les valeurs les plus élevées d'Afrique du Nord. Les éléments de quantification concernant les taux et les concentrations d'érosion spécifique, issus des travaux de Demmak et Heusch (1982) (cité par Serbah, 2011) donnent des chiffres allant de 20 à 500 tonnes/an avec une turbidité comprise entre 16 et 28 g/l [Tabet-Aoul, 2000].

Ce phénomène entraîne l'envasement rapide de nombreuses retenues d'eau. Les barrages réservoirs s'ensavent et perdent de la capacité utile et le rejet de la vase dans les cours d'eau pose d'énormes problèmes écologiques et environnementales (Figs. 1.1 et 1.2).



Fig. 1.1- Envasement du barrage de BAKHADDA à Tiaret en 2008.



Fig. 1.2- Importance de l'envasement des barrages Algériens: Mardja Sidi Abed Ghilizane [ANB, 2001] (Cité par Serbah, 2011).

A cet effet l'envasement pose d'énormes problèmes à savoir:

- **la réduction de la capacité:** chaque année le fond vaseux évolue et se consolide avec occupation d'un volume considérable de la retenue;
- **la sécurité de l'ouvrage:** l'indépendamment du problème de la diminution de la capacité du réservoir. L'envasement pose un problème sur la stabilité de l'ouvrage;
- **obturation des organes de vidange:** un autre danger présent par l'envasement est celui du non fonctionnement des organes de vidange de fond;
- **envasement des canaux d'irrigation:** l'irrigation se fait généralement par de l'eau chargée en sédiments, c'est ainsi que ces particules fines vont se déposer dans les canaux réduisant leurs sections mouillées ceci pose le problème de comblement du réseau des canaux d'irrigation se trouvant a l'aval du barrage;
- **dégradation de la qualité de l'eau:** les sédiments véhiculent des produits chimiques (nitrates, sulfates) provenant en particulier des apports en éléments fertilisants pour les cultures, et se déposant dans les réservoirs entraînant ainsi une dégradation de la qualité de l'eau.

1.2 Les sédiments

Les sédiments sont définis comme "un ensemble constitué par la réunion de particules plus ou moins grosses ou de matières précipitées ayant, séparément, subi un certain transport" appelés communément vases. Les sédiments sont des matériaux solides particuliers qui véhiculés par l'eau,

finissent par décanter sur le fond. Ils proviennent de l'érosion du bassin versant, des berges, du ruissellement sur les surfaces imperméabilisées et des rejets de toute nature.

Ils sont constitués de particules de différentes tailles selon s'il s'agit de limons, de sables, de graviers ou de galets. Ces éléments solides se déplacent soit en suspension dans l'eau soit par charriage sur le fond de la rivière. Quand le courant d'eau ralentit suite à un élargissement du cours d'eau ou quand la charge solide excède occasionnellement ce que la capacité de transport permet d'évacuer, les éléments décanter et sédimentent, provoquant l'envasement du cours d'eau. Les sédiments peuvent être d'origines naturelles ou anthropiques.

Les particules d'origines naturelles peuvent être endogènes (constituées principalement de matière organiques provenant des organismes aquatiques: plantes aquatiques, cadavres de micropyles et d'animaux) ou exogènes (particules minérales provenant de l'érosion du bassin versant ou de l'érosion éolienne des sols). Celles ci sont issues du ruissellement des fleuves, des effluents ou de l'atmosphère.

Les particules d'origines anthropiques peuvent être minérales ou organiques (apports de matière en suspension, de matières organiques, de nutriments ou de micropolluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques).

1.2.1 Composition structurale des sédiments

La composition des sédiments est variée. Elle dépend de la constitution des éléments de nature minérale, de l'eau et des matières organiques ainsi que leurs influences sur les propriétés géotechniques du sédiment.

La composition minérale des sédiments diffère selon leur provenance. Les blocs, les cailloux, les graviers et les sables sont des sédiments terrigènes c'est-à-dire, issus de l'érosion des sols, leur nature chimique dépend principalement des terrains érodés. Ils sont classés en fonction de leurs tailles, on distingue ainsi: les argiles et les limons (Tableau 1.1).

La fraction fine, relative aux particules inférieures à 80 μm est la fraction caractéristique de toute vase. Cette fraction engendre généralement des comportements complexes provoqués par les

interactions entre les particules minérales, les interactions de ces particules avec l'eau contenue dans le milieu, les ions présents dans le milieu, et aussi les éléments organiques.

Tableau 1.1- Classification granulométrique [Costet et Sanglera, 1981] (cité par Serbah, 2011)

Dénomination	Diamètre (mm)
Argile	$d < 0,002$
Limon	$0,002 < d < 0,063$
Sable	$0,063 < d < 2$
Gravier	$2 < d < 20$
Cailoux	$20 < d$

La taille des cations va aussi jouer son rôle, car plus ils seront de grosse taille, plus ils auront de difficultés à s'insérer entre les feuillets, et donc à jouer un rôle dans le comportement des matériaux fins [Dubois, 2006].

1.2.1.1 Les argiles

Les argiles sont des roches sédimentaires à grains fins, de taille inférieure à 5 μm , composée pour une large part de minéraux spécifiques, silicates en général, d'aluminiums plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée qui explique leur plasticité, ou bien une structure fibreuse qui explique leurs qualités d'absorption. Elles absorbent l'eau et forment une pâte imperméable (perméabilité inférieure à 0,2 mm/h), appelée couramment terre glaise, colorée par des oxydes de fer en ocre, rouge, vert.

Les argiles peuvent être gonflantes, notamment celles de la famille des Montmorillonites lorsqu'elles absorbent l'eau et, au contraire, diminuer de volume sous l'effet de la sécheresse, allant jusqu'à fissurer en surface et même sur une profondeur de 2 m à 4 m. Par ailleurs, sous l'effet d'une charge, par exemple celle d'une construction, une partie de l'eau absorbée contenue entre les grains d'argile est chassée, ce qui a pour conséquence de provoquer un tassement sensible du sol.

Les argiles représentent en général une assise acceptable à médiocre lorsqu'elles sont recouvertes par d'autres couches de terrain. En revanche, elles sont dangereuses lorsqu'elles affleurent au niveau du sol, du fait de leur instabilité, se traduisant par des variations de volume et un fluage dans les terrains en pente. D'autres types de sédiments à grains fins contiennent des argiles telles que les marnes et le loess.

1.2.1.2 Les limons

Les limons constitués de silt, de loess, possèdent un squelette siliceux à silicocalcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles, la teneur en argile est variable. Ils sont peu perméables et constituent des terres de culture fertiles. Leur assise est médiocre et sont donc à éviter pour les fondations.

1.2.1.3 Les marnes

Les marnes sont à la fois argileuses et calcaires. On considère, selon leur composition, trois grandes catégories:

- les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35 % de carbonate de calcium;
- les marnes proprement dites;
- les calcaires marneux avec des taux respectivement de 35 à 65 % et 65 à 95 %.

Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de fissurer sur une certaine profondeur en cas de sécheresse. Les marnes ont souvent fait l'objet d'exploitation en carrières à ciel ouvert ou en souterrain pour donner respectivement: de la chaux avec les marnes argileuses, de la chaux hydraulique avec les marnes proprement dites et du ciment avec les marnes calcaires ou calcaires marneux. Elles ont également été utilisées pour amender les terres des exploitations agricoles. D'une façon générale, les marnes sont une assise de fondations bonne à moyenne en l'absence de gypse. En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse, avec risque de formation de fontis.

Les marnes sont des roches relativement tendres, elles subissent une géodynamique très active à leur surface et leur fragilité les rend très vulnérables aux aléas de la nature et des hommes. Une combinaison de facteurs naturels et anthropiques a provoqué une érosion hydrique intense qui s'est manifestée par une dégradation des sols et une diminution importante de leur productivité.

On peut conclure que l'évolution des sols fins est due à la présence des minéraux argileux dans les sols tels que: les marnes, les argiles...etc, qui manifestent une grande sensibilité à l'air (retrait, fissuration désagrégation progressive des couche de sol) et une forte affinité pour l'eau (avec les conséquences classiques de l'humidification: gonflement, déconsolidation, perte des caractéristiques mécaniques).

1.3 La vase

Le nom de vase (mot emprunté aux Néerlandais) est la désignation d'une large famille de sédiments fins, argileux, plus ou moins organiques, pouvant atteindre des teneurs en eau importantes. Elles contiennent une phase minérale dont la granulométrie s'étend des sables, aux argiles et aux colloïdes, une phase organique et une phase liquide. La vase peut se présenter aussi bien à l'état de suspension (crème de vase) que de sol cohérent (sédiment cohésif) présentant alors un caractère plastique, compressible et thixotropique. Elle contient souvent l'habitat d'une faune riche et diversifiée (vers, mollusques, bactéries). [Delphine, H., Michel A., (2002)].

Les vases sont des sols contenant plus de 90% de particules inférieures à 0,2mm, dont la matière organique (M.O) est comprise entre 2% et 10%. Elles sont composées de sable, limon, argile et de colloïdes organiques (Tableau 1.2). Elles sont en particulier très abondantes dans les estuaires. Elles sont fréquemment thixotropes. La Figure (1.3) donne un exemple de passage de remblai de l'autoroute A10 sur une épaisseur importante de la vase.

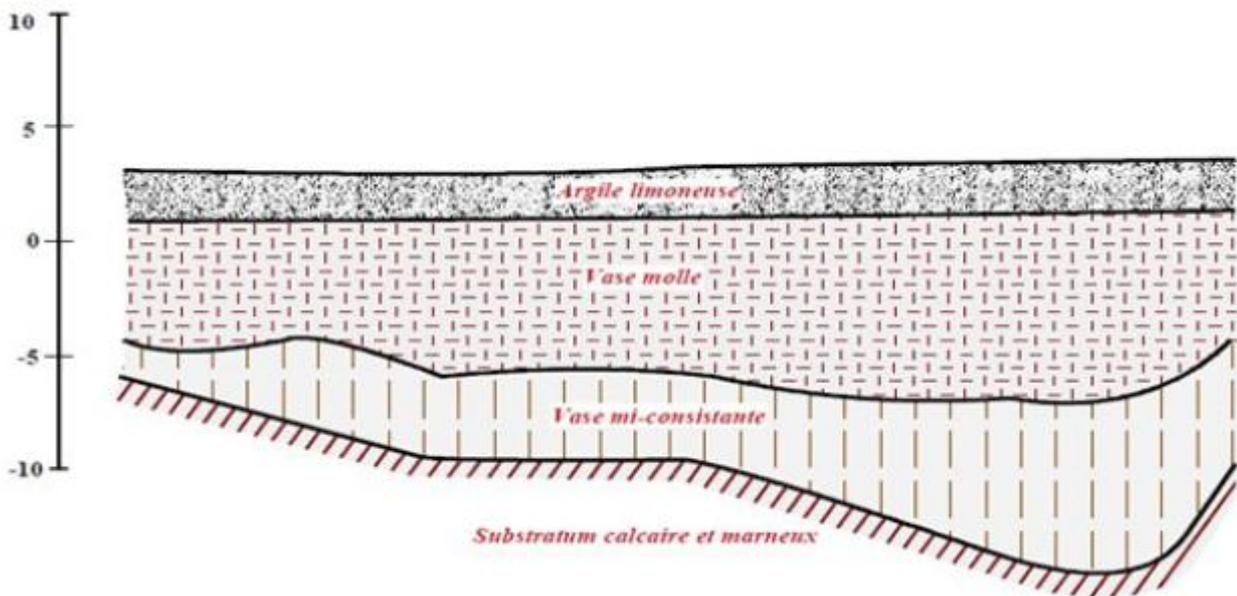


Fig. 1.3- Traversée de la vallée de la Charente par l'autoroute A10

[Scetauroute, 1986] (Cité par Serbah, 2011)

Tableau 1.2:-Les plus simples définitions des faciès d'après Allen (Cité par Boutouil, 2000)

Dénomination	Caractéristiques
Sable	Plus de 80 % d'éléments supérieurs à 50 µm
Sable vaseux	De 20 à 80 % d'éléments supérieurs à 50µm
Vase	Plus de 80 % d'éléments inférieurs à 50 µm

Les sédiments se composent d'une fraction solide et d'une fraction liquide (eau) qui est intimement liées les unes aux autres. Les proportions respectives de chacune de ces fractions sont variables d'un milieu à un autre mais demeurent dans une fourchette, qui par expérience, peut être estimée si l'on considère des matériaux de type vases. [Delphine, H., Michel A., (2002)]. Il y a quatre éléments principaux constitutifs les vases:

1. la matrice minérale (quartz, feldspaths ou carbonates),
2. La fraction argileuse (kaolinite, illite ou smectite),
3. la fraction organique (débris végétaux, micro-organismes, acide fulvique et humiques),
4. une certaine quantité d'eau, présente sous différentes formes.

La distribution granulométrique d'un sédiment constitue son empreinte physique, elle caractérise la taille des particules, constituant la phase solide du matériau. Pour l'obtenir, il est procédé à un tamisage mécanique. En dessous d'une taille de 20 µm, il est nécessaire de recourir à des mesures au laser, qui utilisent le principe de la diffraction de la lumière cohérente sur un écoulement d'une suspension très diluée de fines. Il est communément considéré que les "Vases" correspondent à la fraction inférieure à 63 µm.

Le schéma ci-dessous retrace les grands ensembles de la composition des sédiments portuaires vis-à-vis notamment de leur siccité ou de leur granulométrie (Fig.1.4) [N.Proulhac, Ker Lann 2006].

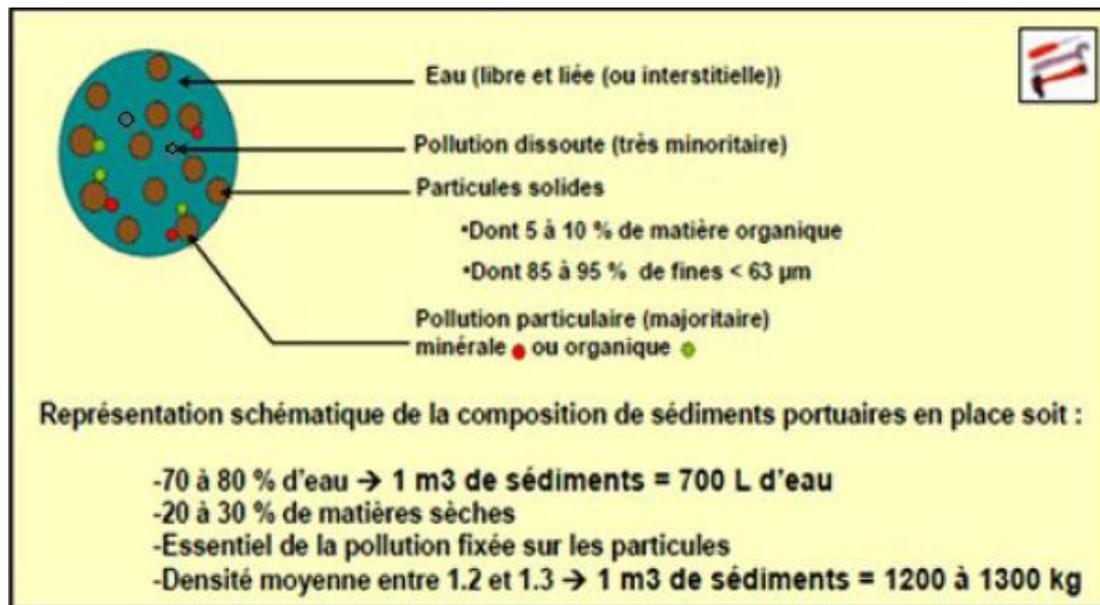


Fig. 1.4- Schéma de la composition simplifiée des sédiments. [N.Proulhac, Ker Lann 2006]

1.4 Principaux problèmes des sols argileux

Dans de nombreux pays du monde, le gonflement est à l'origine de fréquents désordres des ouvrages légers. Aux Etats-Unis d'Amérique les dommages provoqués par le gonflement des sols présentent un coût supérieur à celui de toutes les catastrophes naturelles. En Algérie, l'urbanisation de certains quartiers des villes et la construction des routes se heurtent aux problèmes que posent les phénomènes de gonflement, de tassement et de glissement.

1.4.1 Phénomène de gonflement

Ce phénomène est lié au changement d'humidité de certains sols très argileux (Montmorillonites, saponites et autres nontronites) ou tourbeux qui sont capables de fixer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse.

Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes et varient en fonction de leur teneur en eau), la variation de volume d'un terrain est consécutive à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle) et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'élément jointifs).

1.4.2 Tassements

Il s'agit de la diminution de volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes, argiles) sous l'effet de charges appliquées et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation.

1.4.3 Glissements

Ces mouvements, au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins continu d'un versant instable de montagne ou de colline. Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites.

La masse de matériaux meubles ou rocheux fracturés se détache suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes, visibles ou non, et de formes diverses.

1.5 Quelques cas pathologiques

Les désordres provoqués par le gonflement affectent généralement les constructions apportant de faible contrainte sur le sol support. La pathologie dépend du type d'ouvrage. Les phénomènes de retrait et de gonflement de certains sols argileux ont été observés depuis longtemps dans les pays à climat aride et semi-aride où ils sont à l'origine de nombreux dégâts causés tant aux bâtiments qu'aux réseaux et voiries.

1.5.1 Cas des bâtiments

Pour les structures de génie civil on peut observer les désordres suivants:

- fissuration des structures,
- distorsion des ouvertures,
- rupture des canalisations,
- décollement des bâtiments.

La figure 1.5 représente des fissures au niveau d'une structure légère de génie civil :



Fig. 1.5- Déformation structurelle due au gonflement du sol à Al-Khod(Oman) [Al rawas, 2005].

1.5.2 Cas des chaussées

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Ce phénomène est causé par des variations de la teneur en eau du sous sol. Il peut être attribué au climat et à la surcharge. Les désordres subis par la chaussée se résument généralement à des fissures qui apparaissent à la fin de la saison sèche sur les accotements de la chaussée, en saison de pluie ces fissures permettent à l'eau de s'infiltrer plus facilement entraînant la saturation de ces zones et par conséquent leur gonflement, engendrant ainsi l'apparition de déformation à la surface de la chaussée, puis l'apparition de fissures longitudinales qui peuvent être assimilées à la chute de la portance dans les zones latérales de la chaussée entraînant l'affaissement des bords, ces phénomènes sont accélérés par le flux routier. Ces désordres s'amplifient avec le début de la saison sèche (Fig. 1.6).



Fig. 1.6- Déformation d'une chaussée de sol instable. [Milburn et al.,(2004)].

1.7 Conclusion

Les désordres dans les ouvrages de génie civil tels les remblais routiers et les chaussées, les fondations et les structures, les canaux et les conduites se rencontrent ainsi couramment dans les terrains gonflants, les dégâts produits chaque année à travers le monde ont été évalués en cent mille millions de dollars. Ces dégâts surpassent ceux produits par l'effet combiné des tremblements de terre, ouragans et glissements de terre. Pour éviter le problème des sols gonflants, on dispose de différentes solutions parmi lesquelles on peut relever:

- le changement de site;

- le remplacement des sols gonflants par un matériau non gonflant;
- la protection du sol gonflant vis à vis des accès d'eau;
- la prévention du gonflement par un chargement approprié, et ainsi le calcul des structures de manière à ce qu'elles puissent supporter les pressions de gonflement susceptibles de se développer;
- la possibilité de variation de volume sous des conditions de chargement déterminé, les structures étant conçues alors, pour suivre les déplacements sans dommages;
- La mise en place de fondations profondes, développant leur capacité portante au delà de la zone active;
- et enfin la stabilisation du sol gonflant par un traitement approprié.

Cette dernière solution est étudiée par un grand nombre de chercheurs. Elle est présentée en détails dans le chapitre trois, en mentionnant les résultats trouvés dans le domaine.

2.1 Introduction

Le traitement des sols est souvent opéré pour augmenter leur résistance, pour réduire ou augmenter leur perméabilité ainsi que pour diminuer leur compressibilité. Il est, aussi utilisé pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau comme dans le cas des sols expansifs.

Concernant ce traitement on peut spécifier:

- **l'amélioration des sols:** elle 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. Ceci se traduit par une meilleure praticabilité pour le trafic de chantier;
- **la stabilisation des sols:** elle a pour objectif la réalisation des couches de fondations de qualité dont les caractéristiques mécaniques ont été considérablement rehaussées, ce qui donne une plus grande portance et une meilleure distribution des charges. En outre, ces couches acquièrent ainsi une meilleure résistance à l'érosion et au gel, augmentant dès lors sensiblement leur durabilité. La stabilisation exige des pourcentages de 4 à 6 % de ciment ou d'une combinaison de ciment avec d'autres liants, tels que la chaux, les laitiers de haut-fourneau ou l'émulsion de bitume.

2.2 Technique d'amélioration des sols

Une large variété des méthodes d'amélioration et de stabilisation des mauvais sols est actuellement utilisée et les techniques les plus appropriées sont d'habitude classées comme les méthodes mécaniques, hydromécaniques, thermiques et chimiques. Les méthodes thermiques concernent surtout la stabilisation par congélation ou par chauffage. Ce sont donc des méthodes d'amélioration temporaires, par contre les méthodes mécaniques et chimiques sont permanentes. Le choix de l'une de ces méthodes dépend de plusieurs paramètres tels que, les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

2.3 Méthodes Mécaniques

2.3.1 Compactage de surface

Il peut être exécuté sur des sols excavés ou des remblais placés en des couches minces (Fig.2.1). 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 montrent qu'un compactage approprié des sols réalisé sur des remblais ne tasseront pas ou tasseront très peu. Il y a

donc un optimum de compactage à réaliser, c'est cet optimum que laboratoire se propose de déterminer.

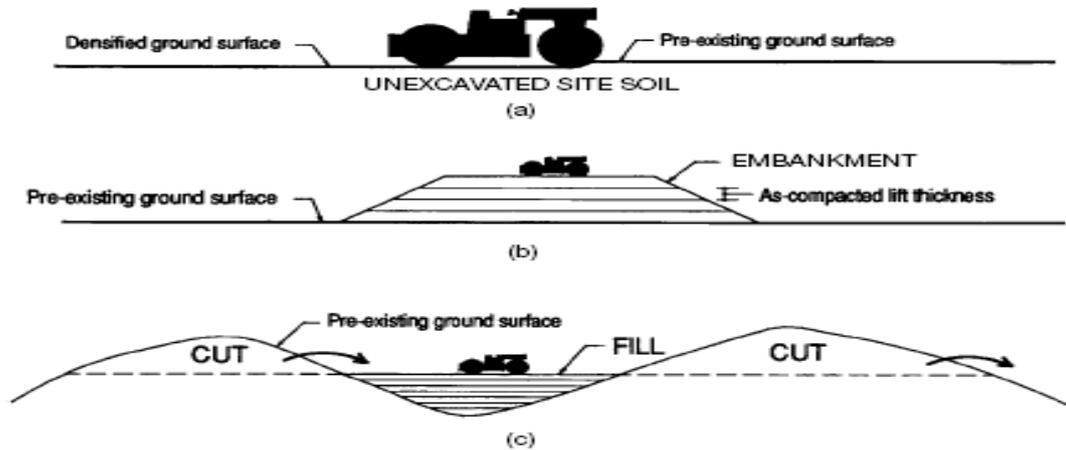


Fig. 2.1- Compactage de surface [Bell, 1978]

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.

2.3.2 Compactage dynamique

Le compactage de surface peut être utilisé pour une profondeur maximale de 3m. Au delà de cette profondeur un autre type de compactage existe connu sous le nom de compactage dynamique profond. C'est un procédé qui consiste à pilonner le sol en surface avec une dame en chute libre (Lawton, 2004). L'énergie transmise par chaque impact pénètre dans le sol et produit une déstructuration. Au bout de quelques jours ou semaines, une restructuration s'opère qui aboutit à des caractéristiques de portance améliorées (Fig. 2.2).



Fig. 2.2- Chantier d'un compactage dynamique profond [Lawton, 2004].

Le procédé s'applique aux sols sablo-graveleux, et aux matériaux argilo-limoneux saturés à condition qu'il y ait présence d'air occlus. Son emploi peut être intéressant pour consolider des couches sous l'eau.

2.3.3 Vibrocompactage

Ce procédé consiste à provoquer une vibration entretenue dans le sol granulaire au moyen d'une aiguille vibrante. La densification du matériau provoquée par la vibration de l'aiguille, se traduit donc par l'affaissement du sol autour du vibreur (Lawton, 2004). L'application de cette méthode contribue à augmenter la capacité de portance, la réduction du tassement, l'augmentation de la résistance au cisaillement des sols de fondation, des remblais de barrages et enfin la réduction du potentiel de liquéfaction des sables lâches saturés et des limons (Fig. 2.3).

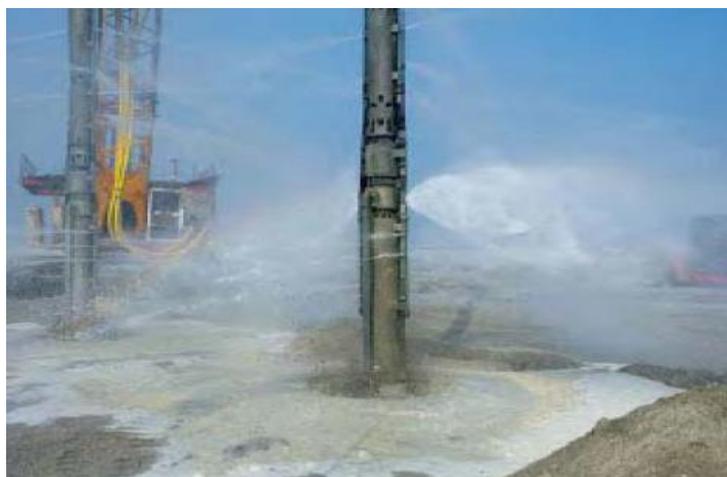


Fig. 2.3- Vibrocompactage [Lawton, 2004].

Ce procédé de vibrocompactage est appelé aussi la vibroflotation. Cette méthode trouve son application dans les sols granulaires particulièrement les sables propres et les sables silteux avec une teneur en fine inférieure à 20%. Les vibrations engendrent un phénomène localisé de liquéfaction sous l'effet des surpressions interstitielles qui met les grains du sol dans un état liquéfié. Les grains se réarrangent en un état plus dense.

2.3.4. 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 que 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 (Fig. 2.4).

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.

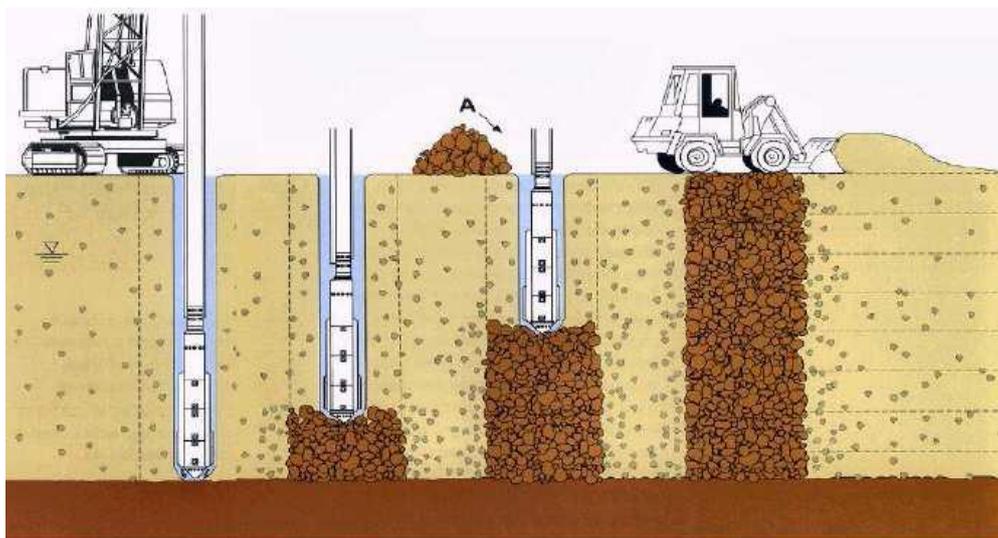


Fig. 2.4- Colonnes ballasté [Natacha, S., 2005].

2.4 Méthodes hydromécaniques

2.4.1 Préchargement ou Précompression

La précompression nécessite la compression du sol sous une pression appliquée avant l'application des charges. Les effets bénéfiques de ce procédé incluent une augmentation considérable de la capacité de portance par la réduction des pressions interstitielles excessives et de plus la réduction de la compressibilité des sols mous par l'accélération de la consolidation. Le processus est défini comme l'application sur le terrain d'une charge égale à la charge définitive augmentée éventuellement d'une surcharge qui va produire un développement rapide des tassements de consolidation primaire et accélérer l'apparition et le développement des tassements de compression secondaire. Ceci peut rendre donc le sol traité constructible sans se redouter à moyen terme ou à long terme des tassements absolus ou différentiels importants (Bell, 1978). Pratiquement, l'application de la surcharge sur le terrain à améliorer peut se faire par le biais de deux techniques à savoir l'édification sur le site d'un remblai ce qui va augmenter la contrainte totale appliquée à la surface de la couche compressible. A la fin du processus de consolidation et quand les pressions interstitielles excessives sont dissipées alors la charge apportée par le remblai sera supportée par le squelette du sol qui se déforme sur toute son épaisseur (Fig. 2.5).

L'autre technique consiste à utiliser la pression atmosphérique en appliquant un vide sous une membrane étanche posée à la surface du sol. Dans ce cas on va assister à une diminution de la distribution des pressions interstitielles dans le massif du sol traité.

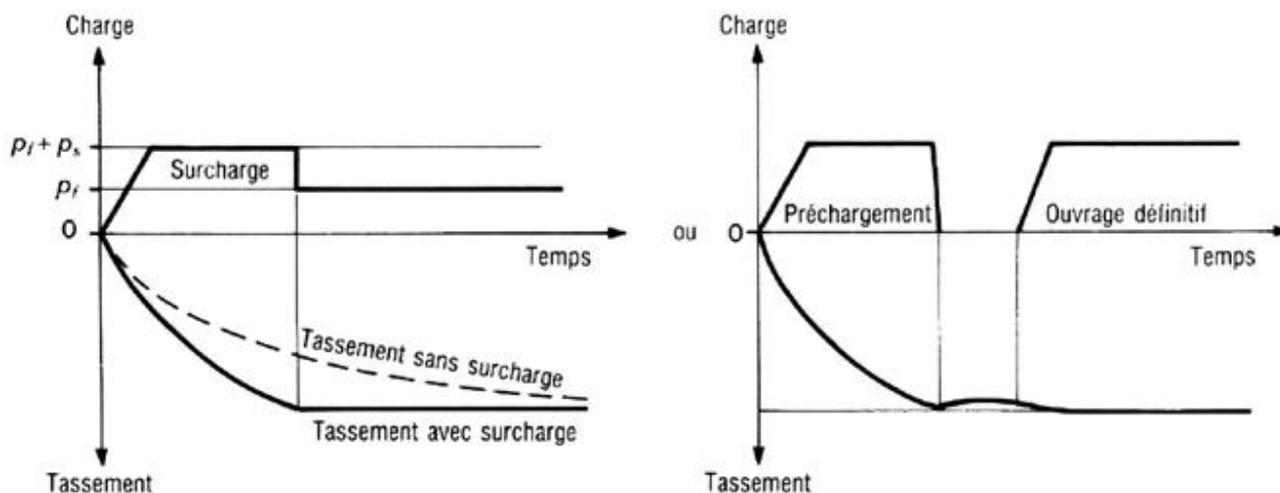


Fig. 2.5- Principe du préchargement pour le contrôle des tassements [Bell, 1978]

Ce procédé de préchargement convient pratiquement pour tous les types de sols. Par ailleurs, la perméabilité élevée des sols grenus permet d'obtenir l'amélioration souhaitée dans des délais beaucoup plus brefs. Le contrôle de la performance du procédé de précompression in situ doit être aussi effectué en utilisant diverses méthodes. Les déformations du sol (tassements) et les pressions de l'eau interstitielle dans le massif du sol fin saturé doivent être déterminées.

2.4.2 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.

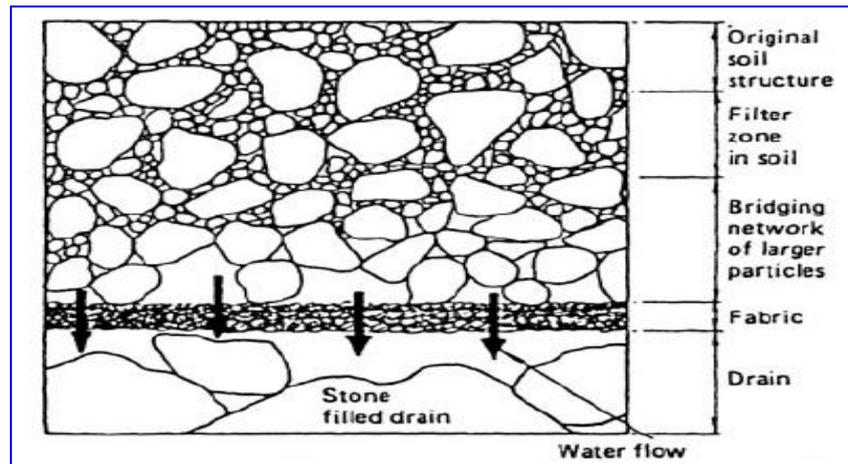


Fig. 2.6- Drain filtre [Bell, 1978].

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.

2.4.3 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 sur creusé 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.

2.5 Méthodes thermiques

2.5.1 Déshydratation

La déshydratation par la chaleur est très rarement appliquée en géotechnique, elle permet de durcir certaines argiles par exemple. En pratique, la méthode consiste à brûler un carburant dans un forage en utilisant un forage voisin communiquant avec le premier et servant de cheminée de tirage.

2.5.2 Amélioration temporaire par congélation

Pour les sols fins : 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.

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.

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.

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.

2.6 Méthodes chimiques

2.6.1 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.

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 /ou le simple arrêt de leur évolution est suffisant.

Le jet grouting (Fig. 2.7) 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 (Fig. 2.8). 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.

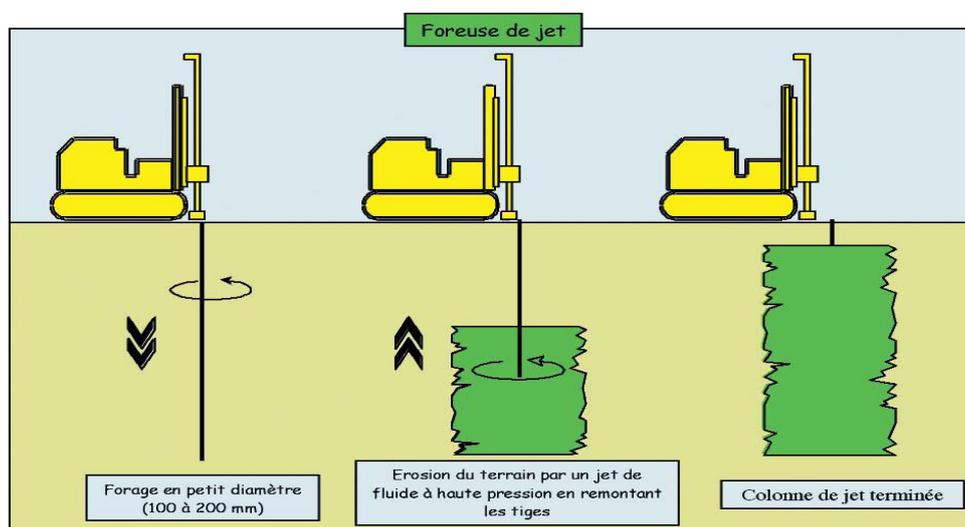


Fig. 2.7- Principe de réalisation d'une colonne de jet grouting [Natacha, S., 2005].

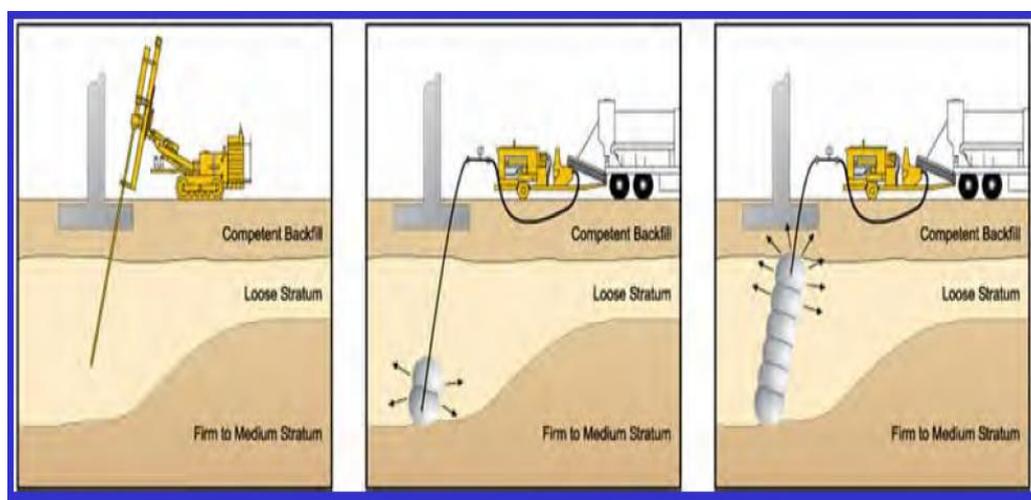


Fig. 2.8- Amélioration des sols par injection [Natacha, S., 2005].

2.6.2 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, les 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),

2.6.2.1 Utilisation de la chaux

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de la chaux pour stabiliser les argiles a connu beaucoup de succès. En effet, plusieurs études ont démontré que les propriétés mécaniques d'un sol traité à la chaux peuvent être modifiées de façon permanente. Dans certains cas par exemple, un sol stabilisé à la chaux fournit une performance structurelle équivalente à celle d'une fondation en gravier naturel ou concassé (Bell, 1978). L'utilisation de la chaux se fait par l'addition des produits calcaires calcinés de monoxyde de calcium (chaux vive, CaO) ou d'hydroxyde de calcium (chaux hydratée, Ca(OH)_2).

Généralement, la chaux vive est plus efficace que la chaux hydratée pour l'amélioration des sols. La chaux est plus efficace aux sols argileux que les sols granulaires. Par conséquent, les sols présentant des indices de plasticité au delà de 10 sont les plus ciblés par ce procédé (Fig. 2.9).



(a) Epannage

(b) Malaxage

Fig. 2.9- Chantier de traitement d'un sol à la chaux [Bell, 1978].

Par ailleurs, la réussite de la stabilisation à la chaux d'un sol nécessite d'une part une source de silice et/ou d'alumine et d'autre part des particules de petites dimensions susceptibles à l'échange cationique ainsi que le temps. Le sable, par exemple, possède une source de silice mais ne réagit pas favorablement avec la chaux ceci est due aux dimensions larges de ses particules et de plus le manque de la capacité d'échange cationique. De même les sols organiques et les argiles riches en sulfates ne peuvent pas réagir favorablement avec la chaux. Une série de paramètres doit être prise en compte pour améliorer davantage l'efficacité de la stabilisation à la chaux à savoir le type et le pourcentage de la chaux, l'énergie de compactage, la teneur en eau et le temps de cure.

2.6.2.2 Utilisation du ciment

Le ciment Portland est un autre produit envisageable pour la stabilisation de certaines catégories de sols utilisés pour les routes et les revêtements de pistes d'aéroports. Alors qu'il existe plusieurs similarités entre la chaux et le ciment Portland comme stabilisants, le ciment Portland fournit en plus la chaux et la source de silice.

Le ciment Portland est un matériau fin formé à partir d'un mélange de clinker et de gypse. Le clinker est composé principalement de quatre phases d'oxydes ; deux phases de silice calcique et deux phases d'alumine calcique. Les deux phases de silice calcique sont les plus importantes dans le

processus de stabilisation. Lors de l'hydratation ces deux phases produisent l'hydroxyde de calcium et l'hydrate de silice calcique. Le premier composant fournit l'apport en calcium nécessaire à l'échange cationique, à la floculation de l'argile et à son agglomération tandis que le deuxième composant quant à lui apporte la résistance ainsi que la structure au sol traité (Tableau 2.1).

Tableau 2.1- Composants principaux du ciment Portland [Lawton, 2004].

Nom des composants	Formule chimique	Abréviation
Silicate tri calcium	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C3S
Silicate di calcium	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C2S
Aluminate tricalcium	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C3A
Terra-calcium alumino-ferrite	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{FeO}_3$	C4AF

Lorsque le ciment Portland est mélangé à l'eau, l'initiation de l'hydratation occasionne une augmentation rapide de la concentration de calcium dans le sol. A mesure que les ions de calcium sont libérés, ils deviennent disponibles pour stabiliser l'argile (Fig. 2.10).



Fig. 2.10- Chantier de traitement du sol au ciment [Bell,1978].

Comme indiqué ci-dessus, le processus de stabilisation initié par l'ajout du ciment Portland à l'argile engendre quatre étapes distinctes à savoir l'échange cationique, la floculation et l'agglomération de l'argile, l'hydratation par cimentation et les réactions pouzzolaniques.

Le ciment Portland possède donc des propriétés lui permettant d'initier une étape de plus que la chaux soit celle de l'hydratation par cimentation. Les sols possédant un faible pourcentage d'argile, donc moins de silice et d'alumine ont besoin d'un apport de ciment si les réactions pouzzolaniques

sont désirées. Par conséquent, le ciment Portland peut généralement être utilisé dans les mêmes types de sols que la chaux.

2.6.2.3 Utilisation des ajouts cimentaires

Parmi les ajouts cimentaires les plus utilisés il y a les cendres volantes, le laitier, la fumée de silice, les cendres volcaniques, et le calcaire. Les coûts élevés de la chaux et du ciment ont poussé les chercheurs à trouver d'autres types de liants dans le but d'améliorer les sols instables à faible coût tout en respectant l'environnement. Les cendres volantes sont intimement liées quant à leur processus de stabilisation. Elles sont souvent utilisées conjointement avec la chaux dans les travaux de stabilisation.

Deux types de cendres volantes sont produits par la combustion du charbon à savoir la cendre volante et la cendre basse. Les cendres basses relativement grossières se récupèrent en bas de la fournaise tandis que les cendres volantes sont séparées des gaz d'échappement par un dépoussiéreur électrostatique. Les cendres volantes ont une composition très semblable à celle du ciment.

Comme les cendres volcaniques, elles présentent des propriétés pouzzolaniques car elles fixent lentement la chaux présente dans le mélange pour donner naissance à des composés stables ayant des propriétés hydrauliques. Elles peuvent être siliceuses ou calciques. Selon leur teneur en chaux libre, les cendres volantes se comportent différemment en présence d'eau. Il existe deux classes de cendre volante à savoir la cendre silico-alumineuse (classe F) et la cendre sulfo-calcique (classe C). Le tableau 2.2 indique la composition chimique des deux classes en comparaison avec le ciment Portland (Lav et al., 1997).

Tableau 2.2- Composition chimique en pourcentage des cendres volantes et du ciment Portland [Lav et al., 1997].

Composés chimiques	Classe F Silico-alumineuse (%)	Classe C Sulfo-calcique (%)	Ciment Portland (%)
SiO ₂	55	29	23
Al ₂ O ₃	26	13	4
Fe ₂ O ₃	7	9	4
CaO	9	41	65
MgO	2	1	2
SO ₃	1	7	2

Le laitier est un sous produit de la fabrication de la fonte. Il renferme principalement de la chaux, de la silice et de l'alumine. Le laitier est le constituant primaire le plus utilisé dans la fabrication des liants hydrauliques routiers. Les liants à base de laitier sont excellents pour le traitement des sols et pour la stabilisation des matériaux de remblai.

La plupart des sols peuvent être traités avec un mélange chaux-cendres volantes. L'approche générale du dosage du mélange consiste à ajouter suffisamment de cendres volantes afin de bien remplir les vides du mélange ainsi que d'y apporter une densité maximale.

L'étape suivante consiste à ajouter suffisamment de chaux permettant de favoriser les réactions pouzzolaniques entre la chaux et les pouzzolanes disponibles dans les cendres volantes.

L'addition des cendres volantes à l'argile réduit considérablement sa perméabilité. Par conséquent, tout dépend du type de sol, l'addition de cendres volantes et de chaux peut donner de meilleurs résultats qu'avec la chaux seule. Ainsi, un mélange de cendres volantes et de chaux semble avoir les propriétés d'un liant hydraulique, soit d'être capable de durcir non seulement dans l'air mais également dans l'eau. Avec un bon dosage, l'addition des cendres volantes peut augmenter les propriétés mécaniques d'un sol notamment sa résistance au cisaillement.

En conséquence, grâce à leurs propriétés pouzzolaniques, la chaux et les cendres volantes peuvent continuer à augmenter la résistance mécanique d'un sol pendant plusieurs années. Il est important de noter que les cendres volantes peuvent se comporter différemment en raison de leur teneur en chaux. Par exemple, les cendres de classe F possèdent peu de chaux dans leur composition chimique et ne peuvent ainsi agir comme un liant hydraulique à elles seules. Elles ont toutefois les caractéristiques de la pouzzolane qui les rapprochent des cendres volcaniques. Il est donc nécessaire de leur ajouter de la chaux pour qu'elles fonctionnent. Contrairement aux cendres volantes de classe F, les cendres de classe C possèdent à elles seules les propriétés d'un liant hydraulique vu qu'elles sont riches en chaux. Elles sont donc des cendres volantes hydrauliques. Les basses températures et les teneurs élevées de la matière organique et des sulfates peuvent affecter d'une façon notable les réactions de cimentation des sols traités aux cendres volantes. La formation de l'ettringite est aussi un problème potentiel quand il ya utilisation des cendres volantes à forte teneur en sulfates.

2.7 Conclusion

Les facteurs qui interviennent dans le choix entre les différentes techniques d'amélioration sont assez divers tels que les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la destination de l'ouvrage à implanter sur ce sol, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

Les méthodes d'amélioration mécaniques et hydromécaniques des sols sont coûteuses et demandent un savoir faire élevé ce qui n'est toujours permis dans les pays en voie de développement comme l'Algérie. De plus, les méthodes d'amélioration thermiques des sols restent elles aussi efficaces mais dont l'emploi reste limité en raison de leurs coûts très élevés.

Par ailleurs, la méthode d'amélioration chimique des sols par addition de la chaux, du ciment ou d'autres ajouts cimentaires reste la plus utilisée et la moins onéreuse. Cette technique s'est développée très rapidement à travers le monde et qui est encore menée à connaître une importante croissance. Aisée à mettre en œuvre, économique et efficace, elle permet surtout d'éviter de lourds travaux de terrassement destinés à rejeter les sols inadéquats et à faire appel à des matériaux d'emprunt de bonne qualité. Les ajouts cimentaires sont produits en Algérie en grandes quantités et à faible coût qui laissent prévoir que cette technique présente des considérations économiques acceptables.

Dans le chapitre suivant il est exposé une analyse des travaux effectués par des chercheurs concernant l'effet de la chaux, du ciment et des différents ajouts cimentaires ainsi que leurs combinaisons sur les différentes propriétés géotechniques des sols instables.

3.1 Introduction

Les caractéristiques médiocres d'un sol ont un impact majeur sur les ouvrages de génie civil et leurs durée de vie. Ces sols peuvent être améliorés avec des additives chimiques et/ou cimentaires. On peut ajouter ces additives aux divers types de sols pour améliorer les caractéristiques géotechniques, facilité de la mise en œuvre et de compactage, la portance et la résistance au poinçonnement.

L'efficacité de ces additives dépend de la nature du sol traité et la quantité d'additive ajoutée. Les additions couramment utilisées sont le ciment, la chaux et les sous produits (ajouts minéraux) sont considérés comme une pouzzolane artificielle.

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.

3.2 Influence de la chaux

3.2.1 Effet de la chaux sur la Plasticité

En général, 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, la texture et les effets des forces d'interaction extérieures.

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 en réduisant l'indice de plasticité qui se traduit par une augmentation de la limite de plasticité s'accompagnant à 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. [Cité par Mellal, 2010]

Les travaux effectués par George et al. (1992) ont permis d'observer que lorsqu'un sol est traité avec la chaux il y a une diminution notable de l'indice de plasticité. De plus, la limite de liquidité présente une augmentation peu marquée que celle de la limite de plasticité (Tableau 3.1).

Tableau 3.1- Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg [George et al., 1992].

Type de sol	Chaux (%)	Wl (%)	Wp (%)	Ip (%)
Sol A	0	55.0	30.0	25.0
	6	56.1	39.3	16.8
Sol B	0	26.5	19.4	7.1
	9	28.0	24.5	3.5

Les travaux effectués par Ola (1977) montrent que l'indice de plasticité après addition de 10 % de chaux au sol instable a montré une diminution de 17.8 % à 1.3 % (Tableau 3.2).

Tableaux 3.2- Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg [Ola, 1977].

Chaux (%)	Wl (%)	Wp (%)	Ip (%)
0	36.0	18.2	17.8
2	36.5	22.8	13.7
4	37.2	28.0	9.2
6	38.0	31.8	6.2
8	38.5	36.5	2.0
10	41.5	40.2	1.3

Dans la plupart des cas, l'effet de la chaux sur la plasticité du sol est plus ou moins instantané. Les ions calcium de la chaux provoquent une diminution de la plasticité et les sols sont de plus en plus friables et plus faciles à manipuler.

D'autres chercheurs [Osula, 1991; Kavak and Akyarli, 2007] ont observé que la limite de liquidité diminue avec l'augmentation de la teneur de la chaux alors que la limite de plasticité augmente entraînant ainsi une diminution considérable de l'indice de plasticité (Fig.3.1).

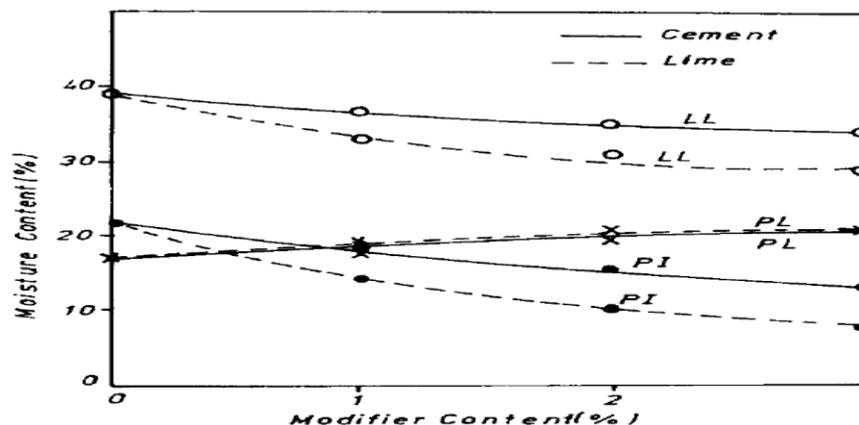


Fig. 3.1- Variation des limites d'Atterberg [Osula, 1991].

3.2.2 Effet de la chaux 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 réagissent 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.

D'après Bell (1996) l'addition de la chaux aux 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]. Cela est dû à la formation immédiate des produits de cimentation [Yong et Ouhadi, 2007]. Une densité de compactage plus élevée a été obtenue par l'argile de kaolinite, que pour les argiles expansibles telles 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 du sol, avec l'addition de la chaux il augmente immédiatement et continue d'augmenter avec le temps [Bell, 1996].

Tableau 3.3 – 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 ³)	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

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 gradation des sols [Attoh-Okine, 1995]. 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 pouzzolaniques [Manassah et Olufmi, 2008].

Sivapullaiah et Lakshmikantha (2005) ont trouvé dans leurs investigations sur les caractéristiques du compactage que, la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale de l'illite n'ont pas changées 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 l'agglomération. L'addition de 1% de la chaux augmente la teneur en eau optimale et diminue la densité sèche maximale. La teneur en eau optimale augmente avec le temps.

3.2.3 Effet de la chaux 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, et induisant une amélioration des propriétés d'usage des sols traités [Kavak et Akyarh 2007, Sakr et al. 2008, Okagbue et Ocholor 2005, Osula 1996, Ansary et al. 2006]. 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 par les 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].

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 pouzzolane, quand la pouzzolane est disponible, elle réagit avec la chaux, et améliore la résistance. Il 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 avec l'ajout de 4 à 6% de chaux 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.

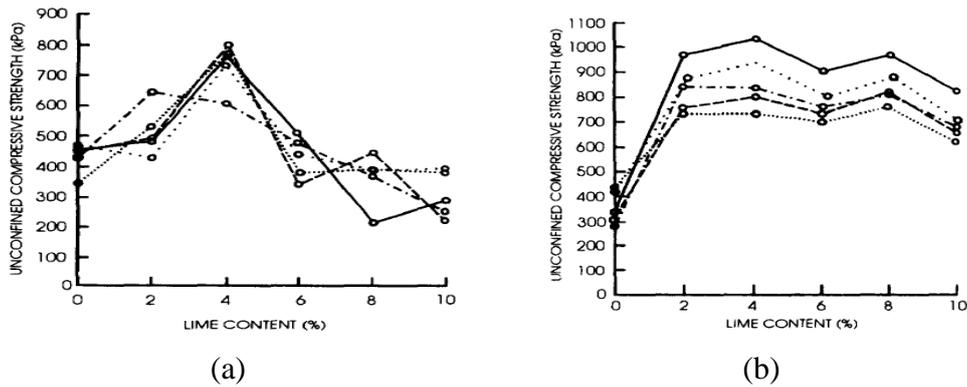


Fig. 3.2- Effet de la chaux sur la résistance à la compression pour (a) montmorillonite
(b) kaolinite [Bell, 1996].

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^2 , à 1400 KN/m^2 et 1480 KN/m^2 à 7, 14 et 28 jours, respectivement.

L'augmentation de la résistance à la compression des échantillons stabilisés à la chaux est due aux réactions pouzzolaniques entre la chaux et la silice et l'alumine présentes dans le sol en présence d'eau pour former enfin divers types de produits de cimentation qui lient les particules du sol ensemble. La cure est l'une des variables majeures qui affecte la résistance du sol stabilisé à la chaux. Son effet sur la résistance est fonction du temps, de la température et de l'humidité.

3.2.4 Effet de la chaux sur la résistance au cisaillement

De nombreuses études ont été effectuées dans le but de voir l'effet de l'addition de la chaux sur la résistance au cisaillement des sols instables à traiter. Plusieurs chercheurs [Osula 1991, Gay et Schad 2000, Muntohar et Hantoro 2000, Bagherpour et Choobbasti 2003, Lin et al. 2007] ont montré que la stabilisation des sols instables à l'aide de la chaux provoque une augmentation de la résistance au cisaillement de ces sols traités par rapport aux sols naturels. La période de cure est un facteur important dans l'évolution de la résistance au cisaillement des échantillons traités. L'augmentation de la cohésion est attribuée à la cimentation des particules tandis que celle de l'angle de frottement est due à la floculation des mêmes particules (Fig. 3.3).

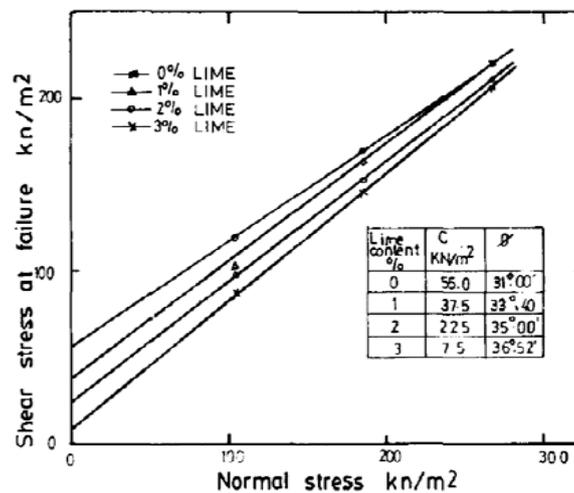


Fig. 3.3- Variation des paramètres de cisaillement des sols traités à la chaux [Osula 1991].

Enfin les résultats obtenus par Muntohar et Hantoro (2000) montrent que pour un dosage en chaux de 10 % l'angle de frottement est environ 1,7 fois celui du sol non traité. De même la cohésion est 1,3 fois celle du sol non traité.

3.3 Influence du ciment

3.3.1 Effet du ciment sur la plasticité

Le ciment portland est un autre produit envisageable pour la stabilisation de certaines catégories des sols considérés comme instables. Le ciment est généralement utilisé pour les sols de faible plasticité, et d'une teneur en eau élevée. Alors qu'il existe plusieurs similarités entre la chaux et le ciment portland comme stabilisants. Certaines distinctions doivent être identifiées en passant en revue des travaux de recherche effectués à travers le monde sur l'influence du ciment sur la plasticité des sols. Plusieurs chercheurs [Osula 1996, Al Rawas et al. 2005, Basha et al. 2005, Kalkan 2006, Eren and Filiz 2009, Sariosseiri and Muhunthan 2009] ont postulé que l'addition du ciment au sol fait diminuer l'indice de plasticité d'une façon remarquable.

De plus, Osula (1996) a montré que l'addition du ciment a engendré une diminution de l'indice de plasticité (Fig. 3.4). Cette diminution de l'indice de plasticité indique une amélioration de la maniabilité du sol instable. Pour cela une addition de 3% de ciment est suffisante pour augmenter la maniabilité du sol, en réduisant l'indice de plasticité de 21.7% à 12.7%. Le même comportement est observé par Basha et al. (2005) (Fig. 3.5).

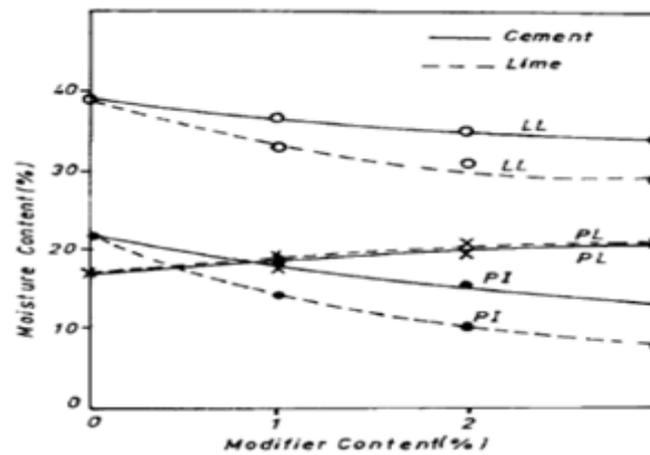


Fig. 3.4- Effet du ciment sur les limites d'Atterberg [Osula1996].

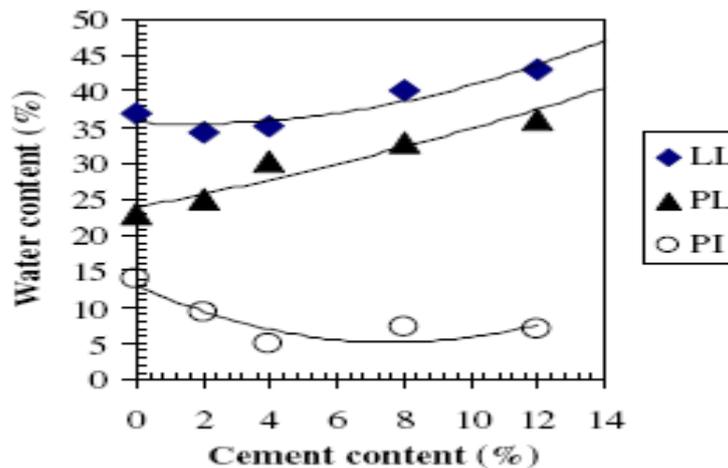


Fig. 3.5- Evolution des limites d'Atterberg [Basha et al. 2005].

Le processus de stabilisation initié par l'addition du ciment à l'argile engendre plusieurs étapes distinctes à savoir : l'échange cationique, la floculation par cimentation, l'hydratation par cimentation et les réactions pouzzolaniques. Le ciment portland possède des propriétés lui permettant d'initier une étape de plus que la chaux, soit celle de l'hydratation en produisant des agents de cimentation.

3.3.2 Effet du ciment sur le compactage

Gay et Schad (2000) ont prouvé que l'addition du ciment à un sol argileux de haute plasticité augmente la teneur en eau optimale et réduit la densité sèche maximale.

La réduction de la densité sèche maximale est due à la floculation et l'agglomération des particules d'argile tandis que l'augmentation de la teneur en eau optimale est due à l'affinité du sol à l'eau nécessaire pour l'hydratation et pour la réaction pouzzolanique. Cependant, les résultats d'Okagbue et al. (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 des 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.

Tableau 3.4 – Effet de l'ajout du ciment sur le compactage [Okagbue et al., 2007]

Ciment (%)	Standard Britannique		Standard.O.A		AASHTO Modifié	
	γ_d max (Mg/m ³)	Wop (%)	γ_d max (Mg/m ³)	Wop (%)	γ_d max (Mg/m ³)	Wop (%)
0	1.30	19.8	1.33	16.3	1.46	15.0
2	1.31	16.7	1.33	15.8	1.44	15.2
6	1.39	19.0	1.41	16.5	1.46	15.0
10	1.41	16.7	1.44	16.2	1.48	12.6

Les résultats de Osula (1996) suggère que la réaction pouzzolanique 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.

3.3.3 Effet du ciment sur la résistance à la compression

Les travaux de recherche effectués montrent aussi une amélioration considérable de la résistance à la compression des sols traités avec le ciment.

De plus, ces caractéristiques mécaniques sont acquises dans les premiers mois bien que des augmentations des caractéristiques mécaniques sur un an et plus soient observées [Rahman 1986, Bell 1994, Kaniraj and Havanagi 1999, Kukko 2000, Sivapullaiah et al. 2003, Chew et al. 2004, Basha et al. 2005, Koliass et al. 2005, Hossain et al. 2006, Kalkan 2006, Kenai et al. 2006, Al Hassan et al. 2007, Degirmenci et al. 2007, Hossain et al. 2007, Altun et al. 2009, Sariosseiri et al. 2009].

Les résultats des essais d'Okagbue et Ochulor (2007) indiquent que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment. L'augmentation de la résistance est attribuée aux composantes actives du ciment portland. Les produits d'hydratation du ciment remplissent les pores de la matrice du sol en augmentant la rigidité de sa structure par la formation d'un grand nombre de liaisons rigides dans le sol. Ces liaisons qui lient les particules d'argile sont attribuées aux agents de la réaction de cimentation comme le CSH, le CAH et le CASH (Aluminosilicates de Calcium Hydratés). Cette réaction pouzzolanique est due à la chaux libérée par l'hydratation du ciment et les minéraux de l'argile. 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.

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

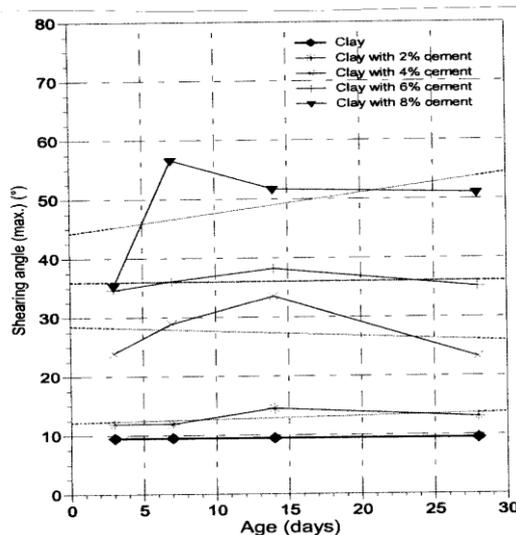
Contenu du Ciment %	0	4	6	8	10	12	15	20
Résistance à la compression à l'état sec (MPa)	1.67	2.34	3.28	4.02	4.20	5.19	6.14	6.5
Résistance à la compression résiduelle relative (%)	0	52.06	54.79	50.54	50.52	40.58	39.55	40.92

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du dosage en ciment. Ceci est dû à l'hydratation suffisante du ciment et à la formation d'un grand nombre de liant rigide. Ces liants qui lient les particules d'argile ont pu

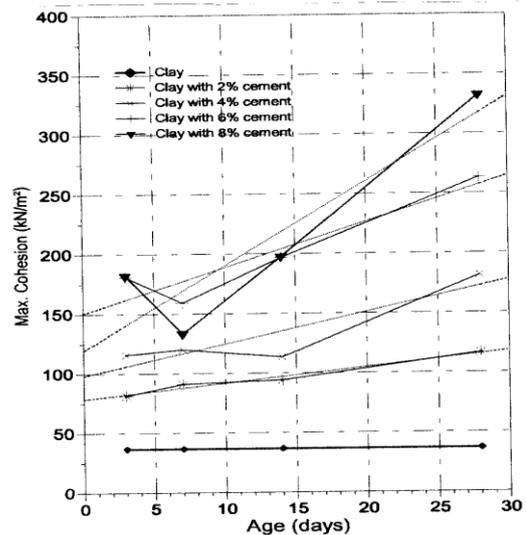
attribuer des produits de cimentation tels que les hydrates de silicate de calcium (CSH), hydrates d'aluminate de calcium (CAH) et hydrates aluminosilicate de calcium (CASH). L'immersion dans l'eau pendant 48h réduit la résistance à la compression jusqu'à 60% et la désintégration complète des spécimens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

3.3.4 Effet du ciment sur la résistance au cisaillement

Gay et Schad (2000) ont montré que les caractéristiques de cisaillement d'un sol instable traité avec différentes teneurs en ciment ont été améliorées d'une façon remarquable et ceci pour différentes périodes de cure (Fig. 3.6). Ainsi pour une teneur en ciment de 8% et une période de cure de 28 jours, l'angle de frottement interne du sol traité est environ 5 fois celui du sol instable non traité. Ceci traduit bien la stabilité requise après l'amélioration par le ciment du sol instable. Le même comportement est observé pour la cohésion qui représente 7,5 fois celle du sol non traité.



a- variation de l'angle de frottement interne



b- variation de la cohésion

Fig. 3.6- Effet du ciment sur les caractéristiques de cisaillement [Gay and Schad 2000].

3.4 Influence des ajouts cimentaires

3.4.1 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.

Selon Nalbantoglu (2004), les cendres volantes modifient le comportement de la plasticité des sols instables. Il s'ensuit une forte réduction de l'indice de plasticité (Figure 3.7).

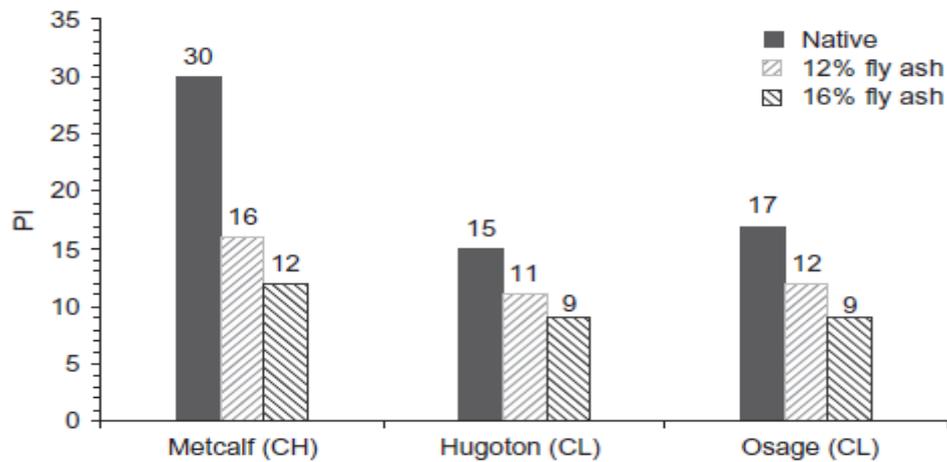


Fig. 3.7- Effet des cendres volantes sur la plasticité de trois sols instables [Parsons and Kneebone 2005].

Par ailleurs, la poussière de ciment ajoutée aux sols à traiter réduit l'indice de plasticité. La diminution de la limite de liquidité est due aux propriétés de cimentation de la poussière de ciment à cause des grandes teneurs en chaux libre (Fig. 3.8).

La chaux additionnée aux différents ajouts minéraux semble être des stabilisants satisfaisants quand on les mélange avec les mauvais sols qui nécessitent une stabilisation. Lin et al. (2007) observent que la plasticité diminue pour un sol traité à la cendre de vase calcinée combinée à la chaux mais pour une période de cure donnée (Fig. 3.9).

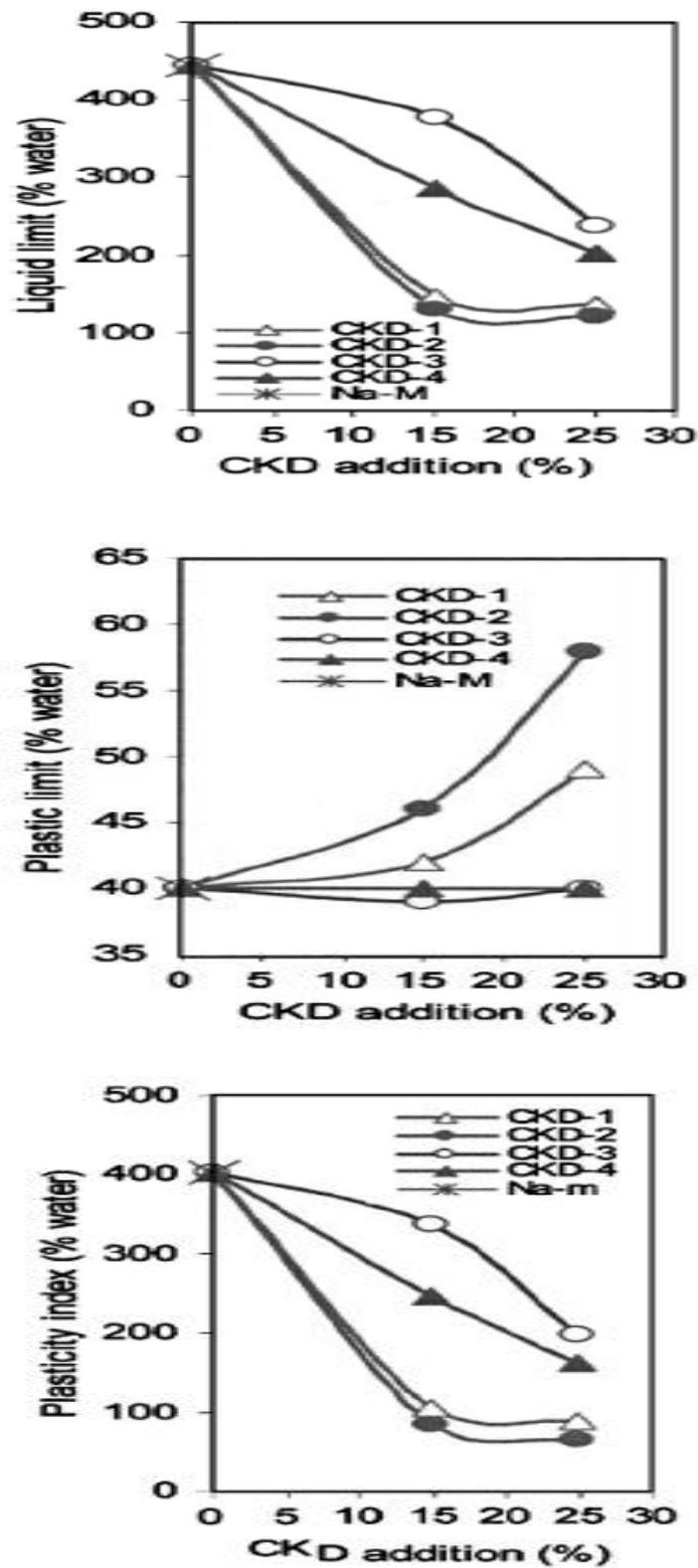


Fig. 3.8- Influence de la poussière de ciment sur les limites d'Atterberg de l'argile traitée [Peethamparan and Olek 2008].

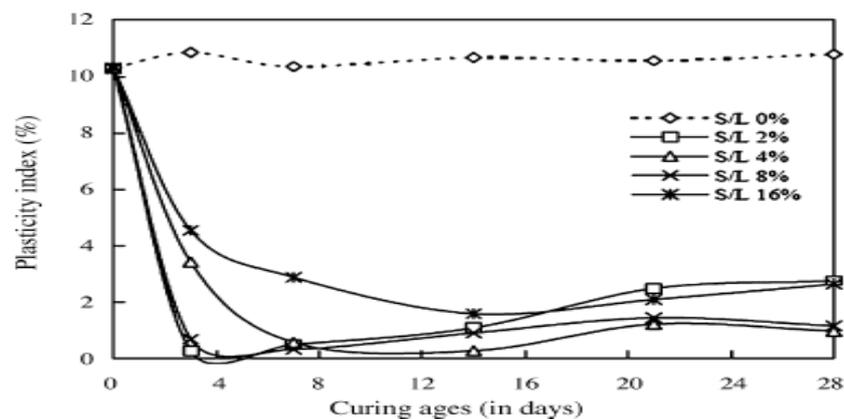


Fig. 3.9- Variation de l'indice de plasticité en fonction de la période de cure pour différentes teneurs du rapport vase calcinée/chaux [Lin et al., 2007].

3.4.2 Effet des ajouts cimentaires 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 diminution de la densité sèche avec l'augmentation des cendres volantes due à la faible densité spécifique des cendres volantes, la réduction est de l'ordre de 15 à 20% et la teneur en eau optimal augmente avec l'addition de cendre volante (Tableau 3.6).

Tableau 3.6 – Effet des cendres volantes sur le compactage [Prabakar et al., (2004)]

N° Sol	Cendres volantes (%)	Sol A		Sol B		Sol C	
		γ_d max	Wop	γ_d max	Wop	γ_d max	Wop
1	0	1.71	14.57	1.57	24.81	1.43	30.09
2	9.0	1.58	15.80	1.52	24.80	1.38	29.50
3	20.0	1.57	17.98	1.41	25.20	1.35	29.50
4	28.5	1.44	20.40	1.39	25.76	1.31	30.05
5	35.5	1.39	22.30	1.34	28.30	1.24	31.90
6	41.2	1.36	25.20	1.30	29.80	1.25	33.30
7	46.0	1.34	27.20	1.29	30.20	1.21	234.26
8	100.0	0.94	44.24	-	-	-	-

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 est

due à l'attraction du CKD à l'eau, et la diminution de la densité sèche est due à l'agrégation des particules.

Okagbue et al. (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 avec l'augmentation du dosage des cendres du calcaire est due au remplacement des particules du sol par les particules des cendres du calcaire qui ont un faible poids spécifique.

3.4.3 Effet des ajouts cimentaires sur la résistance à la compression

Bin-Shafique et al. (2009) ont trouvé que l'addition de 20% des cendres volantes a augmenté la résistance à la compression de 210KPa à 800KPa pour un sol de faible plasticité et de 180KPa à 560KPa pour un sol expansif (Fig 3.10).

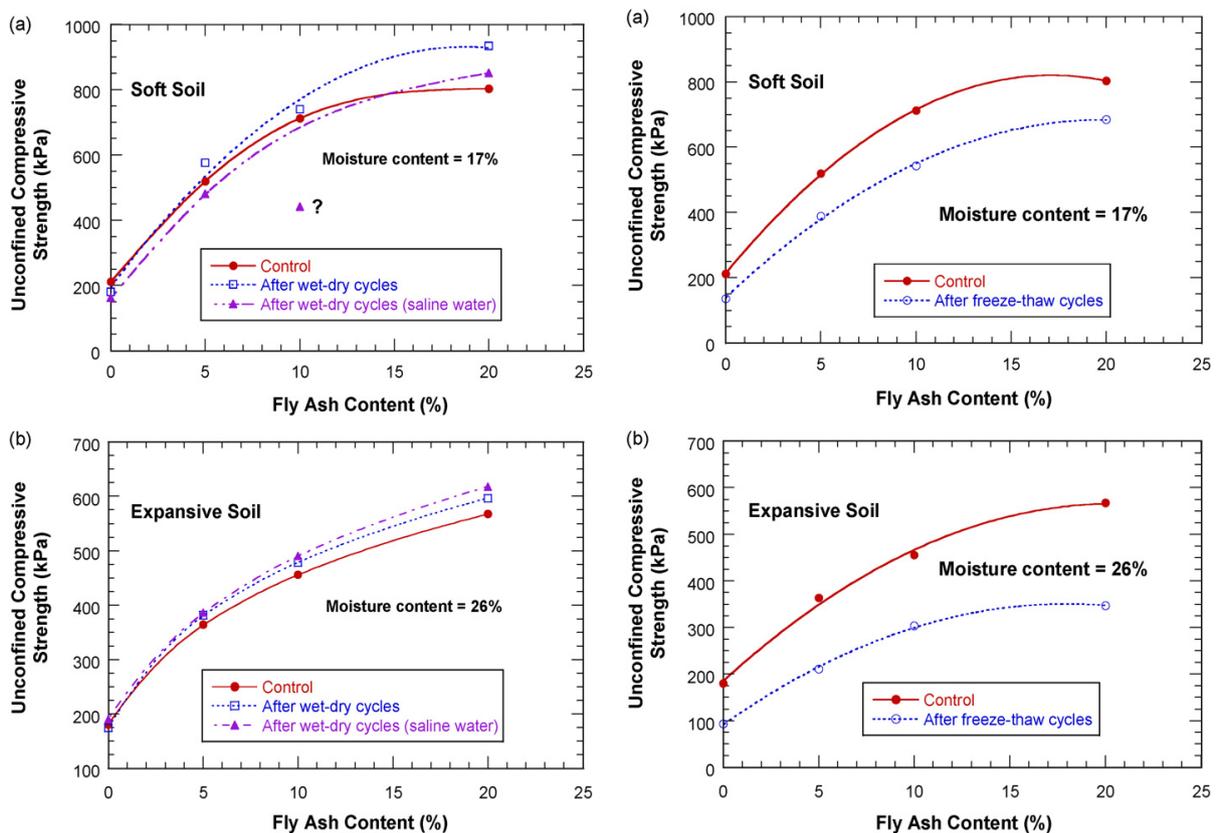


Fig 3.10- Effet de la chaux sur la résistance à la compression [Bin-Shafique et al. (2009)]

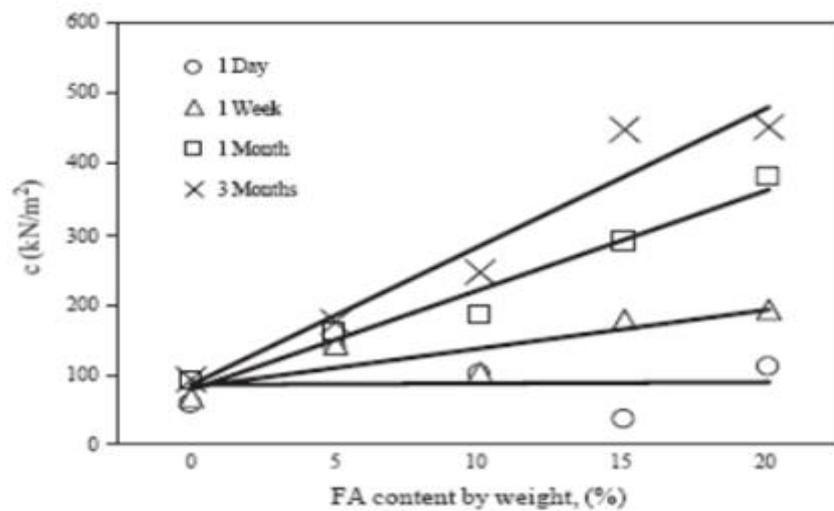
Sreekrishnavilasam et al. (2007) ont noté que le CKD présente une certaine réactivité, un dosage égal ou plus grand à 15%, est nécessaire pour augmenter la résistance du sol. Grâce à

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.

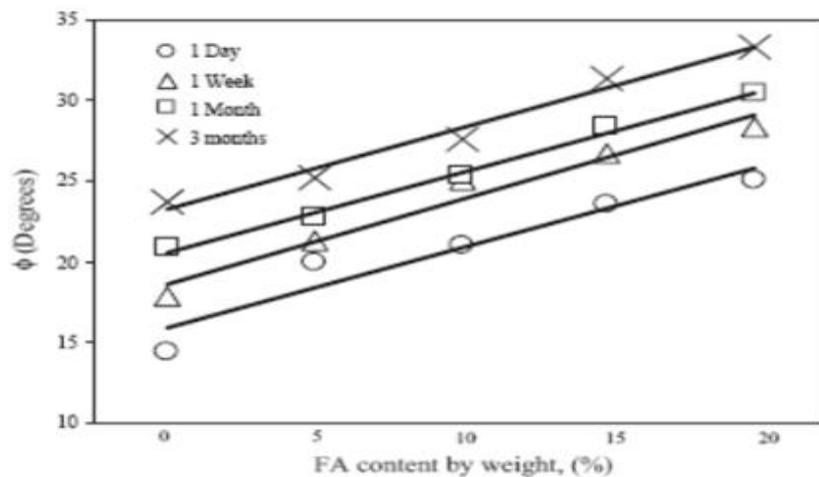
Les résultats de Nalbantoglu et Tawfiq (2006) indiquent que 3% de cendres du noyau d'olive augmente la résistance à la compression, au delà de cette valeur d'ajout, aucun développement de résistance n'a été constaté.

3.4.4 Effet des ajouts cimentaires sur la résistance au cisaillement

Sezer et al. (2006) ont montré que les caractéristiques de cisaillement du sol instable traité présentent une grande amélioration prouvant ainsi l'efficacité du traitement aux cendres volantes (Fig. 3.11). Ainsi pour une teneur en cendres volantes de 20 % et une période de cure de 28 jours, la cohésion est environ 3,8 fois celle du sol non traité. De même, l'angle de frottement interne est environ 0,5 fois celui du sol non traité.



a- Variation de la cohésion



b- Variation de l'angle de frottement interne

Fig. 3.11- Variation des caractéristiques de cisaillement [Sezer et al. 2006].

D'autre part et selon les travaux de Senol et al. (2006), on remarque que pour les sols A et B il y a une nette amélioration de la cohésion et de l'angle de frottement interne pour une teneur en cendre volante de 46%, tandis que pour le sol C le comportement inverse est observé pour la cohésion (Tableau 3.7).

Tableau 3.7- Effet des cendres volantes sur les caractéristiques de cisaillement [Senol et al. 2006].

N° Sol	Cendres volantes (%)	Cohésion (Kg/cm ²)			Angle de frottement interne (°)		
		Sol A	Sol B	Sol C	Sol A	Sol B	Sol C
1	0	0.250	0.185	0.530	30°15'	25°32'	17°10'
2	9.0	0.250	0.280	0.523	31°36'	24°13'	20°26'
3	20.0	0.270	0.300	0.475	33°1'	25°12'	21°58'
4	28.5	0.310	0.300	0.500	35°56'	28°18'	23°15'
5	35.5	0.340	0.330	0.480	34°12'	29°38'	26°17'
6	41.2	0.370	0.370	0.440	32°6'	29°53'	27°22'
7	46.0	0.395	0.380	0.395	28°38'	30°38'	27°56'
8	100.0	-	0.150	-	-	29°21'	-

Lin et al. (2007) ont étudié l'effet de l'addition de la chaux combinée à la cendre de vase calcinée sur la résistance au cisaillement des échantillons du sol traités pour différentes périodes de cure. Une amélioration notable des paramètres de cisaillement est observée (Figure 3.12).

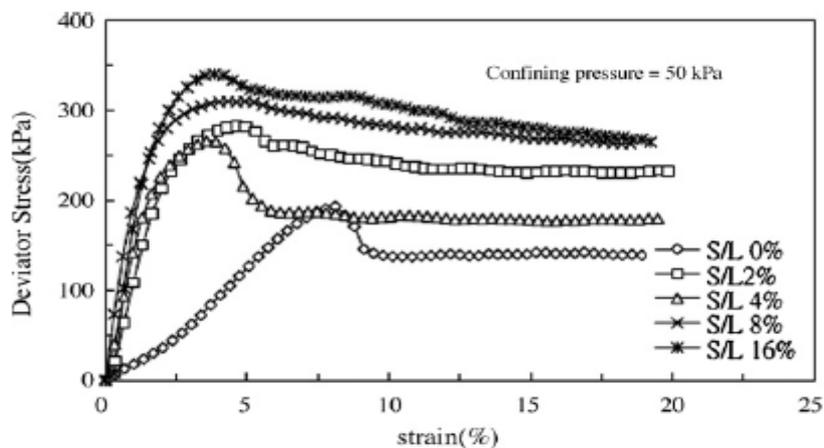


Fig. 3.12- Variation du Déviateur en fonction des déformations pour des mélanges sol-chaux-cendre de vase calcinée [Lin et al., 2007].

3.5 Influence de la combinaison des ajouts minéraux

3.5.1 Effet de la combinaison des ajouts minéraux sur la plasticité

La principale raison d'utiliser les combinaisons de ciment ou de la chaux avec autre ajouts c'est leur économie pour stabiliser les sols. Car les ajouts sont moins chers, plus disponibles et ont plus de réaction pouzzolanique 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. Ils ont trouvés 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, il a diminué à 4,2%. Et pour 8% de ciment l'IP est réduit à 2%.

Degirmenci et al. (2007) ont montrés que 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 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).

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 observée (Fig. 3.13). Ce comportement est attribué par le processus d'échange cationique entre les cations du sol et les additions de stabilisations.

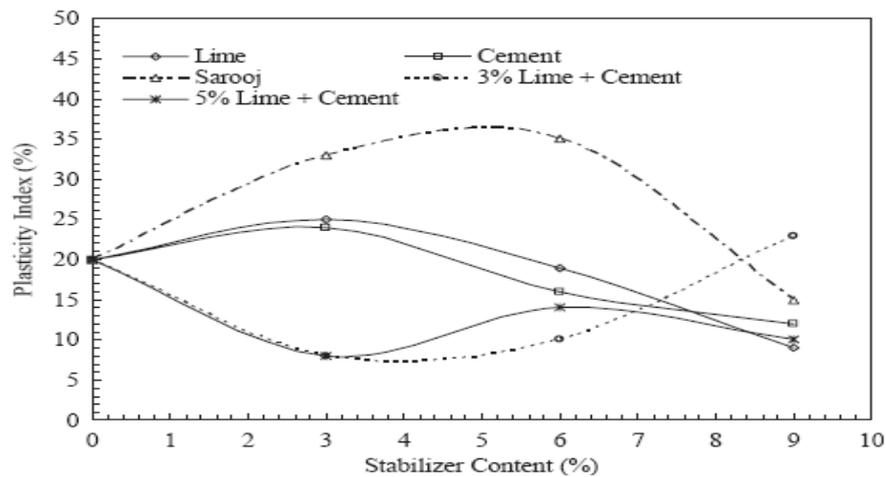


Fig. 3.13- Effet d'addition de stabilisateur sur l'indice de plasticité [AL-Rawas et al., 2005].

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].

3.5.2 Effet des combinaisons des ajouts minéraux sur le compactage

Hossain et al. (2007) ont effectués 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) comme le montre dans le tableau suivant 3.8.

L'addition des cendres volcaniques et de la chaux au sol augmente la teneur en eau optimale. La réaction pouzzolanique des cendres volcanique et de la chaux avec les constituants du sol tend à augmenter la teneur en eau optimale. L'augmentation de la teneur en eau optimale avec l'addition des cendres volcaniques et du 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.

Tableau 3.8- Effet de la combinaison des cendres volantes, du ciment et de la chaux sur le compactage [Hossain et al. (2007)]

Combinaison	Wop (%)		γ_d max (Kg/m ³)	
	S1	S2	S1	S2
0VA	21.5	22.1	1630	1654
2VA	26.0	26.8	1525	1548
4VA	28.0	28.8	1440	1462
5VA	30.0	30.9	1380	1401
10VA	32.0	33.0	1340	1360
15VA	21.5	22.1	1630	1654
20VA	22.2	22.9	1620	1644
2C	22.5	23.2	1605	1629
4C	21.5	22.1	1630	1654
2NL	22.7	23.4	1610	1634
4NL	23.1	23.8	1590	1614
5VA2C	27.1	27.9	1510	1533
5VA4C	28.1	28.9	1500	1523
10VA2C	29.2	30.1	1420	1441
10VA4C	29.8	30.7	1410	1431
5VA2NL	29.0	29.9	1465	1487
5VA4NL	30.1	31.0	1455	1477
10VA2NL	31.2	32.2	1377	1398
10VA4NL	31.9	32.8	1368	1388

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".

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 élevée peut être difficile et coûteux à réaliser pendant des saisons sèches, alors que 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 mêmes résultats ont été obtenus avec le mélange "chaux- cendres volantes".

3.5.3 Effet de la combinaison des ajouts cimentaires sur la résistance à la compression

Les essais réalisés par Al Hassan et al. (2007) sur l'amélioration d'un sol latérique de classification A-7-6 par la combinaison du RHA (2%-8%) avec le ciment (4%-6%) ont montré une amélioration énorme de la résistance du sol traité par rapport au sol naturel. La résistance augmente avec l'augmentation des dosages en RHA et au ciment. L'amélioration de la résistance est due à la réaction pouzzolanique entre la chaux libérée de l'hydratation du ciment et le RHA en produisant des agents de cimentation (Fig 3.14).

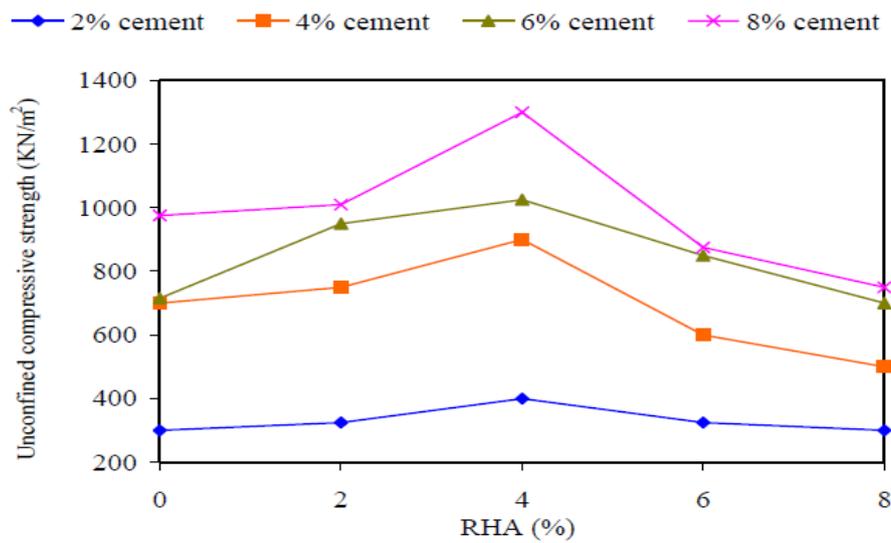


Fig 3.14- Effet de la combinaison du ciment avec RHA sur la résistance à la compression [Al Hassan et al., (2007)].

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 engendre 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.

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 mécanique. 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 étudié, 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.

3.5.4 Effet des ajouts minéraux sur le cisaillement

Harichane (2011) a traité deux types de sol argileux (gris et rouge) avec la chaux, la pouzzolane et la combinaison entre eux pour un test UU (non consolidé et non drainé) en utilisant deux pressions de confinement (25KPa et 50KPa).

Il a trouvé que quand la contrainte atteind sa valeur maximale, la déformation était entre 9% et 12%. Cependant le comportement et la résistance au cisaillement du sol a été similaire d'un matériau fragile les spécimens traités avec la chaux ou la combinaison chaux-pouzzolane. De plus les échantillons traités avec la pouzzolane seule ont un comportement quasi similaire du sol non traité, et l'effet de la pouzzolane a été marginal sur la résistance de cisaillement pour les deux types de sol. La valeur maximale de la résistance au cisaillement a été observée avec les échantillons traités avec la combinaison chaux-pouzzolane.

Les mêmes observations ont été constatées pour les échantillons traités avec une pression de confinement de 50Kpa. La résistance au cisaillement a été plus élevée dans le sol rouge que le sol gris.

Mekerta et al. (2009) ont étudié l'effet de l'ajout de la chaux et ciment sur les paramètres de cisaillement a la boîte rectiligne de Casagrande, les résultats sont présentées dans les tableaux 3.9 et 3.10.

Tableau 3.9- Paramètres de résistance au cisaillement des mélanges vase-chaux.

Mélange	vase+ 0% chaux	vase+ 2% chaux	vase+ 4% chaux	vase + 6%chaux	vase+ 8% chaux
C (Kpa)	145	154	171,67	214,33	203,33
ϕ (degré)	22,05	34,21	36,87	35,18	30,33

Tableau 3.10- Paramètres de résistance au cisaillement des mélanges vase-ciment.

	vase+ 0%ciment	vase+ 2% ciment	vase+ 4% ciment	vase+ 6%ciment	vase+ 8% ciment
C (Kpa)	145	221	93,33	156	132
ϕ (degré)	22,05	27,70	29,03	8,53	28,37

D'après les résultats obtenus dans les tableaux ci-dessus, il a conclu que les mélanges vase-chaux montrent une augmentation de la cohésion en fonction du pourcentage de chaux, avec un optimum de la cohésion de 214,33 Kpa pour 6 % de chaux. Il a remarqué les mêmes observations pour l'angle de frottement interne, avec un optimum de 29,03° pour un pourcentage de chaux 4 %. En outre les valeurs de la cohésion et l'angle de frottement interne ne sont pas proportionnels à la quantité de ciment ajoutée, le comportement du nouveau matériau est influencé par les réactions chimiques internes entre les différents minéraux. Cependant, une quantité de ciment de 2 % améliore nettement la cohésion (221 Kpa) et l'angle de frottement interne (27,70 degré).

Okbague et al. (2000) ont étudiés l'utilisation des cendres de calcaire comme un substituant de la chaux pour l'amélioration des caractéristiques géotechniques de sol. Une diminution de la cohésion et une augmentation de l'angle de frottement interne ont été notées avec l'augmentation du pourcentage de cendres de calcaire dans tous échantillons.

Tableau 3.11- Influence des cendres de calcaire sur les paramètres de cisaillement (UU).

Cendres de calcaire (%)	Cohésion (KN/m ²)		Angle de frottement interne (°)	
	SB	SB modifié	SB	SB modifié
0	33	35	21	23
2	50	50	19	20
4	60	72	16	18
6	73	95	15	15
8	92	97	12	13
10	103	126	12	12

3.6 Conclusion

La recherche bibliographique nous a permis à consulter la documentation concernant la thématique du traitement des sols à la chaux, au ciment et aux différents ajouts cimentaires. D'une manière générale ces publications concernent des avancées techniques dans le mode de traitement et d'analyse des échecs de stabilisation.

Un potentiel économique et environnemental prometteur est observé par les chercheurs pour l'usage des ajouts minéraux pour la stabilisation des sols argileux. L'addition de ces ajouts et leurs combinaisons avec la chaux ou le ciment ont été employés comme stabilisateurs de sol tels que les cendres volantes, la fumée de silice, le calcaire, les cendres de gousse de riz, le laitier, la poussière de ciment.

Bien que plusieurs chercheurs aient démontrés qu'il est possible de traiter efficacement les mauvais sols avec de la chaux, du ciment et/ou combinés aux différents ajouts minéraux, l'impact économique et environnemental de certains sous produits industriels (classés comme ajouts cimentaires) a mis en cause dans bien de cas cette efficacité. Pour tenter d'y remédier à cette situation, une investigation pour la recherche des ajouts cimentaires à base de roche naturelle inoffensifs à l'environnement et acceptés économiquement doit être entamée afin d'évaluer leurs effets sur les propriétés géotechniques des mauvais sols à traiter.

Le but principal de cette recherche est l'étude et l'analyse de l'effet du mécanisme d'action de la pouzzolane naturelle et sa combinaison avec la chaux (ajout cimentaire le plus utilisé dans la stabilisation des sols argileux) sur l'amélioration de la vase dragée du barrage de Oued el fouda de Chlef du point de vue physique et mécanique en effectuant divers essais en laboratoire tels que la plasticité, le compactage, la résistance à la compression ainsi que la résistance au cisaillement à l'appareil triaxial.

Le chapitre suivant présente la caractérisation de la vase à améliorer et les protocoles expérimentaux des expériences effectuées.

4.1 Introduction

Dans l'objectif de mieux comprendre l'effet de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur le comportement physique et mécanique des sols argileux, un programme expérimental a été réalisé. La vase du barrage d'Oued el fouda a été sélectionnée. 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.

4.2 Matériaux utilisés

4.2.1 Le Sol

Notre sol a été pris du dépôt de la vase draguée du barrage de Oued el fouda (Fig. 4.1), Les prélèvements d'échantillons effectués par le biais d'une pelle mécanique ont fait l'objet d'une sélection au niveau du dépôt situé au voisinage de l'oued (Fig. 4.2) et ce dans le but d'obtenir une éventuelle homogénéité des échantillons à étudier.



Fig. 4.1– Dépôt de la vase draguée.



Fig. 4.2– Prélèvement des échantillons à étudier

4.2.1.1 Propriétés chimiques

Cette analyse a porté sur la détermination de la nature chimique de la vase à étudier. Dans ce cadre, une analyse chimique a été réalisée au laboratoire central des travaux publics (LCTP), les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau. 4.1– Composition chimique de la vase.

Composition chimique	Quantité (%)
SiO ₂	29.10
Al ₂ O ₃	14.48
Fe ₂ O ₃	6.40
CaO	12.04
MgO	1.53
SO ₃	0.03

4.2.1.2 Propriétés physiques et mécaniques

Les différentes caractéristiques physiques et mécaniques de la vase étudiée ainsi que sa classification suivant l'USCS (Unified Soil Classification System), ont été déterminées au laboratoire selon les normes ASTM. Les résultats sont rapportés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 – Caractéristiques géotechniques de la vase étudiée.

Caractéristiques	Sol
Couleur	gris
Teneur en eau naturelle (%)	42.60
Densité spécifique	2.69
Eléments <80µm (%)	92
Limite de liquidité (%)	57
Limite de plasticité(%)	25.22
Indice de plasticité(%)	31.78
Classification USCS	CH
Propriétés de compactage	Proctor standard
ω_{opt}	13.9
γ_{max}	16.2

4.2.2 La chaux

La chaux utilisée (Fig. 4.3) est une Chaux Hydratée $Ca(OH)_2$ ramenée directement de l'usine de SAIDA située dans la région ouest de l'Algérie, livrée en sac. Ses Propriétés physico-chimiques ont été fournies par l'usine de fabrication (Tableau. 4.3).



Fig. 4.3– Chaux vive de Saida.

Tableau 4.3– Propriétés physico-chimiques de la chaux.

Nom chimique	Chaux (%)
Apparence physique	Poudre blanche sèche
CaO	> 83.3
MgO	< 0.5
Fe ₂ O ₃	< 2
Al ₂ O ₃	< 1.5
SiO ₂	< 2.5
SO ₃	< 0.5
Na ₂ O	0.4 - 0.5
CO ₂	< 5
CaCO ₃	< 10
Densité spécifique	2
Plus de 90 µm (%)	< 10
Plus de 630 µm (%)	0
Materiau insoluble %)	< 1
Densité apparente (g/l)	600-900

4.2.3 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. 4.4). La roche a été broyée au laboratoire jusqu'à une surface spécifique de 420m²/Kg (Fig. 4.5). Sa composition chimique est représentée dans le tableau 4.4.

**Fig. 4.4**– Pouzzolane naturelle de Beni-Saf.

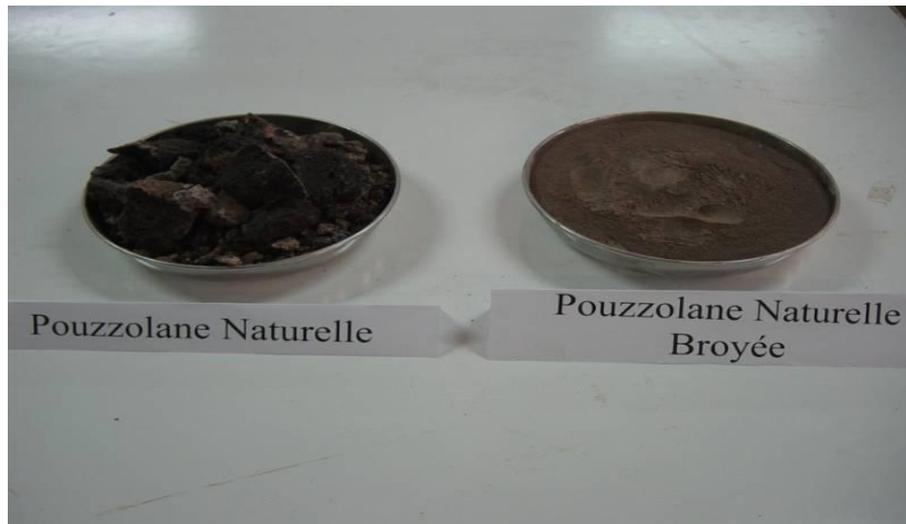


Fig. 4.5– Pouzzolane naturelle défragmentée et broyée

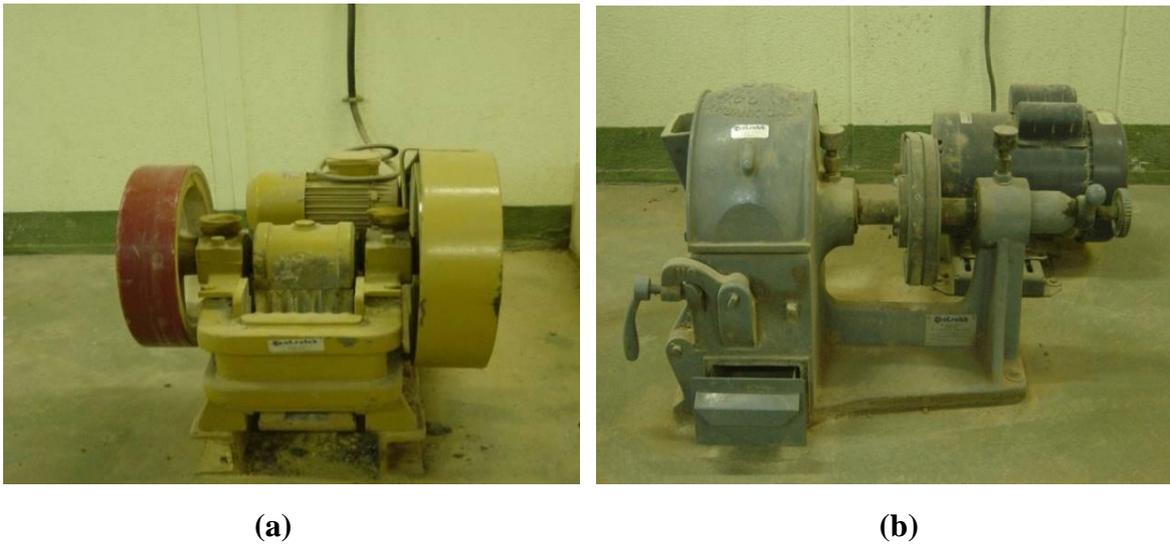
Tableau 4.4– Composition chimique de la pouzzolane naturelle.

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

4.3 Méthodes expérimentales

4.3.1 Préparation des mélanges Sol/ajouts

Après l'extraction de la vase sous forme des pierres argileuses, on les défragmente, et met à l'étuve à 50°C pendant 24h, après elle a été procédé ensuite au concasseur, puis au broyage dans un broyeur à disques (Fig. 4.6), puis au tamisage pour avoir une mouture inférieure à 0.2mm (Fig. 4.7)



(a) (b)
Fig. 4.6– Concasseur (a), Broyeurs à disque (b).



(a) (b)
Fig. 4.7– Vase après concassage (a), Vase après broyage et tamisage (b).

La préparation de la pouzzolane naturelle se fait par séchages des pierres de pouzzolane naturelle, puis les broyées dans les moules de l'appareil micro-Duval jusqu'à avoir une poudre de granulométrie inférieure à 80 μm . La chaux sera tamisée directement (granulométrie inférieure à 80 μm) afin d'éviter les grumeaux.

Les échantillons de la vase sont traités par différents pourcentages de chaux et de pouzzolane. 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 comme le indiqué dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5– Formulation des combinaisons.

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

Les quantités de la vase et ajouts ont été pesés et mélangés manuellement à l'état sec jusqu'à obtenir une uniformité de couleur du mélange, puis mis dans des sachets en plastique et stocké dans un endroit sec, comme indique la figure 4.8.



Fig. 4.8– Stockage des échantillons après pesage et malaxage.

4.3.2 Détermination des limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité) ont été déterminées selon la norme ASTM D 4318. Les sols préalablement broyés (mouture 0/2) et séchés à l'air (passant au tamis N°40) ont été initialement mélangés à l'état sec avec des quantités prédéterminées de la pouzzolane naturelle, de la chaux ou de la combinaison pouzzolane naturelle et la chaux. Ensuite l'eau distillée a été ajoutée au mélange et pour améliorer la diffusion de l'eau dans le mélange, la pâte a été placée dans un récipient hermétique pour 24 heures avant l'essai.

4.3.2.1 Détermination de la limite de liquidité

La totalité du matériau est malaxée afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide. On reparti dans une coupelle propre et sèche avec la spatule une masse d'environ 70g de pâte. Cette pâte est étalée en plusieurs couches afin d'éviter d'emprisonner des bulles d'air, présente en fin d'opération un aspect symétrique par rapport à l'axe vertical de la coupelle. Ensuite, on partage la pâte en deux parties au moyen de l'outil à rainurer. On actionne la came de façon à soumettre la coupelle à une série de chocs à une cadence de 2 coups pas seconde. On note le nombre N_c de chocs nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 1 cm.

L'opération complète est effectuée au moins quatre fois sur la même pâte mais avec une teneur en eau différente à chaque fois. L'essai n'est poursuivi que lorsque N_c est compris entre 15 et 35. Les nombres de chocs de la série d'essais doivent encadrer 25 et l'écart entre deux valeurs consécutives doit être inférieur ou égale à 10. Enfin, on prélève dans la coupelle à l'aide d'une spatule, environ 5 g de pâte, de chaque côté des lèvres de la rainure pour en déterminer la teneur en eau (dessiccation à l'étuve).

La limite de liquidité (WL) est la teneur en eau du matériau qui correspond conventionnellement à une fermeture sur 1 cm des lèvres de la rainure après 25 chocs. Elle est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales (N_c , WL) pour au moins quatre couples de valeurs. La limite (WL) est obtenue pour une valeur de N_c égale à 25 coups. Elle est exprimée en pourcentage et arrondie au nombre entier le plus proche.

4.3.2.2 Détermination de la limite de plasticité

On forme une boulette de la pâte préparée auparavant et la rouler sur une plaque lisse à la main de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3 mm de diamètre.

La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint 3 mm. Une fois les fissures apparues, on prélève la partie centrale du rouleau et la placer dans une capsule de masse connue, la peser immédiatement et l'introduire dans l'étuve afin de déterminer sa teneur en eau.

La limite de plasticité (WP) est la teneur en eau conventionnelle d'un rouleau de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint 3 mm. Cette limite de plasticité est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues à partir de trois essais. La valeur est exprimée en pourcentage.

4.3.2.3 Détermination de l'indice de plasticité

L'indice de plasticité (IP) représente la différence entre les valeurs des limites de liquidité et de plasticité.

$$IP = W_L - WP$$

4.3.3 Détermination des caractéristiques de compactages

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un sol dénommées respectivement la teneur en eau optimum et la masse volumique sèche maximale, sont des caractéristiques très utilisées pour identifier les sols et pour définir les spécifications de compactage qui leurs sont applicables lorsqu'ils sont utilisés dans la construction des remblais, des couches de forme et des assises de chaussées.

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un sol sont déterminées à partir des essais dits: essai Proctor Normal ou essai Proctor Modifié. Les deux essais sont identiques dans leur principe, sauf que les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée sont différentes.

Le principe de ces essais consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau et le compacter selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de la teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du sol et on établit la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. Les essais de compactage sont réalisés conformément à la norme ASTM D698.

Il convient de réduire le sol en une mouture 0/2 mm. L'échantillon sec réduit est répandu dans un bac, homogénéisé et divisé en six parts aussi semblables que possible. Chacune de ces parts est ensuite humidifiée en introduisant la quantité d'eau voulue, à l'aide d'un pulvérisateur, tout en maintenant le malaxage. Celui-ci peut se faire manuellement ou plus avantageusement à l'aide du

malaxeur (Figure 4.9). Les échantillons préparés avec et sans ajouts sont introduits dans des boîtes étanches en les conservant 01 heure avant l'exécution de l'essai de compactage.



Homogénéisation des échantillons



Humidification de la vase



Malaxage de la vase

Fig. 4.9- Procédures de préparation des échantillons pour le compactage.

Le choix du type de moule (moule Proctor) et de la nature de l'essai à exécuter (essai Proctor normal) étant choisis, on procède au compactage des éprouvettes humidifiées en respectant les modalités d'exécution des essais Proctor normal (Fig. 4.10).



Fig. 4 .10- Compactage des éprouvettes.

Après compactage de la dernière couche, on retire la rehausse, le matériau doit alors dépasser du moule d'une hauteur de 1 cm au maximum. Cet excédent est arasé soigneusement au niveau du moule. L'ensemble du moule avec le matériau sera pesé.

On procède au démoulage de l'éprouvette et on extrait un échantillon représentatif pour la détermination de la teneur en eau. Ces opérations sont répétées sur chacune des six parts de matériau préhumidifié. Pour chaque éprouvette compactée, il convient de calculer la teneur en eau, la masse volumique humide et la masse volumique du sol sec en tenant compte du volume réel du moule utilisé. Les valeurs des masses volumiques du sol sec et des teneurs en eau correspondantes sont portées sur un graphe. On trace ensuite la courbe d'ajustement des points expérimentaux. Cette courbe présente une valeur maximale. Cette dernière est un couple de valeurs dénommées respectivement masse volumique sèche maximale et teneur en eau optimum Proctor Normal.

4.3.4 Confections des éprouvettes destinées à la résistance à la compression et au cisaillement

Les poids des échantillons ont été obtenus à partir des résultats de compactage (Tableau 4.6).

Tableau 4.6– Quantités des sols et des additifs utilisés pour la confection des éprouvettes destinées pour la détermination de la résistance à la compression et au cisaillement.

Désignation	Sol (g)	Chaux (g)	Pouzzolane Naturelle (g)	Eau (g)
P0L0	318	-	-	44
P0L4	296	12	-	46
P0L8	266	36	-	49
P10L0	286	-	32	42
P104	268	13	31	39
P20L8	252	25	31	41
P20L0	238	-	60	36
P20L4	238	12	62	39
P20L8	223	25	62	40

Les échantillons non traités et traités sont préparés avec une teneur en eau optimale et compactés à la densité sèche maximale.

Les mélanges vase-ajouts ont été directement mélangés avec la quantité d'eau désirée et ils ont été bien mélangés 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 (4.11) montre les étapes de préparation de la vase avant d'entamer la phase de compactage.



Humidification de la vase



Malaxage de la vase avec la chaux



Conservation des échantillons dans des sacs hermétiques

Fig. 4.11- Préparation des échantillons pour la résistance à la compression et au cisaillement.

Pour obtenir la densité désirée, les échantillons ont été procédés à un compactage par compression statique et reconstitués sous forme des éprouvettes de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur en utilisant le système de double pistonnage qui consiste à appliquer par l'intermédiaire de deux pistons et d'une presse hydraulique, deux efforts similaires sur les deux cotés de l'éprouvette dans un cylindre de 50 mm de diamètre (Fig. 4.12). L'intérieur du cylindre est enduit d'une couche de graisse afin de réduire les frottements vase-moule et éviter la rupture de l'éprouvette lors du démoulage. L'extraction de l'éprouvette se fait manuellement en utilisant les deux pistons. On détermine ensuite son poids et ses dimensions exactes.



Fig.4.12- Système de double pistonnage.

Les spécimens compactés pour les différents tests réalisés (résistance à la compression, et test de triaxial) ont été immédiatement placés et fermés dans des sachets en plastique. Ceci pour réduire la perte d'humidification et la carbonatation de la chaux pendant la maturation. La période de cure était de 01, 07, 28 et 90 jours. La maturation à 20°C est assurée dans un laboratoire à température contrôlée. La figure 4.13 montre le mode opératoire de compactage.



Compactage d'éprouvette



Démoulage de l'éprouvette compactée



Eprouvette après démoulage

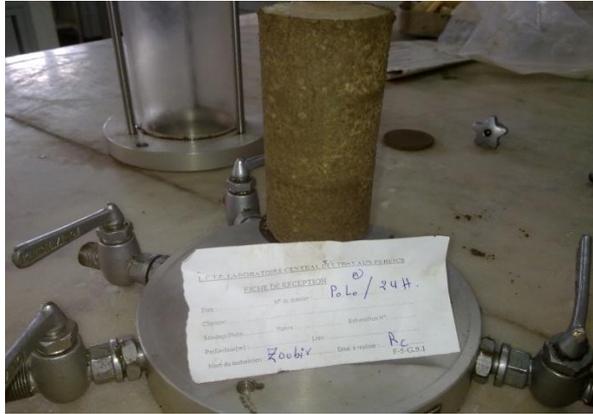


Conservation des éprouvettes dans des sacs hermétiques

Fig. 4.13- Confection des éprouvettes par compactage statique.

4.3.4.1 Résistance à la compression

Afin d'évaluer l'effet de la pouzzolane naturelle et la chaux, ainsi que leur combinaison sur la capacité de portance de la vase, des essais de la résistance à la compression non confinée ont été effectués sur les échantillons du sol conformément à la norme ASTM D2166 (Fig.4.14).



(a) éprouvette à écraser



(b) installation de l'éprouvette



(c) installation de l'éprouvette dans la cellule



(d) installation de la cellule dans la presse.



(e) écrasement de l'éprouvette (1mm/min)



(f) éprouvette après écrasement

Fig. 4. 14- Procédure d'écrasement des éprouvettes destinées à la 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) et du temps de maturation (1, 7, 28 et 90 jours).

4.3.4.2 La résistance au cisaillement

Dans tous les problèmes de stabilité des sols (étude de fondation, ouvrages de soutènement, remblais, talus...) il devient nécessaire de connaître la résistance au cisaillement du sol définie comme étant la contrainte de cisaillement au moment de la rupture. A partir des valeurs de résistance au cisaillement on peut ainsi définir les caractéristiques mécaniques du sol c'est-à-dire la cohésion et l'angle de frottement interne.

Le test est effectué sur des échantillons compactés du sol non traité et traité de 50 mm de diamètre et de 100 mm de hauteur compactées à une teneur en eau optimale et densité sèche maximale. L'essai triaxial non saturée, non consolidée et non drainée a été performée avec les pressions de confinement 25 KPa, 50 KPa et 100 KPa respectivement (Fig. 4.15) selon la norme ASTM 2850.



Introduire l'éprouvette dans la membrane



Installation de l'éprouvette dans la cellule



Remplissage de la cellule par l'eau



Installation de l'éprouvette dans la presse triaxiale



L'éprouvette après écrasement

Fig. 4.15- Procédures de cisaillement a l'appareil triaxial.

4.4 Conclusion

Dans ce travail de recherche, on a sélectionné la vase du barrage d'Oued el fouda afin d'étudier les effets de la pouzzolane naturelle et de la chaux ou de leur combinaison sur son comportement physique et mécanique. Tous les essais ont été réalisés suivant l'organigramme de la figure 4.16.

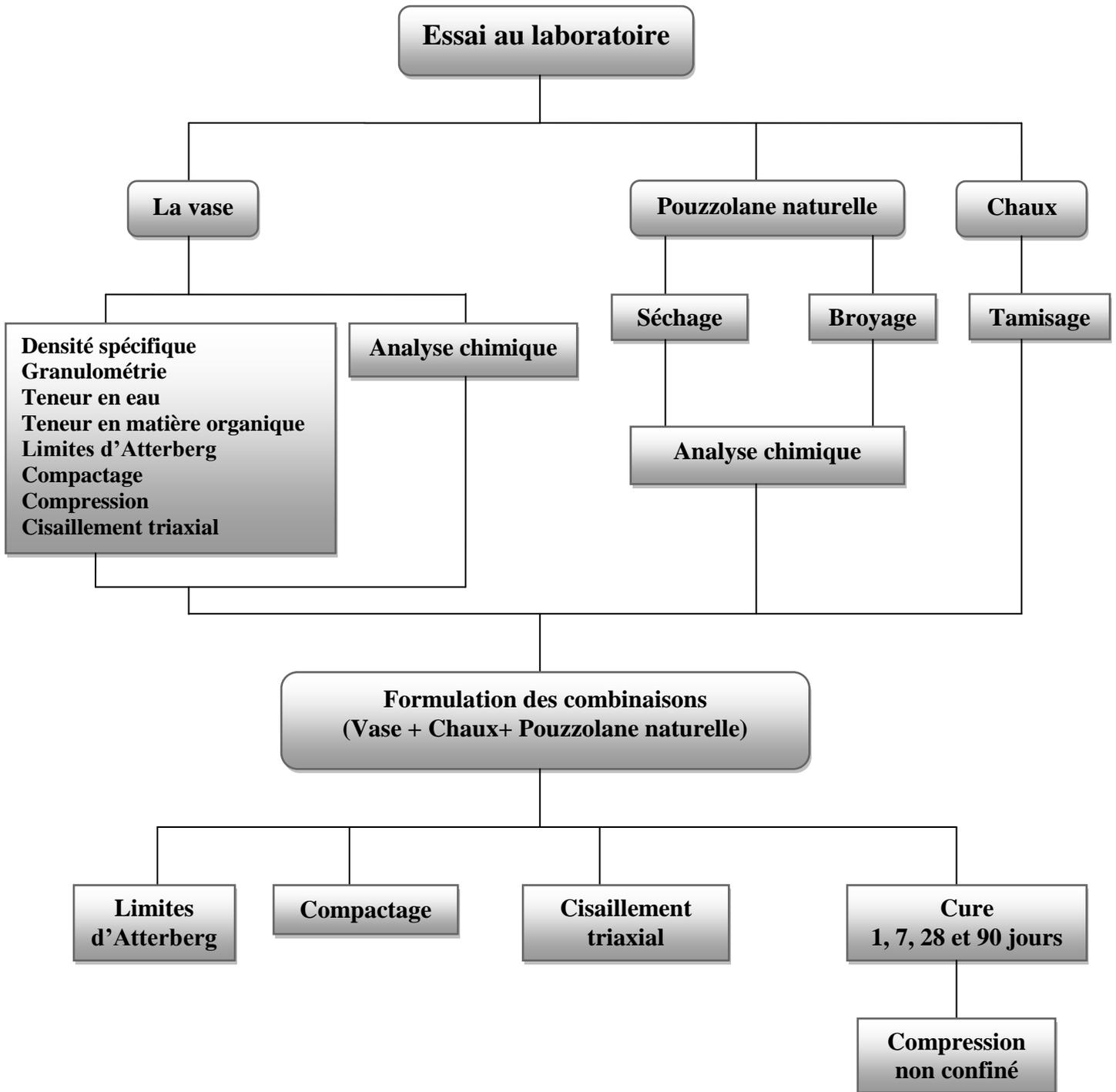


Fig. 4.16- Organigramme des essais effectués au laboratoire.

Dans le chapitre suivant, on va présenter et discuter les différents résultats trouvés.

5.1 Introduction

La nature et la proportion des minéraux, la masse volumique et la teneur en eau ainsi que l'argilosité, sont les paramètres physiques fondamentaux qui influent sur le comportement d'un sol. L'argilosité est une caractéristique exclusive de la fraction fine consiste à déterminer les caractéristiques de plasticité (W_L , W_P et IP). D'autre part, la teneur en eau et la compacité des mélanges sont définies par les essais de compactibilité.

Pour obtenir une meilleure connaissance du comportement mécanique de la vase et des mélanges étudiés, on a réalisé les essais suivants; la résistance à la compression et la résistance au cisaillement à l'appareil triaxial.

Le but de l'étude présentée dans ce chapitre est l'évaluation des additifs ajoutés sur les caractéristiques physiques et mécaniques de la vase étudiée. La comparaison des résultats des échantillons traités et non traités permet de quantifier l'effet du traitement et de suivre l'évolution du comportement de la vase en fonction du dosage et de la durée de cure.

5.2 Les limites d'Atterberg

Les résultats expérimentaux concernant la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité de la vase amélioré sont présentés dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1- Effet des additifs utilisés sur les limites de consistance de la vase.

Echantillons	WL (%)	WP (%)	IP (%)
P0L0	56,36	25,22	31,14
P0L4	52,56	36,39	16,17
P0L8	51,74	35,83	15,91
P10L0	54,84	27,94	26,90
P10L4	51,95	37,24	14,71
P10L8	52,00	38,36	13,64
P20L0	54,06	30,18	23,88
P20L4	51,26	34,54	16,72
P20L8	50,14	33,47	16,67

La limite de liquidité (W_L) est la teneur en eau du sol qui correspond conventionnellement à une fermeture sur 1 cm des lèvres de la rainure après 25 chocs. La limite de liquidité de la vase naturelle est de 56,36%. Par ailleurs, la limite de plasticité (W_P) est la teneur en eau conventionnelle d'un rouleau de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint 3 mm. Elle est calculée sur la base de la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues à partir de 03 essais. La limite de plasticité de la vase naturelle est de 25,22%. Enfin, l'indice de plasticité est calculé à partir de la différence entre les valeurs des limites de liquidité et de plasticité. Pour la vase naturelle, l'indice de plasticité est évalué à 31,14%.

5.2.1 Variation de la limite de liquidité

La figure 5.1 montre la variation de la limite de liquidité en fonction de la teneur des stabilisants.

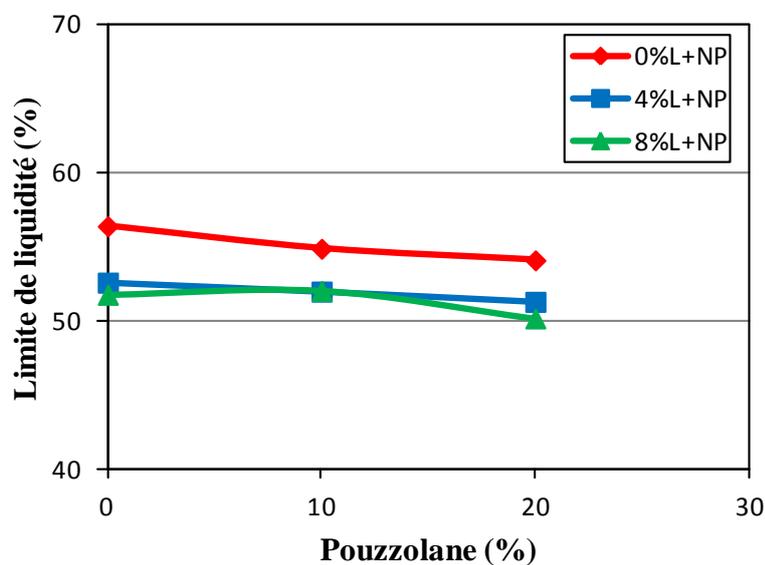


Fig. 5.1- Effet des additifs sur la limite de liquidité de la vase.

D'après la figure 5.1, on constate que l'ajout de la pouzzolane naturelle seule a un effet négligeable sur l'amélioration de la limite de liquidité de la vase étudiée. Le même comportement a été observé par différents chercheurs [Baghdadi (1990); Muntohar et al., (2000); Muntohar (2006); Turker et al., (2006); et Degirmenci et al.,(2007)].

Par contre l'ajout de la chaux seule a diminué la limite de liquidité de la vase étudiée, ce résultat coïncide avec les résultats trouvés par Kavak et al., (2006) et Bozbey et al., (2010).

L'augmentation ou la diminution des limites de liquidité dépendent du type de sol. De plus, l'augmentation de la limite de liquidité se produit pour les sols argileux kaolinitiques tandis que la diminution de la limite de liquidité se produit pour les sols argileux montmorillonitiques [Attoh-Okine, 1995; Sivapullaiah et al., 2003].

Par ailleurs, la réduction de la limite de liquidité est attribuée à l'échange cationique provoqué dans le sol par les ions divalents de calcium [Goswami et al., 2005]. D'ailleurs, les argiles présentant des cations de valence inférieures tels que le sodium montrent un échange cationique significatif et par conséquent une réduction notable de la limite de liquidité pour une augmentation de la teneur de la chaux [Miller et al., 2000; Khattab et al., 2008; Bozbey et al., 2010].

Pour la combinaison Chaux+Pouzzolane naturelle, une diminution de la limite de liquidité est notée pour les différentes teneurs en chaux et à la pouzzolane naturelle. La combinaison de 8%C+20%PN a montré une diminution maximale de la limite de liquidité de la vase étudiée. Le même comportement a été observé par Ansary et al. (2006).

5.2.2 Variation de la limite de plasticité

La variation de la limite de plasticité en fonction de la teneur des stabilisants est montrée sur la figure 5.2.

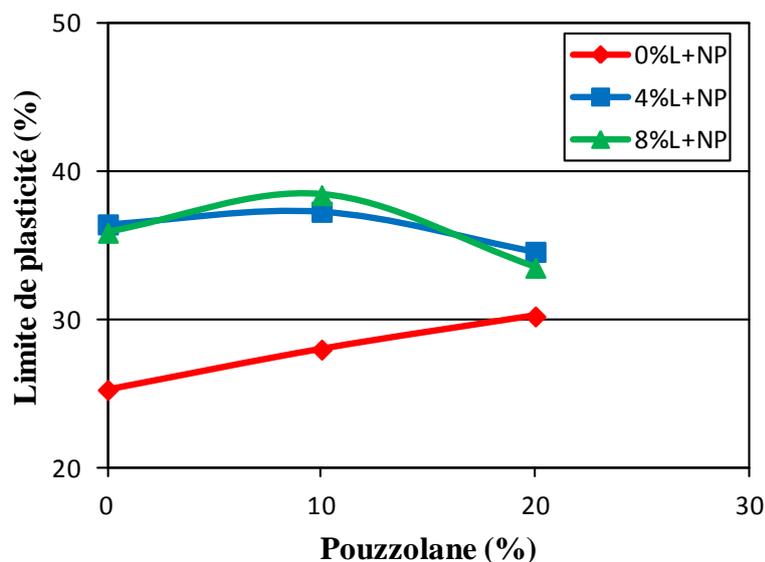


Fig. 5. 2- Effet des additifs sur la limite de plasticité de la vase.

D'après la figure 5.2, il est évident que l'ajout de la chaux a un effet sur la plasticité du sol étudié. On observe que 4% de la chaux a augmenté la limite de plasticité de la vase de 25% à 36%. Le même comportement a été observé par Khattab et al. (2008), où l'ajout de 2% de la chaux a fait augmenter considérablement la limite de plasticité du sol étudié.

Une augmentation considérable a été mentionnée dans les travaux de Rahman (1986) et Nalbantoglu (2006). L'augmentation immédiate de la limite de plasticité est due à la floculation des particules du sol. Par conséquent, la limite de plasticité est le meilleur indicateur du seuil de la chaux nécessaire pour atteindre la modification requise (Goswami et al., 2005). Osula. (1996) a observé que la limite de plasticité diminue avec la teneur en chaux et le temps de cure.

On constate aussi que l'utilisation de la pouzzolane seule a un effet marginal sur l'amélioration de la plasticité du sol. La même tendance a été observée par Al Rawas (2006), où la limite de plasticité a augmenté légèrement avec une teneur de la pouzzolane (Sarooj) de 12%. Sreekrishnavilasam et al. (2005) ont observé que la limite de plasticité augmente légèrement avec la teneur de la poussière de four de ciment pour les trois types de sol et pour les deux types de poussière de four de ciment ajoutés.

Pour l'effet de la combinaison de la pouzzolane naturelle et de la chaux sur la limite de plasticité de la vase à améliorer, on a constaté que la pouzzolane naturelle aux différentes teneurs avait un effet notable sur la limite de plasticité. Pour la combinaison de 4%C+10%PN on observe une augmentation considérable de la limite de plasticité de la vase, au delà de 10% de pouzzolane naturelle, il y a une diminution marginale dans la limite de plasticité. Le même comportement est observé pour la combinaison de 8%C+10%PN.

Choobatsi et al. (2010) ont trouvé que la combinaison de 6% de Ciment + 3% cendre de gousse de riz a diminué la limite de plasticité du sol étudié, et la combinaison de 6% de Ciment avec des pourcentages supérieur de 3% de cendre de gousse de riz a augmenté la limite de plasticité.

5.2.3 Variation de l'indice de plasticité

La variation de l'indice de plasticité du sol fin traité avec les différents stabilisants est présentée sur la figure 5.3.

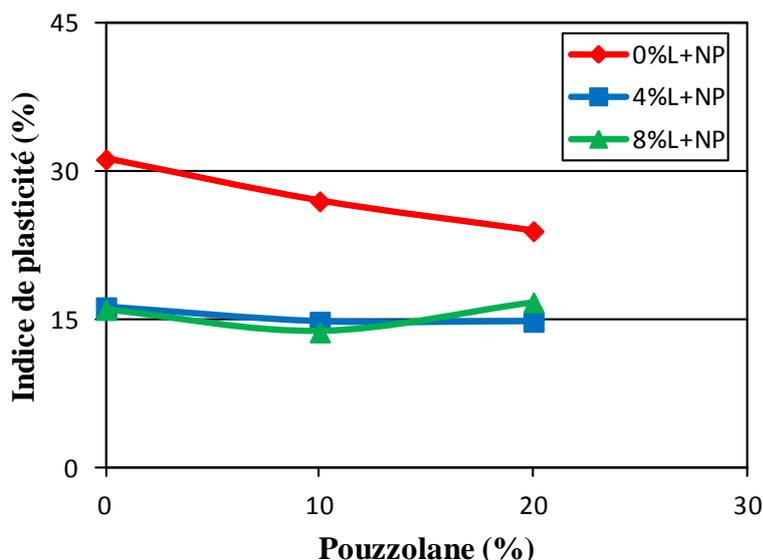


Fig. 5.3- Effet des additifs sur l'indice de plasticité de la vase.

La diminution de l'indice de plasticité indique une amélioration de la maniabilité du sol. Comme indiqué sur la figure 5.3, la vase a montré une diminution immédiate de l'indice de plasticité après l'addition de la chaux. Il est évident que l'addition de 8% de la chaux est suffisante pour augmenter la maniabilité de la vase étudiée, en réduisant l'indice de plasticité avec un taux de 50%.

Le même comportement a été observé par Harichane et al. (2011a) où l'indice de plasticité a diminué de 24% à 19% pour une teneur en chaux de 8%. De plus, la même tendance a été observée par Nalbantoglu (2006) où 7% de chaux a fait diminuer l'indice de plasticité avec un taux de 70%. Plusieurs chercheurs [Attoh Okine, 1995; Bagherpour et al., 2003; Sivapullaiah et al., 2003; Ansary et al., 2006; Khattab et al., 2008; Bozbey et al., 2010] ont montré la même tendance dans leurs travaux de recherche.

Concernant l'utilisation de la pouzzolane naturelle, il peut être noté qu'il y a une légère réduction de l'indice de plasticité pour une teneur de 20% de pouzzolane naturelle. Des résultats semblables ont été observés par Parsons et al. (2005) et Rahman (1986) où ils ont utilisé la cendre volante et la cendre des gousses de riz, respectivement.

L'utilisation de la combinaison "Chaux+Pouzzolane naturelle" a montré un effet considérable dans la réduction de l'indice de plasticité, où la combinaison de 8%C+10%PN a diminué considérablement l'indice de plasticité de la vase étudiée. Au delà de 10% de la pouzzolane naturelle, une légère augmentation a été observée.

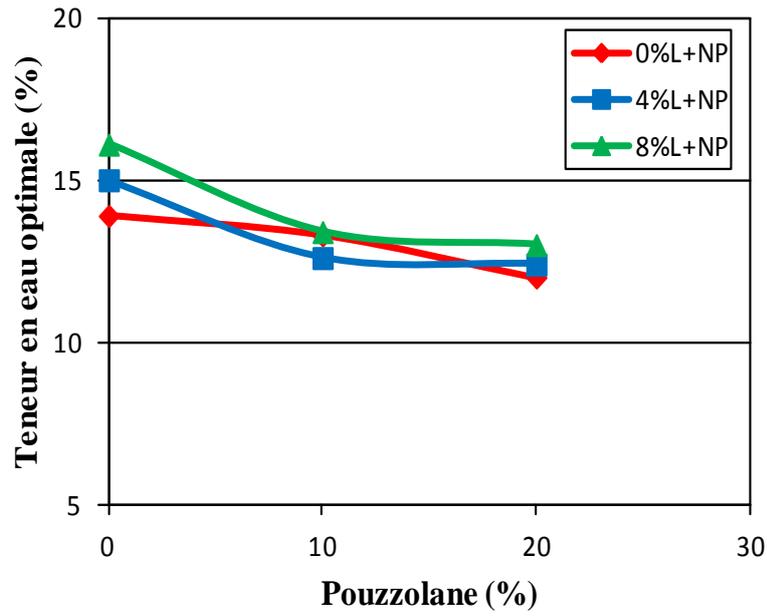
5.3 Variation des caractéristiques de compactage

Les résultats expérimentaux concernant les caractéristiques de compactage Proctor standard de la vase traitée sont présentés dans le tableau 5.2.

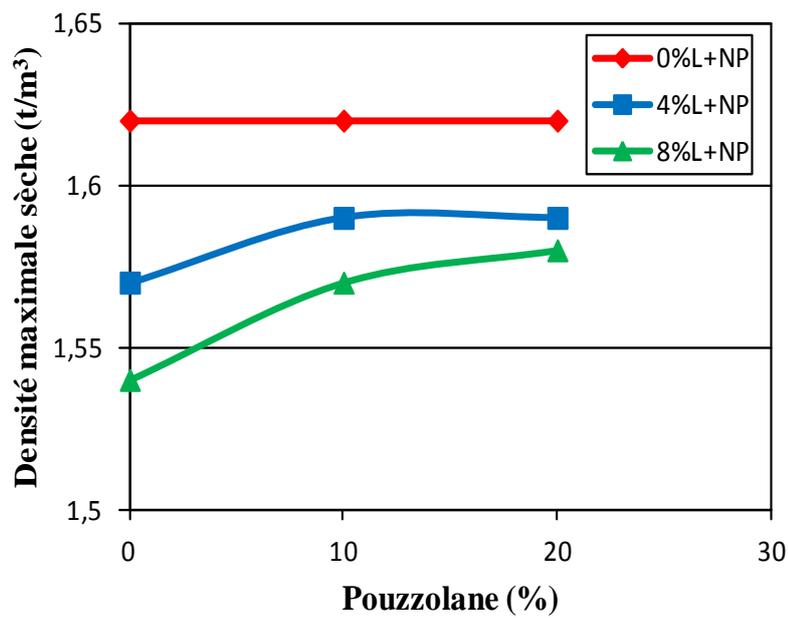
Tableau 5.2- Caractéristiques de compactage Proctor standard.

Echantillon	W_{op}	γ_{dmax}
P0L0	13,9	1,62
P0L4	15	1,57
P0L8	16,1	1,54
P10L0	13,3	1,62
P10L4	12,6	1,59
P10L8	13,4	1,57
P20L0	12	1,62
P20L4	12,4	1,59
P20L8	13	1,58

La figure 5.4 montre l'effet de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leurs combinaisons sur les caractéristiques de compactage (teneur en eau optimale et la densité sèche maximale) du sol argileux traité.



(a)



(b)

Fig. 5.4- Variation des caractéristiques de compactage de la vase traitée
a) teneur en eau optimale et b) la densité sèche maximale.

En ajoutant la chaux, la densité sèche maximale diminue et la teneur en eau optimale augmente. Un comportement similaire a été observé par différents chercheurs qui ont effectué des essais de compactage sur des sols argileux améliorés par la chaux [Ola, 1977; Rahman, 1986; George et al., 1992; Bell, 1996; Gay et al., 2000; Sivapullaiah et al., 2003; Hossain et al., 2007; Kavak et al., 2007; Khattab et al., 2008; Manasseh et al., 2008; Bozbey et al., 2010; Solanki et al., 2009; Harichane et al., 2011b].

Choobatsi et al. (2010) ont constaté que la variation du dosage en chaux de 0% à 6% augmente la teneur en eau optimale et réduit la densité sèche maximale.

L'explication de ce comportement est probablement une conséquence des raisons suivantes: 1) la chaux entraîne l'agrégation des particules par le procédé complexe d'échange cationique aboutissant à une modification de la granulométrie du sol et provoquant par conséquent les particules du sol à occuper de plus grands espaces (structure plus ouverte). 2) la densité spécifique de la chaux est généralement faible que celle des sols naturels testés. 3) les réactions pouzzolaniques entre les particules d'argile et la chaux dans les sols sont responsables de l'augmentation de la teneur en eau optimale vu que ce processus augmente l'affinité du sol à l'eau.

De plus l'augmentation de la teneur en eau optimale est due à la grande surface spécifique de la chaux additionnée, par contre la diminution de la densité sèche maximum est due au faible poids volumique de la chaux [Necmi et al., 2007].

Concernant l'addition de la pouzzolane naturelle, la figure 5.4 montre qu'il y a une influence marginale de la pouzzolane naturelle sur les caractéristiques de compactage de la vase traitée. Globalement, la stabilisation de la vase par l'addition de la pouzzolane naturelle combinée à la chaux a montré une diminution de la teneur en eau optimale et une augmentation de la densité sèche maximale. Plusieurs chercheurs [Ola, 1977; Rahman, 1986; Basha et al., 2005; Harichane et al., 2011c] ont révélé que le changement de la densité sèche maximale se produit en raison de la dimension des particules et des densités spécifiques du sol et des ajouts.

5.4 Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression sont présentés dans le tableau 5.3 pour différentes périodes de cure et différentes teneurs des stabilisants utilisés.

Tableau 5.3- Résultats de la résistance à la compression.

Echantillon	Résistance à la compression Rc (KPa)			
	1 Jour	7 Jours	28 Jours	90 Jours
P0L0	247	250	249	255
P0L4	320	410	618	845
P0L8	344	420	633	935
P10L0	260	276	303	415
P10L4	370	500	650	980
P10L8	390	569	695	1020
P20L0	277	300	315	480
P20L4	410	610	716	1150
P20L8	424	621	765	1200

Les résultats de l'effet de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leurs combinaisons sur la résistance à la compression sont présentés sur la figure 5.5.

L'addition de la chaux fait augmenter la résistance à la compression des échantillons de la vase stabilisée. Ceci est en parfaite concordance avec d'autres résultats de travaux de recherche antérieurs effectués par différents chercheurs [Ola, 1977; Rahaman, 1986; Attoh-Okine, 1995; Sivapullaiah et al., 2003; Osinubi et al., 2006; Hossain et al., 2007; Khattab et al., 2007; Lin et al., 2007; Khattab et al., 2008; Manasseh et al., 2008; Sharma et al., 2008; Bozbey et al., 2010; Solanki et al., 2009].

L'augmentation de la résistance à la compression est due au changement de la structure et de la minéralogie à court terme et à la cimentation des particules produite avec le temps. La première modification instantanée à 1 et 7 jours induit des augmentations faibles de la résistance et de ce fait nécessite un temps suffisant pour la réaction pouzzolanique. 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].

Par exemple et pour une teneur de la chaux de 8%, le sol a développé une résistance à la compression d'environ 633 KPa et 935 KPa après 28 et 90 jours de cure respectivement. En revanche, l'addition de la pouzzolane naturelle n'a pas influé notablement sur la résistance à la compression de la vase améliorée.

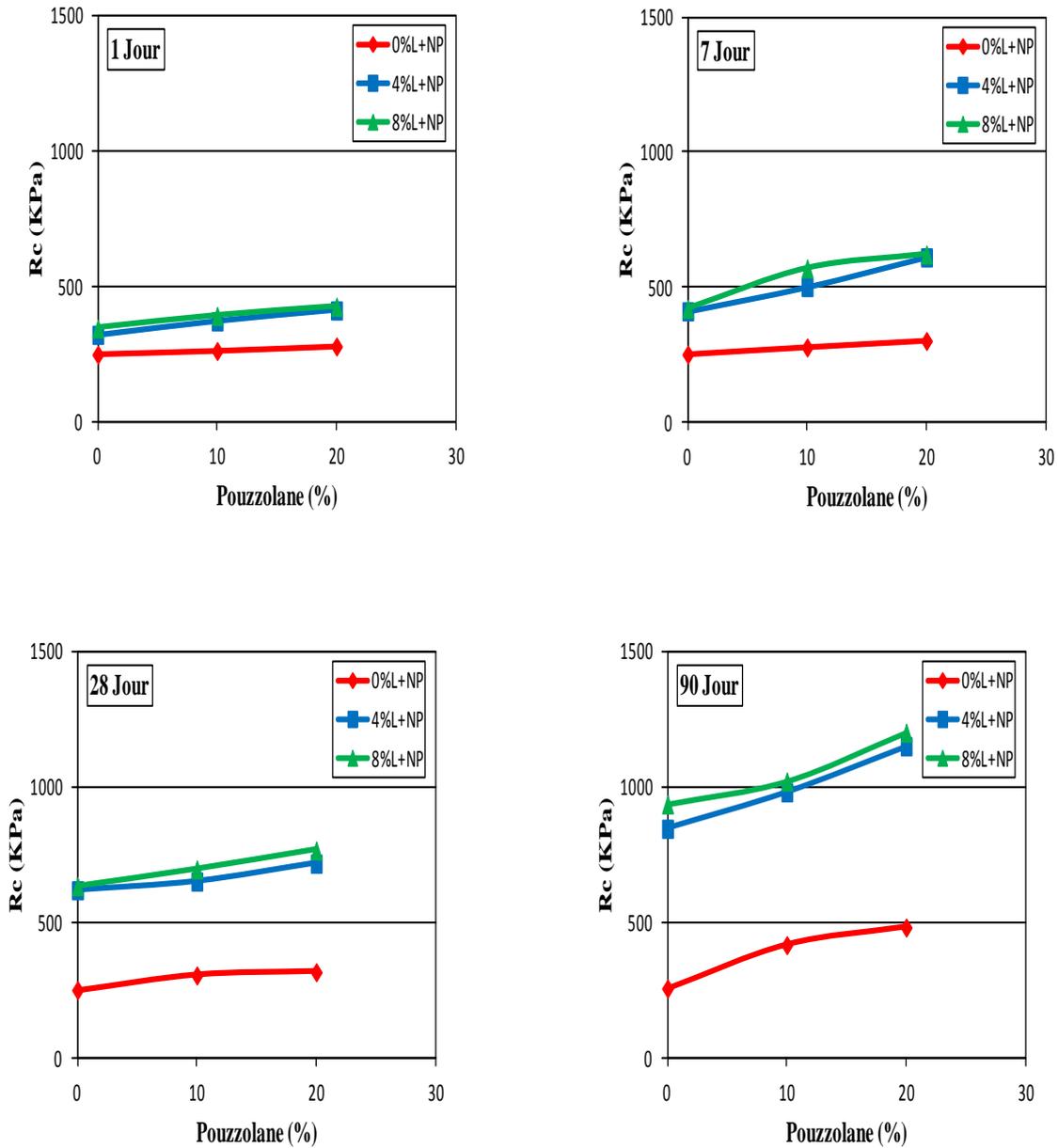


Fig. 5.5- Influence des stabilisants sur la résistance à la compression.

Pour la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle, on observe que la résistance se développe rapidement avec l'addition de la PN jusqu'à l'atteinte d'un état optimum, l'optimum a été observé à 20% de PN et 8% de chaux. La période de cure a une influence importante sur le développement de la résistance à la compression de la vase étudiée. L'optimum de la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la période de cure. Des gains de résistance de 200% et de 350% ont été obtenus avec l'utilisation de 8% de chaux et avec la combinaison de 8%C+20%PN respectivement. Le gain dans la résistance de la vase-chaux est premièrement dû à la réaction pouzzolanique entre la silice et l'alumine de la vase, et la chaux pour former divers types d'agents de cimentation. Par l'introduction de la PN dans le mélange vase-chaux, 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 la vase 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.

Cette performance des sols stabilisés avec la combinaison Pouzzolane Naturelle+Chaux est due à la propriété pouzzolanique du mélange et à l'utilisation de la silice et l'alumine de la pouzzolane naturelle par le calcium de la chaux pour former des agents de cimentation qui vont lier ensemble les particules de la vase. Vu que la chaux est plus chère que la pouzzolane naturelle, l'utilisation de la combinaison Pouzzolane Naturelle+Chaux mène à des travaux d'amélioration de faibles coûts.

5.5 Résistance au cisaillement

Les résultats de l'effet de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leurs combinaisons sur les contraintes de cisaillement de la vase traitée sont présentés sur la figure 5.6.

La vase naturelle et celle traitée avec la pouzzolane naturelle seule présentent un comportement ductile et ceci pour les différentes pressions de confinement appliquées. Cependant, les échantillons des vases traitées avec la chaux où la combinaison Chaux+Pouzzolane naturelle présentent un comportement fragile. Un comportement similaire a été observé par Bagherpour et al. (2003) ; Gay et al. (2000) ; Choobbasti et al. (2010) et Okbague et al (2007). Les résultats de l'effet des stabilisants sur le déviateur sont présentés sur la figure 5.7.

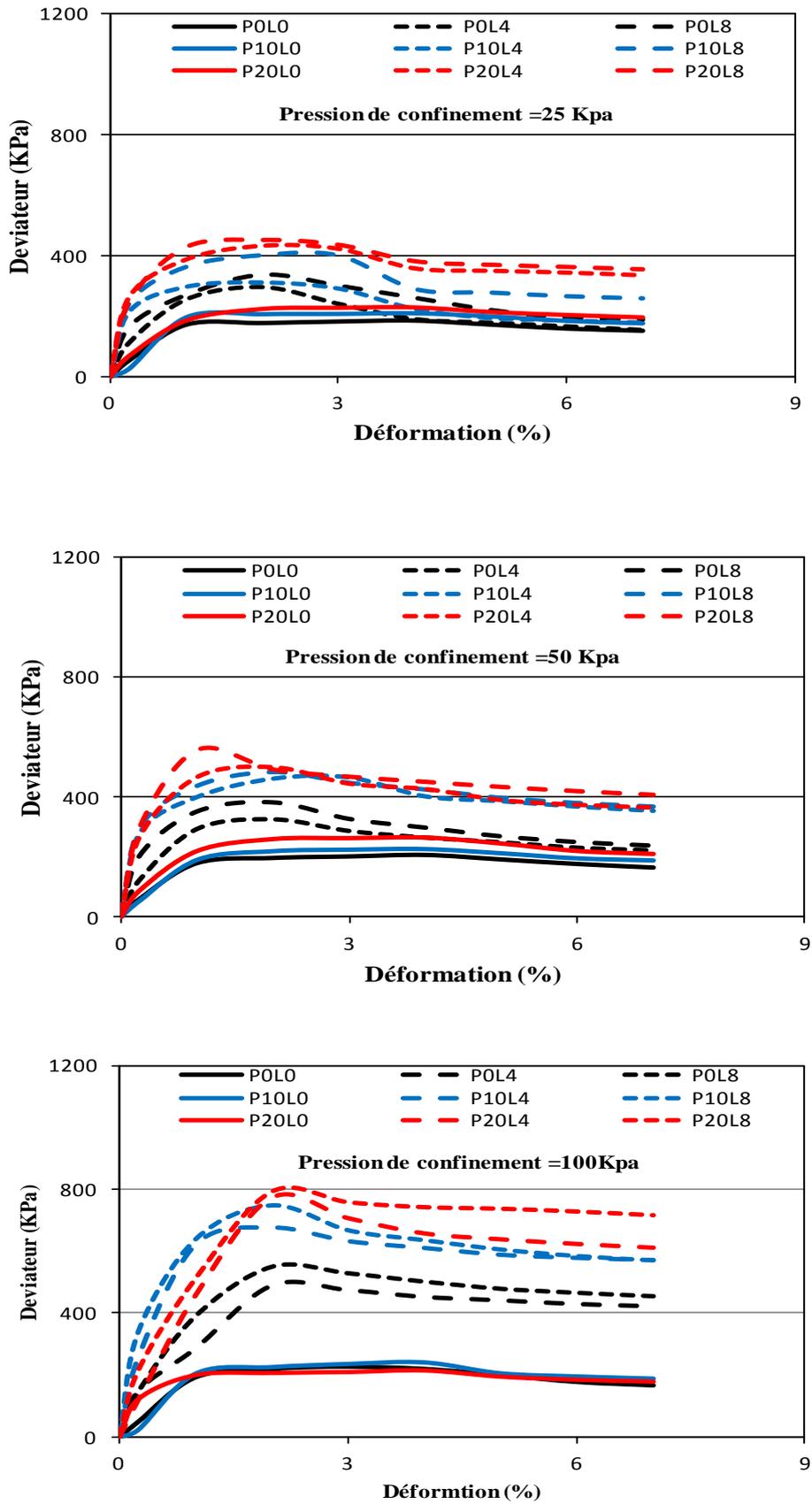


Fig. 5.6- Influence des ajouts minéraux sur la résistance au cisaillement de la vase.

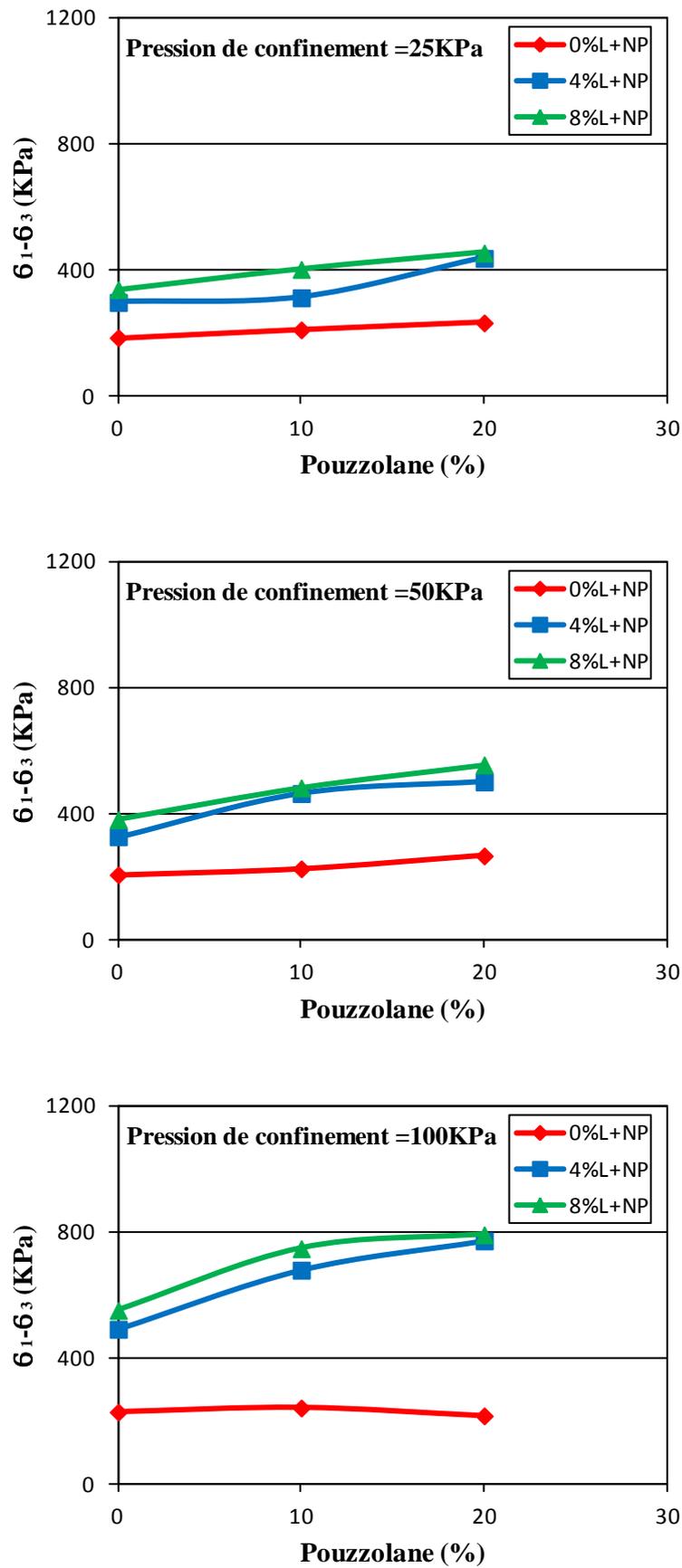


Fig. 5.7- Influence des ajouts minéraux sur le déviateur de la vase.

L'addition de la chaux a un effet considérable sur le déviateur pour les trois pressions de confinement. On remarque ainsi qu'au delà d'une teneur en chaux de 4%, la variation du déviateur n'est que peu significative. L'addition de la pouzzolane naturelle seule à la vase présente un effet marginal sur le déviateur. Par ailleurs et pour les échantillons améliorés avec la combinaison Chaux+Pouzzolane naturelle, une augmentation notable du déviateur est observée. La combinaison 4%C+20%PN présente donc la combinaison optimale qui montre un déviateur maximal pour les trois pressions de confinement.

5.6 Paramètres du cisaillement

Les résultats concernant les paramètres de cisaillement à savoir la cohésion et l'angle de frottement interne de la vase améliorée sont présentés dans le tableau 5.4.

Tableau 5.4- Résultats des paramètres de cisaillement.

Désignation	Cohésion C (kPa)	Angle de frottement Φ(°)
P0L0	32,2	18,24
P0L4	46,2	27,03
P0L8	39,5	41,43
P10L0	35,1	25,43
P10L4	38,3	46,52
P10L8	45,1	43,75
P20L0	38,2	31,89
P20L4	50,4	40,26
P20L8	54,6	41,97

5.6.1 Variation de la cohésion

La variation de la cohésion en fonction des différents stabilisants est présentée sur la figure 5.8.

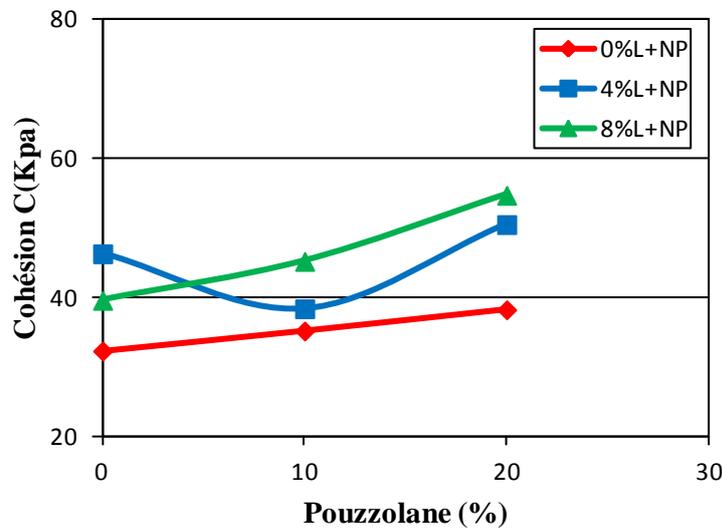


Fig. 5.8- Evolution de la cohésion de la vase pour différentes teneurs des stabilisants.

La figure 5.8 montre une augmentation significative de la cohésion des échantillons traités avec 4% de chaux. Au delà de cette teneur, une réduction considérable de la cohésion est observée et particulièrement pour les échantillons traités avec 8% de chaux. Un comportement similaire a été observé par différents chercheurs [Gay et al., 2000 ; Harichane et al., 2011b].

Ceci peut s'expliquer par le fait de l'agrégation des particules du sol traité et par conséquent le sol se comporte comme un sol grenu fortement lié [Ola, 1977]. D'autres chercheurs [Lees et al., 1982; Bell, 1989; Okagbue et al., 2000] ont souligné l'influence des réactions pouzzolaniques de cimentation qui se produisent plus tard c'est-à-dire à des durées de cure tardives.

L'addition de la pouzzolane naturelle seule au sol argileux présente une augmentation marginale de la cohésion pour les échantillons traités avec 10% et 20% de pouzzolane naturelle.

Par ailleurs, les échantillons traités avec la combinaison 4%Chaux+ 10%Pouzzolane naturelle présentent une diminution notable de la cohésion, au delà de 10% de pouzzolane naturelle une augmentation considérable de la cohésion est observée. Cependant, pour la combinaison 8%Chaux+Pouzzolane naturelle on remarque une augmentation continue de la cohésion.

Un comportement similaire a été reporté par différents chercheurs [Muntohar et al., 2000; Al Hassan et al., 2007; Sezer et al., 2006; Harichane et al., 2011b].

5.6.2 Variation de l'angle de frottement interne

La variation de l'angle de frottement interne en fonction des différents stabilisants est présentée sur la figure 5.9.

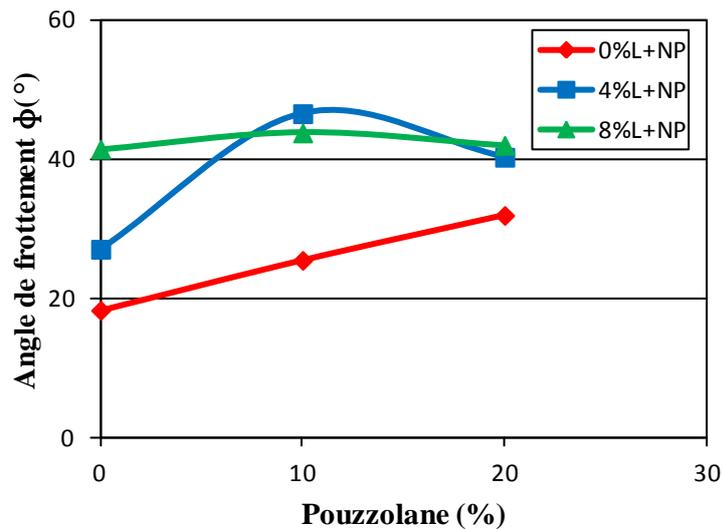


Fig. 5.9- Evolution de l'angle de frottement interne de la vase pour différentes teneurs des stabilisants.

La figure 5.9 montre une augmentation significative de l'angle de frottement interne des échantillons traités avec 8% de chaux. Une tendance similaire est postulée par Sezer et al. (2006). Par ailleurs, l'addition de la pouzzolane naturelle seule aboutit à une augmentation peu significative de l'angle de frottement interne. Un comportement similaire a été observé par Harichane et al. (2011b).

Pour les échantillons stabilisés avec la combinaison Chaux+-Pouzzolane naturelle des comportements opposés ont été observés. Une augmentation considérable de l'angle de frottement interne est observée pour les échantillons traités avec la combinaison 4%C+ 10%PN, au delà de 10% de pouzzolane naturelle une diminution significative est observée. Ceci nous mène à considérer que la teneur en pouzzolane naturelle de 10% est considérée comme dosage optimal. Pour une teneur de 8%Chaux+10% de pouzzolane naturelle une amélioration marginale de l'angle

de frottement interne est remarquée, et pour 20% de pouzzolane naturelle une diminution marginale est observée. L'amélioration des paramètres de cisaillement est due probablement à l'activité pouzzolanique de la combinaison Chaux+Pouzzolane naturelle.

5.7 Conclusion

Plusieurs essais ont été effectués au laboratoire pour étudier l'effet de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leurs combinaisons sur les propriétés physiques et mécaniques de la vase étudiée. A la lumière de ce qui précède, les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- L'utilisation de la pouzzolane naturelle seule n'a aucun effet sur les limites d'Atterberg, par contre l'utilisation de la chaux seule où la combinaison de la chaux avec la pouzzolane naturelle ont montré une amélioration significative de la plasticité de la vase étudiée ;
- L'utilisation de la chaux seule diminue la densité sèche maximale et augmente la teneur en eau optimale de la vase, par contre l'ajout de la pouzzolane naturelle seule à la vase étudiée a un effet marginal sur les paramètres de compactage. La combinaison Chaux+Pouzzolane naturelle fait diminuer la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale.
- L'addition de la chaux ou combinée avec la pouzzolane naturelle améliorent considérablement la résistance à la compression à court et à long terme alors que l'utilisation de la pouzzolane naturelle seule montre un faible développement de la résistance à la compression.
- L'utilisation de la chaux améliore considérablement la cohésion et l'angle de frottement interne de la vase étudiée, où l'utilisation de la pouzzolane naturelle seule montre une faible amélioration des paramètres de cisaillement. La combinaison Chaux+Pouzzolane naturelle fait augmenter les paramètres de cisaillement sauf que pour la combinaison 4%C+10%PN une diminution des valeurs des paramètres de cisaillement est observée.

1. Conclusions générales

La plupart des sols requièrent souvent une certaine stabilisation afin d'augmenter leur stabilité mécanique et d'améliorer leur performance. En plus, l'évolution actuelle du contexte socio-économique dans le domaine des ouvrages en terre est marquée par la nécessité de réutiliser au maximum les matériaux situés dans l'emprise des projets, même ceux dont les caractéristiques de mise en œuvre, notamment mécaniques, sont très faibles. Il est cependant possible d'améliorer ces matériaux par un traitement à la chaux, au ciment et/ou aux différents ajouts.

Comme le sol est une bonne source d'aluminium, les effets du traitement par la chaux peuvent être améliorés en grande partie si le manque apparent de la silice peut être complété d'une façon adéquate par l'addition de la pouzzolane naturelle qui est d'ailleurs riche en silice réactive.

Bien que plusieurs chercheurs aient démontrés qu'il est possible de traiter efficacement les mauvais sols avec de la chaux, du ciment et/ou combinés aux différents ajouts minéraux, l'impact économique et environnemental de certains sous produits industriels (classés comme ajouts cimentaires) a mis en cause dans bien de cas cette efficacité. Pour tenter d'y remédier à cette situation, une investigation pour la recherche des ajouts cimentaires à base de roche naturelle inoffensifs à l'environnement et acceptés économiquement doit être entamée afin d'évaluer leurs effets sur les propriétés géotechniques des mauvais sols à traiter.

L'étude a été entreprise pour étudier le comportement physique et mécanique de la vase dragué du barrage d'oued el fouda traité à la chaux et à la pouzzolane naturelle par une validation d'une campagne expérimentale au laboratoire. Les paramètres étudiés sont multiples et variés. Il s'agit notamment des pourcentages des constituants (vase, chaux et/ou pouzzolane), de la méthode de préparation des échantillons ainsi que les caractéristiques de chaque essai.

Après cette étude, on peut tirer les principaux résultats suivants:

Les limites d'Atterberg du sol peuvent changer considérablement par l'addition de la chaux seule, où on a observé une diminution des limites de liquidité et augmentation des limites de plasticité et une diminution significative de l'indice de plasticité. L'addition au sol de la pouzzolane naturelle seule a un effet marginal sur les limites d'Atterberg. On a observé une diminution de la limite de liquidité et une augmentation de la limite de plasticité.

Quand la pouzzolane naturelle et la chaux sont ajoutées au sol, le résultat est un changement appréciable dans le comportement de plasticité. On peut constater pour la combinaison

8%Chaux+10%Pouzzolane naturelle une diminution de la limite de liquidité et une augmentation de la limite de plasticité. Une réduction significative de l'indice de plasticité est observée.

La chaux fait diminuer la densité sèche maximale ce qui n'est pas le cas quand la pouzzolane naturelle est utilisée où on remarque une influence marginale. Pour la combinaison Chaux+Pouzzolane naturelle le même comportement est observé que pour la chaux utilisée seule. La chaux fait augmenter la teneur en eau optimale. Une diminution marginale est observée quand la pouzzolane naturelle est utilisée. La combinaison Chaux+Pouzzolane naturelle fait diminuer la teneur en eau optimale.

L'addition de la chaux améliore la résistance à la compression spécialement à long terme alors que le développement de la résistance à la compression est faible avec l'addition de la pouzzolane naturelle. La combinaison Chaux+Pouzzolane naturelle améliore considérablement la résistance à la compression du sol argileux stabilisé. De plus, cette combinaison produit des résistances plus élevées que celles où la chaux ou la pouzzolane naturelle sont utilisées seules.

L'utilisation de la combinaison Chaux+Pouzzolane naturelle fait augmenter la contrainte de cisaillement maximale. Une augmentation considérable dans les paramètres de cisaillement des échantillons traités à la chaux est observée.

2. Recommandations futures

Dans une perspective de recherche, plusieurs domaines méritent au moins d'être approfondis:

- ✓ étude de l'influence d'autres types d'ajouts minéraux disponibles en Algérie sur les propriétés physiques et mécaniques de la vase ;
- ✓ étude de la minéralogie, la toxicité et la microstructure de la vase améliorée;
- ✓ étude de la durabilité de la vase traitée ;
- ✓ étude de la modélisation numérique du comportement de la vase traitée ;
- ✓ évaluation de l'efficacité du traitement sur site.

Références Bibliographiques

- 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., Mustapha, M.,** (2007). Effect of rice husk ash on cement stabilized laterite. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, Vol. 11, pp. 47-58.
- Al-Rawas, A.A., Hago, A.W., and Al-Sarmi, H.,** (2005). Effect of Lime, Cement and Sarooj (Artificial Pozzolana) on the Swelling Potential of an Expansive Soil from Oman. *Building and Environment*, Vol. 40, pp. 681-687.
- Altun, S., Sezer, A., Erol, A.,** (2009). The effects of additives and curing conditions on the mechanical behavior of a silty soil. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 56, pp. 135-140.
- 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.
- ASTM,** (2004) Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.08, American Society for Testing and Materials, Easton, Philadelphia, MD.
- 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. *Environment Geology*, vol. 55, pp. 781-788.
- Baghdadi, Z.A.,** (1990). Utilization of kiln dust in clay stabilization, *Journal of King Saud University 11: Engineering Sciences*, Vol. 2, pp. 153-163
- Bagherpour, I. and Choobbasti, A.J.,** (2003). Stabilization of Fine-grained Soils by Adding Microsilica and Lime or Microsilica and Cement. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 8, Bundle B, pp. 1-10.
- Basha, E.A., Hashim, R., Muntohar, A.S.,** (2003). Effect of the cement-rice husk ash on the plasticity and compaction of soil. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 8, Bundle A, pp. 1-8.
- Bhattacharja, S., and Bhattya, J.I.,** (2003). Comparative performance of portland cement and lime stabilization of moderate to high plasticity clay soils. *RD125: Portland Cement Association, USA*, 26 Pages.

- Bell, F.G.,** (1978). Méthodes de traitement des sols instables. Editions Eyrolles, France, 240p.
- Bell, F.G.,** (1989). Lime stabilization of clay soils. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Vol. 39, pp. 67-74.
- Bell, F.G.,** (1994). An Assessment of Cement-PFA and Lime-PFA Used to Stabilize Clay-Size Materials. Bulletin of 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.
- Bozbey, I., Garaisayev, S.,** (2010). Effects of soil pulverization quality on lime stabilization of an expansive clay. Earth and Environmental Science, Vol. 60, N°6, pp. 1137-1151.
- Boutouil, M., Levacherd, D.,** (2000) Traitement et valorisation des vases de dragages par solidification/stabilisation: état de l'art. VI ème Journée National de Génie Civil-Génie Côtier, Caen, France, 17-19 Mai 2000, pp. 367-373.
- Chew, S.H., Kamruzzaman, A.H.M., Lee, F.H.,** (2004). Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, N°7, pp. 696-706.
- Delphine, H., Michel A.,** (2002) Rapport : Historique national des opérations de curage et perspectives. « études sur l'eau en France ministère de l'écologie et du développement durable, Agence de l'eau Artois-Picardie.
- Dubois, V.,** (2006). Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins. Thèse de l'Université d'Artois. 285 p.
- 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.
- Eren, S., Filiz, M.,** (2009). Comparing the conventional soil stabilization methods to the consoled system used as an alternative admixture matter in Isparta Daridere material. Construction and Building Materials, Vol. 23, N°7, pp. 2473-2480.
- Gay, G., Schad, H.,** (2000). Influence of cement and lime additives on the compaction properties and shear parameters of fine grained soils. Otto-Graf Journal, Vol. 11, pp. 19-31.
- George, S.Z., Ponniah, D.A., 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., 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.

Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S., Grine, K., (2011a). Use of natural pozzolana and lime for stabilization of cohesive soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 29, pp. 759-769.

Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S., (2011b). Effect of the combination of lime and natural pozzolana on the compaction and strength of soft clayey soils: a preliminary study. *Earth and environmental sciences*, Vol. 66, pp. 2197-2205.

Harichane, K., Ghrici, M., Khebizi, W., Missoum, H., (2011c). Effect of the combination of lime and natural pozzolana on the durability of clayey soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 15, pp. 1194-1210.

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

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

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

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

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

Kenai, S., Bahar, R., Benazzoug, M., (2006). Experimental analysis of the effect of some compaction methods on mechanical properties and durability of cement stabilized soil. *Journal of Materials Science*, Vol. 41, pp. 6956-6964.

Khatab, S.A.A., Al-Juari, K.A.K., Al-Kiki, I., (2008). Strength, durability and hydraulic properties of clayey soil stabilized with lime and industrial waste lime. *Al-Rafidain Engineering*, Vol. 16, N°1, pp. 102-116.

Khatab, S.A.A., Al-Mukhtar, M., Fleureau, J.M., (2007). Long-term stability characteristics of a lime-treated plastic soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, N°4, pp. 358-366.

Khebizi, W., (2011). Effet de la combinaison de la pouzzolane naturelle et de la chaux sur la durabilité des sols argileux. Mémoire Magister, Université Hassiba Benbouali de Chlef, 121p.

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

Lasledj, A., (2009). Traitement des sols argileux à la chaux: processus physico-chimique et propriétés géotechniques. Thèse Doctorat, Université d'Orléans. ftp://ftp.univ-orleans.fr/theses/abdelmadjid.lasledj_1914.pdf

Lopez-Lara, T., Hernandez, Zaragoza, J.B., Serrano Gutierrez, G.R., Castano, M.V., (2005). Study of Curing Time Of Stabilized Soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 8, pp. 1-8.

Mahi Tabet -Aoul (2000). Les changements d'utilisation et de couvert des sols et les ressources en eau : Association pour la Recherche sur le Climat et l'Environnement (ARCE), BP 4250, Ibn Rochd, 31037, Oran (Algerie).

Manasseh, J., Olufemi, A.T., (2008). Effect of Lime on Some Geotechnical Properties of Igumale Shale. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 13, pp.1-12.

Mellal, F., (2010). Etude du comportement physicochimique et mécanique d'un remblai routier marneux amélioré par la chaux éteinte : cas de l'autoroute Est-Ouest tronçon Oued Fodda /Khemis Miliana. Mémoire Magister, Université Hassiba Benbouali de Chlef, 110 p.

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

Miller, G.A., Azad, S., (2000). Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust. *Construction and Building Materials*, Vol. 14, pp. 89-97.

Mu'Azu, M.A., (2007). Influence of compactive effort on Bagasse ash with cement treated lateritic soil. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, Vol. 10, pp. 79-92.

Muntohar, A.S., (2005). The influence of molding water content and lime content on the strength of stabilized soil with lime and rice husk ash. *Civil Engineering Dimension*, Vol. 7, pp. 1-5.

Muntohar, A.S., Hantoro, G., (2000). Influence of rice husk ash and lime on engineering properties of a clayey subgrade. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 5, pp. 1-9.

Nalbantoglu, Z., (2004). Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer. *Construction and Building Materials*, Vol. 18, pp. 377-381.

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

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

Natacha, S., (2005). Amélioration des sols. Licence IUP, Université de la réunion, 54 p.

Okagbue, C.O., Ocholor, O.H., (2007). The Potential of Cement-Stabilized Coal-Reject as a Construction Material. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, Vol. 66, PP. 143-151.

Okagbue, C.O., 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 Environment*, Vol. 58, pp. 107-113.

Osinubi, K.J., (2006). Influence of compactive efforts on lime-slag treated tropical black clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, N°2, pp. 175-181.

Osula, D.O.A., (1991). Lime modification of problem laterite. *Engineering Geology*, Vol. 30, pp. 141-154.

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., Milburn, J.P., (2004). Use of Cement Kiln Dust for Subgrade Stabilization. Kansas Department of Transportation, Final report No. KS-04-3, 65 pages.

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

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

PROULHAC.N, KER LANN, 2006 Rapport Final du Schéma Directeur de gestion et de valorisation des sédiments de dragage de Rouen et Tancarville. Département de La Gironde .Bassin d'Arcachon.

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

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

Sakr, M.A., Shahin, M.A., Metwally, Y.M., (2009). Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 27, N°1, pp. 105-113.

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

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

Serbah, B., (2011). Étude et valorisation des sédiments de dragage du barrage BAKHADDA Tiaret. Mémoire Magister, Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, 129 p.

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