

UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB DE BLIDA

**Faculté des sciences de l'ingénieur
Département de Génie civil**

MEMOIRE DE MAGISTER

Génie civil

Spécialité : Construction

COMPORTEMENT DES MARNES AU TRAITEMENT A LA CHAUX ET AU CIMENT

Par

IMELHAINE Assia

Devant le jury composé de

Z. ZITOUNI	Maître de conférence, U. Saad Dahlab de Blida	Président
M. TAKI	Maître de conférence, ENTP, Alger	Examineur
A. BOUAFIA	Professeur, U. Saad Dahlab de Blida	Examineur
K. GRINE	Maître de conférence, U. Saad Dahlab de Blida	Rapporteur

Blida, Juin 2009

RESUME

Les marnes altérées sont des sols fins argileux très instables qui sont souvent à l'origine de plusieurs dégradations de structures ayant pour assise de fondation de telles formations. Toute fois, la littérature géotechnique faisant référence aux problèmes rencontrés avec les sols argileux a révélé que l'ajout d'additives, principalement de la chaux et du ciment c'est avéré très efficace en ce qui concerne leurs stabilisations. Le présent travail comporte une étude expérimentale portant sur la stabilisation des sols marneux (marne altérée) par rajout de chaux ou de ciment.

Les résultats obtenus montrent que les propriétés physico-mécaniques du sol utilisé dans cette investigation sont nettement améliorées après le rajout d'une faible proportion de chaux ou de ciment. En effet, des réductions nettes dans la plasticité, les déformations volumiques (tels que le retrait et le gonflement) et dans la compressibilité ainsi qu'une augmentation appréciable dans la résistance du sol sont observées après traitement. Il a été aussi observé à travers cette étude, que les marnes altérées répondent mieux au traitement à la chaux qu'à celui du ciment.

Mots clés : Marnes Altérées, Chaux, Ciment, Stabilisation.

ملخص

السجّيل تربة غير مستقرة تسبب أضرار عديدة للبنائيات المنشأة على هذا النوع من التربة . العديد من الدراسات المنجزة بشأن معالجة التربة الطينية بإضافة الجير و الإسمنت قدمت نتائج جيدة. فالهدف من هذا البحث هو دراسة سلوك السجّيل بعد معالجته بالجير و الإسمنت.

النتائج التي تم الحصول عليها بعد دراسات في المخبر أظهرت انخفاضا في بلاستيكية والتغيرات الحجمية (تقلص ، تضخم و الانضغاطية) وكذلك زيادة في مقاومة التربة بعد العلاج بالجير والإسمنت. تم كذلك الاستنتاج أن استعمال الجير لمعالجة هذا النوع من التربة يقدم نتائج أفضل من المعالجة بالإسمنت.

الكلمات الرئيسية : السجّيل ، الجير ، الإسمنت ، العلاج ، الإستقرار.

ABSTRACT

Altered marls are poorly drained fine clayey soils with a high affinity to water. This makes them unstable by the loss of their strength and by becoming very compressive soils which can undergo severe volume changes even under their own weight, causing several ground instabilities and damage to foundations of structures founded in such soils leading to their deteriorations. Soil stabilisation by mixing additives such as lime and cement has been proven successful when used with clayey soils to improve their volume stability, strength and stress-strain properties and reducing their affinity to water action. This study is concerned with a laboratory investigation into the stability of a Marley soil (altered marl) using additives, mainly lime and cement.

The results show that the physical properties such as plasticity, volume changes (swelling and shrinkage); and the compressibility of the soil are markedly reduced. However, the mechanical property such as the strength is greatly improved after the treatment. It has been also observed that the altered marls are better stabilised using lime than cement.

Keywords: Altered Marl, lime, Cement, stabilisation.



REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche constitue une expérience passionnante et marquante. Je tiens à remercier en tout premier lieu mon encadreur **Mr. Khaled GRINE** grâce à qui j'ai pu mener à bien ce travail.

Ce mémoire a été réalisée au sein du Laboratoire de Génie civil de l'université de Blida, je tiens adresser mes sincères remerciements aux techniciens du laboratoire Mr. Fertasse Abdelkader et Mr. Moussi Tahar. Je remercie aussi l'ensemble des professeurs et tout le personnel du département de génie civil.

J'exprime mon profond respect et ma reconnaissance à tous mes enseignants qui m'ont accompagné tout au long de ma formation.

Mes remerciements vont également aux personnels du Laboratoire National de l'Habitât et de la Construction unité de Koléa et à Mr Issri de l'unité de Rouiba, ainsi qu'aux personnels du Laboratoire Central des Travaux Publique de Kouba.

Je remercie tous les membres du jury de m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce mémoire.

Enfin, je ne pourrais pas terminer sans rendre hommage à mes parents, à mon frère et mes sœurs, mais aussi à mon oncle Abdelkader, sa femme et ces enfants. Je ne saurais jamais leur témoigner suffisamment toute ma gratitude pour m'avoir toujours soutenue.

TABLE DES MATIERES

RESUME

REMERCIEMENT

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUE ET TABLEAU

INTRODUCTION	8
1. LES MARNES	
1.1. Introduction	10
1.2. Minéralogie des marnes	11
1.3. Propriétés des argiles	15
1.4. Caractère évolutif des marnes	17
1.5. Problèmes liés aux comportements des sols marneux	19
1.6. Les marnes du Nord Algérien	25
1.7. Conclusion	26
2. LA STABILISATION DES SOLS PAR AJOUT DE CHAUX ET DE CIMENT.	28
2.1. Introduction	28
2.2. Stabilisation par ajout de chaux	28
2.3. Procédure de la stabilisation	57
2.4. Stabilisation des sols par ajout de ciment	65
2.5. Conclusion	70
3. METHODOLOGIE ET PROCEDURE D'ESSAIS	72
3.1. Introduction	72
3.2. Matériaux	72
3.3. Préparation des échantillons d'essai	73
3.4. Procédures des essais	80

4. RESULTATS	91
4.1 Introduction	91
4.2 Essais physico- chimiques	91
4.3 Essai Oedométrique	98
4.4 Essais mécaniques	103
4.5. Conclusion	121
5. DISCUSSIONS	123
5.1 Introduction	123
5.2 Effet des ajouts (chaux et ciment) sur la consistance	123
5.3 Effet des ajouts (chaux et ciment) sur les variations volumiques	125
5.4 Effet des ajouts (chaux et ciment) sur les caractéristiques de compactage	127
5.5 Effet des ajouts sur la résistance	129
5.6 Effet des ajouts (chaux et ciment) sur la compressibilité à l'oedomètre du sol traité	140
5.7 Comparaison entre le traitement à la chaux et le traitement au ciment	145
5.8 Conclusion	152
CONCLUSION	152
APPENDICE	
A. Classification des sols issue de la recommandation pour les terrassements routiers	
B. Situation des marnes altérées dans la classification des sols	
C. Listes des symboles et des abréviations	
REFERENCES	

LISTES DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1	:(a) Unité tétraédrique ; (b) Couche tétraédrique.	11
Figure 1.2	:(a) Unité octaédrique ; (b) Couche octaédrique.	11
Figure 1.3	: Schéma de la particule de kaolinite.	12
Figure 1.4	: Schéma de la particule d'illite.	12
Figure 1.5	: Schéma de la particule de montmorillonite.	13
Figure 1.6	: Photographies au microscope électronique des argiles	13
Figure 1.7	: Structure de la calcite.	15
Figure 1.8	: Structure de l'aragonite.	15
Figure 1.9	: Exemple de désordre provoqué par les effets de retrait – gonflement.	21
Figure 1.10	: Cas de ravinement sur un versant marneux dans la région d' Al Achour (Algérie).	22
Figure 1.11	: Coulées de solifluxion d'un terrain marneux en Normandie (France).	23
Figure 1.12	: Glissement de terrain marneux.	24
Figure 2.1	: Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de chaux additionnée	39
Figure 2.2	: Variation des limites d'Atterberg en fonction du type du minéral argileux et de la quantité de chaux additionnée	40
Figure 2.3	: Variation des limites d'Atterberg en fonction de la teneur en matière organique et de la quantité de chaux additionnée	41
Figure 2.4	: Variation du retrait linéaire en fonction du temps de cure et de la quantité de chaux additionné	42
Figure 2.5	: Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage	43
Figure 2.6	: Relation entre « teneur en eau - densité sèche » et « teneur en eau – résistance à la compression » d'une argile montmorillonitique après ajout de chaux	44
Figure 2.7	: Corrélation entre l'indice de gonflement, la limite de liquidité et le pourcentage de la fraction argileuse	46



Figure 2.8	: Relation entre la densité sèche et la pression de gonflement d'un sol argileux traité avec de la chaux	47
Figure 2.9	: Produit de réaction entre la kaolinite et la chaux (x 50.000)	49
Figure 2.10	: Produit de réaction entre la montmorillonite et la chaux (x100.000)	49
Figure 2.11	: Variation de la résistance à la compression non confinée en fonction de la quantité de chaux et du temps de cure dans un sol contenant la montmorillonite.	50
Figure 2.12	: Variation de la résistance à la compression non confinée en fonction de la quantité de chaux et du temps de cure dans un sol contenant de la kaolinite	50
Figure 2.13	: Variation de la résistance à la compression non confinée en fonction de la quantité de chaux et du temps de cure dans un sol contenant du quartz	51
Figure 2.14	: Comparaison des résistances obtenues avec la chaux calcitique et la chaux dolomitique à différent température de cure	52
Figure 2.15	: Variation de la résistance à la compression non confinée en fonction du rapport de chaux/ eau	53
Figure 2.16	: Effet du temps de cure sur la résistance à la compression non confinée d'un sol argileux traité avec différents quantité de chaux	54
Figure 2.17	: Variation du CBR en fonction du temps et de la quantité de chaux	55
Figure 2.18	: Courbes de compressibilité d'une argile traitée avec différents pourcentages de chaux	56
Figure 2.19	: Epandage de la chaux	57
Figure 2.20	: Malaxage du sol après épandage de la chaux	58
Figure 2.21	: Ajout d'eau après le malaxage du terrain	58
Figure 2.22	: Compacteur de la catégorie V5 (25 T)	59
Figure 2.23	: Etapes de mise en œuvre des colonnes de chaux	61
Figure 2.24	: Talus stabilisé par injection de coulis de chaux	62
Figure 2.25	: Mise en œuvre de colonne de sol traité à la chaux	63
Figure 2.26	: Effet de l'ajout de ciment sur les limites d'Atterberg d'un sol argileux	66
Figure 2.27	: Micrographies MEB de la microstructure du sédiment	69

	avant et après traitement au ciment	
Figure 3.1	: Localisation des sites d'étude.	71
Figure 3.2	: Four à moufle.	73
Figure 3.3	: malaxeur mécanique.	74
Figure 3.4	: Carottes métalliques pour le prélèvement des éprouvettes de l'essai de compression uniaxiale.	76
Figure 3.5	: Programme d'essai de compression uniaxiale.	77
Figure 3.6	: Série de tamis placée dans un vibreur mécanique	79
Figure 3.7	: Un bac thermostatique contenant une éprouvette d'essai et un agitateur mécanique.	80
Figure 3.8	: (a) Schéma de l'appareillage; (b) le cône et sa tige.	82
Figure 3.9	: Détermination du volume de la prise d'essai.	82
Figure 3.10	: Principe de l'oedomètre.	83
Figure 3.11	: Appareillage du l'essai Proctor modifié : a. Moule ; b. Dame.	85
Figure 3.12	: Sol compacté dans un moule CBR lors de son imbibation.	86
Figure 3.13	: Appareil triaxial.	88
Figure 4.1	: Courbes granulométriques des trois sites étudiés	90
Figure 4.2	: Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de chaux additionnée.	94
Figure 4.3	: Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de ciment additionnée.	95
Figure 4.4	: Variation de la limite de retrait en fonction de la quantité de chaux additionnée.	96
Figure 4.5	: Courbes de compressibilité du sol marneux de Cheraga avant et après le traitement.	97
Figure 4.6	: Courbes de compressibilité du sol marneux d'El harrach avant et après le traitement.	98
Figure 4.7	: Courbes de compressibilité du sol marneux de Tipaza avant et après le traitement.	99
Figure 4.8	: Courbe Proctor en fonction de la quantité de chaux additionnée.	102
Figure 4.9	: Courbe Proctor en fonction de la quantité de ciment additionnée.	103
Figure 4.10	: Variation du taux de gonflement en fonction de la quantité de chaux additionnée.	104

Figure 4.11	: Variation de l'indice CBR après immersion en fonction de la quantité de chaux additionnée.	105
Figure 4.12	: Variation du taux de gonflement en fonction de la quantité du ciment additionnée.	106
Figure 4.13	: Variation de l'indice CBR après immersion en fonction de la quantité du ciment additionnée.	107
Figure 4.14	: Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la quantité de chaux additionnée pour le site de Cheraga.	108
Figure 4.15	: Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la quantité de chaux additionnée pour le site d'El harrach.	109
Figure 4.16	: Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la quantité de chaux additionnée pour le site de Tipaza.	110
Figure 4.17	: Evolution de la résistance à la compression uniaxiale après immersion en fonction de la quantité de chaux additionnée pour le site de Cheraga.	110
Figure 4.18	: Evolution de la résistance à la compression uniaxiale après immersion en fonction de la quantité de chaux additionnée pour le site d'El harrach.	110
Figure 4.19	: Evolution de la résistance à la compression uniaxiale après immersion en fonction de la quantité de chaux additionnée pour le site de Tipaza.	111
Figure 4.20	: Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la température de cure pour des marnes traitées avec 4% de chaux.	112
Figure 4.21	: Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction du temps de cure pour des marnes traitées avec 4% de chaux.	113
Figure 4.22	: Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la quantité de ciment additionnée pour le site de Cheraga.	114
Figure 4.23	: Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la quantité de ciment additionnée pour le site d'El harrach.	115
Figure 4.24	: Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la quantité de ciment additionnée pour le site de Tipaza.	115
Figure 4.25	: Evolution de la résistance à la compression uniaxiale après	116

	immersion en fonction de la quantité de ciment additionnée pour le site de Cheraga.	
Figure 4.26	: Evolution de la résistance à la compression uniaxiale après immersion en fonction de la quantité de ciment additionnée pour le site d'El harrach.	116
Figure 4.27	: Evolution de la résistance à la compression uniaxiale après immersion en fonction de la quantité de ciment additionnée pour le site de Tipaza.	117
Figure 5.1	: Variation de la plasticité en fonction de la quantité de chaux ajoutée.	119
Figure 5.2	: Variation de la plasticité en fonction de la quantité de ciment ajoutée.	120
Figure 5.3	: Variation de la limite de retrait en fonction de la quantité de chaux additionnée.	122
Figure 5.4	: Variation de coefficient de gonflement en fonction de la quantité de chaux/ ciment ajoutée.	122
Figure 5.5	: Variation du taux de gonflement après 4jours d'imbibation en fonction de la quantité de chaux / ciment ajoutée.	123
Figure 5.6	: Variation de densité sèche maximale en fonction de la quantité de chaux / ciment ajoutée.	124
Figure 5.7	: Variation de teneur en eau optimale en fonction de la quantité de chaux / ciment ajoutée.	124
Figure 5.8	: Variation de l'indice CBR en fonction de la quantité de chaux ajoutée.	125
Figure 5.9	: Variation de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la quantité de chaux ajoutée.	126
Figure 5.10	: Variation de la résistance à la compression uniaxiale du temps de cure après un ajout de 4% de chaux.	127
Figure 5.11	: Variation de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la température de cure après un ajout de 4% de chaux.	128
Figure 5.12	: Variation de la résistance à la compression uniaxiale avec et sans imbibation avant la compression.	129
Figure 5.13	: Comportement des marnes de Cheraga avant et après le traitement	130

	à la chaux.	
Figure 5.14	: Comportement des marnes d'El harrach avant et après le traitement à la chaux.	130
Figure 5.15	: Comportement des marnes de Tipaza avant et après le traitement à la chaux.	131
Figure 5.16	: Variation de l'indice CBR en fonction de la quantité de ciment ajoutée.	132
Figure 5.17	: Variation de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la quantité de ciment ajoutée.	132
Figure 5.18	: Variation de la résistance à la compression uniaxiale avec et sans imbibation avant la compression.	133
Figure 5.19	: Comportement des marnes de Cheraga avant et après le traitement au ciment.	134
Figure 5.20	: Comportement des marnes d'El harrach avant et après le traitement au ciment.	135
Figure 5.21	: Comportement des marnes de Tipaza avant et après le traitement au ciment.	135
Figure 5.22	: Comparaison entre l'effet de la chaux et du ciment sur la plasticité.	137
Figure 5.23	: Comparaison entre l'effet de la chaux et du ciment sur le taux de gonflement.	138
Figure 5.24	: Comparaison entre l'effet de la chaux et du ciment sur l'indice CBR.	140
Figure 5.25	: Comparaison entre l'effet de la chaux et du ciment sur la résistance à la compression uniaxiale.	141
Figure 5.26	: Comparaison des taux de pertes de résistance des sols traités à la chaux et au ciment après imbibation.	142
Tableau 1.1	: Dénomination des sols fins calcaires.	10
Tableau 1.2	: Caractéristiques des argiles.	13
Tableau 1.3	: Surface spécifique de quelque minéral argileux.	16
Tableau 1.4	: Synthèse statistique des caractéristiques géotechniques des marnes plaisanciennes d'Alger.	25
Tableau 2.1	: Classification de la chaux.	30
Tableau 2.2	: Exigences chimiques pour la chaux.	31

Tableau 2.3	: Solubilité de la chaux en fonction de la température	32
Tableau 2.4	: Valeur de la solubilité pour différents types de chaux à 20°C.	32
Tableau 2.5	: Variation du pH d'une solution d'hydroxyde de calcium en fonction de la température.	33
Tableau 2.6	: pH de différents types de chaux à 25°C.	33
Tableau 2.7	: Surface spécifique pour différents types de chaux.	33
Tableau 2.8	: Masse volumique apparente pour différents types de chaux	34
Tableau 2.9	: Classification de la chaux en fonction de « i ».	34
Tableau 2.10	: Temps de prise pour différent types de chaux.	35
Tableau 2.11	: Résistances à la compression des chaux hydrauliques et chaux hydrauliques naturelles.	35
Tableau 2.12	: Pourcentage de gonflement d'un sol argileux provenant de l'Iowa (U.S.A) traité avec la chaux.	45
Tableau 2.13	: Pourcentage de gonflement d'un sol argileux provenant de St. Louis (U.S.A) traité avec la chaux et effet de la cure.	45
Tableau 2.14	: Indice CBR de différents types de minéraux argileux traités avec une quantité de chaux optimale.	55
Tableau 2.15	: Exigences mécaniques d'un ciment	65
Tableau 2.16	: Variation de la limite de retrait en fonction du % de ciment ajouté.	67
Tableau 3.1	: Caractéristiques géologiques des marnes utilisées.	70
Tableau 4.1	: Teneur en matière organique des marnes étudiées.	91
Tableau 4.2	: Teneur en carbonate de calcium des trois marnes étudiées.	91
Tableau 4.3	: Limite d'Atterberg en fonction de la quantité de chaux additionnée.	92
Tableau 4.4	: Limite d'Atterberg en fonction de la quantité de ciment additionnée.	93
Tableau 4.5	: Contrainte de préconsolidation après le traitement.	100
Tableau 4.6	: Indice de recompression après le traitement.	100
Tableau 4.7	: Indice de gonflement après le traitement.	100
Tableau 4.8	: Indice de compression après le traitement.	101
Tableau 5.1	: Comparaison entre l'effet de la chaux et du ciment sur l'indice de gonflement.	138
Tableau 5.2	: Contrainte de préconsolidation après le traitement.	143

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les sols fins sont des sols généralement déformables, compressives et très sensibles à l'action de l'eau. Ceci est dû principalement à leur faible pouvoir drainant. Ce dernier, constitue le paramètre majeur qui est à la base de nombreuses instabilités tels que, la variation volumique (gonflement-retraits), compressibilité ou perte de résistance mécanique que ces sols ont tendance à manifester en présence excessive d'eau, les rendant ainsi, des formations très instables.

La technique de stabilisation par rajout d'additives a été une méthode souvent utilisée pour améliorer la résistance, la perméabilité, la durabilité et réduire les déformations et la sensibilité à l'eau des sols. Les additives les plus couramment utilisés par cette technique sont la chaux et le ciment. La chaux est utilisée principalement pour le traitement des sols fins et le ciment pour traiter les sols grenus [1]. En effet, la stabilisation des sols par la chaux est ancienne. Les chinois et les romains connaissaient déjà cette technique dans l'antiquité et ils l'ont utilisée pour la construction de la grande muraille de Chine et de Via Appia en Rome [2]. Cependant c'est aux États-Unis d'Amérique durant les années vingt que la technique a été développée [3]. L'utilisation du ciment date du début du siècle en Allemagne, un grand nombre de sols d'aérodromes ont été stabilisés au ciment durant la guerre [4].

Aujourd'hui la stabilisation des sols par l'ajout de chaux ou de ciment est utilisée dans beaucoup de domaines, la construction des routes pour améliorer les couches de bases et les couches de formes, les chemins de fers, la construction des aéroports, la stabilisation des pentes, l'amélioration de la portance des sols de fondation (Deep mixing) et la construction des remblais [3].

Le but de cette étude est de faire une investigation sur la possibilité de traiter les marnes altérées par ajout principalement de chaux, étant donné que les marnes sont des sols fins argileux ou de ciment.

Les objectifs tracés pour atteindre ce but sont comme suit :

- Voir l'effet de la chaux et du ciment sur la consistance du sol à savoir, les limites de plasticité, les limites de liquidité et l'indice de plasticité,
- Voir l'effet de la chaux et le ciment sur les variations volumiques: le retrait et le gonflement,
- Voir l'effet de la chaux et le ciment sur la compressibilité,
- Voir l'effet de la chaux et le ciment sur la résistance.

Le présent mémoire est subdivisé principalement en cinq chapitres :

Le premier chapitre présente les sols marneux en donnant leurs caractéristiques et en soulevant les problèmes qu'ils leurs sont associés.

Le deuxième chapitre est consacré à une étude bibliographique portant sur le concept, la méthode et le mode d'utilisation de la technique de stabilisation des sols par rajout de chaux et de ciment.

Le troisième chapitre donne la méthodologie adaptée pour la préparation des échantillons et la réalisation des essais effectués au laboratoire.

Le quatrième chapitre présente les résultats des essais de laboratoire obtenus après le traitement des sols marneux avec de la chaux et du ciment.

Le cinquième chapitre comporte la discussion et l'interprétation aux différents résultats obtenus ainsi qu'une comparaison dans la performance entre le traitement à la chaux et au ciment du sol utilisé.

Finalement, une conclusion faisant ressortir les principaux résultats obtenue à partir de cette étude suivit de recommandations pour de future recherche à investiguer dans cet axe.

CHAPITRE 1 LES MARNES

1.1. Introduction

Les marnes sont des formations sédimentaires, cohérentes, formées dans un milieu marin peu profond. Elles résultent de la sédimentation des matières organiques et minérales [5,6]. Les marnes sont constituées essentiellement d'un mélange d'argile et de carbonate de calcium (CaCO_3), la proportion de ce dernier varie de 30 à 70 % (tableau 1.1) [7, 8, 9]. Leurs comportements dépendent du contenu de carbonate et du type du minéral argileux [9]. Elles sont moins compactes que le calcaire et moins plastiques que les argiles [6].

Tableau 1.1: Dénomination des sols fins calcaires.

Pourcentage de CaCO_3	Dénomination
0 à 10	Argile
10 à 30	Argile marneuse
30 à 70	Marne
70 à 90	Calcaire marneux
90 à 100	Calcaire

Dans la classification des sols issus de la recommandation pour les terrassements routiers R.T.R (Appendice A), les marnes sont classées dans la catégorie des formations *évolutives*. Les formations évolutives sont définies comme étant des matériaux possédant une résistance naturelle élevée mais non suffisante pour résister à toutes les manipulations de mise en œuvre ou aux nouvelles conditions d'environnement, introduites par les travaux. Le fait de terrasser ses matériaux entraîne des modifications de leurs structures et par conséquent de leurs comportements géotechniques, pour cette raison ils sont dits évolutifs. L'évolution de ces matériaux se fait par action mécanique, physique, chimique et biologique. Elle entre dans la sous classe E3 de la classe E correspondant aux matériaux évolutifs argileux. Lorsque les marnes atteignent leurs évolutions ultimes elles donnent un sol de classe A selon la classification de a R.T.R (Appendice B) [6].

Etant évolutives, les marnes s'altèrent (se dégradent et deviennent instables. Ces instabilités se manifestent par des gonflements – retraits, des glissements de terrain et des ravinements.

1.2. Minéralogie des marnes

Les marnes sont des matériaux argileux contenant un certain pourcentage de carbonate de calcium, l'étude détaillée des minéraux argileux et du carbonate de calcium est donnée comme suit :

1.2.1. Minéraux argileux

Généralement, les minéraux argileux sont des phyllosilicates, caractérisés par leurs structures en feuillet [10, 11, 12, 13]. La structure de base du feuillet est constituée de [12, 13, 14]:

➤ Tétraèdre de silice SiO_4 (Te): Quatre atomes d'oxygène au sommet d'un tétraèdre régulier en serrent un atome de silicium. Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches tétraédriques (figure 1.1) [12, 13, 14].

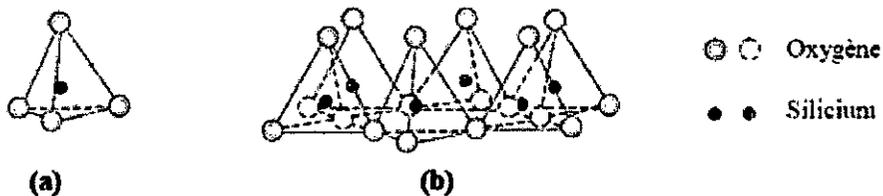


Figure 1.1 : (a) Unité tétraédrique ; (b) Couche tétraédrique.

➤ Octaèdre d'alumine $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ (Oc): six ions hydroxydes enferment un atome d'aluminium ou de magnésium. Les octaèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches octaédriques (figure 1.2) [12, 13, 14].

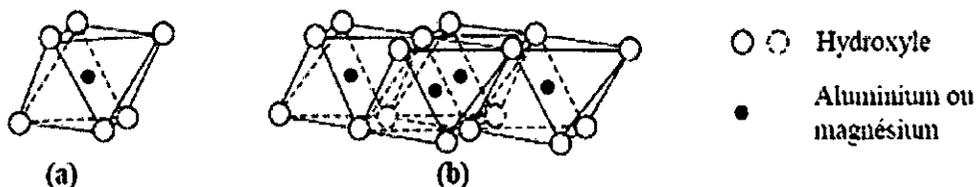


Figure 1.2 (a) Unité octaédrique ; (b) Couche octaédrique.

Les trois types d'argiles les plus couramment rencontrés sont la kaolinite, l'illite et la montmorillonite.

- Kaolinite $(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{Al}_4(\text{OH})_8$

Le feuillet élémentaire est composé d'une couche de silice et d'une couche d'alumine. Entre les différents feuillets de kaolinite le contact se fait entre un plan contenant les ions hydroxyles OH^- de l'octaèdre et celui contenant les ions d'oxygène O^{2-} du tétraèdre ; donnant dans ce cas des liaisons assez fortes. Les particules sont stables et leur structure élémentaire n'est pas affectée par la présence d'eau [12, 13, 14].

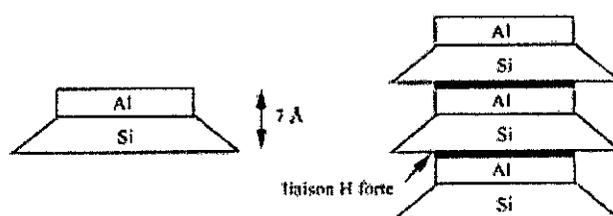


Figure 1.3: Schéma de la particule de kaolinite.

- Illite $(\text{K},\text{H}_2\text{O})_2\text{Si}_8(\text{Al},\text{Fe},\text{Mg})_{4,6}\text{O}_{20}(\text{OH})_4$

Le feuillet élémentaire est composé d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. Dans les couches de silice, un ion Si^{4+} sur quatre est remplacé par un ion Al^{3+} . Le déficit de charge qui en résulte est compensé par les ions de potassium K^+ qui assurent des liaisons assez fortes entre les feuillets [12, 13, 14].

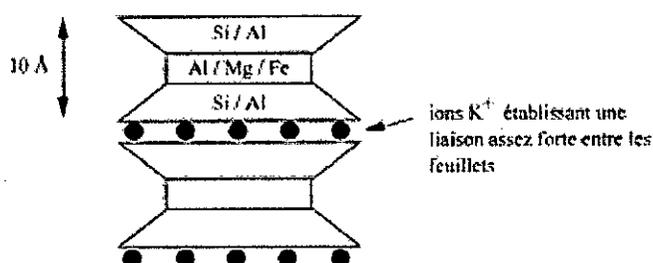


Figure 1.4 : Schéma de la particule d'illite.

- Montmorillonite $(\text{OH})_4\text{Si}_8(\text{Al}_{10/3},\text{Mg}_{2/3})\text{O}_{20},\text{H}_2\text{O}$

Le feuillet élémentaire est composé comme l'illite, d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. Un ion Al^{3+} est remplacé par un ion Mg^{2+} dans les couches

d'alumine. Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des ions Ca^{2+} (montmorillonite calcique) ou par des ions de Na^+ (montmorillonite sodique). Les liaisons entre les feuillets sont très faibles, ce qui rend ces argiles très sensibles à la teneur en eau. La montmorillonite appartient à la famille des smectites définies comme des argiles gonflantes [12, 13, 14].

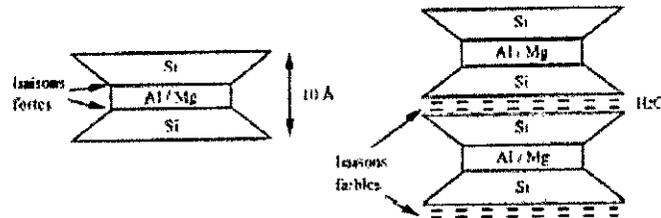


Figure 1.5 : Schéma de la particule de montmorillonite.

Les caractéristiques de ces argiles sont résumées dans le tableau 1.2. La figure 1.6 représente des images de ces argiles prise au microscope électronique [12, 13, 14].

Tableau 1.2 : Caractéristiques des argiles.

Minéraux argileux	Nombre de feuillets par particule	Epaisseur d'une particule (μm)	Surface spécifique (m^2/g)	C.E.C (meq/100g)
Kaolinite	100-200	1-10	10-20	3-15
Illite	1-10	0.003-0.01	65-100	10-40
montmorillonite	1	0.001	700-840	80-150



Kaolinite

Illite

Montmorillonite

Figure 1.6 : Photographies au microscope électronique des argiles [13].

1.2. 2. Carbonate de calcium

Le carbonate de calcium est l'un des minéraux les plus abondants à la surface du globe. Le carbonate de calcium apparaît essentiellement sous trois formes anhydres qui se distinguent par leurs propriétés thermodynamiques, cristallographiques et physico-chimiques [8] :

- La calcite est la forme la plus stable, à pression et température ambiante. Elle représente le constituant principal des roches carbonatées. La structure de la calcite est décrite dans la figure 1.7 [13].
- L'aragonite est le plus souvent obtenue par précipitation en solution et peut également être d'origine organique [8]. La structure de l'aragonite est décrite dans la figure 1.8 [13].
- La vatérite est quasi inexistante à l'état naturel du fait de son instabilité dans les conditions normales de température et de pression [8].

L'aragonite et la vatérite sont moins répandues que la calcite. Elles se transforment de manière irréversible en calcite lorsqu'elles sont soumises à une température dépassant les 400°C [8, 13].

Du point de vue chimique, les carbonates de calcium sont des composés considérés comme inertes : insolubles dans les solvants organiques, ils ne réagissent pratiquement qu'avec les acides [8].

Quant à la solubilité dans l'eau, elle est très faible : de l'ordre de 15 mg/L dans une eau exempte de gaz carbonique à température ambiante, elle croît avec la température.

À l'inverse, dans de l'eau chargée de gaz carbonique, la solubilité est notablement plus forte et décroît avec la température : elle est de l'ordre de 900 mg/L sous 1 atmosphère de gaz carbonique à température ambiante. L'aragonite et la calcite présentent des solubilités similaires [8].

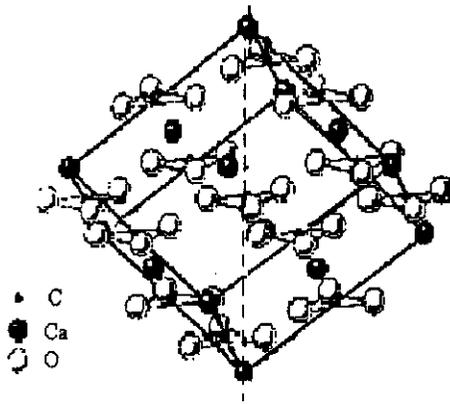


Figure 1.7 : Structure de la calcite.

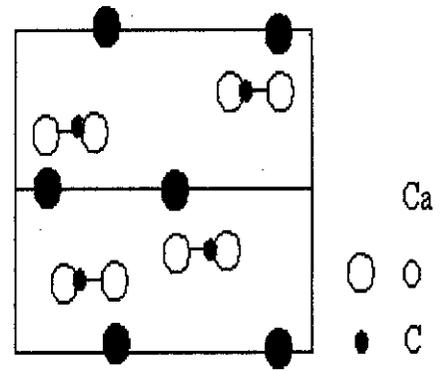


Figure 1.8 : Structure de l'aragonite.

1.3. Propriétés des argiles

1.3.1. Surface spécifique

La surface spécifique d'un sol est le rapport entre l'air total des particules et sa masse sèche [11, 16] :

$$S_s = \frac{S}{m} (m^2 / g)$$

La surface spécifique totale des argiles est la somme de la surface externe comprise entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace interfolaire [15, 16]. Elle peut atteindre plusieurs dizaines voir plusieurs centaines de m^2/g et ceci à cause de la structure en feuillet des argiles [15, 16]. Elle dépend de plusieurs paramètres tel que la nature du minéral argileux, elle est très élevée dans la montmorillonite ($800m^2/g$) par rapport à la kaolinite ($30m^2/g$). Cette différence est relative à l'accessibilité ou non de l'espace interfolaire, s'il n'est pas accessible la surface interne ne sera pas prise en compte [14, 15, 16].

Le tableau suivant donne quelques valeurs approximatives de surface spécifique pour les principaux types de minéraux argileux [12, 14, 16]:

Tableau 1.3: Surface spécifique de quelque minéral argileux.

Minéral	Surface interne (m²/g)	Surface externe (m²/g)	Surface total (m²/g)
Kaolinite	0	10-30	10-30
Illite	20-55	80-120	100-175
montmorillonite	600-700	80	700-800

La surface spécifique est très importante dans l'étude des argiles car elle donne une idée sur leurs comportements en présence d'eau, plus elle est élevée plus la quantité d'eau pouvant être adsorbée par les particules argileuses- est importante, ce qui fait augmenter le pouvoir de gonflement du sol [14, 16].

1.3.2. Capacité d'échange cationique

La configuration de référence du minéraux argileux conduit à ce que les couches tétraédriques et octaédriques présentent une charge électrique identique en valeur absolue mais de signe opposé [11, 18]. Mais en réalité cette configuration est généralement modifiée du fait de la substitution des cations Si⁴⁺ et Al³⁺ par des cations de nature différente, ses substitutions sont appelées isomorphiques. Les substitutions par des cations de plus faible charge conduisent à un déficit de charge. Les possibilités de substitutions ne sont pas illimitées car seuls les ions ayant un rayon ionique proche de celui de Si⁴⁺ et Al³⁺ peuvent les remplacer [18].

Par ailleurs le déficit de charge peut être lié au phénomène de bordure [11, 18, 19]. En effet, lorsqu'une particule argileuse est brisée les valences situées dans le plan de rupture ne seront plus saturées, ce qui peut créer un déficit de charge [11].

Ainsi le déficit de charge total des particules est essentiellement dû aux substitutions isomorphiques et au phénomène de bordure [11, 18].

Si c'est particules sont mises en contact avec des fluides chargés en ions, il se produit alors un équilibre électro – chimique entre les particules et le milieu extérieur par adsorption de cation compensateur. Tous les cations ne sont cependant pas libres ou échangeables car leurs liens avec les particules peuvent être variés. La somme des charges des cations échangeables est appelée *capacité d'échange cationique* (CEC). Le CEC du sol varie avec le pH [11, 18].

Certains minéraux tels que la montmorillonite et l'illite possèdent un CEC élevé, elles sont donc plus actives sur le plan d'échange cationique. Ces minéraux sont dotés d'une structure 2:1, soit deux feuillets de (Si) et une d'alumine. Les deux surfaces de (Si) possèdent des ions négatifs et sont donc susceptibles d'attirer des ions positifs (cations). Donc si par exemple ces structures sont en présence de cation de Ca^{++} provenant d'un ajout de chaux au sol, il peut être attiré à leur surface et modifier la structure du minéral argileux [11, 18, 19].

1.3.3 Capacité d'adsorption d'eau

Le caractère dipolaire de l'eau lui confère la propriété d'être attiré par l'intermédiaire de ces extrémités positives à la surface négative des matériaux argileux [13, 20]. Toutefois, selon la force des liens unissant les feuillets d'argile, ceux-ci autorisent ou non l'arrivée de l'eau dans l'espace interfolaire. Chez certaines argiles l'eau ne peut s'engager entre les feuillets comme c'est le cas de la kaolinite et de l'illite, par contre la montmorillonite se distingue par sa forte capacité à adsorber les molécules d'eau [14, 20,21].

La capacité des argiles à adsorber les molécules d'eau dépend aussi:

- Du déficit de charge positive causé par les substitutions isomorphiques des cations Si^{4+} et Al^{3+} par certains cations de faible valence.
- De la nature du cation échangeable : le cation exerce une attraction sur les molécules d'eau qui s'organisent d'une façon plus ou moins régulière autour de lui. Les cations polyvalents ont une action plus intense que les monovalents, aussi il faut prendre en considération la taille de ces cations, qui leur permet ou non de se loger dans la molécule d'eau [14,15 ,17].

1.4. Caractère évolutif des marnes

Le caractère évolutif des marnes se traduit par les différents processus d'altérations et selon le degré d'altération des marnes, on peut les classer en trois catégories [22]:

- Marne saine;
- Marne intermédiaire;
- Marne altérée.

L'altération est causée principalement par des actions physiques et des actions chimiques.

1.4.1. Actions physiques:

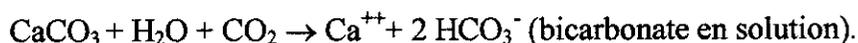
Les processus mis en œuvre dans l'altération physique sont les suivants [23, 24] :

- les alternances de gel – dégel, l'eau en gelant augmente son volume élargissant progressivement les fissures induisant des variations volumiques;
- les variations répétées de température ont à peu près les mêmes effets que l'action du gel où les différences de dilatation thermique entre les minéraux d'une formation provoquent l'apparition de fissures ;
- l'usure mécanique provoquée par l'action du vent, de l'eau ou de la glace.

1.4.2 Actions chimiques:

L'altération chimique agit de deux façons, certains minéraux (calcite) sont dissous totalement et leurs ions sont évacués en solution [19]. D'autres minéraux, comme les micas ou les feldspaths sont transformés en d'autres espèces minérales (surtout en argiles), souvent de granulométries plus fines et plus facilement mobilisables par l'érosion [25]. La plupart des réactions impliquées dans l'altération nécessitent la présence d'eau et d'air [25]. Les réactions les plus significatives dans l'altération chimique :

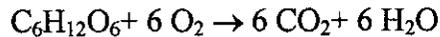
- Mise en solution: c'est la réaction la plus simple, faisant intervenir de l'eau (comme étant un acide faible) ou un acide, comme par exemple la dissolution de la calcite par la réaction suivante [19]:



- Hydratation et déshydratation [19, 25] :
 - La déshydratation du gypse pour produire de l'anhydrite:

$$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O};$$
 - L'hydratation de la kaolinite pour produire de la gibbsite.
- Hydrolyse : cette réaction est le processus par lequel un cation d'un minéral est remplacé par le H^+ d'une solution acide. Cette réaction a pour conséquence la destruction du minéral (mise en solution complète) ou la conversion en une nouvelle espèce de minéral [25].
- Oxydation – réduction: le processus d'oxydation le plus connu est la transformation de Fe^{2+} en Fe^{3+} [19, 25].

- réactions impliquant la matière organique : une réaction importante est l'oxydation de la matière organique, produisant de l'eau et du CO₂, lui-même impliqué dans des réactions de mise en solution [19] :



1.4.2.1 Paramètres contrôlant l'altération chimique

Le climat est probablement le facteur le plus important dans le contrôle de l'altération chimique. Il est clair qu'une température élevée va favoriser l'altération. L'humidité est également importante, puisque beaucoup de réactions se passent en milieu aqueux. L'altération chimique est donc prédominante dans un climat chaud et humide. Dans un climat froid, même si les précipitations sont abondantes, l'eau est à l'état de neige ou de glace, favorise plutôt l'altération physique [24, 26].

D'autres facteurs occupent également une place importante, quoique plus indirecte (exemple : cas du drainage). Si les ions mis en solution ne sont pas évacués, un équilibre chimique sera atteint et les réactions d'altération vont s'arrêter [24, 26].

Le relief, également, contrôle la pente des réseaux fluviaux et la rapidité des courants, donc l'intensité de l'évacuation des ions [24, 26].

L'acidité – alcalinité et le degré d'oxydo – réduction des eaux sont également des paramètres importants contrôlant l'altération chimique. Par exemple l'eau pluviale est légèrement acide, tout comme les sols donc la dissolution et hydrolyse vont jouer un rôle dominant. Par contre, le pH de l'eau de mer est de l'ordre de 8, peu de réactions d'hydrolyse ont donc lieu en milieu sous-marin. Aussi la plupart des environnements en contact avec l'atmosphère peuvent s'oxyder. Des conditions réductrices ne sont observées que dans des milieux isolés de l'atmosphère ou des milieux dont tout l'oxygène est consommé (par exemple suite à l'oxydation de la matière organique) [24, 26].

1.5. Problèmes liés aux comportements des sols marneux

1.5.1. Retrait – gonflement

Suite à une modification de leur teneur en eau, les terrains marneux superficiels varient en volume, retrait lors d'une période d'assèchement et gonflement lorsqu'il y a apport d'eau [27, 28, 29]. Ces changements sont gouvernés par les conditions

météorologiques ; une période de sécheresse provoque le retrait qui se traduit par l'apparition de fissures dans le sol et le retour de la période humide se traduit alors par une pénétration encore plus brutale de l'eau par l'intermédiaire de fissures (causés par le retrait), ce qui entraîne le gonflement des sols [29]. Ces changements sont accompagnés par des modifications dans les caractéristiques géotechniques du sol [29].

Contrairement au phénomène du tassement, dont les effets diminuent avec le temps, les désordres liés au phénomène de retrait – gonflement, évoluent avec le temps [27].

Les désordres dus au phénomène de retrait – gonflement, peuvent déstabiliser les fondations de plusieurs structures. Ces désordres se manifestent par l'apparition de fissures de traction dans les constructions tels que les murs de soutènement, les maisons individuelles et les chaussées (figure 1.9) [29].

Parmi les facteurs intervenants dans le phénomène de retrait – gonflement, il y a les facteurs de prédispositions (conditions nécessaires au phénomène) et les facteurs déclenchants [28].

1.5.1.1. Facteurs de prédisposition

- Type du minéral argileux ;
- Géométrie de la formation (l'épaisseur) ;
- Conditions de formation du dépôt du sol : un climat chaud et humide favorise la formation des minéraux argileux gonflant ;
- L'évolution des contraintes mécaniques appliquées [28].

1.5.1.2. Facteurs déclenchant

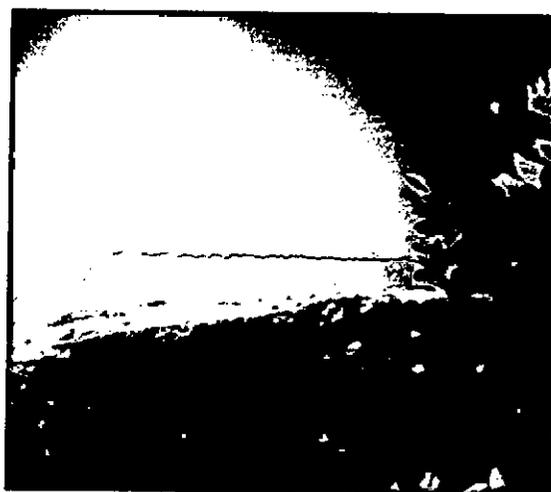
- Les variations climatiques : l'évapotranspiration – précipitations ;
- Actions anthropiques : mise en place des drains qui provoque la diminution des teneurs en eau donc une diminution du volume ;
- Conditions hydrogéologiques : présence de nappe ;
- Topographie : présence de forte pente ;
- Végétations [28].



a.



c.



d.

Figure 1. 9 : Exemple de désordre provoqué par les effets de retrait – gonflement :
 a. Route menant au stade du 5juiet (Alger).
 c et d. Habitation construite sur un sol marneux.

1.5.2. Ravinement

Les ravinelements sont enregistrés généralement dans les versants dépourvus de couverture végétale [29]. Ils se développent quand les averses sont intenses favorisant plus le ruissellement que l'infiltration de l'eau [29, 30]. Les ravinelements peuvent se présenter sous plusieurs formes, par exemple : les ravines en V, les ravines en U, les ravines en tunnel et les ravines remontantes.

Les ravines dépendent de l'énergie de ruissellement, laquelle dépend de la masse et de la vitesse de ruissellement [24].

La masse de ruissellement varie en fonction des paramètres suivants [24]:

- L'intensité des pluies ;
- Types de sols ;
- Couverture végétale.

La vitesse de ruissellement dépend de [24] :

- La topographie ;
- La rugosité du terrain.

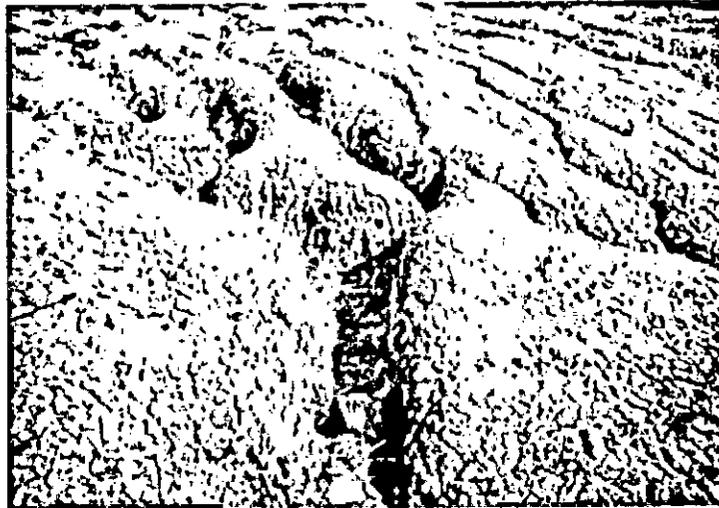


Figure 1.10 : Cas de ravinement sur un versant marneux dans la région d'Al Achour (Algérie).

1.5.3. Mouvements en masse (solifluxion)

Les forces qui s'exercent sur un versant peuvent se ramener à deux composantes, une composante perpendiculaire à la surface du versant et une composante parallèle à la surface du sol qui entraîne les matériaux meubles sous l'action de la pesanteur [30].

Cette composante parallèle joue donc un rôle de « transport » recouvrant toute une série de phénomènes variés, dont les mouvements en masse, qui sont la manifestation d'un processus appelé « solifluxion » [30]. La solifluxion est un phénomène d'écoulement des sols en surface sur des pentes très faibles [30].

Le problème principal c'est l'abondance de l'eau dans les formations superficielles, ces formations laissent infiltrer l'eau arrivant à la surface, c'est cette quantité d'eau infiltrée qui en se mélangeant aux argiles, modifie leurs propriétés mécaniques et à mesure qu'elle augmente, les rend successivement plastiques puis liquides. Ainsi les mouvements

en masse (solifluxion) se déclenchent sous l'effet de ces modifications. Cette incorporation d'eau dans le sol ne produit cependant pas nécessairement une modification des propriétés, les couches superficielles doivent posséder pour cela certaines aptitudes à se transformer en boue liquide, ce qui leur permet de « s'écouler » sous l'effet de la sollicitation de la pesanteur [30].



Figure 1.11 : Coulées de solifluxion d'un terrain marneux en Normandie (France).

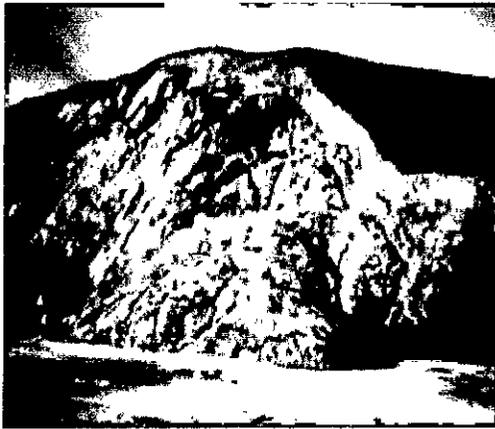
1.5.4. Glissement de terrain

Un glissement de terrain se produit lorsque les contraintes de cisaillement, dues aux forces motrices tel que le poids, excèdent la résistance du sol le long de la surface de rupture [31, 32]. On peut observer des glissements de formes variées [31] :

- Glissements rationnels, à surface de rupture à peu près cylindrique circulaire ;
- Glissements plans, dont la surface de rupture est plane dans sa plus grande partie ;
- Glissements composites, avec une ou plusieurs surfaces de rupture de forme complexe.

Les dimensions en plan d'un glissement vont du décamètre à quelques kilomètres ; la profondeur de la surface de rupture est comprise dans la plupart des cas entre 5 et 10 m, mais elle peut atteindre quelques dizaines de mètres ; les volumes en mouvement dans les glissements les plus considérables atteignent plusieurs dizaines de millions de mètres cubes [31].

Les formations marneuses sont susceptibles de subir des glissements de terrains lorsque leurs pentes dépassent les 10% comme l'indique la figure 1.12 [31]. Ces glissements peuvent entraîner des dégradations sur la construction adjacente.



a.



b.



c.



d.

Figure 1.12 : Glissement de terrain marneux.

- a. glissement boueux dans la région Seheb Nejoum (Maroc).
- b. glissement dans la région du Saguenay (Québec.).
- c. glissement de terrain dans la région de Mehalma (Alger)
- d. dégradation d'un trottoir due au glissement de terrain dans le versant de la figure 1.12.c.

1.6 Les marnes du Nord d'Alger

Les formations marneuses sont souvent rencontrées en Algérie. Dans une étude faite sur les marnes plaisanciennes qui couvrent une large surface du sud-ouest d'Alger, ces formations présentent des pentes de 5 à 30 %. L'étude géotechnique de ces marnes a classé

ces sols comme étant des sols fins, de faible perméabilité et d'une forte plasticité. L'analyse minéralogique a révélé que ces marnes présentent une teneur très élevée en montmorillonite.

Le comportement mécanique de ces sols révèle une faible résistance au cisaillement et une forte aptitude aux variations volumiques (retrait – gonflement). Ces sols ont été le siège de fréquentes instabilités dans les différentes localités où ils sont répandus. Ces instabilités consistent principalement à des mouvements de terrain (glissement, solifluxion et ravinement) et à des instabilités affectant les fondations des structures (construction, chaussées et mur de soutènement) [29].

Quelques propriétés géotechniques sont présentées dans le tableau suivant [29] :

Tableau 1.4 : Synthèse statistique des caractéristiques géotechniques des marnes plaisanciennes d'Alger.

Région		Profondeur (m)	γ_d (kN/m ³)	W_L (%)	I_p (%)	C_c (%)	C_g (%)	C (bars)	Φ (°)
Alger	Altérées	7-15	14.5	52.4	28.6	14.4	7.3	1.2	25
	saines	>15	16.7	51.75	26.1	10.2	6.8	1.65	11
El Biar	Altérées	1.5 – 5	16.6	59.13	28.3	12.4	5.4	0.94	11
	saines	5 – 8.5	17.9	52	23	9.7	3.4	2.17	13
Ben Aknoun	Altérées	<11	16.4	63	27	11.2	5.5	1.11	18
	saines	11 – 15	17.9	52	23	9.7	3.4	2.17	13
cheraga	Altérées	<9	17.6	57	30.7	4.9	5.9	0.9	11
	saines	9 – 20	19.2	52	26	6.4	2.8	-	-
Dely Ibrahim	Altérées	<11	16.7	49	25	15	6.67	-	-
	saines	11 – 17	18.3	48	24	8.56	2.73	-	-
El Achour	Altérées	<12.5	16.3	60.5	29	22.4	9	0.35	13
	saines	12.5 - 15	16.5	54	26	20	8	-	-
Ouled Fayet	Altérées	-	15.8	53	28	7.37	5	-	-

1.7 Conclusion

Les marnes sont des matériaux argileux contenant une certaine quantité du carbonate de calcium. Leurs comportements dépendent du type du minéral argileux et du pourcentage de carbonate qu'elles contiennent.

Dans la classification des sols issus de la recommandation pour les terrassements routiers R.T.R, les marnes sont classées dans la catégorie des formations évolutives. En effet les marnes sont des matériaux altérables et cette altération est principalement fonction d'actions physico-chimiques gouvernées par l'action de l'eau.

Les instabilités des formations marneuses sont à l'origine de nombreux désordres entraînant des mouvements de masse de ces sols tel que : glissement de terrain, solifluxion, ravinement et des dégradations de structures. Ces instabilités sont la conséquence de la susceptibilité à l'eau de ces formations.

CHAPITRE 2

STABILISATION DES SOLS PAR AJOUT DE CHAUX ET DE CIMENT

2.1 Introduction

La stabilisation par ajout de chaux ou de ciment a pour but de conférer au sol des propriétés et des performances nouvelles, en utilisant les affinités chimiques du sol et de l'additive utilisé.

Le présent chapitre donne le mécanisme, le principe, le mode de stabilisation des sols par ajout de chaux et de ciment et leurs effets sur le comportement du sol ainsi que les facteurs influençant la performance de tel ou tel additif.

2.2. Stabilisation par ajout de chaux

2.2.1 La chaux

La chaux est obtenue par la calcination d'un calcaire pur, et selon la nature de celui-ci on peut obtenir plusieurs types de chaux qui diffèrent dans leurs compositions chimiques et leurs modes de prise [33].

Selon la norme française NF P15-311, la chaux est un terme général qui englobe des formes physiques et chimiques de divers types dans lesquels apparaîtrons le l'oxyde de calcium CaO et de magnésium MgO et /ou l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et de magnésium $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

La chaux de construction est composée principalement d'oxyde et d'hydroxyde de calcium, et de quantité moindre d'oxyde et d'hydroxyde de magnésium, de silicium SiO_2 , d'aluminium Al_2O_3 et de fer Fe_2O_3 [34].

2.2.1.1 Types de chaux

a . Chaux aérienne

La chaux aérienne est le résultat de la calcination d'un calcaire pur [33]. Elle est constituée principalement d'oxyde ou d'hydroxyde de calcium, qui réagit au contact avec l'air ou plus exactement du CO_2 [34].

↳ *Chaux vive :*

C'est une chaux aérienne constituée principalement d'oxyde de calcium et de magnésium produite par la calcination de calcaire et / ou dolomie [34].

La chaux vive est avide d'eau, à son contact, elle produit une grande quantité de chaleur (réaction exothermique) [33, 34]. La chaux vive peut être classée selon le calcaire utilisé lors de la fabrication, elle peut être calcitique ou dolomitique :

La chaux calcitique est fabriquée à partir d'un calcaire pur (CaCO_3) ou contenant moins de 5% de magnésium [34, 35]. La chaux dolomitique est fabriquée à partir d'un calcaire dit dolomitique où le carbonate de calcium est associé au carbonate de magnésium [33,35]. La chaux dolomitique contient entre 35 et 46% d'oxyde de magnésium [35, 36].

↳ *Chaux éteinte :*

C'est une chaux produite par l'extinction contrôlée de la chaux vive par addition d'eau, elle est constituée principalement d'hydroxyde de calcium et éventuellement d'hydroxyde de magnésium [33, 34]. La forme de la chaux obtenue après extinction dépend de la quantité d'eau additionner [33] :

- Si la quantité d'eau est limitée, l'extinction produit une chaux en poudre,
- Si la quantité d'eau est en excès, l'extinction produit une chaux en pâte.

Les chaux éteintes n'ont pas de réaction exothermique quand elles sont au contact avec l'eau [34].

Les chaux éteintes peuvent être calcitiques ou dolomitiques [34] :

- ◆ Chaux calcitique éteinte : Elle est constituée principalement d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) [34] ;
- ◆ Chaux dolomitique éteinte : Elle est constituée principalement d'hydroxyde de calcium, d'hydroxyde de magnésium et d'oxyde de magnésium [34], elle peut être soit semi hydratée ou bien totalement hydratée :

La chaux dolomitique semi hydratée est constituée principalement d'hydroxyde de calcium et d'oxyde de magnésium ($\text{Ca(OH)}_2 + \text{MgO}$) [34]. Par contre la chaux dolomitique totalement hydratée est constituée principalement d'hydroxyde de calcium et d'oxyde de magnésium ($\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$) [34].

b. Chaux hydrauliques

Les chaux hydrauliques sont produites :

1. Soit à partir d'un calcaire contenant entre 12 et 20 % d'argile donnant une chaux hydraulique naturelle NHL [35].
2. Soit par ajout de silice et d'alumine au calcaire lors de la fabrication ainsi on aura une chaux hydraulique HL (d'une manière artificielle) [34].
3. Si on ajoute à la chaux hydraulique naturelle des matériaux pouzzolaniques tel que le laitier et le clinker (maximum 20%) on obtient la chaux NHL-Z [33, 34].

Les chaux hydrauliques sont constituées de silicate de calcium, d'aluminate de calcium et d'hydroxyde de calcium [34]. Elles font prises en deux phases :

- Une prise hydraulique : 70 % à 80 % en fonction du taux d'argile,
- Une prise aérienne par carbonatation : 20% à 30%.

2.2.1.2 Classification de chaux selon la norme française NF P15-311

Selon la norme NF P15-311 les différents types de chaux de construction sont classés en fonction de leurs teneurs en $\text{CaO} + \text{MgO}$ dans le cas des chaux aériennes. Les chaux hydrauliques sont classées selon leurs résistances à la compression minimale à 28 jours [33, 34,37]. Le tableau 2.1 donne la classification de la chaux :

Tableau 2.1 : Classification de la chaux.

	Types de chaux	Identification
Chaux aériennes	Chaux calcitique 90	CL 90
	Chaux calcitique 80	CL 80
	Chaux calcitique 70	CL 70
	Chaux dolomitique 85	DL 85
	Chaux dolomitique 80	DL 80
Chaux hydrauliques	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

2.2.1.3 Propriétés chimiques de la chaux

a. Exigences chimiques

La composition de la chaux de construction doit être conforme à la norme NF P15-311, cependant elle peut contenir des additifs en faibles quantités ne dépassant pas 0.1% [38]. Le tableau 2.2 définit les exigences chimiques pour la chaux :

Tableau 2.2 : Exigences chimiques pour la chaux.

Types de chaux	CaO+MgO (%)	MgO (%)	CO ₂ (%)	SO ₃ (%)	Chaux libre (%)
CL 90	≥ 90	≤ 5	≤ 4	≤ 2	-
CL 80	≥ 80	≤ 5	≤ 7	≤ 2	-
CL 70	≥ 70	≤ 5	≤ 12	≤ 2	-
DL 85	≥ 85	≥ 30	≤ 7	≤ 2	-
DL 80	≥ 80	> 5	≤ 7	≤ 2	-
HL 2	-	-	≤ 30	≤ 3	≥ 12
HL 3.5	-	-	≤ 30	≤ 3	≥ 12
HL 5	-	-	≤ 30	≤ 3	≥ 12
NHL 2	-	-	≤ 20	≤ 3	≥ 15
NHL 3.5	-	-	≤ 18	≤ 3	≥ 15
NHL 5	-	-	≤ 16	≤ 3	≥ 15

b. Caractéristiques chimiques

↳ Réactivité :

La réactivité d'une chaux définit la rapidité d'action de celle-ci dans une réaction donnée [33]. Selon la norme NF P15-311 aucune exigence n'est spécifiée en ce qui concerne la réactivité.

Les chaux vives (calcitique ou dolomitique) réagissent fortement avec les acides forts, ainsi qu'avec l'eau pour former la chaux éteinte (calcitique ou dolomitique) [38, 39].

Les chaux éteintes (calcitique ou dolomitique) réagissent fortement avec l'anhydride maléique et les acides forts (calcitique ou dolomitique) [40, 41].

↳ Solubilité :

La chaux aérienne est dissoute en faible quantité dans l'eau. Le tableau 2.3 donne la quantité de chaux dissoute dans 100g de solution en fonction de la température [33, 36]:

Tableau 2.3 : Solubilité de la chaux en fonction de la température.

Température (°C)	Chaux vive CaO (g/100g solution saturée)	Chaux éteinte Ca(OH) ₂ (g/100g solution saturée)
0	0.140	0.185
10	0.133	0.175
20	0.125	0.165
25	0.120	0.159
30	0.116	0.153
40	0.106	0.140
80	0.070	0.092
100	0.054	0.071

D'après le tableau 2.3 la solubilité de la chaux diminue avec l'augmentation de la température. Le tableau 2.4 donne un exemple de la solubilité pour différents types de chaux à une température de 20°C [38, 39, 40, 41].

Tableau 2.4 : Valeur de la solubilité pour différents types de chaux à 20°C.

Types de chaux	Solubilité dans 100 g de solution
Chaux calcitique vive	0.125 g
Chaux dolomitique vive	0.100 g
Chaux calcitique éteinte	0.165 g
Chaux dolomitique éteinte	0.100 g

Le tableau 2.4 indique que la chaux calcitique éteinte est la plus soluble dans l'eau.

↳ *pH* :

La chaux est une base. Elle peut être utilisée pour neutraliser les acides [33].

La solubilité de la chaux diminue avec l'augmentation de la température, donc le pH diminue avec l'augmentation de cette dernière. Le tableau 2.5 montre la variation du pH d'une solution d'hydroxyde de calcium en fonction de la température [33, 36]:

Tableau 2.5 : Variation du pH d'une solution d'hydroxyde de calcium en fonction de la température.

Température (°C)	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60
pH	13.42	13.21	13.00	12.81	12.62	12.45	12.30	11.98	11.71	11.45

Le tableau 2.6 donne quelques valeurs du pH pour différents types de chaux à 25°C [38,39, 40,41].

Tableau 2.6 : pH de différents types de chaux à 25°C.

Types de chaux	pH
Chaux calcitique vive	12.45
Chaux dolomitique vive	11.70
Chaux calcitique éteinte	12.40
Chaux dolomitique éteinte	12.25

2.2.1.4 Propriétés physiques de la chaux

a. Surface spécifique :

La surface spécifique est l'air total des grains en cm² dans un gramme de liant [3, 12]. Plus cette surface est importante plus les grains du liant sont de faibles dimensions et plus la réactivité du liant est grande [33, 42].

Le tableau 2.7 donne quelques valeurs de la surface spécifique pour différents types de chaux [33, 37] :

Tableau 2.7 : Surface spécifique pour différents types de chaux.

Types de chaux	Surface spécifique (cm ² /g)
Chaux calcitique vive	3000 à 10000
Chaux dolomitique vive	3000 à 10000
Chaux calcitique éteinte	8000 à 20000
Chaux dolomitique éteinte	8000 à 20000
Chaux hydraulique naturelle NHL	3000 à 8000
Chaux hydraulique HL	9000

b. Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente est la masse de l'unité de volume apparent, y compris les vides [42]. Selon la norme française NF P15-311, la masse volumique apparente pour différents types de chaux est comme suit (tableau 2.8) :

Tableau 2.8 : Masse volumique apparente pour différents types de chaux.

Type de chaux	CL 90/80/70	DL 85/80	HL 2 NHL 2	HL 3.5 NHL 3.5	HL 5 NHL 5
Masse volumique apparente (Kg/dm ³)	0.3 – 0.6	0.4 – 0.6	0.4 – 0.8	0.5 – 0.8	0.6 – 1.0

c. Indice d'hydraulicité « i » (indice de Vicat) :

L'indice d'hydraulicité « i » est défini par Vicat comme étant le rapport entre différents composants de l'argile et la part en chaux [33]. On peut aussi le définir par le rapport entre les constituants acides et les constituants basiques de la chaux [33]. Il est calculé par la formule suivante [33]:

$$i = \frac{(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)}{\text{CaO} + \text{MgO}}$$

Plus la valeur de « i » est élevée, plus la prise hydraulique est élevée [33].

Le tableau suivant donne la classification et le taux d'argile dans le calcaire [33] :

Tableau 2.9 : Classification de la chaux en fonction de « i ».

Type de chaux	« i »	Quantité d'argile (%)
Chaux aérienne	0 à 0.1	0 à 5
Chaux faiblement hydraulique	0.1 à 0.15	5 à 8
Chaux moyennement hydraulique	0.16 à 0.30	8 à 15
Chaux hydraulique	0.30 à 0.40	15 à 20
Chaux éminemment hydraulique	0.40 à 0.15	20 à 30

d. Vitesse de prise :

La prise de la chaux hydraulique est rapide par rapport à celle de la chaux aérienne, ce qui favorise un gain de résistance à court terme [33]. Les facteurs qui influent sur la vitesse de prise sont [42] :

- la finesse de mouture : plus les grains sont fins plus la prise est lente ;
- la température : elle accélère la prise ;
- la quantité d'eau : la vitesse de prise est faible si la quantité d'eau est élevée.

Le tableau suivant donne un exemple du temps de prise pour différents types de chaux [33, 36] :

Tableau 2.10 : Temps de prise pour différent types de chaux.

Type de chaux	Début de prise (min)
Chaux aérienne CL	600
Chaux hydraulique naturelle NHL	150
Chaux hydraulique pouzzolanique NHL-Z	200
Chaux hydraulique HL	60

2.2.1.5 Exigences concernant la résistance mécanique à la compression

Les résistances mécaniques à la compression du mortier des différentes classes de chaux hydrauliques après 7 et 28 jours doivent être équivalentes à celles indiquées dans le tableau suivant [34] :

Tableau 2.11 : Résistances à la compression des chaux hydrauliques et chaux hydrauliques naturelles.

Types de chaux	Résistances à la compression R_c (N/mm ²)	
	à 7 jours	à 28 jours
HL 2 . NHL 2	-	2 à 5
HL 3.5 . NHL 3.5	≥ 1.5	3.5 à 10
HL 5 . NHL 5	≥ 2	5 à 15

2.2.2 Sols souhaitables pour la stabilisation à la chaux

La chaux n'a d'effet sur le sol que si celui-ci contient une certaine fraction argileuse [35, 43, 44, 45], mais il est souhaitable aussi que le sol satisfait certaines conditions [45]:

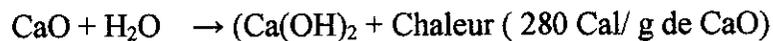
- ↳ un indice de plasticité I_p supérieur à 10% ;
- ↳ un pourcentage de matière organique inférieur à 2 % ;
- ↳ un pourcentage de sulfate inférieur à 1 % ;

2.2.3 Mécanismes de la stabilisation

L'ajout de chaux aux sols fins contenant une fraction argileuse et en présence d'eau produit plusieurs réactions. A court terme la chaux provoque une dessiccation du sol, un échange cationique, une floculation du sol et une carbonatation de la chaux. Ces réactions produisent des *modifications* dans les propriétés physiques du sol. A long terme se produit la réaction pouzzolanique qui donne des agents de cimentations, influençant la résistance du sol.

2.2.3.1 Dessiccation

Quand la chaux est ajoutée au sol, des réactions chimiques se produisent immédiatement [46]. Si c'est la chaux vive qui est ajoutée, elle s'hydrate immédiatement et libère de la chaleur.



Suite à l'hydratation de la chaux vive et à l'action de la chaleur libérée le sol est séché [2, 45, 46, 47]. La chaux vive réduit la masse d'eau dans le sol qui l'entoure de 32 % [45]. Si c'est la chaux éteinte qui est utilisée au lieu de la chaux vive la dessiccation se produit après l'action d'hydratation qui conduit à la réduction de la susceptibilité du sol à l'eau [46].

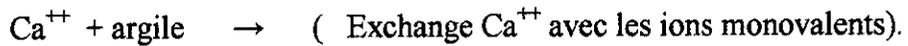
2.2.3.2 Echange cationique

L'ajout de chaux au sol argileux provoque un excès d'ions de calcium (Ca^{++}), ces derniers vont remplacer les cations métalliques associés à la surface des particules argileuses [3, 48, 49]. Ce processus modifie le sol sans produire un nouveau minéral [50].

On peut classer par ordre croissant de potentiel de remplacement comme suit [49, 51, 52, 53]:



En général les cations avec des valences élevées remplacent les cations de faibles valences.



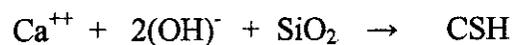
A valence égale, les cations avec un grand rayon ionique remplacent ceux qui ont un petit rayon ionique [49].

2.2.3.3 Flocculation

Les particules d'argile portent en surfaces des charges négatives, responsables de l'établissement d'un champ électrostatique autour d'elles. Ce champ permet le développement d'une double couche d'eau entourant les particules d'argile. L'ajout de chaux modifie la charge superficielle des argiles et donc la structure de la double couche dont une diminution de son épaisseur. On observe alors une diminution du volume apparent des particules, de plus il y a formation de pont de calcium entre les particules d'argiles provoquant la flocculation d'où un changement dans la texture du sol argileux, qui devient grenu [3, 48, 53, 54].

2.2.3.4 Réaction pouzzolanique

L'ajout de chaux au sol produit une augmentation de pH (jusqu'à 12.4) ce qui favorise la solubilité de la silice et de l'alumine [3, 47, 48, 55, 56]. Ces derniers vont réagir avec la chaux pour donner des agents de cimentation semblables à ceux produits par la réaction d'hydratation du ciment appelés : silicate de calcium hydraté CSH et aluminat de calcium hydraté CAH, avec : C = CaO ; S = SiO₂ ; A = Al₂O₃ ; H = H₂O [2, 3, 50, 57, 58].



Dans cette réaction on peut distinguer trois phases [50] :

- 1- Formation du silicate de calcium hydraté, CSH, appelé aussi gel tobermorite, il est mal cristallisé et il a un pourcentage élevé en calcium.

- 2- Formation du silicate de calcium hydraté I, CSHI : c'est un minéral qui est plus cristallisé que le CSH, il contient un faible pourcentage de calcium.
- 3- Formation du silicate de calcium hydraté II, CSHII : il contient un très faible pourcentage de calcium, alors qu'il présente une très forte quantité de silicate. c'est un très fort agent de cimentation.

L'aluminate de calcium hydraté est responsable des faibles liens de cimentation dans la réaction argile – chaux. Il est mal cristallisé [50].

Le nouveau minéral formé couvre et unit les particules argileuses et occupe les vides dans le sol, de ce fait l'argile forme un composé intégral de la masse «unifier» du mélange chaux - argile, ce qui est différent dans le cas de la stabilisation des sols par l'ajout de ciment [50, 59].

Les réactions pouzzolaniques ne se produisent que si la chaux ajoutée est en quantité suffisante. Le point de fixation de la chaux correspond à la quantité de chaux au-delà de laquelle la limite de plasticité ne varie plus. Il peut être aussi défini par la quantité optimale de chaux nécessaire pour un max de modification dans le sol afin d'avoir des résistances maximales. Le point de fixation est fonction du type du minéral argileux contenu dans le sol et il est indépendant du pourcentage de carbonate [3, 54, 59, 60].

La réaction pouzzolanique est responsable du développement de résistance du sol traité à long terme. Elle est fonction du temps et de la température du milieu extérieur [3, 50, 54, 57, 58, 59].

2.2.3.5 Carbonatation

La carbonatation de la chaux est une réaction indésirable [3, 49, 54]. Elle est due à la réaction entre la chaux et le CO₂ présents dans l'air, formant des faibles agents de cimentation [34, 49, 54]. Généralement on essaye de réduire ce phénomène par compactage du sol traité le plutôt possible [45].

2.2.4 Effets de la stabilisation par ajout de chaux sur le sol

2.2.4.1 Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg

Par définition les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau séparant les divers états du sol. Ils sont au nombre de trois [7, 61, 62] :

- Limite de liquidité W_L : séparant l'état liquide et l'état plastique.

- Limite de plasticité W_P : séparant l'état plastique et l'état solide.
- Limite de retrait W_S : séparant l'état solide avec retrait et l'état solide sans retrait.

L'indice de plasticité est la différence entre la limite liquide et la limite plastique, l'ajout de chaux au sol provoque un changement dans ces limites, d'une part à cause de la perte d'eau lors de la réaction entre la chaux et le sol et d'autre part à cause le l'échange cationique et la floculation du sol [7, 61, 62].

L'ajout de chaux au sol argileux réduit la plasticité du sol. Cette réduction est due à l'augmentation de la limite de plasticité et de la limite de liquidité. Toutefois l'augmentation de la limite plastique est plus importante que la limite de liquidité (figure 2.1). Parfois la chaux provoque une légère diminution de la limite de liquidité, mais au final l'indice de plasticité est réduit [3, 54, 55, 60, 63, 64, 65].

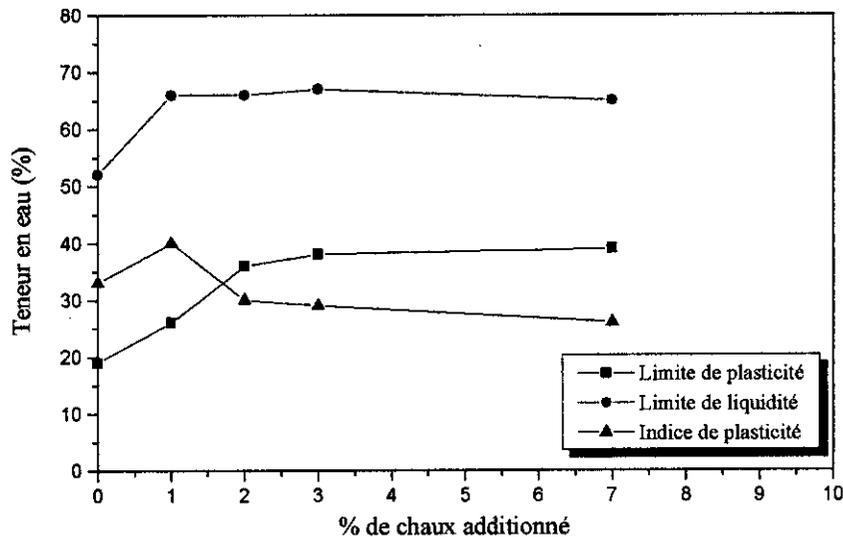


Figure 2.1 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de chaux additionnée [45].

L'effet de la chaux sur les limites d'Atterberg dépend de plusieurs paramètres tels que la minéralogie de l'argile contenant dans le sol, la quantité de matière organique et les conditions de la cure.

▪ Minéralogie

L'effet de la chaux sur les limites d'Atterberg dépend du minéral argileux ; dans l'argile montmorillonitique l'ajout de chaux provoque une augmentation de la limite plastique, et

une diminution de la limite de liquidité [3, 54, 55]. Quand au quartz et l'argile kaolinitique l'addition de chaux a pour conséquence une faible variation de la limite de plasticité et une forte augmentation de la limite de liquidité (figure 2.2) [3, 54, 55, 59]. Quelque soit le type du minéral argileux, l'ajout de chaux réduit la plasticité du sol, ce qui varie c'est l'amplitude de cette réduction [3, 60].

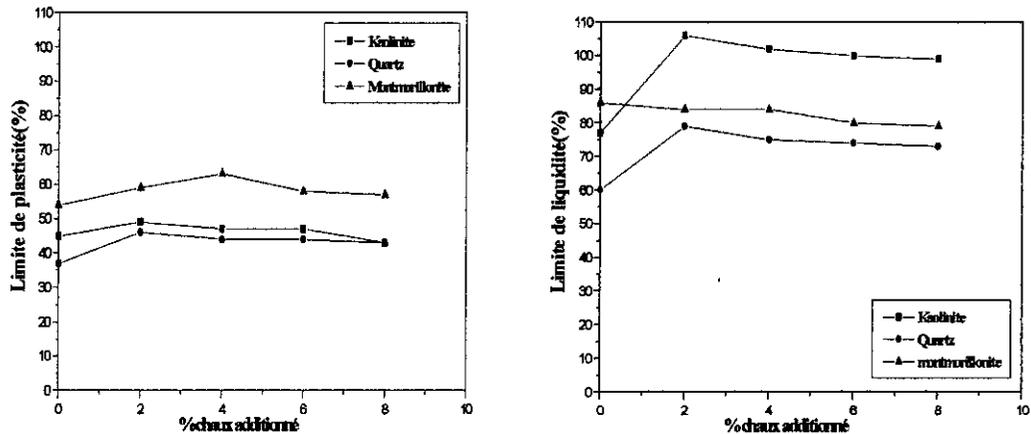


Figure 2.2 : Variation des limites d'Atterberg en fonction du type du minéral argileux et de la quantité de chaux additionnée [63].

▪ Matière organique

La présence d'une quantité importante de matière organique diminue l'action de la chaux sur la limite de liquidité et la limite de plasticité et par conséquent sur l'indice de plasticité. Plus la teneur en matière organique est importante dans le sol plus l'effet de la chaux est diminué (figure 2.3) [63].

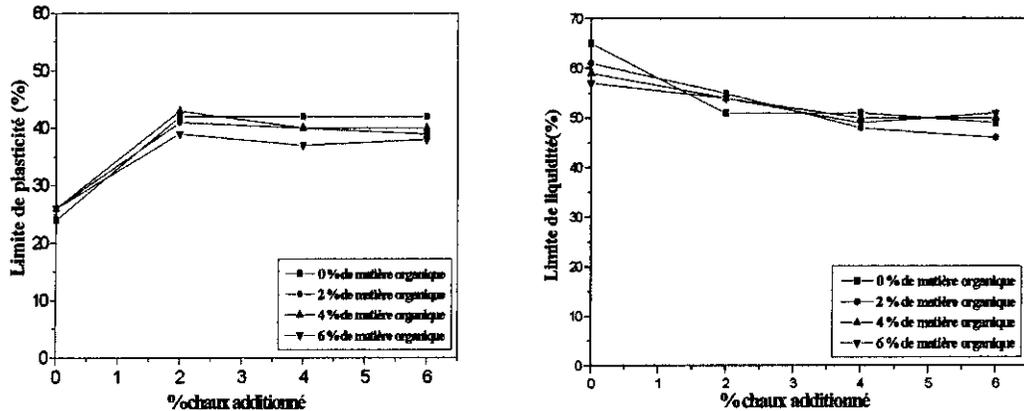


Figure 2.3 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la teneur en matière organique et de la quantité de chaux additionnée [63]

▪ Conditions et temps de cure

Il semble que les conditions et temps de cure ont un effet direct sur la diminution de la plasticité du sol traité. En effet, une étude faite sur des échantillons de sol (de granulométrie inférieur à 400 μ m) traités à la chaux et ayant subi une période de cure allant de 1 à 28 jours dans une chambre humide fermée, a rapporté une diminution de l'indice de plasticité après l'ajout de chaux en fonction du temps de cure [64, 65].

2.2.4.2 Effet de la chaux sur le retrait du sol

L'addition de chaux au sol argileux induit des changements dans la limite de retrait [3, 47, 44, 59, 63, 65]. En effet, l'ajout de 2 % de chaux provoque une augmentation de la limite de retrait. Ceci dépend du type de chaux utilisée lors de la stabilisation. Les valeurs les plus importantes de la limite de retrait sont enregistrées avec l'addition de la chaux calcitique [60]. Il en résulte que la chaux calcitique (de préférence vive) est plus efficace quand l'amélioration des variations volumiques dues au retrait du sol sont visées [3, 54, 59, 60]. Mais ceci n'est pas toujours le cas, il a été rapporté que l'ajout de 8 % de chaux conduit au même résultat sur la limite de retrait et ceci quelque soit le type de chaux utilisée, donnant ainsi une augmentation de la limite de retrait [3, 54, 59, 60].

L'ajout de chaux au sol argileux diminue le retrait linéaire [3, 47, 54, 63, 65]. Cette réduction varie avec le temps, le type du minéral argileux et la quantité de chaux additionnée [3, 54, 59, 65]. Dans le cas d'une argile montmorillonitique, 4 % de chaux

réduit son retrait linéaire de 25% à 4% [3, 54, 59]. Pour les sols contenant principalement de l'illite et de la kaolinite la valeur du retrait diminue de 6 % à 1 % (soit une réduction de 83%) [3].

Dans un sol marneux (contenant entre 30 à 50 % de carbonate de calcium et plus de 20% de montmorillonite), l'addition de chaux réduit le retrait linéaire après une heure de cure et plus le temps de cure est important plus cette réduction est importante (figure 2.4) [65].

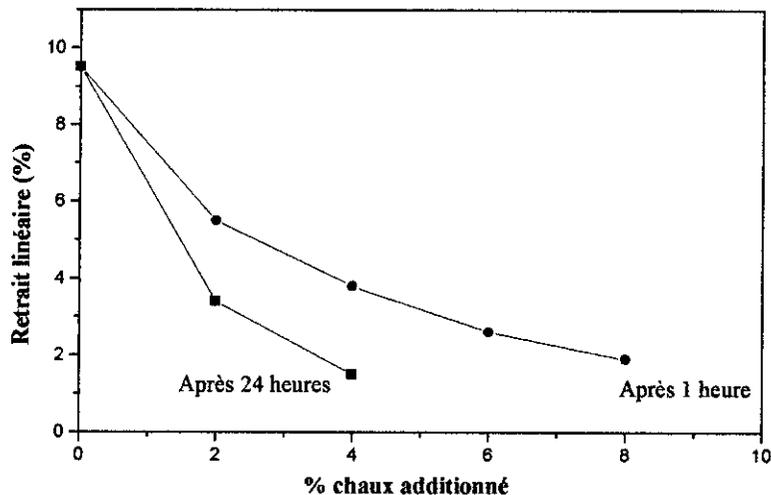


Figure 2.4: Variation du retrait linéaire en fonction du temps de cure et de la quantité de chaux additionné [65].

2.2.4.3 Effet de la chaux sur la courbe Proctor

Immédiatement après l'ajout de chaux au sol argileux la teneur en eau optimale augmente et la densité sèche maximale diminue [2, 3, 45, 47, 54, 59, 60], ce qui fait *aplatir* la courbe Proctor initiale du sol avant le traitement à la chaux, en effet la courbe est déplacée vers le bas et vers la gauche (figure 2.5) [2, 3, 45, 54, 59].

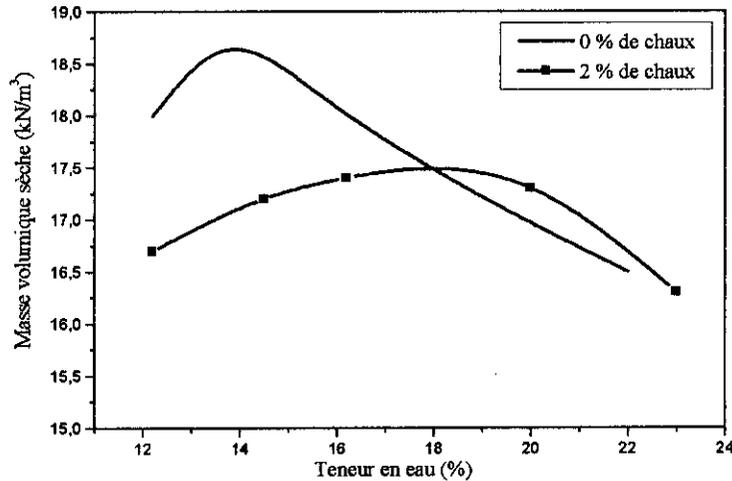


Figure 2.5 : Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage [2].

Les changements induits par l'ajout de chaux au sol argileux sur les caractéristiques de compactage sont dus à la déshydratation et la floculation du sol traité [3, 45, 54, 59]. La floculation développe une grande résistance au compactage, ainsi la densité sèche maximale diminue par rapport à celle du sol non traité pour un même effort de compactage [45]. Cette augmentation de la résistance au compactage est causée par la formation de faibles produits de cimentation, qui lient les particules argileuses entre elle, au début de la réaction sol - chaux [3, 45].

Ces changements dans les caractéristiques de compactage du sol traité dépendent de la quantité de chaux additionnée, plus le pourcentage de chaux augmente plus la densité sèche maximale diminue et plus la valeur de la teneur en eau optimale augmente pour un même effort de compactage [3, 54, 59].

Les conditions de cure influencent l'effet de la chaux sur les courbes Proctor. En effet, dans une étude faite sur des sols argileux traités à la chaux, une augmentation progressive de la teneur en eau optimale accompagnée par la diminution de la densité sèche maximale en fonction de la quantité de chaux additionnée a été observée avec l'augmentation de la période de cure [33].

Dans une autre étude faite sur différents types d'argile, l'effet des conditions de malaxage (malaxage par voie sèche ou humide) sur la valeur de la teneur en eau optimale a été mis en évidence. La teneur en eau optimale des sols marneux traités à la chaux est plus grande quand le malaxage se fait par voie humide [33].

L'ajout de chaux à l'argile montmorillonitique *déforme* la courbe Proctor, la densité sèche maximale n'est pas bien définie (absence de pic), donc pour déterminer la teneur en eau optimale pour le compactage il faut d'abord déterminer la résistance à la compression maximale [54, 59, 60]. En général, la teneur en eau optimale de la majorité des sols pour une densité sèche maximale est proche de la teneur en eau optimale pour une résistance à la compression maximale (figure 2.6) [60].

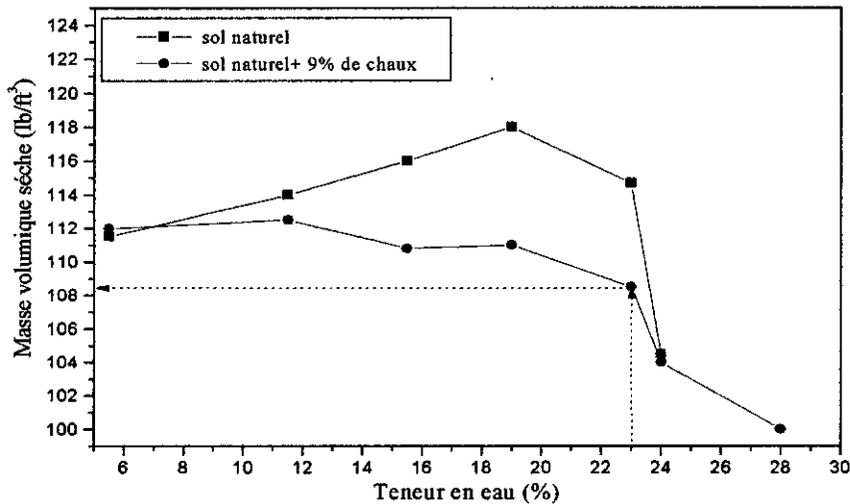
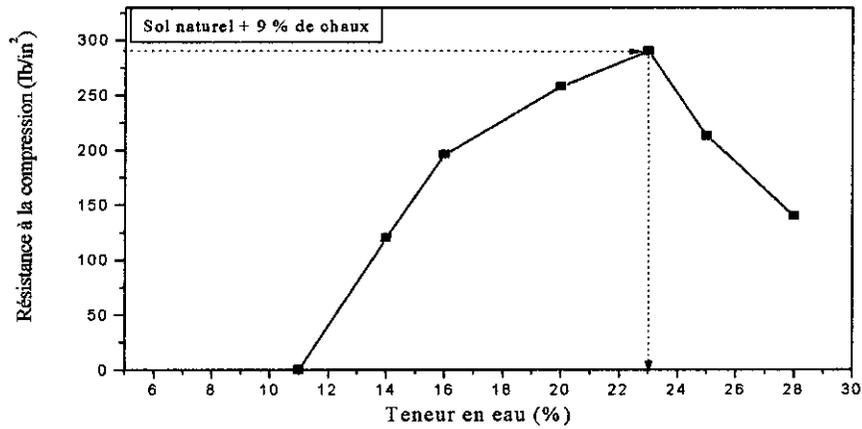


Figure 2.6 : Relation entre « teneur en eau - densité sèche » et la « teneur en eau - résistance à la compression » d'une argile montmorillonitique après ajout de chaux [60].

2.2.4.4 Effet de la chaux sur les caractéristiques de gonflement des sols

Immédiatement après l'ajout de chaux au sol argileux qui présente un potentiel de gonflement, celui-ci est réduit voir même complètement éliminé (tableau 2.12 et 2.13) [3, 7, 47, 54, 59, 60, 63]. Le gonflement dépend principalement de la plasticité du sol (indice de plasticité), du pourcentage de la fraction argileuse et de l'activité du sol, comme le montre la figure 2.7 [7, 65, 66]:

Tableau 2.12 : Pourcentage de gonflement d'un sol argileux provenant de l'Iowa (U.S.A) traité avec la chaux.

	Gonflement après 4 jours d'imbibition (%)
Sol naturel	1
Sol naturel + 2% de chaux	0

Tableau 2.13 : Pourcentage de gonflement d'un sol argileux provenant de St. Louis (U.S.A) traité avec la chaux et effet de la cure.

	Sol naturel	Sol naturel + 5% de chaux	Sol naturel + 5% de chaux + Cure
Gonflement (%)	7.1	2	0.1

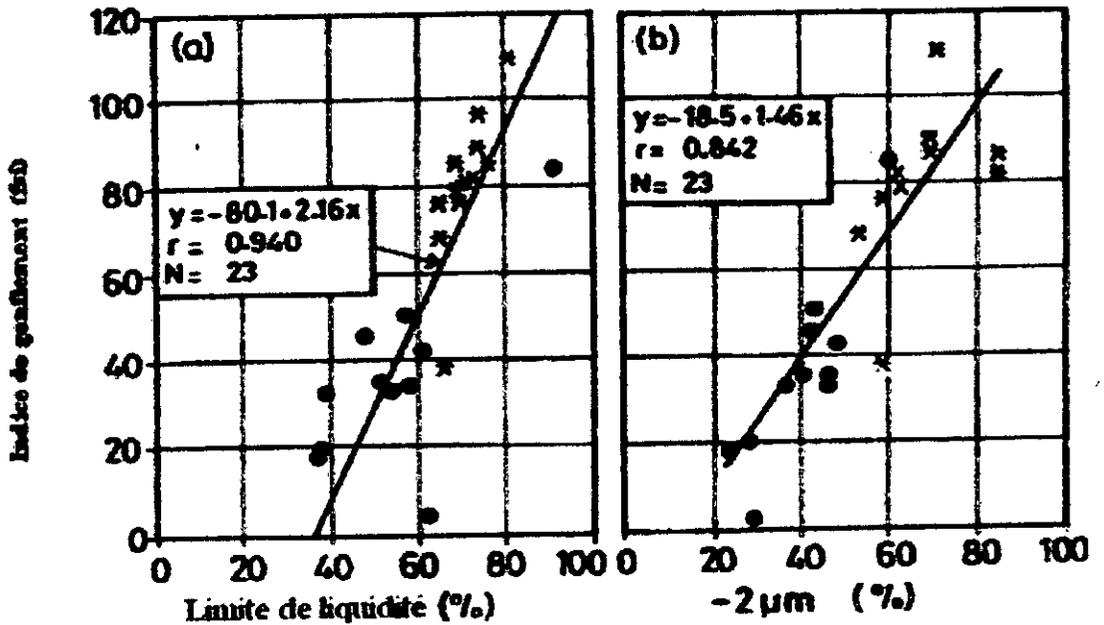


Figure 2.7 : Corrélation entre l'indice de gonflement, la limite de liquidité et le pourcentage de la fraction argileuse (diamètre des grains $<2\mu\text{m}$) [65].

La réduction du gonflement après l'ajout de chaux est due à l'échange cationique entre le sol et la chaux, car en réduisant la plasticité du sol on réduit le pourcentage de gonflement [3, 7, 47, 54, 59, 60, 65]. Le gonflement peut être réduit par le développement de la matrice de cimentation qui résiste aux variations volumiques [47, 62].

La pression de gonflement est la contrainte à appliquer pour remettre un échantillon de sol à son état initial après l'avoir laissé gonflé lors d'une humidification [66]. Cette pression est réduite avec l'ajout de chaux au sol. La pression de gonflement est inversement proportionnelle à la quantité de chaux additionnée (figure 2.8) [7].

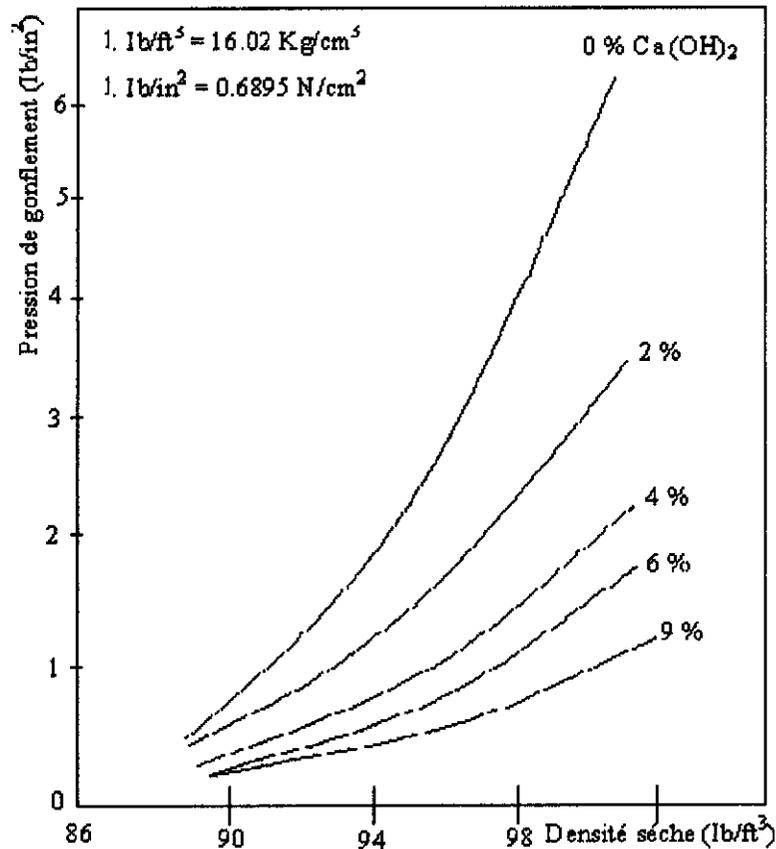


Figure 2.8 : Relation entre la densité sèche et la pression de gonflement d'un sol argileux traité avec de la chaux [7].

2.2.4.5 Effet de la chaux sur la perméabilité

La perméabilité est la mesure de la facilité avec laquelle un fluide passe à travers un matériau [67]. Le coefficient de perméabilité « k » est utilisé pour indiquer la perméabilité du sol, plus « k » est élevé plus le sol est perméable [62].

L'effet de l'ajout de chaux sur la perméabilité des sols argileux varie avec le temps, à court terme la chaux provoque des modifications dans la texture du sol, le rendant floculant impliquant une augmentation de la perméabilité et facilitant ainsi sa compaction. A long terme, la cimentation et le durcissement du sol le rendent imperméable diminuant ainsi son affinité à l'action de l'eau [67, 68].

La perméabilité diminue avec le temps cure, et ceci peut s'expliquer par l'augmentation de la production des agents de cimentation qui vont obturer les vides [54, 58, 59, 67]. Dans

une étude faite sur différents échantillons de sol traité avec la même quantité de chaux avec une cure de 30 jours avant que les essais de perméabilité s'effectuent, il a été démontré que les sols compactés à $W=W_{opt}$ ont une perméabilité et un pourcentage de Ca^{++} élevé que ceux compactés à $W=1.2 W_{opt}$, ceci s'explique par la rapidité de la réaction sol - chaux dans les échantillons compactés à $W=1.2W_{opt}$ et par conséquent la rapidité de la formation des produits de cimentation et l'obturation des vides dans le sol, et donc la diminution de la perméabilité [68].

2.2.4.6 Effet de la chaux sur la résistance:

La résistance du sol traité à la chaux peut être évalué par différents essais mécaniques tels que : essai de compression uniaxiale (UCS), essai CBR et essai triaxial. La résistance dépend de plusieurs facteurs tels que le type du minéral argileux, type et quantité de chaux, teneur en eau, temps et température de cure [68].

- Type du minéral argileux

Les sols gonflants traités à la chaux répondent plus rapidement à l'augmentation de la résistance [3, 54, 58, 59]. En effet, les sols contenant de la montmorillonite atteignent *rapidement* une résistance à la compression non confinée UCS maximale avec 4% de chaux (après 1jour de cure, $R_c^{max} = 800kPa$) (figure 2.11). Par contre les sols contenant de la kaolinite et du quartz présentent une résistance à long terme supérieure à celle des sols contenant de la montmorillonite (figure 2.12 et 2.13) [3, 54, 59]. Ceci s'explique par la structure issue du mélange chaux – sol non gonflant présentant un empilement des tubes de silicate (figure 2.91) qui sont plus rigides que l'empilement de plaques d'aluminate (figure 2.10) qui se développent dans les mélanges chaux - sols gonflants (tel que la montmorillonite) [58].



Figure 2.9 : Produit de réaction entre la kaolinite et la chaux (x 50.000) [58].

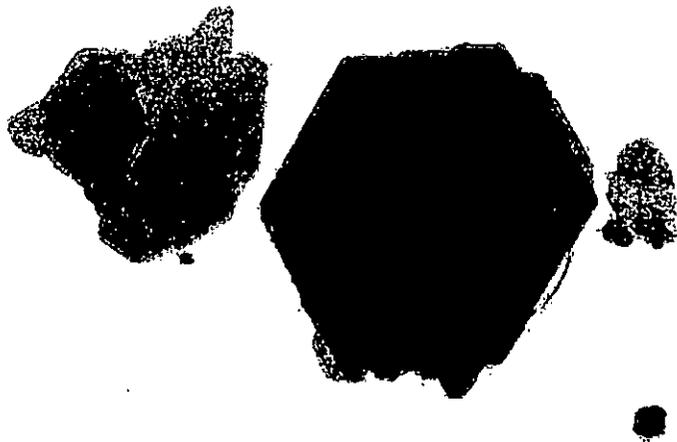


Figure 2.10 : Produit de réaction entre la montmorillonite et la chaux (x100.000) [58].

Pour le quartz, ce dernier développe une résistance à 28 jours supérieurs à celle donnée par la montmorillonite et la kaolinite, elle peut atteindre 5000 kPa pour 4% de chaux (figure 2.13) [3].

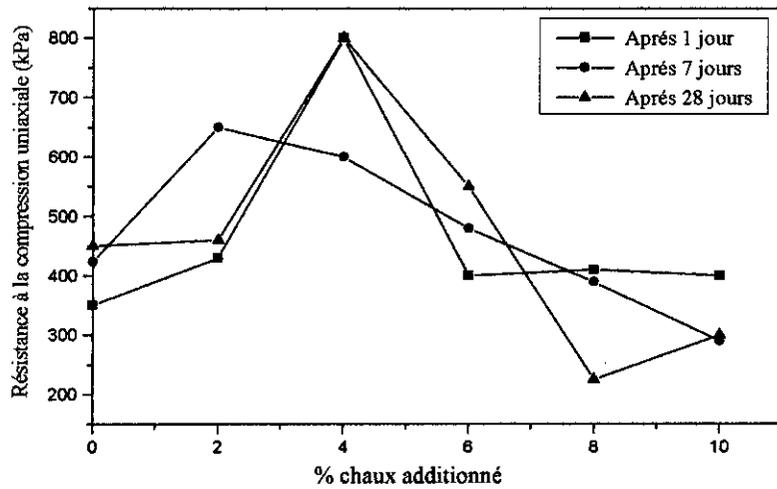


Figure 2.11 : Variation de la résistance à la compression non confinée en fonction de la quantité de chaux et du temps de cure dans un sol contenant la montmorillonite [3].

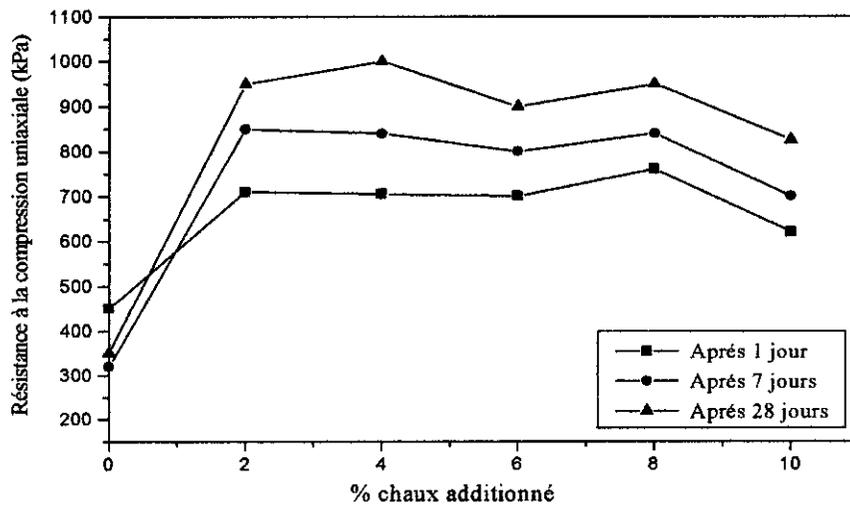


Figure 2.12 : Variation de la résistance à la compression non confinée en fonction de la quantité de chaux et du temps de cure dans un sol contenant de la kaolinite [3].

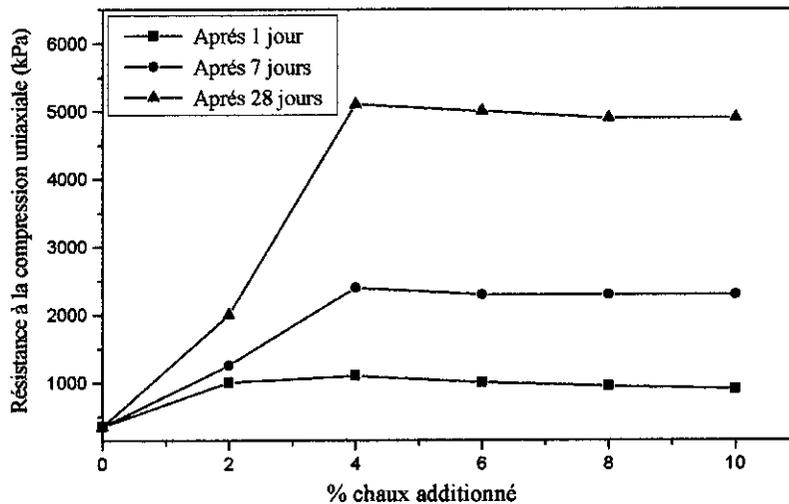


Figure 2.13 : Variation de la résistance à la compression non confinée en fonction de la quantité de chaux et du temps de cure dans un sol contenant du quartz [3].

▪ Quantité de chaux :

La résistance des sols argileux traités avec de la chaux augmente avec l'augmentation de la quantité de chaux [3, 47, 54, 55, 59, 62, 65, 69]. Cependant, au-delà d'une certaine quantité de chaux optimale, l'UCS diminue. Cette diminution est causée par la chaux elle-même car elle ne possède ni cohésion ni frottement appréciable [3, 54, 59]. La quantité de chaux optimale au-delà de laquelle la résistance diminue varie généralement de 4 % à 8% [2, 54, 59].

▪ Type de chaux :

Dans une étude faite sur différents types de minéraux argileux traités avec plusieurs types de chaux, la chaux dolomitique semi hydratée ($\text{Ca(OH)}_2 + \text{MgO}$) donne des résistances plus élevées que la chaux calcitique hydratée ($\text{Ca(OH)}_2 + \text{MgO}$) (plus que le double) et ceci pour différents type de minéraux argileux [60].

Par contre, d'autres études ont montré que la chaux dolomitique donne des résistances plus élevées que la chaux calcitique mais pour des températures de cure de 21°C, excepté pour la kaolinite qui donne les mêmes résistances quelque soit le type de chaux. A des températures de cure supérieures à 40°C la chaux calcitique est la plus efficace (figure 2.14) [59, 60].

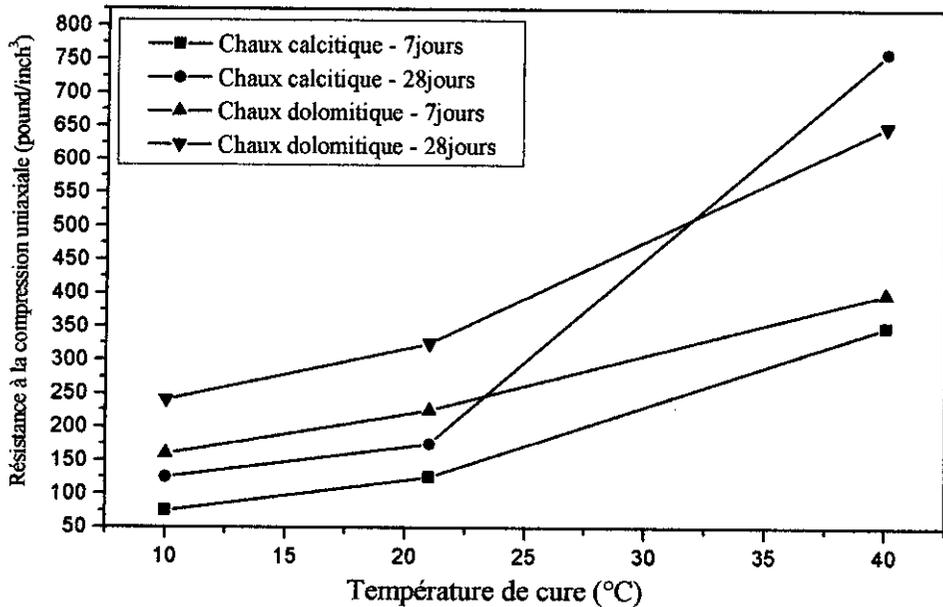


Figure 2.14 : Comparaison des résistances obtenues avec la chaux calcitique et la chaux dolomitique à différentes températures de cure [59].

▪ Teneur en eau :

Une quantité d'eau suffisante pour l'hydratation de la chaux et le développement des liens de cimentation entre les grains du sol influence la résistance [3]. Les sols compactés à des teneurs en eau supérieures à la teneur en eau optimale atteignent des résistances plus élevées que ceux compactés à des teneurs en eau inférieures. Ceci a été confirmé par plusieurs auteurs [3, 54, 59, 68]. En effet, une quantité élevée d'eau favorise la diffusion des ions de calcium Ca^{++} et permet un environnement élevé en pH autour de la majorité des grains ce qui est propice aux réactions pouzzolaniques [68].

La résistance du sol compacté à de faible teneur en eau peut être amélioré par l'ajout d'eau après la compaction [3, 54, 59, 68].

Dans une étude faite sur différents échantillons de sol argileux compactés aux teneurs en eau suivante : $W = 0.8W_{otp}$, $W = W_{otp}$ et $W = 1.2W_{otp}$, l'effet de la teneur en eau lors du compactage des sols traités à la chaux a été constaté [68]. La figure 2.15 montre la variation de la résistance à la compression en fonction du rapport de chaux / eau. En prenant les points A, B et C l'importance économique est nettement visible lorsque le compactage se fait à des $W > W_{otp}$ [68]. Effectivement, les échantillons compactés à des

$W < W_{opt}$ auront besoin de 39% de chaux en plus par rapport ceux compactés à $W = W_{opt}$ et de 53% de chaux en plus par rapport ceux compactés à $W > W_{opt}$ [68].

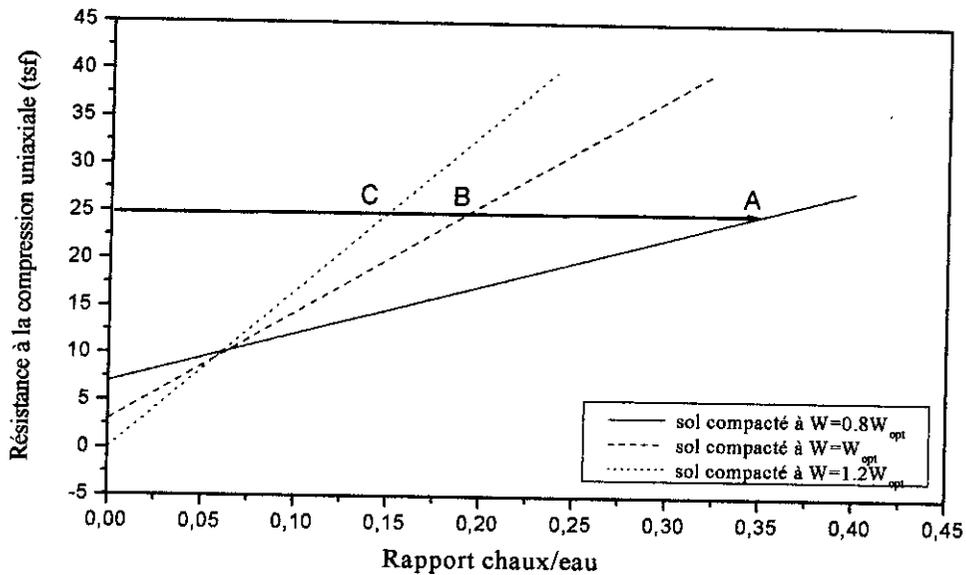


Figure 2.15 : Variation de la résistance à la compression non confinée en fonction du rapport de chaux/ eau ($1 \text{ tsf} = 95 \text{ kN/m}^2$) [68].

▪ Temps et température de cure :

La cure a une grande influence sur la résistance des sols traités, ces effets dépendent de plusieurs facteurs tels que le temps et la température [3, 54, 59].

La résistance du sol traité augmente avec l'augmentation du temps cure [3, 54, 55, 59, 60, 65, 69]. Toutefois, l'amplitude de cette augmentation varie avec la quantité de chaux additionnée (figure 2.16). Avec des faibles pourcentages de chaux, la résistance ne varie pas beaucoup avec le temps de cure, mais pour des pourcentages dépassant 5%, le UCS des sols traités augmente de plus de 80% entre la première et la vingt-huitième semaine de cure [59].

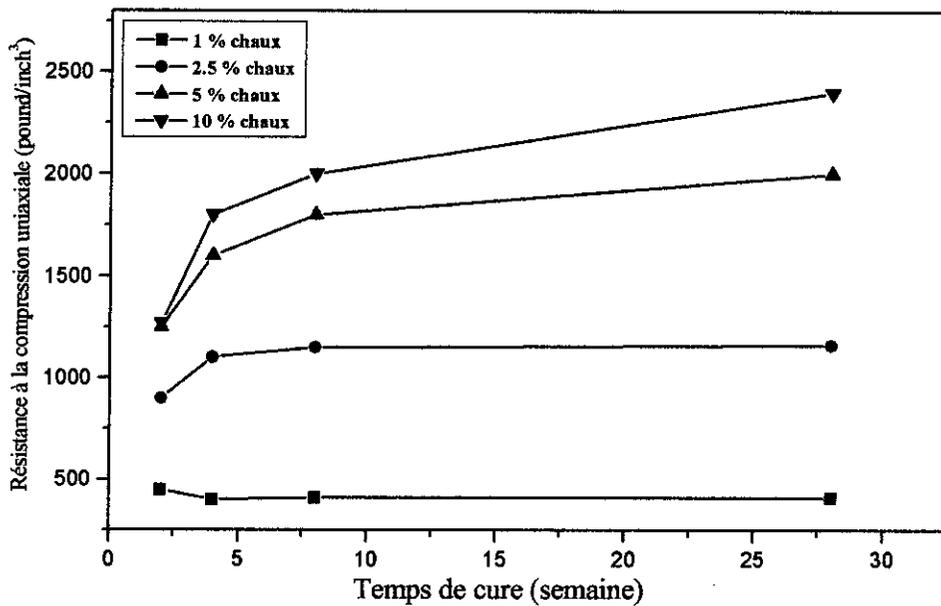


Figure 2. 16 : Effet du temps de cure sur la résistance à la compression non confinée d'un sol argileux traité avec différents quantité de chaux [59].

Une température de cure élevée augmente la résistance [3, 55, 60]. En augmentant la température de 20°C à 40° la résistance du sol peut augmenter de 100% [3, 60]. La réalisation de la stabilisation in – situ pendant l'été est recommandée [60].

2.2.4.7 Effet de la chaux sur l'indice CBR (California Bearing Ratio)

Le CBR des sols argileux est amélioré avec l'addition de chaux [3, 7, 45, 54, 59, 60]. Après l'ajout de chaux le CBR augmente immédiatement et continue son augmentation avec le temps (figure 2.17) [3, 54, 59, 60].

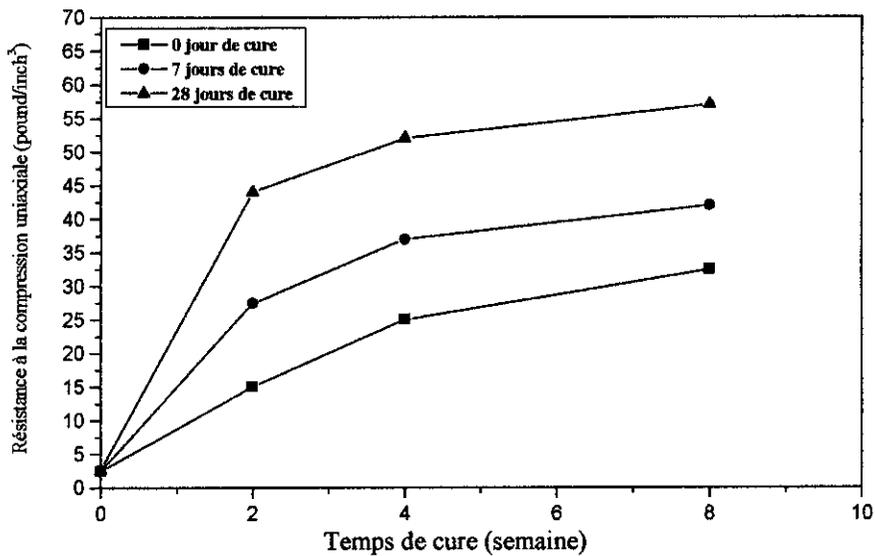


Figure 2.17 : Variation du CBR en fonction du temps et de la quantité de chaux [3].

L'augmentation du CBR des sols montmorillonitiques n'est pas très importante comparée à celle du quartz et de la kaolinite comme le montre le tableau 2.14 [59] :

Tableau 2.14 : Indice CBR de différents types de minéraux argileux traités avec une quantité de chaux optimale.

Minéral argileux	Teneur en chaux (%)	CBR
Kaolinite	0	1
	6	14
Montmorillonite	0	9
	4	18
Quartz	0	1
	6	12

Faire subir au sol traité une cure de 48 heures à une température de 50°C fait augmenter le CBR plus de 200% par rapport à celui qui n'a pas subi de cure [59].

2.2.4.8 Effet de chaux sur la compressibilité

En plus d'augmenter la résistance à la compressibilité des sols, le traitement à l'aide d'ajout de chaux permet de réduire les tassements et la déformation suite au chargement [70]. Dans une étude faite sur des argiles traitées avec différents pourcentages de chaux il a été observé des modifications dans les courbes de compressibilité des sols traités [70]. En

effet, une diminution de l'indice de recompression C_s et de l'indice de gonflement C_g est notée ainsi qu'une augmentation de l'indice de compression C_c et de la contrainte de préconsolidation (figure 2.18) [70]. La compressibilité des sols traités à la chaux est devenue plus faible, elle est liée aux processus d'hydratation et de cimentation [70].

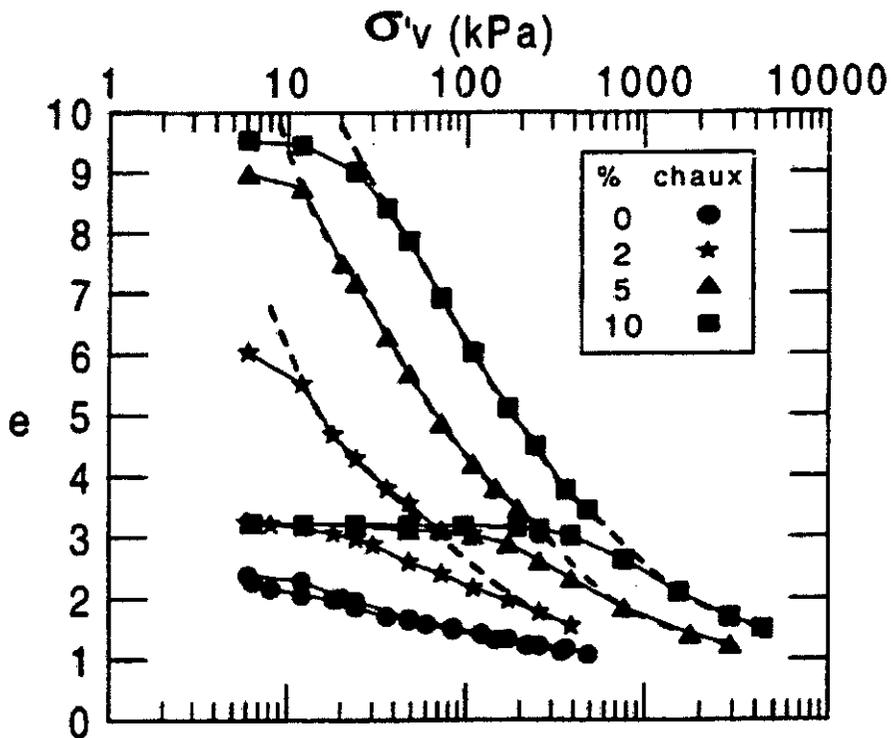


Figure 2.18 : Courbes de compressibilité d'une argile traitée avec différents pourcentages de chaux [70].

2.3 Procédures de la stabilisation

2.3.1 Stabilisation superficielle

La stabilisation superficielle des sols in situ s'effectue par les étapes suivantes :

1. Préparation du terrain ;
2. Epandage de la chaux ;
3. Malaxage initial et pulvérisation du sol ;
4. Ajout d'eau ;
5. Réarrangement et compaction légère d terrain ;
6. Période de maturation ;
7. Malaxage final et ajustement de la teneur en eau ;

8. Compaction finale et finition à la surface du terrain ;
9. Cure et protection.

2.3.1.1 Préparation du terrain

Avant la stabilisation, le terrain doit être nivelé et débarrassé de tous les galets et les roches au dessus de 125mm pour ne pas endommager les engins de stabilisation.

Il faut aussi installer des systèmes de drainages pour évacuer l'eau après la stabilisation afin d'éviter le ramollissement de la couche supérieure du sol traité [45].

2.1.1. 2 Epannage de la chaux

Le dosage de la chaux est défini pondéralement, il est rapporté au poids du sol sec et exprimé en pourcentage. Sur chantier pour les raisons d'épannage, ce dosage est rapporté au m² c'est-à-dire Kg/m². L'épannage est effectué par dépôt d'une couche de chaux à la surface du sol à traiter. Les conditions d'exécution imposent des limites à l'épaisseur de la couche de chaux. L'épannage se fait généralement par des engins rotatifs [48].



Figure 2.19 : Epannage de la chaux [46].

2.3.1. 3 Malaxage initial et pulvérisation du sol

Le malaxage s'effectue immédiatement après l'épannage pour éviter la dispersion et la carbonatation de la chaux. La couche de sol est malaxée jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène sur toute la surface à traitée [71].

Le malaxage s'exécute par bandes longitudinales successives, chaque bande recouvre la précédente sur une largeur d'au moins 10 cm [71]. La profondeur du malaxage dépend de l'engin utilisé, certains peuvent atteindre jusqu'à 500mm de profondeurs [45].

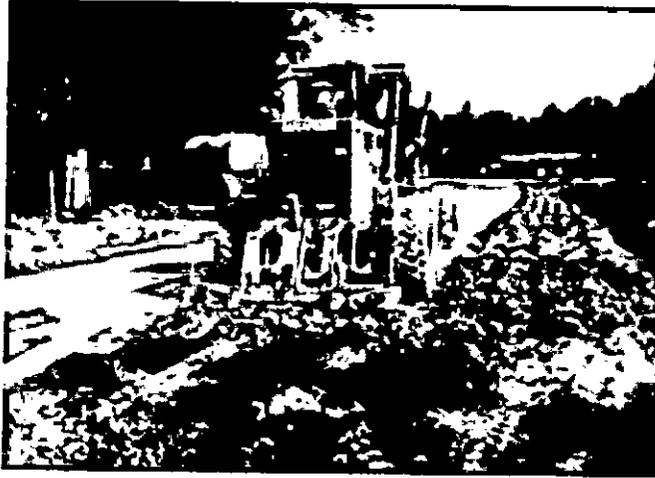


Figure 2.20 : Malaxage du sol après épandage de la chaux [46].

2.4.1.4 Ajout d'eau

Après le malaxage il faut veiller à ce que la teneur en eau du sol corresponde à l'optimum déterminé par l'étude en laboratoire ou légèrement supérieure [48].

La réaction d'hydratation de la chaux est exothermique, d'où il y a une perte d'eau par évaporation, c'est pour cela qu'on doit ajouter de l'eau après le malaxage initial afin de retrouver la teneur en eau optimale du sol (ou légèrement supérieure) pour avoir de bonnes conditions de compaction (c'est-à-dire une densité sèche maximale) [45, 48, 71].

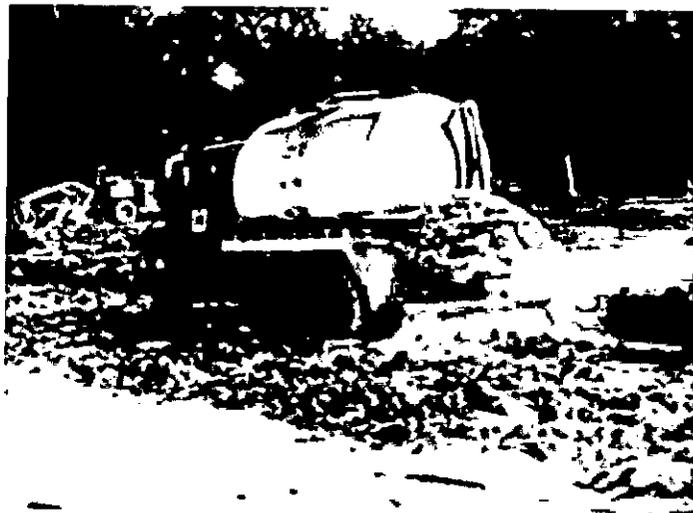


Figure 2.21 : Ajout d'eau après le malaxage du terrain [46].

2.3.1. 5 Réarrangement et compactage du sol

Après chaque passage du malaxeur le sol est réarrangé et légèrement compacté par des engins compacteurs pour assurer un traitement en profondeur [45].

Le compactage est nécessaire pour les raisons suivantes [45, 48] :

- Il permet le contact entre la chaux et le grain de sol ;
- Il minimise les pertes d'eau due à l'évaporation ;
- Il réduit les dommages en cas de pluie ;
- Il réduit les risques de carbonatation.



Figure 2.22 : Compacteur de la catégorie V5 (25 T) [46].

2.3.1. 6 Période de maturation

Une période de maturation de 24 à 72 heures est requise pour permettre que les modifications se produisent dans le sol. Cette période permet à la chaux de se propager dans le sol [45].

2.3.1.7 Malaxage final et ajustement de la teneur en eau

Après la période de maturation, un remalaxage de la couche de sol traité est nécessaire pour s'assurer que toutes les particules de chaux ont réagi avec le sol avant le compactage final [45, 46]. Un apport d'eau durant le malaxage doit être fait pour avoir ensuite des bonnes conditions de compactage, c'est à dire une teneur en eau optimale ou légèrement supérieure [45, 46].

2.3.1.8 Compactage final et finition à la surface

Une compaction finale est nécessaire pour garantir à long terme la résistance et la durabilité du sol traité [45]. Le sol est compacté à la densité exigée et il faut veiller au maintien de l'humidité [71].

Le réglage des couches stabilisées se fait par rabotage sur toute la surface et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'encroûtement des bosses [71].

2.3.1.9 Cure et protection

Une période de cure est essentielle pour le développement maximal de la résistance et la durabilité. Il est important que la stabilisation s'effectue dans des environnements où la température et le degré d'humidité sont favorables [45].

Il est préférable d'effectuer la stabilisation entre les mois de mars et septembre [45].

Pour éviter la dessiccation du sol traité, on peut adopter les mesures suivantes [45]:

- Placer la couche suivante sans retard ;
- Arroser fréquemment la surface du sol traité ;
- Protéger la couche traitée par une émulsion de bitume à raison de 1 l/m² ou un épandage de sable à raison de 3 Kg/m². La protection s'effectue au plus tard à la fin de la journée.

2.3.2 Stabilisation profonde

L'utilisation de la chaux en stabilisation profonde a été utilisée dans plusieurs pays, notamment en Suède, Japon et USA; elle peut être divisée en trois catégories: stabilisation par des colonnes de chaux, stabilisation par injection sous pression et stabilisation par colonnes de sols traités à la chaux [45]. La stabilisation profonde est utilisée pour augmenter la portance des sols sous fondations.

2.3.2.1 Stabilisation par des colonnes de chaux

La stabilisation par des colonnes de chaux comme son nom l'indique consiste à créer des forages profonds dans le sol et les remplir de chaux [45, 59]. La procédure de réalisation des colonnes de chaux est décrite dans la figure 2.23, un tube creux (de 250 mm – 1000 mm de diamètre) est introduit dans le sol à la profondeur souhaitée (entre 5 à 8 m) ensuite la chaux, avec une certaine pression, est enfoncée tout en remontant le tube. Après

chaque mètre de remplissage la fin du tube est fermée afin d'être utilisé pour compacter la chaux introduite et ainsi de suite jusqu'à atteindre la surface du sol [45, 59].

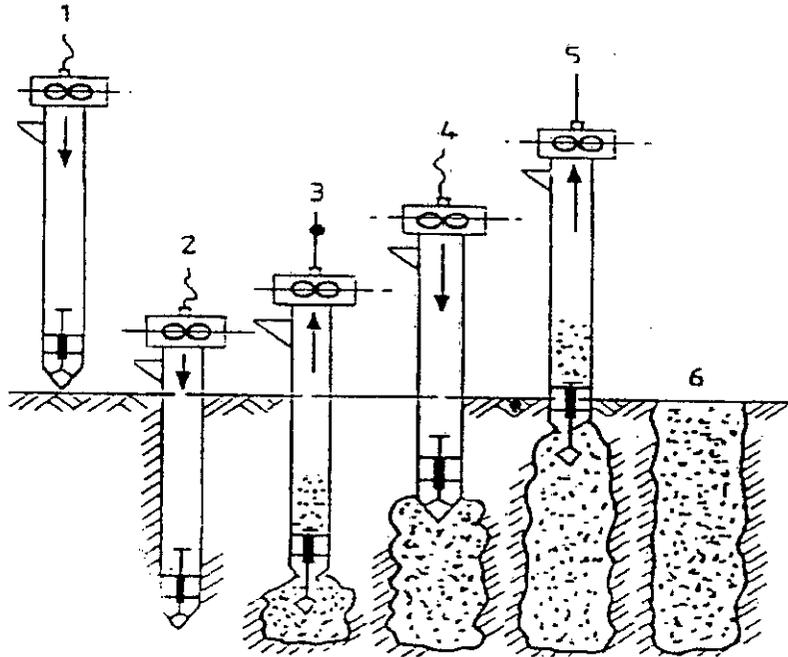


Figure 2.23 : Etapes de mise en œuvre des colonnes de chaux [45].

La stabilisation par colonne de chaux se fait par l'expansion de la colonne et la déshydratation de l'argile entourant la colonne de chaux causant une consolidation latérale du sol [45, 59].

Généralement cette méthode est utilisée pour améliorer la capacité portante et le tassement des sols de fondation ainsi que pour stabiliser les talus [45, 59]. La capacité portante d'une colonne de chaux de 0.50 m de diamètre varie de 50 à 500 kN [45, 59].

2.3.2.2 Stabilisation par injection de coulis de chaux

Cette méthode implique l'introduction d'un coulis de chaux sous pression dans le sol (figure 2.24), ainsi le coulis de chaux remplit les pores et les fissures dans le sol argileux, causant un traitement par migration des ions Ca^{++} [45, 59]. La chaux introduite entoure le sol argileux non traité ce qui prévient le mouvement de l'eau entre ces zones, ainsi augmenter la résistance au gonflement de l'argile [45, 59].

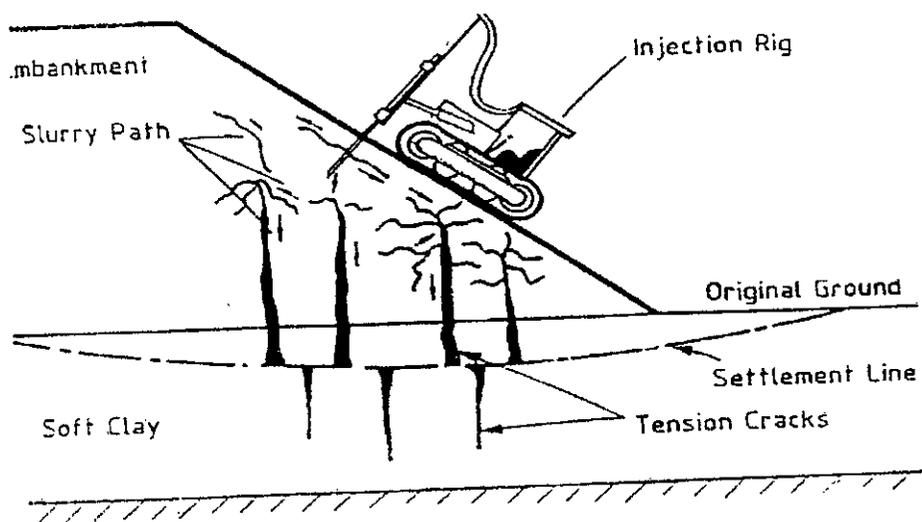


Figure 2.24: Talus stabilisé par injection de coulis de chaux [45].

Cette technique s'applique dans les cas suivants [45, 59]:

- Améliorer la portance des chaussées,
- Améliorer sol de fondation même après la construction,
- Stabiliser les remblais,
- Stabiliser les talus, mais il faut faire très attention à la pression d'injection utilisée.

L'injection se fait pour des profondeurs pouvant atteindre 15 m, les points d'injection sont distants entre eux de 2.5 m. la pression d'injection varie de 350 à 1400 kPa [45].

2.3.2.3 Stabilisations par colonnes de sols traités à la chaux

Cette technique consiste à la création en profondeur de colonne de sol traité à la chaux [45]. La colonne est construite en utilisant des *batteurs* géants (figure 2.25) qui sont introduits dans le sol pour le déstructurer et le mélanger avec la chaux introduite par des orifices [45]. La stabilisation se fait par la déshydratation de l'argile et l'augmentation de la résistance du sol due à la réaction de cimentation entre l'argile et la chaux [45].

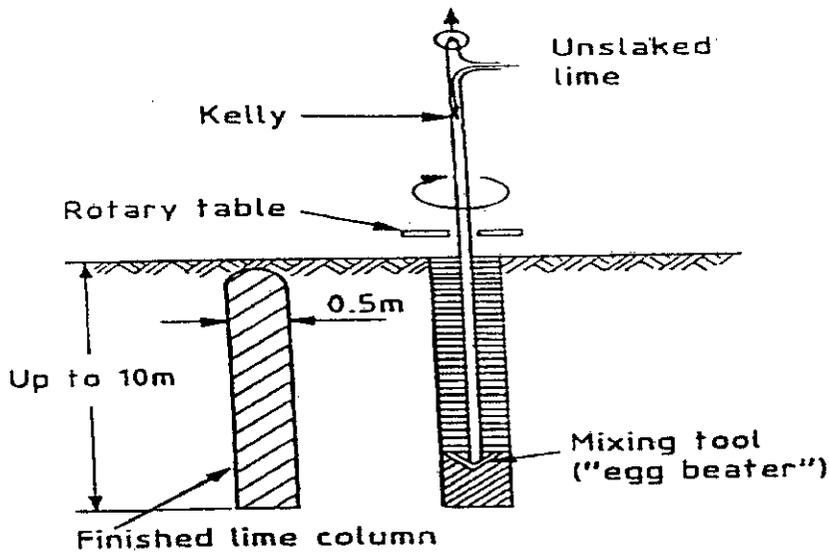


Figure 2.25: Mise en œuvre de colonne de sol traité à la chaux [45]

L'utilisation de cette méthode a pour objectif d'augmenter la capacité portante, la résistance au cisaillement et la perméabilité des terrains traités. Elle est utilisée aussi pour la stabilisation des talus [45, 59]. Dans une étude faite, il a été démontré qu'une colonne de sol traité à la chaux contribue au drainage du sol et une colonne de sol traité à la chaux de 500 mm de diamètre équivaut à trois colonnes de sable de 150 mm [59].

2.4 Stabilisation des sols par ajout de ciment:

Le mécanisme de la stabilisation des sols argileux par ajouts de ciment est similaire à celui de la stabilisation par ajout de chaux, sauf qu'avec le ciment le matériau pouzzolanique est présent dans le ciment. De plus, la chaux libérée par l'hydratation du ciment réagit avec les minéraux argileux. Toutefois, le ciment pénètre difficilement les sols argileux dus à la finesse des particules argileuses, c'est ainsi que la stabilisation par ajout de ciment est plus pratique dans les sols grenus, d'une part parce que le ciment ne se mélange pas facilement avec les sols fins et d'autre part il n'est pas économique [5, 47].

2.4.1 Le ciment:

Le ciment Portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse [72].

Les principaux composants anhydres du clinker sont [72]:

- Le silicate tricalcique: $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C3S),
- Le silicate bicalcique: $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C2S),
- L' aluminat tricalcique: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2 \text{O}_3$ (C3A),
- L' alumino – ferrique tétracalcique: $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2 \text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2 \text{O}_3$ (C4AF)

D'autres constituants sont ajoutés au clinker, tel que [72]:

- Laitier granulé de haut fourneau (S),
- Pouzzolane naturelle (Z),
- Cendres volantes (V ou W),
- Schistes calcinés (T),
- Calcaires (L),
- Fumées de silice (D).

a. Principales catégories de ciment

Les ciments peuvent être classés en cinq catégories [72] :

- CEM I: ciment portland;
- CEM II: ciment portland composé;
- CEM III: ciment de haut fourneau;
- CEM IV: ciment pouzzolanique;
- CEM V: ciment composé.

Et selon leur résistance, trois classes de ciment sont définies en fonction de leur résistance à la compression à 28 jours d'après le tableau 2.15 [72]:

Tableau 2.15 : Exigences mécaniques d'un ciment [72].

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2jours	7jours	28 jours	
32.5 N	-	≥ 16	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5 R	≥ 10	-		
42.5 N	≥ 10	-	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5 R	≥ 20	-		
52.5 N	≥ 20	-	≥ 52.5	-
52.5 R	≥ 30	-		

Avec: N: résistance à court terme ordinaire.

R: résistance à court terme élevée.

2.4.2 Mécanisme de stabilisation:

Le mécanisme de stabilisation des sols par ajout de ciment est différent selon le type de sol. Les sols non cohérents ont des particules plus grandes que les grains de ciment ce qui facilite le malaxage du ciment avec les particules du sol. Après l'hydratation du ciment et durcissement des gels de cimentation, les particules du sol sont liées entre elles, augmentant ainsi la résistance du sol [47].

Dans les sols fins le mécanisme de stabilisation est différent car non seulement l'hydratation du ciment provoque des liens entre les particules mais aussi les particules argileuses réagissent avec le ciment (réaction pouzzolanique) conduisant à des modifications chimiques du sol [5, 47].

Quand le sol argileux est additionné de ciment et en présence d'eau, des réactions d'hydratations se produisent rapidement: les premiers produits de cimentation sont [5]:

- Silicate de calcium hydraté $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (CSH),
- Aluminate de calcium hydraté $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (CAH).

Il y a aussi formation de chaux hydratée [71].

Ces produits de cimentations lient les grains du sol non traité entre eux [5]. En plus, l'hydratation du ciment fait augmenter le PH du sol à 13 provoquant une dissolution de la silice et de l'alumine du sol argileux. Ces derniers vont réagir avec la chaux libérée lors de la réaction d'hydratation du ciment pour former des produits de cimentation secondaire; cette seconde réaction est appelée réaction pouzzolanique [5].

L'hydratation du ciment et les réactions pouzzolaniques conduisent à des modifications du sol argileux et à une augmentation de sa résistance [5].

2.4.3 Effets de l'ajout de ciment aux propriétés géotechniques du sol argileux

2.4.3.1 Effet du ciment sur les limites d'Atterberg

L'ajout de ciment au sol argileux provoque des modifications des limites d'Atterberg. En effet, l'ajout de ciment aux sols argileux cause une diminution de l'indice de plasticité et ceci par une augmentation de la limite de plasticité et diminution de la limite de liquidité comme le montre la figure 2.26 [60].

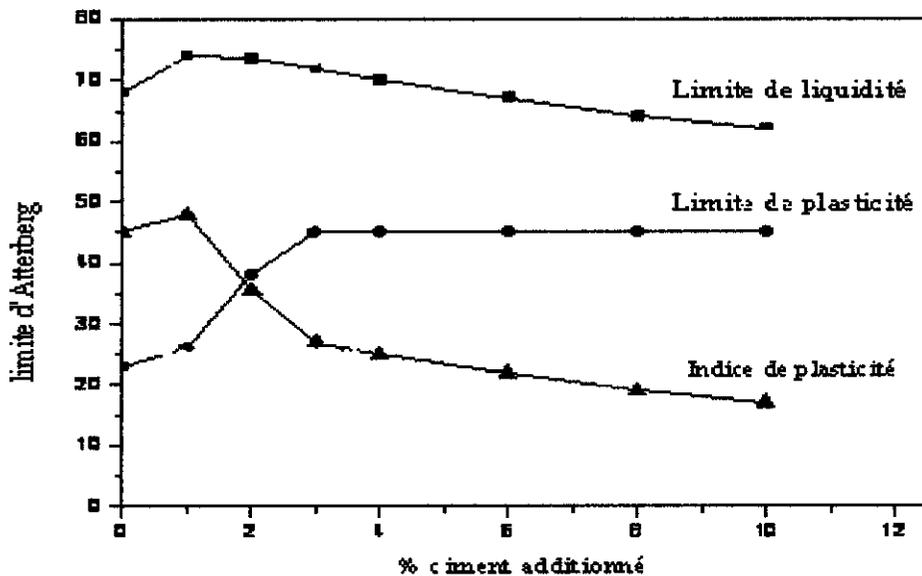


Figure 2.26: Effet de l'ajout de ciment sur les limites d'Atterberg d'un sol argileux [60].

2.4.3.2 Effet du ciment sur la limite de retrait:

Le retrait des sols argileux traités avec du ciment est réduit et ceci est traduit par l'augmentation de la limite de retrait W_s en fonction de la quantité de ciment additionné (tableau 2.16) [60, 65].

Tableau 2.16: Variation de la limite de retrait en fonction du % de ciment ajouté.

% ciment ajouté	Limite de retrait (%)
0	7.7
2	15.3
8	37.4

2.4.3.3 Effet du ciment sur les caractéristiques Proctor:

L'addition de ciment aux sols argileux cause une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la masse volumique sèche [47, 73, 74, 75]. Ce changement s'explique par l'augmentation de l'affinité du ciment à l'eau et à la floculation des particules [75].

2.4.3.4 Effet du ciment sur l'indice CBR:

Dans une étude faite sur une argile limoneuse, l'addition de ciment a fait augmenter l'indice CBR d'une manière linéaire. Cette augmentation peut atteindre plus de 100 % pour 3% de ciment ajouté [74].

Le taux de gonflement après imbibation avant l'essai CBR diminue après l'addition de ciment. En effet l'ajout de 3 % de ciment réduit un taux de gonflement de 5% à 0.09% [74].

2.4.3.5 Effet du ciment sur la résistance à la compression uniaxiale:

L'ajout de ciment au sol argileux augmente sa résistance [47, 69, 73]. La résistance à la compression uniaxiale du sol traité augmente linéairement avec le pourcentage de ciment additionné [47, 69, 73]. Elle dépend du temps et de la température de la cure; la résistance du sol traité continue de se développer avec le temps et plus la température est élevée plus les réactions sol – ciment sont accélérées. Néanmoins, le temps et la température ne sont pas les seuls facteurs pour le développement de la résistance, il faut que le sol traité soit à une teneur en eau optimale et il faut la contrôler tout le long du traitement et l'ajuster si nécessaire [47, 69, 73].

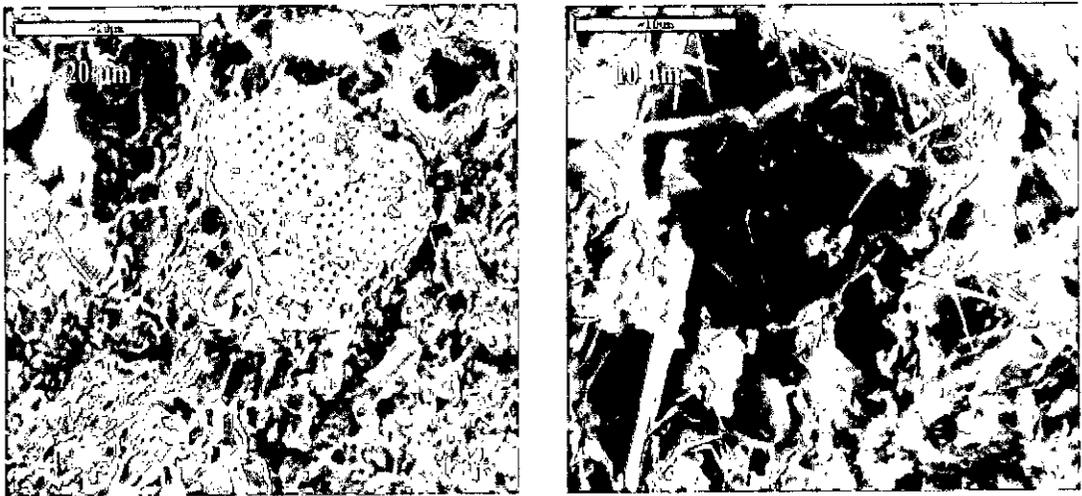
Dans les essais de compression uniaxiale il faut que les éprouvettes d'essais subissent une imbibation avant de réaliser l'écrasement pour simuler le cas le plus défavorable et ceci réduit la résistance à la compression uniaxiale [69]. La réduction de la résistance du

sol traité après imbibation dépend de la granulométrie et de la quantité et type des minéraux argileux [69]. Dans une étude faite sur des argiles contenant différents types de minéraux argileux, la plus grande perte de résistance de ces sols après imbibation est observée dans ceux possédant une grande capacité à adsorber de l'eau (sol gonflant) [69]. La présence de CaCO_3 (plus de 20%) augmente la résistance à l'eau des mélanges sol - ciment [69].

La résistance à la compression uniaxiale des sols traités avec le ciment dépend aussi du type du minéral argileux, car pour un même pourcentage de ciment la résistance développée dans les sols kaolinitiques est plus grande que dans les sols illitiques; les sols montmorillonitiques donnent des résistances relativement faibles [58].

2.4.3.6 Effet du ciment sur la compressibilité

L'ajout de ciment au sol fin entraîne des modifications dans les paramètres de compressibilités [76]. Les résultats d'une étude faite sur des argiles traités avec 10 % de ciment montrent une réduction de l'indice de recompression et de l'indice de gonflement ainsi qu'une augmentation de l'indice de compression et de la contrainte de préconsolidation après le traitement [76]. Une analyse par diffractométrie aux rayons X du sol avant et après le traitement a indiqué la présence de C-S-H, C-A-S-H, l'ettringite et la portlandite qui se sont développés dans le sol traité (figure 2.27) [76]. La nouvelle microstructure qui s'est développée a réduit la compressibilité [76].



a) avant traitement.

b) traité et après 7 jours de cure.

Figure 2.27 : Micrographies MEB de la microstructure du sédiment avant et après traitement au ciment [76]

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre l'effet positif du traitement des sols argileux avec de la chaux ou du ciment est bien observé. Leurs utilisations ont été observées dans beaucoup de domaines que ce soit la stabilisation des sols en surface (chaussées, aérodromes) ou en profondeur pour améliorer la portance des sols de fondations et stabiliser les zones de glissement. La chaux est utilisée principalement pour l'amélioration des sols fins possédant un indice de plasticité supérieur à 10 % et le ciment est mieux adapté pour les sols grenus.

La chaux réagit avec le sol argileux par plusieurs mécanismes : dessiccation, échange cationiques, floculation et carbonatation induisant des modifications dans le sol ; les réactions pouzzolaniques conduisent à la cimentation et la stabilisation du sol.

Les réactions induisant la cimentation du sol après le traitement à la chaux sont presque similaires à celles produites lors du traitement par ajout de ciment

▪ Approche :

Etant données les instabilités qui surviennent dans les terrains marneux dus à leurs variations volumiques et leurs pertes de résistances et suite à l'étude bibliographique qui stipule que les sols argileux peuvent être stabilisés à la chaux et au ciment, la seconde partie de cette étude sera consacrée à la possibilité de stabiliser et traiter les sols marneux par ajout principalement de chaux et de ciment.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE ET PROCEDURE D'ESSAIS

3.1 Introduction

Le présent chapitre décrit les matériaux utilisés pour la réalisation des essais de laboratoires, le mode opératoire pour la préparation des échantillons et les procédures des essais réalisés ainsi que les instruments utilisés.

3.2 Matériaux

3.2.1 Le sol

Les sols utilisés dans la présente étude sont des marnes altérées provenant de trois sites différents (Figure 3.1) : Cheraga, El Harrach et Tipaza. Elles ont toutes été échantillonnées à moins de 10 mètres de profondeurs. Le tableau suivant résume les caractéristiques géologiques de ces trois marnes:

Tableau 3.1 : Caractéristiques géologiques des marnes utilisées.

Sites	Cheraga	El Harrach	Tipaza
Age géologique	tertiaire	quaternaire	secondaire
Couleur	verdâtre	verdâtre	jaunâtre

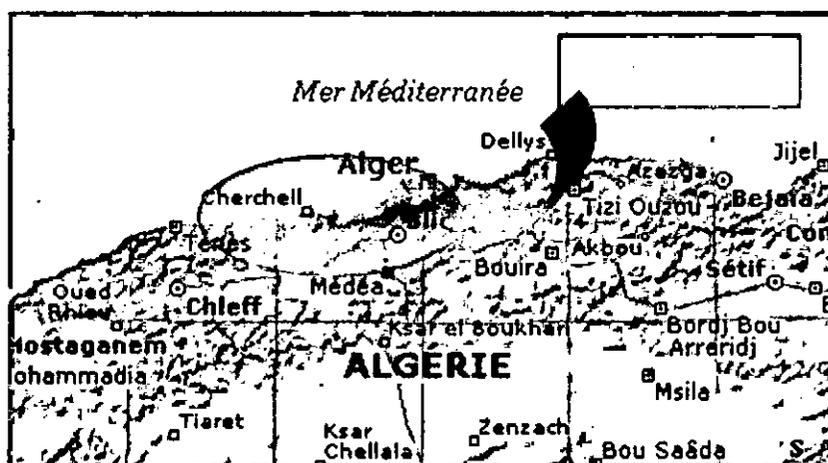


Figure 3.1: Localisation des sites d'étude.

3.2.2 Les ajouts

▪ Chaux

La chaux utilisée pour la préparation des échantillons d'essais dans toute cette étude est de la chaux hydratée procurée dans le commerce.

▪ Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment portland composé, de classe de résistance 32.5 provenant de la cimenterie de Meftah.

3.3 Préparation des échantillons d'essais

3.3.1 Essais physico- chimiques

3.3.1.1 Réaction à l'acide chlorhydrique

La réaction du sol à l'acide chlorhydrique (HCl) donne une estimation de la teneur en carbonate de calcium. Pour cet effet trois échantillons d'essais sont prélevés et séchés.

3.3.1.2 Analyse granulométrique

Les échantillons d'essai sont préparés selon la norme britannique BS 1377. Ils sont obtenus par quartage du matériau naturel. Cette prise d'essai (200g) est imbibée pendant 24 heures pour faciliter en suite le passage au tamis de 80 μm de diamètre. Le refus et le

tamisat sont récupérés et séchés. Le refus est utilisé dans l'analyse granulométrique par tamisage et le tamisat est utilisé pour l'analyse par sédimentométrie.

L'analyse sédimentométrique nécessite un ajout de 100 ml d'un défloculant préalablement préparé avec 4g d'héxamétaphosphate de sodium dans 100 ml d'eau à la prise d'essai. La solution du sol est laissée pendant 15 heures au repos.

Juste avant la réalisation de l'essai, une homogénéisation de la solution est effectuée à l'aide d'un agitateur mécanique. L'agitation se fait à une vitesse de 10000 tours/minute pendant 3 minutes.

3.3.1.3 Teneur en matière organique

La préparation des échantillons d'essais pour la détermination de la teneur en matière organique s'est faite selon les étapes suivantes :

- sécher la totalité du matériau à l'étuve réglée à 105 °C.
- tamiser au tamis de 2 mm ;
- peser les passants au tamis de 2 mm. La masse du tamisat doit être supérieure ou égale à 200 g ;
- broyer les éléments passant au tamis de 2 mm ;
- prélever au moins trois prises d'essai, d'environ 50 g chacune.

3.3.1.4 Teneur en carbonate de calcium

Pour la détermination de la teneur en carbonate de calcium par la méthode dite perte au feu, les étapes de la préparation des prises d'essais sont comme suit :

- L'échantillon est séché puis divisé par la méthode des quarts de façon à avoir un échantillon réduit à environ 50g ;
- Cet échantillon réduit est alors broyé manuellement ou mécaniquement jusqu'à ce qu'il passe entièrement au tamis de 0,125 mm.
- Après homogénéisation, l'échantillon est porté à l'étuve à (110 ± 5) °C jusqu'à une masse constante.
- La prise d'essai est constituée d'une masse de matière sèche de $(7,5 \pm 2,5)$ g prélevée dans l'échantillon réduit. Elle est ensuite mise dans un four à moufle (figure 3.2) à une température de 550°C pendant quatre heures.

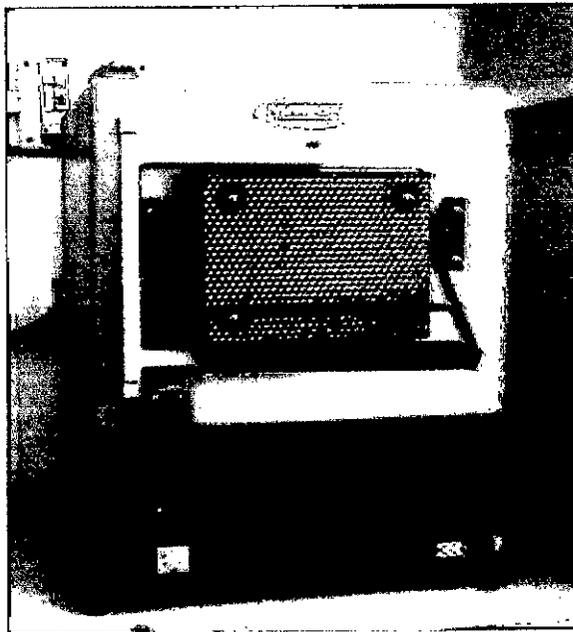


Figure 3.2 : Four à moufle.

3.3.1.5 Limites d'Atterberg

Après échantillonnage et homogénéisation, une masse (m) du sol est imbibée dans un récipient d'eau pendant 24 heures.

Une fois imbibé le sol et tamisé par voie humide au tamis de $400\mu\text{m}$. l'eau de lavage et le tamisat sont recueillis dans un bac. Après une décantation de 12 heures. L'échantillon est séché à 105°C pendant 24 heures.

Pour la préparation des échantillons de marnes traitées les mêmes procédures ont été suivies avec un sol non traité ; après le séchage de l'échantillon d'essai la chaux ou le ciment est ajouté à différents pourcentages.

3.3.2 Essai de compression la l'oedomètre

L'essai oedométrique est réalisé sur des échantillons de sol non traité intact. L'éprouvette de sol est carottée au moyen de la bague oedométrique où l'intérieur a été préalablement enduit d'une graisse. Elle est ensuite arasée sur les deux faces parallèles de la bague.

Les éprouvettes de sol traité à la chaux ou au ciment ont été confectionnées en suivant les étapes suivantes :

- Sécher le matériau naturel à 105°C ;
- Homogénéisation du matériau sec et ajout de chaux ou de ciment ;
- Ajout d'eau (quantité optimale) et compactage du sol par couches dans un moule Proctor ;
- Carottage de l'éprouvette d'essai au moyen de la bague oedométrique.

Pour l'essai oedométrique du sol traité trois types d'éprouvettes d'essais ont été confectionnées, la première contient l'échantillon traité avec 4 % de chaux, la seconde contient l'échantillon traité avec 4% de ciment et la troisième contient l'échantillon traité avec 4 % de chaux avec une cure de 7 jours à 40°C.

3.3.3 Essais mécaniques

3.3.3.1 Essai Proctor

Pour un seul essai Proctor au moins de 12 Kg de matériau passant au tamis 5 mm sont nécessaires. Le matériau est séché à 105°C puis homogénéisé. Ensuite des masses de 2 Kg sont prélevées et humidifiées à des teneurs en eau croissantes. Un malaxeur mécanique a été utilisé pour mélanger le sol sec avec de l'eau (figure 3.3).



Figure 3.3 : malaxeur mécanique.

A partir de chaque part , des éprouvettes ont été confectionnées pour la détermination des points de la courbe Proctor.

Pour la confection des échantillons de sol traités, la chaux ou le ciment est ajouté après le séchage du matériau passant au tamis de 5 mm. Après un malaxage à sec du sol avec de la chaux ou du ciment, les mêmes étapes de préparation des échantillons de sol non traités ont été suivies.

Les échantillons d'essais traités ne subissent aucune cure. L'essai Proctor est réalisé immédiatement après le malaxage.

3.3.3.2 Essai CBR

Pour réaliser cet essai, 5 Kg du matériau naturel séché passant au tamis de 5 mm sont nécessaires. L'échantillon d'essai est mélangé avec une quantité d'eau optimale, déterminée préalablement par l'essai Proctor.

La détermination de l'indice CBR des échantillons traités à la chaux ou au ciment s'est faite en suivant plusieurs étapes :

- Sécher le matériau naturel à 105°C ;
- Homogénéisation du matériau sec et ajout de chaux ou de ciment à différentes quantités;
- Addition d'eau (quantité optimale déterminé au préalable) au matériau traité;

3.3.3.3 Essai de compression uniaxiale

Pour la présente étude, cet essai a été réalisé sur des éprouvettes de 38 mm de diamètre avec un élancement de 1.9 à 2.2. Les éprouvettes intactes ont été prélevées sur des carottes de marnes et les éprouvettes traitées ont été confectionnées suivant les étapes suivantes :

- Détermination de la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale pour la quantité de chaux ou de ciment rajoutée;
- Compacter dans un moule Proctor le sol traité à la teneur en eau optimale ;
- Prélever à l'aide de carotte normalisée (figure 3.4) les éprouvettes d'essais à partir du matériau traité et compacter ;
- Faire subir une cure aux éprouvettes d'essais soit de 7 ou 28 jours à une température de 20°C ou 40°C selon le programme d'essai présenté dans la figure 5.3.
- Imbiber les éprouvettes d'essais pour simuler les situations réelles sur le terrain.



Figure 3.4 : Carottes métalliques pour le prélèvement des éprouvettes de l'essai de compression uniaxiale.

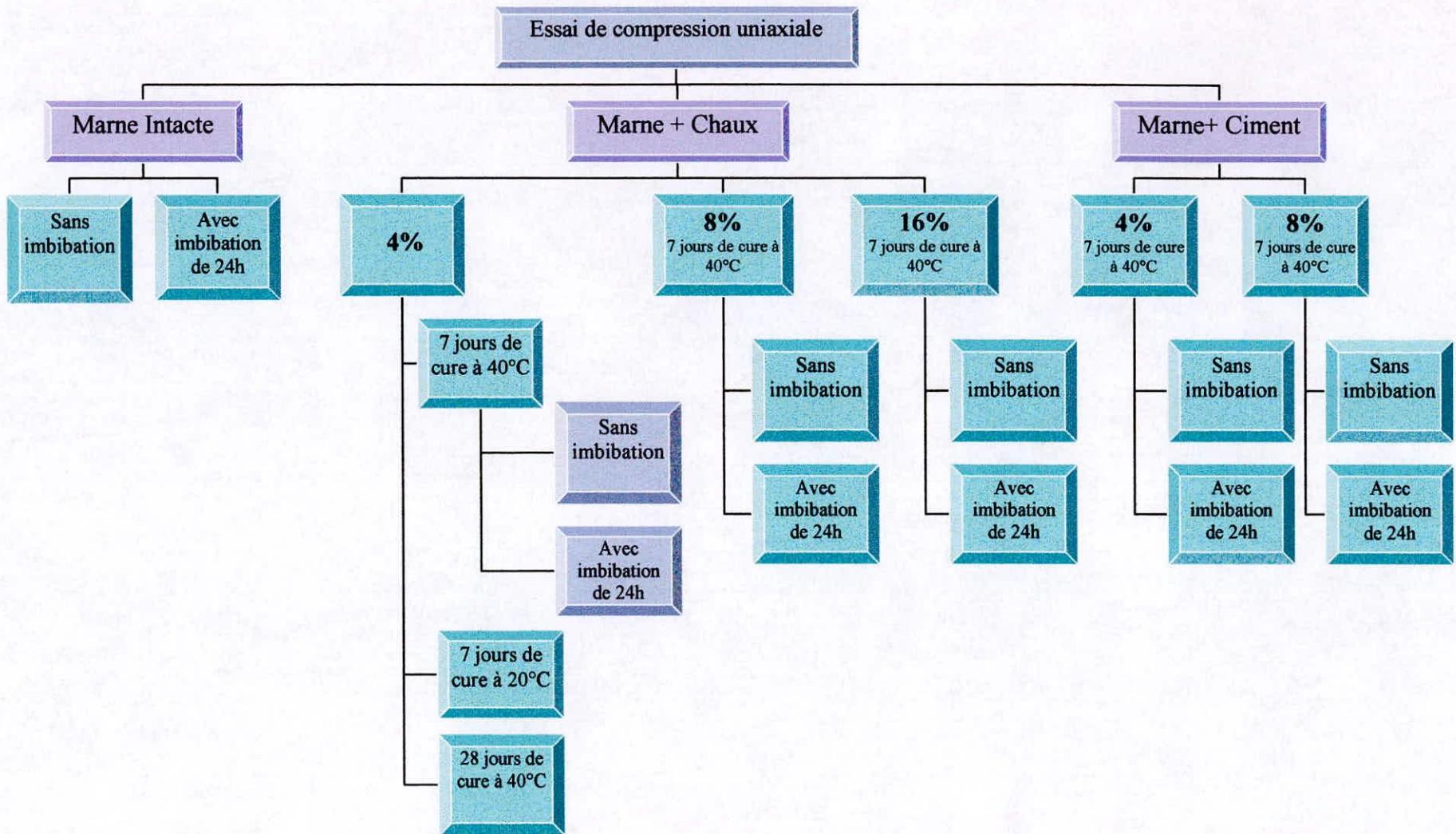


Figure 3.5 : Programme d'essai de compression uniaxiale.

3.4 Procédures des essais

3.4.1 Essais physico-chimiques

3.4.1.1 Réaction à l'HCl

Les marnes sont des sols argileux contenant un certain pourcentage de CaCO_3 . Les marnes peuvent se différencier des argiles par plusieurs méthodes et parmi ces méthodes existe celle de la réaction à l'acide chlorhydrique d'après la norme Française XP P 94-011.

La réaction du sol en présence d'acide chlorhydrique dilué se traduit par une effervescence qui permet d'indiquer déjà s'il s'agit de sol marneux, de sol calcaire ou non [77]:

- a) Pour une effervescence très vive et prolongée, où les bulles de gaz forment une écume abondante, indiquant que le matériau a une teneur en carbonate supérieure à 25 % ;
- b) Pour une effervescence vive mais non soutenue, où les bulles de gaz forment une couche peu épaisse mais plus ou moins continue, ceci correspond à un matériau faiblement marneux, pour lequel la teneur en carbonate est comprise entre 10 % et 30 % ;
- c) Pour une effervescence visible mais modérée, où les bulles de gaz sont assez nombreuses indiquant une teneur en carbonate comprise généralement entre 2 % et 10 % ;
- d) Pour une effervescence perceptible et quelques bulles de gaz seulement perceptible après quelques secondes: la teneur en carbonates est faible (en général < 2 %) ;
- e) aucune effervescence visible ou audible : le matériau ne contient pas d'éléments carbonatés.

3.4.1.2 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution en poids des grains du sol selon leurs dimensions. Dans la présente étude elle a été réalisée selon la norme Anglaise BS 1377.

Cet essai comporte deux parties:

- Tamisage des éléments de diamètre supérieur à 80 μm ,
- Analyse par sédimentation des éléments de diamètre inférieur à 80 μm ,

L'analyse granulométrique par tamisage consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis. Le matériau est versé au sommet de la colonne de tamis d'ouverture de maille croissante de bas en haut. La colonne de tamis est agitée par voie mécanique pendant 15 minutes (figure 3.6).



Figure 3.6: Série de tamis placée dans un vibreur mécanique

L'analyse granulométrique par sédimentométrie est basée sur la loi de Stokes, qui utilise le fait que dans un milieu liquide au repos la vitesse de décantation des grains fins est fonction de leurs dimensions.

Pour réaliser cet essai, la solution du sol (prise d'essai + défloculant) est introduite dans une éprouvette graduée de 1000 ml de capacité et complétée avec de l'eau distillée jusqu'à 1000 ml. L'éprouvette est agitée pendant 2 minutes avant le début de l'essai. Un densimètre est introduit dans la solution. L'éprouvette est ensuite installée dans un bac thermostatique remplis d'eau maintenue à une température constante.

Au moyen du densimètre nous mesurons en fonction du temps la masse volumique de la solution (figure 3.7). Ensuite, à partir de la masse volumique de la solution, la distribution pondérale des particules est déterminée en fonction de leurs diamètres.



Figure 3.7: Un bac thermostatique contenant une éprouvette d'essai et un agitateur mécanique.

3.4.1.3 Teneur en matière organique

La teneur en matière organique est déterminée selon la norme française XP P 94-047 par la méthode de calcination.

L'essai consiste à déterminer la perte de masse d'un échantillon préalablement séché (à 105°C), après calcination dans un four à une température de 550 °C.

La teneur en matière organique est calculée par le rapport de la masse de matière organique contenue dans un échantillon, détruite par calcination, sur la masse sèche des particules solides avant calcination de la fraction du matériau passant au tamis de 2 mm.

3.4.1.4 Teneur en carbonate de calcium

La teneur en carbonate de calcium du matériau a été déterminée selon le CME. L'essai consiste à déterminer la perte de masse d'un échantillon de sol sec (sécher à 550°C) soumis à une température de 1050°C. Le matériau est soumis à une perte au feu, le carbonate se décompose et le CO₂ se dégage constituant la masse perdue lors de la calcination.

La teneur en CaCO₃ est donnée par l'expression suivante [78]:

$$X = \frac{Z_1(P_1 - P_2)}{Z_2 P_2} \cdot 100(\%)$$

Où :

Z_1 : masse moléculaire du CaCO_3 (100.1)

Z_2 : masse moléculaire du CO_2 (44)

P_1 : masse de la prise d'essai avant calcination.

P_2 : masse de la prise d'essai après calcination.

X: teneur en carbonate de calcium.

3.4.1.5 Limite d'Atterberg

La détermination des limites d'Atterberg permet de séparer les trois états physiques du sol fin : solide, plastique et liquide. La limite de liquidité W_L sépare l'état liquide et l'état plastique, la limite de plasticité W_P sépare l'état plastique et l'état solide et la limite de retrait W_S sépare l'état solide avec et sans retrait.

La limite de liquidité est mesurée avec l'essai du pénétromètre à cône selon la norme Française NF P 94-052-1. L'essai consiste à lâcher un cône en chute libre sur un échantillon de sol placé dans un gobelet pendant 5 secondes (figure 3.8). L'essai est réalisé pour différentes teneurs en eau. La limite de liquidité est la teneur en eau du sol qui correspond conventionnellement à un enfoncement du cône de 17 mm.

La limite de plasticité est déterminée par l'essai au rouleau selon la norme Française NF P 94-051. L'essai consiste à confectionner avec le matériau un boudin qu'on fait amincir jusqu'à un diamètre de 3 mm. La limite de plasticité est la teneur en eau obtenue lorsque le rouleau se fissure en atteignant un diamètre de 3 mm.

La limite de retrait est déterminée par l'essai de dessiccation selon la norme Française XP P 94-060-1. L'essai a pour principe la détermination de la masse et le volume d'une prise d'essai, avant et après dessiccation par étuvage. Le volume final de la prise d'essai est déterminé par immersion dans le mercure (figure 3.9).

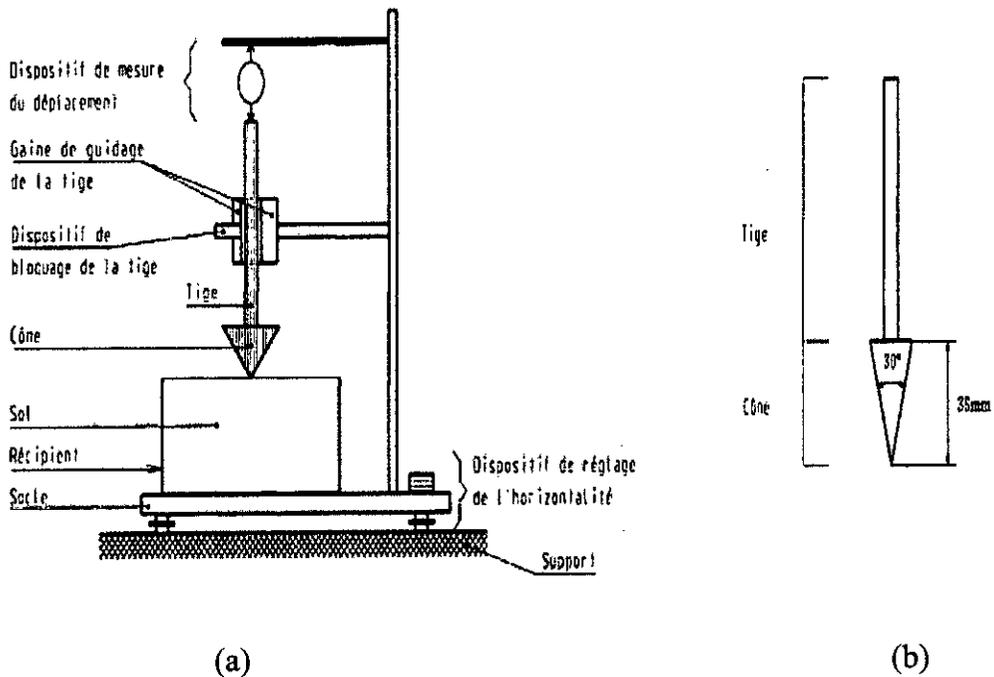


Figure 3.8: (a) Schéma de l'appareillage; (b) le cône et sa tige.

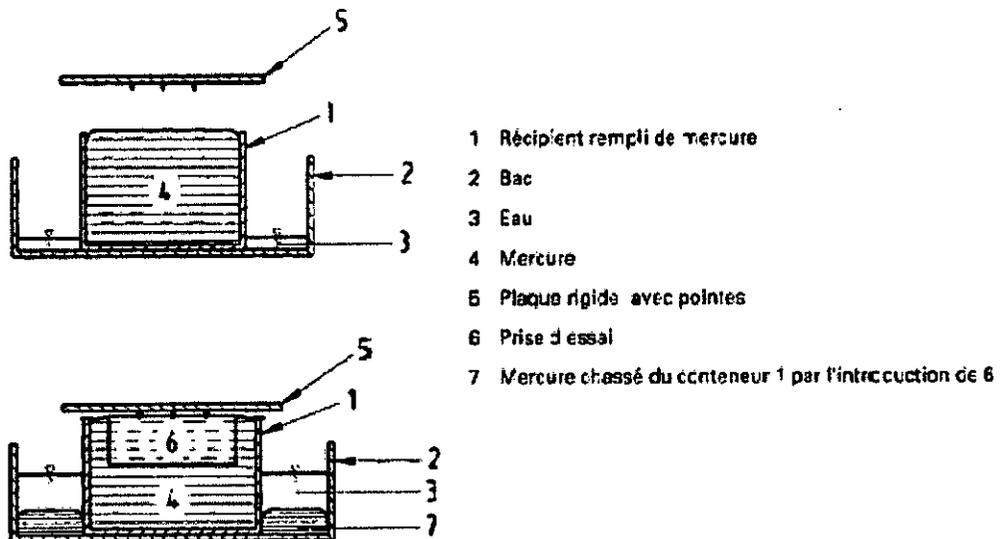


Figure 3.9: Détermination du volume de la prise d'essai.

Pour la détermination des limites de liquidité, de plasticité et de retrait des sols traités, les mêmes procédures ont été suivies avec des sols non traités.

3.4.2 Essai oedométrique par palliers

Cet essai est réalisé selon les procédures décrites dans la norme Française XP P94-090-1.

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol intact ou traité placée dans une enceinte cylindrique rigide (oedomètre). Un dispositif applique sur cette éprouvette un effort vertical, l'éprouvette étant drainée en haut et en bas et maintenue saturée pendant l'essai (figure 3.10).

La charge est appliquée par palliers maintenus constants successivement croissants lors du chargement et décroissants lors du déchargement. Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées après 24 heures pour chaque pallier de chargement ou déchargement.

L'essai oedométrique permet de déterminer les paramètres suivants :

- L'indice de compression C_c qui caractérise la compressibilité du sol ;
- L'indice de gonflement C_g qui caractérise le gonflement du sol ;
- Le coefficient de consolidation C_v qui permet de déterminer les temps de consolidation sous une charge donnée
- La contrainte de préconsolidation σ_c .

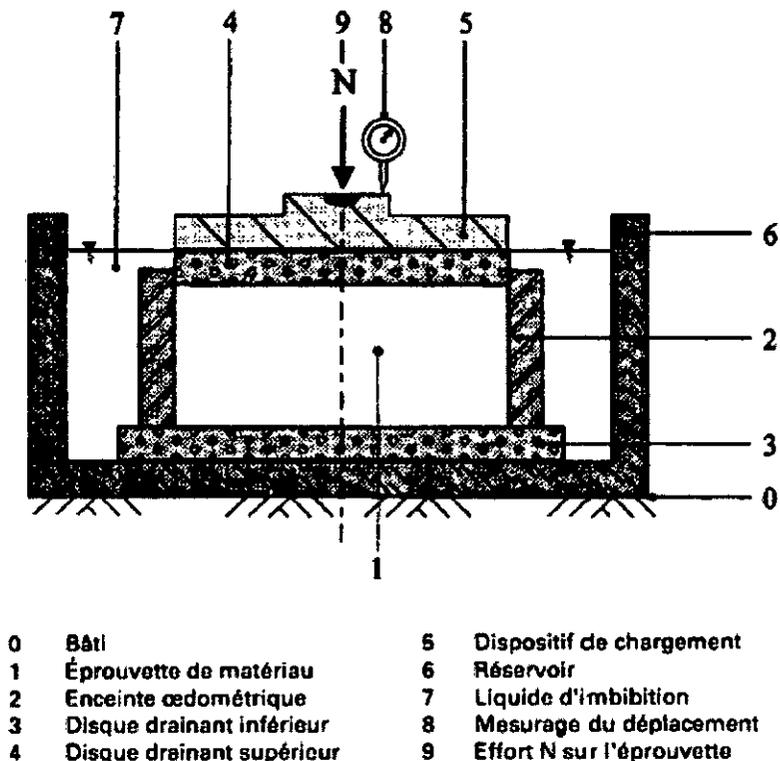


Figure 3.10: Principe de l'oedomètre.

3.4.3 Essais mécaniques

3.4.3.1 Essai Proctor

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol donné qui conduit à une densité maximale du sol après compactage.

L'essai a été effectué selon un processus bien défini dans la norme française NF P 94-093, il consiste à compacter par couche dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée (figure 3.11), l'échantillon du sol à étudier et à mesurer sa teneur en eau et son poids volumique sec après compactage.

L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons humidifiés à différentes teneurs en eau. Les valeurs des poids volumiques du matériau sec et des teneurs en eau correspondantes sont portées sur un graphe $\gamma_d = f(w)$. La courbe tracée présente un maximum dont les coordonnées sont dénommées respectivement teneur en eau optimale et poids volumique sec maximal.

Pour l'essai Proctor deux types de moules de dimensions différentes peuvent être utilisés:

- Le moule Proctor ($\Phi_{\text{moule}} = 101,5 \text{ mm} / H_{\text{de sol}} = 117 \text{ mm}$) lorsque le matériau est suffisamment fin (pas d'éléments supérieurs 5mm),
- Le moule CBR (California Bearing Ratio) pour des sols de dimensions supérieures à 5mm et inférieures à 20mm ($\Phi_{\text{moule}} = 152 \text{ mm} / H_{\text{de sol}} = 152 \text{ mm}$).

Avec chacun de ces moules, des énergies normalisées de compactage peuvent être appliquées selon le type d'essais Proctor : l'essai Proctor normal et l'essai Proctor modifié.

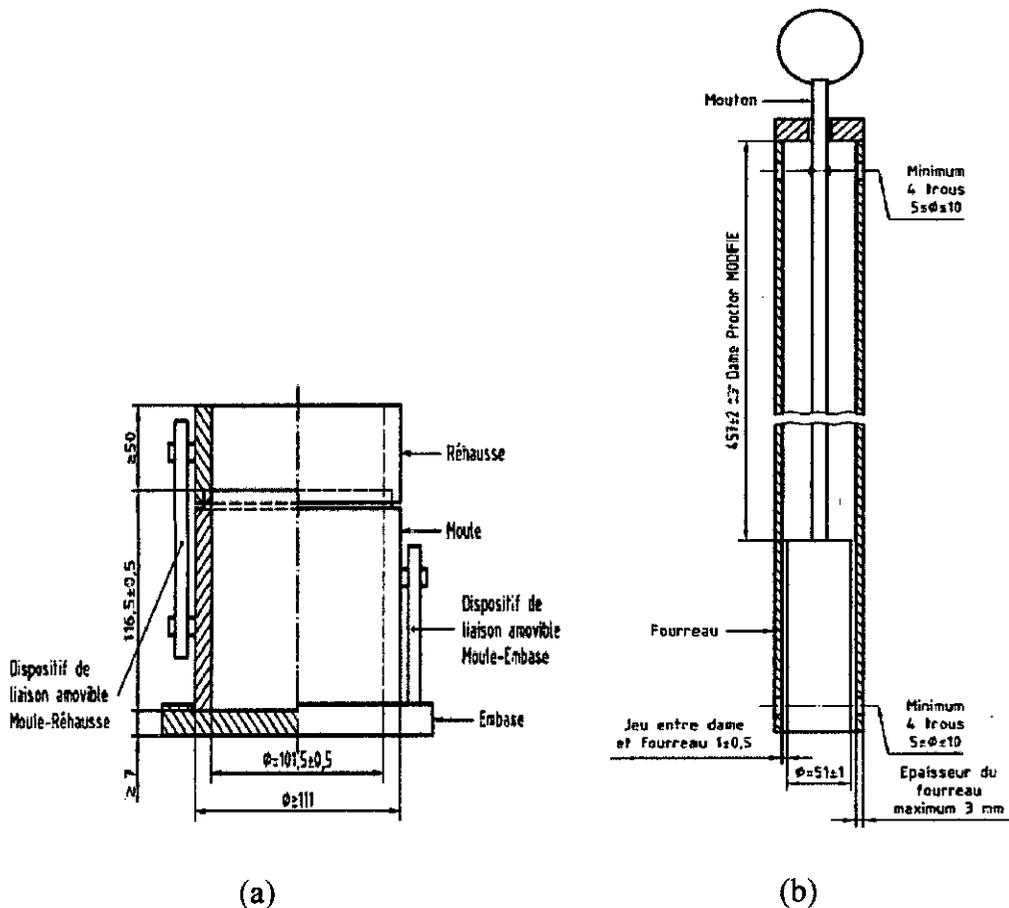


Figure 3.11 : Appareillage du l'essai Proctor modifié : a. Moule ; b. Dame.

Pour les essais Proctor réalisés dans le cadre de cette étude, le moule Proctor et une dame appelée dame Proctor modifié avec une hauteur de chute de 457 mm et la masse de l'équipage mobile est de 4 535 g sont utilisés.

a. Essai Proctor sur les marnes traitées avec de la chaux ou du ciment

L'essai Proctor modifié a été réalisé sur tous les échantillons de sol marneux traité avec différentes quantités de chaux ou de ciment. L'essai Proctor a été réalisé immédiatement après l'ajout de chaux ou de ciment au sol marneux suivant la même procédure décrite dans la norme française NF P 94-093.

3.4.3.2 Essai CBR

L'indice portant californien est un nombre sans dimension, il caractérise la tenue au poinçonnement d'un sol.

Dans la présente étude l'essai CBR a été réalisé selon les procédures décrites dans la norme française NF P 94- 078, le sol à étudier est placé dans un moule CBR dans un état de densité maximale, il est ensuite poinçonné par un piston de $19,3 \text{ cm}^2$ de section, enfoncé à une vitesse constante de $1,27 \text{ mm/min}$.

L'indice de portance ou CBR exprime en % le rapport entre les pressions produisant dans un même temps un enfoncement donné dans le sol étudié d'une part et dans un matériau type d'autre part.

On distingue 2 types d'essais CBR en fonction des buts fixés :

- L'essai C.B.R. immédiat : Mesure de la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à sa teneur en eau naturelle. Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation en phase de chantier.
- L'essai C.B.R. après immersion : Mesure de la résistance au poinçonnement d'un sol compacté puis immergé durant 4 jours (figure 3.12).

Dans la présente étude l'essai CBR après immersion de 4 jours a été réalisé.



Figure 3.12: Sol compacté dans un moule CBR lors de son imbibation.

A partir de cet essai le taux de gonflement du matériau compacté dans le moule CBR après les quatre jours d'immersion a été mesuré à l'aide d'un comparateur.

a. Essai CBR sur les marnes traitées avec de la chaux ou du ciment

Pour les échantillons de marnes traitées avec de chaux ou de ciment, l'essai CBR après 4 jours d'immersion selon la norme NF P 94- 078 a été effectué. Les échantillons de marnes traitées ont été compactés à la densité maximale sèche avec la teneur en eau optimale déterminée par l'essai Proctor. Par la suite les échantillons ont subi une imbibation de quatre jours sous une charge constante (4.6 Kg) et au quatrième jour le poinçonnement a été effectué.

Le taux de gonflement après les quatre jours d'immersion a été mesuré.

3.4.3.3 Essai de compression uniaxiale

L'essai de compression uniaxiale a été exécuté selon les procédures décrites dans la norme française NF P94-077, en utilisant l'appareil triaxial (figure 3.13).

L'essai s'effectue sur une éprouvette placée entre deux plateaux parallèles d'une presse. L'axe de l'éprouvette est orthogonal aux plateaux. L'essai consiste à imposer une vitesse de déformation longitudinale constante (1.5 à 2 mm/min) et à mesurer la force axiale appliquée à l'éprouvette (figure 3.13). La courbe $\sigma_1 = f(\Delta h/h)$ a été tracé, Δh représente le raccourcissement de la hauteur initiale h . A partir de cette courbe, la rupture est définie :

- soit par un maximum de σ_1 si celui-ci apparaît;
- soit par une valeur de σ_1 correspondant à un certain pourcentage de déformation relative de l'éprouvette: 10 à 15 % pour les sols argileux normalement consolidé; 5 à 10 % pour les marnes.

Donc à partir de cet essai la résistance à la compression maximale est déterminée [79].

L'essai de compression uniaxiale est un essai triaxial non consolidé non drainé (UU) ; si le sol est saturé, à la rupture [79]:

$$C_U = \frac{R_C}{2}$$

C_U : cohésion non drainée.

R_C : résistance à la compression uniaxiale maximale.

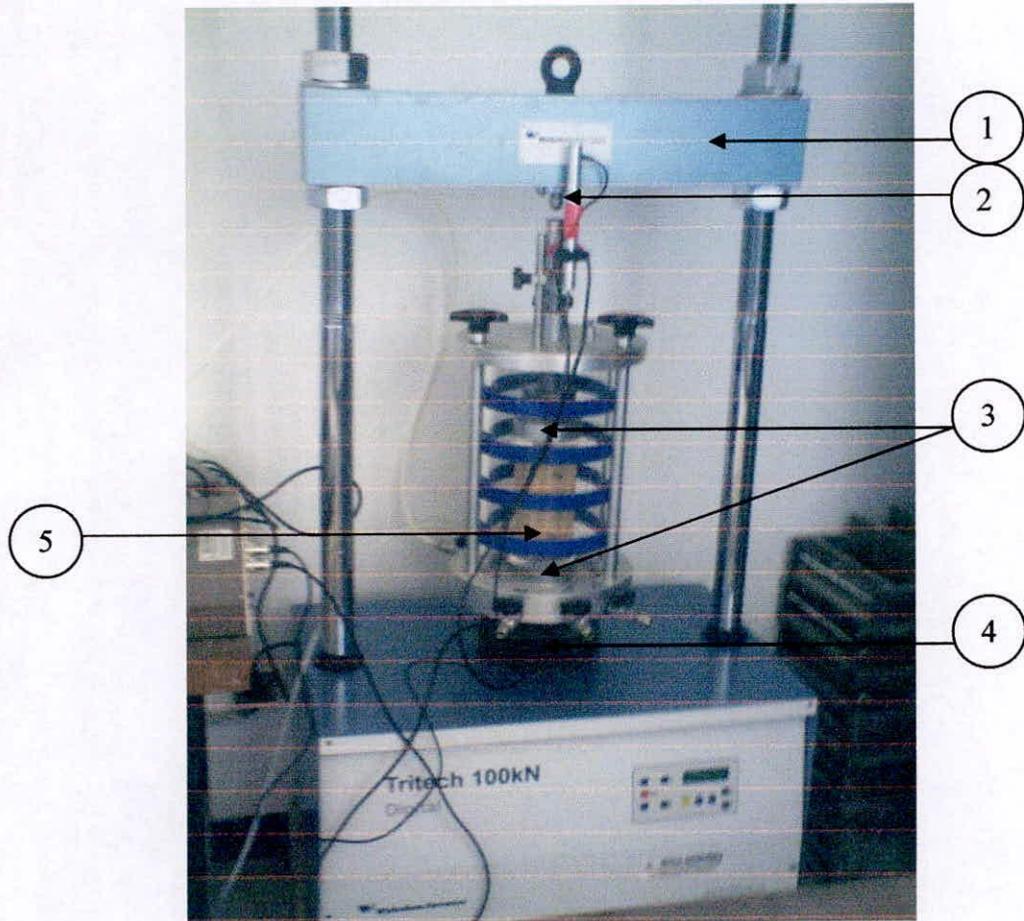


Figure 3.13 : Appareil triaxial.

1. Bâti fixe, 2. Capteur de déplacement,
3. Embases, 4. Dispositif d'avancement,
5. Echantillon de sol.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS

4.1 Introduction

Le chapitre suivant présente les principaux résultats des essais de laboratoires réalisés pour atteindre les objectifs fixés. Ces essais ont été réalisés en suivant les procédures décrites dans le chapitre précédent.

4.2 Essais physico- chimiques

4.2.1 Réaction à l'Hcl pour l'estimation de la teneur en carbonate de calcium

Pour estimer la teneur en carbonate de calcium des sols utilisés dans notre étude des tests à l'Hcl ont été effectués. Une effervescence très vive et prolongée est obtenue pour les sols provenant de Cheraga et Tipaza ce qui indique que le matériau a une teneur en carbonate supérieure à 25 %. Quand au sol provenant d'El Harrach, l'effervescence a été vive mais non soutenue, ce qui conduit à une teneur en carbonate du matériau comprise entre 10 % et 30 % ;

4.2.2 Granulométrie

L'essai granulométrique par tamisage a été réalisé sur la fraction du sol supérieure à 80 μm et l'essai granulométrique par sédimentométrie sur la fraction inférieure à 80 μm pour les trois sites d'étude, Cheraga, El harrach et Tipaza. Les résultats obtenus sont représentés par la figure 4.1.

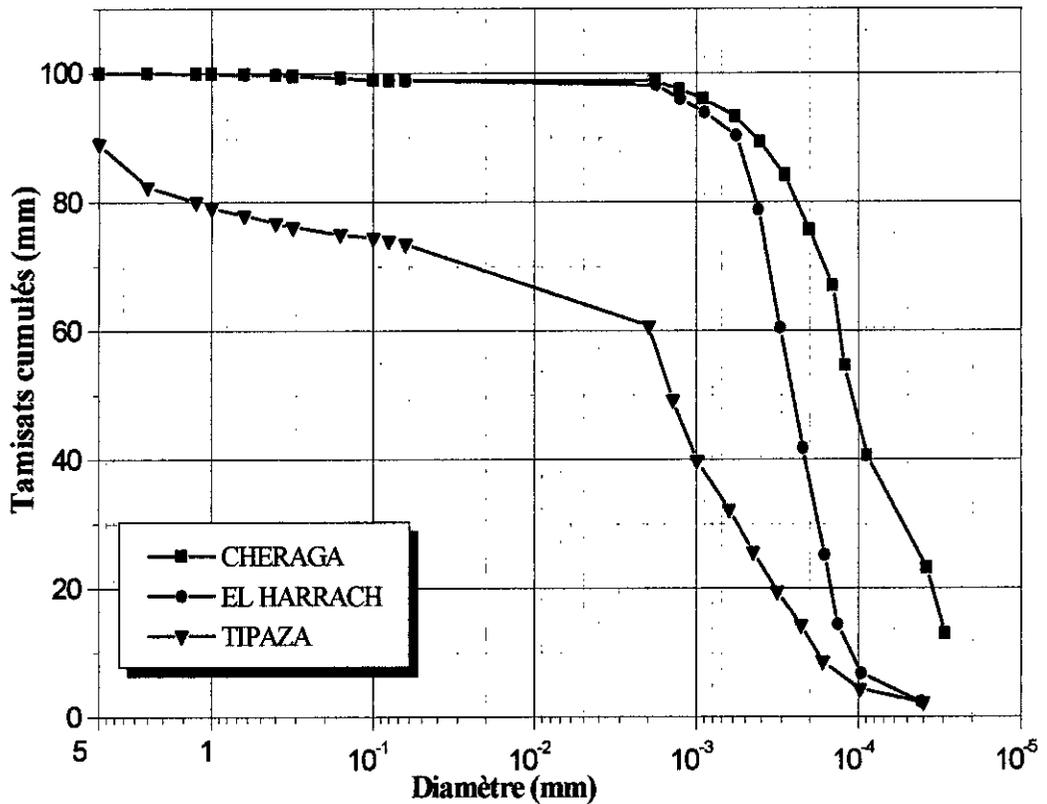


Figure 4.1 : Courbes granulométriques des trois sites étudiés

Comme l'indique la figure 4.1, les sols étudiés contiennent entre 74.1 à 99 % d'éléments inférieurs à 0.08 mm avec 61.7 à 98.4 % inférieurs à 0.002 mm. Ils sont classés dans la catégorie des sols fins.

4.2.3 Teneur en matière organique

La teneur en matière organique est un facteur important à déterminer. Une quantité élevée en matière organique peut nuire à la stabilisation des sols par ajout de chaux ou de ciment.

La détermination du pourcentage de matière organique contenu dans les sols utilisés dans cette étude a été faite par la méthode de calcination, les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 4.1:

Tableau 4.1 : Teneur en matière organique des marnes étudiées.

Site	Cheraga	El Harrach	Tipaza
Teneur en matière organique (%)	3	4.2	2.6

Selon la norme XP P 94-011, les marnes provenant d'El Harrach sont classées faiblement organiques alors que ceux de Cheraga et de Tipaza sont classés dans la catégorie des sols non organiques.

4.2.4 Teneur en carbonate de calcium

Les marnes contiennent un certain pourcentage de carbonate de calcium, dont leurs comportements en dépendent. La détermination de la teneur en CaCO_3 au laboratoire a permis d'obtenir les résultats représentés dans le tableau 4.2:

Tableau 4.2 : Teneur en carbonate de calcium des trois marnes étudiées.

Site	Cheraga	El Harrach	Tipaza
Teneur en carbonate de calcium (%)	37.8	15	31.2

Selon la norme NF P 94-048, les sols provenant de Cheraga et Tipaza sont classés dans la catégorie des marnes et ceux d'El harrach sont des argiles marneuses.

4.2.5 Limites d'Atterberg

La détermination des limites d'Atterberg a été effectuée selon les procédures décrites dans le chapitre 3. Les tableaux 4.3 et 4.4 présentes les valeurs des limites de plasticités, limites de liquidités et les indices de plasticités obtenues après l'ajout de chaux et de ciment aux échantillons de marnes étudiées.

Tableau 4.3 : Limite d'Atterberg en fonction de la quantité de chaux additionnée.

Site	% chaux	W_L	W_P	I_P
Cheraga	0	56	28,2	27,8
	2	66,7	40	26,7
	4	66	42	24
	8	84	63,3	20,7
	16	73	62	11
El harrach	0	48	18,5	29,5
	2	59	40,6	18,4
	3	55	37,8	17,2
	4	57	41,2	15,8
	8	59	46,6	12,4
Tipaza	0	48,7	17,7	31
	2	56,3	28,6	29,7
	4	63,5	41,7	21,8
	8	66,7	45	21,7
	16	65	60	5

Tableau 4.4 : Limite d'Atterberg en fonction de la quantité de ciment additionnée.

Site	% chaux	W _L	W _P	I _P
Cheraga	0	56	28,2	27,8
	2	57,2	30,8	26,4
	3	64,1	38,2	25,9
	4	64,7	39,4	25,3
	8	59	49,7	9,3
El harrach	0	48	18,5	29,5
	2	59,5	33,3	26,2
	3	60	36,5	23,5
	4	57	34,1	22,9
	8	57	34	23
Tipaza	0	49,5	18,5	31
	2	60,5	30,8	29,7
	3	60,4	34,1	26,3
	4	62,7	37	25,7
	8	60	34,8	25

4.2.5.1 Limites d'Atterberg en fonction du % de chaux et de ciment additionné

Les marnes provenant de trois sites différents ont été mélangées avec différentes quantités de chaux et de ciment, les courbes représentant la variation de la limite de liquidité, de plasticité et de l'indice de plasticité en fonction de la quantité de chaux et de ciment additionné sont données par les figures 4.2 et 4.3 :

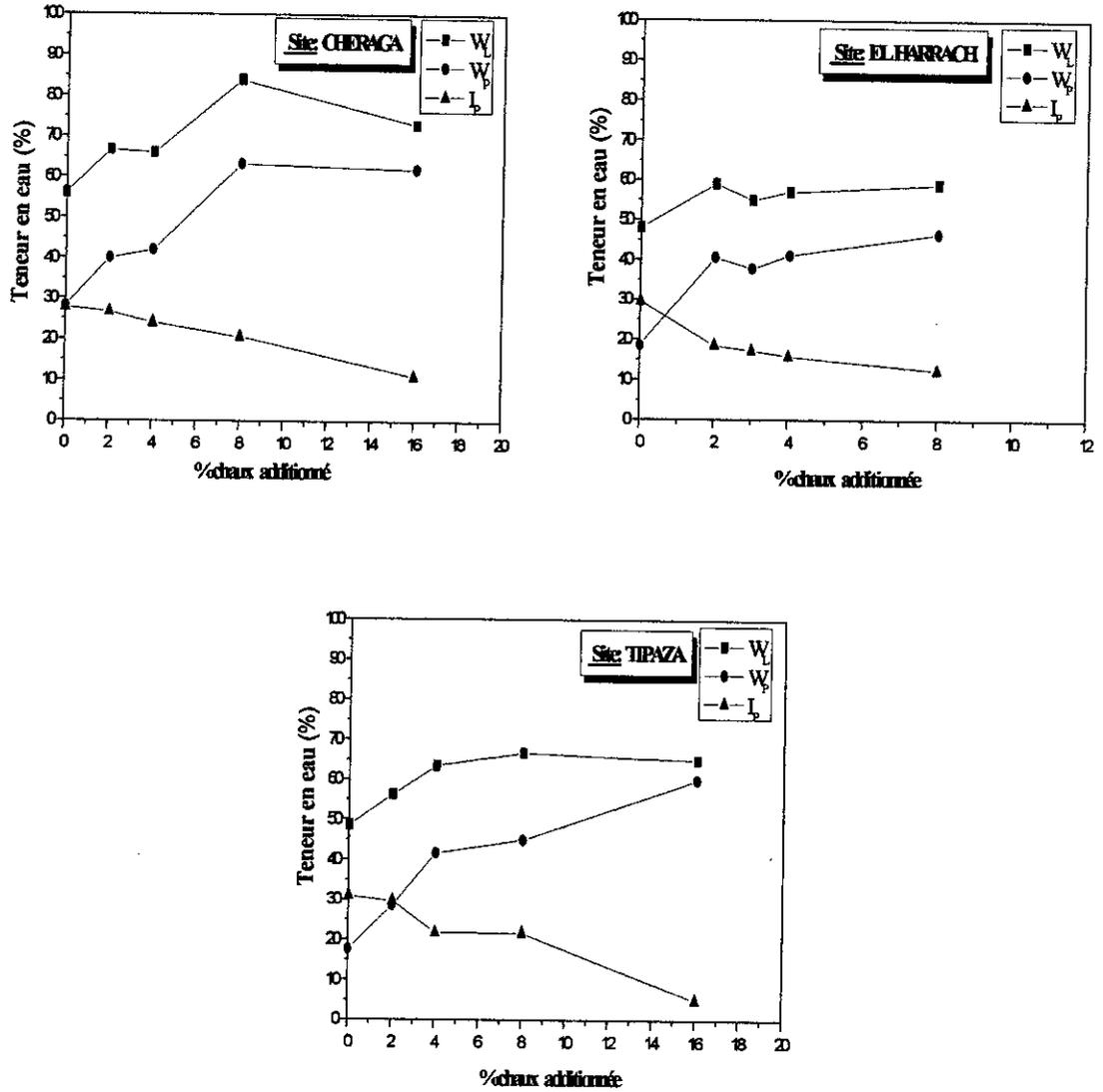


Figure 4.2 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité de chaux additionnée.

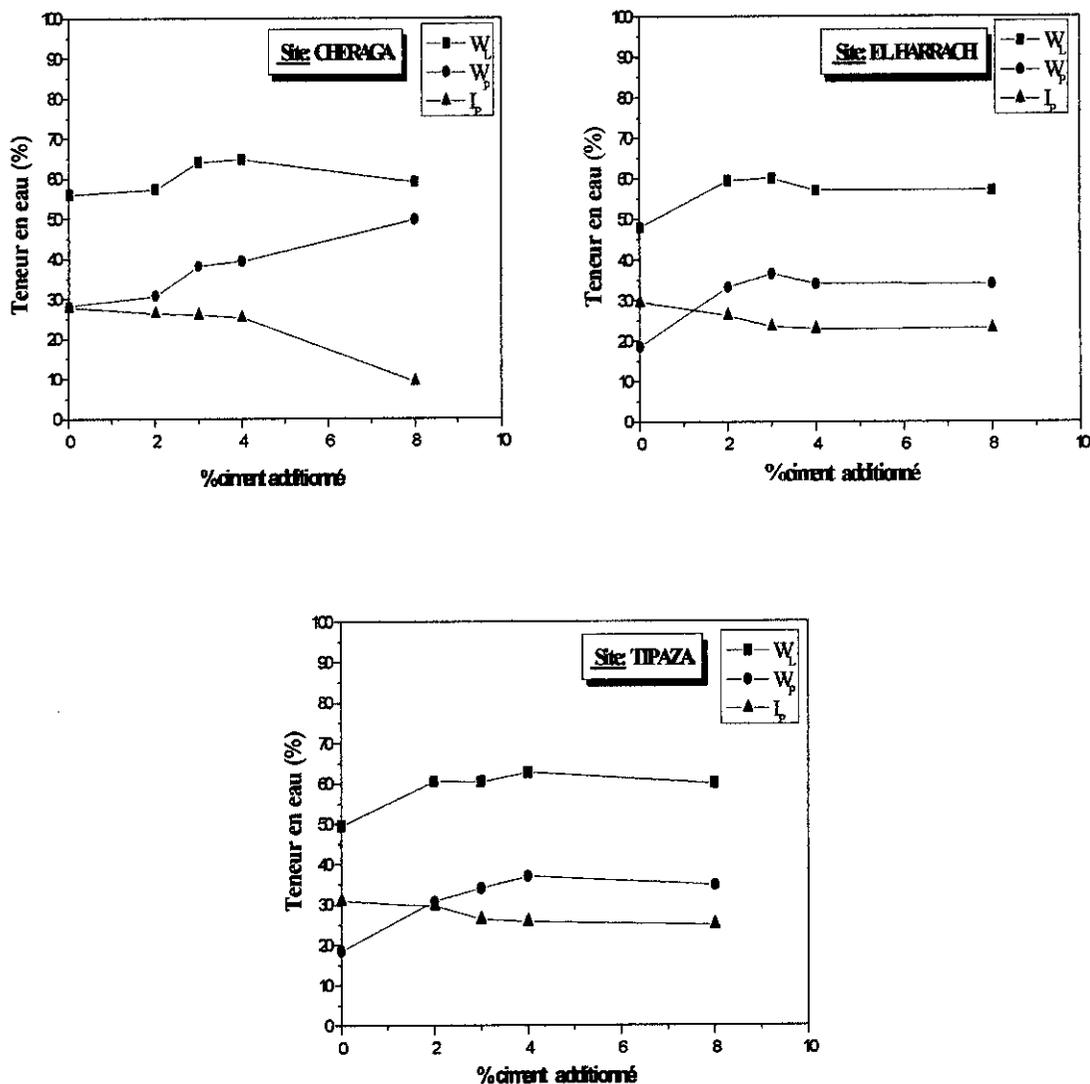


Figure 4.3 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la quantité du ciment additionnée.

Comme l'indique les figures 4.2 et 4.3, une variation des limites de liquidité et de plasticité et par conséquent de l'indice de plasticité en fonction du pourcentage de chaux et de ciment ajouté, est bien observé. En effet, les limites de plasticité et les limites de liquidité augmentent, l'indice de plasticité diminue en fonction de la quantité de chaux et de ciment additionnée. Ceci est le cas pour les échantillons provenant des différents sites d'emprunts (Cheraga, El harrach et Tipaza).

L'essai de dessiccation pour la détermination des limites de retrait des marnes provenant de Cheraga avec et sans ajout de chaux a permis de tracer le graphe présenté dans la figure 4.4.

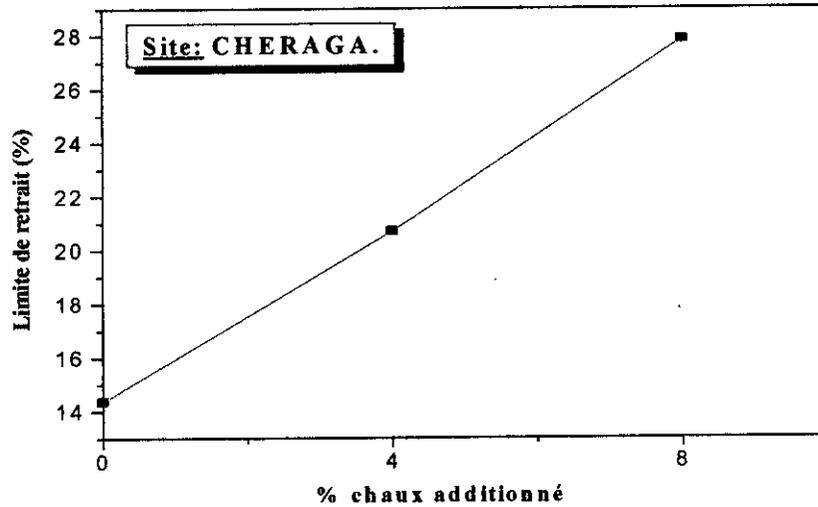


Figure 4.4 : Variation de la limite de retrait en fonction de la quantité de chaux additionnée.

La variation de la limite de retrait en fonction de la quantité de chaux additionnée est linéaire. Pour seulement 4% de chaux ajoutée le retrait diminue de 50 %.

4.3 Essai Oedométrique

L'essai oedométrique a été réalisé sur des échantillons de sol non traités et des échantillons traités avec 4% de chaux et de ciment provenant des différents sites d'emprunts (Cheraga, El harrach et Tipaza). Afin d'étudier l'effet de cure sur la compressibilité des sols traités à la chaux des essais oedométriques sont réalisés sur des échantillons de sols additionnés de 4% de chaux et ayant subi une cure de 7 jours sous une température de 40°C. Les résultats de ces essais sont représentés dans les figures 4.5 à 4.7.

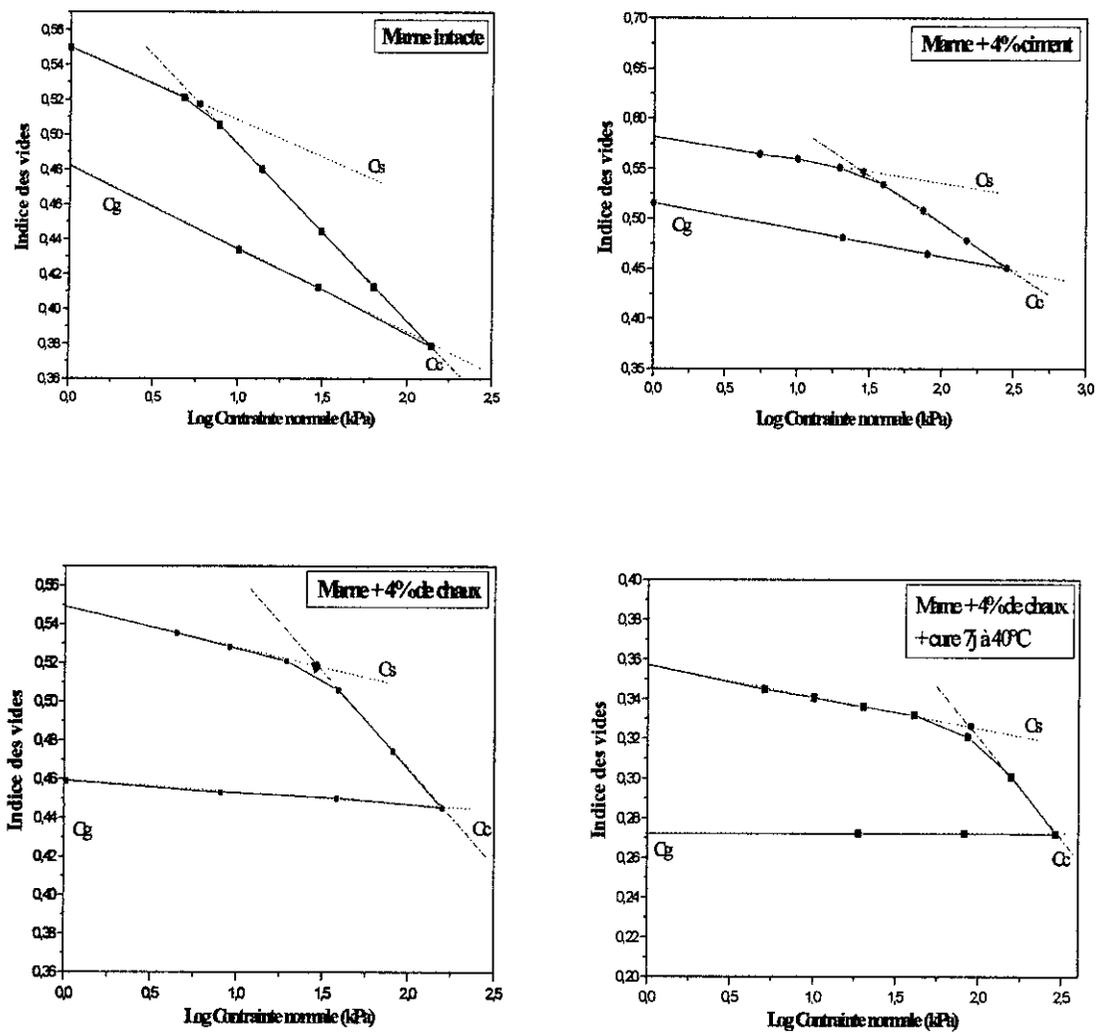


Figure 4.5 : Courbes de compressibilité du sol marneux de Cheraga avant et après le traitement.

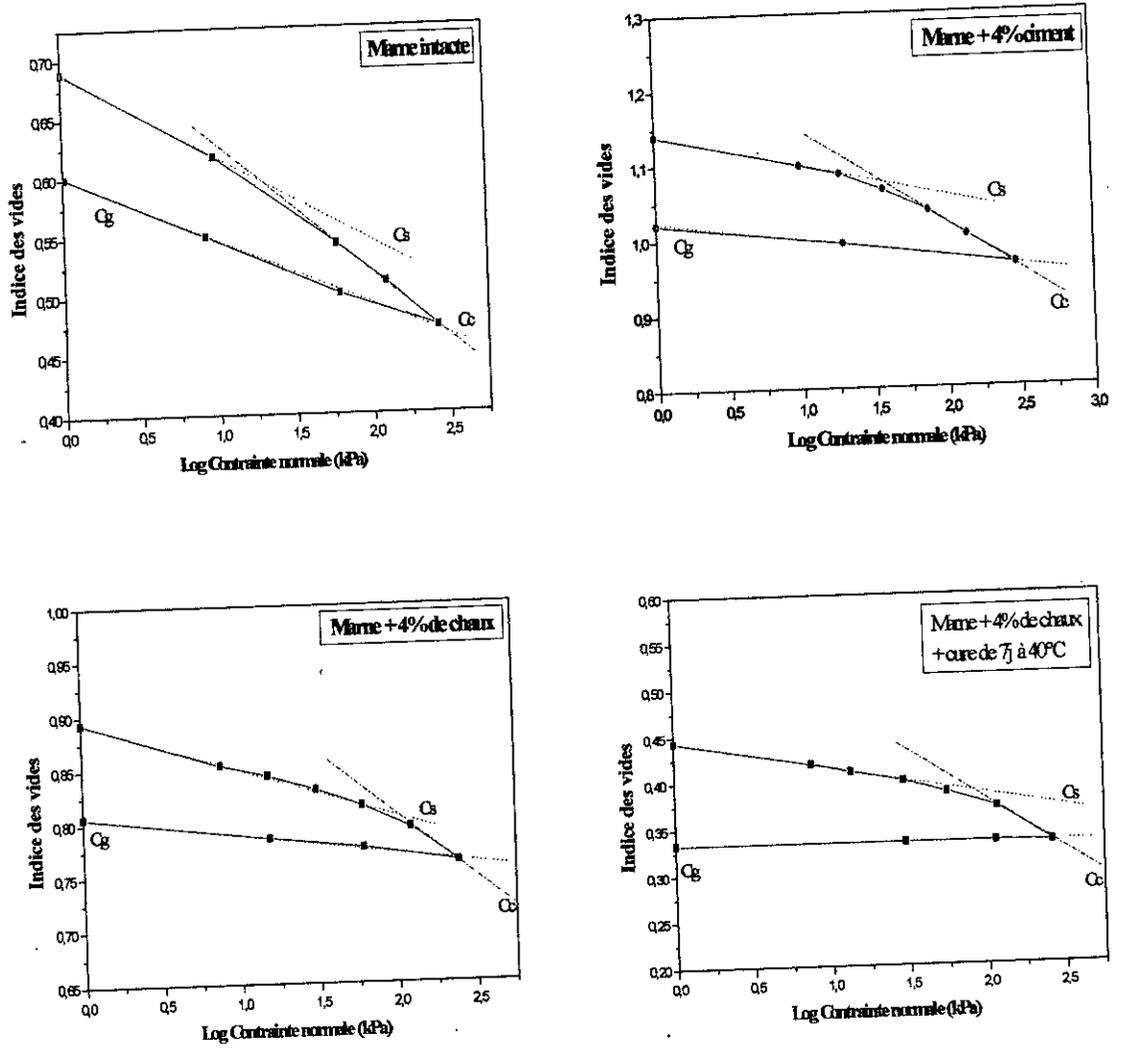


Figure 4.6 : Courbes de compressibilité du sol marneux d'El harrach avant et après le traitement.

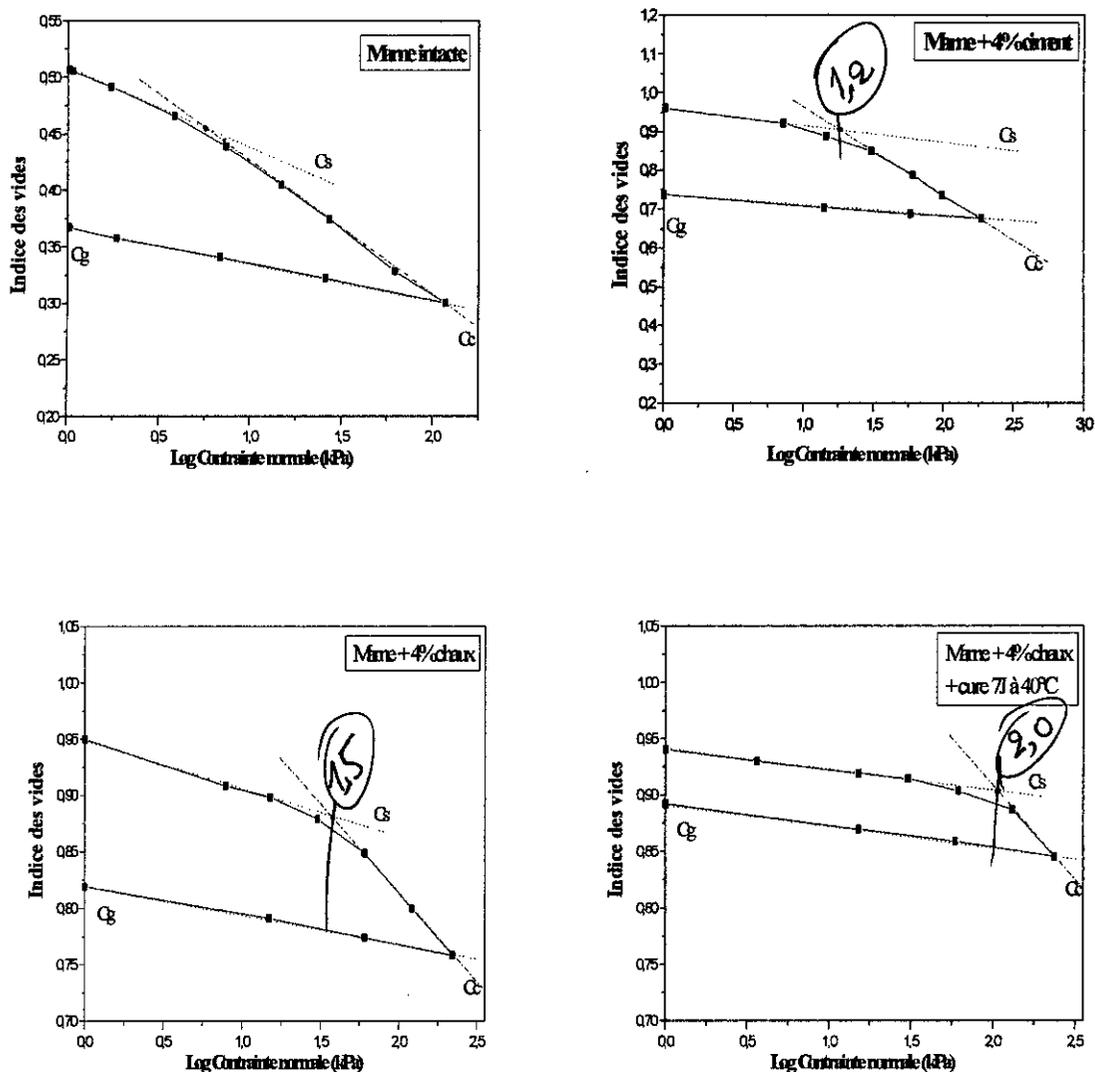


Figure 4.7 : Courbes de compressibilité du sol marneux de Tipaza avant et après le traitement.

Comme il peut se voir sur les figures précédentes la contrainte apparente de préconsolidation montre une augmentation après l'ajout de 4% de chaux et de ciment. Cette augmentation est encore plus apparente pour des échantillons traités et ayant subi une cure de 7 jours sous une température de 40°C (tableau 4.5). Ce fait est observé pour l'ensemble des échantillons provenant des trois sites d'emprunts.

D'autre part, une diminution de l'indice de recompression et celui de gonflement est observée après rajout de chaux et de ciment (tableau 4.6 et 4.7). Une cure de 7 jours sous une température de 40°C réduit d'avantage la valeur de C_s et C_g pour l'ensemble des échantillons testés.

Pour ce qui est de l'indice de compression, les valeurs obtenues pour ce dernier après l'ajout de 4% de chaux et de ciment semble montrer une légère diminution pour les échantillons de Cheraga et d'El harrach et une nette augmentation pour les échantillons de Tipaza (tableau 4.8)

Tableau 4.5 : Contrainte de préconsolidation après le traitement.

σ_p (kPa)	Cheraga	El Harrach	Tipaza
Marne intacte	5.82	19.7	5.9
Marne + 4%Chaux	29.6	67.6	36.9
Marne + 4%Chaux +cure	87.1	83.2	104.7
Marne + 4% ciment	27.4	36.6	18.2

Tableau 4.6 : Indice de recompression après le traitement.

Cs	Cheraga	El Harrach	Tipaza
Marne intacte	0.043	0.725	0.066
Marne + 4%Chaux	0.022	0.036	0.047
Marne + 4%Chaux +cure	0.013	0.028	0.017
Marne + 4% ciment	0.018	0.42	0.046

Tableau 4.7 : Indice de gonflement après le traitement.

Cg	Cheraga	El Harrach	Tipaza
Marne intacte	0.045	0.055	0.031
Marne + 4%Chaux	0.006	0.017	0.024
Marne + 4%Chaux +cure	0	0	0.023
Marne + 4% ciment	0.015	0.021	0.028

Tableau 4.8 : Indice de compression après le traitement.

Cc	Cheraga	El Harrach	Tipaza
Marne intacte	0.14	0.12	0.1
Marne + 4%Chaux	0.11	0.11	0.16
Marne + 4%Chaux +cure	0.11	0.10	0.17
Marne + 4% ciment	0.09	0.12	0.23

4.4 Essais mécaniques

4.4.1 Essai Proctor

4.4.1.1 Résultats de l'essai Proctor des marnes traitées à la chaux

La réalisation de l'essai Proctor sur des marnes, provenant de trois sites, et additionnées de différentes quantités de chaux a permis de tracer les courbes suivantes (figure 4.8) :

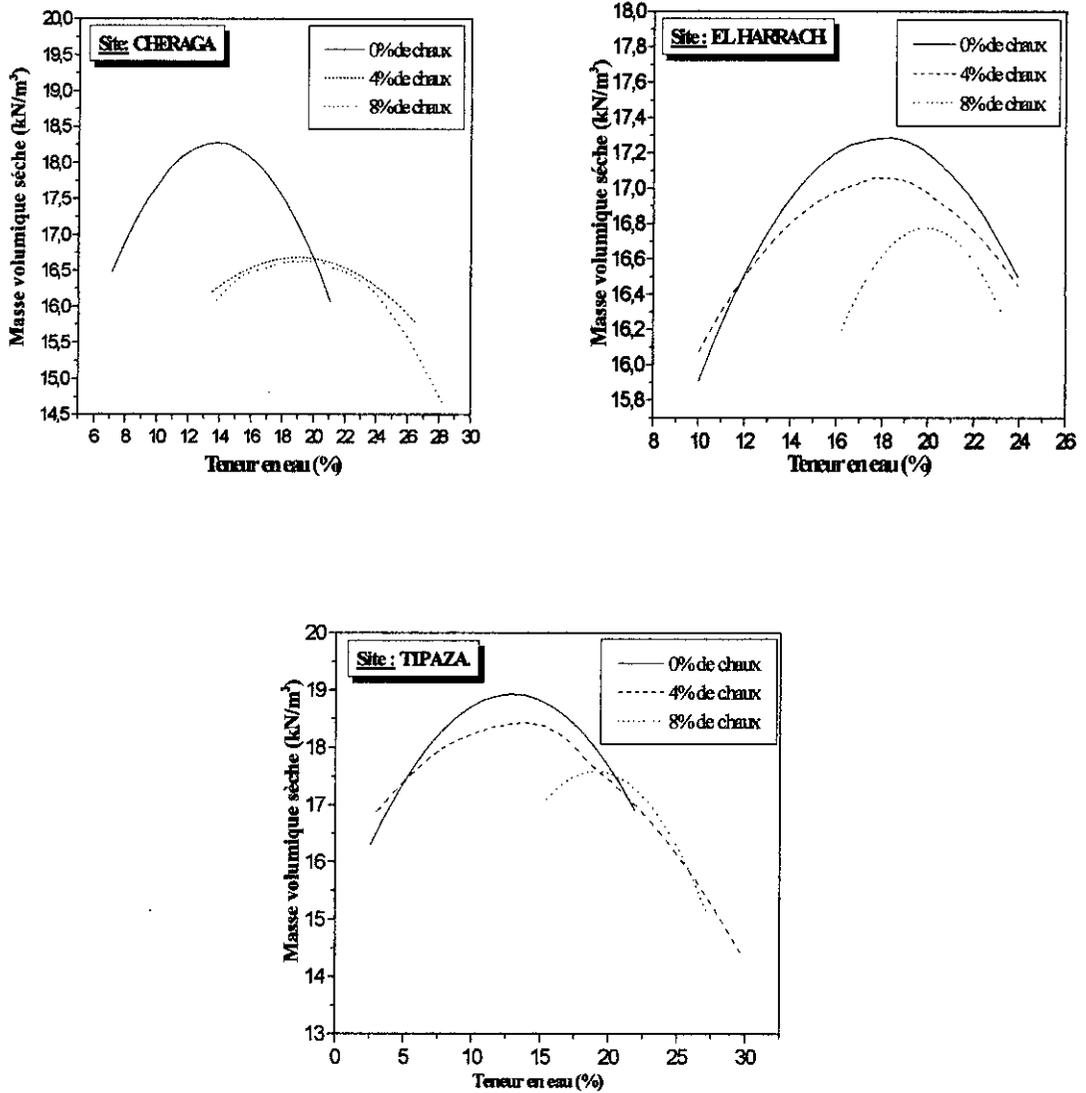


Figure 4.8 : Courbe Proctor en fonction de la quantité de chaux additionnée.

Ces courbes montrent que l'ajout de chaux aux sols marneux provoque une augmentation de la teneur en eau optimale et une réduction de masse volumique sèche maximale et ceci pour un même effort de compaction. Sachant aussi que les marnes traitées destinées pour cet essai n'ont subi aucune cure et l'essai a été réalisé immédiatement après le malaxage des marnes avec la chaux. Ceci témoigne de la rapidité de la réaction de la chaux avec le sol marneux.

4.4.1.2 Résultats de l'essai Proctor des marnes traitées au ciment

L'essai Proctor réalisé sur des marnes provenant de trois sites et additionnées de 4 et 8% de ciment a permis d'obtenir les résultats suivants (figure 4.9) :

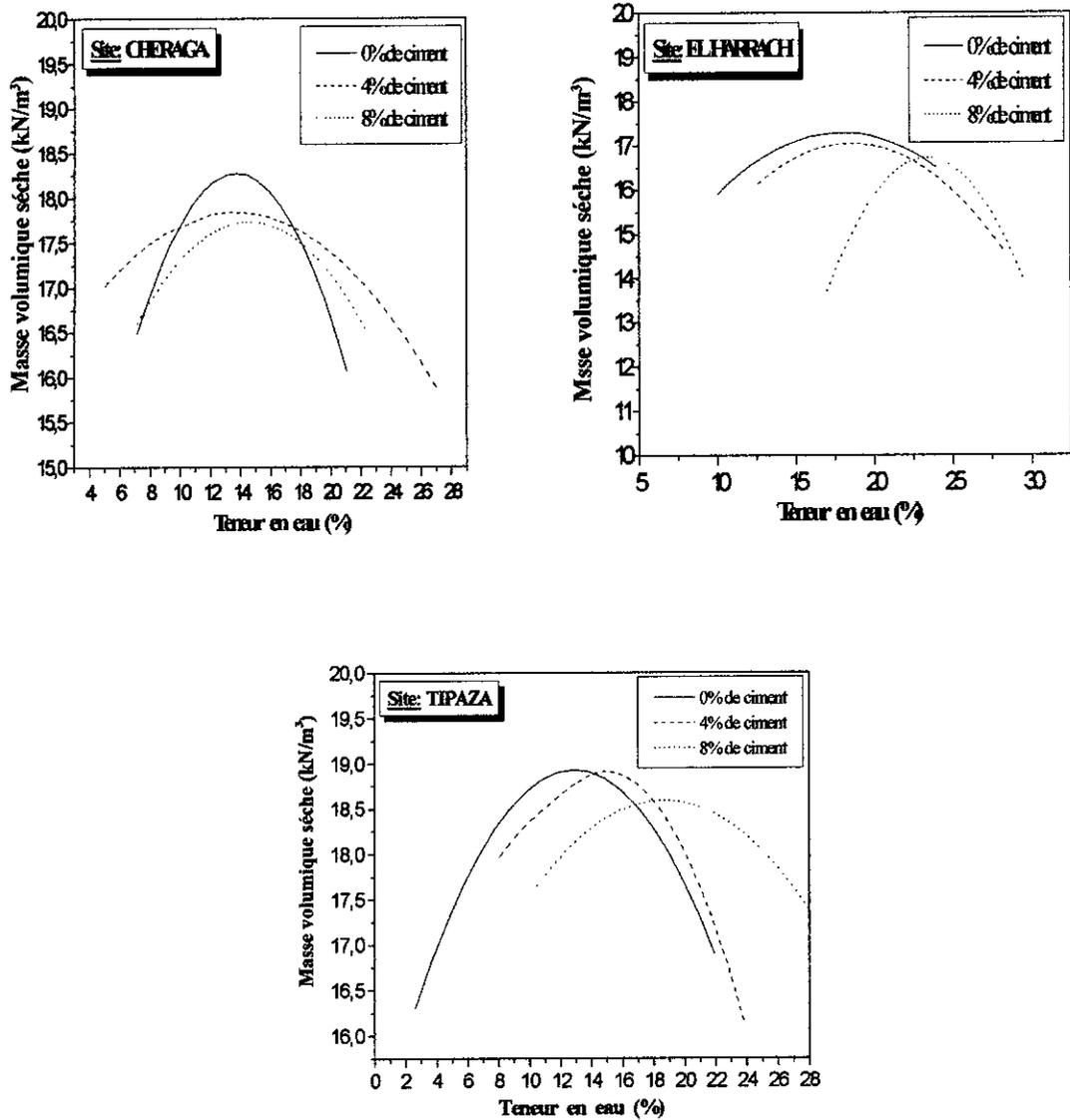


Figure 4.9 : Courbe Proctor en fonction de la quantité de ciment additionnée.

Comme pour les sols traités à la chaux, la même tendance est observée avec les échantillons traités avec le ciment. Une augmentation de la teneur en eau optimale et une réduction de masse volumique sèche maximale sont observées pour les différents échantillons étudiés.

4.4.2 Essai CBR

4.4.2.1 Résultats de l'essai CBR des marnes traitées à la chaux

Les trois sols marneux ont été mélangés avec différentes quantités de chaux et des quantités d'eau optimales, ensuite ils ont été compactés dans des moules CBR et laissés

imbiber pendant quatre jours. Après les quatre jours d'immersion le gonflement total des éprouvettes d'essais a été mesuré, ce qui a permis de déterminer le taux de gonflement du sol (figure 4.10).

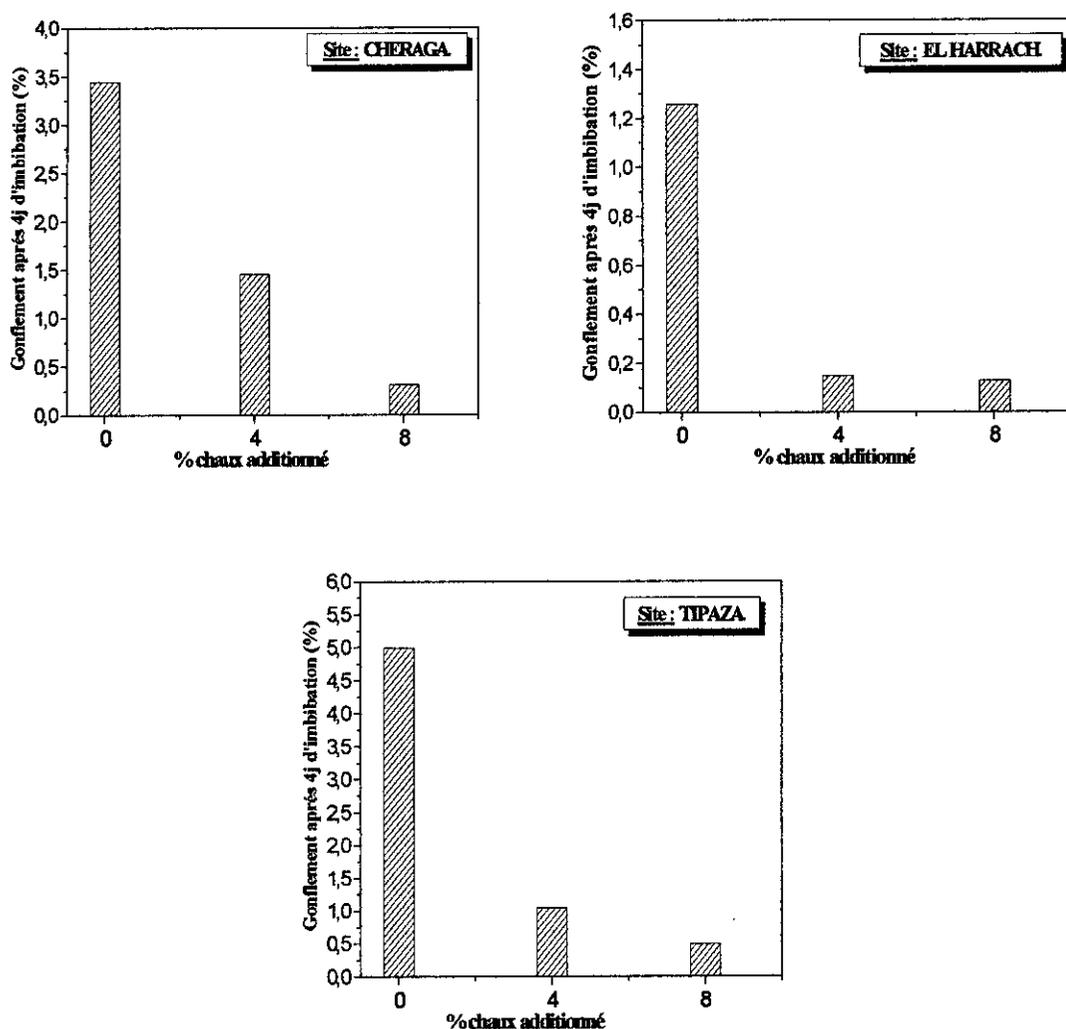


Figure 4.10 : Variation du taux de gonflement en fonction de la quantité de chaux additionnée.

Comme il peut se voir sur la figure 4.10 le taux de gonflement du sol est réduit après le traitement à la chaux. Le taux de gonflement est inversement proportionnel à la quantité de chaux additionnée.

Par la suite, le poinçonnement a été exécuté permettant ainsi de déterminer l'indice CBR de ces marnes (figure 4.11).

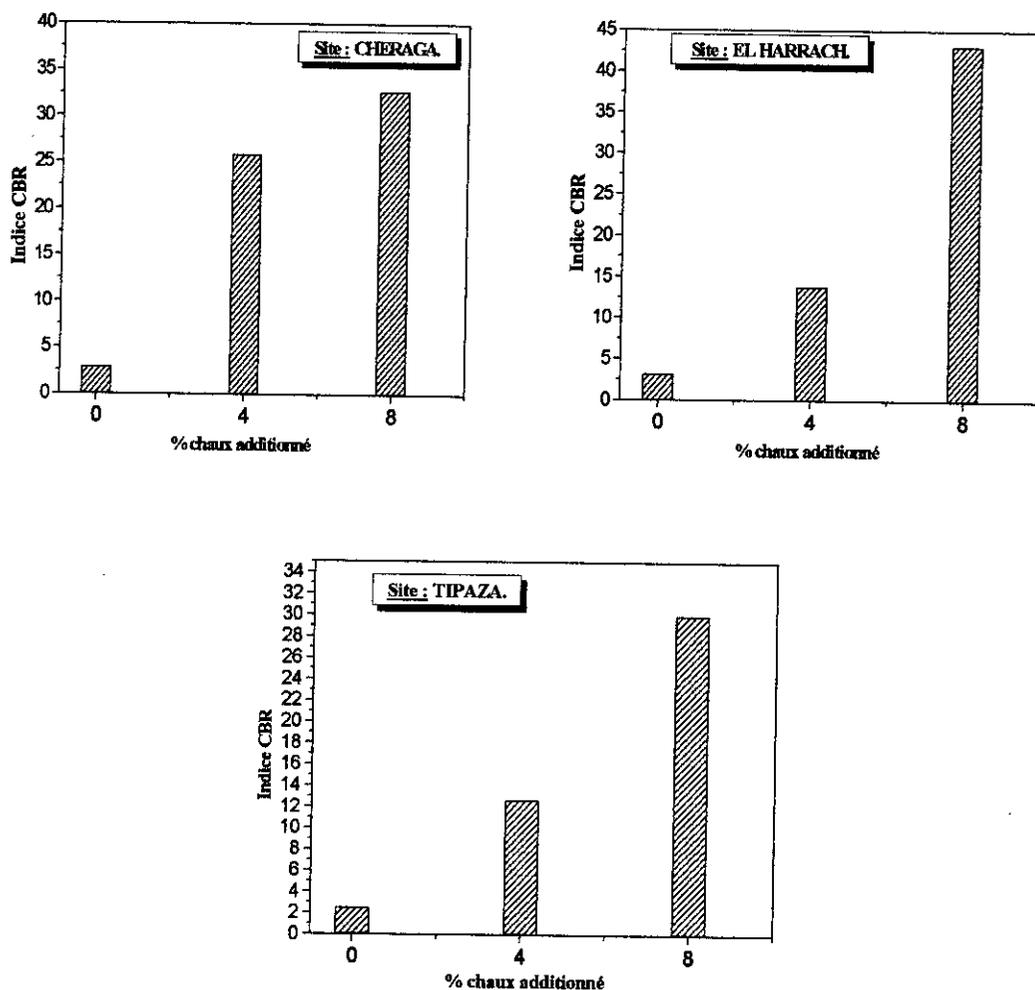


Figure 4.11 : Variation de l'indice CBR après immersion en fonction de la quantité de chaux additionnée.

Comme l'indique la figure 4.11 l'indice CBR augmente considérablement avec l'ajout de chaux.

4.4.2.2 Résultats de l'essai CBR des marnes traitées au ciment

La détermination de l'indice CBR et du taux de gonflement des marnes traitées au ciment s'est effectuée de la même façon qu'avec la chaux. Le traitement s'est fait avec des ajouts de 4 et 8 % de ciment et les résultats obtenus sont présentés dans les figures 4.12 et 4.13:

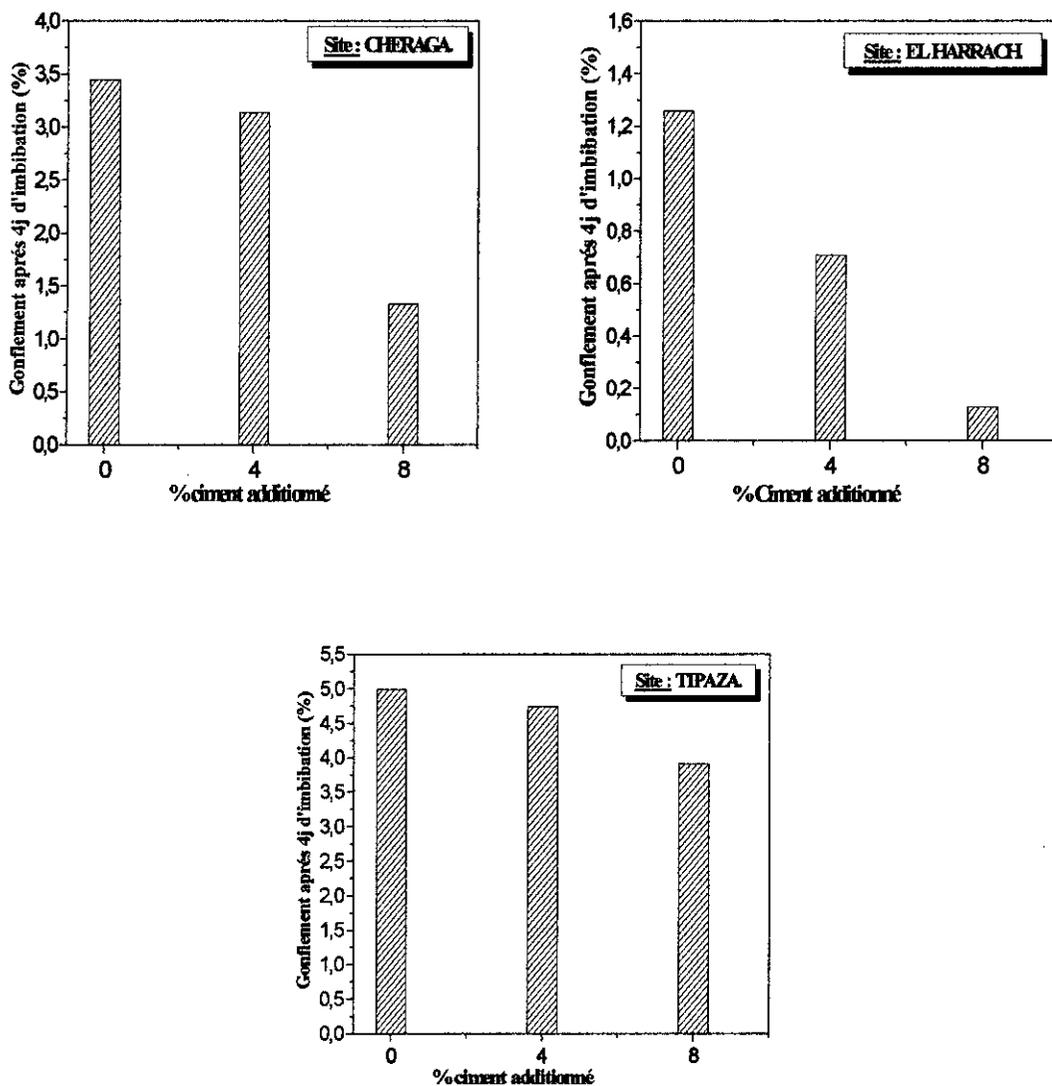


Figure 4.12 : Variation du taux de gonflement en fonction de la quantité du ciment additionnée.

Le taux de gonflement après les quatre jours d'imbibation des marnes traitées au ciment a diminué en fonction de la quantité de ciment ajoutée comme l'indique la figure 4.13.

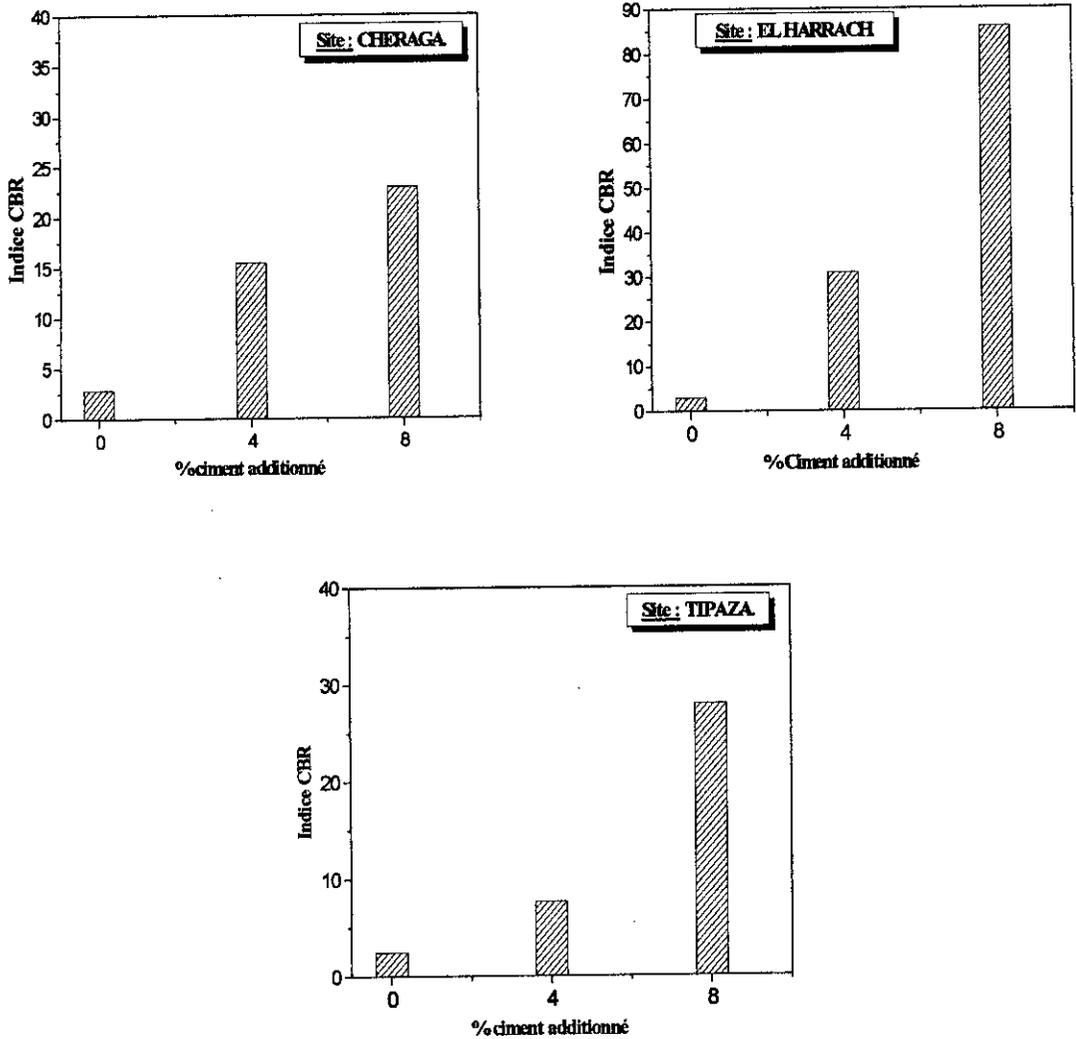


Figure 4.13 : Variation de l'indice CBR après immersion en fonction de la quantité du ciment additionnée.

Comme il peut se voir sur la figure 4.13, le ciment a bien réagi avec les marnes, l'indice CBR a augmenté d'une manière significative dans les échantillons des trois sites étudiés, mais la variation la plus importante est observée pour les échantillons provenant du site d'El Harrach pour un ajout de 8% de ciment.

4.4.3 Essai de compression uniaxiale

L'essai de compression uniaxiale est très important du fait qu'il permet d'avoir une idée sur l'évolution de la résistance et sur le comportement du sol face au traitement et ceci de manière rapide. Dans le cadre de cette étude cet essai a été réalisé pour étudier les points suivants :

- L'évolution de la résistance à la compression en fonction de la quantité de chaux additionnée,
- L'évolution de la résistance à la compression en fonction des conditions de cure : temps et température,
- L'évolution de la résistance à la compression en fonction de la quantité de ciment additionné,
- L'effet de l'imbibation sur la résistance à la compression des marnes traitées et non traitées.

4.4.3.1 Résultats de l'essai de compression simple des marnes traitées à la chaux

Pour étudier l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la quantité de chaux, l'essai de compression uniaxiale a été réalisé selon la norme française NF P94-077 sur des marnes additionnées de différents pourcentages de chaux : 4%, 8% et 16%. Les éprouvettes d'essais ont subi une cure de 7 jours sous une température de 40°C. Après la période de cure, une partie de ces éprouvettes a été écrasée et l'autre partie a subi une saturation pendant 24 heures avant l'écrasement. Les résultats obtenus sont représentés dans les figures 4.14 à 4.19 :

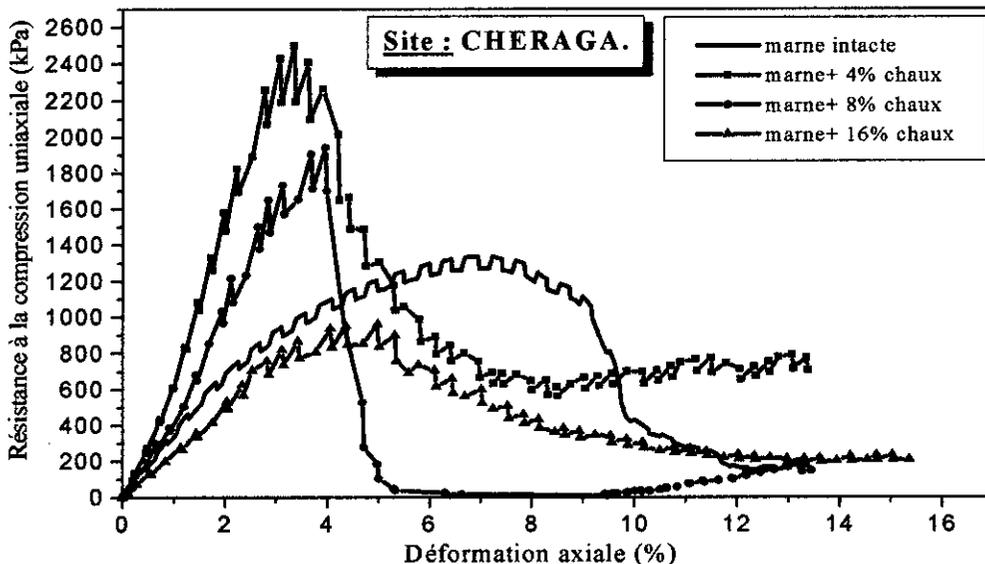


Figure 4.14 : Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la quantité de chaux additionnée pour le site de Cheraga.

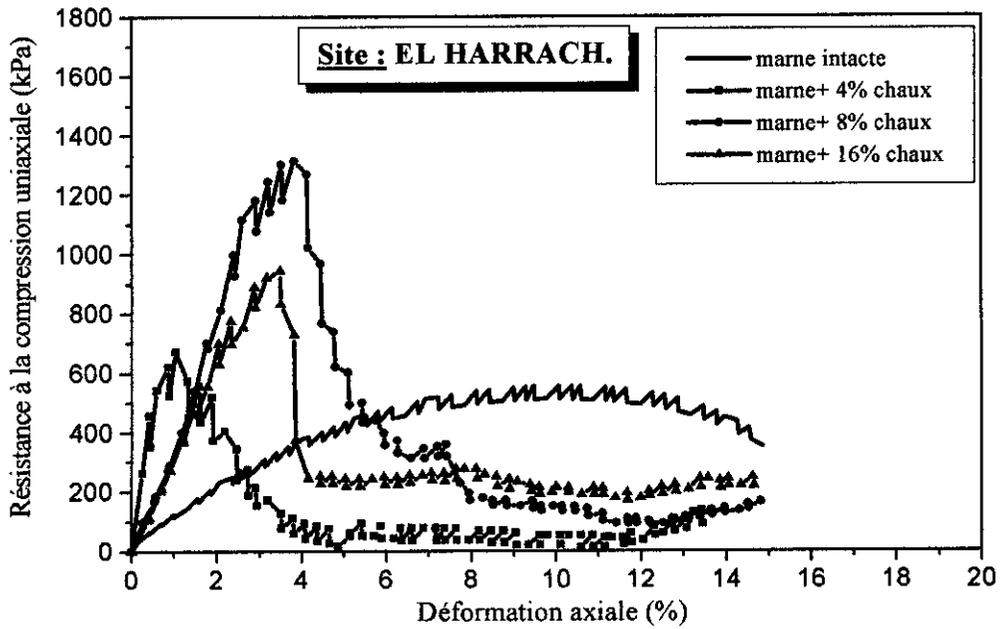


Figure 4.15 : Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la quantité de chaux additionnée pour le site d'El harrach.

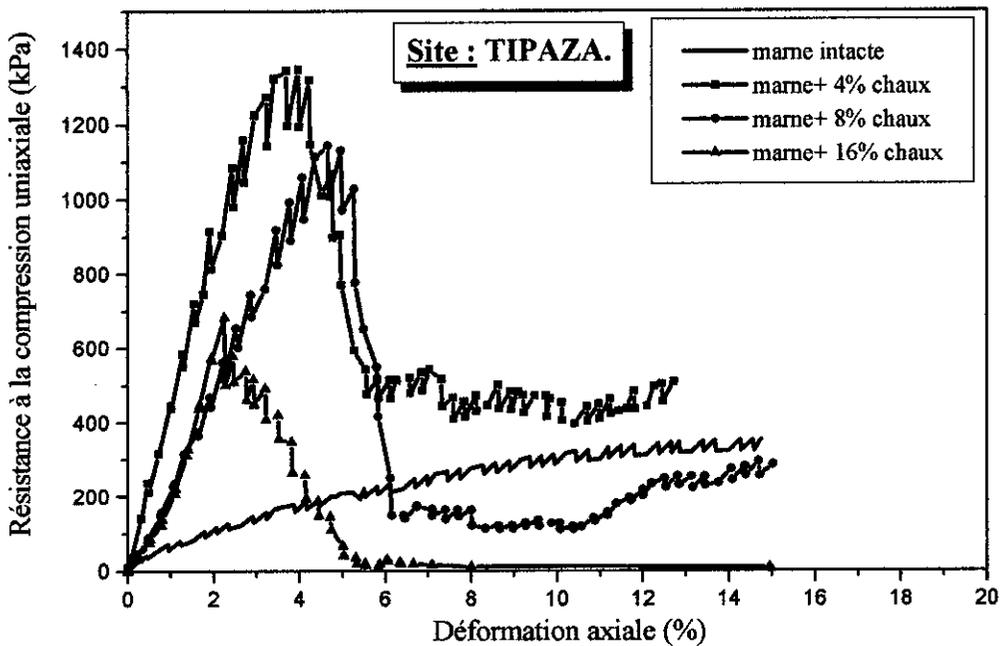


Figure 4.16 : Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la quantité de chaux additionnée pour le site de Tipaza.

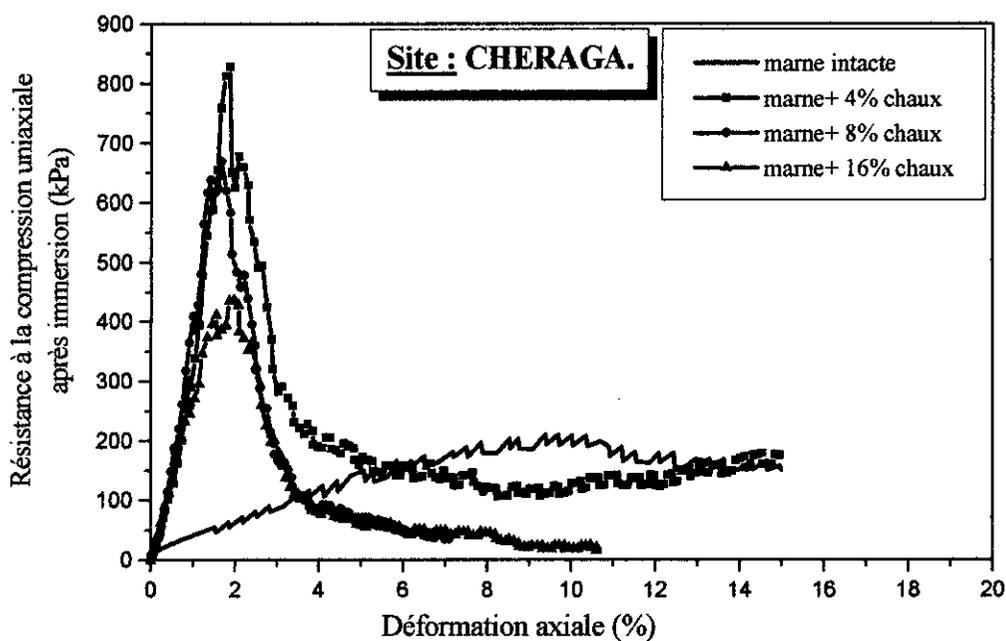


Figure 4.17 : Evolution de la résistance à la compression uniaxiale après immersion en fonction de la quantité de chaux additionnée pour le site de Cheraga.

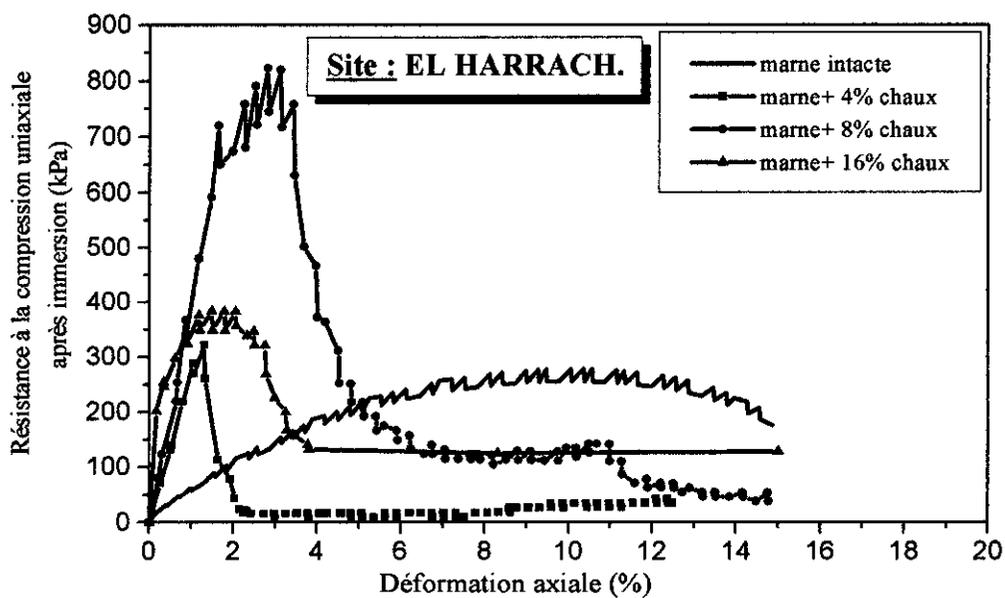


Figure 4.18 : Evolution de la résistance à la compression uniaxiale après immersion en fonction de la quantité de chaux additionnée pour le site d'El harrach.

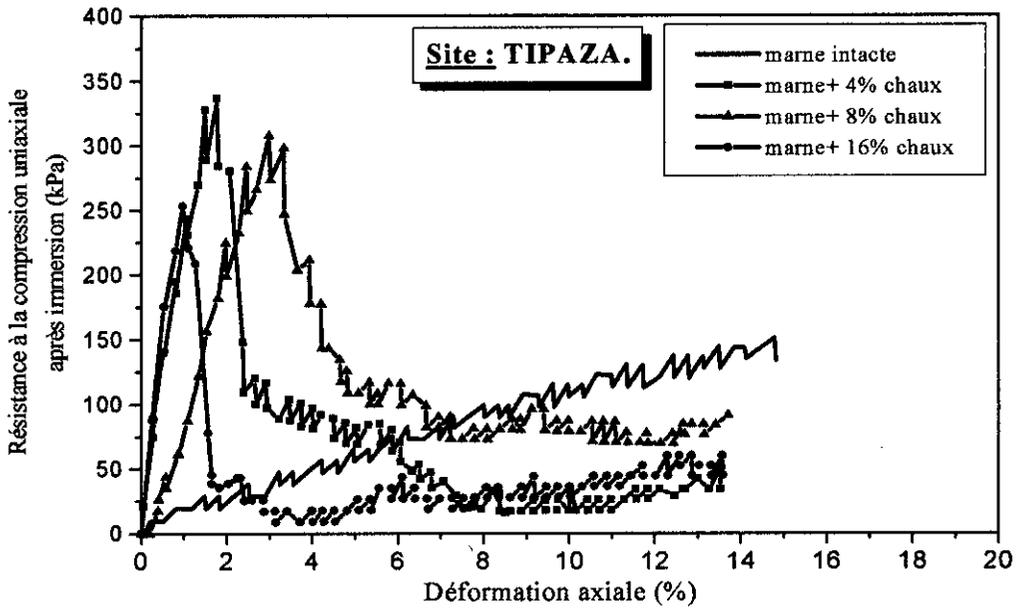


Figure 4.19 : Evolution de la résistance à la compression uniaxiale après immersion en fonction de la quantité de chaux additionnée pour le site de Tipaza.

Le comportement de ces sols après le traitement à la chaux est le même pour les trois sites. La résistance à la compression uniaxiale du sol augmente jusqu'à un optimum représentant le seuil de résistance puis diminue subitement après la rupture.

La valeur de la quantité de chaux optimale permettant d'avoir des résistances maximales est égale à 4% pour les sites de Cheraga et Tipaza. Elle est de 8% pour le site d'El Harrach.

Dans le but d'étudier l'effet des conditions de cure (temps et température) sur la résistance des sols traités à la chaux, l'essai de compression uniaxiale a été réalisé sur des échantillons de marnes additionnées de 4% de chaux, où les conditions de cure ont été comme suit :

- Une cure de 7 jours à 20°C,
- Une cure de 28 jours à 40°C.

Avant l'écrasement, les éprouvettes d'essais ont été imbibées pendant 24 heures, les résultats obtenus sont représentés dans les figures 4.20 et 4.21:

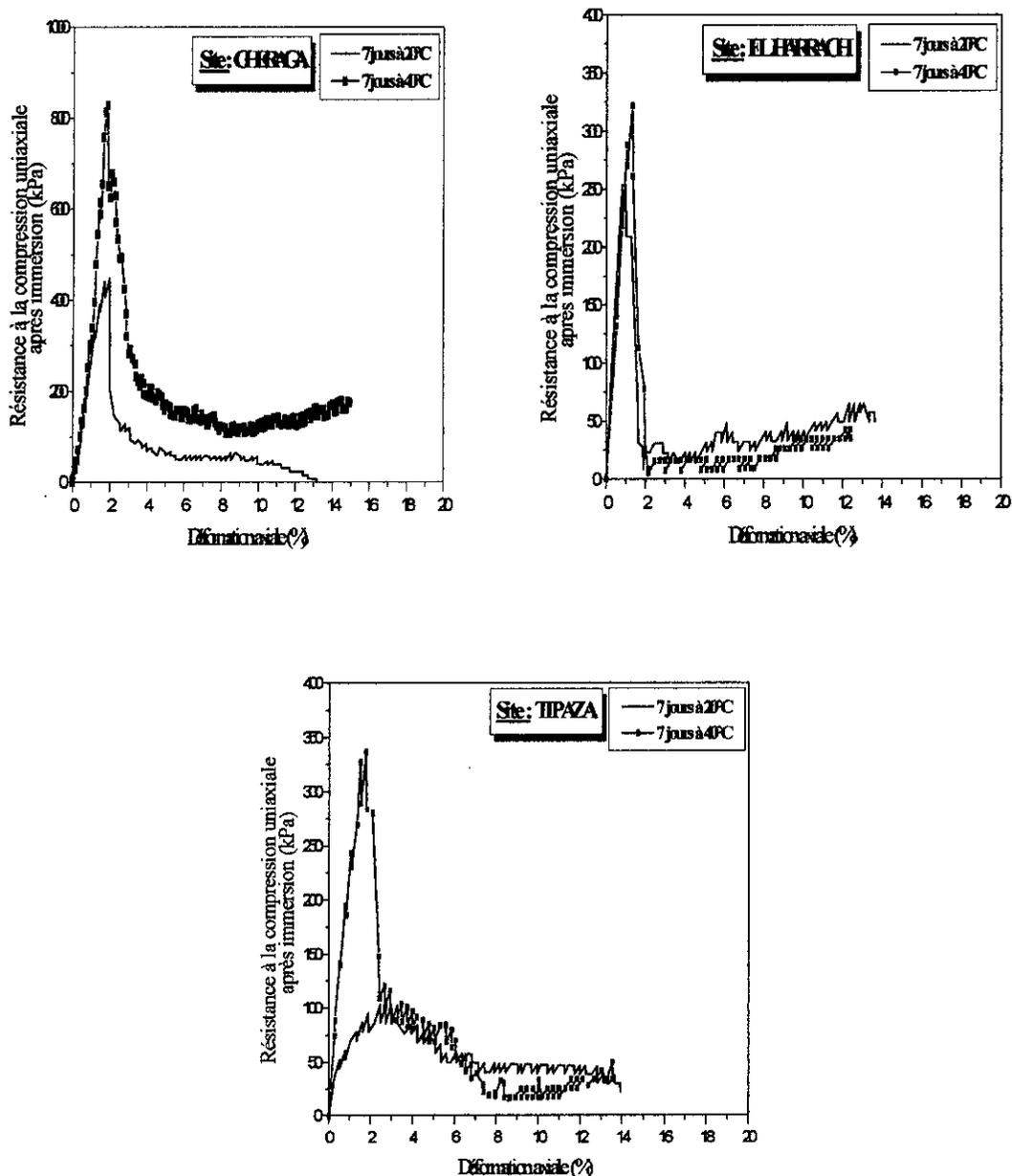


Figure 4.20 : Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la température de cure pour des marnes traitées avec 4% de chaux.

D'après la figure 4.20, la résistance à la compression maximale augmente avec l'augmentation de la température de 20°C à 40°C pour un même temps de cure.

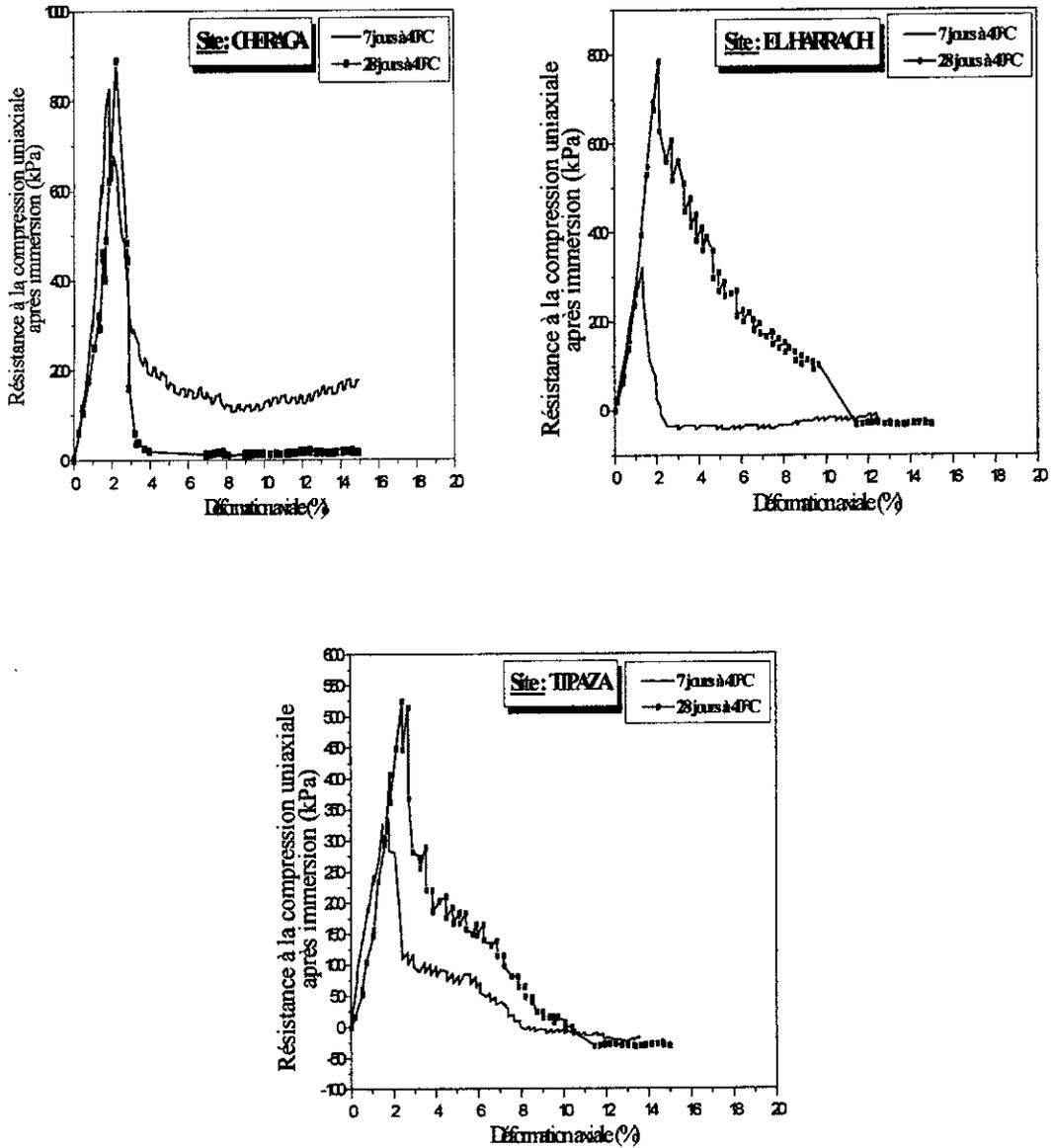


Figure 4.21 : Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction du temps de cure pour des marnes traitées avec 4% de chaux.

D'après la figure 4.21, la résistance à la compression maximale augmente avec l'augmentation du temps de cure pour à une température de 40°C pour les échantillons d'El Harrach et Tipaza. Pour les marnes de Cheraga la résistance maximale a augmenté légèrement après les 28 jours de cure, une augmentation de 8 % a été notée.

4.4.3.2 Résultats de l'essai de compression uniaxiale des marnes traitées au ciment

Pour étudier l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la quantité de ciment nous avons réalisé l'essai de compression uniaxiale selon la norme française NF P94-077 sur des marnes additionnées de 4% et 8 % de ciment. Les éprouvettes d'essais ont subi une cure de 7 jours sous une température de 40°C. Ensuite après la période de cure une partie de ces éprouvettes a été écrasée et l'autre partie a subi une saturation pendant 24 heures avant l'écrasement. Les résultats obtenus sont représentés dans les figures 4.22 à 4.27:

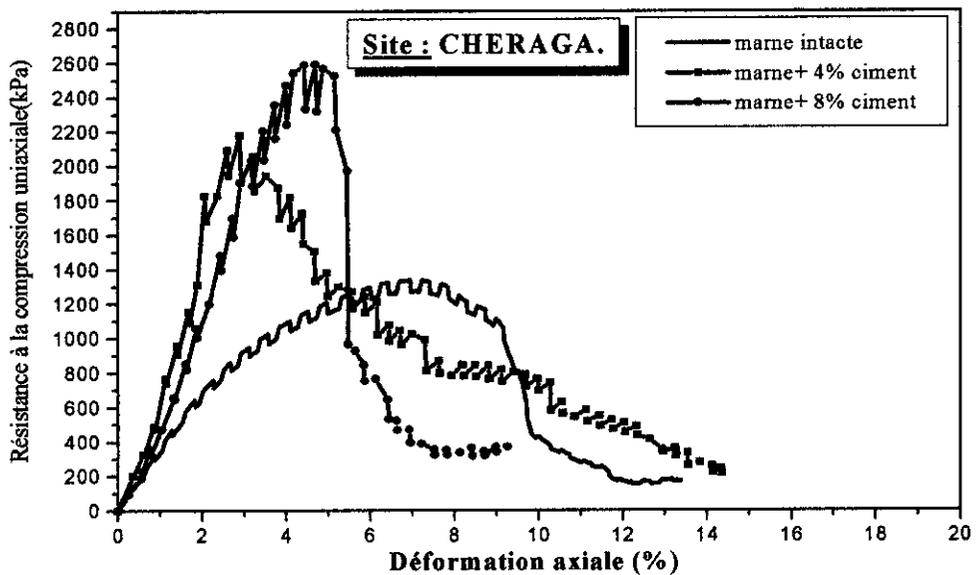


Figure 4.22 : Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la quantité de ciment additionnée pour le site de Cheraga.

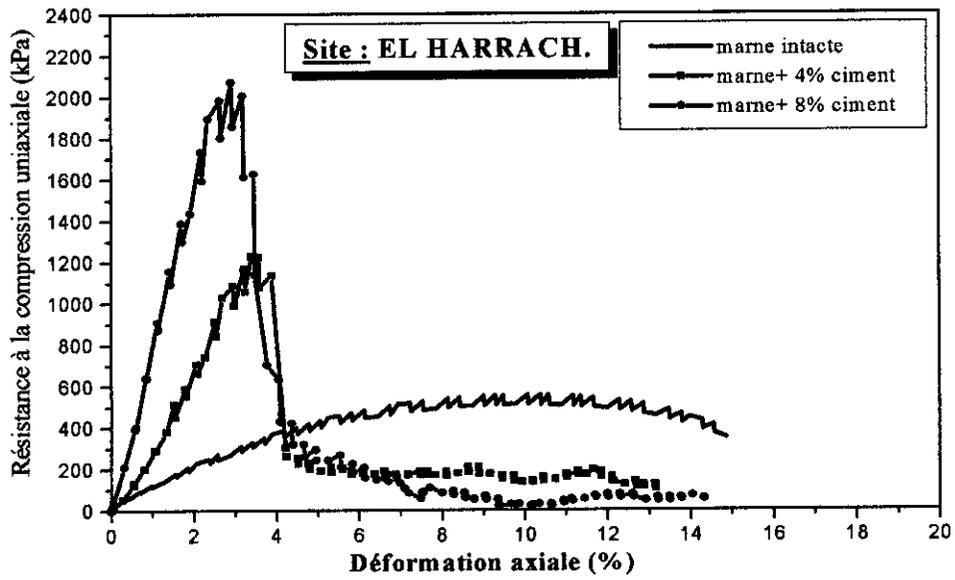


Figure 4.23 : Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la quantité de ciment additionnée pour le site de El harrach.

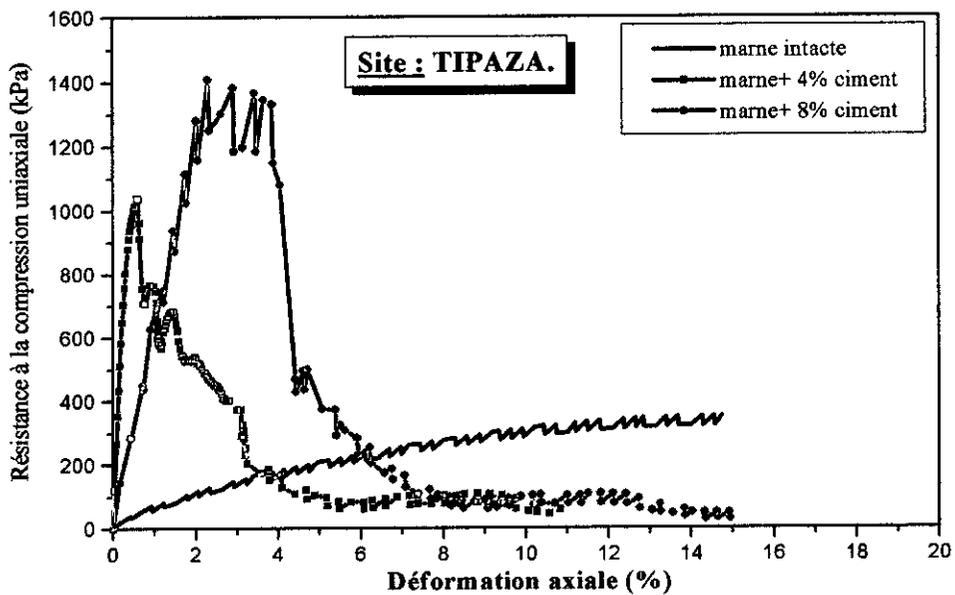


Figure 4.24 : Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la quantité de ciment additionnée pour le site de Tipaza.

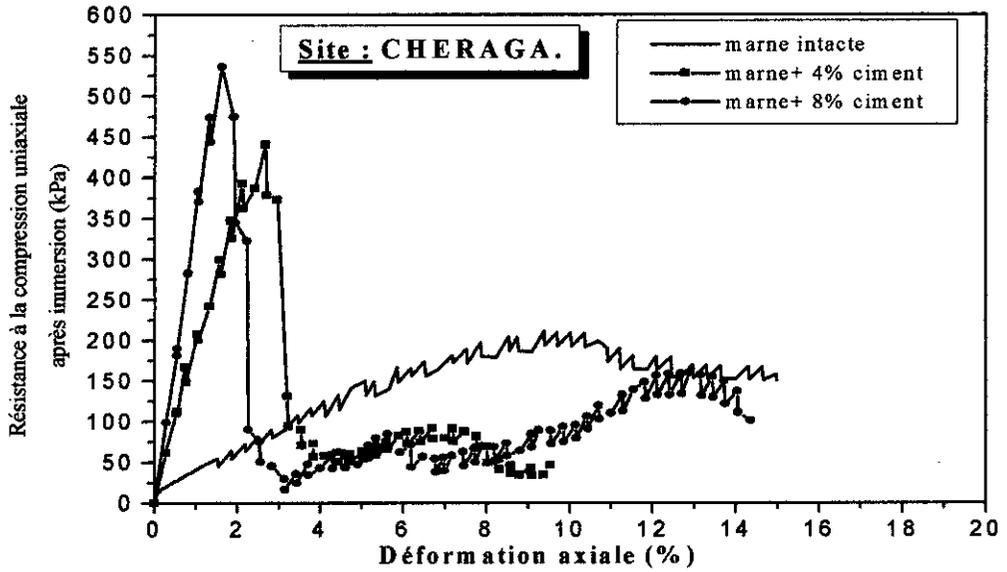


Figure 4.25 : Evolution de la résistance à la compression uniaxiale après immersion en fonction de la quantité de ciment additionné pour le site de Cheraga.

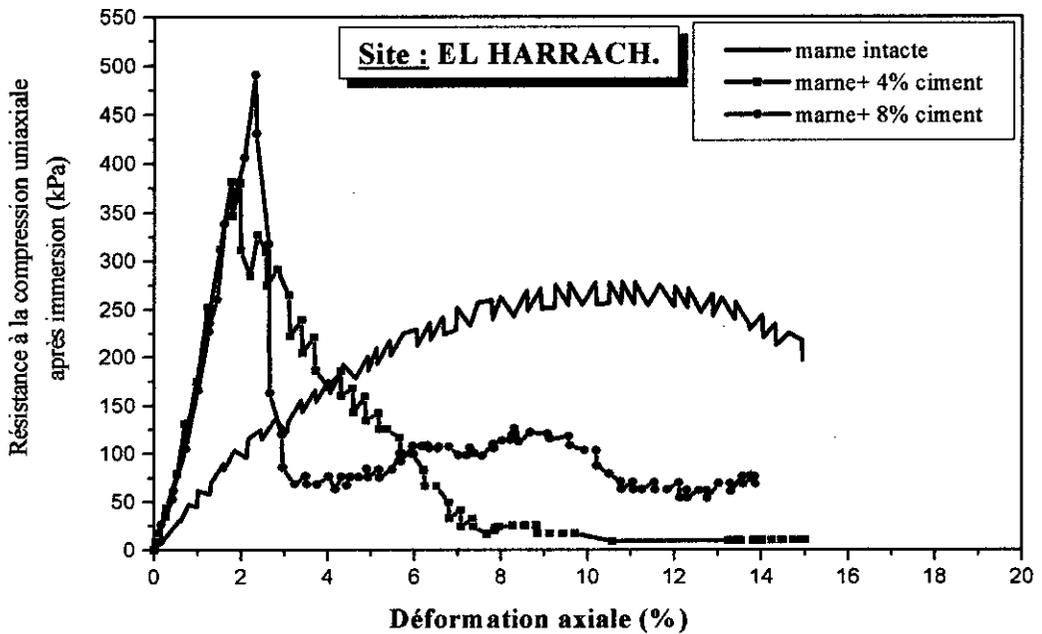


Figure 4.26 : Evolution de la résistance à la compression uniaxiale après immersion en fonction de la quantité de ciment additionnée pour le site de El harrach.

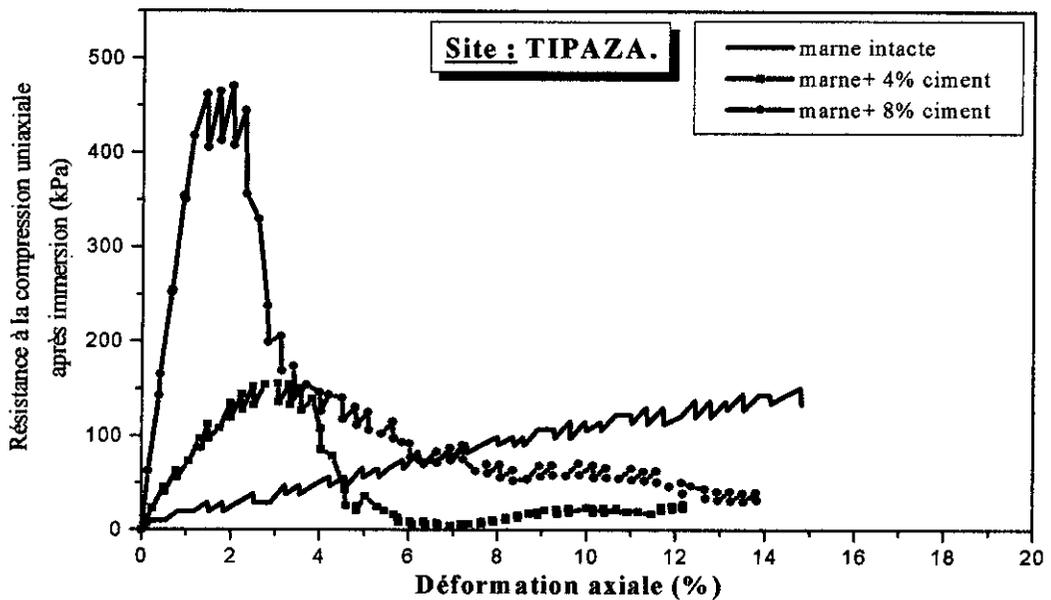


Figure 4.27 : Evolution de la résistance à la compression uniaxiale après immersion en fonction de la quantité de ciment additionnée pour le site de Tipaza.

Le comportement des ces sols après le traitement au ciment est le même dans les trois sites : la résistance à la compression uniaxiale augmente en fonction des déformations axiales puis diminue subitement après la rupture. La résistance à la compression maximale augmente en fonction de la quantité de ciment additionné.

4.5 Conclusion

D'après les différents résultats obtenus, il en ressort que le traitement des marnes à la chaux et au ciment a pour effet de :

- Diminuer la plasticité : la limite de plasticité et la limite de liquidité augmentent, l'indice de plasticité diminue en fonction de la quantité de chaux et de ciment rajouté ;
- Réduire les variations volumiques : la limite de retrait augmente après l'ajout de chaux impliquant que le sol est devenu moins rétractable. Le taux de gonflement obtenu par l'essai CBR et l'indice de gonflement C_g déterminé par l'essai oedométrique ont diminué après le traitement à la chaux et au ciment.
- Diminuer la compressibilité après l'ajout de chaux et de ciment qui se manifeste par l'augmentation de la contrainte de préconsolidation.

- Augmenter la résistance du sol marneux après l'ajout de chaux et de ciment : l'indice CBR et la résistance à la compression uniaxiale ont augmenté après le traitement. La quantité de chaux optimale pour des résistances maximales est de 4 % et 8%.

CHAPITRE 5

DISCUSSIONS

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, les résultats présentés précédemment sont analysés et discutés. La relation entre les différents paramètres entrant dans cette investigation et leurs impacts sur le sol traité sont établis pour une meilleure compréhension de ces paramètres sur le comportement des marnes traitées.

5.2 Effet des ajouts (chaux et ciment) sur la consistance du sol traité

La limite de plasticité et la limite de liquidité augmentent en fonction du pourcentage de chaux et de ciment additionné. Ceci entraîne une diminution de l'indice de plasticité pour l'ensemble des échantillons représentant les trois sites d'emprunts (figure 5.1 et 5.2).

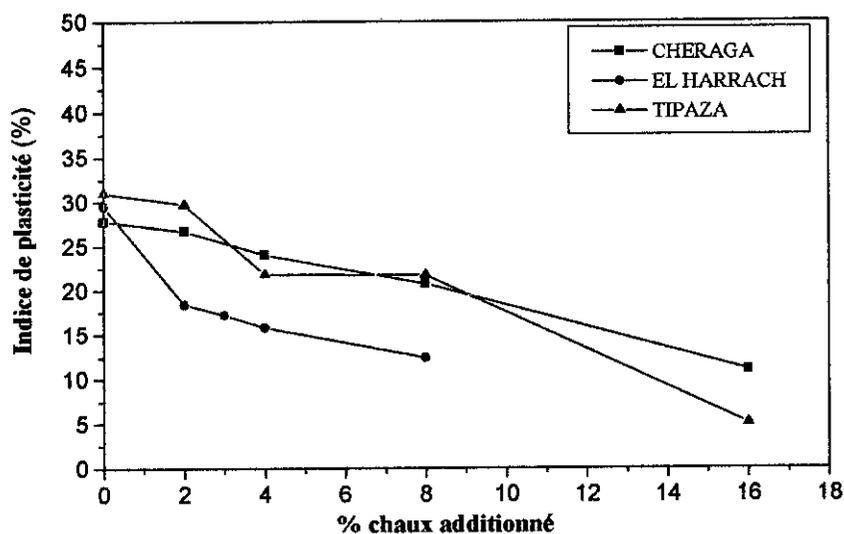


Figure 5.1 : Variation de la plasticité en fonction de la quantité de chaux ajoutée.

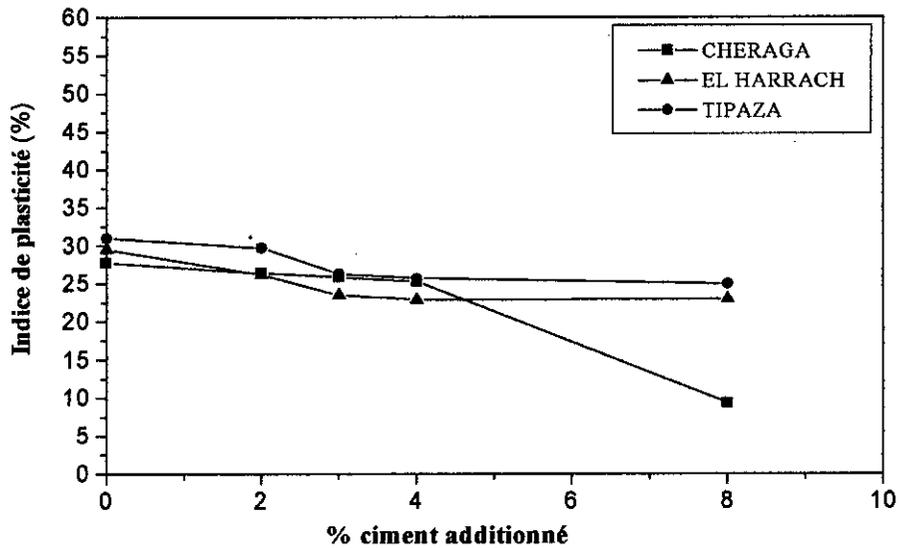


Figure 5.2 : Variation de la plasticité en fonction de la quantité de ciment ajoutée.

La diminution de l'indice de plasticité est causée par plusieurs mécanismes qui se produisent à la surface de la particule argileuse après l'ajout de chaux et de ciment.

La double couche de Gouy – Chapman qui entoure le feuillet argileux est composée d'une couche compacte de charge positive et d'une couche diffuse. L'épaisseur de la double couche dépend de la charge de surface du feuillet argileux. La charge de surface argileuse est négative, en ajoutant de la chaux (ou du ciment) ou plus précisément les cations de Ca^{++} un échange cationique se produit : les cations de Ca^{++} vont remplacer les cations de faibles valences présents dans la particule argileuse, conduisant à la réduction de l'épaisseur de la double couche (K^{-1}) selon la formule suivante [14, 15, 21, 48] :

$$\frac{1}{K} = \sqrt{\frac{\epsilon_{liq} k_B T}{8\pi C_{liq} e_c^2 Z^2}}$$

K^{-1} : épaisseur de la double couche.

ϵ_{liq} : constante diélectrique du milieu liquide.

k_B : constante de Boltzmann.

T : température.

C_{liq} : concentration ionique (ions / m^3).

e_c : charge électronique.

Z : valence des cations.

Puisque la valence des cations et la charge électronique augmentent, la concentration ionique augmente donc l'épaisseur de la double couche diminue.

La diminution de l'épaisseur de la double couche réduit la distance entre les feuillets argileux qui conduit à leurs agglomérations et floculations.

La conséquence de l'échange cationique et la floculation est la diminution de la sensibilité du sol à l'eau d'où la réduction de sa plasticité.

L'augmentation de la limite de liquidité et de la limite de plasticité pour des sols argileux après un traitement à la chaux ou au ciment a été rapportée dans la littérature par différentes études [3, 54, 55, 60, 63, 64, 65]. Il a été démontré qu'il y a une relation directe entre la quantité de chaux et de ciment rajouté et les paramètres de consistance du sol traité, où l'effet de l'ajout de chaux et de ciment avait pour conséquence l'augmentation de la limite de liquidité et de la limite de plasticité et une diminution de l'indice de plasticité.

5.3 Effet des ajouts (chaux et ciment) sur les variations volumiques

L'effet de la chaux et du ciment sur les variations volumiques a été mesuré par les essais suivants : essai de dessiccation, essai œdométrique et essai CBR. Les résultats obtenus à partir de l'essai de dessiccation réalisé sur des échantillons de sol traité avec de la chaux montrent une réduction du retrait (figure 5.3). Le gonflement des marnes étudiées est réduit suite au traitement à la chaux et au ciment comme l'indique les figures 5.4 et 5.5.

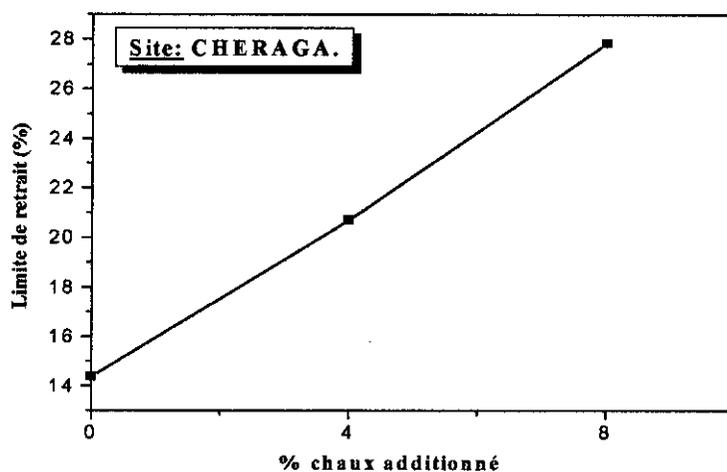


Figure 5.3 : Variation de la limite de retrait en fonction de la quantité de chaux additionnée.

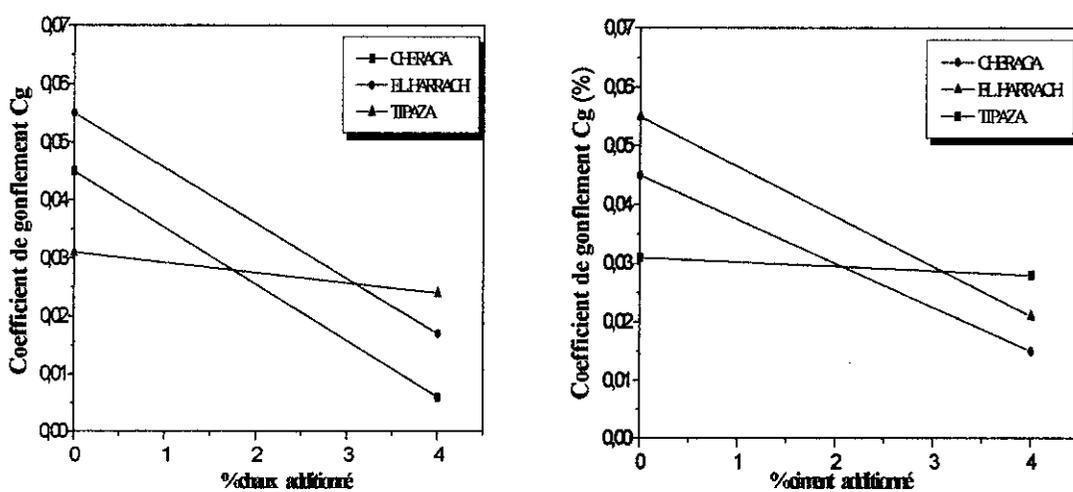


Figure 5.4 : Variation de coefficient de gonflement en fonction de la quantité de chaux / ciment ajoutée.

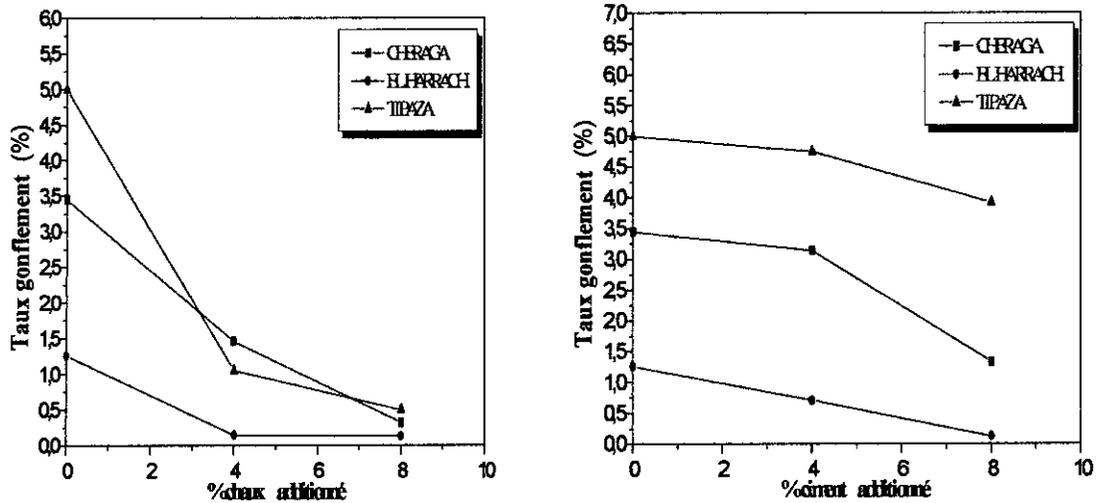


Figure 5.5 : Variation du taux de gonflement après 4 jours d'imbibation en fonction de la quantité de chaux / ciment ajoutée.

La réduction du retrait et du gonflement des échantillons provenant des trois sites étudiés après l'ajout de chaux et de ciment sont conformes aux résultats rapportés par d'autres études réalisées sur des sols argileux [60,65]. En effet, ces études ont montré que le coefficient de gonflement C_g et le taux de gonflement diminuent après un ajout de chaux ou de ciment. La limite de retrait W_s augmente après l'ajout de chaux.

Ces changements sont causés par l'échange cationique et la floculation qui se produit après l'ajout de la chaux et de ciment réduisant ainsi la sensibilité du sol à l'action de l'eau et stabilisant par conséquent son retrait et son gonflement

5.4 Effet des ajouts (chaux et ciment) sur les caractéristiques de compactage

Plusieurs études ont montré que l'ajout de chaux ou de ciment au sol argileux a pour effet de réduire sa densité sèche maximale et d'augmenter sa teneur en eau optimale [2, 3, 45, 47, 60, 58, 74, 75]. En effet, le traitement à la chaux et au ciment des marnes étudiées a conduit à une réduction de densité sèche maximale et une augmentation de sa teneur en eau optimale comme l'indique les figures 5.6 et 5.7.

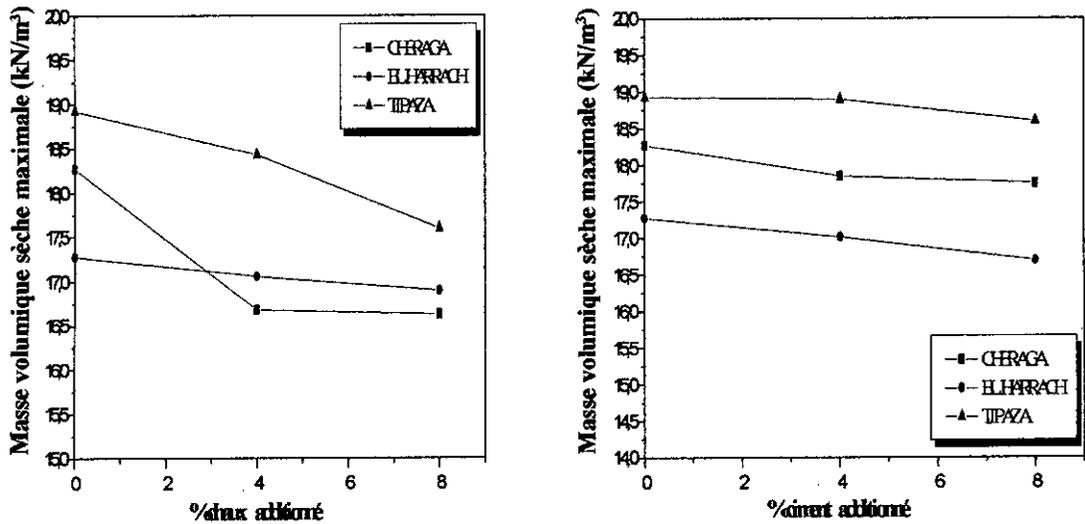


Figure 5.6 : Variation de densité sèche maximale en fonction de la quantité de chaux / ciment ajoutée.

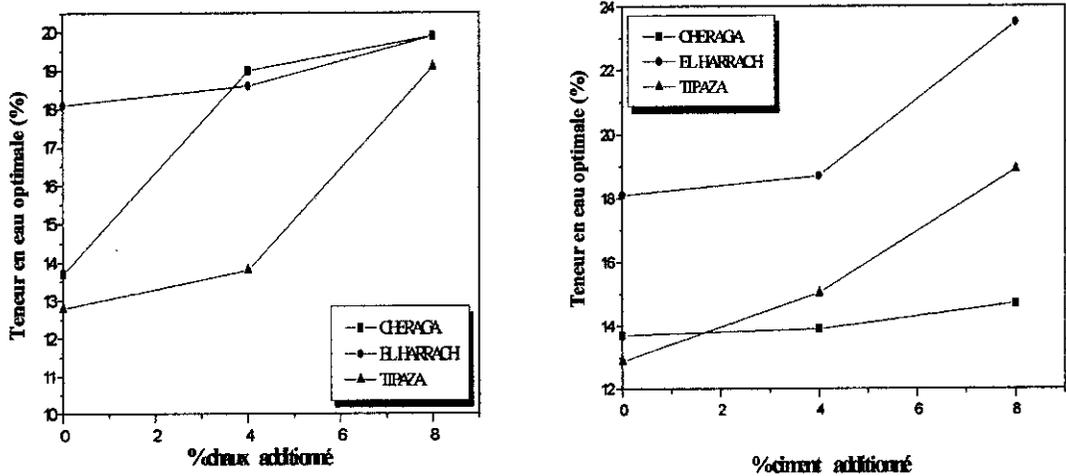


Figure 5.7 : Variation de teneur en eau optimale en fonction de la quantité de chaux / ciment ajoutée.

En ajoutant la chaux ou du ciment au sol, plusieurs réactions se produisent (échanges cationiques), ces réactions nécessitent un surplus d'eau par rapport au sol non traité, c'est ainsi que la teneur en eau optimale du sol augmente après le traitement à la chaux.

La diminution de la densité sèche maximale après le traitement est due à la formation des produits de cimentation. Le sol sera plus dur à compacter réduisant ainsi sa densité.

Ces modifications des optimums Proctor ne doivent pas être considérées comme un inconvénient, au contraire elles indiquent que la chaux et le ciment ont réagi avec le sol et qu'à long terme il y aura une augmentation de la résistance du sol.

5.5 Effet des ajouts sur la résistance

5.5.1 Effet de la chaux

Après les modifications qui se produisent instantanément après l'ajout de chaux au sol argileux causées par l'échange cationique et la floculation des particules argileuses, à long terme les réactions pouzzolaniques se produisent pour donner des agents de cimentation qui en durcissant rendent le sol plus rigide et plus résistant. C'est ainsi qu'après un rajout de chaux au sol marneux et après un certain temps de cure, une augmentation de la résistance est obtenue. Ceci est reflété par l'augmentation de l'indice CBR et la résistance à la compression uniaxiale comme l'indique les figures 5.8 et 5.9.

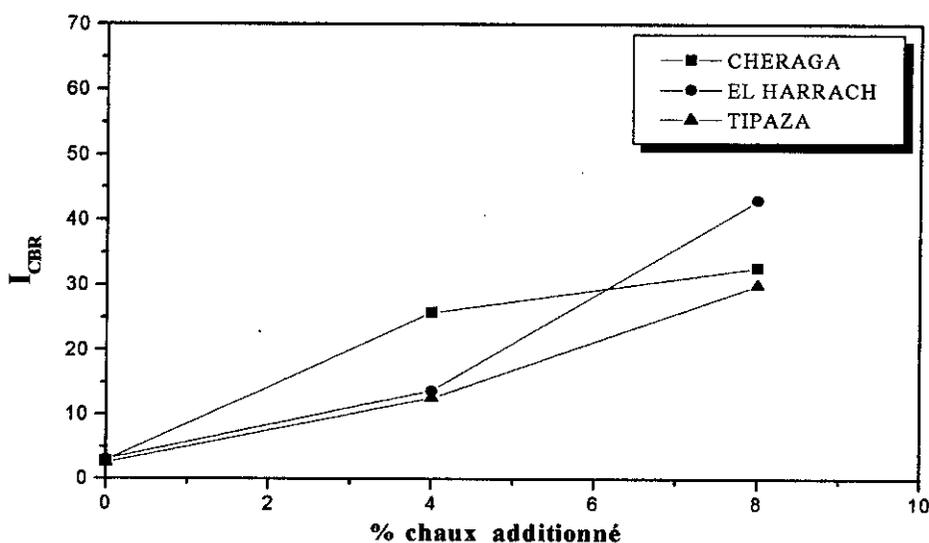


Figure 5.8 : Variation de l'indice CBR en fonction de la quantité de chaux ajoutée.

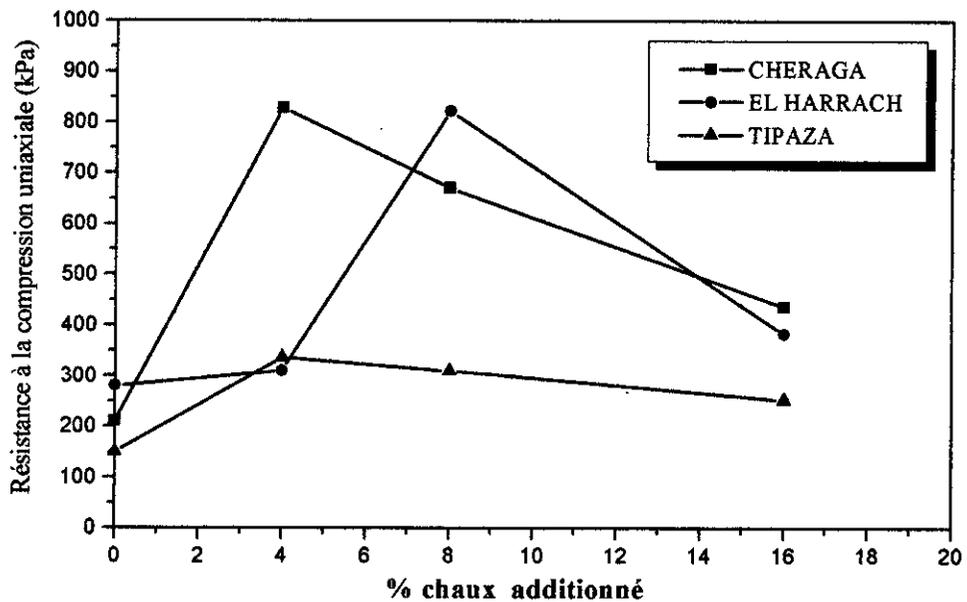


Figure 5.9 : Variation de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la quantité de chaux ajoutée.

La résistance à la compression uniaxiale atteint une valeur maximale puis diminue au-delà d'une quantité de chaux dite optimale. En effet, plusieurs études faites sur des sols argileux traités à la chaux ont démontré que la résistance à la compression de ces sols ne varie pas linéairement en fonction de la quantité de chaux rajoutée [2, 3]. Il a été noté que cette augmentation de la résistance du sol est due à différentes réactions chimiques entre les minéraux argileux et la chaux résultant de la précipitation des produits de cimentation qui vont lier les particules argileuses entre eux. Au-delà de la quantité optimale aucun effet sur l'augmentation de la résistance du sol n'est observé. Ceci s'explique par la chaux elle-même car elle ne possède pas de cohésion ou d'angle de frottement appréciable [3].

- Effet de la cure (temps et température) sur la résistance à la compression

Plusieurs travaux réalisés sur des sols argileux traités à la chaux ont illustré l'effet des conditions de cure sur le développement de la résistance après le traitement à la chaux. Il a été noté que la résistance augmente après l'augmentation du temps et de la température de cure [3, 45, 52, 55, 60, 65, 69].

La résistance qui se développe après le traitement à la chaux dépend des réactions pouzzolaniques qui eux même dépendent du temps et de la température de cure [55]. Comme l'indique la figure 5.10, pour une même température la résistance à la compression du sol traité avec 4% de chaux augmente en fonction du temps.

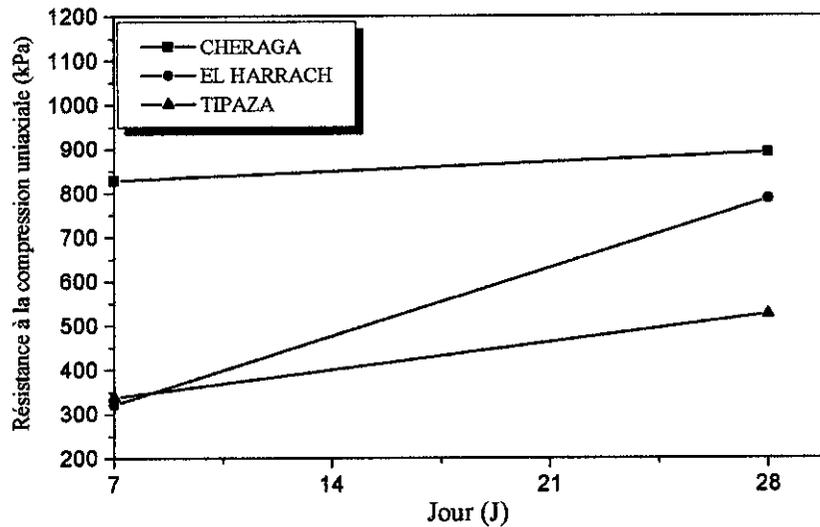


Figure 5.10 : Variation de la résistance à la compression uniaxiale en fonction du temps de cure après un ajout de 4% de chaux.

Pour ce qui concerne l'effet de la température de cure, les résultats obtenus montrent que la résistance du sol traité et ayant subi une cure de 7 jours augmente après une augmentation de la température de cure de 20 à 40°C (figure 5.11). Une température élevée accélère les réactions pouzzolaniques d'où le développement rapide de la résistance, mais même avec une faible température la résistance du sol traité atteint son maximum mais avec plus de temps [55].

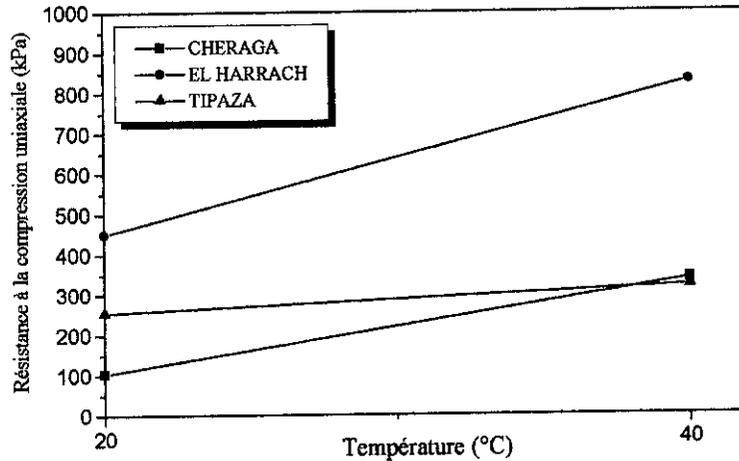


Figure 5.11 : Variation de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la température de cure après un ajout de 4% de chaux.

- Effet de l'imbibation sur la résistance à la compression

L'imbibation des échantillons de sol avant l'essai de compression simule les conditions défavorables que le sol peut rencontrer. L'imbibation altère une partie des composés de cimentation formés après les réactions de stabilisation [45, 70]. C'est ainsi que la résistance est réduite après une imbibation de 24 heures comme l'indique la figure 5.12.

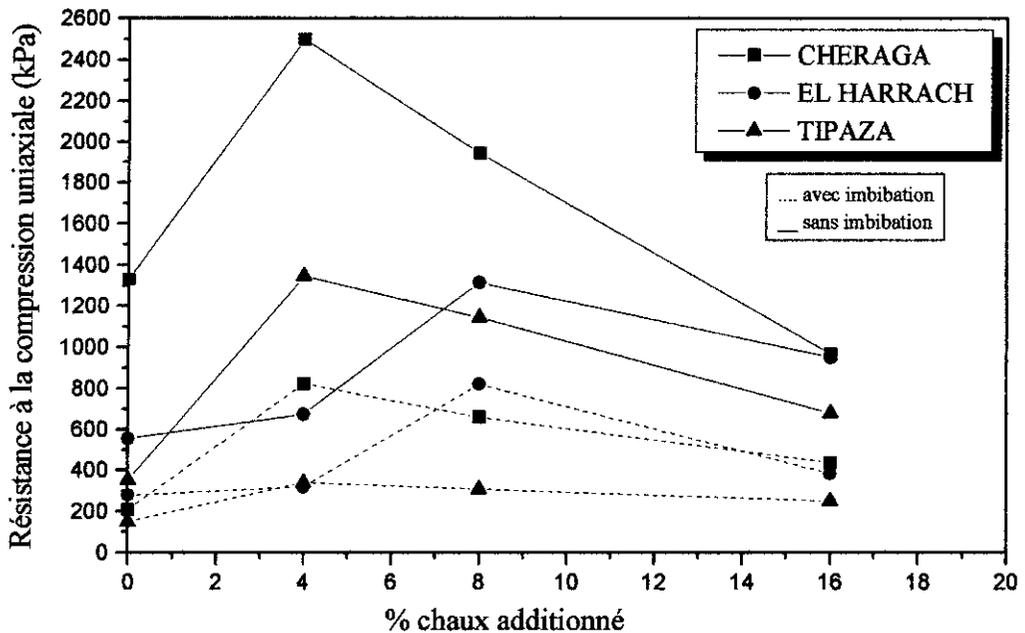
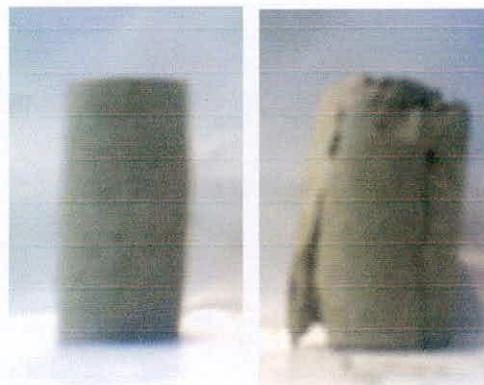
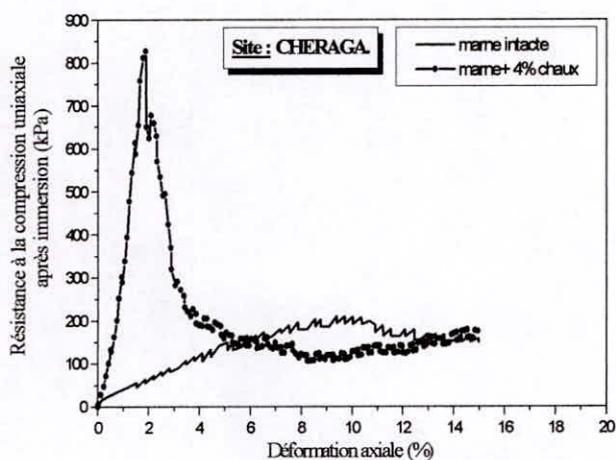


Figure 5.12 : Variation de la résistance à la compression uniaxiale avec et sans imbibation avant la compression.

Même si la résistance est réduite après l'immersion, la résistance du sol traité est supérieure à celle du sol non traité. Ces résultats sont conformes à ceux observés dans d'autres travaux ayant fait l'objet d'étudier l'effet de l'imbibation sur la résistance des sols argileux traités à la chaux [45, 69, 70]

- Mode de rupture

Plusieurs auteurs ont rapportés du fait du changement du comportement des sols argileux après le traitement à la chaux au cours du cisaillement. Le mode de rupture du sol passe du mode de rupture ductile à celui du mode de rupture fragile [3, 58]. Ceci est bien illustré par les figures 5.13 à 5.15 avec des marnes traitées à la chaux provenant des trois sites d'emprunts.



.a.

.b.

Figure 5.13 : Comportement des marnes de Cheraga avant et après le traitement à la chaux.

a. éprouvette d'essai intacte.

b. éprouvette d'essai contenant 4% de chaux.

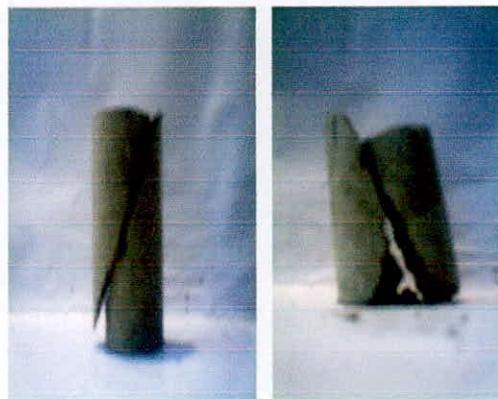
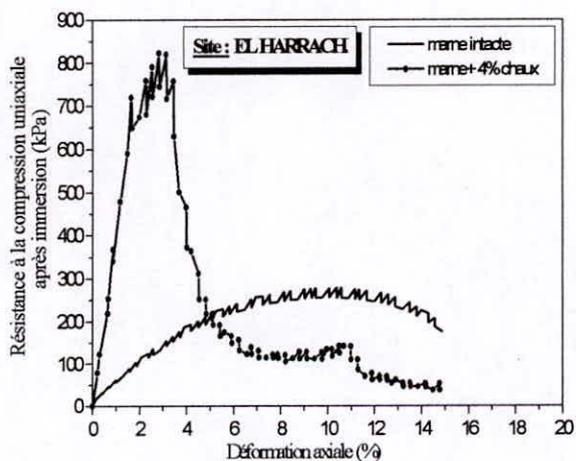


Figure 5.14 : Comportement des marnes d'El harrach avant et après le traitement à la chaux.

a. éprouvette d'essai intacte.

b. éprouvette d'essai contenant 8% de chaux.

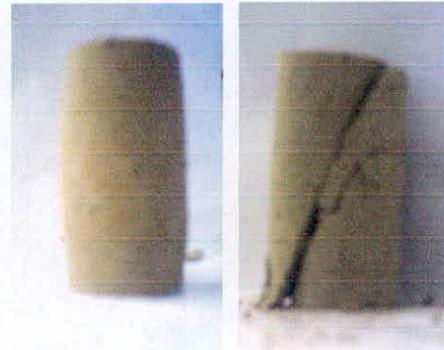
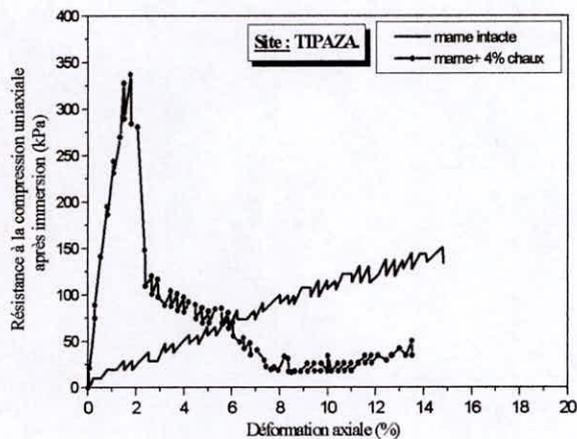


Figure 5.15 : Comportement des marnes de Tipaza avant et après le traitement à la chaux.

a. éprouvette d'essai intacte.

b. éprouvette d'essai contenant 4% de chaux.

Ce changement dans le comportement du sol après l'ajout de chaux est la conséquence de la cimentation du sol.

5.5.2 Effet du ciment

Après les modifications qui se produisent instantanément après l'ajout de ciment au sol argileux à long terme les réactions pouzzolaniques et d'hydratation du ciment se produisent pour donner des agents de cimentation qui en durcissant rendent le sol plus rigide et plus résistant. C'est ainsi qu'après l'ajout de ciment au sol marneux et après un certain temps de cure, une augmentation de la résistance est obtenue. Ceci reflète l'augmentation de l'indice CBR et de la résistance à la compression uniaxiale comme l'indique les figures 5.16 et 5.17.

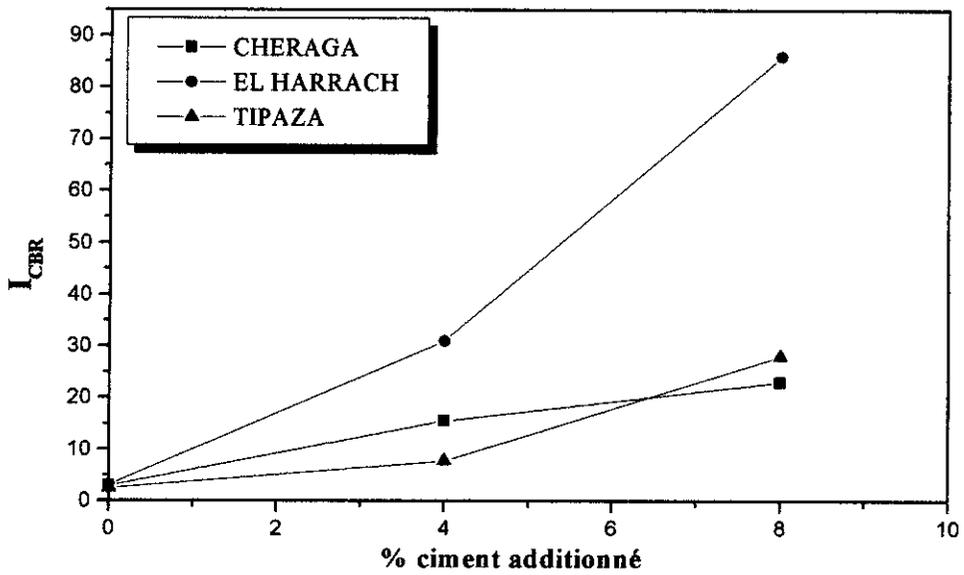


Figure 5.16 : Variation de l'indice CBR en fonction de la quantité de ciment ajoutée.

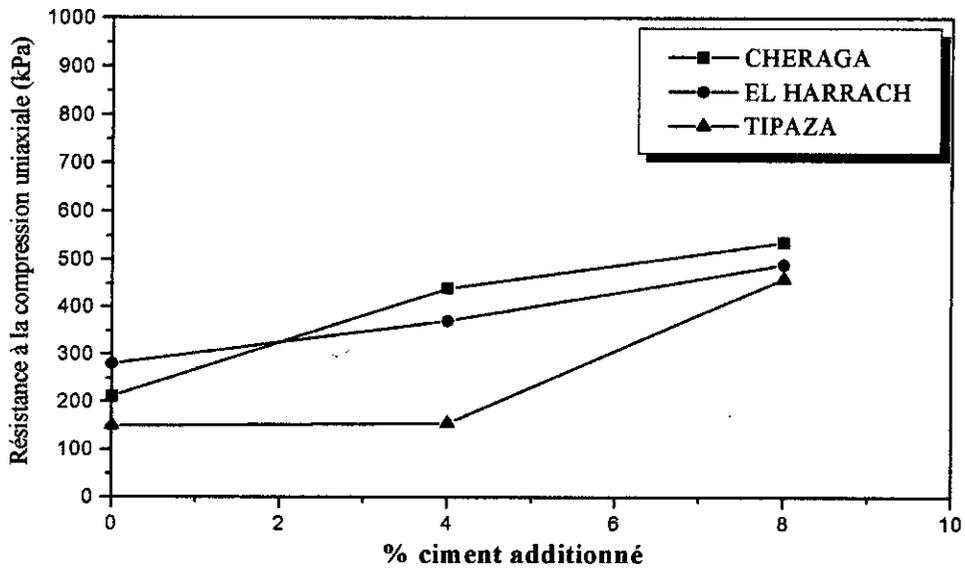


Figure 5.17 : Variation de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la quantité de ciment ajoutée.

Contrairement à la chaux il a été noté que la résistance à la compression uniaxiale augmente linéairement en fonction de la quantité de ciment additionnée comme ça a été

mentionné par plusieurs auteurs [47, 58, 69]. Cette augmentation de la résistance est la conséquence du durcissement des agents de cimentation produits, d'une part par la réaction d'hydratation du ciment et d'autre part, par la réaction pouzzolanique qui se produit entre la chaux libérée et les minéraux argileux (silice et alumine) [47, 58, 69].

- Effet de l'imbibation sur la résistance à la compression

De même que pour la chaux, l'imbibation des échantillons de sol traités avec du ciment avant l'essai de compression détruit une partie des composés formés après les réactions de stabilisation, c'est ainsi que la résistance des marnes est réduite après une imbibation de 24 heures comme l'indique la figure 5.18.

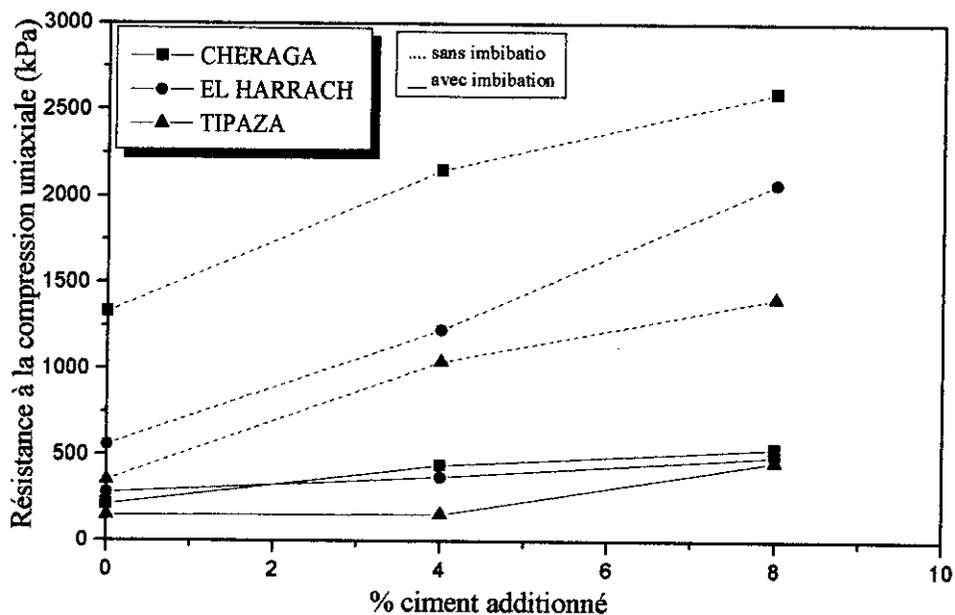


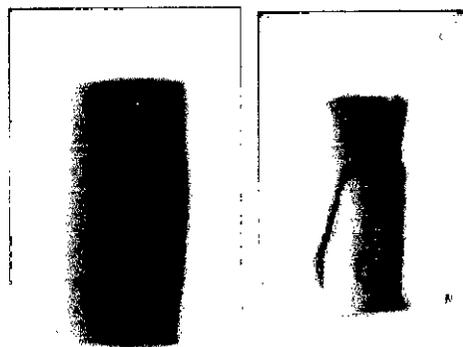
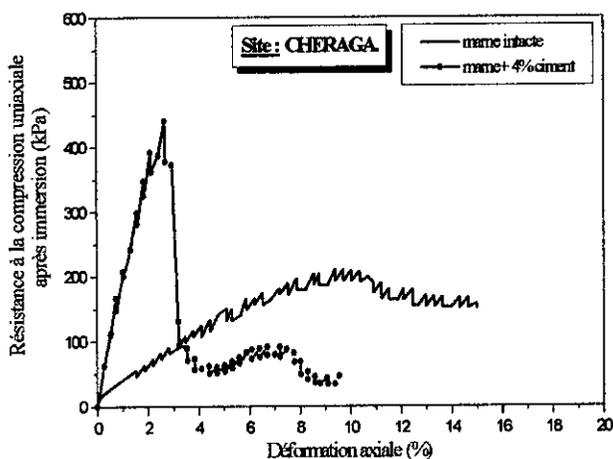
Figure 5.18 : Variation de la résistance à la compression uniaxiale avec et sans imbibation avant la compression.

Même si la résistance est réduite après l'immersion, la résistance du sol traité reste supérieure à celle du sol non traité. Ces résultats sont conformes à ceux observés dans d'autres travaux [69, 70].

- Mode de rupture

La même allure est observée comme dans le cas du traitement à la chaux pour le mode de rupture des échantillons traités au ciment. Après le traitement le mode de rupture passe du mode ductile au mode fragile.

Comme l'illustre les figures 5.19 à 5.21, les résultats obtenus des marnes traitées au ciment confirme ce changement de comportement. Ce changement dans le comportement du sol après l'ajout de ciment est causé par la cimentation du sol [58].



.a.

.b.

Figure 5.19 : Comportement des marnes de Chéraga avant et après le traitement au ciment.

a. éprouvette d'essai intacte.

b. éprouvette d'essai contenant 4% de ciment.

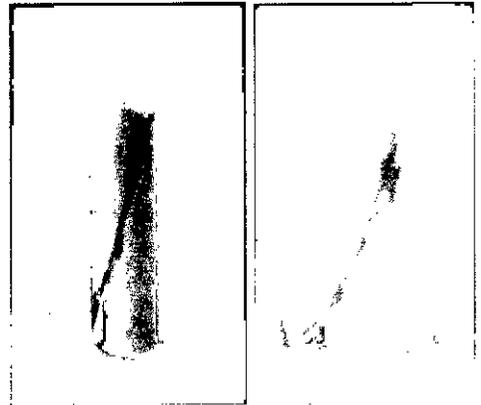
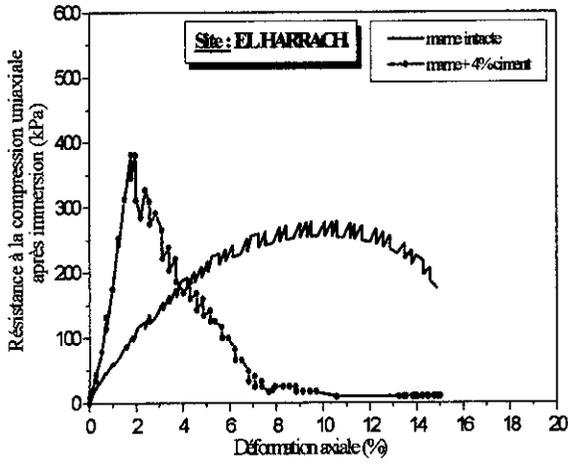


Figure 5.20 : Comportement des marnes d'El harrach avant et après le traitement au ciment.

- a. éprouvette d'essai intacte.
- b. éprouvette d'essai contenant 4% de ciment.

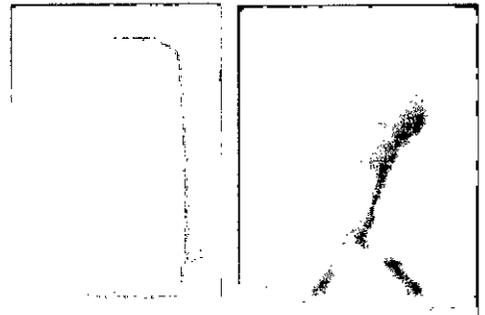
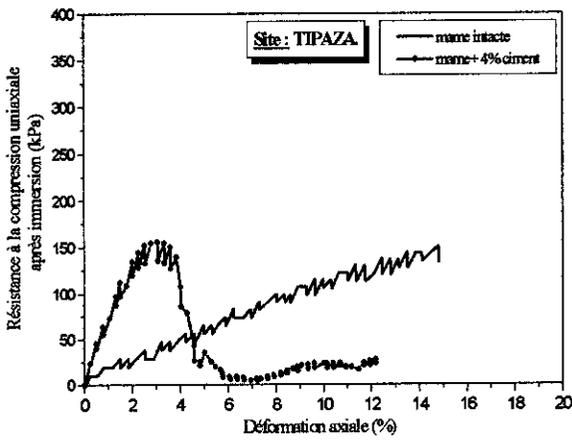


Figure 5.21 : Comportement des marnes de Tipaza avant et après le traitement au ciment.

- a. éprouvette d'essai intacte.
- b. éprouvette d'essai contenant 4% de ciment.

5.6 Effet des ajouts (chaux et ciment) sur la compressibilité à l'oedomètre du sol traité

La courbe $(e, \log \sigma)$ issue de la compression unidimensionnel après rajout d'une quantité de chaux ou de ciment tend à s'aplatir montrant une allure plus linéaire avant le point de cassure signalant l'effondrement. L'augmentation de la contrainte de préconsolidation indique un comportement similaire à celui d'un sol préconsolidé malgré que les échantillons aient été tous compactés sous une même énergie manuelle de compaction. Cette augmentation dans la contrainte de préconsolidation pour les échantillons compactés sous un effort égal reflète la présence de liens entre les particules argileuses causées par la précipitation des éléments de cimentation. Ceci explique la diminution de l'indice de recompression et de l'indice de gonflement ainsi que l'augmentation de contrainte de préconsolidation et de l'indice compression. L'ajout de chaux et de ciment a pour effet d'augmenter la rigidité du sol et par conséquent de diminuer sa compressibilité. Ces résultats confirment encore ce qui a été rapporté dans la littérature l'effet de la chaux et du ciment sur la compressibilité [70, 76]

5.7 Comparaison entre le traitement à la chaux et le traitement au ciment

5.7.1 La plasticité

La figure 5.22 montre la variation de l'indice de plasticité en fonction du pourcentage d'additive rajouté au sol étudié pour les sites de Cheraga, El harrach et Tipaza. Comme il peut se voir sur la figure 5.22, la chaux a plus d'effet sur la diminution de l'indice de plasticité que le ciment. Ceci est constaté pour tous les échantillons provenant des trois sites d'emprunts. En faite, la plasticité est modifiée suite aux échanges cationiques qui se produisent entre le Ca^{++} de la chaux et les minéraux argileux ; le ciment *tarde* à libérer de la chaux après les réactions d'hydratation, c'est pour cette raison qu'à courte terme la chaux est plus apte à réduire la plasticité que le ciment.

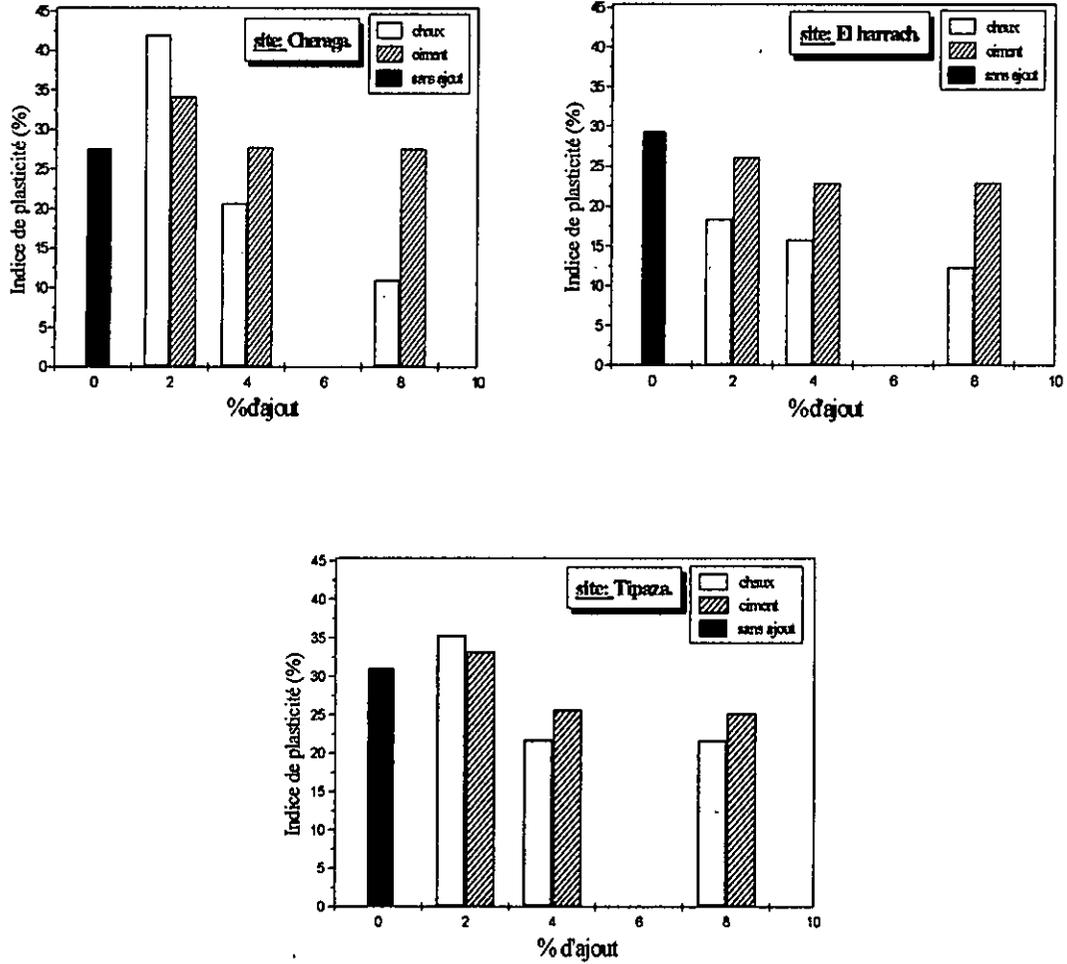


Figure 5.22 : Comparaison entre l'effet de la chaux et du ciment sur la plasticité.

5.7.2 Le gonflement

La variation du coefficient de gonflement obtenu à partir de l'essai oedométrique pour les différents échantillons provenant des trois sites d'étude et traités avec 4 % de chaux et de ciment est donnée dans le tableau 5.1. Comme il peut se voir, le C_g diminue après l'ajout de chaux et de ciment. Néanmoins, la réduction la mieux observée est dans le cas des sols traités à la chaux. D'autre part, le taux de gonflement déterminé à partir de l'essai CBR semble montrer la même tendance (figure 5.23). En effet, les sols traités à la chaux présentent des taux de gonflement faibles comparés à ceux donnés par le sol traité au ciment.

Tableau 5.1 : Comparaison entre l'effet de la chaux et du ciment sur l'indice de gonflement.

Cg	Cheraga	El Harrach	Tipaza
Marne intacte	0.045	0.055	0.031
Marne + 4%Chaux	0.006	0.017	0.024
Marne + 4% ciment	0.015	0.021	0.028

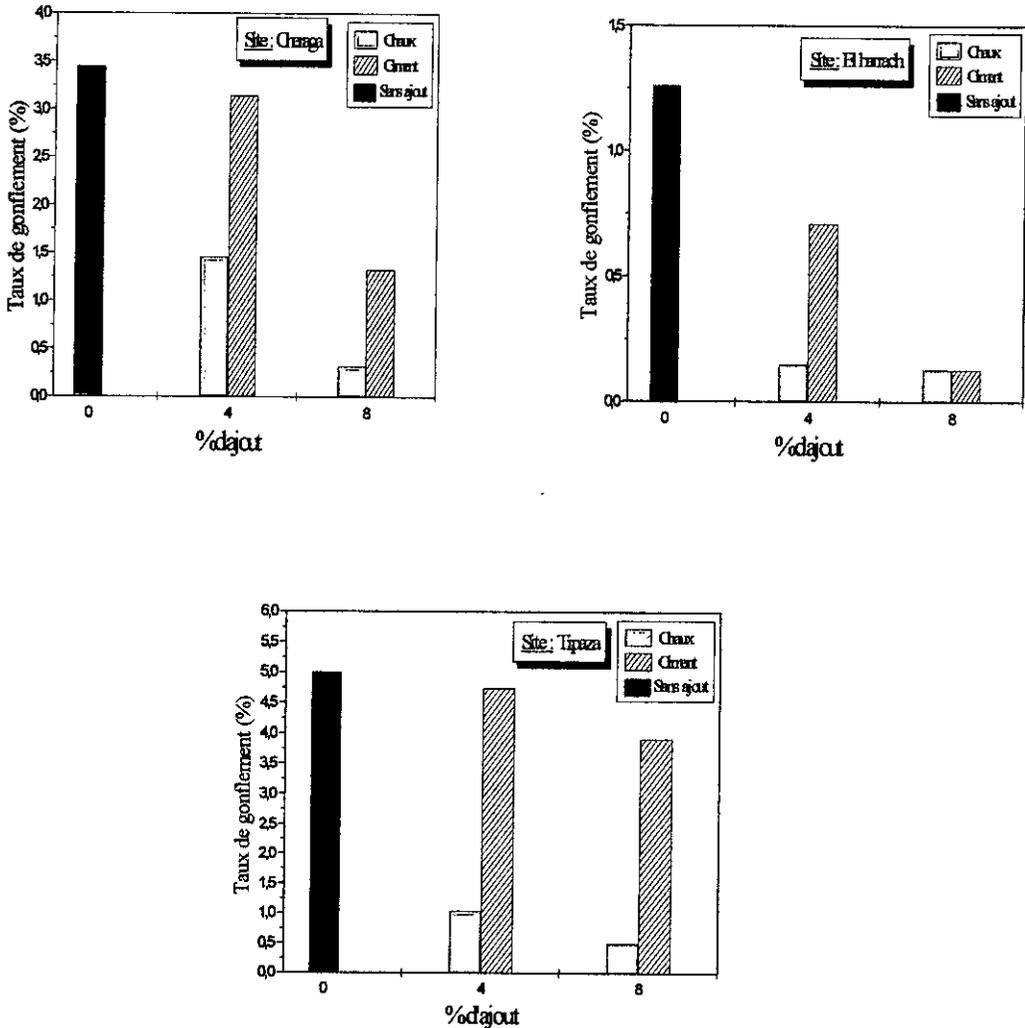


Figure 5.23 : Comparaison entre l'effet de la chaux et du ciment sur le taux de gonflement.

La chaux diminue plus rapidement que le ciment l'affinité du sol à l'action de l'eau, ainsi le gonflement des sols traités à la chaux est plus faible comparé aux sols traités au ciment. De plus la chaux réagit directement avec le sol argileux d'où cette diminution est plus ressentie.

5.7.3 La résistance

Comme l'indique la figure 5.24, la résistance au poinçonnement mesurée par l'essai CBR après 4 jours de cure a démontré que l'indice CBR des sols de Cheraga et Tipaza est plus important après le traitement à la chaux qu'avec le ciment ; tandis que le sol d'El harrach a enregistré une très grande augmentation de I'_{CBR} après l'ajout de ciment.

Le développement de la résistance des sols traités à la chaux est la conséquence des réactions pouzzolaniques, qui donnent des produits de cimentation durcissant avec le temps, ces réactions dépendent entre autre du type de minéraux argileux, tandis que l'augmentation de la résistance des sols traités avec du ciment est due en grande partie au durcissement des produits des réactions d'hydratation du ciment, où les minéraux argileux ne participent que peu. C'est ainsi que la différence du développement de la résistance des marnes de Cheraga et de Tipaza traités à la chaux par rapport à celle d'El harrach est due à la différence des minéraux argileux car certains minéraux réagissent plus rapidement tel que par exemple la montmorillonite. En effet, d'après les résultats de l'essai de compression uniaxiale, les sols d'El harrach traités à la chaux développent à long terme une résistance plus élevée que ceux traités au ciment.

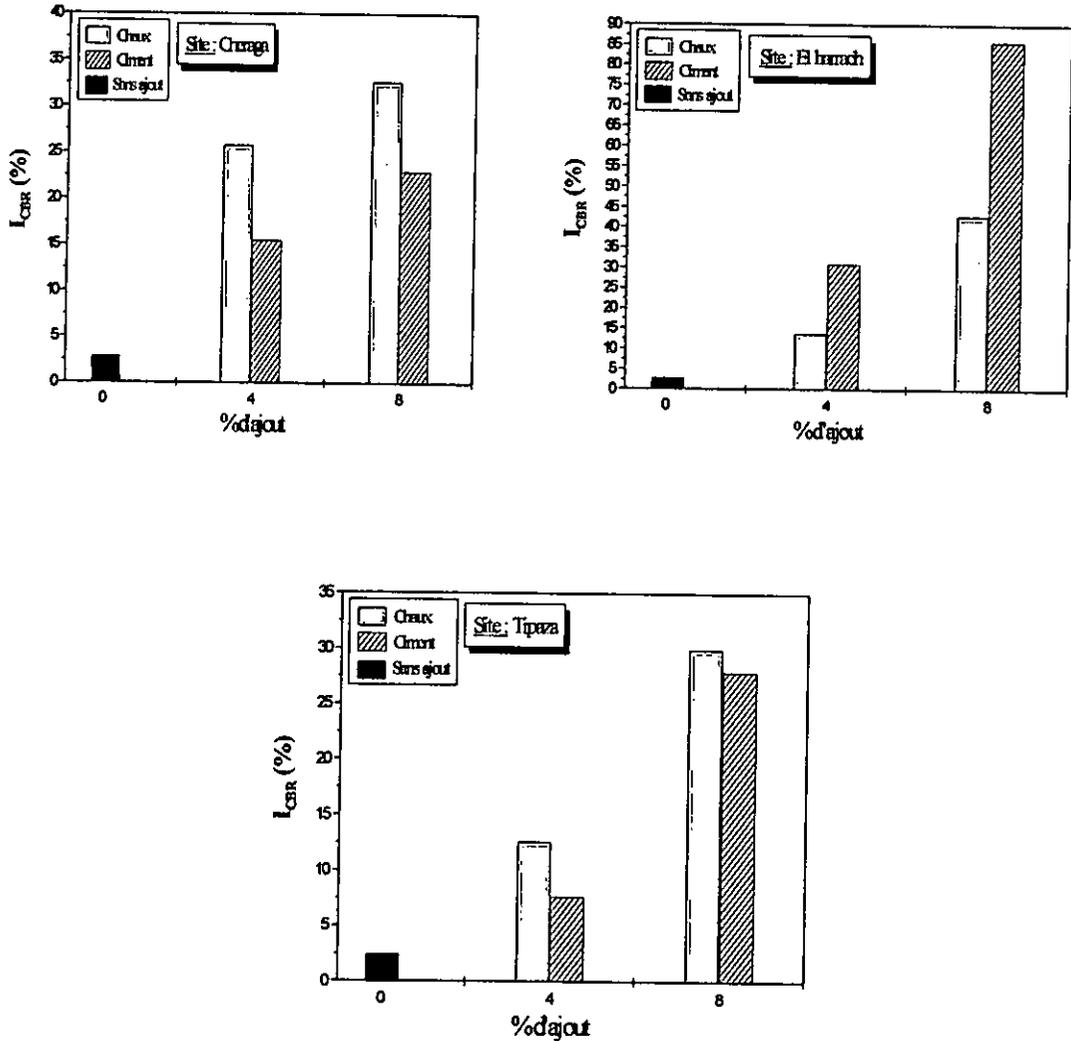


Figure 5.24 : Comparaison entre l'effet de la chaux et du ciment sur l'indice CBR.

Le calcul de la résistance à la compression uniaxiale des marnes traitées à la chaux et au ciment a permis d'avoir la figure 5.25. En comparant les résistances de compression uniaxiale (figure 5.25) des sols traités avec la quantité de chaux optimale (4% pour les sols de Cheraga et Tipaza et 8% pour les sols d'El Harrach) et celles des sols traités avec la même quantité de ciment, il peut être constaté que la résistance des mélanges sol - chaux est plus élevée que celle des mélanges sol - ciment.

Le traitement à la chaux s'opère en modifiant la structure interne du sol argileux (réaction pouzzolanique) tandis que le ciment hydraté pénètre le sol argileux qui en durcissant rend le sol plus résistant. Étant donné que les particules argileuses sont plus fines que les particules de ciment, ce dernier pénètre difficilement les sols argileux, c'est

pour ces raisons que les résistances qui se développent dans les mélanges sol – chaux sont plus importantes que celles développées dans les mélanges sol – ciment.

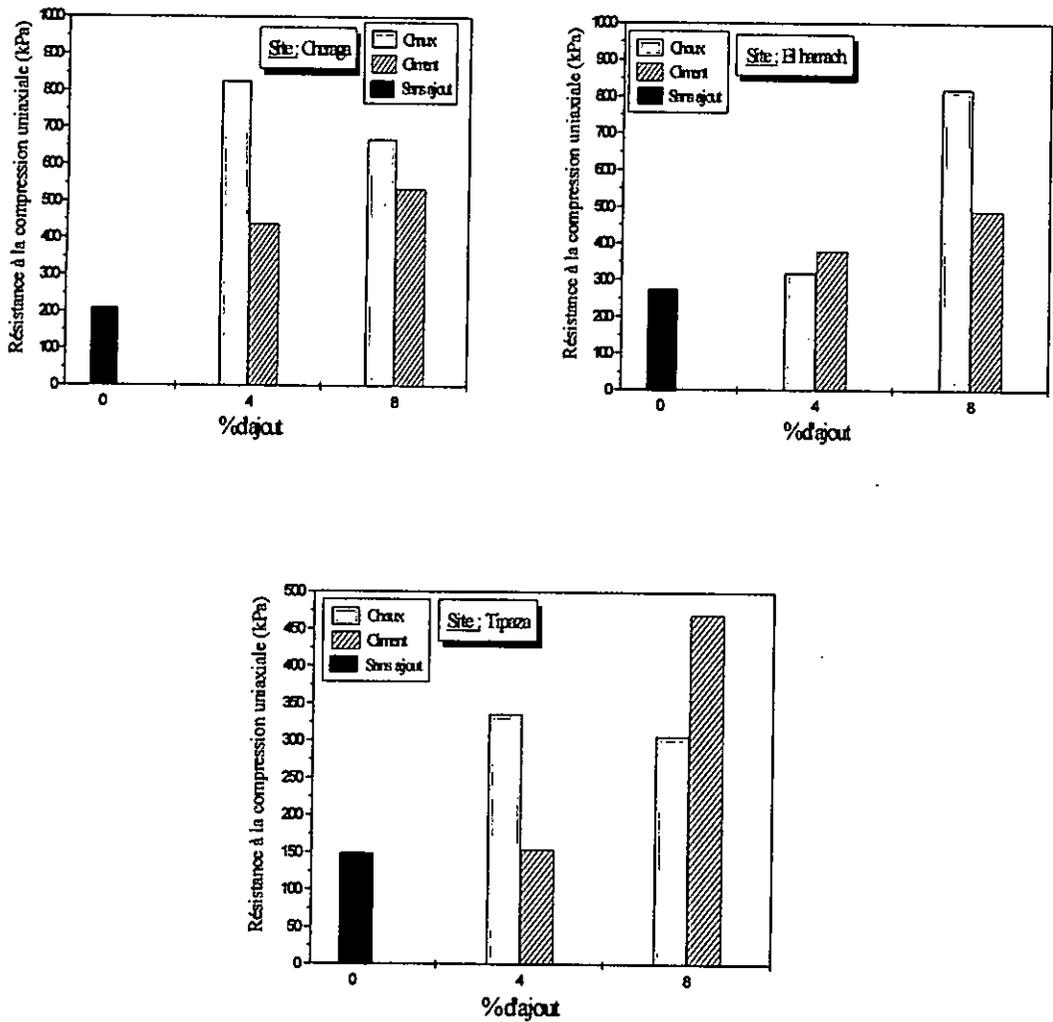


Figure 5.25 : Comparaison entre l'effet de la chaux et du ciment sur la résistance à la compression uniaxiale.

De plus, les pertes de résistances après imbibation sont plus importantes dans les mélanges sol - ciment (figure 5.26) donc les liens de cimentation développés par le traitement à la chaux sont plus résistants à l'action de l'eau que ceux produits par le ciment.

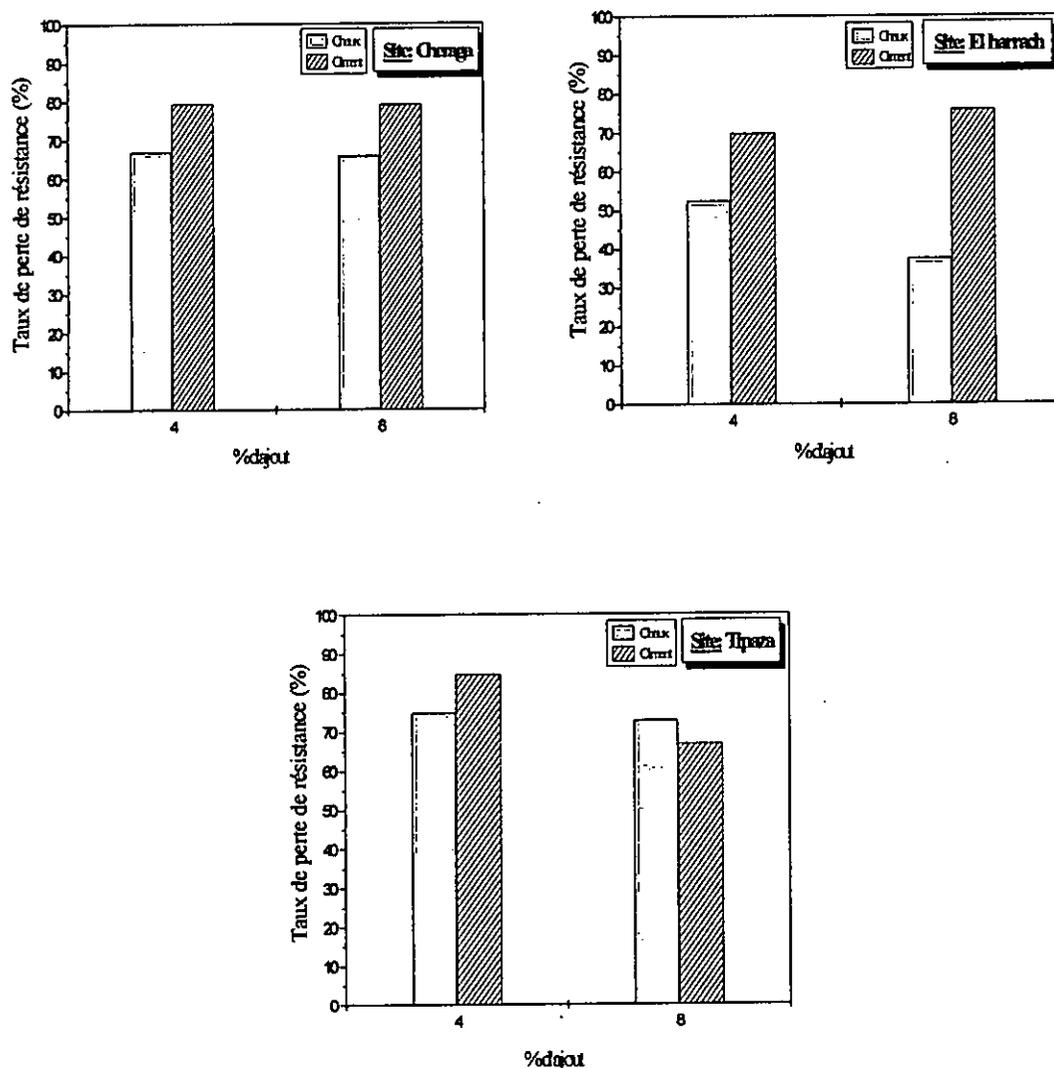


Figure 5.26 : Comparaison des taux de pertes de résistance des sols traités à la chaux et au ciment après imbibition.

5.7.4 Compressibilité à l'oedomètre

La contrainte de préconsolidation développée dans les échantillons de marnes traités à la chaux est plus grande que celle développée dans les échantillons traités au ciment (tableau 5.2). La chaux réagit avec le sol induisant des modifications internes, la résistance qui se développe est causée par ces modifications ; le ciment quand à lui modifie peu la structure du sol, sa principale action est causée après son infiltration dans le sol et comme il pénètre difficilement, son champs d'action est limité d'où la différence entre l'effet de la chaux et du ciment sur la contrainte de préconsolidation.

Tableau 5.2 : Contrainte de préconsolidation après le traitement.

σ_p (kPa)	Cheraga	El Harrach	Tipaza
Marne intacte	5.82	19.7	5.9
Marne + 4% chaux	29.6	67.6	36.9
Marne + 4% ciment	27.4	36.6	18.2

5.8 Conclusion

Notre interprétation des résultats a été basée sur des travaux antérieurs qui sont résumés dans la partie bibliographique de ce rapport. Nos résultats sont en général en accord avec ceux trouvés dans d'autres études faites sur la stabilisation des sols argileux par ajout de chaux ou de ciment.

A partir des différents points traités dans ce chapitre nous concluons ce qui suit :

- L'ajout de chaux ou de ciment aux sols marneux a provoqué à court terme des modifications des propriétés géotechniques causées par les échanges cationiques et la floculation du sol au contact avec les ajouts. Parmi ces modifications il a été observé une réduction de la plasticité et du potentiel de retrait – gonflement de ces sols après le traitement.
- L'ajout de chaux et de ciment a provoqué des modifications dans les caractéristiques de compactage. En effet, une diminution de densité sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimale sont notées dans les sols traités indiquant que les ajouts ont bien réagi avec le sol.
- Suite à l'augmentation de la rigidité après cimentation, une diminution de la compressibilité après un gain de résistance est observée. Ces résultats sont obtenus pour tous les échantillons de marnes étudiées.
- Une augmentation de la résistance des sols marneux après l'ajout de chaux ou de ciment conduisant à des réactions pouzzolaniques et des réactions d'hydratations qui produisent des agents de cimentation. A long terme ces agents de cimentation durcissent augmentant ainsi la résistance du sol.
- En comparant les effets obtenus par le traitement à la chaux et au ciment, il s'avère que la chaux est plus appropriée que le ciment pour le traitement des marnes altérées.

CONCLUSION

Les marnes sont des sols argileux contenant du carbonate de calcium. Elles sont connues pour leurs caractères évolutifs causés par plusieurs phénomènes tels que l'alternance des cycles saisonniers entraînant des variations volumiques et des pertes de résistance, qui sont la cause de nombreux sinistres. Toutefois, l'étude bibliographique a montré que l'ajout de chaux ou de ciment peut améliorer les caractéristiques géotechniques de ces sols.

Sur la base des résultats obtenus au laboratoire et à la lumière des interprétations de ces résultats, plusieurs conclusions ont été faites :

- Une diminution de la plasticité : L'indice de plasticité a diminué après le traitement à la chaux et au ciment, le sol est devenu peu plastique.
- Une réduction des variations volumiques : le retrait et le gonflement ont diminué suite à l'ajout de chaux et de ciment.
- Une réduction de la sensibilité à l'eau des sols marneux.
- Augmentation de la résistance du sol marneux après l'ajout de chaux et de ciment.
- La quantité de chaux optimale pour atteindre des résistances maximales est de 4 à 8%.
- La résistance est linéairement croissante en fonction de la quantité de ciment ajouté
- Le mode de rupture du sol change après le traitement du mode de rupture ductile au mode de rupture fragile.

En comparant les résultats des différents essais obtenus après le traitement à la chaux avec ceux obtenus après le traitement au ciment, il en ressort que la chaux réagit de façon plus efficace avec le sol marneux. A long terme la résistance des marnes traitées avec de la chaux est plus importante que celle obtenue après traitement au ciment.

La stabilisation de marnes altérées par rajout de chaux avec des quantités de 4 % et 8% est possible et faisable.

• **Recommandation**

Suite à cette étude il est conseillé de voir dans des travaux futurs les points suivants :

- Etudier l'effet du type du minéral argileux contenant dans les sols marneux,
- Etudier l'effet du temps et de la température de cure sur la plasticité après le traitement,
- Etudier l'effet de l'humidité relative lors de la période de cure,
- La possibilité de mélanger la chaux et le ciment en même temps pour de nouvelles performances.
- Une étude plus approfondie sur l'effet de l'ajout de chaux et de ciment sur les paramètres de compressibilité.

APPENDICE A

**CLASSIFICATION DES SOLS ISSUE DE LA RECOMMANDATION POUR LES
TERRASSEMENTS ROUTIERS**

Sols fins	D < 50mm Tamisat à 80µm > 35%	I _p < 10		A1	
		10 < I _p < 20		A2	
		20 < I _p < 5+0		A3	
		I _p > 50		A4	
Sols sableux et graveleux avec fines	D < 50mm Tamisat à 80µm entre 5 à 35%	Tamisat à 80µm de 5 à 12	Refus à 2mm inférieur à 30%	ES > 35	B1
				ES < 35	B2
			Refus à 2mm supérieur à 30%	ES > 25	B3
				ES < 25	B4
		Tamisat à 80µm de 12 à 35%	I _p < 10		B5
			I _p > 10		B6
Sols comportant des fines et des gros éléments	D > 50mm Tamisat à 80µm > 5%	Tamisat à 80µm élevé		C1	
		Tamisat à 80µm faible	D < 250 mm	C2	
			D > 250 mm	C3	
Sols et roches insensibles à l'eau	Tamisat à 80µm < 5%	D < 50mm	Refus à 2mm inférieur à 30	D1	
			Refus à 2mm supérieur à 30%	D2	
		50 mm < D < 250 mm		D3	
		D > 250 mm		D4	
Roches évolutives	Matériaux à structure fine, fragile avec peu ou pas d'argile			E1	
	Matériaux à structure grossière, fragile avec peu ou pas d'argile			E2	
	Matériaux évolutifs argileux			E3	
Matériaux Putrescible combustible, soluble ou polluants				F	

APPENDICE B

SITUATION DES MARNES ALTERÉES DANS LA CLASSIFICATION DES SOLS

Sous classe	Sols les plus fréquemment rencontré	Caractères principaux
A ₁ I _p <10	<p>Limons peu plastiques. Loess. Sables fins. Sols à micro fossile poreux. Cendres volantes</p>	<p>Ces sols changent totalement de consistance pour de faibles variations de w pour de faible variation de compacité si w est proche w_p. Le temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique et climatique est relativement court, mais la perméabilité peut varier dans de larges limites selon la granulométrie et la plasticité, ce temps de réaction peut aussi varier largement. Les moins plastiques de ces sol ont un comportement mécanique particulier (possibilité de rupture fragile : fissuration)</p>
A ₂ I _p 10à20	<p>Sables fins argileux. Limons. Argiles et marnes peu plastiques.</p>	<p>Le caractère moyen des sols de cette sous-classe fait qu'ils se prêtent à l'emploi de la plus large gamme d'outils de terrassement (si la teneur en eau n'est pas trop élevée)</p>
A ₃ I _p 20à50	<p>Argiles Marnes Limons très plastiques</p>	<p>Ces sols sont très cohérents à teneur en eau moyenne à faible, collant ou glissant à l'état humide, d'où la difficulté de mise en œuvre sur chantier. Leurs perméabilités très réduites rendent très lente leurs variations de teneur en eau en place. Une augmentation de teneur en eau assez importante est nécessaire pour changer leur consistance.</p>
A ₄ I _p >50	<p>Argiles et marnes très plastiques.</p>	<p>Ces sols sont très fortement cohérents et presque imperméables ; s'ils changent de teneur en eau, c'est extrêmement lentement et avec d'importants retraits gonflements</p>

APPENDICE C
LISTES DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS

Ca CO ₃	: Carbonate de calcium.
R.T.R	: Recommandation pour les terrassements routiers.
Te	: Tétraèdre.
Oc	: Octaèdre.
OH	: Hydroxyle.
O	: Oxygène.
Si	: Silicium.
Al	: Aluminium.
K	: Potassium.
Mg	: Magnesium.
Ca	: Calcium.
Na	: Sodium.
µm	: Micro mètre.
m	: Mètre.
g	: Gramme.
C.E.C	: Capacité d'échange cationique.
meq	: Milliéquivalent.
W _L	: limite de liquidité.
I _p	: Indice de plasticité.
°C	: Degré Celsius.
mg	: Milligramme.
l	: Litre.
pH	: potentiel Hydrogène.
CO ₂	: Dioxyde de carbone.
H ₂ O	: Molécule d'eau.
H	: hydrogène.
Fe	: fer.
NF	: norme française.

CaO	: oxyde de calcium.
MgO	: oxyde de magnésium.
Ca(OH) ₂	: hydroxyde de calcium.
Mg(OH) ₂	: hydroxyde de magnésium.
NHL	: chaux hydraulique naturelle.
HL	: chaux hydraulique.
NHL-Z	: chaux hydraulique pouzzolanique.
Kg	: Kilogramme.
dm	: décimètre.
i	: Indice d'hydraulicité (indice de Vicat).
min	: minute.
R _c	: Résistances à la compression.
N	: Newton.
mm	: millimètre.
CSH	: silicate de calcium hydraté.
CAH	: aluminat de calcium hydraté.
W _P	: Limite de plasticité.
W _S	: Limite de retrait.
lb	: pound.
ft	: foot.
in	: inch.
K	: Le coefficient de perméabilité.
W _{opt}	: Teneur en eau optimale.
W	: Teneur en eau
s	: seconde.
h	: heure.
CBR	: California Bearing Ratio.
UCS	: Unconfined compressive strength.
kPa	: kilo-Pascal
tsf	: Tonne per square foot.
C _s	: Indice de recompression.
C _g	: Indice de gonflement.
C _c	: Indice de compression.

σ_c	: Contrainte de préconsolidation.
e	: Indice des vides.
t	: Tonne.
kN	: kilo Newton.
C3S	: Silicate tricalcique.
C2S	: Silicate bicalcique.
C3A	: Aluminate tricalcique.
C4AF	: Alumino – ferrique tétracalcique.
MPa	: Méga Pascal.
MEB	: microscope électronique à balayage.
Hcl	: Acide chlorhydrique.
BS	: British Standard.
ml	: millilitre.
γ_d	: Poids volumique sèche.
γ_h	: Poids volumique humide.
CME	: Le Catalogue des Méthodes d'Essais (Belge)
Cv	: Coefficient de consolidation.
Φ	: Diamètre.
σ_1	: Résistance à la compression selon l'axe de chargement.
J	: jour
γ_d^{\max}	: masse volumique sèche maximale.

REFERENCES

1. J. P. Magnan et G. Pilot, «Amélioration des sols», Techniques de l'ingénieur, C 55, (1988)
2. G. Venstermans, B. Guelton, D. Verfaillie, M. Janssens, « Amélioration des sols à la chaux », Bulletin CRR, N° 47, Février 2001.
3. F.G. Bell, « lime stabilization of clay minerals and soils », Engineering geology, N°42, 223 – 237, (1996).
4. Département Ingénierie, «Traitement des sols à la chaux ou au ciment », Génie hippique, GEN 31, (Novembre 2004).
5. A.M.O Mohamed, « The role of clay minerals in marly soils on its stability», Engineering geology, N°57, pp 193-203, (2000).
6. E. Ben Daoud, « Les marnes et marnocalcaires du Nord-Est Algérien- caractéristiques et comportement en construction routière », Ecole nationale supérieurs des mines de Paris, (1988).
7. J. P. Magnan, « Description, identification et classification des sols », Techniques de l'Ingénieur, vol. 1, C 208, (1997).
8. K. Cavalier « Carbonate de calcium, additif multifonctionnel », Techniques de l'Ingénieur, AM 3222, (2007).
9. F. Lamas, C. Irigaray, C. Oteo, J. Chacón, «Selection of the most appropriate method to determine the carbonate content for engineering purposes with particular regard to marls », Engineering Geology, (2005).
10. S. Caillere, S. Hénin, « Minéralogie des argiles : 1 structure et propriété physico-chimique », Masson, Paris, (1982).
11. S. Caillere, S. Hénin, « Minéralogie des argiles : 2 classification et nomenclature », Masson, Paris, (1982).
12. F. Ferrah, « Prise en compte du gonflement pour le dimensionnement des fondations superficielles », Université de Batna, (2006).
13. A. Baronnet, « Minéralogie », Edition Dunod, (1988).
14. F. Bultel, « Prise en compte du gonflement des terrain pour le dimensionnement des revêtement des tunnels », Ecole Nationale des Pont et Chaussées, (2001).

15. J. Wakim, « Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses », Ecole des Mines de Paris, (2006)
16. A. T. Mantho, « Echanges sol - atmosphère : Application à la sécheresse », Ecole Nationale des Pont et Chaussées, (2005).
17. J. Grolier, A. Fernandez, M. Hucher, J. Riss, « Les propriétés physiques des roches : Théorie et modèles », Masson, Paris, (1991).
18. A. Meunier, « Origin and mineralogy of clays. Clays and the environment », Edition B. Velde, (1995).
19. C. Mathieu, F. Pieltain, « Analyse chimique des sols – Méthode choisies », Edition TEC & DOC, Paris, (2003).
20. F. Schlosser, « Mécanique des sols », Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, (1983).
21. J. GAOMBALET, « le gonflement des argiles et ses effets sur les ouvrages souterrains de stockage », l'Ecole Polytechnique- Palaiseau, (2004).
22. Z. Derriche, « Compressibilité des sols gonflants surconsolidés (Cas de la marne plaisancienne) », USTHB, (2000).
23. C. W. Correns, « La formation des roches », Alger, (1952).
24. E. Roose, R. Chebbani, L. Bourougaa, « Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation », IRD et INRF, (1995)
25. M. Lamouroux, « Les formes de départ et les conditions de l'entraînement des principaux constituants minéraux de l'altération et de la pédogénèse », ORSTOM, Paris, (1975).
26. P. Blancaneaux, « Encroûtements calcaires dans les altérations de matériaux marno - gréseux aptiens de la dorsale tunisienne Djebel Bargou », ORSTOM, (1990).
27. P. L. Bégin, D. Naud, « Fente de retrait du sol et amas de fumier », Direction de l'environnement et du développement durable, Québec, (2007).
28. G. Bigot, M. I. Zerhouni, « Retrait, Gonflement et tassement des sols fins », Bull. LCPC, N° 228, Réf 1252, pp 105-114, Paris, France, (Novembre - Décembre 2000).
29. Z. Derriche, G. Cheikh- Lounis, « Caractéristiques géotechniques des marnes Plaisanciennes d'Alger », Bull. Eng. Geol. Environ, N° 63, pp 367-378, (2004).
30. J. M. Avenard, « Sensibilité aux mouvements en masse (solifluxion) », ORSTOM, N° 1-2, pp 119-129, (1990).
31. J. L. Durville, G. Sève, « Stabilité des pentes : Glissements en terrain meuble », Techniques de l'Ingénieur, C254, (1996).

32. C. Chapeau, J. L. Durville, « L'eau et les risques de glissement de terrain », Géosciences, N° 2, (2005).
33. P. Canonge, F. Autric, G. Nourissier, « Technique et pratiques de la chaux », Eyrolles, (2003).
34. AFNOR, « Chaux de construction : Définitions, spécification, et critère de conformité », (1996).
35. Note trimestrielle d'information du Centre d'Etudes et de Services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction, N°12, (Octobre 2005).
36. National Lime Association, « Lime terminology, standards and properties », (January 2007).
37. CALCIA, fiches techniques, (2008)
38. GRAYMONT, « Fiche signalétique – Chaux calcitique vive », (Avril 2007).
39. GRAYMONT, « Fiche signalétique – Chaux dolomitique vive », (Avril 2007).
40. GRAYMONT, « Fiche signalétique – Chaux calcitique éteinte », (Avril 2007).
41. GRAYMONT, « Fiche signalétique – Chaux dolomitique éteinte », (Avril 2007).
42. A. Brahma, « Le Béton », OPU, Blida, (1996).
43. Lawrence J. Sikora et Harry Francis, « Lime-stabilized soil for use as a compost pad », Environmental - Issues Session.
44. M. Mateos, « Recherche sur la stabilisation des sols par la chaux et les cendres volantes », Comptes rendus, 6^{ème} Congrès International de mécanique des sols et des travaux de fondations, Vol 2, University of Toronto Press, (1965).
45. Thomas Telford, « Lime stabilisation », London, (1996).
46. American Road Builders Association Subcommittee on Lime Stabilization, « Lime-treated soil construction manual -lime stabilization & lime modification », National Lime Association, Bulletin 326, (January 2004).
47. Van Stephan Burroughs, « Quantitative criteria for the selection and stabilisation of soils for rammed earth wall construction », University of New South Wales, Australia, (2001)
48. Ferrah Ferrah, « Prise en compte du gonflement pour le dimensionnement des fondations superficielles », Université de Batna, (2006).
49. Jagannath Mallela, Harold Von Quintus, P.E., Kelly L. Smith, « consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design », The National Lime Association, (June 2004).

50. B. Dan Marks, T. Allan Haliburton, «Acceleration of lime – clay reaction with salt», Soil mechanics and foundations division, vol.98, N° SM4, 327-339, (April 1972).
51. P. Pelloux, « méthodes de détermination : des cations échangeables, de la capacité d'échange dans les sols courants, mais ni sales ni gypseux », Centre scientifique et technique de Bondy, (Juin 1963).
52. Sankar Bhattacharja, Javed I. Bhattu, and H. Alan Todres, « Stabilization of Clay Soils by Portland Cement or Lime - A Critical Review of Literature», Portland Cement Association, (2003).
53. Nicolas Cabane, « Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation », Ecole des Mines d'Alès, (décembre 2004).
54. F.G. Bell, « lime stabilization of clay soils », Bulletin of the International Association of Engineering geology, N°39, 67-74, (1989).
55. Sudhakak M. Rao and P. Shivananda, «Role of curing temperature in progress of lime-soil reactions», Geotechnical and Geological Engineering, N°23, 79-85, (2005).
56. Sudhakak M. Rao and P. Shivananda, «Compressibility behaviour of lime stabilised clay», Geotechnical and Geological Engineering, N°23, 309-319, (2005).
57. Marshall R. Thompson, « Lime- treated soils for pavement construction», Journal of the Highway division ASCE, Vol. 94 N° HW2, (November 1968),
58. J.B. Croft, « The structures of soils stabilized with cementitious agents», Engineering Geology, N° 2(2), 63-80, (1967).
59. F.G. Bell, « Stabilization and treatment of clay soils with lime: Part1- Basic principles », Ground Engineering, (March 1988).
60. M. Mateos, « Soil lime research at Iowa state university», Journal of the Soil Mechanics and foundations division- Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.90, N°SM2, (March1964).
61. F. Schlosser, «Mécanique des sols», Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, (1983).
62. Ali Bouafia, «Mécanique des sols : Principe de base –Exercice résolu», Edition el Maarifa, (2002).
63. Thomas M. Petry et Eric J. Glazier, «Project Report: The Effect of Organic Content on Lime Treatment of Highly Expansive Clay», University of Missouri, (June 2004).
64. K. E. Clare et al, « Laboratory experiments in the stabilization of clays with hydrated lime», Geotechnique, Vol 17:97-111, (1957).

65. A. C. Stamatopoulos, J.C. Christodoulis et H.Ch. Giannaros, « Treatment of expansive soils for reducing swell potential and increasing strength», *Quarterly Journal of Engineering Geology*, N°25, 301-312, (1992).
66. A.Djedid, S.M .Aissa Mamoune, A. Bekkouche, « Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen (Algérie) », *Bull. LCPC*, N° 233, Réf 4375, pp 67-75, Paris, France, (Juillet - Août 2001).
67. Nagih M. Rawi, Amir A.A. Awad, «Permeability of lime stabilised soils», *Transportation Engineering Journal of ASCE*, vol. 107, N°TE1, (January 1981).
68. M. Aly Sabry, James V. Parcher, «Engineering properties of soil-lime mixes», *Engineering Journal of ASCE*, vol. 105, N°TE1, (January 1979).
69. E.G. Akpokodje, «The stabilisation of some arid zone soil with cement and lime», *Q.J. eng. Geol. London*, Vol. 18, pp. 173-180, (1985).
70. Hélène Tremblay, « Amélioration mécanique et prédiction de la compressibilité des sols fins du Québec », *Université LAVAL*, (Décembre 1998).
71. Centre de recherches routières, « Amélioration des sols pour terrassements et fond de coffre », *Bruxelles*, (2004).
72. AFNOR, «Ciment : Partie 1 – composition, spécifications, et critères de conformité des ciment courants », (Février 2001).
73. J. B. Croft, «The influence of soil mineralogical on cement stabilization», *Géotechnique*. N° 17, pp 119-135, (1967).
74. N.M. El Rawi et M.M.Y El Samadi, « Optimization of cement – lime chemical additives to stabilize Jordanian soils », *Journal of Islamic Academy of sciences*, N°8:4, pp 167-174, (1995).
75. F. H. Ali et Lee, S. T., "Stabilization of Residual Soils using Chemical Method", 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Singapore, (2003).
76. Boubaker Rekik et Mohamed Boutouil «Etude de la compressibilité et de la microstructure d'un sédiment de dragage traité au liant hydraulique », IX^{èmes} Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, 12-14, (Septembre 2006).
77. AFNOR, «Description — Identification —Dénomination des sols : Terminologie — Éléments de classification», (1999).
78. Walter E. Dean, Jr., «Determination of Carbonate and Organic Matter in Calcareous Sediments and Sedimentary Rocks by Loss on Ignition: Comparison with Other Methods», *Journal of Sedimentary Research*, Volume 44, (1974).

79. Georges Filliat, « La Pratique des sols et fondations », Editeur : Le Moniteur, janvier (1981).