

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur ET de la Recherche
Scientifique
Université Djilali Bouanaama de Khemis Miliana



**Influence de la présence de sulfates sur le
traitement du sol argileux par des ajouts
minéraux**

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Géotechnique

Faculté: Science de la Terre
Département: Science de la terre
Spécialité: Géotechnique

Présenté Par :

Nom: Marwana Aminou

Nom: Muangongo Ivanete

Jury

Président M_{me} Fillali Mira

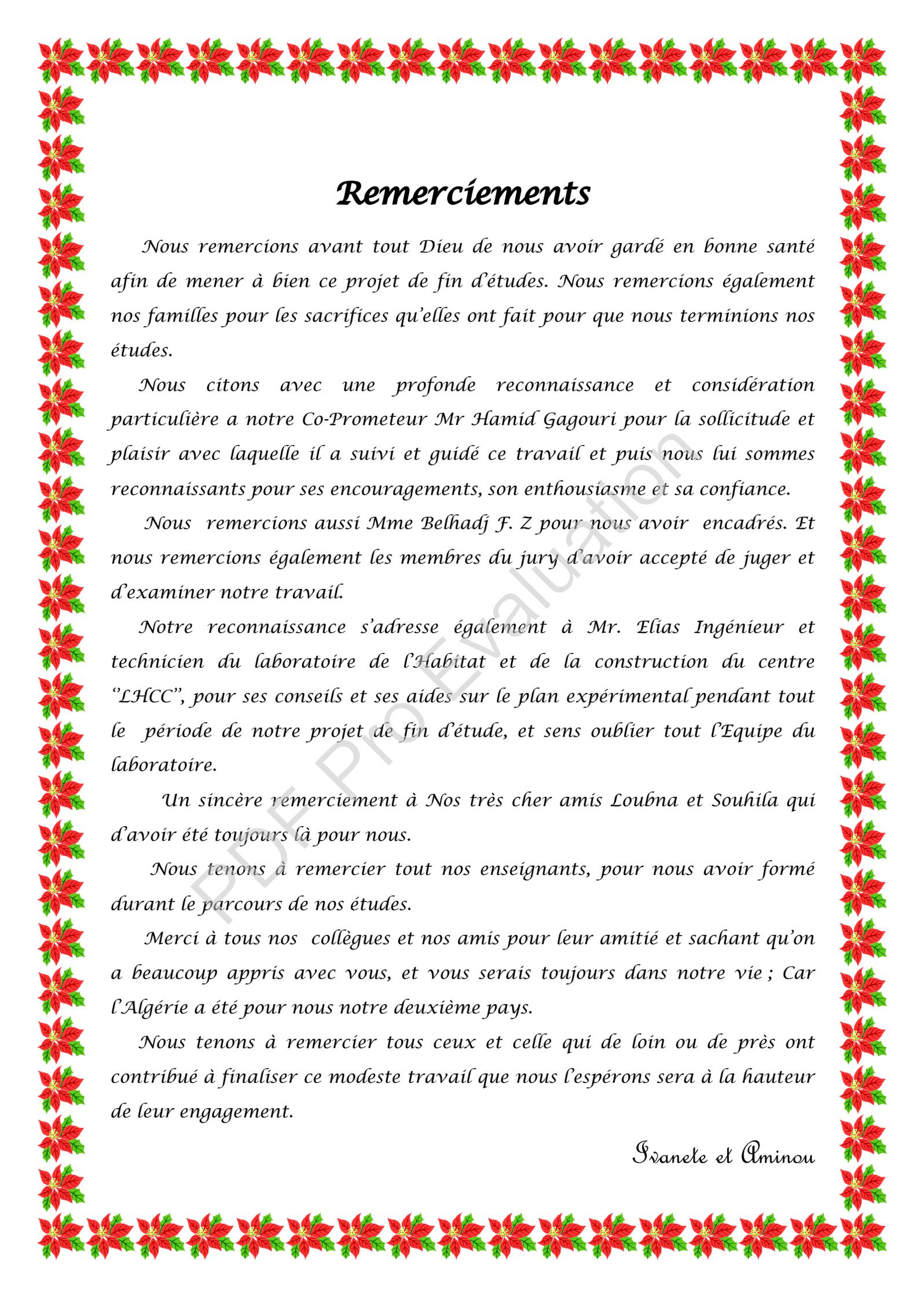
Promotrice..... M_{lle} Belhadj

Co-promoteur..... M_r Gadouri Hamid

ExamineursM_{me} Chouchene

ExamineursM_r

Année universitaire : 2014-2015



Remerciements

Nous remercions avant tout Dieu de nous avoir gardé en bonne santé afin de mener à bien ce projet de fin d'études. Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont fait pour que nous terminions nos études.

Nous citons avec une profonde reconnaissance et considération particulière a notre Co-Promoteur Mr Hamid Gagouri pour la sollicitude et plaisir avec laquelle il a suivi et guidé ce travail et puis nous lui sommes reconnaissants pour ses encouragements, son enthousiasme et sa confiance.

Nous remercions aussi Mme Belhadj F. Z pour nous avoir encadrés. Et nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté de juger et d'examiner notre travail.

Notre reconnaissance s'adresse également à Mr. Elias Ingénieur et technicien du laboratoire de l'Habitat et de la construction du centre "LHCC", pour ses conseils et ses aides sur le plan expérimental pendant tout le période de notre projet de fin d'étude, et sans oublier tout l'Equipe du laboratoire.

Un sincère remerciement à Nos très cher amis Loubna et Souhila qui d'avoir été toujours là pour nous.

Nous tenons à remercier tout nos enseignants, pour nous avoir formé durant le parcours de nos études.

Merci à tous nos collègues et nos amis pour leur amitié et sachant qu'on a beaucoup appris avec vous, et vous serais toujours dans notre vie ; Car l'Algérie a été pour nous notre deuxième pays.

Nous tenons à remercier tous ceux et celle qui de loin ou de près ont contribué à finaliser ce modeste travail que nous l'espérons sera à la hauteur de leur engagement.

Idanele et Aminou

Dédicace

D'abord je tiens à consacrer Le Tout-Puissant de m'avoir donné la vie, la fois, la patience et le courage pour arriver là.

Cette mémoire, avant tout je la dédie à celui que tout abdiqué pour moi, a celle qu'a laisse de vivre sa vie pour la mienne, a celle qu'a été Mère et Père au même temps, à celle qu'à donner tout son temps pour me donné l'éducation et pour me voir grandir avec sante, a celle que malgré la distance a été très proche et a accompagne mes pire et bon moment ... Ma très chère Mère

Je tiens aussi à dédie

A mes chères frères, le fait d'être toujours là pour moi, en me soutenant en tout ;

A mes amies qui avec le temps ont devenue mes sœurs ;

A mes cousines ;

A toute la promotion de la géotechnique 2009 et en particulier à mon Binôme Aminou Marwana, à toi qui à été très patient avec moi,

A mes très chères sœurs Yula, Marcia, Isabel et Mariana ;

Et à celui qu'a été toujours là pour moi... à lui qui ma jamais laisse dans le pire et bon moment... Mon meilleure ami et copain

Yuri Miguel

Isanele

Dédicaces

J'aimerai dédier ce travail à ma mère et à mon père. C'est une faveur d'الله que de me retrouver au sein de la famille de ces deux êtres. Qu'الله les bénisses et qu'il leur accorde son pardon dans l'au-delà.

Il est aussi dédier à la famille proche et lointaine, les amis, connaissances..., Chacune des personnes que j'ai rencontrées dans ma vie a contribué à me faire comprendre en grande partie le sens des choses qui étaient les plus importantes.

Hamdoullah.

Résumé

La demande en matériaux de bonne qualité constitue une contrainte économique inévitable pour satisfaire les besoins techniques des constructions de telle sorte à remplir les conditions normatives exigées pour leur réalisation. Actuellement, le recours à l'utilisation des matériaux locaux de faibles caractéristiques est devenu une solution envisageable. Les sols présentant des caractéristiques insuffisantes, ou voire médiocres, peuvent être améliorés chimiquement en utilisant des ajouts cimentaires. Néanmoins, la présence de certains éléments perturbateurs de prise (sulfates, nitrates, chlorures, phosphates, matières organiques...etc.) peut conduire à l'échec d'un traitement voire exclure certains types de sols du processus d'amélioration. Une étude expérimentale a été effectuée concernant l'effet apporté par le sulfate de sodium (Na_2SO_4) (0-4% par rapport à la masse du sol sec) sur le traitement d'une argile par l'utilisation de la chaux (0-8%), de la pouzzolane naturelle (0-20%) et de leur combinaison. Les échantillons de sols ont été préparés à la teneur en eau optimale et à la densité sèche maximale et conservés dans des sacs hermétiques où la résistance au cisaillement a été déterminée après une durée de cure de 7 à 60 jours. Les résultats obtenus ont montré qu'en absence du Na_2SO_4 , le sol argileux peut être stabilisé avec succès par la combinaison de la chaux et de la PN. Cependant, à court terme, la présence du Na_2SO_4 importe un effet significatif sur la résistance au cisaillement et les paramètres de cisaillement du sol stabilisé. Après 30 jours de cure pour 4% de Na_2SO_4 la résistance au cisaillement chute. Cette chute est attribuée à la formation d'ettringite qui dépend aussi de plusieurs facteurs: la teneur en sulfate du sodium, le type et la teneur en ajout utilisé, le temps de cure.

Mots-clés: Sol argileux, Chaux, Pouzzolane naturelle, Traitement, Sulfate de sodium, Résistance au cisaillement.

الملخص:

الطلب المتكرر لمواد البناء عالية الجودة يشكل واجبا اقتصاديا محتوما بغية تلبية الاحتياجات التقنية للبناء من أجل استيفاء الشروط السوية المطالب بها لتحقيق البناء. حاليا، الملاذ لاستخدام لوازم البناء المحلية بميزات ضعيفة أصبح حلا ممكنا. إن الأتربة تحوي ميزات غير كافية او ربما عديمة الجودة ولكن إمكانية تحسينها كيميائيا واردة وهذا باستعمال إضافات إسمنتية. عكسا من ذلك ، فوجود بعض العناصر المخلة بانتظام التربة والمتمثلة في (الكبريت، النترات، الكلور، الفسفات، المادة العضوية ...) قد تؤدي إلى معالجة تقتصر على بعض الأنواع من الأتربة في طور التحسين. في دراسة تجريبية أجريت حسب التأثير الذي تسببه كبريتات الصوديوم () بالنسبة لكتلة التربة الجافة) على معالجة الطين باستخدام الكلس ()، البزولان الطبيعي () ، و باستخدامهما معا. إن عينات الأتربة حضرت حسب المحتوى الأحسن من الماء وحسب الكثافة الجافة الأعظمية وحفظت في أكياس مغلقة أين حددت مقاومة بعد مدة من المعالجة تمتد من 7 إلى 60 يوم. النتائج المتحصل عليها أظهرت أنه في غياب () التربة الطينية يمكن لها أن تستقر بشكل ناجح بالتوفيق في استعمال الكلس والبزولان الطبيعي معا. مع هذا و بشكل مختص، وجود ، يحدث تأثيرا دالا على مقاومة و خصائص للتربة المستقرة. بعد 30 يوم من المعالجة من أجل من مقاومة تتراجع، هذا التراجع مسند إلى تشكل الذي يتعلق أيضا بكثير من العوامل : المحتوى من كبريتات الصوديوم، النوع والمحتوى من الإضافة المستعملة و زمن المعالجة.

الكلمات المفتاحية: تربة طينية، كلس، بزولان طبيعي، معالجة، كبريتات الصوديوم، مقاومة

Abstract

The request of good quality of materials is an inevitable economic restriction to meet the technical needs of buildings so as to fulfill the regulatory conditions required for their achievement. Currently, the use of local materials using low characteristics became an option. Soils with insufficient characteristics, or even mediocre, can be improved chemically using cementitious additions. Nevertheless, the presence of certain disturbing elements (sulphates, nitrates, chlorides, phosphates, organic materials ... etc.) can lead to treatment failure or even exclude certain types of soils in the improvement process. An experimental study was conducted on the effect provided by sodium sulfate (Na_2SO_4) (0-4% relative to the mass of dry soil) on the treatment of a clay by use of lime (0- 8%), natural pozzolan (0-20%) and their combination. Soil samples were prepared at the optimum moisture content and maximum dry density and stored in sealed bags which the shear strength was determined after a treatment period of 7-60 days. The results showed that in the absence of Na_2SO_4 , the clay soil can be successfully stabilized by a combination of lime and PN. However, in the short term, the presence of Na_2SO_4 imports a significant effect on the shear strength and stabilized soil shear parameters. After 30 days of curing for 4% Na_2SO_4 , shear strength drop. This drop is attributed to the formation of ettringite which also depends on several factors: the content of sodium sulfate, the type and content of addition used, the curing time

Key words: Clay soil, Lime, Natural Pozzolana, Treatment, Sodium Sulphate, Shear Strength.

Table des Matières

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Table des matières	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction Générale.....	1
Première partie : Revue Bibliographique	
Chapitre I : Caractérisation et conséquences des sols évolutifs	
I.1 Définition des sols évolutifs.....	5
I.2 Particularités d'un sol évolutif.....	5
I.3 Classification des sols.....	5
I.4 Les trois principaux sols évolutifs.....	7
I.4.1 Les argiles.....	7
I.4.2 Les limons.....	8
I.4.3 Les marnes.....	8
I.5 Définition des minéraux argileux.....	8
a) Unité tétraédrique.....	9
b) Unité octaédrique.....	9
I.5.1 Les argiles du groupe de la kaolinite.....	10
I.5.2 Les argiles du groupe des micas (les illites).....	10
I.5.3 Les argiles du groupe des smectites (la montmorillonite).....	11
I.6 Problèmes des sols argileux.....	11
I.6.1 Le gonflement.....	12
I.6.2 Le tassement.....	12
I.6.3 Glissements.....	12
I.7 Pathologies rencontrées dans les ouvrages.....	12

1.8 Conclusion.....	13
---------------------	----

Chapitre II : Méthodes d'amélioration des sols instables

II.1 Introduction.....	15
II.2 Techniques d'amélioration.....	15
II.2.1 Amélioration temporaire par congélation.....	15
II.2.2 Amélioration des sols par drainage.....	16
II.2.3 Le rabattement.....	17
II.2.4 Amélioration des sols par compactage.....	17
II.2.5 Amélioration des sols par renforcement des terres.....	17
II.2.5.1 Technique de la terre renforcée.....	17
II.2.5.2 Technique de la terre ancrée.....	18
II.2.6 Amélioration des sols par inclusion.....	19
II.2.6.1 Inclusion rigide.....	19
II.2.6.2 Colonnes ballastées.....	19
II.2.6.3 Colonnes à module contrôlé.....	21
II.2.7 Techniques d'injection.....	21
II.2.8 Amélioration des sols par addition d'ajouts minéraux.....	22
II.2.8.1 Mécanismes de stabilisation.....	22
II.2.8.1.1 la capacité d'échange cationique.....	23
II.2.8.1.2 Principe d'action de la chaux.....	23
a) Action immédiate.....	23
b) Action à long terme.....	24
II.2.8.1.3 Principe d'action du ciment.....	24
II.2.8.2 Risque de formation d'ettringite et thaumasite.....	25
II.2.8.2.1 Cas du traitement à la chaux.....	25
II.2.8.2.2 Cas du traitement au ciment.....	25
II.2.8.3 Effets des ajouts minéraux sur les propriétés des sols fins améliorés.....	26
II.2.8.3.1 Effets de la pouzzolane sur les sols améliorés.....	26

a) Effets de la pouzzolane naturelle sur la plasticité.....	26
b) Effets de la pouzzolane naturelle sur le compactage.....	26
c) Effets de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression.....	26
d) Effets de la pouzzolane naturelle sur la résistance au cisaillement.....	26
II.2.8.3.2 Effets du ciment sur les sols améliorés.....	27
a) Effets du ciment sur la plasticité.....	27
b) Effets du ciment sur le compactage.....	27
c) Effets du ciment sur la résistance à la compression.....	27
d) Effets du ciment sur la résistance au cisaillement.....	28
II.2.8.3.3 Effets de la chaux sur les sols améliorés.....	28
a) Effets de la chaux sur la plasticité.....	28
b) Effets de la chaux sur le compactage.....	29
c) Effets de la chaux sur la résistance à la compression.....	31
d) Effets de la chaux sur la résistance au cisaillement.....	31
II.3 Conclusion.....	34

Chapitre III : Types, origine des ajouts minéraux et des éléments perturbateurs

III.1 Introduction.....	26
III.2 Les ajouts minéraux.....	26
III.2.1 Ajouts minéraux inertes.....	26
III.2.1.1 Fillers calcaires.....	26
III.2.1.2 La poussière.....	26
III.2.2 Ajouts minéraux actifs.....	27
III.2.2.1 Ciment Portland.....	27
III.2.2.2 Laitier granulé de haut fourneau.....	27
III.2.2.3 La fumée de silice.....	27
III.2.2.4 La pouzzolane.....	27
a) Pouzzolane naturelle.....	27
b) Pouzzolane artificielle.....	28
III.2.2.5 la chaux.....	28

a) Chaux aériennes	28
b) Chaux hydrauliques naturelles (NHL).....	28
III.3 Les éléments perturbateurs.....	29
III.3.1 La matière organique.....	30
III.2.2 Les chlorures.....	31
III.3.3 Les nitrates.....	32
III.3.4 Les phosphates.....	33
III.3.5 Les sulfates.....	33
III.4 Conclusion.....	34

Chapitre IV : Etudes expérimentales, analyses et discussions

IV.1 Introduction.....	46
IV.2 Matériaux utilisés et préparation.....	46
IV.2.1 Sols naturels.....	46
IV.2.1.1 Lieu de prélèvement.....	46
IV.2.1.2 Préparation.....	46
IV.2.1.3 Identification et caractérisation.....	47
IV.2.2 Pouzzolane naturelle.....	48
IV.2.2.1 Lieu de prélèvement.....	48
IV.2.2.2 Préparation.....	49
IV.2.3 Chaux.....	49
IV.2.4 Produits chimiques.....	50
IV.3 Déroulement des essais.....	51
IV.3.1 Combinaison des échantillons et propriétés étudiées.....	51
IV.3.2 Résistance au cisaillement (UU).....	53
IV.3.2.1 Préparation des combinaisons et confection des éprouvettes.....	54
IV.3.2.2 Cisaillement des éprouvettes.....	56
IV.4 Exploitation de l'essai.....	57
IV.4.1 Résultats d'essai de cisaillement à la boîte.....	58

IV.4.1.1 Résistance au cisaillement.....	58
a) Evolution de la résistance au cisaillement en l'absence de Na ₂ SO ₄	58
b) Evolution de la résistance au cisaillement en présence de NaSO ₄ dans le sol.....	60
IV.4.1.2 Paramètres de cisaillement : cohésion et angle de frottement interne.....	63
a) Cohésion.....	64
b) Angle de frottement interne.....	65
IV.5 Conclusion.....	78

Conclusion générale et recommandations

Conclusion générale.....	80
Recommandations.....	81
Références bibliographiques.....	83

Annexes

Annexe 1.....	87
Annexe 2.....	88
Annexe 3.....	89
Annexe 4.....	90
Annexe 5.....	91

Liste des tableaux

Tableau N°	Titre du tableau	Page N°
Chapitre I		
Tab.1.1	Classification du MIT des sols suivants leurs dimensions (Costet J. et Sanglerat J.,1983)	5
Tab.1.2	Classification des sols selon leurs propriétés mécaniques (Costet J. et Sanglerat J.,1983)	6
Chapitre II		
Tab.2.1	Effets du ciment sur les limites d'ATTERBERG (Okagbue et Ocholor, 2007)	27
Tab.2.2	Effets de la chaux sur le compactage de la kaolinite, montmorillonite, quartz (Bell, 1996)	29
Chapitre III		
Tab.3.2	Types de chaux et leur notation (NF p15-104)	39
Tab.3.3	Les perturbateurs et leurs effets cités par le GTS, (LCPC-SETRA, 2000)	40
Chapitre IV		
Tab.5.1	Caractéristiques physico-mécaniques du sol (Harichane et al, 2011a)	47
Tab.5.2	Propriétés chimiques du sol (Harichane et al, 2011a)	48
Tab.5.3	Propriétés minéralogiques du sol (Harichane et al, 2011a)	48
Tab.5.4	Propriétés physico-chimiques des ajouts utilisés (Harichane et al, 2011b)	50
Tab.5.5	Caractéristiques physico-chimiques du sulfate de sodium	51
Tab.5.6	Combinaisons des échantillons des sols stabilisés et perturbés	52
Tab.5.7	Références de compactage des sols choisis (Harichane et al, 2011a)	53

Liste des figures

Figure N°	Titre de la figure	Page N°
Chapitre I		
Fig.1.1	Relation entre la limite de liquidité et l'indice de plasticité pour des sols caractéristiques	6
Fig.1.2	Diagramme de plasticité de Casagrande	7
Fig.1.3	Structure de base des argiles	9
Fig.1.4	Structure cristallographique du feuillet de la kaolinite	10
Fig.1.5	Structure cristallographique du feuillet de l'illite, de la smectite et de la vermiculite	11
Fig.1.6	Fissuration de structure due au sol gonflant	12
Fig.1.7	Fissuration d'une chaussée de sol instable	13
Chapitre II		
Fig.2.1	Stabilisation par congélation	16
Fig.2.2	Amélioration par drainage	16
Fig.2.3	Renforcement de sol à l'aide géotextile	18
Fig.2.4	Stabilisation par clouage	18
Fig.2.5	Principe d'un renforcement par inclusions rigides	19
Fig.2.6	Disposition des colonnes selon les maillages, à droite, et principe de la cellule unité, à gauche	20
Fig.2.7	Principe de réalisation de colonnes ballastées	20
Fig.2.8	Technique Injection	22
Fig.2.9	L'effet des différents types de cations sulfatiques sur la limite de liquidité (WL) d'une montmorillonite traitée à 6% chaux, (Sivapullaiah et al, 2000)	29
Fig.2.10	Modification des caractéristiques de compactage d'un sol suite à l'ajout de chaux, d'après le GTS (LCPC –SETRA, 2000)	30
Fig.2.11	l'effet des différents types de cations sulfatiques sur la densité sèche maximale (MDD), (Kinuthia et al, 1999)	30

Fig.2.12	L'effet des sulfates monovalents et divalents sur l'angle de frottement interne effectif d'une montmorillonite traité à 6% de chaux pour différentes périodes de cure, (Sivapullaiah et al, 2000) (Parsons et Kneebone, 2005)...	31
Fig.2.13	L'effet des sulfates monovalents et divalents sur la cohésion effective d'une montmorillonite traité à 6% de chaux pour différentes périodes de cure (Sivapullaiah et al, 2000)	32
Fig.2.14	L'effet de la minéralogie sur l'angle de frottement interne effectif (a), et la cohésion effective (b) de deux sols argileux traités à 6% de chaux et perturbés par un sulfate monovalent (Na ₂ SO ₄) pour différentes périodes de cure, (Sivapullaiah et al, 2000, 2006)	32
Fig.2.15	L'influence de deux types de cations sulfatiques (Na ₂ SO ₄ et CaSO ₄) sur la résistance au cisaillement d'une montmorillonite traitée à 6% de chaux après une année de cure (PC = 100 KPa). (Sivapullaiah et al, 2000)	33
Fig.2.16	L'effet de la minéralogie sur la résistance au cisaillement de deux sols argileux [(a) : montmorillonite, (b) : kaolinite] traités à 6% de chaux et perturbés par un seul sulfate monovalent (Na ₂ SO ₄) pendant une année de cure, (PC=100 KPa), (Sivapullaiah et al, 2000, 2006)	33

Chapitre III

Fig.3.1	Effets de l'incorporation au sol de diverses matières organiques à divers pourcentages (Peltier ,1957)	41
Fig.3.2	Influence d'une addition de NaCl sur la résistance à la compression simple de sols traités (a) sable de Bouër ; (b) limon du Val d'Europe (Le Borgne 2008)	42
Fig.3.3	Influence d'une addition de Na ₂ SO ₄ sur la résistance à la compression simple d'un sol riche en sels traité (Xing et al. 2009)	44

Chapitre IV

Fig.4.1	Moyens utilisés pour la préparation des sols, (a) : Concasseur, (b) : Broyeur	46
----------------	---	-----------

Fig.4.2	Préparation des sols pour les essais au laboratoire, (a) : broyage et tamisage au tamis 1mm, (b) : sols après tamisage, (c) : conservation hors humidité dans des sacs hermétiques	47
Fig.4.4	Le gisement volcanique de Bou-Hamidi (Béni-Saf) Préparation de la pouzzolane naturelle pour l'essai micro-Deval.(a) :	48
Fig.4.5	pouzzolane naturelle de Béni-Saf, (b) : pouzzolane naturelle concassée, (c) : passage de la pouzzolane naturelle à l'étuve Broyage de la pouzzolane naturelle au micro-Deval jusqu'à une finesse de 420 m ² /kg. (a) : introduction de 1.5kg de PN concassée	49
Fig.4.6	avec 3 boules et 1.5kg de billes dans chaque cylindre, (b) : l'emplacement des cylindres et lancement de l'essai pendant 18h, (c) : la PN après broyage Préparation de la chaux. (a) : emballage utilisé pour la chaux vive de	49
Fig.4.7	Saida, (b) : tamisage au tamis 0,4mm, (c) : pesage de la chaux et conservation dans des sacs hermétiques	50
Fig.4.8	Le sulfate de sodium anhydre(Na ₂ SO ₄) Différentes étapes de la préparation des échantillons. (a) malaxage et	51
Fig.4.9	homogénéisation à sec après pesage, (b) : conservation dans des sacs hermétique, (c) : stockage dans un endroit sec Préparation des combinaisons pour la confection et le compactage. (a)	52
Fig.4.10	: homogénéisation, (b) : malaxage après humidification, (c) : conservation pendant une heure	54
Fig.4.11	Presse statique manuelle destinée à la confection des éprouvettes et moule cylindrique	55
Fig.4.12	Confection des éprouvettes par compactage statique. (a) : compactage, (b) : démoulage, (c) : éprouvette compactée et conservation dans les sachets en plastique	56
Fig.4.13	Procédure de cisaillement. (a) : éprouvette à cisailier, (b) : installation de l'éprouvette dans la boîte de cisaillement, (c) : installation de la boîte dans la machine de cisaillement, (d) : éprouvette après cisaillement	57
Fig.4.14	Détermination de paramètres de résistance au cisaillement	58

Fig.4.15	Résistance au cisaillement produite sous contrainte normale en absence du sulfate de sodium à 7 jours	59
Fig.4.16	Résistance au cisaillement produite sous contrainte normale en absence du sulfate de sodium à 30 jours	59
Fig.4.17	Résistance au cisaillement produite sous contrainte normale en absence du sulfate de sodium à 60 jours	60
Fig.4.18	Effet de 2% du sulfate de sodium sur la résistance au cisaillement stabilisés à 7 jours	61
Fig.4.18	Effet de 2% du sulfate de sodium sur la résistance au cisaillement stabilisés à 30 jours	61
Fig.4.19	Effet de 2% du sulfate de sodium sur la résistance au cisaillement à 60 jours	62
Fig.4.20	Effet de 4% du sulfate de sodium sur la résistance au cisaillement à 7 jours	62
Fig.4.21	Effet de 4% du sulfate de sodium sur la résistance au cisaillement à 30 jours	63
Fig.4.22	Effet de 4% du sulfate de sodium sur la résistance au cisaillement à 60 jours	63
Fig.4.23	Variation temporelle de la cohésion avec le temps de cure en l'absence de sulfate de sodium	64
Fig.4.24	Variation temporelle de la cohésion avec le temps de cure en présence de 2% de sulfate de sodium	65
Fig.4.25	Variation temporelle de la cohésion avec le temps de cure en présence de 4% de sulfate de sodium	65
Fig.4.26	Variation temporelle de l'angle de frottement en l'absence de sulfate de sodium	66
Fig.4.27	Variation temporelle de l'angle de frottement pour 2% de sulfate de sodium	66
Fig.4.28	Variation temporelle de l'angle de frottement pour 4% de sulfate de sodium	67

Liste des abréviations

GTR : Guide des Terrassements Routiers

LCPC : Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées

PN : Pouzzolane Naturelle

MIT : Massachusset Institute of Technology

SETRA : Services d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes

GTS : Guide technique du Traitement des Sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques

ASTM : American Society for Testing Materials

D_{max} : diamètre maximale des grains du sol

γ_{dmax} : Densité sèche maximale

ω_{opt} : Teneur en eau optimale

UU : Non-consolidé non drainé

CU : Consolidé non-drainé

CD : Consolidé Drainé

SG : Sol argileux Gris

Introduction Générale

PDF Pro Evaluation

INTRODUCTION

Dans les projets géotechniques les exigences requises font en sorte que certains sols ne répondent pas aux conditions, du fait de leur nature physique, chimique et mécanique. Les sols argileux présentent le plus souvent des mauvaises caractéristiques liées à leur microstructure, la matière organique, les éléments perturbateurs (les sulfates, chlorures, fertilisants, etc...) Ce qui implique leur faible capacité portante, tassement excessif, faible perméabilité et le phénomène de gonflement-retrait. Le traitement de ces argiles est une voie concrète pour les transformer en matériaux utilisables dans les ouvrages géotechniques.

Dans les pays en voie de développement comme l'Algérie les méthodes d'amélioration mécaniques et hydromécaniques, thermiques des sols ont un emploi très limité car leur coût est très élevé, mais demeurent efficaces.

Toutefois on dispose des méthodes d'amélioration utilisant la chaux, la pouzzolane, le ciment et d'autres ajouts cimentaires, moins coûteuses et plus pratiques. Des études récentes ont montré que ces méthodes avaient des répercussions à long terme sur le sol.

Dans le cas de notre étude, il s'agit d'un sol argileux gris, qui possède des propriétés mécaniques et physiques faibles, d'où le traitement est conseillé. Cette argile a été prélevée à partir de 4m de profondeur et est de provenance d'un projet de remblai situé approximativement à 18 km au Nord-est de la ville de Chlef.

- L'objectif du travail

L'étude consiste à évaluer au laboratoire l'influence d'une variation du pourcentage de chaux, de pouzzolane naturelle, de sulfate de sodium et de leur combinaison sur les paramètres physiques et mécaniques.

- ✓ En premier, la caractérisation complète de l'argile à la fois physique et chimique;
 - ✓ En second, les investigations réalisées au laboratoire sur la stabilisation physique et mécanique par compactage, les essais de cisaillement de l'argile à l'état naturel et après traitement chimique avec différents dosages en chaux, la pouzzolane, le sulfate, et leur combinaison.
- Canevas du travail

Cette thèse est structurée en deux grandes parties :

La **première partie** consiste en une revue bibliographique, constituée de quatre chapitres :

- ✓ Le premier chapitre traite sur la définition, particularités et aussi une classification des sols évolutifs. Il traite également sur la structure des minéraux argileux ainsi que les désordres occasionnés par les sols évolutifs au niveau des constructions de génie civil.
- ✓ Le deuxième chapitre présente les principales méthodes d'amélioration des sols
- ✓ Le troisième chapitre est consacré aux différents types des ajouts minéraux utilisés pour stabiliser les sols évolutifs, leur origine et les éléments perturbateurs qui surviennent lors et après le traitement.
- ✓ Le quatrième chapitre est basé sur les mécanismes de la stabilisation chimique et l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés des sols fins améliorés.

La **deuxième partie** est affermie à l'étude expérimentale au laboratoire des matériaux (chaux, pouzzolane et sulfate de sodium). Elle est composée de deux chapitres :

- ✓ Le premier chapitre dans lequel on présentera un sol argileux traité par des ajouts (chaux et pouzzolane) et en présence de sulfates, qui a fait l'objet de notre étude à travers les résultats d'essais de cisaillement au laboratoire
- ✓ Le deuxième chapitre concerne l'analyse et l'interprétation des résultats de ces essais.

Chapitre I :

Caractéristiques et Conséquences des Sols évolutifs

PDF Professional

I.1 Définition des sols évolutifs

On peut définir un matériau évolutif comme un matériau dont les propriétés physiques et mécaniques évoluent dans le temps. Les sols qui ont un caractère évolutif sont les sols fins (limons, argiles, marne) qui peuvent créer dans les ouvrages, des tassements, gonflements et glissements pendant leur durée de vie (Zoubir, 2009).

I.2 Particularités d'un sol évolutif

Dans ce type sol, les forces d'attraction capillaire entre les grains sont prédominantes à cause de la valeur importante de la surface des grains. C'est pour cela qu'on est amené à étudier la notion de surface spécifique qui quantifie la somme des surfaces des grains obtenus dans une unité de masse du sol. Les autres types de sol sont caractérisés par leur grande perméabilité et l'absence d'une adhérence entre leurs grains. La notion de surface spécifique apparaît dans les sols fins (cas de l'argile) dont les particules ont de petites dimensions ($<2\mu\text{m}$), difficiles à déterminer ainsi que leur forme, contrairement au sable présentant des grains de dimensions $> 50\mu\text{m}$ (Harr, 1981). Le tableau 1.1 nous renseigne sur la classification des sols selon la dimension de leurs particules

Tab 1.1 : Classification du Massachusset Institute of Technology des sols suivants leurs dimensions (Costet et Sanglerat, 1983).

Diamètre des tamis	Sol
$>63\text{mm}$	Pierres
$63-20\text{mm}$	Gravier gros
$20-6\text{mm}$	Gravier moyen
$6-2\text{mm}$	Graviers fin
$2-0,6\text{mm}$	Sable gros
$0,6-0,2\text{mm}$	Sable moyen
$0,2-0,06\text{mm}$	Sable fin
$60-20\mu\text{m}$	Limon gros
$20-6\mu\text{m}$	Limon moyen
$6-2\mu\text{m}$	Limon fin
$2-0,6\mu\text{m}$	Argile

I.3 Classification des sols

Une classification géotechnique des sols a pour but de ranger les sols par catégories présentant des caractéristiques géotechniques voisines. Il existe plusieurs classifications géotechniques utilisant différents paramètres et caractéristiques distinctes.

Deux sols peuvent être les même d'un point de vue géologique mais différents selon leurs caractéristiques géotechniques et aussi selon la classification choisie. Dans la figure 1.1 on retrouve des sols argileux de différentes origines mais qui n'ont pas la même considération géotechnique : la limite de liquidité et l'indice de plasticité varient considérablement d'une argile à une autre.

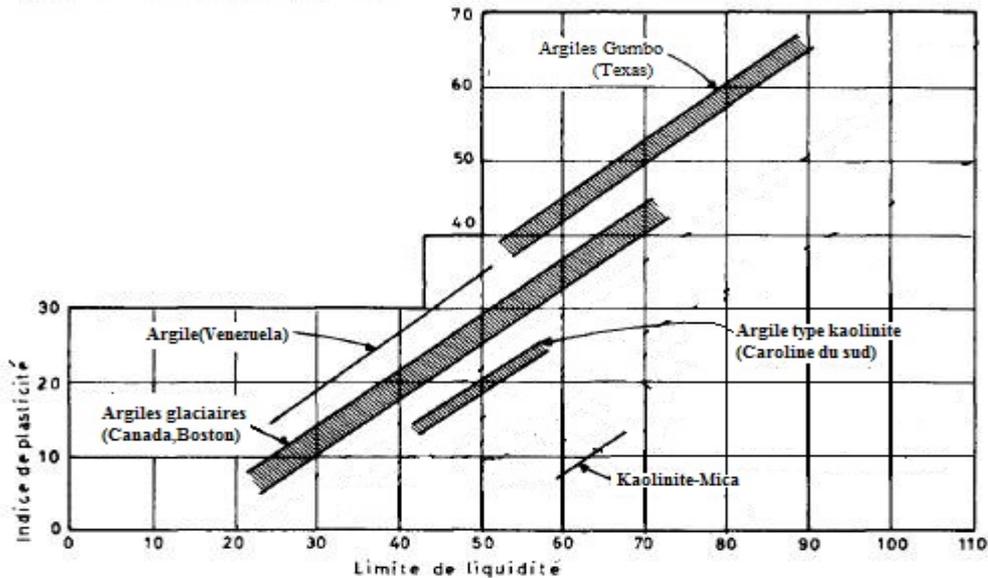


fig.1.1 : Relation entre la limite de liquidité et l'indice de plasticité pour des sols caractéristiques (Schon, 1965).

Les résultats d'essai in-situ (préssiomètre et pénétromètre) permettent aussi de classer le sol évolutif en fonction de la pression limite et résistance à la pointe.

Tab 1.2 : Classification des sols selon leurs propriétés mécaniques (Costet et Sanglerat, 1983)

Classe de sol		Pressiomètre P_l (MPa)	Pénétromètre Q_c (MPa)
Argiles et Limons	A-Argiles et limons mous	<0,7	<3,0
	B- Argiles et limons fermes	1,2 à 2,0	3,0 à 6,0
	C- Argiles très fermes à dures	>2,5	>6,0
Sables, graves	A-Lâches	<0,5	<5
	B-moyennement compacts	1,0 à 2,0	8 à 15,0
	C-Compacts	>2,5	>20,0
Marnes Marno-calcaires	A-Tendres	1,5 à 4,0	-
	B-Fragmentées	>4,5	-

Parmi les classifications, on retrouve le triangle de texture de Taylor, la classification Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées(L.C.P.C), le Guide de Travaux Routiers (G.T.R.)...

La classification L.C.P.C utilise soit les résultats classiques d'essais de laboratoire (granulométrie, limites d'Atterberg), soit l'appréciation visuelle et des tests simples sur le chantier. Il faut avoir une grande expérience pour employer correctement la méthode rapide ou méthode de chantier.

Pour particulièrement les sols évolutifs (fins) deux étapes indissociables sont à observer au laboratoire :

Une première subdivision (analyse granulométrique), d'après la proportion massique des grains inférieurs et supérieurs à 0,08 mm, permet de distinguer :

- les sols grenus : lorsque plus de 50 % des éléments > 0,08 mm
- les sols fins : quand plus de 50 % des éléments < 0,08 mm

Les limites d'Atterberg sont par après déterminées et aident à classer le sol en utilisant la courbe de Casagrande.

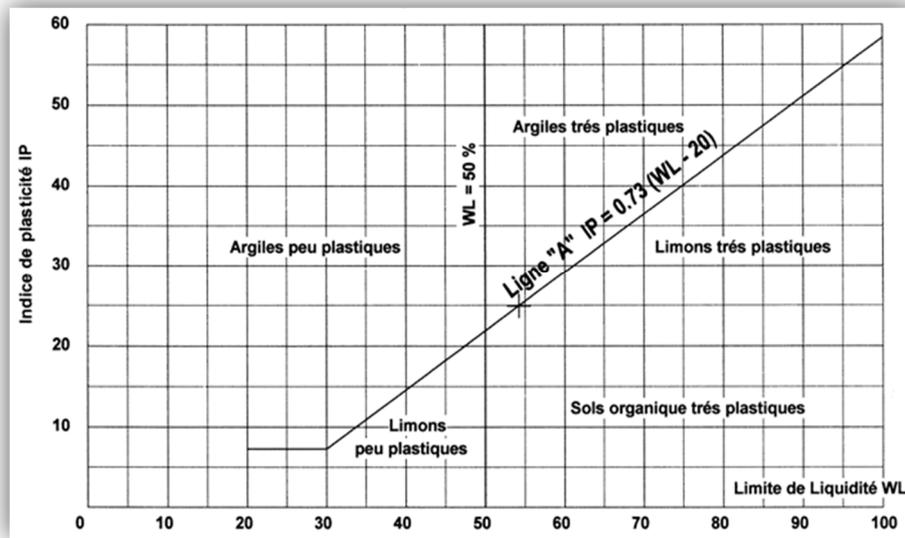


Fig1.2 : Diagramme de plasticité de Casagrande (Schon, 1965)

Dans la classification la quantité de matière organique (MO) joue un rôle essentiel

- Pour $MO < 3\%$, la matière organique n'a pas d'influence sur le sol
- Pour $3 < MO < 10\%$, le sol est faiblement organique
- Pour $MO > 10\%$, il est considéré comme un sol organique (Schon, 1965).

I.4 Les trois principaux sols évolutifs

I.4.1 les argiles

Les argiles sont des roches sédimentaires à grains fins, de taille inférieure à $5\mu\text{m}$, composées 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, où bien une structure fibreuse qui explique leurs qualités d'absorption.

Elles absorbent l'eau et forment une pâte imperméable (perméabilité inférieure à $0,2 \text{ mm/h}$), appelée couramment terre glaise, colorée par des oxydes de fer en ocre, rouge. 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 craqueler 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, le loess. (Zoubir, 2009)

I.4.2 Les limons

Les limons, constitués de silt, de loess, possèdent un squelette siliceux à silico-calcaire 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

I.4.3 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 et 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 craqueler sur une certaine profondeur en cas de sécheresse. Les marnes ont souvent fait l'objet d'exploitation en carrières à ciel ouvert où 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 caractéristique mécaniques).

I.5 Définition des minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des silicates d'alumine hydratés provenant de la décomposition des feldspaths et des micas, leur formule chimique est de la forme : $(\text{SiO}_2)_M(\text{Al}_2\text{O}_3)_N(\text{H}_2\text{O})_P$

Ils sont composés de particules de forme aplatie et de dimensions très petites (Inférieures à 2 μm), ceci leur confère une très grande surface spécifique. Les éléments structuraux sont le tétraèdre de silice et l'octaèdre d'alumine.

Les particules d'argile sont formées d'un empilement de feuillets qui sont constitués par l'association de deux unités structurales de base (Figure 1.3)

a) Unité tétraédrique

Elle est formée d'un tétraèdre au sommet duquel quatre ions d'oxygènes (O^{2-}) enserrent un ion de silicium (Si^{4+}), équidistant à chacun d'eux. Ces tétraèdres se combinent entre eux pour former une couche tétraédrique.

b) Unité octaédrique

Elle est formée d'un octaèdre au centre duquel un ion d'aluminium (Al^{3+}) est équidistant aux six hydroxyles (OH^-) des sommets.

Ces octaèdres se combinent pour former des couches planes dites couches octaédriques, et la liaison avec la couche tétraédrique se fait au niveau des oxygènes.

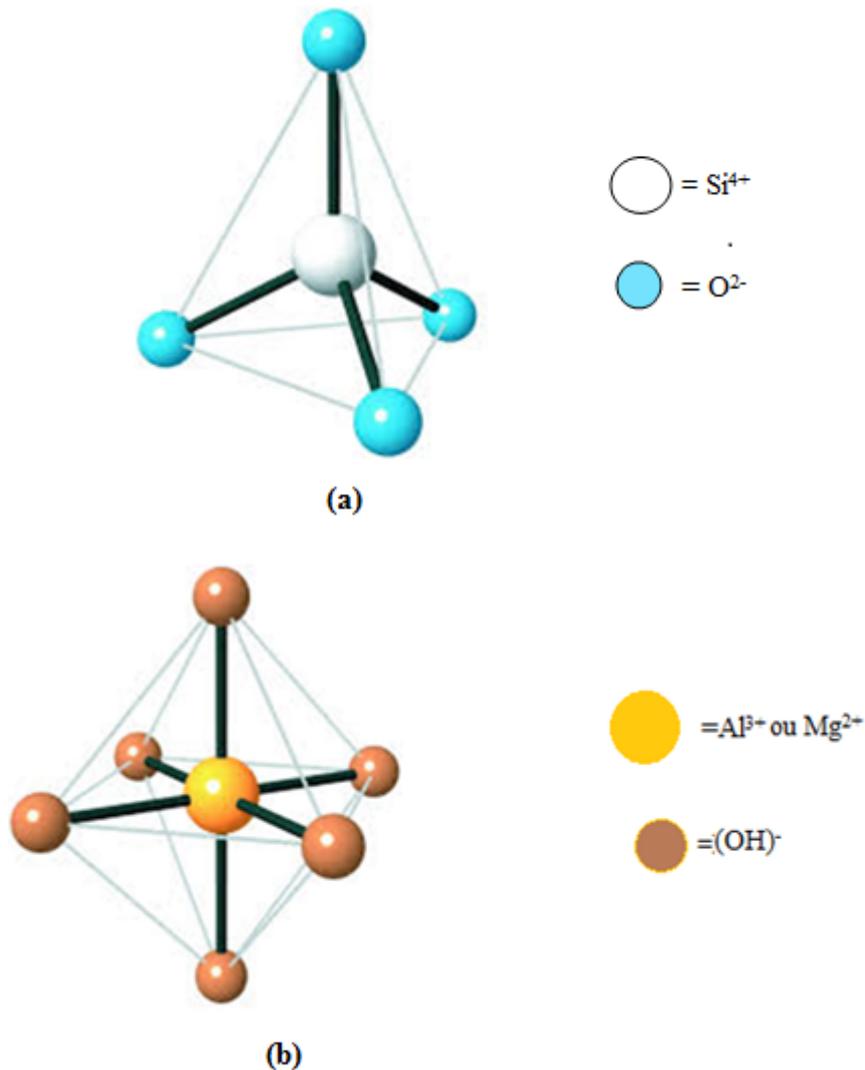


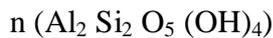
Fig1.3 : Structure de base des argiles a)Unité tétraédrique ; b) Unité octaédrique

A partir de ces structures de base nous pouvons définir plusieurs familles d'argiles (La kaolinite, l'illite, le chlorite, la montmorillonite).

I.5.1 Les argiles du groupe de la kaolinite

Dans la kaolinite les couches d'octaèdres et les couches de tétraèdres sont parallèles, et s'intercalent de telle façon que les atomes supérieurs et inférieurs de chacune des couches appartiennent à un même plan.

L'espacement de base entre les ions d'oxygène dans l'unité tétraédrique et les ions hydroxyles dans l'unité octaédrique est presque identique, de ce fait les couches tétraédriques et octaédriques peuvent s'associer et former ainsi le feuillet de kaolinite avec une formule générale :



Notons que l'épaisseur du feuillet élémentaire est d'environ 7Å mais les dimensions dans les deux autres directions sont infinies comme nous le montre dans la figure 1.4

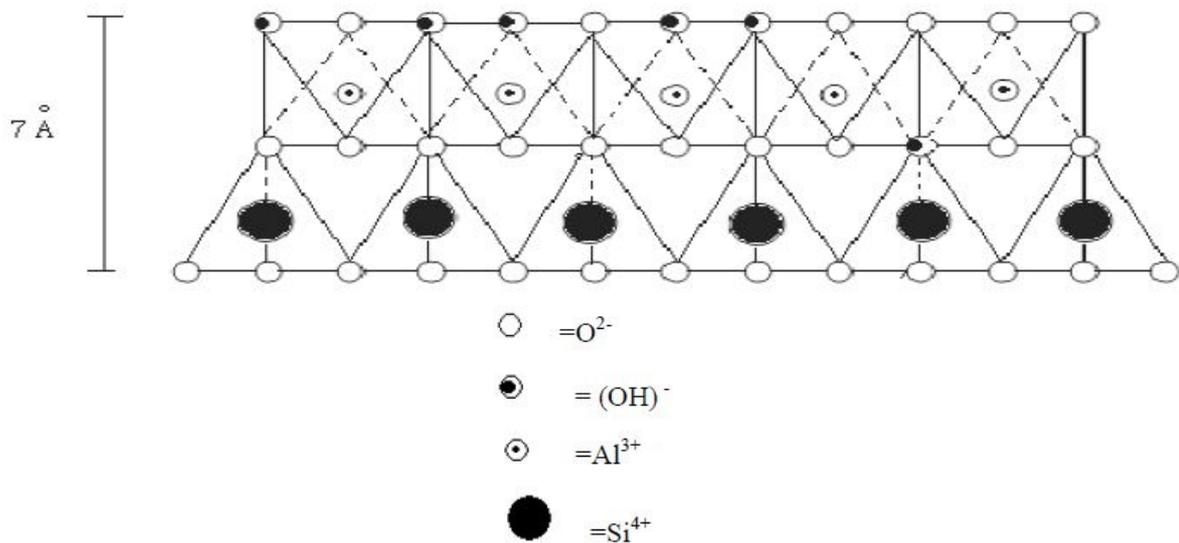


Fig1.4 : Structure cristallographique du feuillet la kaolinite (Zoubir, 2009)

I.5.2 Les argiles du groupe des micas (les illites)

La structure du feuillet est en forme de « sandwich », composée d'une couche octaédrique comprise entre deux couches tétraédriques.

L'illite est un des minéraux argileux du groupe des micas le plus répandu dans la nature. La structure de l'illite ressemble à celle de la montmorillonite. La différence provient de ce que l'aluminium remplace à 20 % le silicium dans les tétraèdres et que des atomes de potassium venant rétablir l'équilibre des charges rompu par le remplacement, assurent la liaison des couches tétraédriques et octaédriques. Cette liaison est suffisante pour empêcher l'eau de s'insérer à l'inter couche et l'illite n'est pas donc une argile très gonflante.

Les illites sont des particules de dimensions plus petites que la kaolinite de diamètre équivalent moyen de $0,3\ \mu\text{m}$ et d'une épaisseur de 10Å .

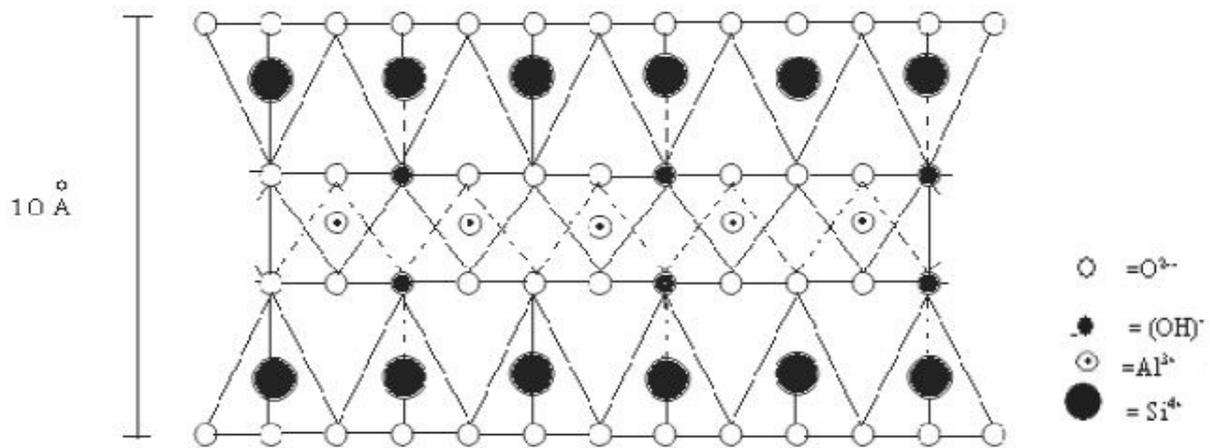


Fig.1.5 : Structure cristallographique du feuillet de l'illite, de la smectite et de la vermiculite : deux couches de tétraèdres SiO_4 (T) encadrant une couche d'octaèdres $\text{AlO}_6(\text{O})$. Le cation interfoliaire lie deux feuillets consécutifs (Zoubir, 2009)

I.5.3 Les argiles du groupe des smectites (la montmorillonite)

Ce sont des argiles du même type que le mica (une couche octaédrique entre deux couches tétraédriques), mais les liaisons entre feuillets sont plus faibles. Les substitutions isomorphiques sont principalement localisées en couches octaédriques.

Les smectites possèdent ainsi des propriétés de gonflement qui se produisent surtout en présence d'eau et peuvent provoquer la dissociation complète des feuillets. Les smectites (par exemple la montmorillonite) se caractérisent par l'existence entre deux feuillets d'un certain nombre de couches d'eau contenant des cations échangeables (libres) généralement des cations sodiques et calciques, ce qui entraîne un écartement des feuillets variables suivant les conditions du milieu.

Dans la montmorillonite, il y a un remplacement partiel de l'aluminium des octaèdres par du magnésium (presque un sur six), le déficit de charge est composé par des cations généralement Na^+ ou Ca^{2+} situés entre les feuillets et qui sont échangeables (ou compensateurs), ainsi la montmorillonite peut se présenter par la formule suivante :



Les feuillets sont empilés l'un sur l'autre comme les feuilles d'un livre. Les montmorillonites sont des minéraux où les liaisons entre les feuillets sont affaiblies, si bien que de l'eau se glisse entre ces feuillets en quantité variable. C'est ce qui explique que les montmorillonites sont sujettes au gonflement.

Un sol contenant un pourcentage élevé de montmorillonite est susceptible de gonfler provoquant ainsi l'endommagement des fondations superficielles et des structures. (Zoubir, 2009).

I.6 Problèmes des sols argileux

En Afrique particulièrement les problèmes de gonflement-retrait d'argile engendrent des dommages conséquents sur les structures comme dans le monde entier. En Algérie le gonflement, glissement, tassement sont des risques multipliés selon la sismicité de la zone et aussi l'activité anthropique.

I.6.1 Le 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).

I.6.2 Le tassement

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

I.6.3 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.

I.7 Pathologies rencontrées dans les ouvrages

Les bâtiments, les routes, et autres ouvrages ayant comme assises ou/et matériaux constitutifs des argiles, encourent des risques énormes compte tenu de l'instabilité des argiles.

- Dans les bâtiments on constate des fissures, distorsion des ouvertures, décollement du bâtiment et rupture de canalisation. Dans la figure 1.9 on peut remarquer des dommages liés au sol argileux dans un bâtiment (Zoubir, 2009).



Fig 1.9 : Fissuration de structure due au sol gonflant

- Dans le cas de chaussée le cycle de saturation-séchage du sol dû aux variations des saisons (été, hiver) crée des vides dans le corps de chaussée ce qui permet l'infiltration de l'eau, la

diminution de la cohésion dans le matériau constituant la chaussée et le gonflement de la chaussée. Ce gonflement s'observe par des fissures longitudinales assimilées par la chute de la portance du sol et accélérées par le flux routier. La figure 1.7 nous donne un aperçu de ces pathologies



Fig 1.7 : Fissuration d'une chaussée de sol instable

I.8 Conclusion

Les sols évolutifs et l'argile en particulier présentent une faible capacité portante en plus des problèmes qu'ils engendrent tels que le gonflement et le tassement. Ce qui ne convient pas pour certains ouvrages génie civil qui exigent une haute portance et une stabilité à long terme.

Pour remédier à ces problèmes des solutions existent, telles que :

- le remplacement du sol par un matériau adéquat
- le changement du site de l'ouvrage
- l'amélioration de la qualité du sol par le renforcement ou encore par le traitement

Les deux premières solutions présentent des inconvénients à la fois économique et environnemental : Le remplacement du sol crée un déblai qui peut-être important en fonction de l'ampleur du projet, ce qui touche particulièrement à l'environnement dans la zone de déblai. Le changement de site amène à de nouvelles études (faisabilité, impact environnemental...) dans le projet qui multiplie le budget du projet. L'amélioration est donc la solution la plus adéquate car les répercussions sur l'environnement et l'économie du projet sont limitées.

Chapitre II :

Méthodes d'amélioration des sols
instables

PDF Pro Evaluation

II.1 Introduction

Les méthodes d'amélioration du sol sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. Certaines de ces méthodes sont très anciennes comme le battage de pieux dans les sols de faible portance. Ces méthodes ont connu un développement considérable et sont maintenant comme un élément à part entière des projets. Ces méthodes se regroupent en deux techniques:

-Stabilisation des sols : Son objectif est d'augmenter durablement la portance du sol et d'avoir une meilleure distribution des charges en rehaussant considérablement les caractéristiques mécaniques des couches de fondation.

-Amélioration des sols : Elle consiste à obtenir directement une facilité de mise en œuvre (ouvrabilité), de compactage et une meilleure traficabilité pour le trafic du chantier.

Ces deux techniques s'appliquent pour les sols de grande plasticité et aussi aux sols expansifs. (Khebizi, 2011)

II.2 Techniques d'amélioration

Les dépôts épais des sols granulaires lâches peuvent exiger une amélioration de leurs propriétés pour éliminer les effets des tassements totaux et différentiels excessifs sous les charges de la future construction et aussi pour minimiser la possibilité de la liquéfaction sous les sollicitations dynamiques. L'amélioration souhaitée peut souvent s'obtenir par :

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

Elles sont, de façon générale, de mise en œuvre rapide et relativement facile.

Comme dans le cas des sols fins, les argiles sont caractérisées par des perméabilités très faibles qui ralentissent la consolidation et la dissipation des processus interstitiels. L'application des charges aux frontières d'un massif d'argile se traduit par le développement des pressions interstitielles. Il existe une multitude de méthodes : préchargement, vibro-compactage, pilonnage, compactage statique en profondeur, les inclusions, les techniques d'injection dans le sol, les différents moyens de drainage, les renforcements des terres, etc., seules les méthodes les plus couramment utilisées seront décrites dans ce chapitre.

II.2.1 Amélioration temporaire par congélation

Les techniques de refroidissement utilisées reposent sur la circulation d'un fluide froid (azote liquide habituellement) dans des tubes enfoncés dans le massif de sol.

Elle est utilisée dans les sols fins lorsqu'aucune autre méthode n'est applicable. Elle doit être réalisée rapidement pour limiter le gonflement et doit tenir compte de l'effet de dégel sur le massif de sol.

Pour les sols grenus la congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation rend également imperméable le sol et facilite les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe.

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. (Khebizi, 2011)



Fig2.1 : Stabilisation par congélation

II.2.2 Amélioration des sols par drainage

Cette technique est utilisée pour collecter l'eau et ensuite la drainer ailleurs dans les cas d'ouvrages en terrassement (remblais routiers...). 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. (Wiem KHEBIZI, 2011)

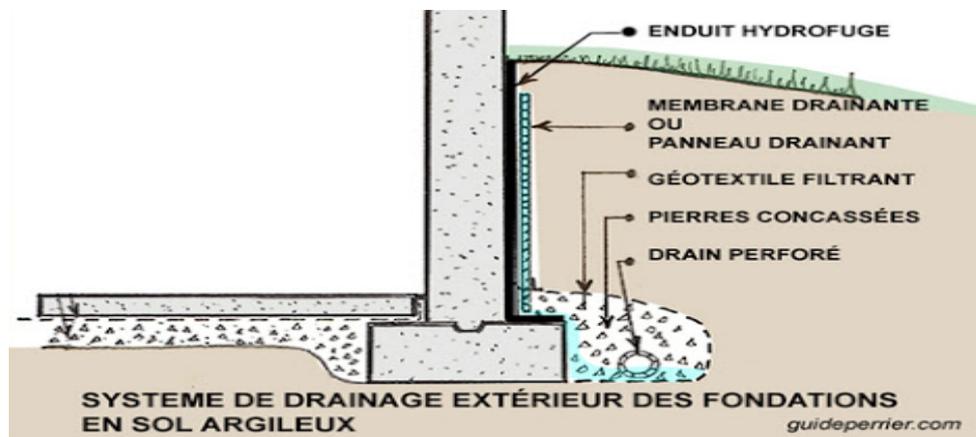


Fig2.2 : Amélioration par drainage

II.2.3 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 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. (Khebizi, 2011)

II.2.4 Amélioration des sols par compactage

Il consiste à réduire le volume des vides par densification des particules en appliquant momentanément des charges (roulement ou vibration). Il peut être exécuté sur des sols excavés ou des remblais placés en des couches minces. Chen (1988), suggère pour les sols très expansifs, un compactage à faible densité. (Also et al, 1975)

Le compactage de surface est utilisé généralement pour une profondeur maximale d'environ 3m. Pour des profondeurs supérieures on utilise le compactage dynamique, et le vibro-compactage. La nature du terrain détermine le type de compacteur à utiliser. Les études expérimentales définissent un compactage approprié des sols de remblais qui ne tasseront pas ou tasseront très peu. Il y'a donc un optimum de compactage à réaliser, c'est cet optimum que les essais au laboratoire se proposent de déterminer. (Khebizi, 2011)

II.2.5 Amélioration des sols par renforcement des terres

II.2.5.1 Technique de la terre renforcée

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

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

Pour les sols fins où l'adhésion entre le remblai et le renforcement est mauvaise et peut être réduite par l'augmentation de la pression interstitielle on utilisera donc des matériaux sandwichs (couche de sable en contact avec les éléments renforçant).

L'efficacité du renforcement est commandée par sa résistance à la traction et la liaison qu'il développe avec le sol adjacent. Les éléments de renforcement sont:

- Bandes d'acier ou d'aluminium
- Câbles d'acier
- Matériau polymère, géosynthétiques
- Treillis métalliques

- Les grilles sont des éléments métalliques ou en polymère arrangés en réseaux rectangulaires (maillages)
- Les fibres sont en géotextiles, métalliques ou en fibres naturelles. (Khebizi, 2011)



Fig 2.3 : Renforcement de sol à l'aide géotextile

II.2.5.2 Technique de la terre ancrée

La technique de terre ancrée intervient pour stabiliser le massif vis-à-vis du glissement. Elle utilise le clouage des sols. Dans les terres ancrées la résistance est survenue par le développement des pressions de portance autour de l'ancrage à la fin du membre tendu lequel est en contact avec la force.

La méthode consiste à renforcer le sol (grenu dense, argile raide) par de petites inclusions sous forme de barres en acier installées horizontalement pour améliorer la résistance au cisaillement des sols. Les barres d'acier peuvent aussi être scellées par un clouage multidirectionnel à 45° à 60° environ, rendant ainsi au "rocher" son monolithisme. Elle vise à stabiliser les déplacements différentiels des parois de faille. Ces méthodes sont comparables à celles de clouage des parois rocheuses fracturées. (Khebizi, 2011)

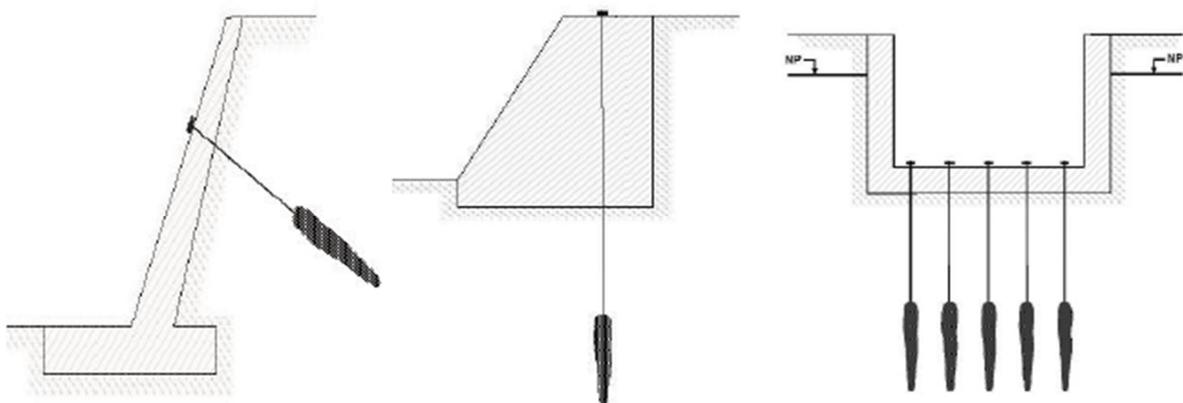


Fig2.4 :Stabilisation par clouage

II.2.6 Amélioration des sols par inclusion

II.2.6.1 Inclusion rigide

La technique des inclusions rigides est un procédé consistant à superposer un matelas granulaire à un réseau d'inclusions rigides verticales afin de tirer parti des transferts de charges se mettant en place dans tout matériau granulaire. Son rôle est de transmettre la charge due au poids de l'ouvrage et les charges de service vers le substratum.

Elle peut aussi inclure des géotextiles au niveau du matelas granulaire en fonction de l'objectif recherché (étanchéité, joint, drain...). Elle renforce des sols de caractéristiques médiocres lors de la fondation de grands ouvrages (remblais routiers, ferroviaire, bâtiments industriels, réservoir de stockage...) tout en étant économique. (Khebizi, 2011)

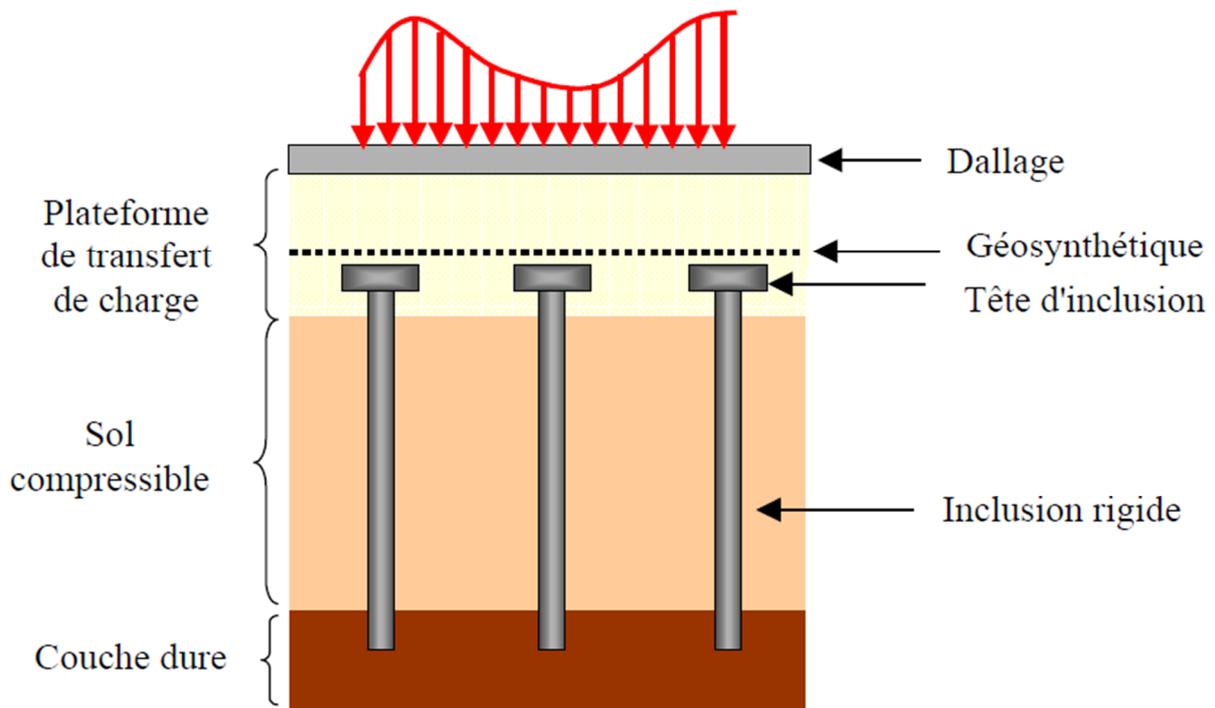


Fig 2.5 : Principe d'un renforcement par inclusions rigides

II.2.6.2 Colonnes ballastées

Les colonnes ballastées sont des colonnes constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mises 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 maillage réguliers ou variables, en lignes, en groupes ou même de manière isolée (voir figure 2.6). 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.

Les avantages de cette méthode sont d'une part, la rapidité de réalisation, et d'autre part le prix compétitif par rapport aux autres techniques existantes. Pour réaliser des colonnes, on peut recourir à plusieurs techniques et procédés d'exécutions sur le terrain. L'amélioration de sol par colonnes ballastées permet :

- l'augmentation des caractéristiques mécaniques du sol et sa capacité portante

- la diminution des tassements sous les charges appliquées
- de diminuer le temps de consolidation
- contribuer à la stabilité des ouvrages et réduire les risques de liquéfaction du sol dans les zones sismiques. (Chardigny & al, 2010)

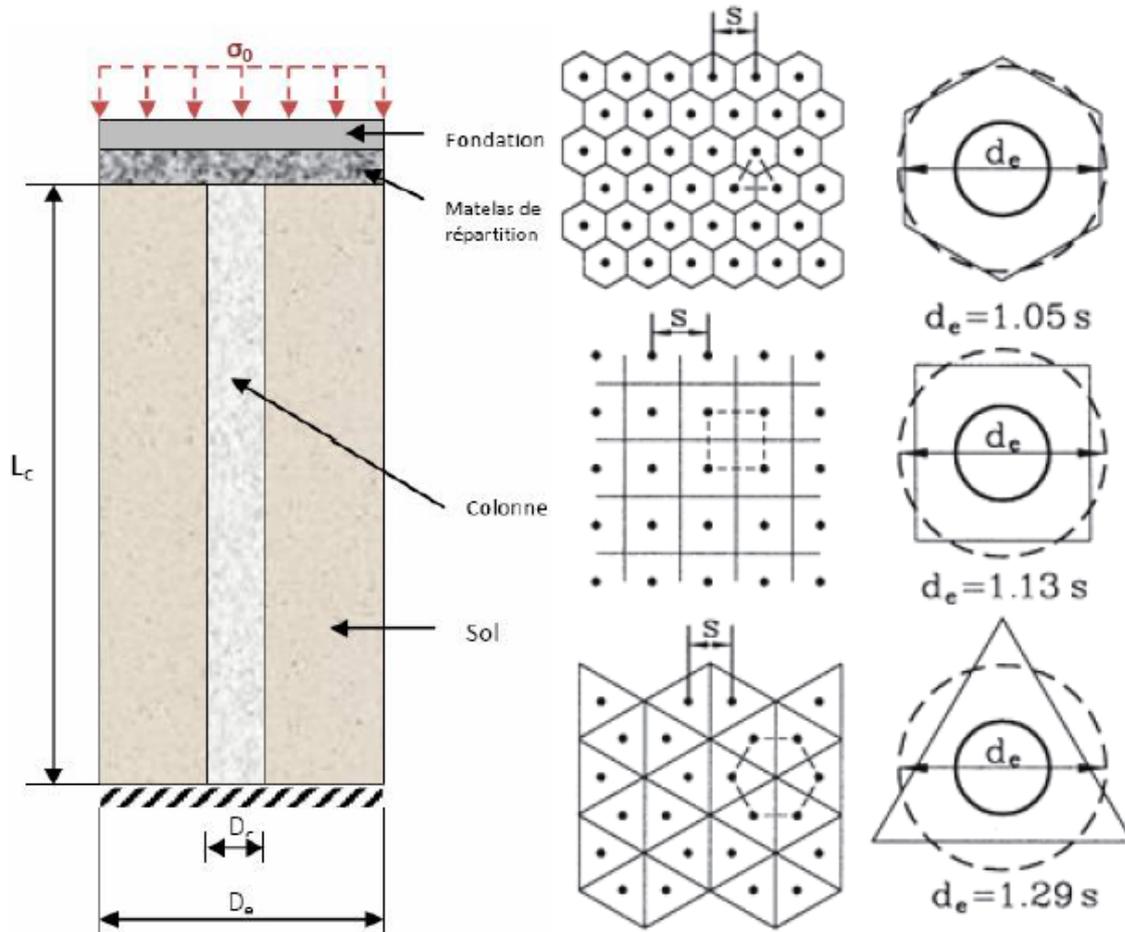


Fig 2.6 : Disposition des colonnes selon les maillages, à droite, et principe de la cellule unité, à gauche

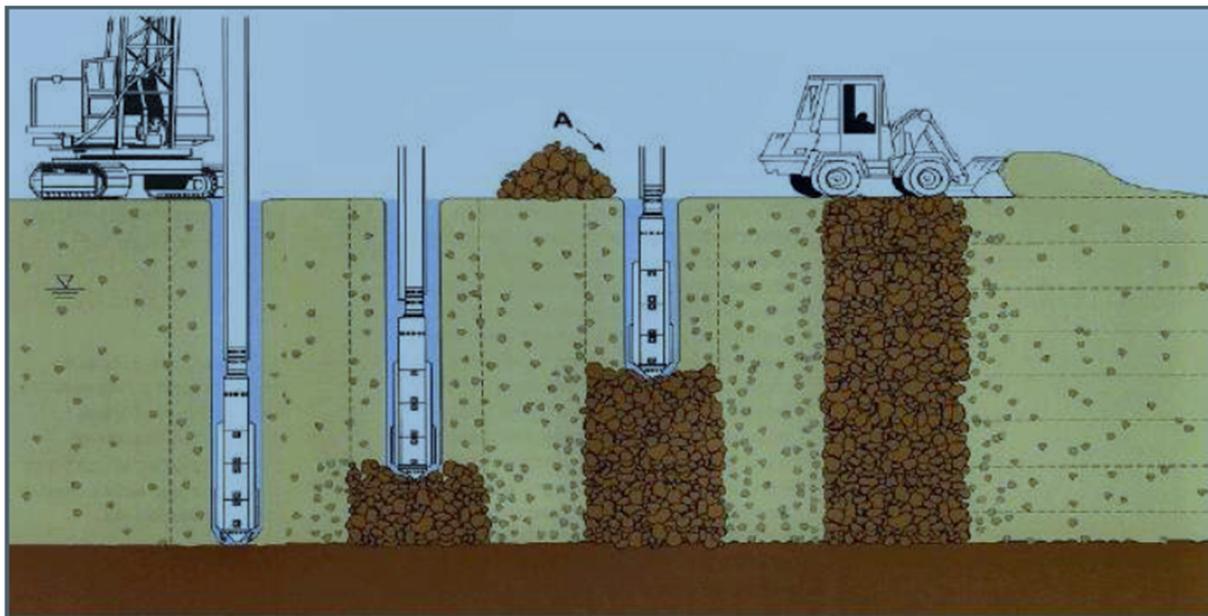


Fig 2.7 :Principe de réalisation de colonnes ballastées

II.2.6.3 Colonnes à module contrôlé

Les colonnes à module contrôlé sont des inclusions semi-rigides et cimentées avec un module de déformation variant de 500 à 10000MPa. Elles sont mises en œuvre comme procédé de renforcement de sol.

La technique étant la même que celle des inclusions rigides, elle est préférable aux colonnes ballastées lorsque :

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

Les colonnes à module contrôlé sont toujours coiffées d'un matelas permettant la répartition des charges lorsqu'elles doivent supporter un dallage sur sol. Cette technique est sans incidence sur l'environnement, ne comportant ni vibration ni battage. Ce type de traitement ne vise donc pas à réaliser des pieux devant supporter la totalité de la charge apportée par l'ouvrage, mais à réduire la déformabilité globale du sol à l'aide d'éléments semi-rigides régulièrement répartis. (Khebizi, 2011)

II.2.7 Techniques d'injection

L'injection est une technique d'origine américaine (compaction grouting) initialement utilisée pour stabiliser et remettre à niveau des constructions sujettes à tassements. Elle a été introduite en France en 1983 et utilisée pour des applications beaucoup plus variées. Elle consiste à injecter dans le sol un coulis fluide qui pénètre dans les vides du sol. Un matériau composite est donc obtenu après la prise du coulis.

Cette méthode est subdivisée en deux types :

- Injection classique : Elle 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 jet grouting : Le jet grouting est un procédé de traitement des sols par une injection à grande vitesse et pression, de fluides et coulis. Effectué de manière continue ou discontinue, il permet la réalisation de colonnes, demi-colonnes, lamelles ou parois. Il est applicable à tous les terrains meubles, hormis les sols très organiques. Un mélange de sol et ciment est obtenue.

Le résultat de l'injection est donc une diminution de la perméabilité du massif, ce qui est le plus souvent le but recherché. Mais aussi une amélioration des caractéristiques de résistance et de déformabilité est également obtenue. L'injection peut stabiliser un ouvrage en stoppant des déformations. (Khebizi, 2011)

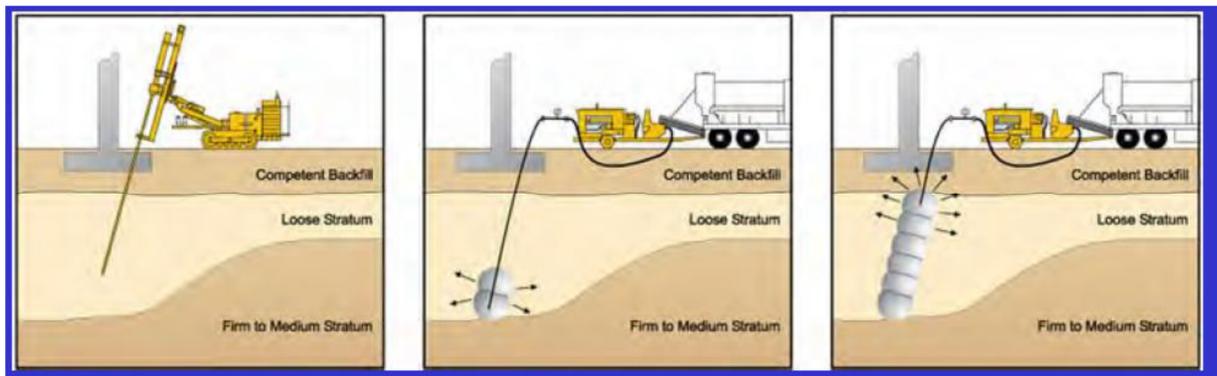


Fig 2.8 :Technique Injection

II.2.8 Amélioration des sols par addition d'ajouts minéraux

L'amélioration via les ajouts minéraux est une technique qui est très largement utilisée de nos jours car non seulement elle concerne la majorité des sols mais en plus elle peut se faire in situ, avant compactage et aussi sur des matériaux excavés. Elle provoque une modification physico-chimique créant ainsi des réactions d'échanges de base avec les particules d'argile(cation) et les réactions pouzzolaniques(cimentation). Ces réactions corrigent les défauts de perméabilité et augmentent la résistance et la durabilité du sol.

Les ajouts minéraux le plus souvent utilisées sont la chaux, le ciment, les ajouts cimentaires (pouzzolane, cendre volante, laitier, fumée de silice, écorce de riz...), le bitume, les sels.

Le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques est une solution qui a éprouvé sa fiabilité et son efficacité dans les dernières décennies; cette technique a été développée en France ce qui a donné la naissance du guide technique du traitement des sols à la chaux et /ou aux liants hydrauliques réalisé en collaboration entre SETRA et LCPC.

Une étude préalable basée sur plusieurs normes (NF p94-100, NF p98-230) montre l'aptitude du sol traité à être utilisé dans les différents ouvrages.

II.2.8.1 Mécanismes de stabilisation

L'appréhension des mécanismes de stabilisation résultant de l'ajout de chaux ou de ciment nécessite la connaissance des réactions chimiques intervenant après l'ajout. La

notion de capacité d'échange cationique (C.E.C), qui est intrinsèque à l'argile, est prioritaire dans la compréhension de la stabilisation.

II.2.8.1.1 la capacité d'échange cationique

A l'échelle microscopique l'argile est constituée par deux unités de base : tétraèdre(SiO_2) et octaèdre (Al_2O_6 ou $\text{Al}(\text{OH})_6$). La superposition de ces dernières suivant un plan bien défini donne des couches (six unités pour la couche tétraédrique et deux pour la couche octaédrique). Ces couches s'associent pour former un feuillet. L'espace interfoliaire entre deux feuillets peut contenir de l'eau responsable du gonflement de certains types d'argiles ainsi que des ions interfoliaires résiduels ou acquis lors du traitement des sols suite à l'échange cationique.

La capacité d'échange cationique dépend de deux types de charges :

- ✓ Des charges permanentes négatives générées par la substitution entre les différents atomes d'argile formant la couche tétraédrique ou octaédrique. Lorsqu'il y'a déficit dans la charge permanente, la liaison entre feuillets est affaiblie et engendre l'infiltration de molécules d'eau et d'ions. C'est le cas des Smectites ayant une charge comprise entre -0.2 et -0.6.
- ✓ Des charges variables négatives qui se localisent en bordure des feuillets d'argiles et dépendant du pH du sol. À bas pH, les hydroxyles (OH^-) de surfaces sont entièrement protonés (OH^+) l'argile montre une charge de bordure globalement positive et pas d'échange cationique. À haut pH, les hydroxyles se déprotonent, la surface est globalement négative (O^{2-}). On parle ici de charges variables.

II.2.8.1.2 Principe d'action de la chaux

L'hydratation de la chaux vive au contact de l'eau du sol provoque une consommation d'eau et une évaporation importante. Par ailleurs, l'adjonction de chaux au sol provoque une modification de la qualité des argiles par échange des cations alcalins (Na^+ , K^+ ...) par des cations Ca^{2+} apportés par la chaux; ceci développe des forces électriques conduisant à une agglomération des fines particules argileuses en particules grossières et friables. L'addition de chaux a des effets à long terme (plus d'un an) par combinaison avec les constituants des argiles.

La chaux provoque deux actions différentes dans le sol: une action immédiate, qui se produit directement après que la chaux soit mélangée au sol et une action à long terme, qui peut durer entre plusieurs mois et quelques années après la mise en œuvre.

a) Action immédiate

La chaux vive diminue la teneur en eau du sol via trois phénomènes distincts:

- ✓ L'hydratation de la chaux vive: une partie de l'eau «disparaît» via la réaction exothermique avec la chaux vive; $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + 15,5\text{kcal} (1)$
- ✓ L'évaporation d'une partie de l'eau, provoquée par la chaleur dégagée par l'hydratation de la chaux vive (15,5 kcal/mol);

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

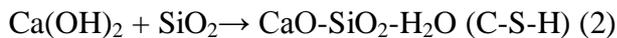
La diminution attendue est de 1 % de teneur en eau pour 1% de chaux vive introduite. La chaux éteinte diminue également la teneur en eau mais uniquement via l'apport de matière sèche dans le sol. La diminution de la teneur en eau est limitée à 0,3 % pour 1% de chaux éteinte introduite.

La chaux influe sur les charges électriques se trouvant autour des particules d'argile et modifie ainsi les champs électriques entre ces particules. Ceci entraîne leur floculation, ce qui a des conséquences non négligeables sur les caractéristiques géotechniques du sol. (BULLETIN CRR, 2001)

b) Action à long terme

C'est une action pouzzolanique qui se produit. Elle est due à la mise en solution en milieu de pH élevé (supérieur à 12) de la silice, de l'alumine et des oxydes de fer présents dans les minéraux argileux sous des formes cristallisées plus ou moins altérées.

Ces éléments en solution réagissent ensuite avec la chaux pour former des ferro-silico-aluminates de calcium insolubles qui précipitent et cristallisent en présence d'eau, créant ainsi des liaisons de même nature que celles produites avec les liants hydrauliques. L'action à long terme est définie par les réactions chimiques suivantes :



Ces phénomènes se développent en général très lentement (plusieurs mois, voire des années). Ils sont influencés par la température du milieu, la quantité et la nature de la fraction argileuse du sol et la teneur en eau du sol. Cette action a lieu à partir de pourcentages de chaux ajoutés de 3 à 4 %, en fonction des caractéristiques du sol.

II.2.8.1.3 Principe d'action du ciment

La minéralogie et la granulométrie des sols traités influent peu sur les effets du ciment puisque la poudre de ciment contient en elle-même tout ce dont elle a besoin pour réagir et former des produits cimentaires ; le ciment va créer des liens physiques entre les particules augmentant ainsi la résistance des sols. Pour les sols très peu argileux, les constituants hydratés du ciment enrobent et relient les grains entre eux formant des sortes de ponts de plus en plus nombreux et solides, ce qui explique que la portance, la rigidité, le module de déformation, la résistance au gel, les résistances mécaniques augmentent au cours du temps.

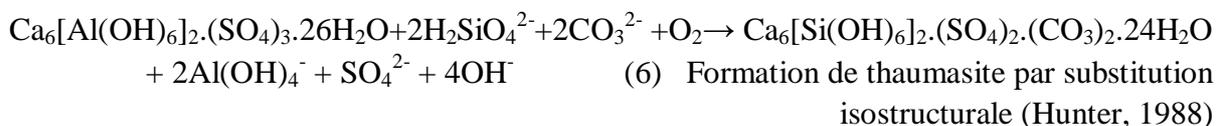
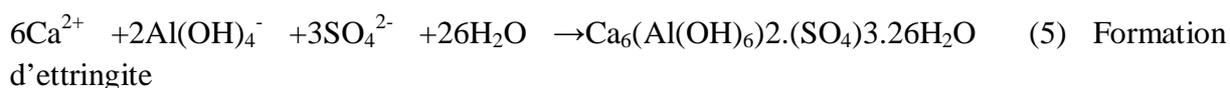
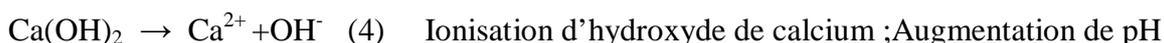
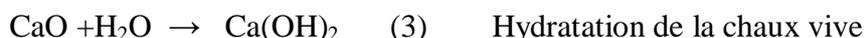
Dans le cas de sols argileux, l'hydroxyde de chaux Ca(OH)_2 formé par l'hydratation du ciment pourra peu à peu se combiner aux éléments argileux. Dans certains cas, les particules d'argile pourront ralentir la prise du ciment en formant autour des grains une enveloppe protectrice. La composition chimique et minéralogique des argiles ainsi que leur quantité jouent donc un rôle fondamental dans les phénomènes d'interaction qui auront lieu et qui se poursuivront dans le temps entre elles et le ciment (Baron et Olivier ,1992).

Le traitement mixte chaux/ciment permet de réduire la proportion du ciment et d'avoir une bonne résistance à court terme. La préparation d'un sol argileux à la chaux entraîne la formation de grumeaux qui rend ce sol bien apte à recevoir un traitement au ciment. La réaction de ce ciment avec le sol traité à la chaux consiste surtout en une hydratation de silicates et aluminates de calcium (ajoutés sous forme anhydride). Ils passent en phase liquide, après quoi les produits hydratés durcissent («liaison hydraulique»). Par la croissance, l'imbrication et la ramification de plus en plus grande des microcristaux qui apparaissent, les grains de sols sont soudés et liés. De cette manière, ils forment des liaisons de plus en plus nombreuses et dures. Le mélange durcit et atteint des résistances mécaniques élevées, une grande résistance au gel et une bonne imperméabilité (BULLETIN CRR, 2001).

II.2.8.2 Risque de formation d'ettringite et thaumasite

II.2.8.2.1 Cas du traitement à la chaux

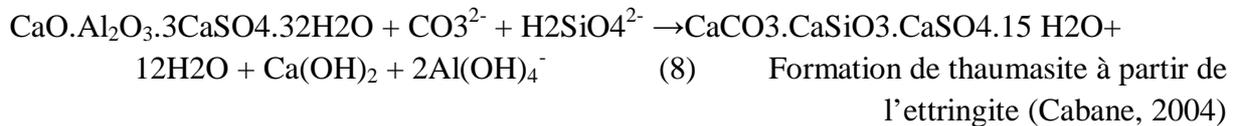
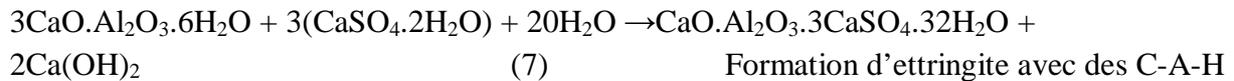
Il existe plusieurs facteurs qui influencent les propriétés du sol traité à la chaux comme les cations, la concentration de sulfates et minéraux composant l'argile (alumine et silice disponibles). Les ions sulfates (SO_4^{2-}) sont à la base de la formation de composés ettringitiques. Les réactions pouzzolaniques y sont également impliquées. Les anions des sulfates se combinent avec le calcium et d'alumine disponible, et forment l'ettringite insoluble dans le système du sol. La formation d'ettringite augmente la porosité et diminue simultanément la libre teneur en humidité lors de la nucléation d'ettringite et de sa croissance ultérieure). Lorsque la température est en dessous de 15°C , l'ettringite n'est plus stable. La conversion d'ettringite en thaumasite arrive par la substitution isostructural d'aluminium par la silice. Les réactions de gonflement induites par la chaux peuvent être résumées comme suit :



II.2.8.2.2 Cas du traitement au ciment

Dans le traitement au ciment, des sulfates (gypse, hémihydrate ou anhydrite) sont ajoutés pour réagir avec $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ pour former l'ettringite dite primaire qui permet d'éviter le raidissement immédiat de la pâte (« prise éclair »). L'ettringite secondaire apparaît plusieurs mois ou années après et cause le gonflement. Elle se manifeste par l'attaque de sulfates d'origine externe (eaux souterraines, sol..) ou interne (remobilisation des sulfates de la matrice cimentaire, altération de minéraux présents dans les granulats). Ses sulfates se combinent avec le $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ pour donner l'ettringite secondaire. La thaumasite est un minéral considéré comme résultant de la transformation de l'ettringite par substitution de

l'alumine par de la silice et du carbonate. L'important dans la formation de la thaumasite est la source de silice qui provient des $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. La formation de thaumasite s'accompagne de la fragilisation du ciment.



II.2.8.3 Effets des ajouts minéraux sur les propriétés des sols fins améliorés

Les faibles caractéristiques d'un sol ont un impact majeur sur les ouvrages de génie civil et leur 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 mise en œuvre et de compactage, portance et résistance au poinçonnement. De nombreuses études et recherches expérimentales ont été menées sur l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux. Le potentiel de la stabilisation s'est avéré dépendre du type de sol, la quantité des stabilisateurs, des combinaisons de stabilisateur et de l'âge (Hossain et al, 2007).

II.2.8.3.1 Effets de la pouzzolane sur les sols améliorés

a) Effets de la pouzzolane naturelle sur la plasticité

L'addition de 10 puis 20% de PN dans une vase a permis à chaque fois une diminution d'indice de plasticité du sol de 31,14% sans pouzzolane jusqu'à 23,88% à 20% de pouzzolane. Une augmentation faible de limite de plasticité ainsi que la diminution de la limite de liquidité en sont la cause (Zoubir, 2009).

b) Effets de la pouzzolane naturelle sur le compactage

Harichane et al(2011a) ont eu à étudier l'effet de l'incorporation de 10 et 20% de PN sur deux sols argileux, l'un très plastique et l'autre peu plastique. Les paramètres de compactage évoluent de la même manière dans les deux sols : une diminution légère de la teneur en eau optimale et augmentation légère également de la densité sèche maximale avec l'addition de pouzzolane. Zoubir (2009) a aussi observé la diminution de la teneur en eau optimale avec les mêmes proportions en pouzzolane, mais toutefois n'a pas remarqué de variation sur la densité maximale sèche.

c) Effets de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression

La PN n'influe pas considérablement sur la résistance à la compression d'un sol. Pour un temps de cure de 90 jours l'addition de pouzzolane dans le sol a faiblement augmenté la résistance à la compression (Harichane et al, 2011b ; Zoubir, 2009).

d) Effets de la pouzzolane naturelle sur la résistance au cisaillement

L'addition de la PN seule au sol présente un effet marginal sur la résistance au cisaillement du sol. (Harichane et al, 2011a ; Zoubir, 2009).

II.2.8.3.2 Effets du ciment sur les sols améliorés

a) Effets du ciment sur la plasticité

Le ciment est généralement utilisé pour les sols de faible plasticité ayant une teneur en eau est élevée. Tous les auteurs s'accordent à dire que l'addition du ciment cause une réduction dans l'indice de plasticité. L'incorporation du ciment réduit la plasticité des sols. Ces résultats ont été confirmés par de nombreux chercheurs (Degirmenci et al, 2007). L'influence du ciment portland sur les limites d'Atterberg d'un sol constitué de rejets de charbon est montrée dans le tableau 2.1 (Okagbue et Ochulor, 2007).

Tab : 2.1 – Effet du ciment sur les limites d'Atterberg (Okagbue et Ochulor, 2007).

Ciment(%)	Limite de liquidité(%)	Limite de plasticité(%)	Indice de plasticité(%)
0	32	21	11
2	37	22	15
6	38	25	13
10	39	29	10

Une augmentation pour les deux limites de liquidité et de plasticités a été observée avec l'augmentation du dosage du ciment, cependant, l'indice de plasticité diminue. Ces résultats sont désirables pour la stabilisation. Une réaction a eu lieu entre le ciment et le sol. La modification des particules d'argile par le ciment et la dissolution des silicates et aluminates de particule d'argile due à un pH élevé est produite par la réaction de chaux et d'hydratation du ciment. Les matières dissoutes vont associer avec Ca^{2+} pour produire des agents de cimentation c'est de cette façon les particules d'argile adjacentes seront liées (Okagbue et Ochulor, 2007). Osula (1996) conclut que cette réaction mène à la formation de particules grossières, par conséquent, la réduction des fines particules mène à une réduction dans la surface superficielle et fait réduire la plasticité.

b) Effets du ciment sur le compactage

L'addition du ciment dans un sol argileux de haute plasticité augmente la teneur en eau optimale et réduit la densité sèche maximale (Okagbue et Ochulor, 2007). L'addition du ciment améliore et modifie les caractéristiques du sol, menant à un compactage performant avec une augmentation de la densité sèche. L'agglomération du ciment autour des grains de sol, cause une augmentation de la taille des particules fines, et peut aussi avoir une légère réduction de la teneur en eau optimale. 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.

c) Effets du ciment sur la résistance à la compression

La résistance à la compression augmente avec l'augmentation des dosages du ciment. L'augmentation de la résistance est attribuée aux composantes actives du ciment portland. Par l'hydratation, ces composés actifs (silicate tricalcique, silicate dicalcique et l'aluminate tricalcique) cristallisent et lient ensemble les particules du sol, de ce fait en les transformant en masse dure. Les résultats obtenus suggèrent que l'efficacité du ciment dans l'amélioration de la résistance du sol peut également être attribuée à la composition du sol. (Okagbue et Ochulor, 2007) ; (Kenai et al, 2006); (Aiban et al, 1998).

d) Effets du ciment sur la résistance au cisaillement

Gay and 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. Ainsi pour une teneur en ciment de 8% et une période de cure de 28 jours, l'angle de frottement interne 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.

II.2.8.3.3 Effets de la chaux sur les sols améliorés

a) Effets de la chaux sur la plasticité

- **En absence de sulfates**

George et al. (1992) ont conclu que l'indice de plasticité du sol diminue avec l'addition de la chaux et cette diminution est associée avec l'augmentation de la limite de plasticité plutôt que la diminution de la limite de liquidité. Les résultats de Bell (1996) indiquent que la limite de plasticité et la limite de liquidité de la kaolinite traitée augmentent légèrement avec l'addition de 2% de chaux. Pour l'argile montmorillonite traitée, la limite de plasticité augmente avec la chaux jusqu'à 4% puis se stabilise alors que la limite de liquidité diminue progressivement jusqu'à 8% de chaux. La chaux modifie l'affinité à l'eau des particules de la kaolinite et cela se traduit par l'augmentation de la capacité d'échange cationique et en conséquence de la capacité d'absorption d'eau et donc la limite de liquidité augmente. Au contraire dans le cas de la montmorillonite, l'ajout de la chaux diminue considérablement la limite de liquidité avec l'augmentation de la limite de plasticité. Cette différence de comportement de la kaolinite est expliquée par la différence dans l'échange cationique et les différents niveaux d'activité sur la surface de la particule d'argile.

- **En présence de sulfates**

Kinuthia et al. (1999) ont étudié la plasticité d'une kaolinite traitée à 6% de chaux en présence de sulfates monovalents et divalents. Les résultats dégagés montrent que toutes les teneurs en eau varient en fonction du dosage en sulfate. Les sulfates divalents présentent une variation cadencée (diminution pure), tandis que, les sulfates monovalents montrent une variation perturbée (une forte diminution pour un faible dosage 1% puis, une faible augmentation pour un fort dosage). Pour les fortes concentrations (2 à 3% de SO_3), les sulfates divalents diminuent la plasticité plus que les sulfates monovalents. Mais, l'effet est le contraire en faible dosage en sulfate (moins de 1% de SO_3). Donc, la réduction de la plasticité dépend de la concentration en sulfate et du type de cation qui s'attache à l'ion sulfatique. Car une forte concentration en cation provoque l'augmentation de l'espace particule-particule.

Sivapullaiah et al. (2000) dans leur étude, n'ont pas eu les mêmes résultats : Ils ont étudié l'influence d'un sulfate monovalent et d'un autre divalent sur la limite de liquidité d'une montmorillonite très plastique, traitée à 6% de chaux éteinte avec des concentrations en sulfates de 0.5, 1 et 3%. La limite de liquidité augmente avec le dosage en sulfate. On remarque le sulfate monovalent augmente plus la limite de liquidité que le sulfate divalent (figure 2.9) : Cela a mis en évidence l'effet non négligeable de la nature des minéraux

argileux qui se présentent dans les sols, la montmorillonite possède une réactivité (CEC) plus élevée qu'une kaolinite.

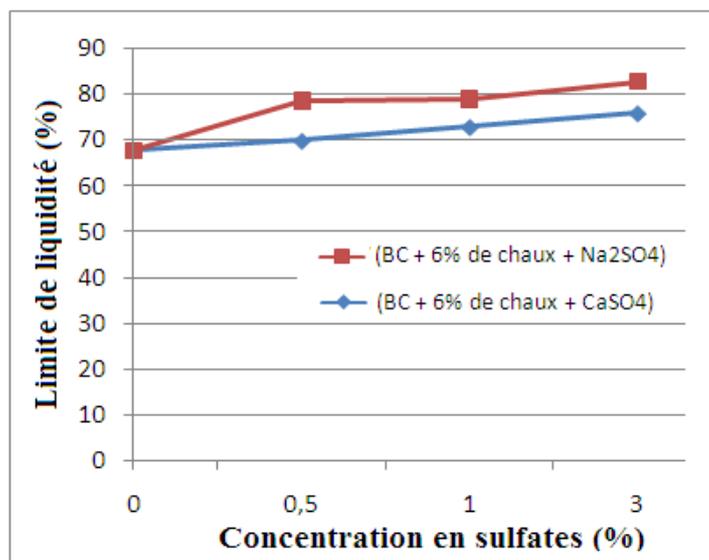


Fig. 2.9 : L'effet des différents types de cations sulfatiques sur la limite de liquidité (W_L) d'une montmorillonite traitée à 6% chaux, (Sivapullaiah et al, 2000).

b) Effets de la chaux sur le compactage

- En absence de sulfates

D'après Bell (1996) l'addition de la chaux avec les sols argileux augmente leur teneur en eau optimale et réduit leur densité sèche maximale, le LPCP, SETRA (2000) confirme ces résultats (figure 2.10). Bell (1996) a constaté (Tableau 2.2) une densité de compactage plus élevée a été obtenue par l'argile de kaolinite, que par les argiles expansibles tel que la montmorillonite. Dans les trois sols étudiés le quartz a développé la densité la plus élevée.

Tab 2.2 : Effet de la chaux sur le compactage de la kaolinite, montmorillonite, quartz (Bell, 1996).

Matériaux	Teneur en chaux optimale(%)	Teneur en eau optimale(%)	Densité sèche maximale (Mg/m^3)
Kaolinite	0	29	1.4
	6	31	1.33
Montmorillonite	0	20	1.29
	4	25	1.15
Quartz	0	28	1.41
	6	32	1.40

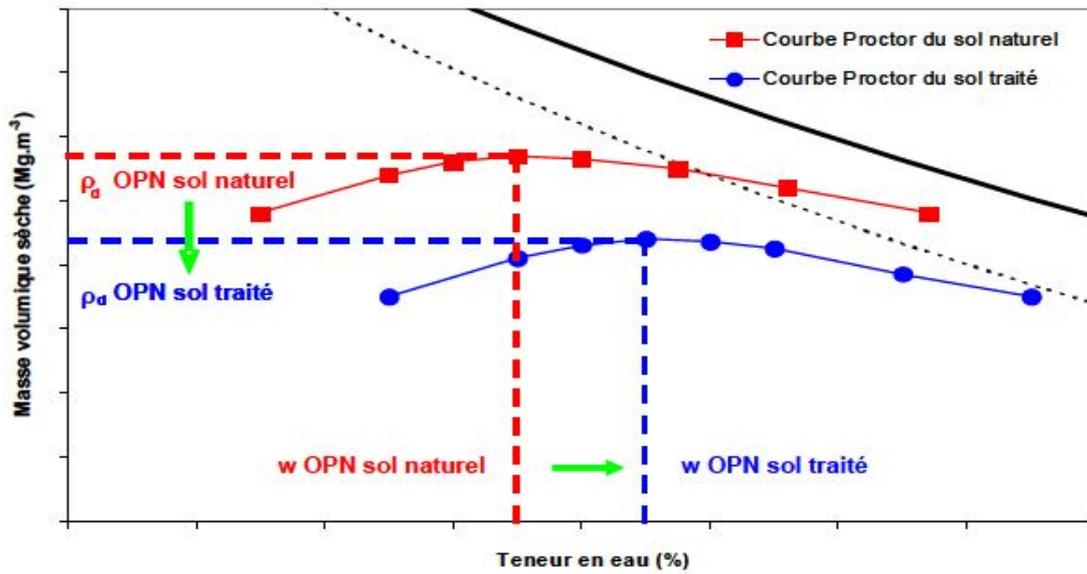


Fig. 2.10 : Modification des caractéristiques de compactage d'un sol suite à l'ajout de chaux, d'après le GTS (LCPC –SETRA, 2000)

• En présence de sulfates

Kinuthia et al. (1999) ont étudié l'influence des sulfates monovalents (Na_2SO_4 et K_2SO_4) et divalents (CaSO_4 et MgSO_4) sur les paramètres de compactages d'une kaolinite traitée à 6% de chaux. Les résultats trouvés montrent que la densité sèche maximale diminue en présence de sulfate : Dans le cas des sulfates monovalents on a une variation non-uniforme avec la concentration et le sulfate de potassium donne une plus faible valeur de densité. Alors que les sulfates divalents diminuent avec la concentration. Les résultats montrent aussi que la teneur en eau optimum augmente : pour les sulfates monovalents on a une augmentation de pour les faibles concentrations 1% et une diminution en forte concentration 2 à 3%. Alors que pour les sulfates divalent l'augmentation est régulière(Figure.2.11).

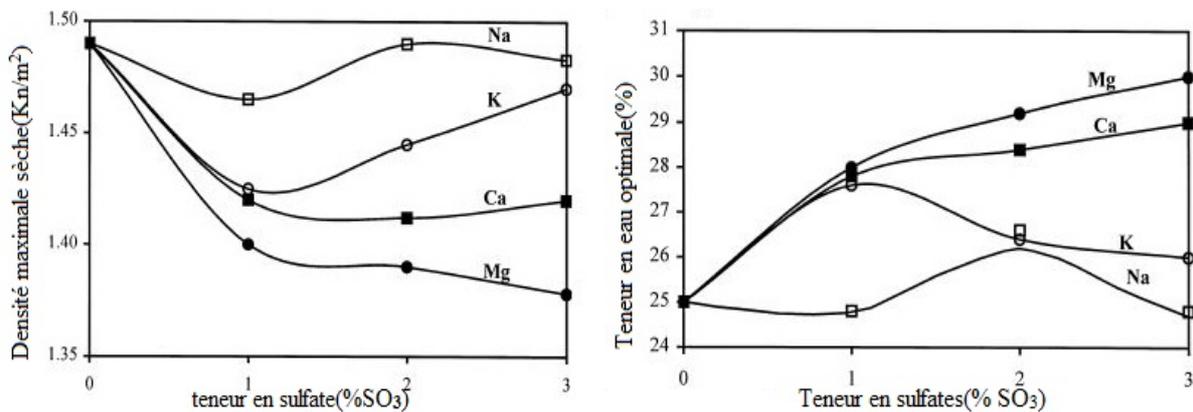


Fig : 2.11 : l'effet des différents types de cations sulfatiques sur la densité sèche maximale (a), et la teneur en eau optimum (b), d'une kaolinite sans présence de sulfates, (Kinuthia et al, 1999).

c) Effets de la chaux sur la résistance à la compression

La résistance à la compression simple des sols argileux augmente avec l'addition de chaux (Bell, 1996). Manasseh et Olufmi (2008) ont obtenu une valeur optimale de résistance à la compression simple pour 8% de chaux ajoutée au sol argileux.

d) Effets de la chaux sur la résistance au cisaillement

• **En absence de sulfates**

Osula(1991) a 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 formation des nouveaux produits de cimentation(C-S-H, C-A-H), tandis que celle de l'angle de frottement est due à la floculation des mêmes particules. Les résultats obtenus par Muntohar and Hantoro (2000) le confirment en montrant que pour un dosage en chaux de 10 % l'angle de frottement est environ 1.7 fois celui du sol non traité.

• **En présence de sulfates**

Sivapullaiah et al, (2000) ont étudié le comportement de la montmorillonite traitée à 6% de la chaux sous l'influence de sulfates (NaSO_4 et CaSO_4). Trois concentrations de sulfates (0.5%, 1%, 3%) ont été utilisées et les paramètres effectifs de cisaillement ont été déterminés à court et long terme (7 jours et 365jours) dans le cadre de l'étude.

L'angle de frottement interne effectif à 7 jours de cure, pour des faibles concentrations en sulfate de calcium (de 0.5 à 1%) a diminué mais, au-delà de 1%, l'effet est renversé. Dans le cas du sulfate de sodium l'angle diminue pour le même temps de cure aux différentes concentrations. Pour 365 jours de cure la variation de l'angle de frottement est perturbée pour les deux sulfates utilisés (figure 2.12).

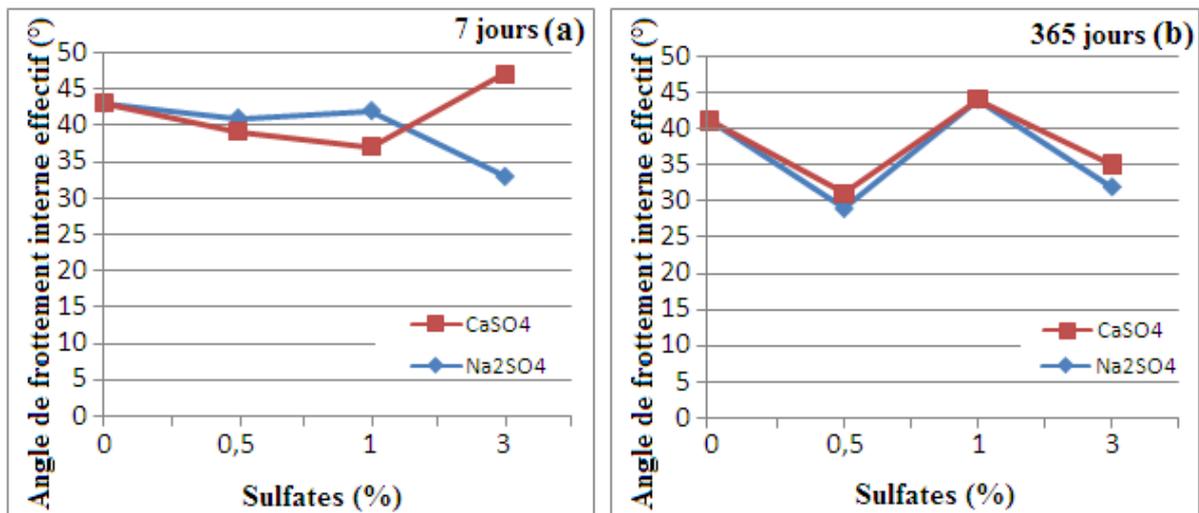


Fig.2.12 : L'effet des sulfates monovalents et divalents sur l'angle de frottement interne effectif d'une montmorillonite traitée à 6% de chaux pour différentes périodes de cure, (Sivapullaiah et al, 2000).

Pour le sulfate monovalent(Na_2SO_4), la cohésion effective diminue à faible dosage et augmente pour un dosage fort pour une période de cure de 7jours. Alors le sulfate divalent

(CaSO_4) crée une variation inverse pour le même temps de cure. A 365 jours de cure, la cohésion diminue considérablement dans les deux cas de sulfates utilisés.

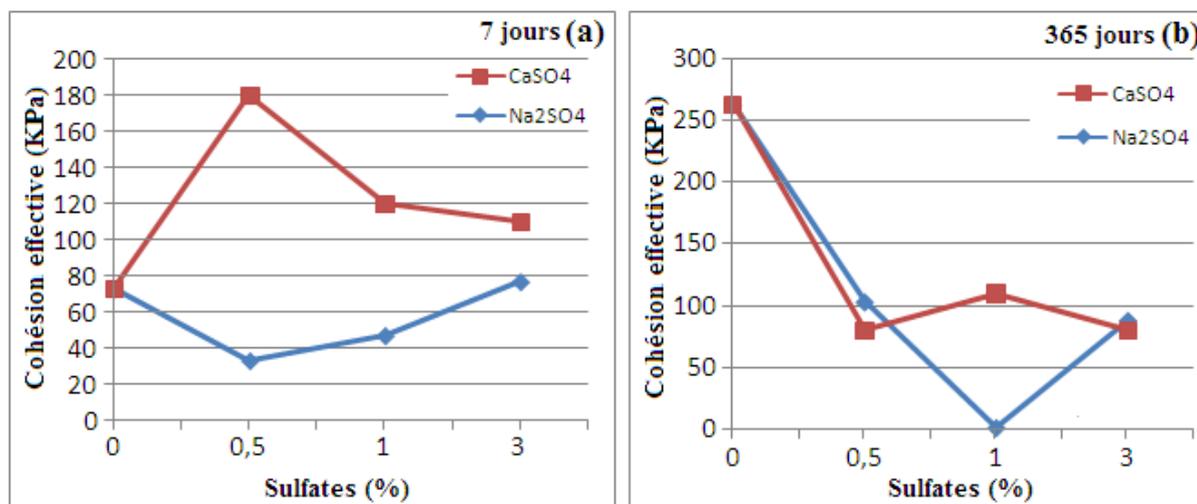


Fig.2.13 : L'effet des sulfates monovalents et divalents sur la cohésion effective d'une montmorillonite traitée à 6% de chaux pour différentes périodes de cure, a)7jours ;b) 365 jours, (Sivapullaiah et al, 2000).

Les résultats des paramètres de cisaillement de la montmorillonite et de la kaolinite obtenus par (Sivapullaiah et al. 2000, 2006) sont reportés sur un même graphe (Figure 2.14) en vue de mettre en évidence l'effet de la minéralogie sur le traitement des sols à la chaux en présence d'un sulfate monovalent (Na_2SO_4) avec deux concentrations (1 et 3%).

En général, quel que soit la concentration de l'élément perturbateur et quel que soit la période de cure, l'effet du sulfate de sodium sur l'angle de frottement interne effectif de la kaolinite est plus grand que sur celui de la montmorillonite (Figure 2.14a). Cet effet est renversé concernant la cohésion effective (Figure 2.14.b). La concentration en sulfate et la nature minéralogique de ce sol influent sur les résultats.

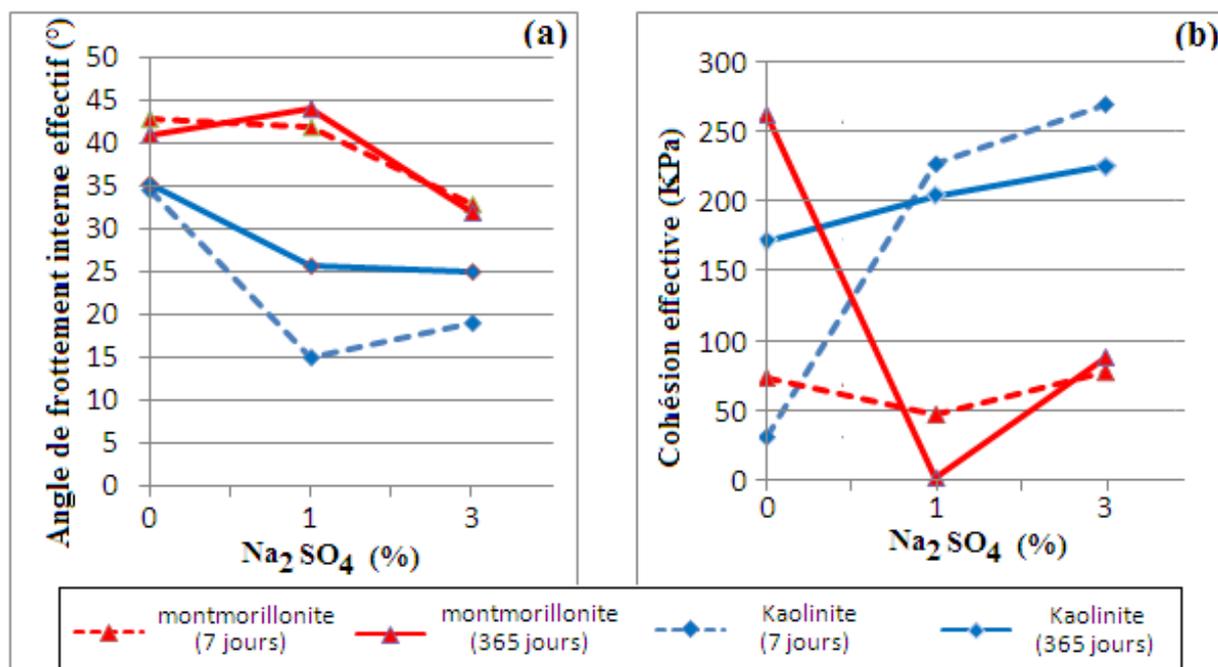


Fig.2.14 : L'effet de la minéralogie sur l'angle de frottement interne effectif (a), et la cohésion effective (b) de deux sols argileux traités à 6% de chaux et perturbés par un sulfate monovalent (Na_2SO_4) pour différentes périodes de cure, (Sivapullaiah et al, 2000, 2006).

En présence de sulfate, durant une année de cure, la résistance au cisaillement diminue significativement (figure 2.15). Cette diminution dépend du dosage en sulfate ainsi que du type de cations sulfatiques (Figures 2.15a et 2.15b) Le sulfate de sodium, pour un dosage de 1% fait diminuer la résistance au cisaillement plus que le sulfate de calcium.

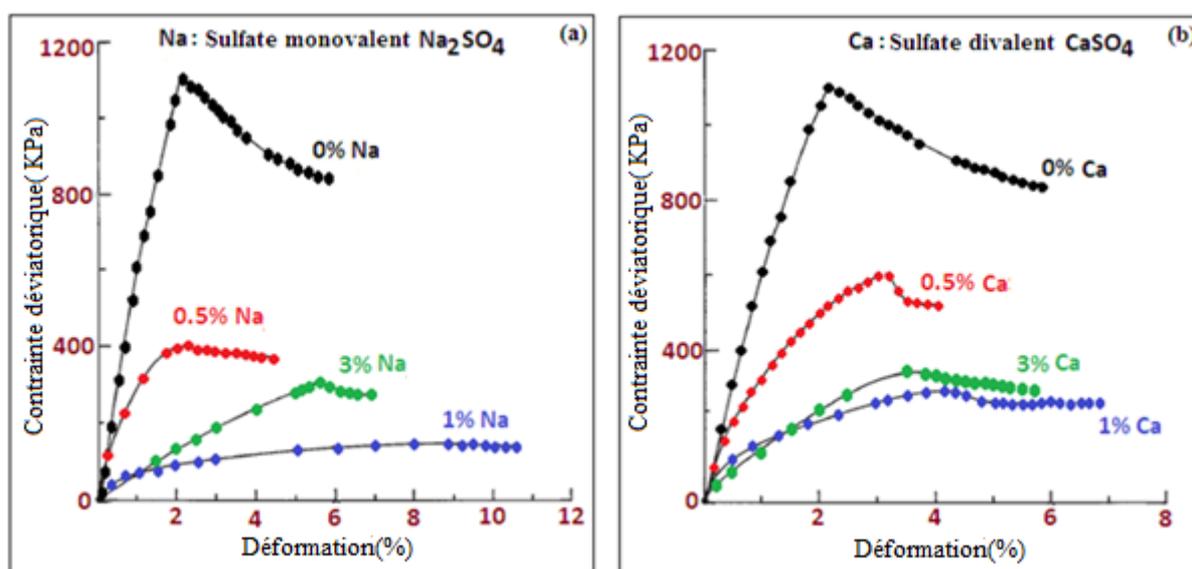


Fig.2.15 : L'influence de deux types de cations sulfatiques (Na_2SO_4 et CaSO_4) sur la résistance au cisaillement d'une montmorillonite traitée à 6% de chaux après une année de cure (PC = 100 KPa). (Sivapullaiah et al, 2000)

Sivapullaiah et al. (2000, 2006) ont fait une étude comparative de l'évolution de la résistance au cisaillement de la montmorillonite et de la kaolinite traitées à la chaux et perturbées au sulfates de sodium. La perturbation est faite pour 1% et 3% de sulfate de sodium. En absence de sulfate, la montmorillonite présente un pic de résistance au

cisaillement équivalent au double de celui de la kaolinite. La présence des sulfates fait sensiblement diminuer le pic de la résistance au cisaillement de la montmorillonite (de 1100 à moins de 400 KPa pour les deux concentrations en sulfate). Tandis que, celui de la kaolinite augmente faiblement avec la diminution du dosage en même type de sulfate (de 600 à 700 KPa) (figure 2.16).

La perturbation dépend donc des concentrations en sulfates et de la minéralogie des sols.

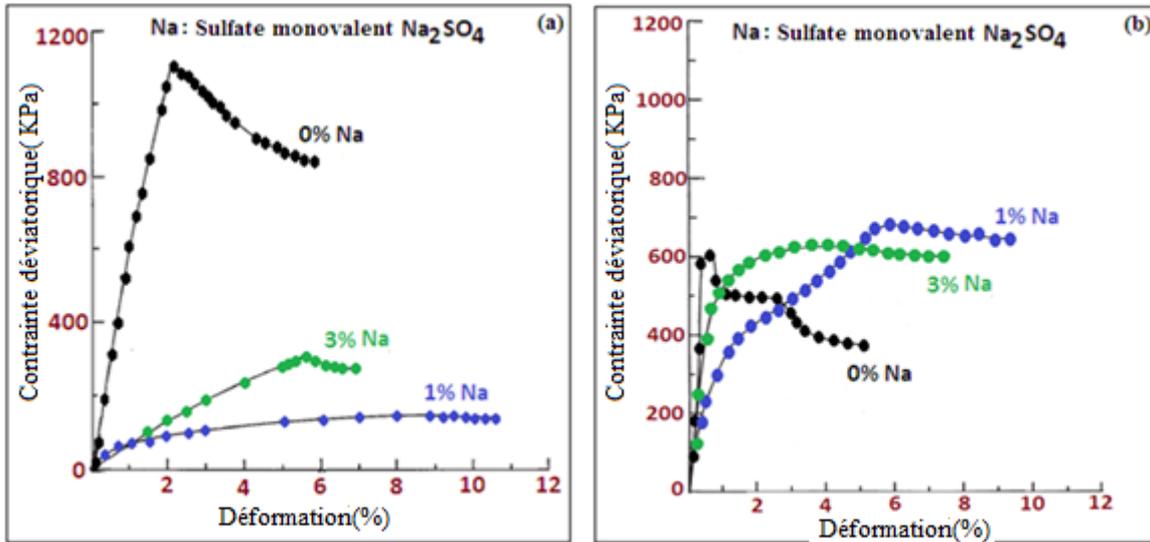


Fig.2.16 : L'effet de la minéralogie sur la résistance au cisaillement de deux sols argileux [(a) : montmorillonite, (b) : kaolinite] traités à 6% de chaux et perturbés par un seul sulfate monovalent (Na₂SO₄) pendant une année de cure, (PC=100 KPa), (Sivapullaiah et al, 2000, 2006).

II.3 Conclusion

La plupart des méthodes d'amélioration des sols décrites tiennent compte particulièrement de la nature du sol : sols fins ou sols grenus. Dans la pratique, l'application de ces méthodes est soumise à plusieurs aléas : climat, expérience de main-d'œuvre, vétusté et non-conformité aux normes des appareils et machines. Il doit y avoir des précautions dans le respect des normes ainsi que dans les méthodes de calcul utilisées pour chaque méthode et pour une bonne réalisation de l'ouvrage.

La méthode de stabilisation par ajouts minéraux semble être la plus pratique et favorable (économie et mis en œuvre) et se perfectionne au fur et à mesure grâce aux études en cours réalisées par les chercheurs en faisant intervenir les différents ajouts et d'autres éléments pouvant influencer le traitement

Chapitre III :

Types, origine des ajouts minéraux et
des éléments perturbateurs

PDF Pro Evaluation

III.1 Introduction

Le traitement de sol par ajouts minéraux s'avère être une méthode efficace dans les travaux de terrassement. La diversité des choix des ajouts, fonction de la proximité de zone d'extraction des ajouts, leur possible combinaison et la nature du terrain en place ou du remblai à traiter sont les atouts majeurs de cette technique.

Néanmoins, elle ne reste pas parfaite et présente des inconvénients : Le ciment qui est l'un des ajouts les plus utilisés génère environ une tonne de CO₂ pour une tonne de ciment produit. De ce fait le remplacement total ou partiel de ce dernier pour des raisons environnementales et économiques a conduit à l'utilisation d'autres éléments (chaux, pouzzolane...). Certains éléments perturbateurs (microstructure du sol, matières organiques, sulfates, chlorures, fertilisants, etc...) sont susceptibles d'atteindre le sol traité et contribuent à endommager le matériau traité et à réduire les nouvelles performances ou à avoir l'effet inverse sur le matériau.

Le chapitre suivant donne un aperçu sur les différents ajouts minéraux ainsi que les éléments perturbateurs qui interviennent lors du traitement des sols

III.2 Les ajouts minéraux

Ce sont des éléments ou corps composés chimique naturel ou d'origine industrielle qui associés au sol changent les paramètres physiques ou/et mécaniques. Les ajouts minéraux permettent d'avoir une amélioration des sols à plus long terme. Selon la NF p 15-101 (2001), ils sont classés en deux catégories : les ajouts minéraux inertes et les ajouts minéraux actifs.

III.2.1 Ajouts minéraux inertes

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau). Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et la poussière.

III.2.1.1 Fillers calcaires

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes)

Les fillers se différencient par l'origine, la composition minéralogique et chimique, ainsi que la finesse et forme des grains, dureté et porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

III.2.1.2 La poussière

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000 cm²/g. Le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable

à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

III.2.2 Ajouts minéraux actifs

III.2.2.1 Ciment Portland

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Il est obtenu après un processus mécanique débutant par la calcination d'un mélange homogène de calcaire et d'argile broyés, puis refroidissement pour obtenir le clinker et broyage de ce dernier.

III.2.2.2 Laitier granulé de haut fourneau

Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide du laitier fondu de composition adaptée provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau ; il contient au moins deux tiers en masse de laitier vitreux et présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable(NF p15-101-1).

III.2.2.3 La fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de ferrosilicium ou de zircone. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de ferrosilicium). Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux, SiO se forme et s'échappe vers la partie supérieure du four, il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice SiO₂. Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage. D'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice (Aitcin, 1994).

III.2.2.4 La pouzzolane

La pouzzolane est des matériau, naturel ou artificiel, capable de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes (Venuat, 1989). Cette capacité de réaction est appelée pouzzolanité.

Les normes françaises donnent les définitions suivantes de la pouzzolane entrant dans la fabrication des ciments :

a) Pouzzolane naturelle

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites.

b) Pouzzolane artificielle

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement sont: argile, schiste, latérite, bauxite et moler.

III.2.2.5 la chaux

La chaux désigne toutes les formes physiques et chimiques dans lesquelles peuvent apparaître l'oxyde de calcium et de magnésium (CaO et MgO) et/ou l'hydroxyde de calcium et/ou de magnésium (Ca(OH)₂ et Mg(OH)₂). Elle se présente sous deux formes : aérienne et hydraulique.

a) Chaux aériennes

Il s'agit des chaux constituées principalement d'oxyde ou d'hydroxyde de calcium qui durcissent lentement à l'air sous l'effet du dioxyde de carbone présent dans l'air. En général, elles ne durcissent pas sous l'eau, car elles n'ont pas de propriétés hydrauliques. Elles peuvent être soit des chaux vives soit des chaux hydratées.

- **Chaux vives (Q)**

La chaux aérienne constituée principalement d'oxyde de calcium et de magnésium produit par la calcination de calcaire et/ou de dolomie. Les chaux vives ont une réaction exothermique au contact de l'eau. Les chaux vives se présentent sous différents états granulaires, allant de la roche à des matériaux finement pulvérisés. Elles incluent les chaux calciques et dolomitiques.

- **Chaux hydratées (S)**

Chaux aérienne, calcique ou dolomitique résultant de l'extinction contrôlée des chaux vives. Elles sont produites sous forme de poudre sèche, de pâte ou de coulis (lait de chaux).

- **Chaux calciques (CL)**

Elle est constituée principalement d'oxyde de calcium ou d'hydroxyde de calcium, sans matériaux pouzzolaniques ou hydrauliques ajoutés.

- **Chaux dolomitiques (DL)**

La chaux constituée principalement d'oxydes ou d'hydroxydes de calcium et de magnésium, sans matériaux pouzzolaniques ou hydrauliques ajoutés. Elles peuvent être semi-hydratées et hydratées.

b) Chaux hydrauliques naturelles (NHL)

Chaux produite par la calcination de calcaires plus ou moins argileux ou siliceux avec réduction en poudre par extinction, avec ou sans broyage. Toutes les NHL ont la propriété de faire prise et de durcir en présence d'eau. Le dioxyde de carbone présent dans l'air contribue également au processus de durcissement.

- **Chaux hydrauliques naturelles avec matériaux ajoutés (Z)**

Certains produits spéciaux, qui peuvent contenir des matériaux hydrauliques ou pouzzolaniques adaptés rajoutés, jusqu'à 20 % en masse, sont désignés de plus par la lettre «Z».

- **Chaux hydrauliques (HL)**

C'est une chaux principalement constituées d'hydroxydes de calcium, de silicates de calcium et d'aluminates de calcium, produites par mélange des constituants appropriés. Elles ont la propriété de faire prise et de durcir en présence d'eau. Le dioxyde de carbone présent dans l'air contribue également au processus de durcissement. (NF p15-104)

La même norme française propose un classement en fonction de leur teneur en oxyde de calcium et magnésium (CaO + MgO) pour les chaux aériennes et en fonction de leur résistance à la compression pour les chaux hydrauliques dans le tableau 3.1.

Tab3.1 Types de chaux et leur notation (NF p15-104)

Désignation	Notation
Chaux calcique 90	CL 90
Chaux calcique 80	CL 80
Chaux calcique 70	CL 70
Chaux dolomitiques 85	DL 85
Chaux dolomitiques 80	DL 80
Chaux hydraulique 2	HL 2
Chaux hydraulique 3,5	HL 3,5
Chaux hydraulique 5	HL 5
Chaux hydraulique naturelle 2	NHL 2
Chaux hydraulique naturelle 3,5	NHL 3,5
Chaux hydraulique naturelle 5	NHL 5
a) En outre, les chaux aériennes sont classées selon la forme distribuée : chaux vive (Q) ou chaux hydratée (S). Dans le cas particulier de chaux dolomitiques hydratées, le degré d'hydratation est identifié comme suit : S1 : semi-hydratée ; S2 : totalement hydratée.	

III.3 Les éléments perturbateurs

Un élément perturbateur peut être défini comme un parasite qui induit des effets néfastes (indésirables) au cours et après le traitement du sol. Dans certains cas, cet élément perturbateur importe des effets bénéfiques pour les sols.

Les composés suivants sont liés à la perturbation : les matières organiques, la microstructure, les composés soufrés et les sulfates solubilisés, les phosphates, les nitrates, les chlorures, la nature des ajouts utilisés (chaux, ciment, pouzzolane naturelle ou artificielle,

endres volantes, fumée de silice...etc. Le LCPC-SETRA (2000) résume dans le tableau 3.2 l'effet de certains éléments perturbateurs sur le traitement des sols aux liants hydrauliques.

Tab.3.2 : Les perturbateurs et leurs effets cités par le GTS, (LCPC-SETRA, 2000).

Perturbateurs	Effet sur le traitement des sols
Les matières organiques	Consommation des produits de traitement permettant l'augmentation du pH au détriment des réactions de cimentation
Les sulfates et sulfures	Formation d'espèces cristallines provoquant un gonflement du sol
Les chlorures	Accélérateurs de prise et formation de phases gonflantes
Les phosphates	Inhibiteurs ou retardateurs de prise
Les nitrates	Inhibiteurs ou retardateurs de prise

III.3.1 La matière organique

La matière organique est la matière carbonée produite en général par des êtres vivants, végétaux et animaux. Il s'agit par exemple des glucides, protides et lipides. À la différence de la matière minérale, la matière organique est souvent biodégradable. Outre le carbone et l'eau qui sont les constituants essentiels, elle peut contenir aussi les éléments hydrogène, oxygène, azote, phosphore, soufre, ... (Duchaufour, 2004). Parmi la matière organique produite, on peut citer : les composés humiques (acides fulviques, acides humiques et humines évolués) stables plusieurs années ; les polysaccharides, composés peptidiques et acides gras.

Les acides organiques perturbent le traitement des sols. Les acides organiques (acide acétique, acides humiques, acides tanniques) empêchent la prise parce que le pH est trop faible pour former les produits cimentaires. Les huiles, les hydrocarbures non miscibles, et le sucre retardent la prise en enrobant les particules de ciment (ralentissement de l'hydratation), et sans affecter les résistances (Tremblay et al, 2002). (Peltier, 1957) a montré l'influence de plusieurs formes de matière organique sur la résistance à la compression d'un sol sableux traité au ciment et a présenté les résultats dans la figure 3.1

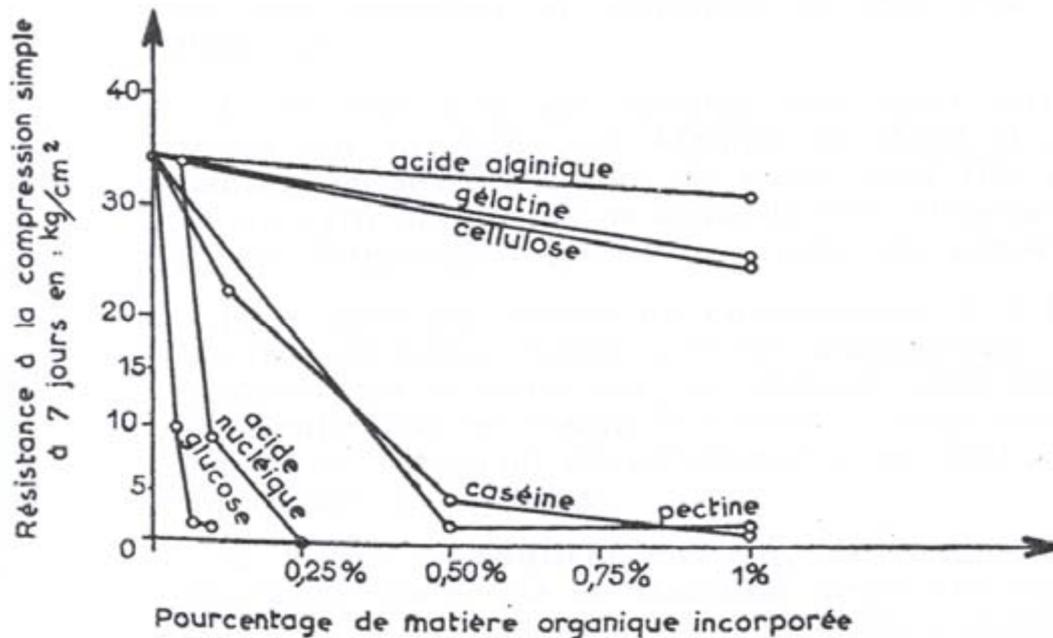


Fig 3.1 Effets de l'incorporation au sol de diverses matières organiques à divers pourcentages (Peltier ,1957).

III.2.2 Les chlorures

La présence naturelle de chlorures dans les sols est attribuée généralement aux embruns marins et aux intrusions d'eau de mer dans les zones côtières et aux émanations volcaniques. Ils sont généralement présents sous forme de sels solubles NaCl et KCl. Les sources anthropiques sont l'épandage d'engrais sur les sols agricoles, l'épandage sur les routes, effluents industriels, eaux usées, eaux d'irrigation, eaux de lixiviation des déchets...

Utilisés dans le ciment Portland comme adjuvants, les chlorures apparaissent soit comme accélérateurs de prise (chlorure de calcium utilisé à 1 ou 2%) soit retardateurs de prise (chlorure de magnésium). Dans le cas du chlorure de magnésium, la température ainsi que la concentration déterminent l'effet de ce dernier : pour une pâte de ciment conservée à 12°C, le retard de prise augmente avec la concentration en chlorure. A 20°C et à faible concentration (0,2%), les chlorures sont accélérateurs de prise. A fortes concentrations (0,9%), ils sont retardateurs. A 28°C, les chlorures sont retardateurs quelle que soit leur concentration. (Nilforoushan et Sharp ,1995).

Des études sur les sols traités montrent que les chlorures réagissent bien avec le sable (traitement au ciment) en temps qu'accélérateurs de prise augmentant également sa résistance à la compression, mais n'ont pas d'influence significative sur celle du limon (traitement chaux et ciment) (Le Borgne, 2008). La figure 3.2 présente les résultats de cette étude. Une autre étude, basée sur l'utilisation des chlorures pour limiter le gonflement de l'argile a permis d'obtenir des résultats significatifs : Les chlorures(KCl,NaCl,CaCl₂) réduisent considérablement, jusqu'à 70% le gonflement de la bentonite qui est de la famille des smectites (Nabil & AISSA ,2004).

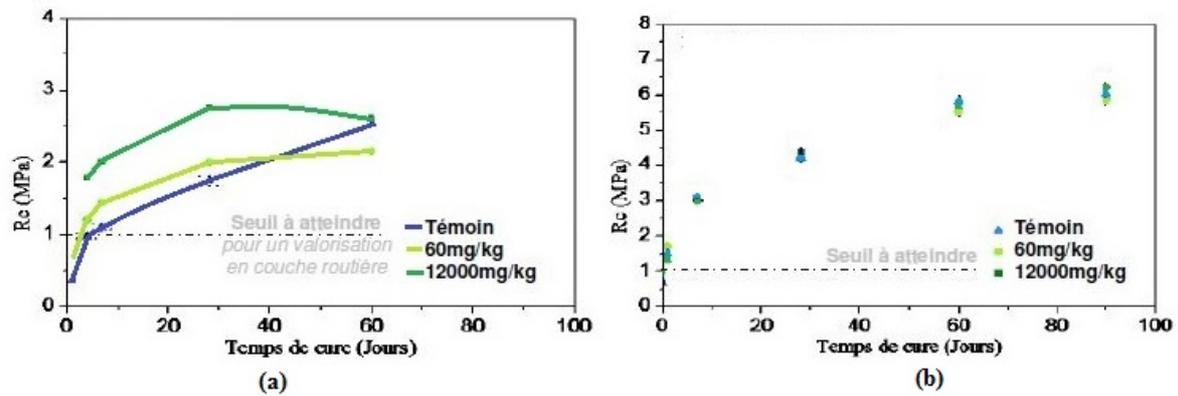


Fig 3.2 : Influence d'une addition de NaCl sur la résistance à la compression simple de sols traités (a) sable de Bouër ; (b) limon du Val d'Europe (Le Borgne 2008)

III.3.3 Les nitrates

Les nitrates sont des sels dérivés oxygénés de l'azote. La fixation de l'azote atmosphérique et la minéralisation de la matière organique mènent, par une succession de réactions biochimiques, à la production d'ions ammonium, nitrite et nitrate, formes principales de l'azote dans les sols. Les apports en fertilisants chimiques et organiques modifient la chimie du sol. Les agriculteurs apportent les nutriments nécessaires aux plantes et une partie de ces produits se minéralise dans les sols. Les sels de nitrate sont très solubles dans l'eau de sorte que leur passage dans la solution de sol se produit immédiatement après leur application, générant de forts gradients d'azote. Le sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, l'urée $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, le nitrate de calcium $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ou le nitrate de potassium KNO_3 sont d'autres formes courantes d'apport d'azote aux sols agricoles.

Dans les matériaux cimentaires, les nitrates sont utilisés comme adjuvants. Le nitrate de calcium $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ est utilisé comme accélérateur de prise (Cheikh-Zouaoui *et al.* 2006), (Aggoun *et al.* 2008).

D'après Le Borgne(2008) qui a dopé le limon du Val d'Europe au nitrate d'ammonium (156mg NO_3/kg et 1,56g NO_3/kg) avant son traitement à 1,5% de chaux et 6% de ciment (0,26% et 2,6 % de nitrate). Il montre ainsi que les ions nitrate ne sont pas perturbateurs de la prise et de l'hydratation des liants. En effet, il constate qu'avec cet élément chimique, les résistances mécaniques et le gonflement volumique du matériau solidifié restent acceptables pour une réutilisation en technique routière. Guichard (2006) se focalise sur le limon des aéroports de Paris, reconnu apte au traitement à 2% de chaux et 6% du liant hydraulique routier Roc AS. Il contient initialement moins de 10mg de NO_3 par kg. Un apport en nitrate complémentaire, de 2 à 200 fois cette concentration (0,03 à 3,33%), sous la forme NH_4NO_3 , ne met pas en échec l'aptitude. En parallèle, Guichard montre que le sol de Louche, ayant des concentrations en NO_3 comprises entre 9 et 100mg/kg, est inapte au traitement. Il semble ainsi que la seule prise en compte de la concentration des ions nitrate dans un sol ne suffise pas à expliquer l'aptitude d'un sol au traitement.

III.3.4 Les phosphates

Les phosphates sont des sels de l'acide phosphorique, d'aspect granuleux et forant des concrétions contenant des fragments organiques. Le phosphore est un élément majeur de la pédosphère (1000mg/kg) dont 60% se trouve sous forme inorganique. Les teneurs en phosphate pour la plupart des sols sont de 200 à 4000mg/kg de sol sec. Le phosphate se présente sous la forme d'acide phosphorique H_3PO_4 , de composés ammono-phosphatés $(NH_4)_2(HPO_4)$ et $(NH_4)_3(PO_4)$ et de superphosphates simple $Ca(H_2PO_4)_2$ ou triple $3(Ca(H_2PO_4)_2)$. Les phosphates se trouvent sous formes d'engrais et de pesticides, de détergents, d'adoucisateurs d'eau, de retardateurs d'incendie, d'additifs pour carburants, de plastiques.

Dans le ciment les résistances à la compression simple restent stables pour 0,46% de P_2O_5 . En revanche, elles diminuent de 15 à 25MPa (20 à 30%) pour 0,75 et 0,85% de P_2O_5 (Lin et al, 2009). Cau Dit Coumes et Courtois (2003) ne montrent pas le même comportement sur un mortier. Retardateurs pour des concentrations de 0,30 à 1,20%, les ions phosphate à une concentration supérieure à 1,20% améliorent les propriétés d'un mortier contaminé par Na_3PO_4 accélérant la prise, diminuant le gonflement en immersion et améliorant la maniabilité.

Les phosphates sont des agents chimiques stabilisateurs lorsqu'ils sont utilisés sans liants. Lors de traitement ils diminuent la résistance à la compression du sol (limon), cette dernière demeure toujours importante pour une utilisation en technique routière (Le Borgne, 2008)

III.3.5 Les sulfates

Sels de l'acide sulfurique, les sulfates proviennent généralement de la dégradation chimique de la pyrite(FeS_2) ou du gypse($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) d'eaux souterraines et d'embruns marins. Le sulfate de potassium (K_2SO_4) est aussi présent dans l'engrais, le fumier et/ou le pesticide (Pansu et Gautheyrou, 2003).

Le sulfate, sous forme de gypse, hémihydrate ou anhydrite, est un composé nécessaire pour réguler la prise dans les ciments et les liants hydrauliques routiers. Ces derniers peuvent contenir de 0,1 à 4,0% de SO_3 . Toutefois le sulfate est identifié comme cause de gonflement et de fissuration. Lorsque plusieurs sulfates s'associent à l'alumine on assiste à la formation d'un nouveau composé qui est l'ettringite (trisulfo ou monosulfoaluminate de calcium hydraté) : c'est la réaction sulfatique. Dans certaines conditions ce nouveau composé se transforme en thaumasite. Tous deux initient un gonflement et affectent la structure même du matériau.

Dans le comportement des sols de nombreuses recherches se sont intéressées à l'influence des sulfates sur les sols. Un sol traité au ciment à différentes concentrations de sulfate de sodium($NaSO_4$) a permis de montrer que la résistance à la compression simple diminue lorsque la concentration de sulfate augmente (figure 3.3) : les ions de sulfate de sodium sont retardateurs de l'hydratation du ciment (Xing et al. 2009).

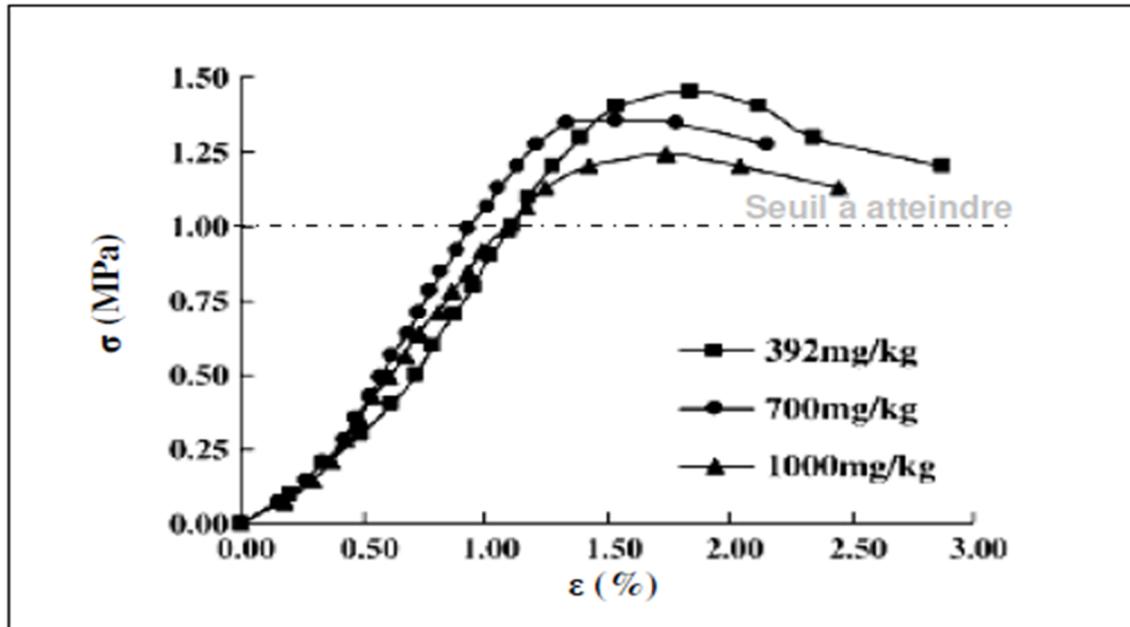


Fig 3.3 : Influence d'une addition de Na_2SO_4 sur la résistance à la compression simple d'un sol riche en sels traité (Xing et al. 2009)

D'après Rajasekaran (2005) la résistance au cisaillement d'un sédiment de dragage traité par 1 à 2% de chaux passe de 18kPa sans sulfate, à 72kPa en présence de Na_2SO_4 et 172kPa en présence de gypse($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Un risque de gonflement est par ailleurs évoqué pour 10 à 25% de Na_2SO_4 . Il existe dès 7,50% de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Kinuthia et al(1999) montrent l'influence du type de sulfate (monovalent Na_2SO_4 , K_2SO_4 et divalent CaSO_4 , MgSO_4) mis en jeu lors du traitement d'une kaolinite à la chaux. En présence de sulfates, la limite de liquidité et la masse volumique sèche maximale d'une kaolinite pure traitée à la chaux augmentent. Ainsi, les cations monovalents maintiennent voire inversent l'effet de la chaux. En revanche, les cations divalents renforcent les effets d'un traitement à la chaux en diminuant de manière importante l'indice de plasticité et la masse volumique sèche optimale et en augmentant nettement la teneur en eau optimale.

III.4 Conclusion

La préparation et l'utilisation des ajouts minéraux est régie par des normes qui donnent les informations essentielles sur les ajouts. Plusieurs chercheurs se sont intéressés aux éléments qui perturbent le traitement, mais ils n'ont pas pût trouver de comportement exhaustif pour chaque élément perturbateur. Le plus souvent lors du traitement la présence et la nature de l'ajout utilisé ainsi que la nature du sol peuvent changer l'effet de l'élément perturbateur. Il est donc primordial d'avoir une connaissance sur les différents mécanismes de stabilisation qui se déclenchent dans le sol traité après avoir utilisé l'ajout.

Chapitre IV :

Etude expérimentale au laboratoire,
analyse et discussion des résultats

IV.1 Introduction

Un programme expérimental a été entrepris pour mieux comprendre l'effet des sulfates sur le traitement des sols argileux stabilisés à la chaux, à la pouzzolane naturelle et par leur combinaison. Et pour cela un sol argileux gris de forte plasticité a été choisi. Harichane et al.(2011a) ont caractérisé le sol ainsi que les ajouts et l'élément perturbateur utilisé, nous présenterons la caractérisation qu'ils ont faites. Le co-encadreur de cette étude a eu a effectué des essais de cisaillement sur les éprouvettes de 30 et 60 jours, pour étudier l'influence du temps nous avons réalisé les essais à 7 jours de cure et présentés tous les résultats pour faire une étude l'évolution. Toutes les analyses ont été réalisées avec des matériaux argileux réduits en poudre de granulométrie inférieure à 1mm. Les protocoles expérimentaux employés s'appuient sur des normes ASTM (2004), NF p94-071-1(1994)et sur l'expérience acquise au niveau du laboratoire de l'habitat et de la construction centre (LHCC) de Rouïbaet d'Oued Smar(Alger).

IV.2 Matériaux utilisés et préparation

IV.2.1 Sols naturels

IV.2.1.1 Lieu de prélèvement

Dans cette étude le sol argileux gris a été prélevé à partir de 4m de profondeur en provenance d'un projet de remblai situé approximativement à 18 km au Nord-est de la ville de Chlef.

IV.2.1.2Préparation

Après son extraction, le sol a été placé dans des sachets en plastique, transporté au laboratoire et passé à l'étuve à 50°C pendant 24h. Après séchage, il a été concassé et broyé pour la préparation et exécution des essais géotechniques d'identification et de caractérisation (figure. 4.1 et figure. 4.2).(Harichane et al, 2011a)

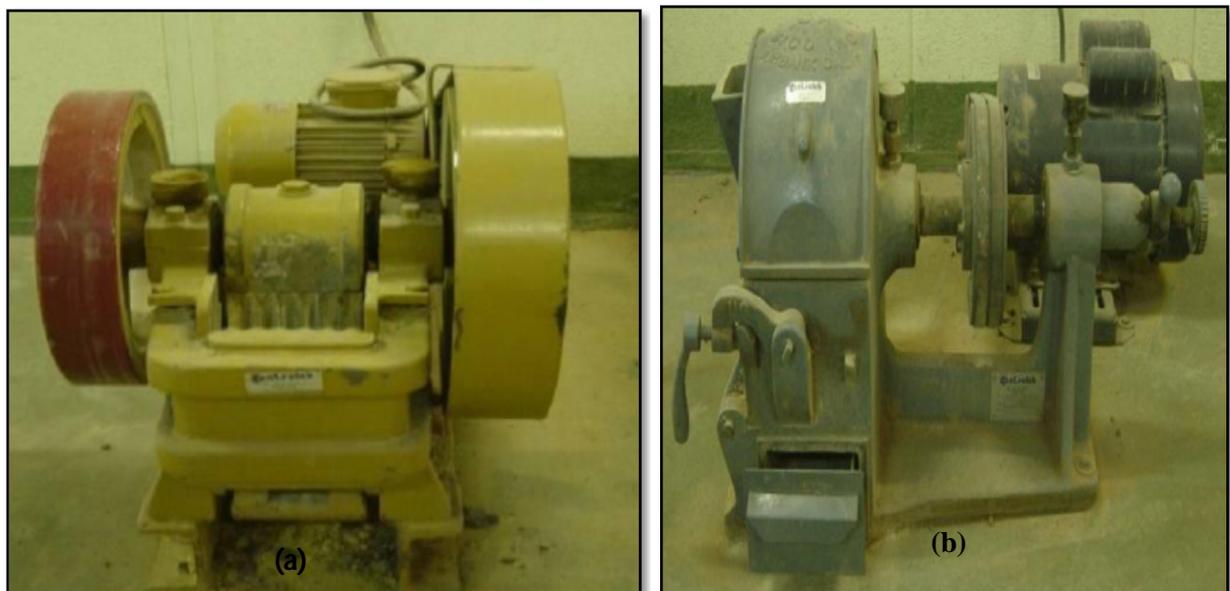


Fig. 4.1 : Moyens utilisés pour la préparation des sols, (a) : Concasseur, (b) : Broyeur.

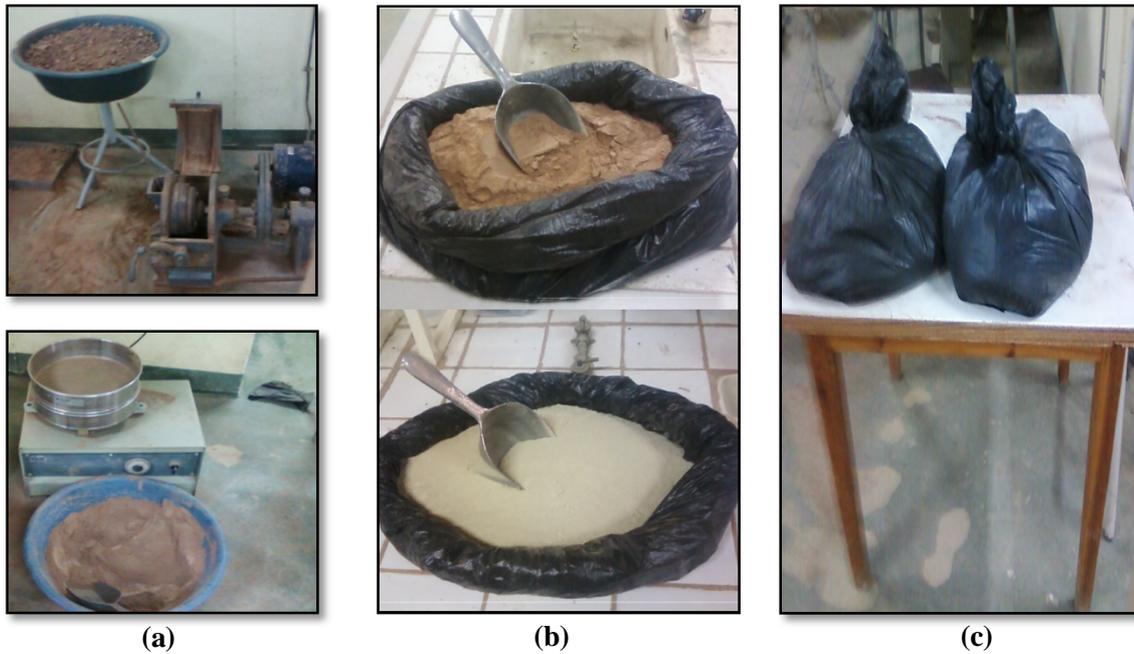


Fig. 4.2 Préparation des sols pour les essais au laboratoire, (a) : broyage et tamisage au tamis 1mm, (b) : sols après tamisage, (c) : conservation hors humidité dans des sacs hermétiques.

IV.2.1.3 Identification et caractérisation

Les différentes caractéristiques physico-mécaniques des sols fins utilisés ainsi que leur classification ont été déterminées suivant les normes américaines (ASTM, 2004), (Tab.4.1). Tandis que les propriétés chimiques et minéralogiques ont été déterminées suivant les normes françaises (Tab.4.2 et Fig. 4.3), (NF EN 196-2., 2013; X Pert Data Collector)

Tab.4.1 : Caractéristiques physico-mécaniques du sol (Harichane et al, 2011a)

Caractéristiques de base	SG
Couleur	Gris
Teneur en eau naturelle (%)	32.9
Densité spécifique	2.71
Eléments passant au tamis 80 μ m (%)	85
Limite de liquidité (%)	82.8
Limite de plasticité (%)	32.2
Indice de plasticité (%)	50.6
Classification (USCS)	CH
Teneur en eau optimale (%)	28.3
Densité sèche maximale (kN/m ³)	13.8
Résistance à la compression non confinée (MPa)	0.34
Perte au feu (%)	17.03

Tab.4.2 : Propriétés chimiques du sol(Harichane, 2011a)

Nom chimique	Formule chimique	SG (%)
Oxyde de calcium	CaO	14.43
Oxyde de magnésium	MgO	1.99
Ferrite	Fe ₂ O ₃	5.56
Alumine	Al ₂ O ₃	14.15
Silice	SiO ₂	43.67
Sulfite	SO ₃	0.04
Oxyde de sodium	Na ₂ O	0.34
Oxyde de potassium	K ₂ O	1.96
Dioxyde de titan	TiO ₂	0.65
Phosphore	P ₂ O ₅	0.18
Pertes au feu	--	17,03
Le potentiel d'hydrogène mesuré pH= 9.18		

Tab 4.3 : Propriétés minéralogiques du sol (Harichane, 2011a)

Composition minéralogique	SG (%)
Quartz SiO ₂	20
Calcite CaCO ₃	26
Albite NaAlSi ₃ O ₈	--
Illite 2K ₂ O.Al ₂ O ₃ .24SiO ₂ .2H ₂ O	16
Kaolinite Al ₂ SiO ₅ (OH) ₄	12
Montmorillonite Al ₂ ((SiO ₄ Al)O ₁₀)(OH) ₂ H ₂ O	20
Chlorite Mg ₂ Al ₄ O ₁₈ Si ₃	--
Minéraux ferrugineux + Autres	06

IV.2.2 Pouzzolane naturelle

IV.2.2.1 Lieu du prélèvement

La PN utilisée dans cette étude est une roche d'origine volcanique. Elle a été procurée du gisement de Bou-Hamidi (Béni-Saf) situé dans l'Ouest du territoire national sous forme de roches concassées de type pierre ponce de diamètres variant de 10 à 20cm. (Fig. 4.4)



Fig. 4.4 : Le gisement volcanique de Bou-Hamidi (Béni-Saf).

IV.2.2.2 Préparation

Nous avons d'abord procédé à son concassage puis son étuvage à 105°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage au micro-Deval (Fig. 4.5).

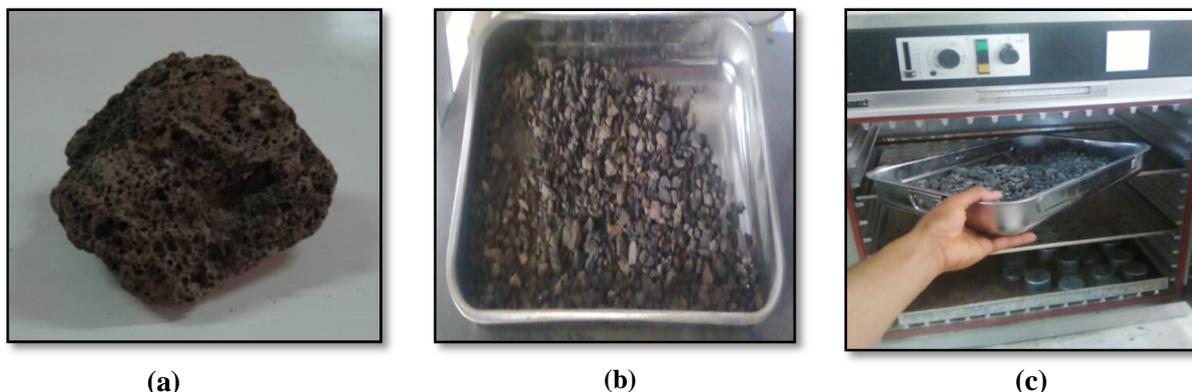


Fig. 4.5 : Préparation de la pouzzolane naturelle pour l'essai micro-Deval. (a) : pouzzolane naturelle de Béni-Saf, (b) : pouzzolane naturelle concassée, (c) : passage de la pouzzolane naturelle à l'étuve.

La roche a été broyée au laboratoire pour rechercher une surface spécifique proche de 420 m²/kg en se basant sur un broyage au micro-Deval (Fig. 4.6).

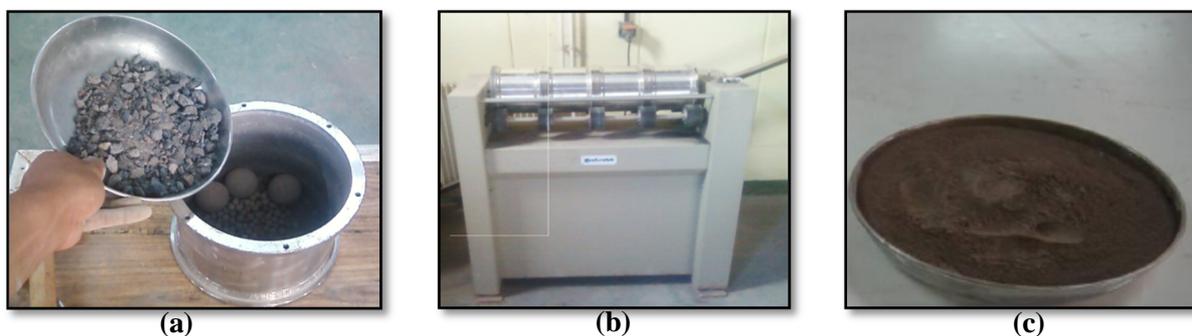


Fig. 4.6 : Broyage de la pouzzolane naturelle au micro-Deval jusqu'à une finesse de 420 m²/kg. (a) : introduction de 1.5kg de PN concassée avec 3 boules et 1.5kg de billes dans chaque cylindre, (b) : l'emplacement des cylindres et lancement de l'essai pendant 18h, (c) : la PN après broyage.

Les propriétés physico-chimiques et minéralogiques de la pouzzolane naturelle sont présentées dans le tableau 4.3

IV.2.3 Chaux

La chaux utilisée dans cette étude est une chaux vive produite par la société BMSD-SARL située dans la ville de Saïda (Sud-ouest du territoire national). Un tamisage au tamis 0.4mm avant son utilisation a été procédé pour éliminer les grumeaux qui peuvent se former en présence d'une éventuelle humidité (Fig. 4.7). Les propriétés physico-chimiques de la chaux sont présentées dans le tableau 4.3.

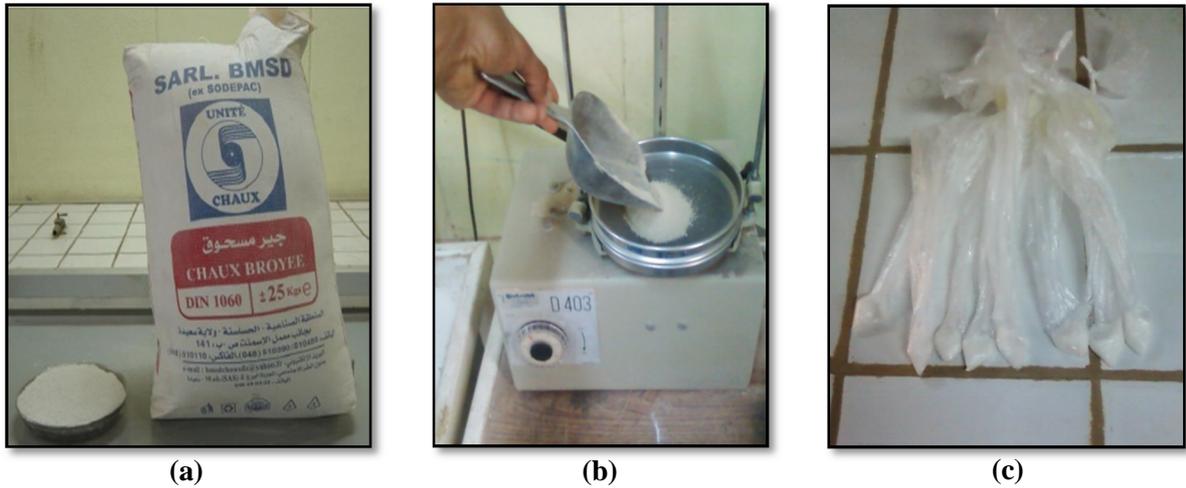


Fig. 4.7 : Préparation de la chaux. (a) : emballage utilisé pour la chaux vive de Saida, (b) : tamisage au tamis 0,4mm, (c) : pesage de la chaux et conservation dans des sacs hermétiques.

Tab. 4.4 : Propriétés physico-chimiques des ajouts utilisés (Harichane et al, 2011b)

Nom chimique	Chaux (%)	Pouzzolane naturelle (%)
CaO	> 83.3	9.90
MgO	< 0.5	2.42
Fe ₂ O ₃	< 2	9.69
Al ₂ O ₃	< 1.5	17.5
SiO ₂	< 2.5	46.4
SO ₃	< 0.5	0.83
Na ₂ O	0.4 - 0.5	3.30
K ₂ O	-	1.51
CO ₂	< 5	-
TiO ₂	-	2.10
P ₂ O ₃	-	0.80
CaCO ₃	< 10	-
Apparence physique	Poudre blanche sèche	Poudre brune sèche
Densité spécifique	2	-
Plus de 90 µm (%)	< 10	-
Plus de 630 µm (%)	0	-
Matériau insoluble (%)	< 1	-
Densité apparente (g/l)	600 – 900	-
Perte au feu	-	5.34

IV.2.4 Produits chimiques

Le sulfate de sodium anhydre (Na₂SO₄) a été utilisé dans cette étude (Figure 4.8). Lequel a été ajouté sous forme de poudre grossière dans le sol stabilisé par différents ajouts minéraux. Les propriétés physico-chimiques du sulfate anhydre sont présentées dans le tableau 5.8.



Fig. 4.8 : Le sulfate de sodium anhydre(Na_2SO_4)

Tab. 4.5 : Caractéristiques physico-chimiques du sulfate de sodium

Propriétés	Sulfate de sodium
Couleur	Blanche
Taille des particules	0/1mm
Formule chimique	Na_2SO_4
Masse molaire (g/mol)	142.042
pH (50g/L, 25°C)	5 à 8
Matière insoluble (%)	0.005
Chloride (Cl, %)	0.001
Phosphate (PO_4 , %)	0.002
Calcium (Ca, %)	0.01
Fer (Fe, %)	0.0005
Sodium (Na, %)	-
Potassium (K, %)	-
Cuivre (Cu, %)	-

IV.3 Déroulement des essais

IV.3.1 Combinaison des échantillons et propriétés étudiées

Des essais au laboratoire concernant la résistance au cisaillement non drainé, non consolidé ont été effectués sur l'argile grise. Trois combinaisons de la pouzzolane naturelle et de la chaux ont été utilisées pour la stabilisation du sol. Les teneurs de la pouzzolane naturelle sont de 0, 10 et 20% tandis que celles de la chaux sont de 0, 4 et 8%. Ces combinaisons ont été perturbées par 0, 2 et 4 de sulfate de sodium anhydre ajouté sous forme d'une poudre grossière (0/1mm). Ceci permet d'obtenir 27 combinaisons (Tableau 4.5).

Tab. 4.6 : Combinaisons des échantillons des sols stabilisés et perturbés.

Désignation	Échantillons mélangés (%)				Désignation	Échantillons mélangés (%)			
	Sol	PN	Chaux	Sulfate		Sol	PN	Chaux	Sulfate
P0L0N0	100	0	0	0	P20L0N4	76	20		4
P0L0N2	98	0	0	2	P10L4N0	86	10	4	0
P0L0N4	96	0	0	4	P10L4N2	84	10	4	2
P0L4N0	96	0	4	0	P10L4N4	82	10	4	4
P0L4N2	94	0	4	2	P20L4N0	76	20	4	0
P0L4N4	92	0	4	4	P20L4N2	74	20	4	2
P0L8N0	92	0	8	0	P20L4N4	72	20	4	4
P0L8N2	90	0	8	2	P10L8N0	82	10	8	0
P0L8N4	88	0	8	4	P10L8N2	80	10	8	2
P10L0N0	90	10	0	0	P10L8N4	78	10	8	4
P10L0N2	88	10	0	2	P20L8N0	72	20	8	0
P10L0N4	86	10	0	4	P20L8N2	70	20	8	2
P20L0N0	80	20	0	0	P20L8N4	68	20	8	4
P20L0N2	78	20	0	2					

Pour que les éprouvettes de sols confectionnées et destinées à soumettre les essais de la résistance au cisaillement atteignent une densité maximale, nous avons procédé à évaluer la masse des sols ou des additifs (chaux, pouzzolane naturelle et sulfate) ainsi que la masse de l'eau à l'aide des références de compactage en se basant sur les deux équations suivantes :

$$\gamma_{dmax} = \frac{P_s}{V} \text{ Et } \omega_{opt} = \frac{P_w}{P_s}$$

Les quantités de sols, d'ajouts et de sulfates ont été pesés et mélangés manuellement à l'état sec jusqu'à obtenir une uniformité de couleur du mélange, puis mis dans des sacs en plastique et stocké dans un endroit sec, comme indique la (Fig. 4.9). (Harichane, 2011b)



Fig. 4.9 : Différentes étapes de la préparation des échantillons. (a) malaxage et homogénéisation à sec après pesage, (b) : conservation dans des sacs hermétique, (c) : stockage dans un endroit sec.

Tab. 4.7 : Références de compactage du sol (Harichaneet al, 2011a).

Désignation	Sol argileux gris	
	Densité sèche maximale (kN/m ³)	Teneur en eau optimale (%)
P0L0	13.8	28.3
P0L4	13.2	30.4
P0L8	12.9	31.1
P10L0	14.0	27.6
P20L0	14.3	25.8
P10L4	13.3	26.8
P20L4	13.6	29.0
P10L8	13.3	29.8
P20L8	13.6	28.2

IV.3.2 Résistance au cisaillement (UU)

Afin d'évaluer l'effet des ajouts (pouzzolane naturelle et la chaux ainsi que leur combinaison) en présence ou non des sulfates sur la capacité de portance du sol fin argileux, des essais en résistance au cisaillement (UU), ont été effectués sur les échantillons des sols conformément à la norme NF P 94-071-1(1994).

La résistance au cisaillement est un des paramètres mécaniques du sol. Définie lors de la rupture du sol, par une contrainte mobilisée par les forces tangentielles agissant sur le plan de rupture.

Selon la norme NF P 94-071-1(1994), l'essai de cisaillement rectiligne à la boîte s'applique à tous types de sols naturels, reconstitués ou artificiels. L'essai consiste à provoquer la rupture du sol suivant un plan horizontal imposé tout en appliquant une contrainte verticale au sol. La rupture est causée par une force horizontale s'appliquant au sol selon des vitesses variables en fonction du type d'essai. La résistance au cisaillement est déterminée en trois procédures d'essai différentes :

-Type CD : L'échantillon est consolidé à l'aide d'une contrainte verticale avant cisaillement. La vitesse de cisaillement est très lente. Lors de l'essai l'eau s'évacue et la reprise des contraintes est attribuée aux grains solides. Cet essai étudie la stabilité à long terme du sol, les paramètres de cisaillement à long terme sont recherchés. Il s'agit de la cohésion effective (C') et l'angle de frottement effectif (ϕ') qui sont relatifs au sol.

-Type CU : Il permet également de déterminer les caractéristiques à long terme du sol. L'échantillon est consolidé avant le cisaillement. L'eau des vides n'est pas drainée pendant le cisaillement. La vitesse de cisaillement est plus rapide que le CD La reprise des contraintes due à la pression interstitielle est déterminée et les contraintes effectives déduites.

-Type UU : Le UU s'intéresse à la stabilité à court terme du sol. Il est sans consolidation avant le cisaillement, ni drainage de l'eau des vides pendant le cisaillement. La vitesse d'essai est très rapide. La reprise des contraintes est due également à la pression interstitielle.

Les paramètres de cisaillement sont la cohésion et l'angle de frottement. La cohésion est la résistance au cisaillement sous contrainte normale nulle appelée aussi résistance propre de la structure (due aux liaisons physico-chimiques). L'angle de frottement est l'angle de glissement grain sur grain qui dépend de l'état de compacité du sol pour les sols grenus et de la nature minéralogique des grains pour les sols fins.

IV.3.2.1 Préparation des combinaisons et confection des éprouvettes

Les échantillons non traités et traités sont préparés avec une teneur en eau optimale et compactés à la densité sèche maximale. Les mélanges sol-ajouts-perturbateur 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 hermétiques et stockés à température ambiante pendant une heure. Ces dispositions garantissent l'homogénéité de la teneur en eau dans le mélange. La figure 4.10 montre les étapes de la préparation du sol avant d'entamer la phase de compactage.

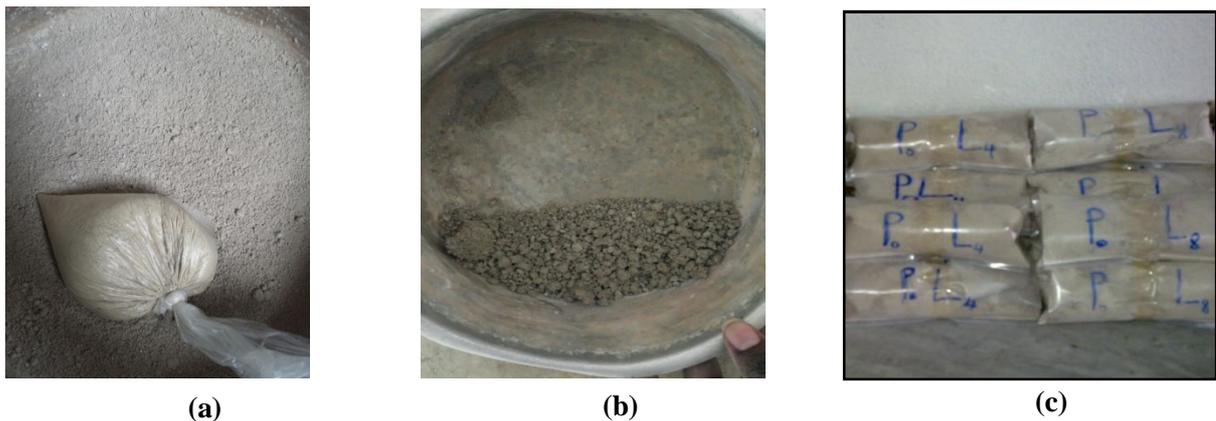


Fig. 4.10 : Préparation des combinaisons pour la confection et le compactage. (a) : homogénéisation, (b) : malaxage après humidification, (c) : conservation pendant une heure.

La confection doit tenir compte du (d_{max}) qui est tel que :

$$6d_{max} \leq h \leq L/2$$

h étant la hauteur de l'éprouvette et L le diamètre intérieur de la boîte de cisaillement de section droite circulaire ou carrée.

Pour que les échantillons soient compactés à la densité maximale désirée, les mélanges ont été confectionnés par compression statique et reconstitués sous forme d'éprouvettes de 4 cm de diamètre et 6 cm de hauteur en utilisant une presse statique manuelle qui consiste à appliquer par l'intermédiaire d'un piston, un effort vertical exercé sur le mélange à confectionner dans un moule de 4 cm de diamètre. Les parois intérieures du moule doivent être enduites d'une couche de graisse afin de réduire les frottements mélange-moule et d'éviter la rupture de l'éprouvette lors du démoulage. L'extraction de l'éprouvette du moule peut se faire manuellement après compactage. On utilise un piston ayant le même diamètre

que le diamètre intérieur du moule pour faire glisser l'éprouvette vers l'extérieure. On détermine ensuite son poids et ses dimensions(Figure 4.11).



Fig. 4.11 : Presse statique manuelle destinée à la confection des éprouvettes et moule cylindrique

Après démoulage, les échantillons ont été immédiatement stockés dans des sachets en plastique pour prévenir d'éventuelles pertes d'humidité et de les éloigner de tout contact avec le CO₂ qui est le responsable de la carbonatation de la chaux pendant la maturation. De plus, les échantillons sont confectionnés pour différentes périodes de cure (7, 30, 60 jours). La maturation à 20°C est assurée au laboratoire à température contrôlée. Le mode opératoire de confection de l'éprouvette est illustré dans la (Figure 4.12).

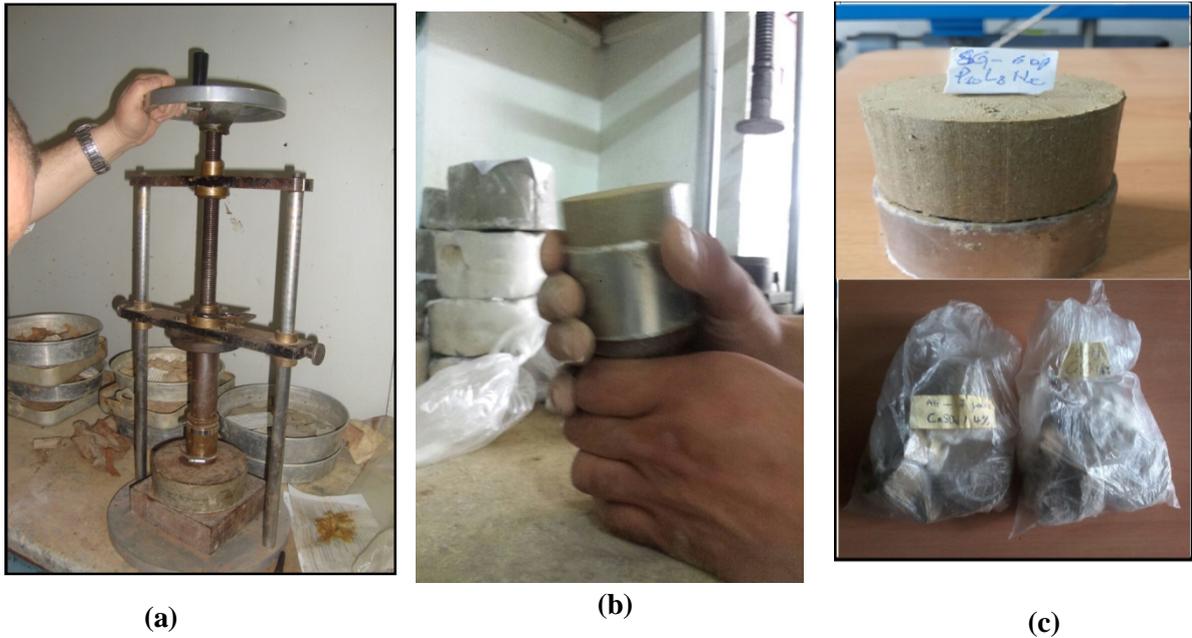


Fig.4.12 : Confection des éprouvettes par compactage statique. (a) : compactage, (b) : démoulage, (c) : éprouvette compactée et conservation dans les sachets en plastique.

IV.3.2.2 Cisaillement des éprouvettes

A la fin de la période de cure, des essais de résistance au cisaillement non consolidé, non drainé sont effectués.

L'éprouvette est introduite dans la boîte de cisaillement de Casagrande qui comprend deux parties : la partie inférieure fixe (immobile) et la partie supérieure mobile. Un effort normal vertical est appliqué tout le long de l'essai sur l'éprouvette en utilisant des masses et un bras de levier. Les masses de 5, 11 et 17kg permettent respectivement d'appliquer un effort normal vertical de 1, 2 et 3bars. La machine de cisaillement à vitesse constante crée un mouvement uniforme de la boîte de cisaillement qui occasionne un effort tranchant horizontal. Le cisaillement étant du type UU, donc très rapide, la vitesse de cisaillement est donc de 1mm/min. L'éprouvette développe alors une force en s'opposant au mouvement. Cette force, en fonction de son intensité, induit le déplacement d'un anneau métallique. Ce déplacement est appelé lecture de l'anneau et mesuré à l'aide d'un dispositif de mesure. Les lectures se font chaque 15 secondes donc pour chaque déplacement de 0,25mm.

L'essai est arrêté lorsque la valeur de la lecture se répète trois fois ou lorsque le déplacement horizontal atteint au moins 5mm. La valeur de la résistance au cisaillement est la moyenne de deux essais effectués sur chaque type d'échantillon.

L'évolution de la résistance au cisaillement est étudiée en fonction de la quantité de ajouts utilisés (0, 4 et 8% de la chaux et 0, 10 et 20% de PN), de la concentration en sulfate (0, 2, 4 et 6% de Na_2SO_4) et du temps de maturation (7, 30, 60, jours). Le mode opératoire est indiqué sur la figure 5.13.



Fig. 4.13 : Procédure de cisaillement. (a) : éprouvette à cisailier, (b) : installation de l'éprouvette dans la boîte de cisaillement, (c) : installation de la boîte dans la machine de cisaillement, (d) : éprouvette après cisaillement

IV.4 Exploitation de l'essai

Lors de l'expérimentation, on obtient les lectures du dispositif de mesure installé sur l'anneau. Leur exploitation permet de déterminer d'abord la contrainte tangentielle maximale (résistance au cisaillement du sol) puis ensuite les paramètres de cisaillement.

Lecture de l'anneau \times Coefficient (K) de l'anneau = Force nette

- La lecture de l'anneau correspond au déplacement de cet anneau induit par la force développée par l'éprouvette.
- Le coefficient (K) est le coefficient de raideur. Il varie en fonction de la nature du métal et de l'état de l'anneau

Force nette / Section modifiée = Contrainte tangentielle (τ)

- La section modifiée est la nouvelle section de l'éprouvette calculée après chaque déplacement de l'éprouvette.

La résistance au cisaillement est la plus grande valeur de contrainte tangentielle calculée.

La résistance au cisaillement a deux composantes qui sont la résistance cohésive définie par la cohésion C et la résistance frictionnelle définie par le produit de la contrainte verticale (σ) par la tangente de l'angle de frottement interne (ϕ). Ses deux composantes sont déterminées à l'aide du couple de points résistance au cisaillement en fonction de contrainte verticale appliquée. Une droite est obtenue par l'ajustement linéaire des points : C'est la droite intrinsèque du sol (figure 5.14).

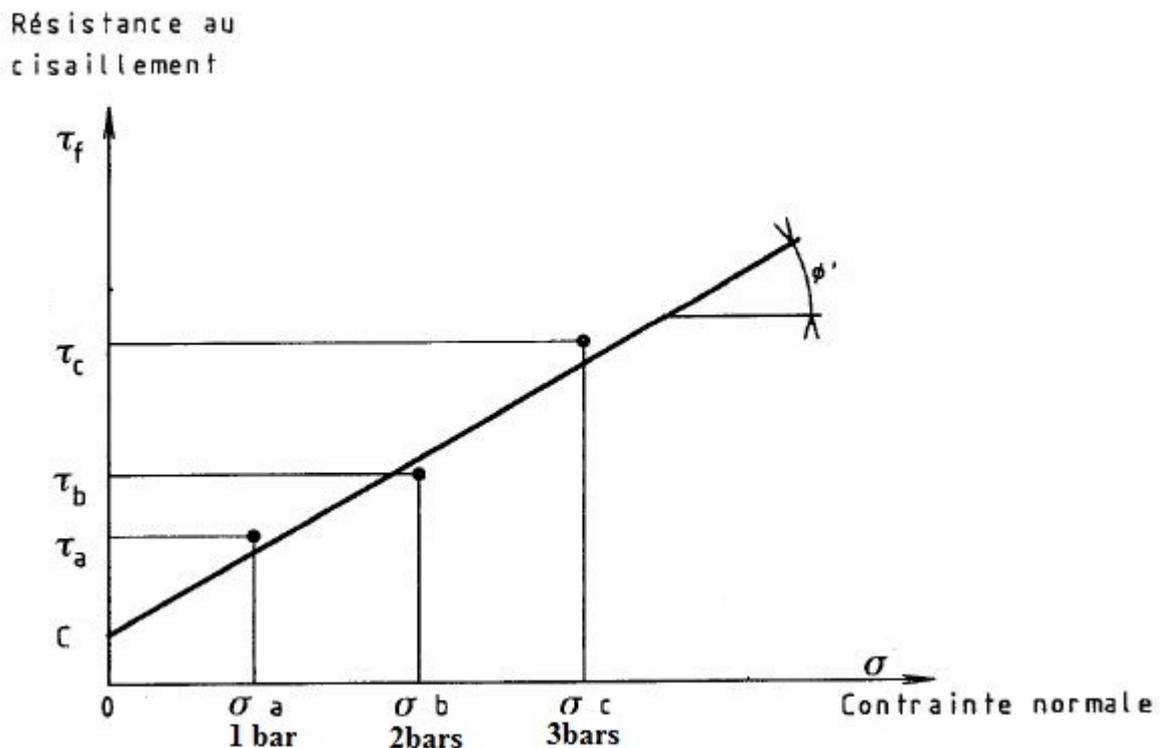


Fig. 4.14 : Détermination de paramètres de résistance au cisaillement (NF P 94-071-1,1994)

IV.4.1 Résultats d'essai de cisaillement à la boîte

IV.4.1.1 Résistance au cisaillement

Les résultats d'essai de cisaillement sont représentés dans les graphes des figures 4.15-4.16. Aux annexes 1, 2 et 3 figurent les tableaux indiquant les différents résultats représentés dans les graphes. Ces derniers mettent en évidence la résistance au cisaillement en fonction de la contrainte verticale appliquée.

a) Evolution de la résistance au cisaillement en l'absence de NaSO_4

Si le Na_2SO_4 est absent, la résistance au cisaillement du sol augmente avec la cure. L'ajout de la chaux seule dans le sol fait cimenter leurs particules en augmentant significativement leur résistance au cisaillement, en particulier, à partir de 30 jours. La résistance au cisaillement augmente faiblement pour des teneurs en chaux de 4 à 8%. Lorsque la PN est

ajoutée toute seule, la résistance au cisaillement augmente avec la teneur en pouzzolane mais reste négligeable.

Cependant, la combinaison des deux ajouts importe une amélioration considérable sur la résistance au cisaillement du sol, aussi bien à court terme qu'à long terme, par rapport à l'utilisation de la chaux ou de la PN seule. Cette augmentation s'accroît si la teneur en chaux-pouzzolane augmente. Toutefois, on remarque que l'augmentation est faible lorsqu'on passe de 10 à 20% de pouzzolane pour une teneur en chaux fixe.

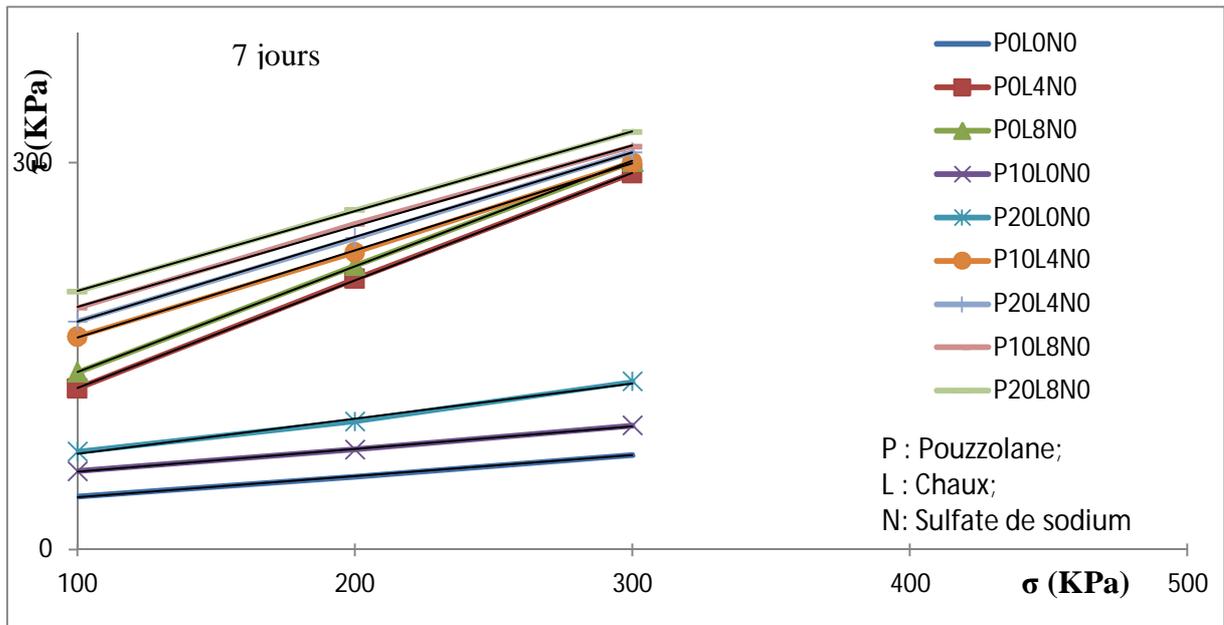


Fig 4.15 : Résistance au cisaillement produite sous contrainte normale en absence du sulfate de sodium à 7 jours

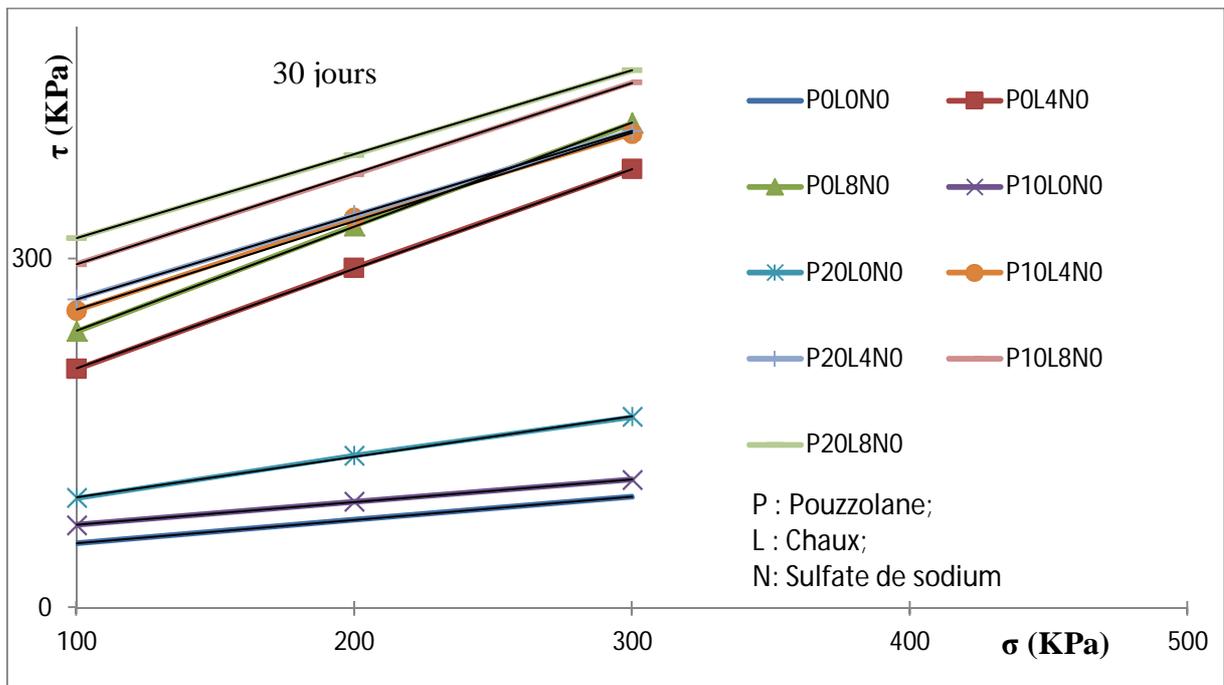


Fig 4.16 : Résistance au cisaillement produite sous contrainte normale en absence du sulfate de sodium à 30 jours

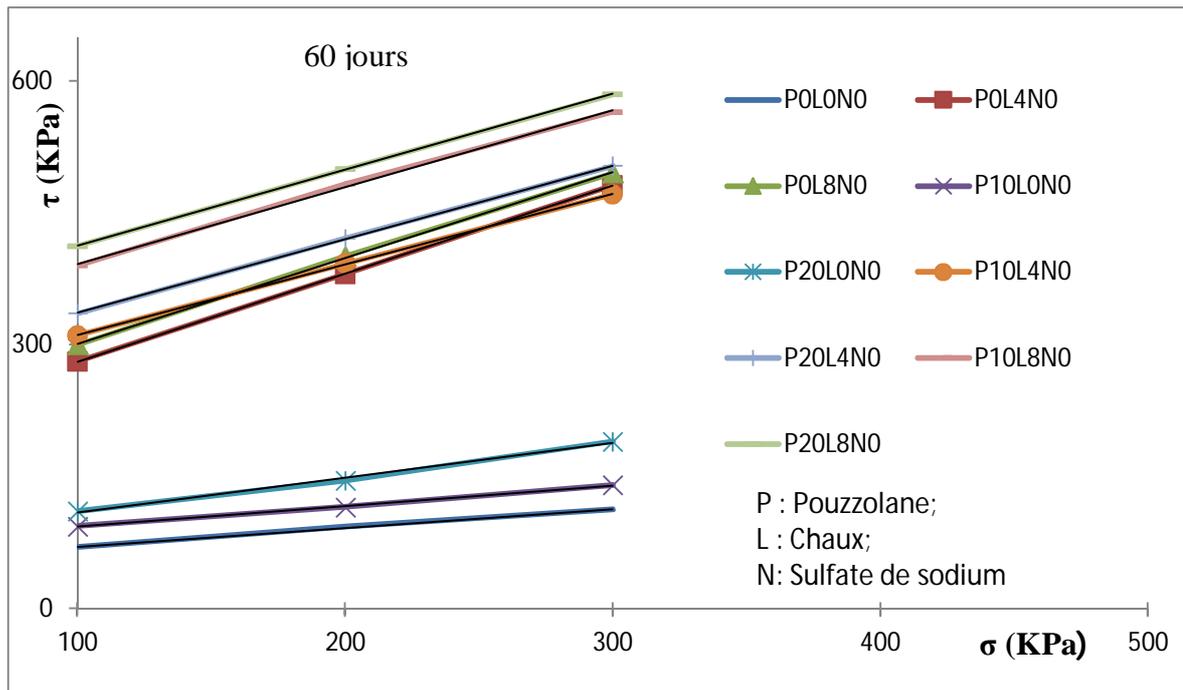


Fig 4.17 : Résistance au cisaillement produite sous contrainte normale en absence du sulfate de sodium à 60 jours

b) Evolution de la résistance au cisaillement en présence de Na_2SO_4 dans le sol

Pour 2% de Na_2SO_4 en faible proportion, l'addition de chaux seule augmente considérablement la résistance. L'augmentation de la pouzzolane seule a un effet négligeable sur la résistance au cisaillement. La combinaison pouzzolane-chaux augmente amplement la résistance au cisaillement du sol. En augmentant la teneur du mélange chaux-pouzzolane la résistance au cisaillement augmente également. Toutefois, pour une teneur en chaux fixe, on remarque que les teneurs de 10 à 20% de pouzzolane donnent des valeurs de résistances très proches.

Pour de fortes teneurs en Na_2SO_4 (4%), la résistance au cisaillement des éprouvettes traitées à la chaux seule évolue de la même manière que celle des éprouvettes en traitement combiné chaux-pouzzolane : A court et moyen terme (7 et 30 jours), la résistance augmente avec le temps de cure. Cependant à 60 jours elle a tendance à baisser énormément. Quant à la pouzzolane, utilisée seule, elle augmente très légèrement voir de façon négligeable la résistance.

L'augmentation de la résistance au cisaillement à court et moyen terme a été observée lorsque le pourcentage de sulfate augmente de 0 à 4% pour les éprouvettes traitées à la chaux seule et celles ayant subi le traitement combiné. Les résistances s'améliorent également lorsque la combinaison chaux-pouzzolane augmente en teneur : Cela est dû à la présence du Na_2SO_4 dans le système stabilisé qui fait transformer la chaux additionnée en forme de gypse insoluble et en hydroxyde de sodium tout en réduisant ainsi la quantité de chaux disponible pour les réactions avec le sol. Cependant, la présence d'hydroxyde de sodium augmente le pH en provoquant la dissolution d'une grande quantité de l'alumine et de la silice qui rentrent en réaction avec la chaux restante pour former des produits cimentaires. Cela explique

l'augmentation significative de la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés à court terme (Sridharan et al, 1995).

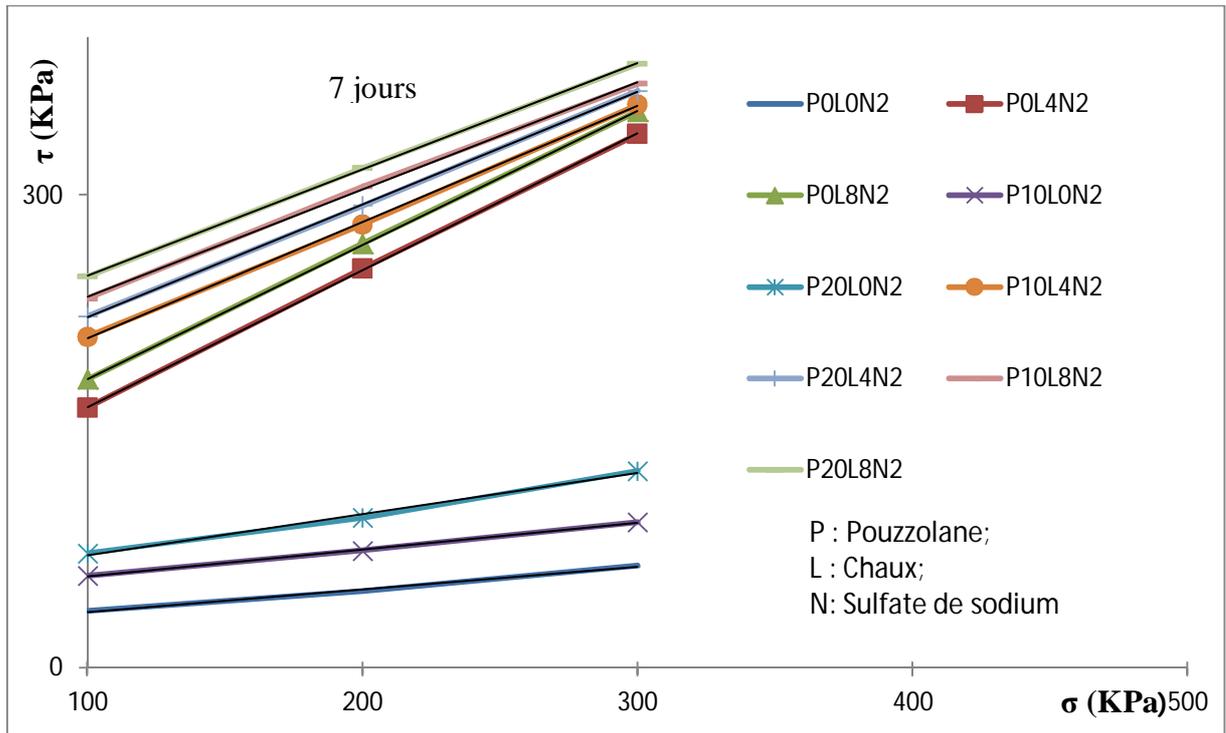


Fig. 4.18 :Effet de 2% du sulfate de sodium sur la résistance au cisaillement stabilisés à 7 jours

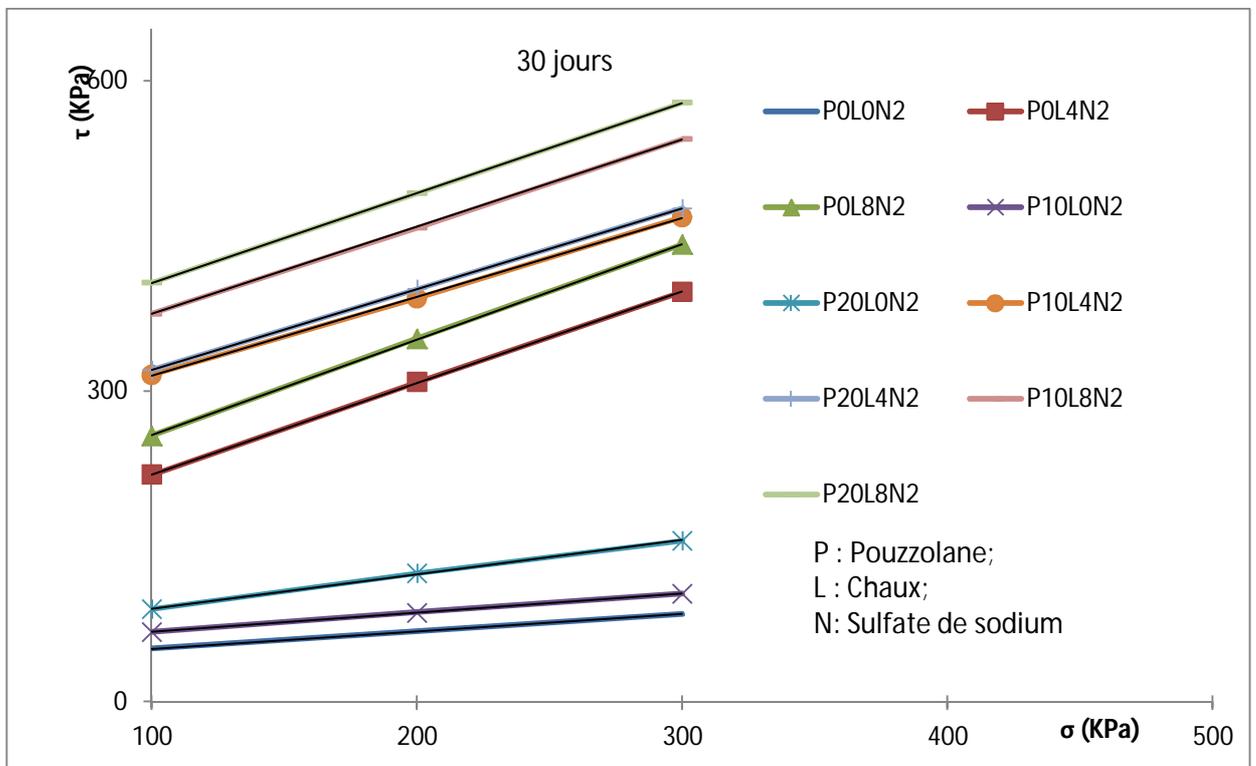


Fig. 4.18 :Effet de 2% du sulfate de sodium sur la résistance au cisaillement stabilisés à 30 jours

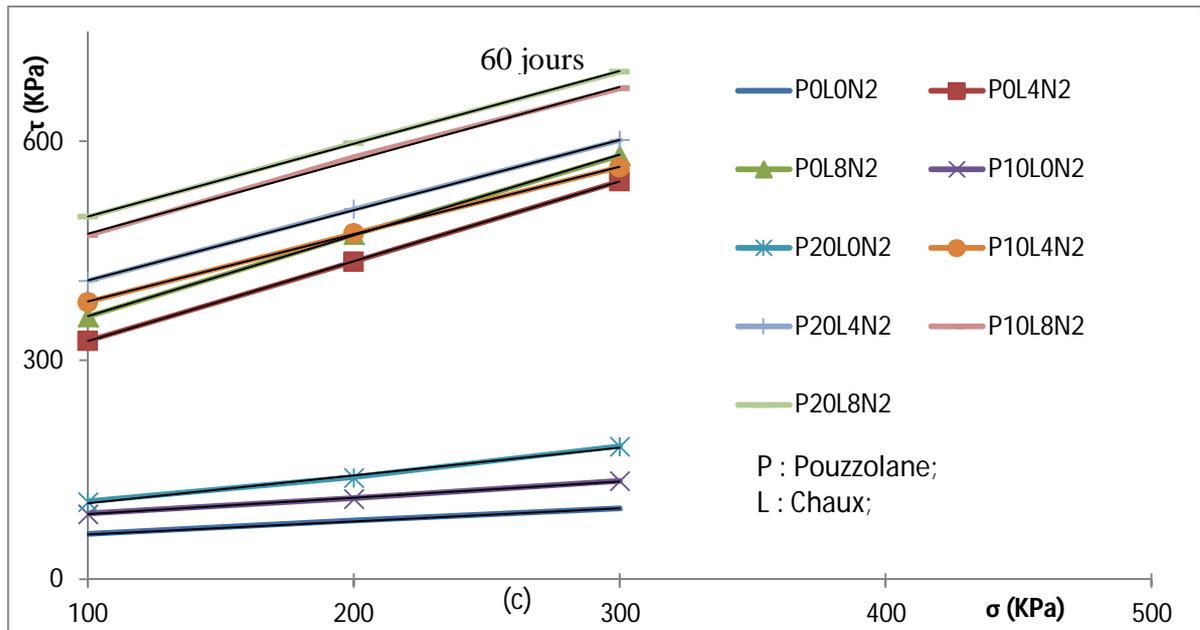


Fig. 4.19 : Effet de 2% du sulfate de sodium sur la résistance au cisaillement à 60 jours

A 4% de Na_2SO_4 et à long terme (60 jours), la résistance au cisaillement diminue brusquement et considérablement due à la formation d'ettringite: l'accélération de la réaction pouzzolanique est contrôlée par l'accélération de la dissolution de la pouzzolane. Par conséquent les espèces de monosilicates et d'aluminates dépolymérisés, pénètrent dans la solution en formant deux principaux composés $[\text{SiO}(\text{OH})_3]$ et $[\text{Al}(\text{OH})_4]$. Lorsque les ions de calcium contactent ces espèces de monosilicates et d'aluminates, les composés de C-S-H et C_4AH_{13} se forment. Dans le même temps, l'introduction de Na_2SO_4 augmente la concentration de SO_4^{2-} et conduit à la formation d'ettringite qui fait densifier la structure tout en augmentant, ou voire détruire, la résistance du système stabilisé où ils ont rapporté dans leur étude que l'ettringite peut augmenter le volume solide jusqu'à 164% alors que les composés de C-S-H font l'augmenter jusqu'à 17,5%.

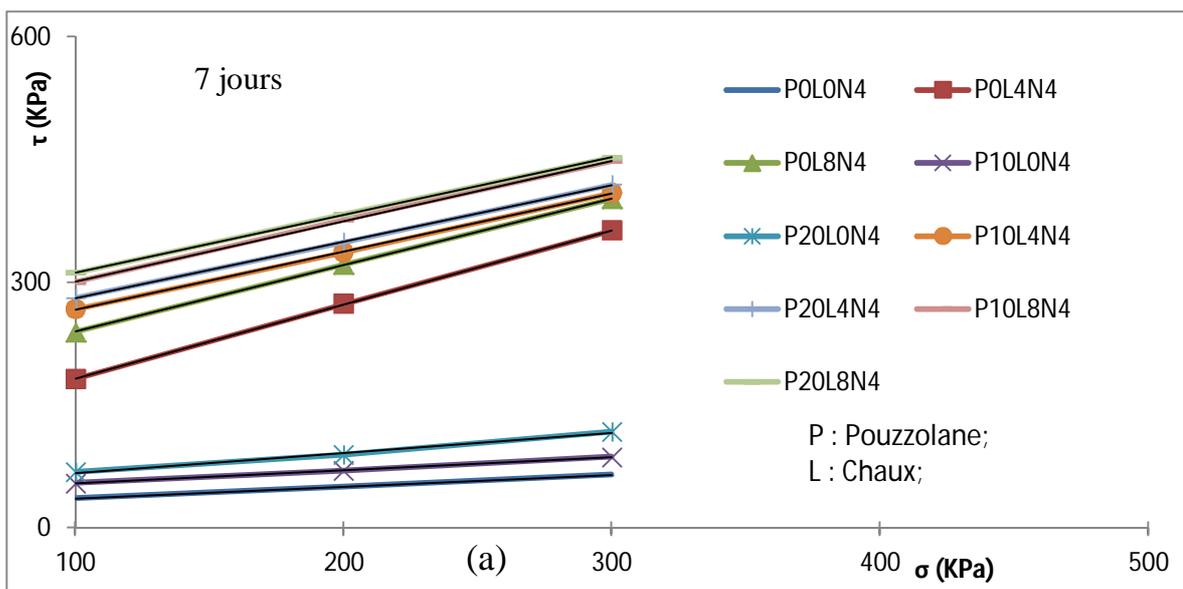


Fig. 4.20 : Effet de 4% du sulfate de sodium sur la résistance au cisaillement à 7 jours

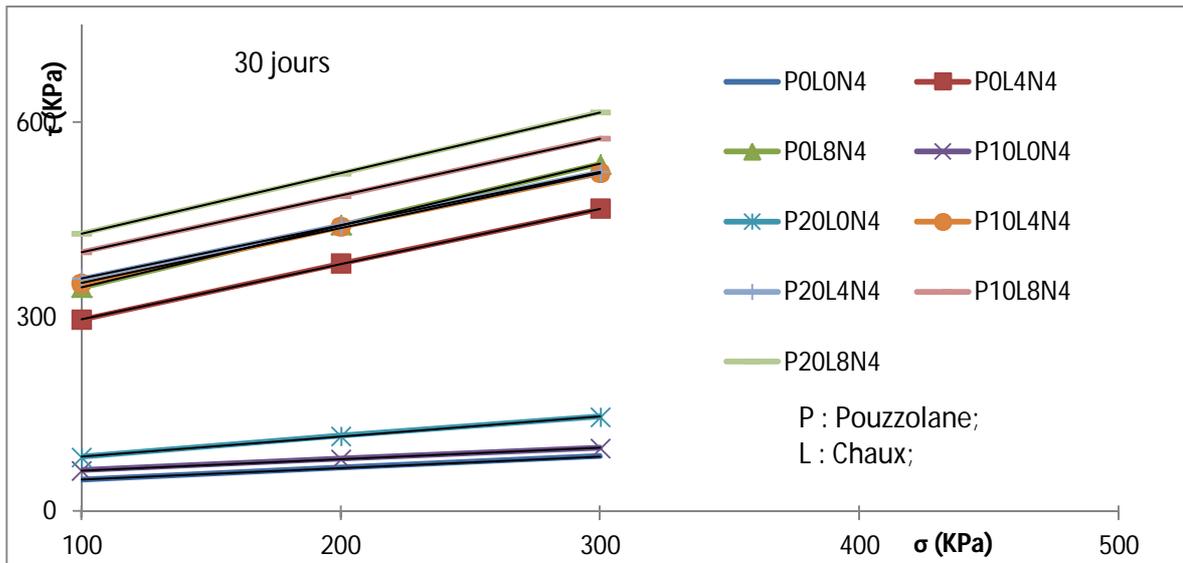


Fig. 4.21 : Effet de 4% du sulfate de sodium sur la résistance au cisaillement à 30 jours

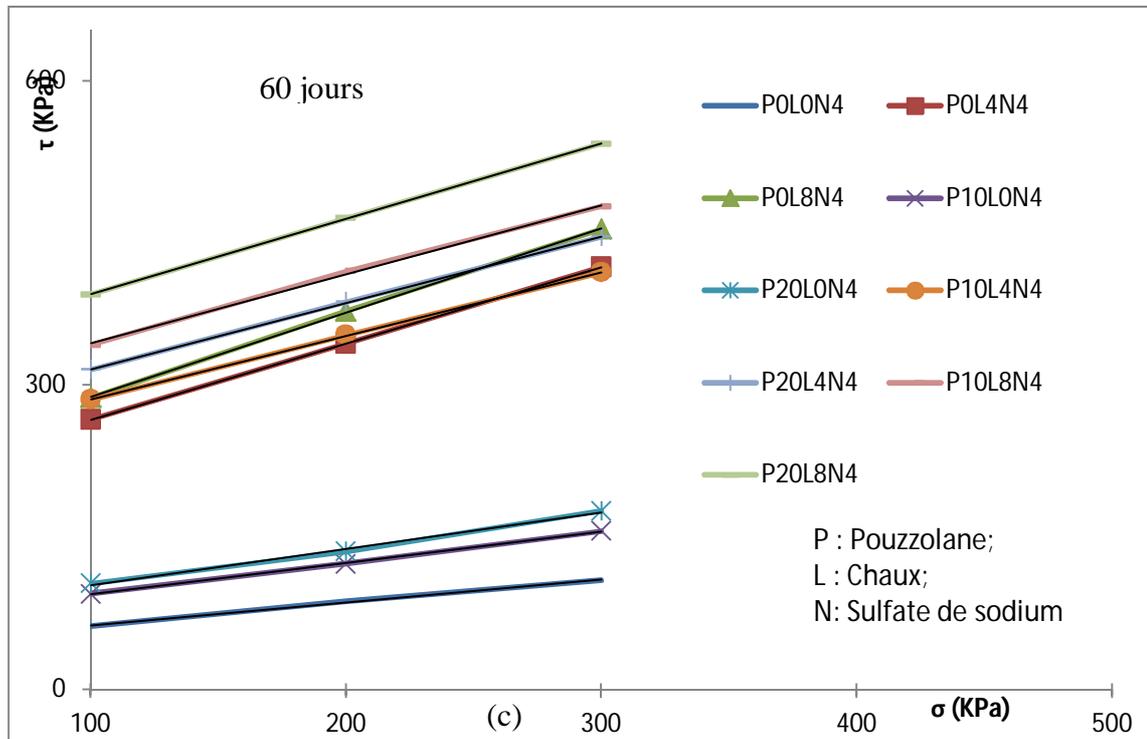


Fig. 4.22 : Effet de 4% du sulfate de sodium sur la résistance au cisaillement à 60 jours

IV.5.2 Paramètres de cisaillement : cohésion et angle de frottement interne

Les valeurs de résistances au cisaillement permettent d'obtenir les paramètres intrinsèques du sol qui sont la cohésion et l'angle de frottement interne. Les figures 4.23-4.28 montrent l'évolution de chacun des deux paramètres en fonction du temps de cure. Les tableaux présentant les résultats utilisés, figurent dans les annexes 4 et 5.

a) Cohésion

La stabilisation à la chaux seule des deux sols en absence du Na_2SO_4 importe un effet bénéfique sur la variation temporelle de la cohésion. La cohésion augmente considérablement avec l'augmentation de la teneur en chaux et du temps de cure, particulièrement, à long terme. Avec 8% de chaux on a à 7 jours une cohésion de 56,1 Kpa alors qu'à 60 jours elle atteint 203,5 Kpa. L'augmentation de la cohésion avec la teneur en chaux est attribuée à la formation des nouveaux produits de cimentation (C-S-H, C-A-H) (Osula, 1991). La pouzzolane utilisée seule a un effet marginal sur la cohésion. Le traitement combinée chaux-pouzzolane améliore énormément la cohésion qui s'accroît avec le dosage en chaux-pouzzolane et également avec le temps de cure.

En présence d'une faible concentration de sulfate (2%), la chaux seule ou combinée fait augmenter considérablement la cohésion du sol : la cohésion augmente avec le temps de cure et lorsqu'on fait augmenter la teneur en chaux et pouzzolane.

Pour 4% de Na_2SO_4 , pour le traitement à la chaux seule et combinée la cohésion augmente fortement jusqu'à 30 jours puis chute à 60 jours. Pour 20% de pouzzolane et 8% de chaux elle prend les valeurs de 241,3 Kpa, 334,6 Kpa, et 315,2 Kpa respectivement à 7,30 et 60 jours : Cette diminution est due au développement de l'ettringite.

On remarque également qu'en présence de sulfates la pouzzolane utilisée seule n'influe pas sur la cohésion.

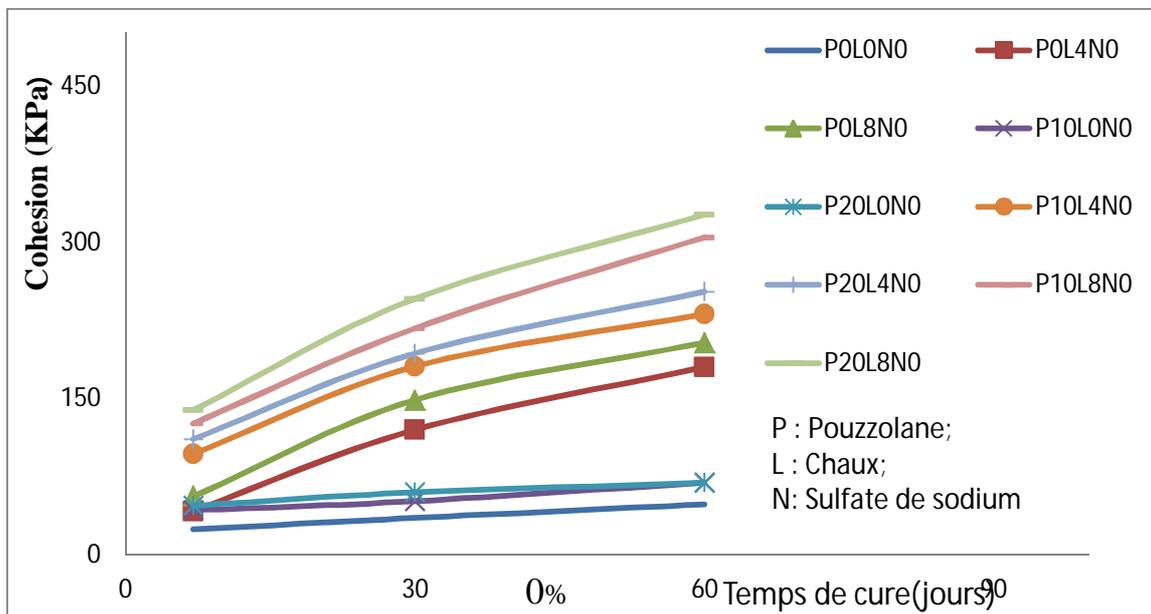


Fig. 4.23 : Variation temporelle de la cohésion avec le temps de cure en l'absence de sulfate de sodium

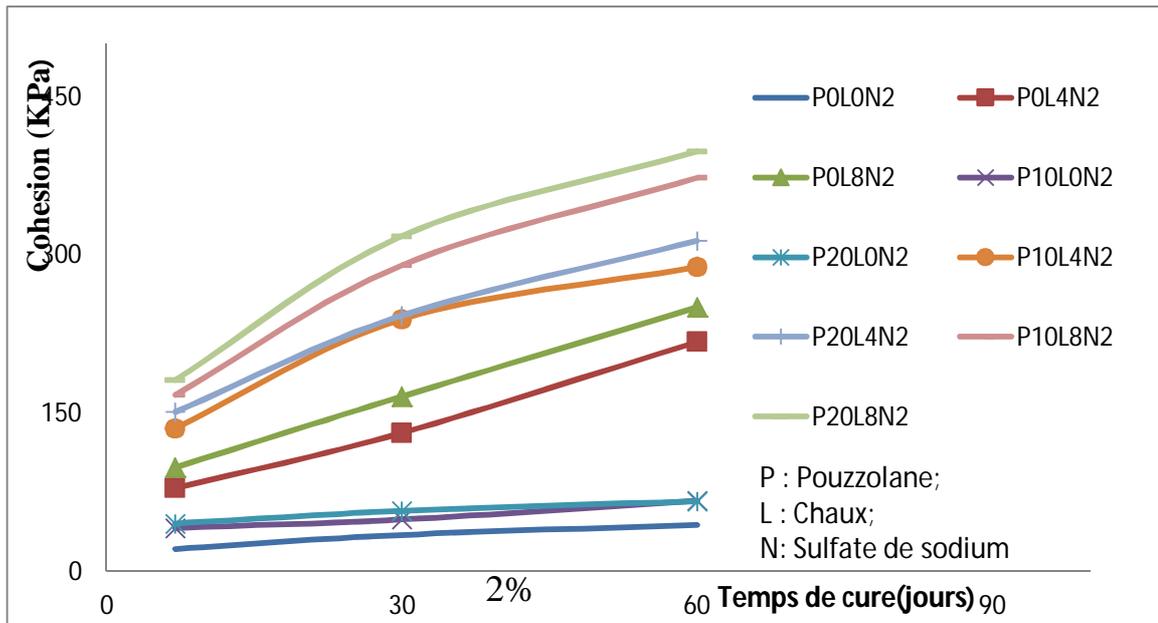


Fig. 4.24 : Variation temporelle de la cohésion avec le temps de cure en présence de 2% de sulfate de sodium

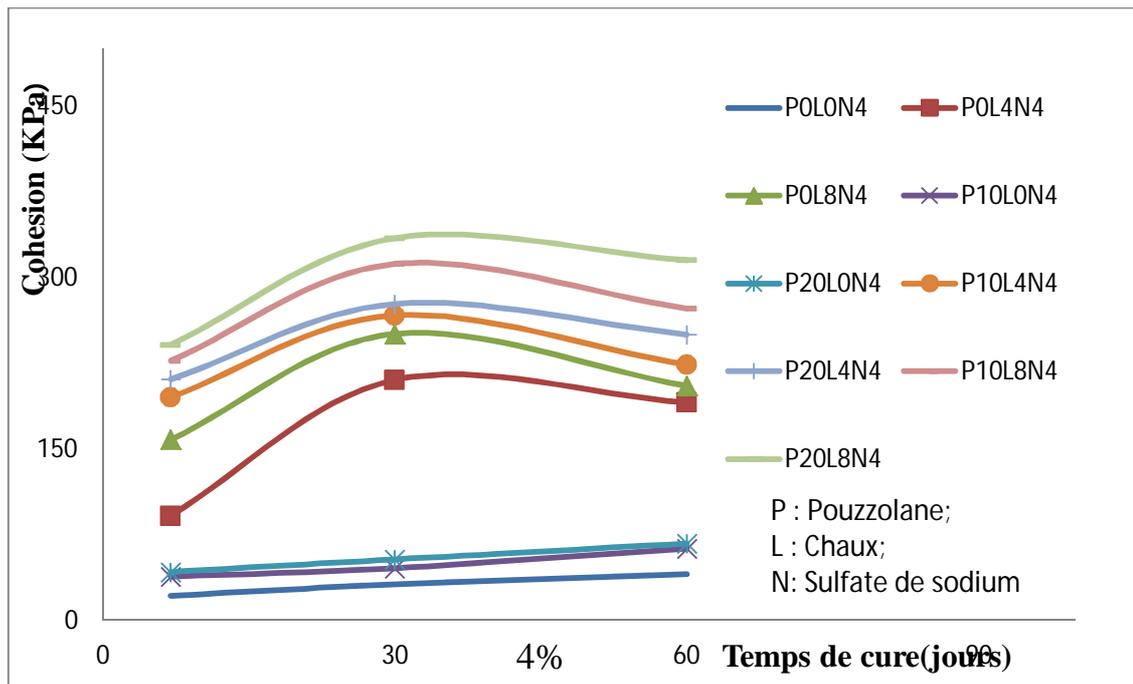


Fig. 4.25: Variation temporelle de la cohésion avec le temps de cure en présence de 4% de sulfate de sodium

b) Angle de frottement interne

En absence de sulfates et pour une faible teneur de sulfates, la chaux utilisée seule augmente énormément l'angle de frottement. Cette augmentation s'accroît avec la période de cure. L'angle de frottement varie similairement lorsque les éprouvettes sont traitées à la chaux et pouzzolane. La floculation des particules argileuses et leur agrégation dues aux réactions avec la chaux expliquent l'augmentation rapide de l'angle de frottement : à 7 jours et à une teneur de 2% de Na_2SO_4 , l'angle de frottement est de 41° pour 4% de chaux utilisée.

Tandis que le sol en absence de chaux à un angle de frottement de 8.1° à 7 jours également. A 4% de Na₂SO₄ la variation de l'angle de frottement est perturbée en traitement à la chaux seule et combinée : à 4% de chaux utilisée seule, après 7 jours l'angle de frottement chute alors que dans les autres cas il ne commence à baisser qu'après 30 jours.

La présence de pouzzolane seule n'induit pas d'effet sur l'angle de frottement interne quel que soit la teneur en sulfate et le temps de cure.

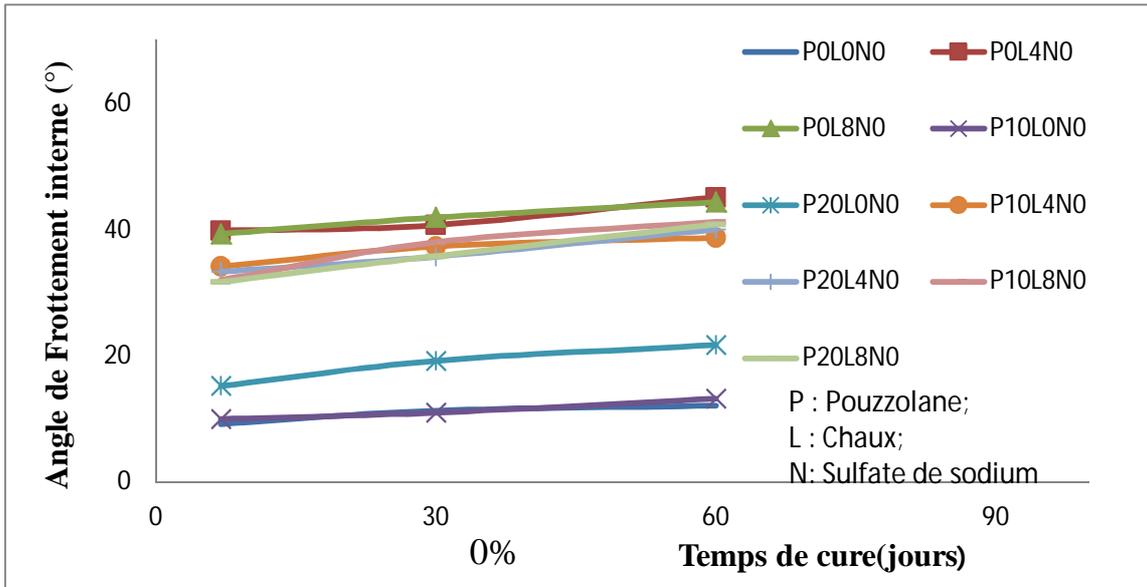


Fig.4.26 : Variation temporelle de l'angle de frottement en l'absence de sulfate de sodium

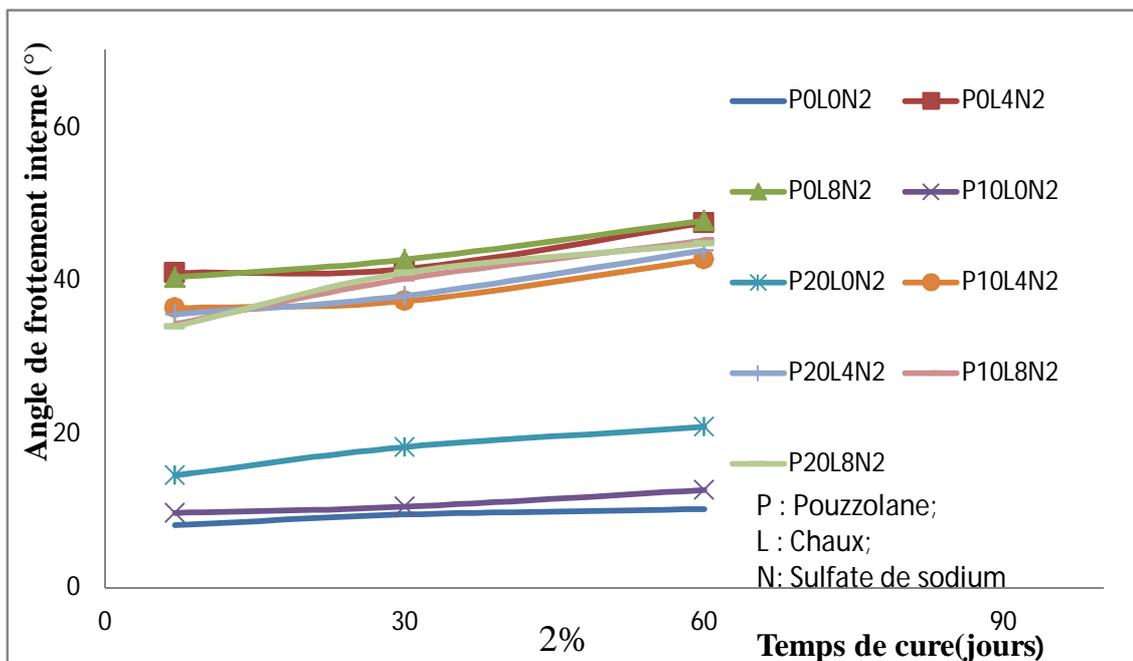


Fig. 4.27 : Variation temporelle de l'angle de frottement pour 2% de sulfate de sodium

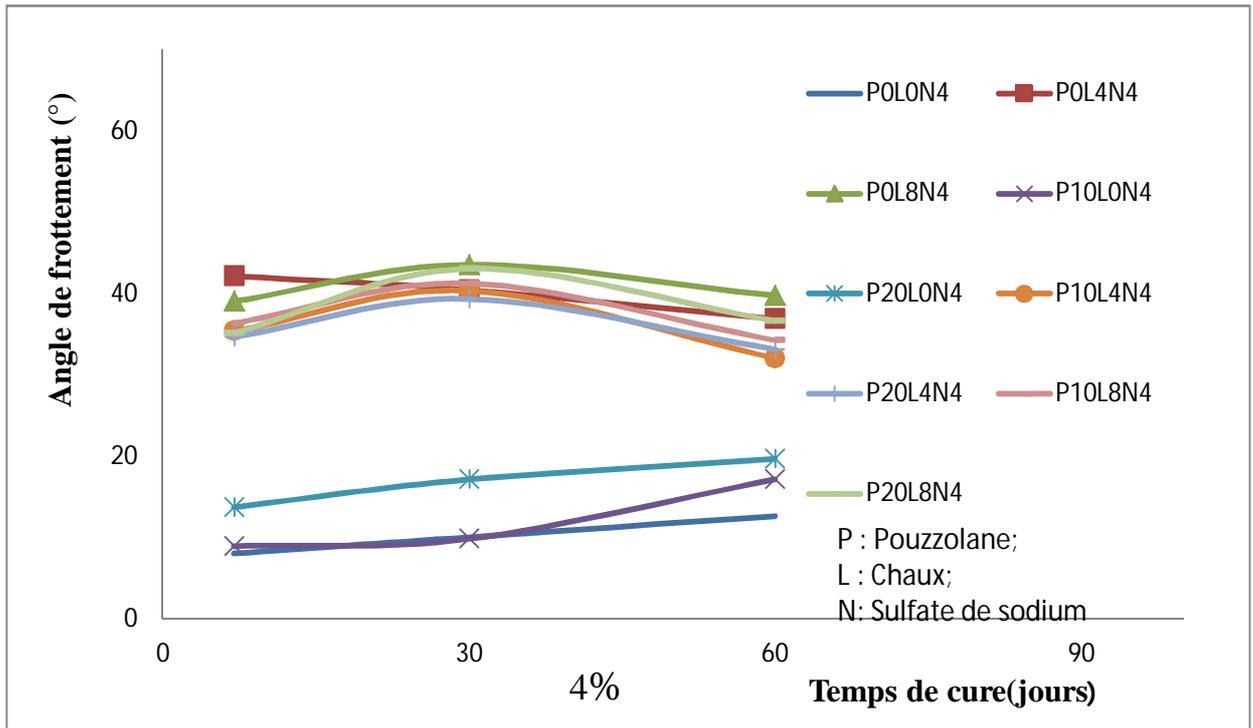


Fig. 4.28 : Variation temporelle de l'angle de frottement pour 4% de sulfate de sodium

IV.5 Conclusion

Des essais de cisaillement ont été effectués au laboratoire pour étudier l'influence de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leurs combinaisons sur les propriétés mécaniques d'un sol argileux instable. L'analyse des différents résultats nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- La pouzzolane utilisée seule lors du traitement présente un effet négligeable sur la résistance et les paramètres de cisaillement que ça soit en présence ou absence de sulfates.
- La chaux utilisée seule donne de bonnes résistances au cisaillement à court et long terme et en absence de sulfates. Cela est dû à la floculation et l'agglomération des particules, qui augmentent l'angle de frottement et la formation des produits de cimentation qui sont responsables de l'augmentation de cohésion. L'effet de la chaux s'accroît davantage lorsque la pouzzolane lui est combinée et lorsque la teneur en chaux-pouzzolane augmente.
- Pour une teneur en sulfate de 2% le traitement combiné a permis d'avoir une plus grande résistance au cisaillement qu'en absence de sulfates. Cette résistance évolue avec le temps de cure.
- L'expansion de l'ettringite se manifeste après 30 jours pour une teneur élevée en sulfates de sodium (4%) et réduit considérablement la résistance au cisaillement.
- La présence de 2% de sulfates dans le sol est bénéfique pour le traitement alors que pour une teneur de 4% comporte des risques de dégradation progressive à très long terme du sol.

Références bibliographiques

PDF Pro Evaluation

Références Bibliographiques

Aggoun S., Cheikh-Zouaoui M., Chikh N., Duval R., (2008), Effect of some add mixtures on the setting time and strength evolution of cement pastes at early ages Construction and Building Materials, vol. 22, n°2, pp.106-110

Aitcin P.C., Jolicoeur C. et Macgregor J., (1994), Superplasticizers : how they work and why they occasionally don't », concrete international, pp. 45-52.

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 Material Vol. 12, pp.329-340.

Also E.E. & Delage P., (1975), Etude en laboratoire du gonflement de l'argile de la Flandres. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille.

ASTM, (2004), Annual book of ASTM Standards, Volume04.08, American Society for Testing Materials

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

Bulletin CRR (Centre de Recherche Routières), (2001), Amélioration des sols à la chaux

Baron J. et Ollivier J.-P., (1992), Durabilité des bétons ; Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Vincennes.

Cheikh-Zouaoui M., Aggoun S., Chikh N., Kadri E.H., Duval R., (2006), Effets du nitrate de calcium et de la triéthanolamine sur le temps de prise et les résistances mécaniques des pâtes de ciment, Revue européenne de génie civil, vol. 10, n°4, pp.475-485

Cau dit Coumes C., Courtois S., (2003), Cementation of a low-level radioactive waste of complex chemistry - Investigation of the combined action of borate, chloride, sulfate and phosphate on cement hydration using response surface methodology Cement and Concrete Research, vol. 33, n°3, pp.305-316

Chardigny, M. Karstunnen et Chazallon C., (2010), Influence d'une colonne ballastée sur le comportement des sols argileux, Université de Strathclyde, Glasgow.

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

Duchaufour P., (2004), Abrégé de pédologie, sol végétation, environnement, Masson (Paris), édition.

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

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

Guichard C., (2006) éléments perturbateurs de la prise dans les sols traités aux liants hydrauliques : Définition, détection, seuils et remèdes Projet de Fin d'Etudes, Institut National des Sciences Appliquées Strasbourg.

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

Harichane K., Ghrici M., Missoum H., (2011a), Influence of natural pozzolana and lime additives on the temporal variation of soil compaction and shear strength, Frontier in Earth Science,5(2): pp.162–169

Harichane K., Ghrici M., Kenai S., (2011b), Effet de la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur le compactage et la résistance des sols mous argileux, Séminaire International, Innovation & Valorisation en génie civil & Matériaux de construction, Rabat-Maroc, pp. 1-7

Harr M.E., (1981), Mécanique des milieux formés de particules, Editions presses polytechniques romandes, Lausanne.

Hunter D., (1988), Lime-induced heave in sulphate-bearing clay soils. J. Geotech. Eng., ASCE 114, pp.150–167.

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

Kinuthia J.M., Wild S., Jones J.I., (1999), Effects of monovalent and divalent metal sulphates on consistency and compaction of lime-stabilised kaolinite Applied Clay Science, vol. 14, n°1-3, pp.27-45

LCPC – SETRA, (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, p.240.

Le Borgne T., (2008), Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols, Séminaire des doctorants LAEGO, Nancy

Lin K.L, Lin D.F., Luo H.L., (2009), Influence of phosphate of the wastes ludge on the hydration characteristics of eco-cement Journal of Hazardous Materials, vol. 168, n°2-3, pp.1105-1110.

Manasseh, J. and Olufemi, A.T., (2008), Effect of lime on some geotechnical properties of Igumale Shale, EJGE, Vol. 13. Material Bull Engineering Geology Environnement, Vol. 66, pp.143-151.

Mallela J., Harold Von Quintus P., Smith K.L. and E. Consultants, (2004), Consideration of lime-stabilized Layers in Mechanistic-empirical Pavement Design. The National Lime Association, Arlington, Virginia, USA.

Muntohar A.S. and Hantoro G., (2002), Influence of rice husk ash and lime on engineering properties of a clayey subgrade, EJGE.

Nabil Aboubekr & Sidi Mohammed Aissa Mamoune, (2004), Stabilisation des sols gonflants par des sels, Conférence Internationale de Géotechnique – Beyrouth

NF P15-101-1, (2001), Ciment Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants

NF P15-104, (2002), Les chaux de construction

NF P94-100, (1999), Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques

NF P98-230 Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités

NF P 94-071-1, (1994), Essai de cisaillement rectiligne à la boîte

Nilforoushan M.R., Sharp J.H., The effect of additions of alkaline-earth metal chlorides on the setting behavior of a refractory calcium aluminate cement, Cement and Concrete Research, vol. 25, n°7, 1995, pp.1523-1534

Nicolas Cabane, (2003), Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation, Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, pp.44-45.

Okagbue C.O. and Ochulor O.H., (2007), the Potential of Cement-Stabilized Coal-Reject as a Construction.

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

Pansu M., Gautheyrou J., (2003), L'analyse du sol minéralogique, organique et minérale, Editions Springer.

Peltier R., (1957), La stabilisation des sols, Revue Générale des Routes et Aérodrômes N°304, 37-60.

Rajasekaran G., (2005), Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays Ocean Engineering, vol. 32, pp.1133-1159.

Sivapullaiah P.V., Sridharan A., Ramesh H.N., (2000), Strength behaviour of lime-treated soils in the presence of sulphate, Can. Geotech. J, Vol. 37, p.1358-1367.

Sivapullaiah P.V., Sridharan A., Ramesh H.N., (2006), Effect of sulphate on the shear strength of lime treated kaolinitic soil, Ground Improvement 10, No. 1, p.23-30

Schon Ch., (1965), Classification géotechnique des sols basée sur la classification USCS, Bull, liaison Labo. routiers P. et Ch., pp. 3-5/3-16

Tremblay H., Duschene J., Locat J., Leroueil S., (2002), Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement, Canadian Geotechnical Journal, J.39: pp.535- 546,

Vénuat M., (1989), La pratique des ciments, mortiers et bétons, Tome 1 : Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers - édition2 – Collection Moniteur. p.277.

Khebizi W., (2011), Etude de la durabilité des sols argileux améliorés avec des ajouts minéraux, Université Hassiba Ben-Bouali de Chlef

Xing H., Yang X., Xu C., Ye G., (2009), Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil-cement Engineering Geology, vol. 103, pp.33-38

Zoubir W., (2009), Effet des résidus minéraux sur l'amélioration des sols argileux de la région de Chlef, Université Hassiba Ben-Bouali de Chlef

Annexes

PDF Pro Evaluation

Annexe 1

Résistance au cisaillement

Tableau de résistance au cisaillement à 7 jours en absence de sulfate.

Normal stress (Kpa)	100	200	300
P0L0N0	40,9	56,5	73,3
P0L4N0	125	209,9	291,9
P0L8N0	137,5	220,3	301
P10L0N0	60,7	77,5	96,1
P20L0N0	75,7	99,1	130,2
P10L4N0	165,1	230,5	300,3
P20L4N0	177	241,5	308,2
P10L8N0	187,5	252,7	312,5
P20L8N0	200,3	263,4	324

Tableau de résistance au cisaillement à 30 jours en absence de sulfate.

Normal stress (Kpa)	100	200	300
P0L0N0	55,3	75,7	95,3
P0L4N0	205,4	292,5	377,2
P0L8N0	237,7	328,7	416,9
P10L0N0	70,9	90,9	110
P20L0N0	94,3	130,9	164
P10L4N0	255,5	335,1	407,7
P20L4N0	265,5	337,8	410,2
P10L8N0	295,8	372,8	452,1
P20L8N0	318	389,7	462,5

Tableau de résistance au cisaillement à 7 jours en absence de sulfate.

Normal stress (Kpa)	100	200	300
P0L0N0	69,4	92,4	112,2
P0L4N0	280,7	380,4	481,2
P0L8N0	300,2	400,7	495,5
P10L0N0	93,3	115,2	140,2
P20L0N0	110,5	145,3	190
P10L4N0	310,7	392,3	471,2
P20L4N0	335,7	421,1	503,4
P10L8N0	390	483,2	565
P20L8N0	412,2	499,9	585

Annexe 2

Résistance au cisaillement

Tableau de résistance au cisaillement à 7 jours en présence de 2% de sulfate.

Normal stress (Kpa)	100	200	300
P0L0N2	35,9	48,7	64,6
P0L4N2	165	253,3	338,6
P0L8N2	183	269,1	353
P10L0N2	58,3	74,4	92,3
P20L0N2	72,7	95,1	125
P10L4N2	210	281,2	357,3
P20L4N2	222,9	293,2	365,9
P10L8N2	234,4	305,4	370,6
P20L8N2	248,3	317,1	383,2

Tableau de résistance au cisaillement à 30 jours en présence de 2% de sulfate

Normal stress (Kpa)	100	200	300
P0L0N2	51	68,2	84,6
P0L4N2	219,2	308,9	396,1
P0L8N2	257,4	351,2	442
P10L0N2	67,4	86,4	104,5
P20L0N2	89,6	124,4	155,8
P10L4N2	315,9	389,9	468,3
P20L4N2	320,7	398,8	477
P10L8N2	375,1	458,2	543,9
P20L8N2	405	491,5	579,1

Tableau de résistance au cisaillement à 7 jours en présence de 2% de sulfate

Normal stress (Kpa)	100	200	300
P0L0N2	61,5	79,9	97,3
P0L4N2	326,9	435,5	545,4
P0L8N2	360,1	472,7	581
P10L0N2	89,6	110,6	134,6
P20L0N2	106,1	139,5	182,4
P10L4N2	380,3	474,1	564,9
P20L4N2	409,1	507,3	601,9
P10L8N2	471,5	578,7	672,8
P20L8N2	497	597,9	695,8

Annexe 3

Résistance au cisaillement

Tableau de résistance au cisaillement à 7 jours en présence de 4% de sulfate.

Normal stress (Kpa)	100	200	300
P0L0N4	36	49,7	64,5
P0L4N4	181,8	273,4	362,9
P0L8N4	239,5	321,6	402,2
P10L0N4	54,6	69,8	86,5
P20L0N4	68,1	89,2	117,2
P10L4N4	267,1	336,4	409,24
P20L4N4	280,6	349,1	419,2
P10L8N4	300,3	376,2	447,9
P20L8N4	311,5	383	452,47

Tableau de résistance au cisaillement à 30 jours en présence de 4% de sulfate

Normal stress (Kpa)	100	200	300
P0L0N4	49,2	67,4	84,8
P0L4N4	295,7	382,2	466,8
P0L8N4	345,7	441,9	536,3
P10L0N4	63,1	80,9	97,9
P20L0N4	83,9	116,5	146
P10L4N4	351,3	439,2	521,6
P20L4N4	359,2	441,4	523,6
P10L8N4	400	486,8	575,5
P20L8N4	428,5	521,2	615,7

Tableau de résistance au cisaillement à 60 jours en présence de 4% de sulfate

Normal stress (Kpa)	100	200	300
P0L0N4	62,4	86,4	107,6
P0L4N4	266	340,8	416,4
P0L8N4	287,7	373,2	454,1
P10L0N4	94,2	123,7	156,2
P20L0N4	104,5	135,8	176
P10L4N4	285,9	349,6	411,1
P20L4N4	315,4	382,1	446,3
P10L8N4	339,7	412,4	476,2
P20L8N4	389,3	464,7	538,1

Annexe 4 La Cohésion

Tableau de l'évolution de la cohésion en fonction de temps de cure avec 0% de Na₂SO₄

Temps de cure (jours)	P0L0N0	P0L4N0	P0L8N0	P10L0N0	P20L0N0	P10L4N0	P20L4N0	P10L8N0	P20L8N0
7	24,5	42	56,1	42,7	47,2	96,8	111	125,9	138,8
30	35,4	119,9	148,5	51,5	60	180,5	193,1	217,2	245,5
60	48,5	180,2	203,5	69,3	69,1	230,9	252,3	304,4	326,2

Tableau de l'évolution de la cohésion en fonction de temps de cure 2 % de Na₂SO₄

Temps de cure (jours)	P0L0N0	P0L4N0	P0L8N0	P10L0N0	P20L0N0	P10L4N0	P20L4N0	P10L8N0	P20L8N0
7	21	78,7	98,4	41	45,3	135,5	151	167,2	181,3
30	34,3	131,1	165,6	49	57,1	238,9	242,5	290,2	317,7
60	48,3	217,4	250,3	66,6	66,4	288,5	313,3	373	398,1

Tableau de l'évolution de la cohésion en fonction de temps de cure avec 4 % de Na₂SO₄

Temps de cure (jours)	P0L0N0	P0L4N0	P0L8N0	P10L0N0	P20L0N0	P10L4N0	P20L4N0	P10L8N0	P20L8N0
7	21,6	91,6	158,4	38,4	42,4	195,4	211	227,2	241,3
30	31,5	210,4	250,7	45,8	53,4	267	277	311,9	334,6
60	40,26	190,6	205,2	62,7	67,3	223,6	250,3	272,9	315,2

Annexe 5

Angle de frottement interne

Tableau de l'évolution de l'angle de frottement en fonction de temps de cure avec 0 % de Na_2SO_4

Temps de cure (jours)	P0L0N0	P0L4N0	P0L8N0	P10L0N0	P20L0N0	P10L4N0	P20L4N0	P10L8N0	P20L8N0
7	9,2	39,8	39,3	10	15,2	34,1	33,3	32	31,7
30	11,3	40,7	41,9	11	19,2	37,3	35,7	38	35,8
60	12,1	45,1	44,3	13,2	21,7	38,7	40	41,2	40,8

Tableau de l'évolution de l'angle de frottement en fonction de temps de cure avec 2 % de Na_2SO_4

Temps de cure (jours)	P0L0N2	P0L4N2	P0L8N2	P10L0N2	P20L0N2	P10L4N2	P20L4N2	P10L8N2	P20L8N2
7	8,1	41	40,4	9,7	14,6	36,4	35,6	34,3	34
30	9,5	41,5	42,7	10,5	18,3	37,3	38	40,2	41
60	10,2	47,5	47,8	12,7	20,9	42,7	43,9	45,2	44,8

Tableau de l'évolution de l'angle de frottement en fonction de temps de cure avec 4 % de Na_2SO_4

Temps de cure (jours)	P0L0N4	P0L4N4	P0L8N4	P10L0N4	P20L0N4	P10L4N4	P20L4N4	P10L8N4	P20L8N4
7	8,1	42,2	39,1	9	13,8	35,4	34,7	36,4	35,2
30	10,1	40,5	43,6	9,9	17,2	40,4	39,4	41,3	43,1
60	12,7	36,9	39,8	17,2	19,7	32,1	33,2	34,3	36,7