



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie civil

Option : Conception et calcul des constructions

Présenté par : MELLOUK NAOUAL

THEME : APPROCHE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA STABILISATION DES LIMONS PAR LA CHAUX ET LES LIANTS HYDRAULIQUE POUR LES TRAVAUX ROUTIER

Sous la direction de : Dr BENYAGHLA HACENE

Septembre 2014

1



REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous tenons à remercier Dieu, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance au Dr BENYAGHLA, le promoteur de ce mémoire. Il m’a témoigné une grande confiance en me proposant ce travail et il a toujours fait preuve d’un grand enthousiasme à l’égard de mon initiation à la recherche. Qu'il soit assuré de ma profonde gratitude.

Je remercie également tous les professeurs du Département génie civil, Tous les ingénieurs de la DTP de Annaba surtout mes responsables de stage Abdi Fahima, Lahouel Mohamed et Tolba Hicham



DEDICACE

**Je dédie ce modeste travail
À ma mère à mon père qui ont éclairé ma route
par leurs compréhensions, leurs sacrifices et leurs
affections ainsi que leur soutien moral et matériel**

A mon chère marie mon grand supporteur HICHAM

**A mes chères sœurs
À mes chers frères et à leurs épouses
Sans oublier mes chers neveux et nièces
A mon petit chat Steve
A tout LA famille MELLOUK
A tous mes amis, surtout KHAWLA, ASMA, HANAN
A tout les membres de ma promotion (Conception et Calcule des Constructions)**



ملخص	16
RESUME	17
ABSTRAC	18
INTRODUCTION	19
CHAPITRE I : BIBLIOGRAPHIQUE ET METHODOLOGIE	21
I : LES LIANTS HYDRAULIQUE DANS LE TRAITEMENT DES LIMONS	22
I-1 : Introduction	22
I-2 : Propriétés physique et chimique des liants hydrauliques	22
I-2-1 : Introduction	22
I-2-2 : Processus d'échange	23
I-3 : PROCESSUS DE PRISE ET DE STABILISATION APPOSEE AUX LIMONS	25
I-3-1 : particularisation spécifique des limons	25
I-3-2 : effet de la chaux-liant hydraulique sur un sol traite	26
I-4 : LA CHAUX ET LES LIANT HYDRAULIQUE	26
I-4-1 : introduction	26
I-4-2 : Propriétés d'un sol sous traitement mixte	27
I-5 : DEVELOPEMENT DES PROPRIETES GEOTECHNIQUES DES SOLS TRAITES A LA CHAUX ET OU LIANT HYDRAULIQUE	28
I-6 : EFFET DU COMPACTAGE SUR LES CARECTERISTIQUES MECANIQUES DU SOL TRAITÉ	31
I-6-1 : Action après traitement d'un sol sur sa porosité et sa perméabilité	31
I-6-2 : Développement des performances mécanique d'un sol traité	32
I-7 : CONCLUSION	34
I-8 : ECHANGE AVEC L'ENVIRONNEMNT DES SOLS TRAITES ET LEUR STABILITE APRES PRISE	34
I-8-1: Introduction	34
I-8-2 : Action d'entraînement des sels soluble par l'eau	34
I-9 : GEOTECHNIQUES PLANIFIE DES SOLS TRAITES	35
I-9-1 : Introduction	35
I-9-2 : Sols Etudiés	36
I-9-3 : conditionnalités de la portance immédiate	37
I-9-4 : Aptitude des sols de terrassement au traitement à la chaux et ou liant hydraulique	37
I-9-5 : commentaire et conclusion	40
I-9-5-1 : Commentaire	41



I-9-5-2 : Conclusion	41
CHAPITRE II : APPROCHE EXPERIMENTALE ET RESULTATS OBTENUS AU LABORATOIRE 3SR DES SOLS TRAITES À LA CHAUX	42
II-1 : Objectif de l'étude expérimentale	43
II-1-1 : Introduction	43
II-1-2 : Caractéristiques principales du traitement à la chaux	43
II -2 : RESULTATS DE L'ETUDE MENEES AU LABORATOIRE 3SR GRENOBLE SUR LA STABILISATION A LA CHAUX	48
II-2-1 : Objectif	48
II-2-2 : Caractéristiques géotechniques du sol étudié	48
II-2-3 : Objectifs recherchés	48
II-2-3 : Evolution des propriétés mécaniques du sol-chaux dans le temps	49
II-2-4 : Chaux vive : évolution des résistances en compression simple dans le temps	50
II-2-5 : Chaux éteinte : évolution des résistances en compression simple dans le temps	53
II-2-6 : Conclusion sur l'évolution des résistances en compression simple dans le temps	57
II-2-7 : Chaux vive : évolution de l'indice CBR dans le temps	58
II-2-7 : Chaux éteinte : évolution de l'indice CBR dans le temps	60
II-2-8 : Conclusion sur l'évolution des indices CBR dans le temps	61
II-2-9 : CONCLUSION	63
CHAPITRE III : APPLICATION TECHNOLOGIQUE DES SOLS TRAITES A LA CHAUX ET OU LIANTS HYDRAULIQUE IN SITU	64
III : LES SOLS	65
III-1 : Introduction	65
III-2 : Définition des sols	65
III-2-1 : Définition géotechnique des sols	65
III-2-2 : Phase solide	65
III-2-2-1 : Classification des sols : sols grenus, sols fins	66
III-2-2-2 : Sols organiques	66
III- 3 : SPECIFICITE DES SOLS TRAITES A LA CHAUX ET OU LIANT HYDRAULIQUE	66
III-3-1 : Introduction	66
III-2-2 : Eléments perturbateurs	67
III-2-3 : Les chlorures	67



III-2-4 : Les Sulfates	67
III-2-5 :Les Nitrates	67
III-2-6 : Les Phosphates	68
III-2-7 : Conclusion sur les anions perturbateurs de la prise	68
III-3 : TECHNOLOGIE DES SOLS TRAITES A LA CHAUX ET OU LIANT HYDRAULIQUE	68
III-3-1 : Introduction	68
III – 4 : LE TRAITEMENT DES SOLS	68
III-4-1 : Définition et objet	68
III-4-2 : Les liants et les différents types de traitements	69
III-4-2-1 : Action des liants sur les sols	69
III-5 : EXÉCUTION DES TRAVAUX	71
III-5-1 : Traitement type et conditions de mise en œuvre	71
III-5-2 : Compactage partiel	72
III-5-3 : Réglage	73
III-6 : CONCLUSION	74
IV : CONCLUSION GENERALE	75



ABREVIATIONS

LES SIGLES UTILISENT

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

SETRA ; Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements

BDAT : Base de Données d'Analyse des Terres

GTR : Guide technique des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme

PST : partie supérieure de terrassement

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

LES SYMBOLES UTILISENT

5×5 : Eprouvette cylindrique de 5cm de diamètre et de 5cm de hauteur

5×10 Eprouvette cylindrique de 5cm de diamètre et de 10cm de hauteur

A1, A2, B5 : Classes de sols (selon le GTR)

c: Cohesion

CBR: California Bearing Ratio

CMOC : Teneur en matières organiques par calcination

CU : Consolidé Non drainé (Consolidated Undrained)

Ø : Diamètre

D : Dimension maximale pour laquelle le passant est compris entre 80 et 99%

D_{max} : Dimension maximale des plus gros éléments contenus dans un sol

ε : Energie / Déformation

E : Module de déformation ou Module de Young

E_{it} : Module de déformation à 30% de la charge maximale en traction indirecte

G_v : Gonflement volumique

I.CBR : Indice portant californien (California Bearing Ratio)

IPI : Indice Portant Immédiat

j : Jour

M.O : Matière Organique



MPa: Mégapascal [10^6 N.m^{-2} _ $10^6 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$]

ρ_{dOP} : Masse volumique sèche optimum Proctor

ρ_{dOPN} : Masse volumique sèche optimum Proctor normal

ρ_w : Masse volumique de l'eau

OPM : Optimum Proctor Modifié

OPN : Optimum Proctor Normal

R_c : Résistance à la compression simple

R_{C60} Résistance à la compression simple à 60 jours

R_{ci} : Résistance à la compression simple après immersion

R_{it} : Résistance à la traction indirecte

T0 à T4 : Classe mécanique (R_t ; E)

th : Etat hydrique très humide

VBs : Valeur au Bleu du sol

w : Teneur en eau

w_N : ou w_{nat} Teneur en eau naturelle

w_{OP} : Teneur en eau à l'optimum Proctor

w_{OPN} : Teneur en eau à l'optimum Proctor normal

CEM I à V : Classes de ciment (selon NF EN 197-1)

CEM II/B-L 32,5R ; Système de notation du ciment (selon NF EN 197-1)

LHR : Liant Hydraulique Routier

A1, A2, A3 : Groupes précisant le degré de traitement physique, chimique et microbiologique pour atteindre une qualité des eaux permettant la consommation

MEB : Microscope Electronique à Balayage

SYMBOLES SPECIFIQUES A L'ETUDE

LD : Limon de Démouville

LL : Limon de Loucelles

LS : Limon de Sées



LF : Limon fin

LG : Limon grossier

BILAN CALCIUM

CaCO_3 : Carbonate de calcium ou calcaire

CaO : Chaux libre

Ca(OH)_2 : Chaux hydratée

Ca^{2+} : Ion calcium

INTEGRATION DES ELEMENTS POTENTIELLEMENT PERTURBATEURS EN PHASES CIMENTAIRES

ANIONS POTENTIELLEMENT PERTURBATEURS

Cl^- : Ion chlorure

SO_4^{2-} : Ion sulfate

NO_3^- : Ion nitrate

PO_4^{3-} : Ion orthophosphate

CHLORURES

CaCl_2 : Chlorure de calcium

NaCl : Chlorure de sodium

$3(\text{CaO}).(\text{CaCl}_2).15(\text{H}_2\text{O})$: Oxychlorure

$(\text{CaO}).(\text{CaCl}_2).2(\text{H}_2\text{O})$: Oxychlorure

$(\text{Ca}_2).\text{Al}(\text{OH})_6\text{Cl}.2(\text{H}_2\text{O})$: Chloroaluminate de calcium

SULFATES

CaSO_4 : Sulfate de calcium

$\text{CaSO}_4.2\text{H}_2\text{O}$: Gypse

FeS_2 : Pyrite

H_2SO_4 : Acide sulfurique

(Na_2SO_4) : Sulfate de sodium

NITRATES

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$: Nitrate de calcium



NaNO_3 : Nitrate de sodium

PHOSPHATES

H_2PO_4^- : Orthophosphate (pKa $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 2, 1)

HPO_4^{2-} : Orthophosphate (pKa $\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{HPO}_4^{2-}$ 7, 2)

H_3PO_4 : Acide phosphorique

P_2O_5 Phosphate

Na_3PO_4 : Phosphate de sodium

$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$: Hydrogénophosphate de sodium dodécahydraté

LEXIQUE



Angle de frottement interne

L’angle de frottement interne, exprimé en degrés, est une caractéristique intrinsèque d'un sol.

CEMI à CEMV

Les classes CEMI à CEMV correspondent aux classes courantes de ciment selon la norme NF EN 197-1.

Le tableau 1 donne pour chaque classe la proportion de clinker, constituant de base du liant hydraulique.

Tableau 1. Définition des 5 classes de ciment courant

Classe	Dénomination	Proportion de clinker (%)	Autres constituants principaux (%)
CEMI	Ciment Portland	95-100	-
CEMII	Ciment Portland composé	65-94	6-35 Laitier de haut fourneau (S) Fumée de silice (D) Pouzzolane naturelle (P) Pouzzolane naturelle calcinée (Q) Cendre volante siliceuse (V) Cendre volante calcique (W) Schiste calciné (T) Calcaire (L) (LL)
CEMIII	Ciments de hauts fourneaux	5-64	36-95 Laitier de haut fourneau (S)
CEMIV	Ciments pouzzolaniques	45-89	11-55 Fumée de silice (D) Pouzzolane naturelle (P) Pouzzolane naturelle calcinée (Q)
CEMV	Ciments au laitier et aux cendres ou ciment composé	20-64	36-80 Laitier de haut fourneau (S) Pouzzolane naturelle (P) Pouzzolane naturelle calcinée (Q) Cendre volante siliceuse (V)

Cohésion

La cohésion d’un sol représente les forces d’attraction internes existantes entre les particules,

Compressibilité

La compressibilité définit la capacité d’un sol à être comprimé sous l’action des charges qui lui sont appliquées.

Consolidation

La consolidation correspond à une diminution de la déformabilité d’un sol sous charge.

Cure

La cure correspond à la protection d'un matériau cimentaire pendant la phase de prise et de durcissement.

**Cure normale**

La cure normale fait référence à des conditions de conservation en moule hermétique, limitant les échanges avec le milieu extérieur.

Durcissement

Phase d'amélioration des résistances mécaniques d'un matériau cimentaire

Floculation

Phénomène physico-chimique au cours duquel les particules d'un matériau s'attirent par réactions électrochimiques, forment des flocons, s'agrègent en un floc, engendrant une réorganisation de la structure même de ce matériau.

Gâchage

Phase de la fabrication des matériaux cimentaires au cours de laquelle sont mélangés les différents constituants.

Hydratation / Hydrates cimentaires

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, la réaction d'hydratation commence. Des hydrates (portlandite CH, tobermorite CSH, ettringite...) se forment, liant les grains de ciment entre eux et développant les résistances mécaniques.

Lessivage

Phénomène d'entraînement par l'eau, à travers les sols, de substances solides et/ou solubles du sol.

Lixiviation

La lixiviation consiste à extraire des éléments chimiques en faisant circuler une solution aqueuse au travers d'un matériau (solution lixiviante ; lixiviat).

Module élastique

Le module élastique est une constante qui relie la contrainte exercée sur un matériau à sa déformation élastique réversible..

Pâte de ciment

Une pâte de ciment est un mélange ciment-eau

Perméabilité

La perméabilité du sol, exprimée en m.s-1, est sa capacité à transmettre et à laisser circuler l'eau et l'air.

Plasticité

La plasticité d'un sol correspond à la propriété qu'il a de changer de forme, mais non de volume, sous l'effet d'une charge, de garder la forme prise quand la pression disparaît, sans rompre. L'état plastique



est un état intermédiaire entre l'état solide et l'état liquide.

Porosité

La porosité désigne l'ensemble des vides ou interstices, connectés ou non, d'un matériau, pouvant contenir des fluides (liquide ou gaz). En mécanique des sols, elle est calculée à partir du rapport entre le volume des vides et le volume total de sol.

Solidification

La solidification est la transformation du déchet en un solide compact (structure physique solide massive),

Stabilisation

Le terme stabilisation désigne l'ensemble des techniques et opérations permettant d'obtenir un déchet stabilisé.

Teneur en eau optimale

La teneur en eau optimale correspond à la teneur en eau pour laquelle un sol, après compactage Proctor (normal ou modifiée), acquiert une masse volumique sèche maximale.

Zones 1 à 5 ; Classes T0 à T4

Ces classements correspondent respectivement aux classes de performances mécaniques attribuées aux matériaux traités dans les abaques (Rt ; E) figurant dans les GTS 2000 (remblais et couches de forme) et 2007 (couches d'assise de chaussée). Les niveaux de performance sont croissants de la zone 5 à 1 et de la classe T0 à T4. Un classement en zone 5 ou T0 ne permet pas de valider une réutilisation du matériau, les performances mécaniques étant alors considérées comme trop faibles

GLOSSAIRE

La constitution de ce glossaire repose sur l'utilisation de définitions extraites des Techniques de l'Ingénieur et d'ouvrages généraux sur les sols et les matériaux cimentaires (géologie, physique, chimie, etc.), en appui à des connaissances propres.



TABLE DES FIGURES

- Figure I-1 :** Eléments constitutifs d'une pâte de ciment (a) portlandite (CH) et tobermorite (CSH) (b) portlandite (CH) et ettringite (Ett.) [U.S. Department of Transportation Highway Administration 2009]
- Figure I-2 :** Evolution du pH et des concentrations en calcium dissout de l'eau interstitielle d'une pâte de ciment soumise à lixiviation [adaptée de Carde et al. 1996 ; Andra 2001 dans Le Runigo 2008]
- Figure I-3 :** Evolution de la résistance mécanique d'une pâte de ciment CEMI et d'une pâte de ciment CEMII en fonction de leur état d'altération [adaptée de Carde et al. 1996]
- Figure I-4 :** Classification des sols [LCPC-SETRA 1992]
- Figure I-5 :** Relation entre la formation des hydrates CAH et CSH et le développement des résistances à la compression simple d'un sol traité [Xing et al. 2009]
- Figure I-6 :** Diagramme de dissolution/précipitation des phases cimentaires en fonction du pH [adapté de Loughnan 1969 dans Le Runigo 2008]
- Figure I-7 :** Représentation schématique de la structure d'un sol fin solidifié au-delà de 90 jours de cure [Cabane 2004]
- Figure I-8 :** Microstructure d'un limon traité à 1% de chaux et 5% de CEMII/B 32,5 (a) grumeau (b) coque de ciment [Cabane 2004 ; Lelong 2008]
- Figure I-9 :** Modification des caractéristiques de compactage et de portance d'un sol après traitement à la chaux, (a) Modification de l'optimum Proctor d'un sol traité à la chaux [Rossi et al. 2007] (b) Modification de l'IPI et de l'ICBR d'un sol traité à la chaux [Rossi et al. 2007]
- Figure I-10 :** Modification des limites d'Atterberg d'un sol après traitement à la chaux [adaptée de Fediex 2009]
- Figure I-11 :** Influence du dosage en chaux et des conditions de compactage sur la perméabilité d'un limon après 25 jours de cure normale [Le Runigo 2008]
- Figure I-12 :** Influence des conditions de compactage sur la résistance à la compression simple d'une argile traitée à 5% de chaux [Petry et Berger 2006]
- Figure I-13 :** Bilan calcium du limon traité à 3% de chaux après 25 jours de cure et 0, 150, 200 et 320 jours de percolation [Deneele 2008 d'après Le Runigo 2008]
- Figure I-14 :** Coupe transversale d'une structure routière [adaptée de Rolland 2006 ; Bocciardi et Nicaise 2008 ; planete-tp.com 2009 ; cercle-recyclage.asso.fr 2009]
- Figure I-15 :** Critères d'évaluation de l'aptitude au traitement d'un sol traité à la chaux et aux liants hydrauliques [LCPC-SETRA 2000 mis en forme par Cabane 2004]
- Fig II-1 :** Influence du traitement à la chaux sur les caractéristiques de compactage Laboratoire 3SR Grenoble
- Fig II-2 :** Evolution des résistances à la compression en fonction de la qualité de chaux vive consommée pour différents dosages laboratoire 3SR Grenoble
- Fig II-3 :** Interprétation des différentes phases de la stabilisation, évolution des résistances à la compression avec le temps laboratoire 3SR Grenoble
- Fig II-4 :** Courbe granulométrique du sol étudié laboratoire 3SR Grenoble
- Fig II-5 :** Courbe des résistances à la compression à 7 jours (sans immersion) en fonction de la teneur en eau de compactage pour 2% de chaux vive Laboratoire 3SR INPG Grenoble
- Fig II-5 bis :** courbe de compactage du sol traité avec 2% de chaux vive Laboratoire 3SR INPG Grenoble
- Fig II-6 :** Résistance à 28 jours pour deux durées d'immersion en fonction de la teneur en eau de compactage (2% de chaux vive) Laboratoire 3SR INPG Grenoble
- Fig II-7 :** Résistance en fonction du temps pour divers teneurs en eau de compactage (2% de chaux vive) Laboratoire 3SR INPG Grenoble
- Fig II-8 :** Résistance en fonction du temps pour divers teneurs en eau de compactage (4% de chaux vive) Laboratoire 3SR INPG Grenoble
- Fig II-9 :** Résistance à la compression en fonction de la teneur en eau de compactage (2% de chaux éteinte) Laboratoire 3SR INPG Grenoble
- Fig II-9 bis :** Courbe de compactage du sol avec 2% de chaux éteinte Laboratoire 3SR INPG Grenoble



- Fig II-10** : Résistance en fonction du temps pour divers teneur en eau de compactage (2% de chaux éteinte)
- Fig II-11** : Résistance à la compression R₆₊₁ en fonction de la teneur de compactage (4% de chaux éteinte) laboratoire 3SR INPG Grenoble
- Fig II-11 bis** : Courbe de compactage de sol traité avec 4% de chaux éteinte laboratoire 3SR INPG Grenoble
- Fig II-12** : Résistance en fonction du temps pour divers teneur en eau de compactage (4% de chaux éteinte) laboraoire 3SR INPG Grenoble
- Fig II-13** : Evolution de l'indice CBR en fonction du temps d'immersion (2% de chaux vive, W_r = 19%) Laboratoire 3SR INPG Grenoble
- Fig II-13 bis** : Evolution de l'indice CBR en fonction du temps d'immersion (2% de chaux vive, W_r = 23%) Laboratoire 3SR INPG Grenoble
- Fig II-14** : Evolution de l'indice CBR en fonction du temps d'immersion (4% de chaux vive, W_r = 25 %) Laboratoire 3SR INPG Grenoble
- Fig II-14 bis** : Evolution de l'indice CBR en fonction du temps d'immersion (4% de chaux vive, W_r = 28 %) Laboratoire 3SR INPG Grenoble
- Fig II-15** : Evolution de l'indice CBR en fonction du temps d'immersion (4% de chaux éteinte, W_r = 19 %) Laboratoire 3SR INPG Grenoble
- Fig II-15 bis** : Evolution de l'indice CBR en fonction du temps d'immersion (4% de chaux éteinte, W_r = 15 %) Laboratoire 3SR INPG Grenoble
- Fig II-16** : Evolution de l'Indice CBR en fonction du temps d'Immersion après 3 mois de prise Laboratoire 3SR INPG Grenoble
- Fig III-1** : sol traité à la chaux « revue de l'école des pont et chaussé Paris 2010 »
- Fig III-2** : Traitement in situ d'un sol argileux par la chaux revue de l'école des ponts et chaussées Paris 2010
- Fig III-3** : Aspect visuel d'un sol après traitement revue de l'école des ponts et chaussées Paris 2010
- Fig III-4** : Compactage d'un sol traité à la chaux revue de l'école des ponts et chaussées Paris 2010
- Fig III-5** : Epanchage de liant hydraulique revue de l'école des ponts et chaussées Paris 2010
- Fig III-6** : Malaxage d'un sol traité aux liants hydrauliques revue de l'école des ponts et chaussées Paris 2010
- Fig III-7** : Protection de la chaussée traitée aux liants hydrauliques revue de l'école des ponts et chaussées Paris 2010

TABLE DES TABLEAUX

- Tableau I-1** : Ordre de grandeur de la taille des pores dans un sol fin compacté après traitement à la chaux
- Tableau I-2** : Influence des conditions de compactage sur les paramètres de cisaillement d'un sol traité à 5% de chaux (OMC : teneur en eau optimale ; DMC : côté sec ; WMC : côté humide ; NE : énergie normale ; HE : haute énergie) [adapté de Wissa 1965 dans Le Runigo 2008]
- Tableau I-3** : Sensibilité aux paramètres (dosage en liant ; conditions de compactage) d'un limon A2 traité au LHR [Kergoët 2001]
- Tableau I-4** : Critères d'argilosité et de taille granulaire des sols utilisables en couches d'assise [LCPC-SETRA 2007]
- Tableau I-5** : Valeurs minimales de l'IPI pour les matériaux traités [LCPC-SETRA 2007]
- Tableau I-6** : Caractéristiques mécaniques requises pour l'utilisation d'un sol traité en couches d'assise à court terme [LCPC-SETRA 2007]
- Tableau I-7** : Caractéristiques mécaniques requises pour l'utilisation d'un sol traité en couches d'assise à long terme [LCPC-SETRA 2007]
- Tableau I-8** : Résistance à l'immersion de sols traités
- Tableau I-9** : Seuils de classes mécaniques des sols traités [LCPC-SETRA 2007]

ملخص

معالجة التربة مع روابط الهيدرووليكية (الجير والاسمنت ...) هو أسلوب يمارس على نحو متزايد. شركات البناء في بناء الطرق . أنه يحسن الخصائص الجيوتقنية والميكانيكية للتربة. وتحليل ردود الفعل يظهر عدد من الاضطرابات من العلاج. بناء السدود وطبقات من الأشكال تمثل جزءا هاما من تكلفة البناء الإجمالية لمشاريع الطرق. هذه الأهمية تبرر تحسين البحث العالمي ، للحد من التكاليف. الاستفادة المثلى من الحلول التقنية هو، أولا ، وهو خيار حكيم المحاذاة الأفقية و المحاذاة العمودية من أعمال الحفر للتقليل من حركات الأرض تبعا ل نوعية المواد المطلوبة.

يركز هذا التقديم على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية و الكيميائية دون وصف التفاعل الكيميائي الرئيسي، ولكن القيد الوحيد على C1 قبل وبعد العلاج اضطراب التصلب بسبب وجود الأنيونات الكلور - ، - SO42 ، - NO3 ، PO43 المطلوب تركيزات. إذا كان إدخالها في التربة من شاردة واحد لا يؤثر على إعادة المعالجة ، و محاكاة التفاعلات من الأنيونات تكشف حالات العجز ، ويجب أن يستمر عنصر التحكم. تقنية معالجة التربة مع الجير و / أو تنفيذ السدود اللاصقة التقليدية و التربة التحتية تطور كبير في طبقات الرصف ، وهو ما يثبت التميز في التقنية



RESUME

Le traitement des sols aux liants hydrauliques (chaux, ciment...) est un procédé de plus en plus pratiqué par les entreprises du BTP en technique routière. Il améliore les propriétés géotechniques et mécaniques des sols dits « médiocres » in situ. Les guides techniques « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques » (SETRA-LCPC, 2000 et 2007) présentent les méthodologies d'études géotechniques en laboratoire et in situ afin d'atteindre les performances requises. Cependant, l'analyse du retour d'expérience montre un certain nombre de perturbations du traitement. La présente thèse s'intéresse à la caractérisation physico-mécanique et physico-chimique des 3 sols types C1 avant et après un traitement mixte avec suivi de la détermination de seuils de perturbations de la solidification dues à la présence des anions Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} dans le sol. Les concentrations seuil sont recherchées tant du point de vue des performances mécaniques que de la stabilité structurelle. A l'échelle microscopique, les perturbations sont étudiées à l'aide des analyses physico-chimiques et microstructurales des sols dopés. Il apparaît que les 4 anions présentent un potentiel de perturbation de la solidification dont l'expression diffère selon le sol, le traitement considéré, la forme chimique de l'anion, sa concentration, les conditions de cure et le type de sollicitation. Si l'introduction dans le sol d'un anion unique ne remet pas en cause une réutilisation du sol traité en techniques routières, les simulations d'interactions des anions révèlent des cas d'inaptitude fortement préjudiciables, dont le contrôle doit être poursuivi de chaussée. La technique du traitement des sols à la chaux et ou aux liants classique dans l'exécution des remblais et des couches de forme c'est développé considérablement dans les couche d'assises

Mots-clés : sols, liants hydrauliques, solidification, assise de chaussée, perturbations chimiques, couplage géotechnique-physico-chimie



ABSTRAC

Soil treatment with hydraulic binders (lime, cement ...) is a method increasingly practiced . By construction companies in road construction . It improves the geotechnical and mechanical properties of soil called "poor" in situ. Technical guides " Soil treatment with lime and / or hydraulic binders " (SETRA -LCPC , 2000 and 2007) present methodologies geotechnical laboratory and in situ to achieve the required performance. However, analysis of the feedback shows a number of disturbances of treatment. Construction of embankments and layers of shapes represent an important part of the overall construction cost of road projects. This importance justifies a global search optimization, to minimize costs. The optimization of technical solutions is , first, a judicious choice of horizontal alignment and vertical alignment of earthworks to minimize earth movements depending on the quality of materials required . This submission focuses on the physical and mechanical characterization as the physico-chemical component without describe the main chemical reaction , but only limit to this principle chemical treatment of 3 types soils C1 before and after mixed treatment he followed thresholding disruption solidification due to the presence of anions Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} dans the ground. The threshold concentrations are desired from the point of view that the mechanical performance of the structural stability. If the introduction into the soil of a single anion does not affect reuse of treated soil road engineering, simulations of interactions of anions reveal cases of incapacity highly prejudicial, the control must be continued. The technique of soil treatment with lime and / or conventional binders execution embankments and subgrade develops considerably in the Assize pavement layers (subbase and base layer) , which proves the excellence in technical

Keywords: soil hydraulic binders, solidification, sitting floor, chemical disturbances, coupling geotechnical physical chemistry



INTRODUCTION

Le traitement des sols pour l'exécution de remblais pour les travaux routier s'est étendu depuis plusieurs années grâce aux connaissances acquises et aux développements des performances mécaniques des sols traités ainsi qu'à la fiabilité des matériels de traitement. Ainsi, le traitement des sols est actuellement largement utilisé dans la réalisation des travaux routiers. Ils représentent une part non négligeable du secteur de la construction et du génie civil, tant pour l'avantage mécanique qu'il présente. Cette technique permet la valorisation de matériaux aux caractéristiques géotechniques inadaptées, non utilisables à l'état naturel, entraînant une économie réelle dans le coût de projet dont l'investissement est trop lourd pour les finances des organismes maîtres de l'ouvrage. En effet, elle permet la réutilisation de ces terrassements sur site économisant les déplacements vers les décharges et protégeant ainsi l'environnement.

Les sols (limon) traités aux liants hydrauliques et particulièrement à la chaux pour atteindre les performances mécaniques nécessaires à la réalisation des projets routiers montrent après leur achèvement (quelques semaines à quelques mois) après une stabilisation de sol des défauts de comportement (auto-route est-ouest). Ces défauts se manifestent par des caractéristiques mécaniques insuffisantes qui détruisent la rigidité acquise du sol traité. Cet événement a été observé par Le Borgne [2010] ou Rahmat et Kinuthia [2011].

Ce phénomène d'inefficacité du traitement est d'une manière globale à des éléments chimiques (physico-chimie) ou minéralogiques (microstructure) perturbateurs [LCPC-SETRA 2000 ; Cabane 2004]. Cabane (2004), Guichard (2006) et Le Borgne (2010) ont entamé une recherche dans ce domaine afin de comprendre les mécanismes responsables de la perturbation de la prise (figement, coagulation, consolidation etc...). Cette étude se propose de fixer les caractéristiques mécaniques, structurales et physico-chimiques des sols avant et après traitement en étudiant plus précisément l'influence d'interactions chimiques au sein du sol. Les résultats constatés après une série d'essais recommandée par le Guide technique de Traitement des Sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS) [LCPC-SETRA 2000 ; LCPC-SETRA 2007] est de proposer des solutions adaptées aux traitements de sols inconstructibles.

Les limons sujets de ce mémoire sont les sols majoritairement rencontrés dans le nord algérien lors de chantiers nécessitant une excavation. Ce mémoire limite son domaine d'application à des sols de qualité médiocre d'un point de vue géotechnique mais chimiquement inactif nécessitant par contre une étude pédologique afin de déterminer les différents minéraux formant ce sol figé.

Cette étude bibliographique reposera sur les protocoles d'approche suivants :

- les sols, après identification géotechnique et physico-chimique, seront soumis à un traitement mixte à base de chaux et/ou de liant hydraulique et plus précisément à la chaux pour notre mémoire ;
- Le but est une réutilisation de ce sol traité à la chaux en couches d'assise pour des travaux routiers. Cette considération impose des essais géotechniques particuliers et des seuils de performance à atteindre.



- les causes de risque de perturbation de la prise sont à identifier.
- l'analyse de la stabilisation des éléments par des essais de lixiviation* (lavage) favorise la compréhension de leur comportement au sein du sol traité.

Une application technologique de mise en place in situ de ces sols sera présentée



CHAPITRE I

BIBLIOGRAPHIQUE ET METHODOLOGIE



I : LES LIANTS HYDRAULIQUE DANS LE TRAITEMENT DES LIMONS

I-1 : INTRODUCTION

La bibliographie présentée dans ce chapitre rappelle certaines caractéristiques chimiques des matrices cimentaires. Il est exact de considérer que les processus chimique d'un matériau traité à la chaux et/ou de liant hydraulique sont techniquement identiques. Ces réactions interne chimique appliques à un sol à traiter sont à court et long terme. L'application de la chaux et ou liant hydraulique à un sol naturel modifie ces caractéristiques structurales et mécaniques en fonction de son pH et de la concentration des différent minéraux le constituant. Ces caractéristiques structurales et mécaniques dépendent également de son compactage qui est influencé par sa porosité.

I-2 : PROPRIÉTÉS PHYSIQUE ET CHIMIQUE DES LIANTS HYDRAULIQUES

I-2-1 : INTRODUCTION

Le ciment Portland est constitué de clinker dont les proportions sont : 80% de calcaire et 20% d'argile calciné à 1450°C sous forme de poudre fine inférieure à 80µm, dont les composés chimique sont , les silicates tricalciques (C₃S), les silicates dicalciques (C₂S), les aluminates tricalciques (C₃A) et les aluminoferrites, tétracalciques (C₄AF). Du gypse CaSO₄.2H₂O (CSH₂), est ajouté au clinker pour atténuer la réaction du C₃A au contact de l'eau.

Le mortier de ciment hydratée obtenue est constituée de : Silicates de calcium hydratés (CSH) [figure I-1a] issus de l'hydratation des C₂S et C₃S [réactions (1) et (2)] :



Les CSH représentent 60 à 70% du volume du mortier de ciment hydratée. Ce sont ces mélange d'eau et de ciment qui, en se formant à la surface des grains , augmentent la cohésion du mortier.

Le processus chimique des CAH provoquent une prise rapide du mortier qui diminuant ainsi sa la fluidité et de là maniabilité diminuent tout en augmentant sa résistance.

Pour les liants hydrauliques à l'exception de la chaux, il est admis qu'après 28 jours la quasi-totalité de leur potentiel de solidification a réagi, c'est-à-dire que les caractéristiques mécaniques sont presque définitives. L'hydratation se poursuit pendant quelques années agissant ainsi sur , porosité Nachbaur [1997]; Gervais [1999] ; Pipilikaki et al. [2009] ; Elaknesawaran et al.[2009]. C'est à partir de ce réseau de pore ouvert que se déroulent les échanges avec le milieu extérieur.

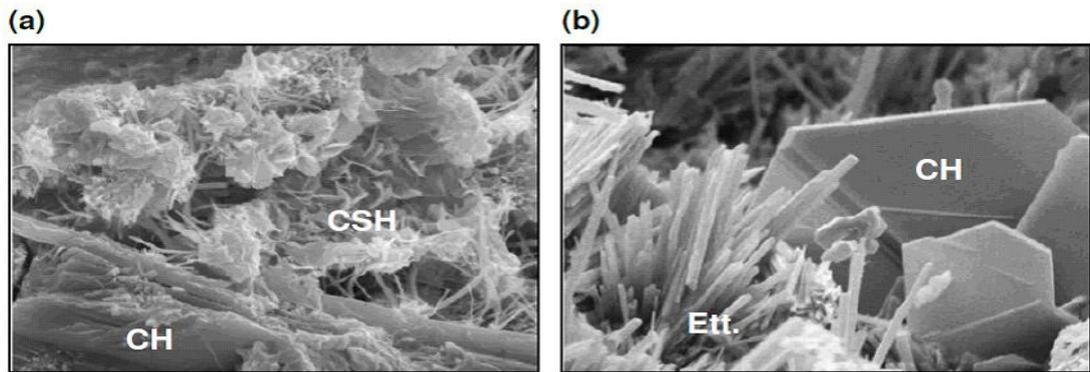


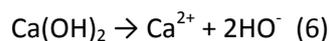
Figure I-1 : *Eléments constitutifs d’une pâte de ciment* (a) portlandite (CH) et tobermorite (CSH) (b) portlandite (CH) et ettringite (Ett.), U.S. Department of Transportation Highway Administration [2009]

I-2-2 : PROCESSUS D’ECHANGE

Le système chimique représenté par le mortier de ciment (milieu basique) est en déséquilibre avec le milieu extérieur (CO₂, pluies acides...). Le contact continu avec ces éléments (absorption de l’humidité de l’air, lavage par les eau de pluie ect...) entraîne à plus ou moins à long terme, une dissolution et un transfert des espèces chimiques vers un nouvel équilibre et la précipitation de nouveaux hydrates. Le pH du milieu directement en contact avec les mortiers de liant hydraulique influe directement sur les paramètres physico-chimique majeur gouvernant les fronts de dissolution/précipitation.

Le graphique de la Figure (I-2), proposé par Carde [1996], donne l’évolution par rapport au temps le taux en calcium dissous et du pH dans la solution interstitielle d’un mortier de ciment soumise à un essai de lavage à l’eau.

La réaction de l’hydrate au contact de l’eau [réaction (6)] est alors la suivante :



Le pourcentage des vides dans le milieu considéré accélère les réactions de dissolution et le transport des éléments dissous dans la matrice Lin et Huang [1994].

La Figure (I- 2) relevées Gervais [1999], Poon et al. [2001], Guillon [2004], Deschamps et al. [2006], Kamali-Bernard et al. [2007], montre que dans un second temps, quand toute la portlandite présente dans le milieu est dissoute le pH baisse entraînant une décalcification des hydrates de type CSH et/ou CAH. S Perlot [2005] donne comme formulation pour la dissolution partielle des CSH l’équation suivante :

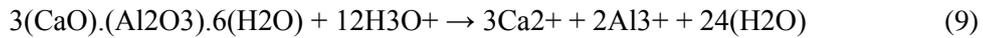


Cette interaction est valable pour les CSH déduit par les réactions (1) et (2) après dissolution totale par la formulation chimique [interaction (8)] :





Guillon [2004] pour les CAH matériau très peu soluble donne la réaction de décalcification suivante [réaction (9)]



Picquet [1995] remarque une faible quantité de silicium en solution lors de cette seconde phase provenant de la dissolution d'une part des CSH.

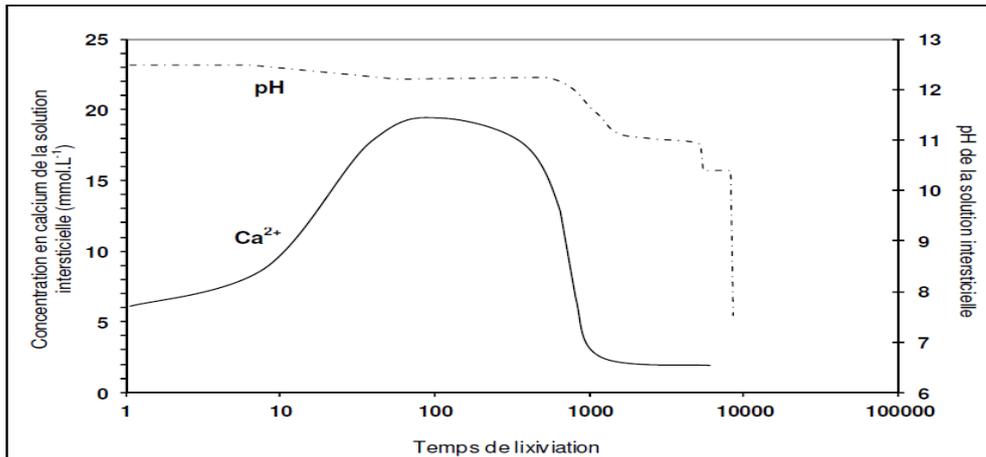


Figure I-2 : Evolution du pH et des concentrations en calcium dissout de l'eau interstitielle d'une pâte de ciment soumise à lixiviation [adaptée de Carde et al. 1996 ; Andra [2001] dans Le Runigo 2008]

L'augmentation de la porosité dans le mortier cimentaire est associée à la dissolution de la portlandite plutôt et non à la décalcification Perlot [2005] ; Burlion et al. [2006] ; Kamali-Bernard et al. [2007]. Cette augmentation abaisse les performances mécaniques Kamali-Bernard et al [2007], Carde [1996] ; Kamali [1999] ; Le Bellego [2001]. Carde et al [1996], observe que la perte de résistance augmente avec la décalcification croissante des hydrates après lavage du mortier de ciment CEMII Fig (I-3)

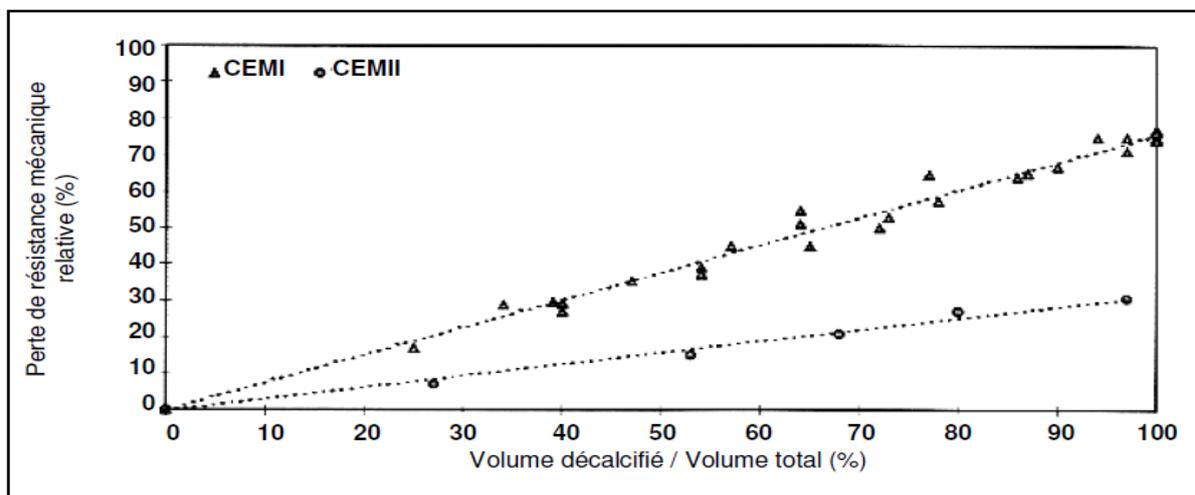


Figure I-3 : Evolution de la résistance mécanique d'une pâte de ciment CEMI et d'une pâte de ciment CEMII en fonction de leur état d'altération [adaptée de Carde et al. [1996]]

I-3 : PROCESSUS DE PRISE ET DE STABILISATION APPOSEE AUX LIMONS

I-3-1 : PARTICULARISATION SPECIFIQUE DES LIMONS

Les limons sont diffère extrêmement répandues [Foucault et Raoult 2010]. Ils se rencontrent couramment lors des travaux de terrassement des travaux publics (construction de tour d'habitation, de barrage, de travaux routiers et autoroutiers).

On géotechnique, le limon se distingue par une fraction granulométrique intermédiaire entre argile et sable dont la fraction granulométrique est de $2/63\mu\text{m}$ Holtz et Kovacs [1996] ; Robitaille et Tremblay [1997] ; Dupain et Saint-Arreman [2009].

La classification d'un sol est défini par : Tab (4)

- sa courbe granulométrique
- son argilosité : son activité argileuse ou sa capacité d'adsorption
- par sa valeur au bleu (VBs), son indice de plasticité (IP) et par ses limites d'Atterberg (w_L et w_P).

Les limons font partie de la classe des sols fins (classe A) définie par le Guide des Travaux Routier et le LCPC-SETRA (France). Cette classe, très courante en Algérie, traitée améliorée par un traité par un mélange chaux-liant hydraulique, est utilisée comme matériau de couche de forme pour la construction des route, route à grande vitesse et autoroute Cabane [2004] ; Abdo [2008] ; Chardard et Gandille [2008].

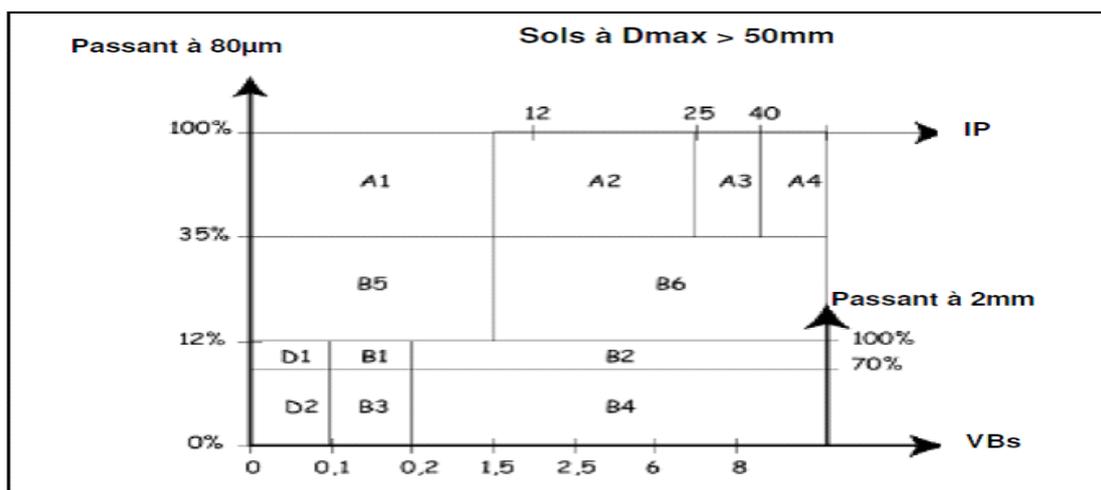


Figure I-4 : Classification des sols [LCPC-SETRA 1992]

Une classification intermédiaire permet de définir l'état hydrique du sol. Elle fait intervenir :

- la teneur en eau naturelle (w_{nat}) et de la teneur en eau optimale (w_{OPN})



- l'indice portant immédiat (IPI) à sa teneur en eau naturel après compactage qui définit sa résistance au poinçonnement (essai en plaque).

Le comportement mécanique d'un sol est lié à sa teneur en argile, en matières organiques et en eau :

- le terme argile regroupe différents minéraux chimique et physique dont les particules n'excèdent pas $2\mu\text{m}$. La grande attraction de l'élément argileux pour l'eau influe sur les caractères physico-mécanique du sol comme la plasticité, le retrait/gonflement, la compressibilité* et la cohésion* et diminue leur perméabilité ainsi que l'angle de frottement interne.
- Les matières organiques comprennent des composés à base de molécules carbonées (végétation, microorganismes, etc.) et des composés issus de leur dégradation. La réaction entre la fraction argileuse et la fraction organique qui ne doit pas excéder 1% dans le sol à traiter améliore sa plasticité, sa porosité et sa compressibilité et retarde sa prise (GTS) [LCPC-SETRA 2000].
- la teneur en eau et l'eau interstitielle influent sur la plasticité, la cohésion et la porosité d'un sol en fonction de sa composition minéralogique.

L'étude pédologique du sol et la nature de l'eau du sol et celle entrant dans le traitement sont très important. C'est au travers de ces deux paramètres qu'en recherche les origines de perturbations de la prise des sols traités.

I-3-2 : EFFET DE LA CHAUX-LIANT HYDRAULIQUE SUR UN SOL TRAITE

Le traitement de sols avec une valeur au bleu (VBs) supérieure à 1 nécessite l'emploi de 1 à 2% de chaux. L'utilisation d'un liant hydraulique seul s'applique à des matériaux plus sableux (VBs \leq 1) avec des dosages de l'ordre de 5 à 7% Kinuthia et al.[1999] ; Puiatti [2005] ; Malviya et Chaudhary [2006] ; Abdo [2008] ; Chardard et Gandille [2008].

Pour qu'un sol traité à la chaux supporte la circulation des engins d'épandage et de roulage, la quantité de chaux ajoutée au sol traité doit être suffisante afin de pouvoir assurer cette conditionnalité. L'ajout de ciment ou d'un liant hydraulique routier à la chaux permet de développer les propriétés mécaniques nécessaire à une amélioration du sol en assise de chaussée et plus particulièrement sa durabilité en couche d'assise et de forme. Le guide technique, Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques pour la réalisation des remblais et les couches de forme [LCPC-SETRA 2000], propose pour un sol de classe A₁ (Fig 4) la combinaison suivante : 1% de chaux vive et 7% de CEMII 32,5. L'étude pédologique donne une multitude de sols différencier par les proportions des minéraux les constituant et de la qualité de leur eau de constitution de tel sorte qu'il est impossible de d'avancer une formulation générale. C'est l'expérience de terrain acquise qui nous permet d'établir les protocoles de traitement à savoir les conditions de mélange (dosages, ordre d'introduction, durée de malaxage, ect ...) et de mise en œuvre (compactage, teneur en eau etc...). Tous ces paramètres influent sur les performances du traitement.

I-4 : LA CHAUX ET LES LIANT HYDRAULIQUE

I-4-1 : INTRODUCTION :

Le ciment Portland composé (classe CEMII) et les liants hydrauliques routiers (LHR) sont les principaux liants utilisés pour le traitement des sols Sheffield et al. [1987] ; Conner et Hoeffners

[1998] ; Malviya et Chaudhary [2006]. Les caractéristiques de la chaux vive adoptées pour le conditionnement de sol sont définies par les normes NF P98-101 et NF P98-102 et nouvellement par les normes NF EN 459-1 et NF EN 459-2). Les ciments classes CEMI à CEMV sont aujourd'hui très peu utilisés. On leur préfère les LHR, plus adapté aux conditions et aux exigences de mise en œuvre des terrassement (partie supérieure de terrassement), de remblais et de couches de forme Cimbéton [2004] ; Rossi et al. [2007].

I-4-2 : PROPRIÉTÉS D'UN SOL SOUS TRAITEMENT MIXTE

Le malaxage de la chaux et ou des liants hydraulique par d'eau avec le sol nature modifie les caractéristiques mécaniques de ce matériaux dus aux conséquence des réactions chimiques qui se déclenche et particulièrement la perte d'eau (diminution de la teneur en eau du sol naturel dus à la température dégagée lors des réactions chimique et ceci par consommation/évaporation de 1% de teneur en eau pour 1% de chaux ajouté au sol traité LCPC-SETRA 2000], de la floculation de l'argile (modification de la consistance), des réaction d'hydratation entraînant une modification du pH (progression du pH dont les conséquences varient en fonction du pH du sol naturel (Fig I-5) Burlion et al. [2006] ; Xing et al. [2009], des réactions pouzzolanique dont les effets sont une augmentation lente de la résistance du sol traité et cela après 28 jours du à la présence des hydrates formés (Fig I-6), Le Runigo [2008], de la carbonation (formation de carbonate de calcium au contacte du CO_2 de l'air) dont la conséquence est une diminution de 30 à 80% de la résistance à la compression et ceci est en fonction de la fraction d'argile constituant le sol à traité Le Long [2008].

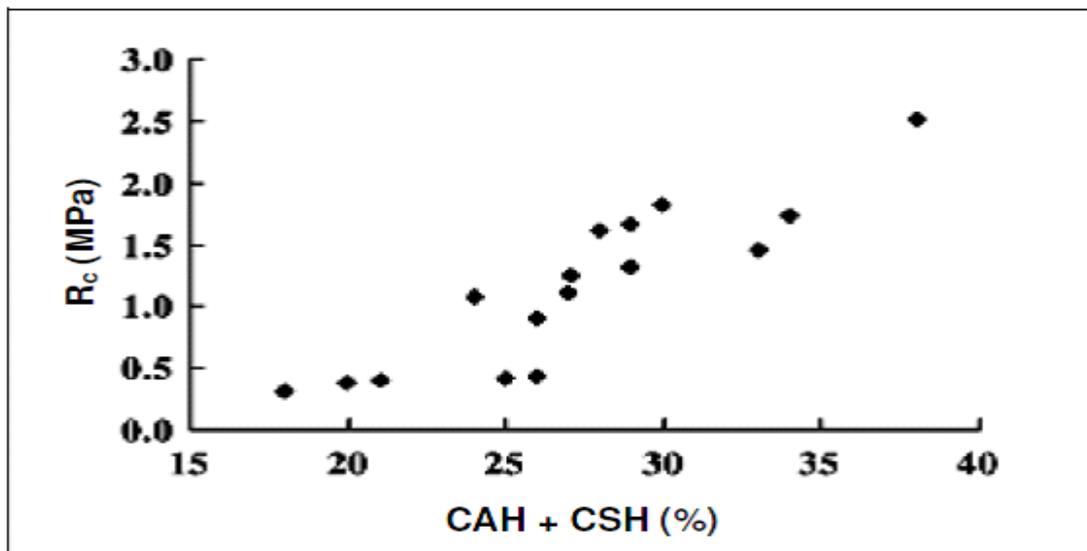


Figure I- 5 : Relation entre la formation des hydrates CAH et CSH et le développement des résistances à la compression simple d'un sol traité [Xing et al. 2009]

Le changement structural du sol traité par de ces nouvelles phases baisse la porosité et change la agencement dimensionnelle des pores Choquette et al. [1987], Bell [1996]. La cohésion définitive

acquise est fonction de la nature du sol traité, du type et du dosage du liant, de la nature du compactage, de la température de l'environnement et de l'âge du composé.

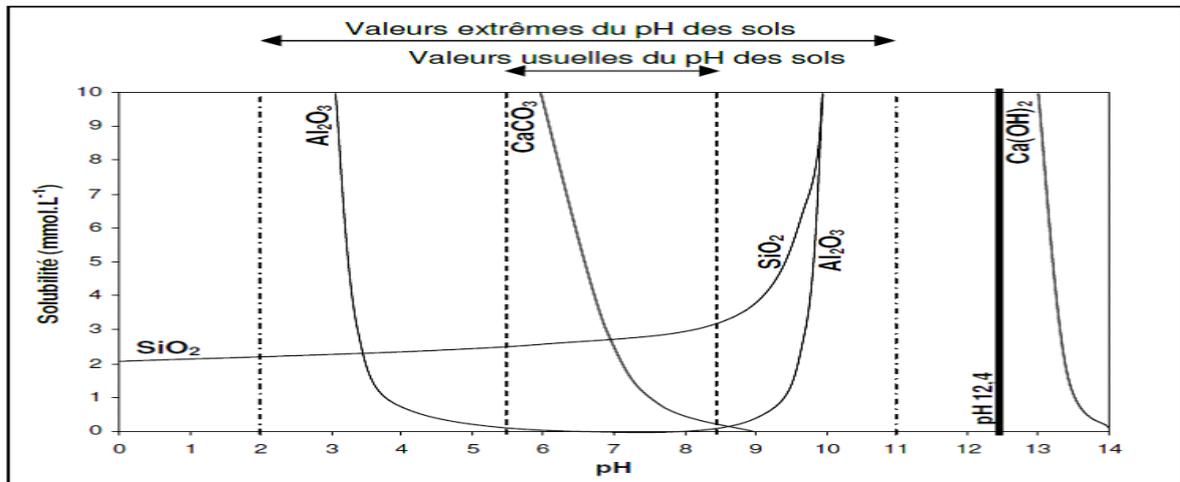


Figure I-6 : Diagramme de dissolution/précipitation des phases cimentaires en fonction du pH
[adapté de Loughnan 1969 dans Le Runigo 2008]

I-5 : DEVELOPEMENT DES PROPRIETES GEOTECHNIQUES DES SOLS TRAITES A LA CHAUX ET OU LIANT HYDRAULIQUE

On a précédemment vu que le mélange de la chaux et ou liant hydraulique dans une proportion préindiqué avec un sol naturel entraîne une réaction exothermique par absorption et évaporation de l'eau du sol dont les conséquences sont l'amélioration de certains indices et l'affaiblissement d'autres.

Le GTS ,LCPC-SETRA [2000], puis par Rossi et al. [2007] Fig (I-7), nous montre la forme générale des courbes Proctor normal ($\rho_d = f(w)$) Figure (I- 9a), IPI ($IPI = f(w)$) et I.CBR ($I.CBR = f(w)$) Fig (I- 9b) d'un sol de classe A₁ avant et après traitement à la chaux. La figure (7- 9a) montre le développement de la courbe Proctor du sol traité courbe bleue aplatie traduisant une inertie à l'eau de ce sol (absorption/évaporation) et une perte de la masse volumique optimal proctor (w_{OPN}) dues à la réorganisation des particules du sol en agglomérats.

La Figure (7- 9b) montre une augmentation de l'indice portant immédiat (IPI), de l'indice CBR (California Bearing Ratio ou indice portant californien) (courbe bleue trait plein et courbe bleue trait pointillé) qui montre la portance du sol Bocciardi et Nicaise [2008]. En effet pendant le traitement d'un limon à 1% de chaux et 5% de ciment, l'optimum Proctor d'un limon passe de (14% ; 1,95Mg.m⁻³) à (16% ; 1,92Mg.m⁻³), l'IPI de 20 à 35 et l'ICBR de 5 à 235

Bocciardi et Nicaise [2008], ont constaté une amélioration immédiate de l'ouvrabilité et des résistances mécaniques qui se traduit par :

- une réduction de la plasticité (abaissement de l'indice de plasticité (IP), augmentation de la limite de plasticité (w_P), diminution de la teneur en eau (w) et une amélioration de la résistance à la compression simple (R_c) :

Le processus est indiqué sur la Fig (I-8) : la partie supérieure de la figure présente le comportement du sol naturel et la partie inférieure considère l'évolution des limites d'Atterberg dues aux conséquences d'un traitement sur un sol naturel Fedix [2009].

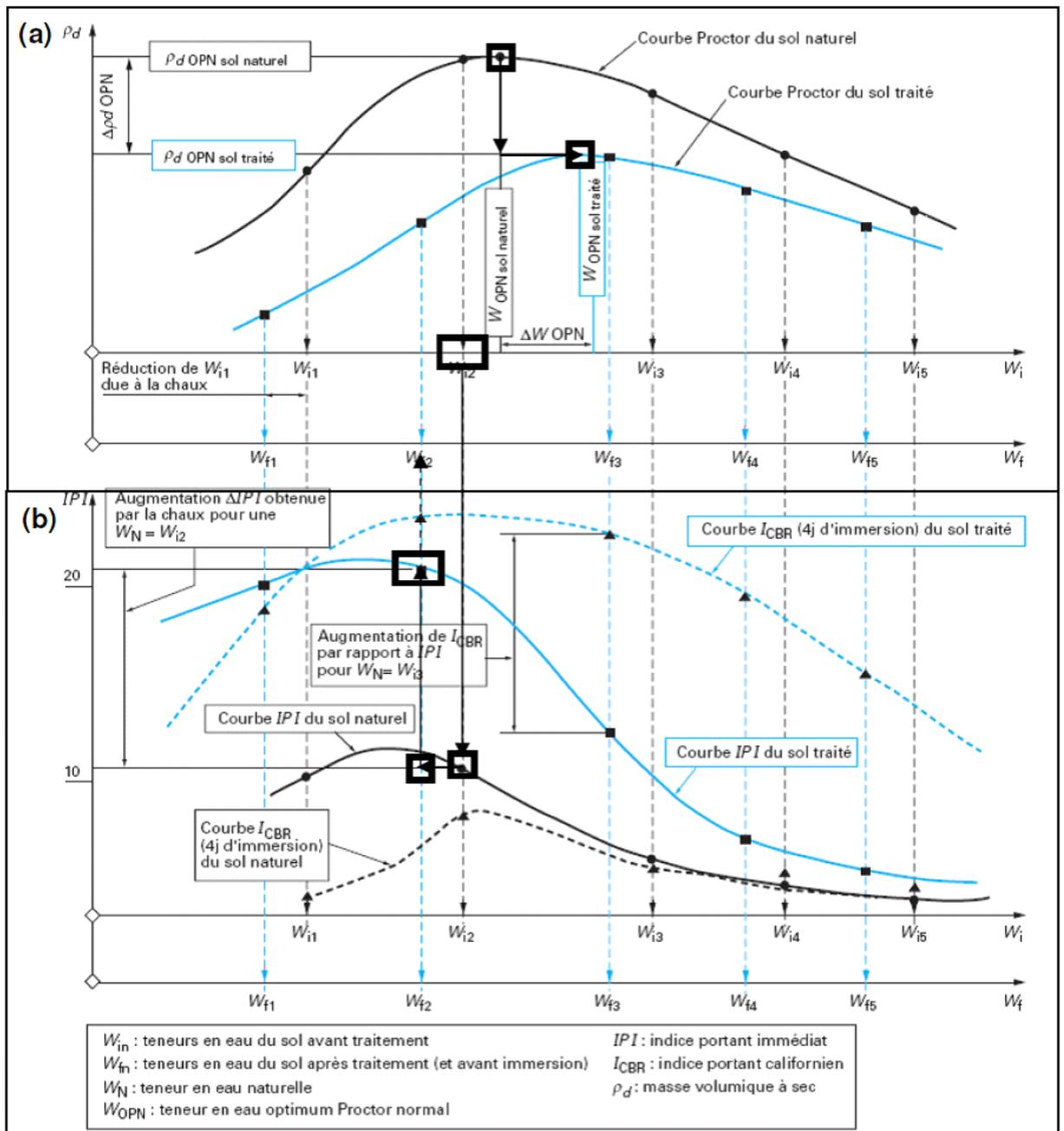


Figure I-7 : Modification des caractéristiques de compactage et de portance d'un sol après traitement à la chaux

(a) Modification de l'optimum Proctor d'un sol traité à la chaux, Rossi et al. [2007]

(b) Modification de l'IPI et de l'ICBR d'un sol traité à la chaux, Rossi et al. [2007]

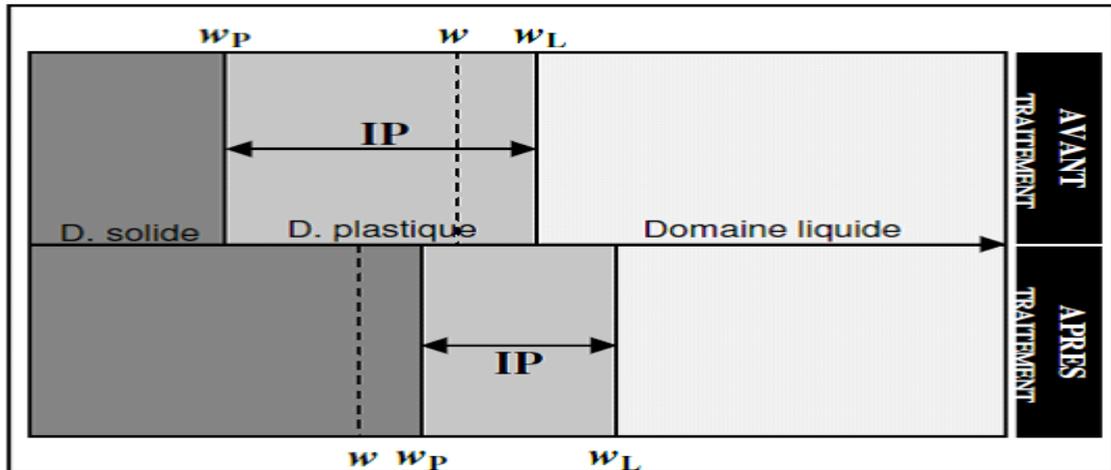


Figure I-8 : Modification des limites d'Atterberg d'un sol après traitement à la chaux [adaptée de Fedieux 2009]

La résistance de la compression simple d'un sol traité à la chaux est fonction de la proportion d'ajout de la chaux et ou des liants hydrauliques. On expose ici quelques exemples de sols naturels traités sous différents mélanges de chaux et ou de liant hydraulique.

Pour un sol naturel traité à 2% de chaux, la résistance à la compression simple passe de 0,30MPa à 24h de cure à 0,45MPa à 28j, puis à 0,50 MPa après 360j.

Pour un traitement à 6% de chaux les résistances aux mêmes échéances sont de 0,40, 0,90 et 1,00MPa Fedieux [2009].

Par contre l'apport de 3% de liant hydraulique LHR montre qu'un limon de classe A₁ développe une résistance simple de compression de 1,10MPa à 28j et de 1,19MPa à 60j. Un dosage de 4% de LHR donne une résistance simple de compression de 1,70MPa à 60j. Cette même résistance pour un dosage de 5% de LHR est atteinte à 28j Abdo [2008] ; Chardard et Gandille [2008].

Abdo [2008] ; Chardard et Gandille [2008], remarque également une amélioration de la résistance à la traction indirecte (R_{it}) (mesure indirecte de la résistance à la traction) et une augmentation du module d'élasticité (E) par exemple :

L'ajout de 3% de LHR permet à un limon de classe A₁ d'atteindre des résistances à la traction indirecte de 0,16MPa à 28j, de 0,27MPa à 60j et de 0,28MPa à 90j et respectivement des modules d'élasticité de 3897MPa, 5112MPa et 5301MPa.

Un malaxage à 5% de LHR donne une résistance à la traction indirecte simple et un module d'élasticité (R_{it} ; E) de (0,40MPa ; 8505MPa) à 90j [Abdo 2008 ; Chardard et Gandille [2008].

De ces exemples on peut en déduire que les sols naturels traités à la chaux et ou liant hydraulique en fonction de la proportionnalité des ajout ce qui suit :

une amélioration des paramètres de cisaillement (l'angle de frottement interne ϕ et de la cohésion c) en exemple lors d'un l'essai triaxial consolidé non drainé (CU) à 90j les caractéristiques



intrinsèques c et ϕ du limon classe A_1 sont de l'ordre de respectivement de 19kPa et 27° . Un traitement à 1% de chaux permet d'atteindre respectivement de 60kPa et 32° , tandis qu'un traitement à 3% de chaux permet d'atteindre respectivement de 74kPa et 33° Cuisinier [2008].

Un essai de cisaillement direct effectué sur un sol de limon naturel de classe A_2 montre des valeurs de l'angle de frottement et de la cohésion de respectivement 0kPa et 33° . Après traitement de ce sol à 2% de ciment, les valeurs de l'angle de frottement et de cohésion à 28 jours atteignent respectivement 120kPa et 40° . Un traitement à 4% de ciment montre des valeurs respectivement de 340kPa et 52° Gay et Schad [2000].

I-6 : EFFET DU COMPACTAGE SUR LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DU SOL TRAITE

La prise d'un sol traité à la chaux et ou liant hydraulique est fonction de son compactage. Les paramètres de compactage, énergie et teneur en eau, influencent sur la porosité et sur la perméabilité du sol traité.

I-6-1 : ACTION APRES TRAITEMENT D'UN SOL SUR SA POROSITE ET SA PERMEABILITE

Le traitement et ensuite le compactage à l'optimum Proctor normal (OPN) d'un sol de classe générale A, fait diminué la taille et le nombre des pores et de là le volume poreux total du sol entraînant une réduction des agrégats d'argiles formant un agglomérat plus compact et plus résistant Khattab [2002] ; Cabane [2004] ; Le Runigo [2008] Fig (I-9) et Tab (I-13). Consoli et al. [2009] annonce une diminution de la perméabilité du sol traité à la chaux et au liant hydraulique

Tableau I-1 : *Ordre de grandeur de la taille des pores dans un sol fin compacté après traitement à la chaux*



Référence	Matériau	Compacité	Age de cure (j)	Taille des pores (nm)		
				1-10nm	100-1000nm	>1000nm
Cabane [2004]	sol + CaO	OPN	non précisé	pas d'effet relevé	diminution 100-1000	disparition des pores > 1000nm
Bin <i>et al.</i> [2007] Cuisinier <i>et al.</i> [2008]	sol + CaO	OPN	non précisé	diminution des pores < 3nm	augmentation 50	10-3000
Le Runigo [2008]	sol	OPN	après compactage	pas d'effet relevé	400	2000
	Limon de Jossigny + 3%CaO	OPN	<i>immédiatement après traitement</i>		apparition 50	disparition des pores > 2000nm
			<i>entre 7 et 25 jours</i>		augmentation 10-100	diminution des pores > 1000nm
		+ w	<i>immédiatement après traitement</i>		augmentation 50-400	pas d'effet relevé
+ ε	<i>immédiatement après traitement</i>	pas d'effet sur les pores < 1000nm	pas d'effet relevé			

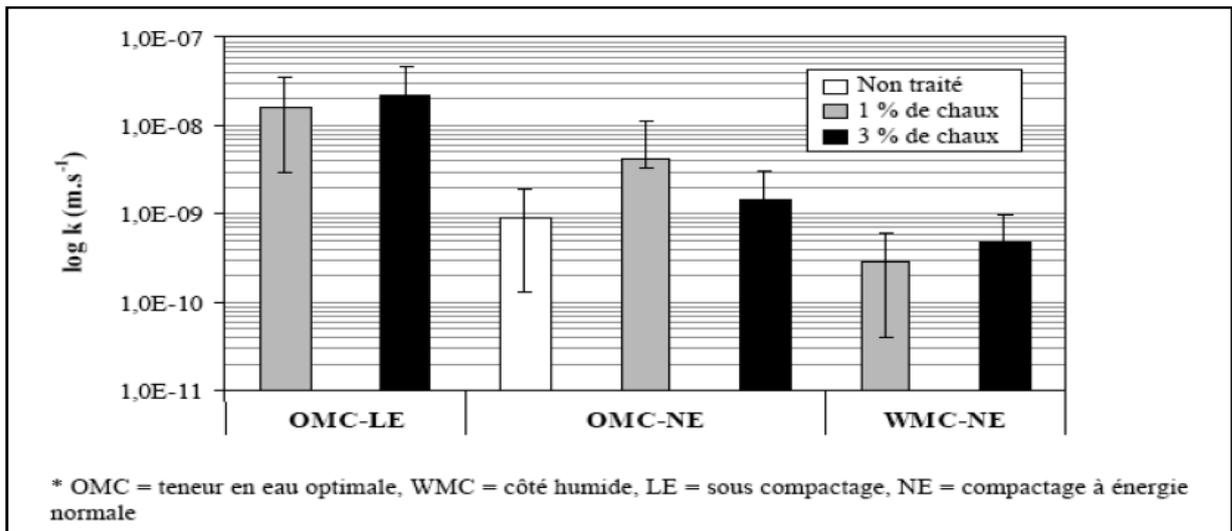


Figure I-9 : Influence du dosage en chaux et des conditions de compactage sur la perméabilité d'un limon après 25 jours de cure normale [Le Runigo 2008]

I-6-2 : DEVELOPPEMENT DES PERFORMANCES MECANIQUES D'UN SOL TRAITE

La structure et les caractéristiques mécaniques d'un sol traité sont liées. Les modalités de compactage, teneur en eau w et énergie ε, changent respectivement ces grandeurs et plus précisément la résistance à la compression simple R_c dont la valeur est en fonction de la porosité. Plus la porosité est grande plus la résistance à la compression simple est faible. Pendant le processus de prise, la résistance à la compression simple R_c est proportionnelle au dosage en liants et inversement



proportionnelle à la teneur en eau initiale w_0 . Le graphique de la Fig (I-10), donné par Petry et Berger [2006], montre les courbes d'évolution de la masse volumique sèche apparente ρ_d et de la résistance à la compression simple R_c en fonction de la teneur en eau w d'une argile traitée à 5% de chaux.

Le tableau I-2 donne les résultats de Wissa [1965]. Des essais de résistance au cisaillement sont menés sur des éprouvettes de sol traité à 5% de chaux compactées sous différentes exigences de variations de la teneur en eau du sol traité w et de l'énergie de compactage ε . L'angle de frottement ϕ du sol traité ne change pas par les variations apportées lors du mélange, constant à $31,5^\circ$. Par contre pour la résistance à la compression simple, un compactage du côté sec (DMC-NE) est pénalisant pour la cohésion c qu'un compactage du côté humide (WMC-NE). Une forte énergie de compactage du côté humide (WMC-HE) ne donne qu'une cohésion plus significative qu'à l'optimum Proctor normal (OMC-NE).

Kergoët [2001] propose un exemple de traitement d'un limon A_2 au LHR. Pour démontrer l'importance des conditions de compactage, la masse volumique sèche et la teneur en eau de compactage sont modifiées Tab I-2 et Tab I-3

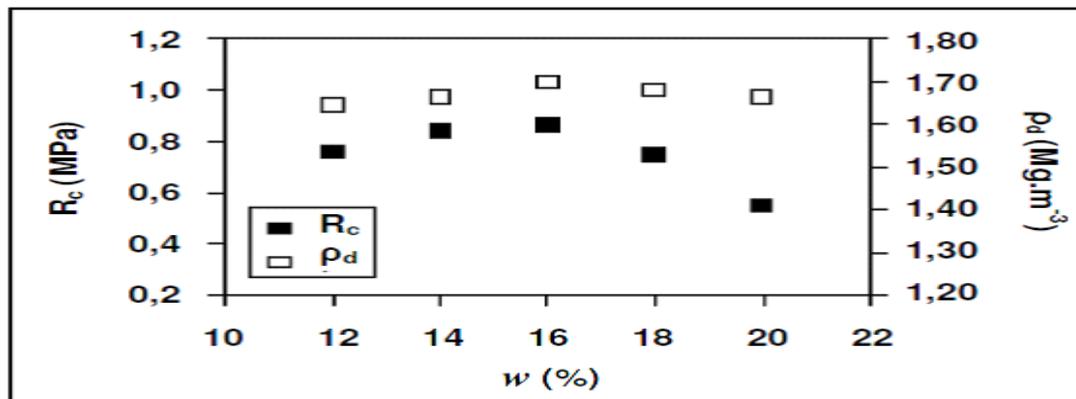


Figure I-10 : Influence des conditions de compactage sur la résistance à la compression simple d'une argile traitée à 5% de chaux , Petry et Berger [2006]

Tableau I-2 : Influence des conditions de compactage sur les paramètres de cisaillement d'un sol traité à 5% de chaux (OMC : teneur en eau optimale ; DMC : côté sec ; WMC : côté humide ; NE : énergie normale ; HE : haute énergie), adapté de Wissa [1965] dans Le Runigo [2008]

Teneur en eau (%)	Energie de compactage	Masse volumique sèche (Mg.m ⁻³)	c (kPa)	ϕ (°)
OMC 15,2	NE	1,80	99	31,5
DMC 13,7	NE	1,79	78	31,5
WMC 17,2	NE	1,80	86	31,5
WMC 17,6	HE	1,87	128	31,5

Tableau I-3 : Sensibilité aux paramètres (dosage en liant ; conditions de compactage) d'un limon A_2 traité au LHR, Kergoët [2001]



Point	Limon A2 + LHR (dosage %)	Compacité	Etat hydrique	R _t (MPa)	E (MPa)	Zone de classement
d5	5	96% ρ _{dOPN}	W _{OPN}	0,22	2,80	4
d6	6	96% ρ _{dOPN}	W _{OPN}	0,30	3,90	4
d7	7	96% ρ _{dOPN}	W _{OPN}	0,26	3,15	4
A	5,4	96% ρ _{dOPN}	0,9 W _{OPN}	0,20	2,80	5
B	5,4	96% ρ _{dOPN}	1,1 W _{OPN}	0,24	3,10	4
C	5,4	94% ρ _{dOPN}	W _{OPN}	0,15	2,15	5

I-7 : Conclusion

Il ressort ainsi de ces différentes études et d'essais effectués au laboratoire sous différents dosage qu'un sol maintenu à sa teneur en eau optimale et compacté au plus près de sa masse volumique sèche maximale offre un compromis technique intéressant entre sa résistances à la compression simple, ainsi qu'au cisaillement et à la traction. Les variations autour de cet optimum tendent à affaiblir l'une de ces performances

I-8 : ECHANGE AVEC L'ENVIRONNEMENT DES SOLS TRAITES ET LEUR STABILITE APRES PRISE

I-8-1: INTRODUCTION:

On a vue dans les paragraphes précédents que le sol naturel échange avec son milieu naturel par absorption et ou par évaporation. Ces échanges naturels ont pour origine deux sources, les agents atmosphérique, pluie neige etc..., pouvant être pollués par des produits chimiques dont les origines sont pour la plus grande partie les industries installés, mais également les eaux souterraine qui lors de leur remonté par capillarité dans le sol peuvent être pollués par des élément chimique nocifs qui réagissent avec les éléments chimique constituant le sol. Dans les sols les eaux pouvant être pollués sont de deux sortes. L'eau de constitution, teneur en eau d'un sol, et l'eau libre, eau interstitielle appelée également eau de circulation. La teneur en eau et l'eau interstitielle influent sur la plasticité, la cohésion et la porosité d'un sol en fonction de sa composition minéralogique sous l'action du chlorure Cl⁻, du sulfate SO₄²⁻, des nitrates NO₃⁻ et de l' orthophosphate PO₄³⁻ présents dans l'eau libre du sol. L'apport d'eau de préparation du mortier rentrant dans le traitement altère également sensiblement l'action des liants hydraulique [LCPC-SETRA 2000]. La chimie de l'eau de gâchage doit être approximativement neutre pH autour de 7. Le traitement d'un sol par la chaux et où les liant hydraulique doit prendre en considération tous les problèmes de pollution du sol naturel et de l'eau.

I-8-2 : ACTION D'ENTRAINEMENT DES SELS SOLUBLE PAR L'EAU :

On a vue que l'eau est le seul élément qui circule à travers les particules constituant les sol Il a cette propriété de dissoudre certain élément chimique du sol et les transmettre à son environnement immédiat Deschamps et al. [2006], Stegemann et Côté [1996]. L'extraction des principes solubles d'une substance par le lavage d'un matériau traité tend plus à assurer une durabilité physico-chimique du traitement et non une stabilité mécanique.



La méthodologie développée par le guide d’acceptabilité des matériaux traités en techniques routières SETRA [2011] repose sur ce principe. Néanmoins les sollicitations de l’eau, par immersion ou par percolation, font évoluer en même temps les propriétés physicochimiques, microstructurales et mécaniques des sols traités. Ces changements de propriétés du sol traité se distinguent par, pour l’immersion, une évolution de la porosité pour un sol traité par 1 à 3 % de chaux compacté à l’OPN, Le Runigo [2008]. Le Borgne [2009] constate une baisse de résistance à la compression simple d’un limon traité à 1,5% de chaux et 6% de ciment CEMII immergé à 20°C. Pour une immersion à 40°C la baisse de la résistance de compression simple est effective quel que soit le temps de cure avant immersion Tab (I-3).

Quand à la percolation pour un traitement à 1% de chaux on constate une diminution de la microporosité et une augmentation significative de la macroporosité. L’amplitude des pertes de performances mécaniques liées à une circulation d’eau à travers un sol traité semble liée au temps de cure De Bel et al. [2005], Le Borgne [2006], à la quantité de liant Mc Callister [1990], dans Le Runigo [2008] et aux conditions de compactage, teneur en eau et énergie, Le Runigo [2008]. Ainsi, plus ces paramètres ci indiqués sont faibles plus les pertes de performances mécaniques sont importantes sous l’action de l’eau Fig (I-11).

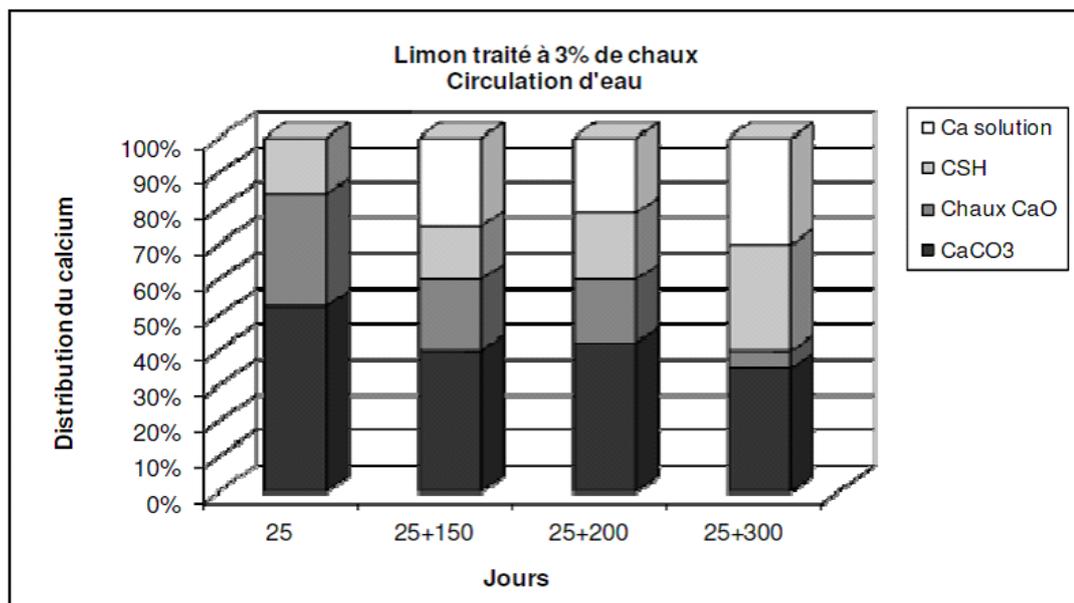


Figure I-11 : Bilan calcium du limon traité à 3% de chaux après 25 jours de cure et 0, 150, 200 et 320 jours de percolation Deneele [2008] d’après Le Runigo [2008]

I-9 : GEOTECHNIQUES PLANIFIE DES SOLS TRAITES

I-9-1 : INTRODUCTION

Dès que la classification des sols à traiter est effectuée, le GTR informe sur la nature et la qualité des études de traitement à mener en fonction de la destination des matériaux à traiter et des techniques de mise en œuvre.

Le GTS requit un traitement selon des indications techniques en fonction de la nature et des propriétés du matériau à traiter LCPC-SETRA (2000) en couche de fondation LCPC-SETRA (2007). La figure I-12 donne une représentation de la structure transversale d’une route et précise les différentes couches la constituant.

I-9-2 : SOLS ETUDIES

La réutilisation d’un sol de terrassement en couches d’assise de chaussée est régie par les prescriptions du GTS 2007 LCPC-SETRA [2007].

L’utilisation des sols de terrassement traités préalablement ne concerne que quelques classes de sols définies selon le GTR. En effet, le GTS [2007] fixe des paramètres de granularité et d’argilosité à ne pas dépasser Tab (I-5).

Seuls des sols de classes A₁, A₂ et B₂ à B₆ assure plus ou moins à des degrés convenables ces critères spécifiques

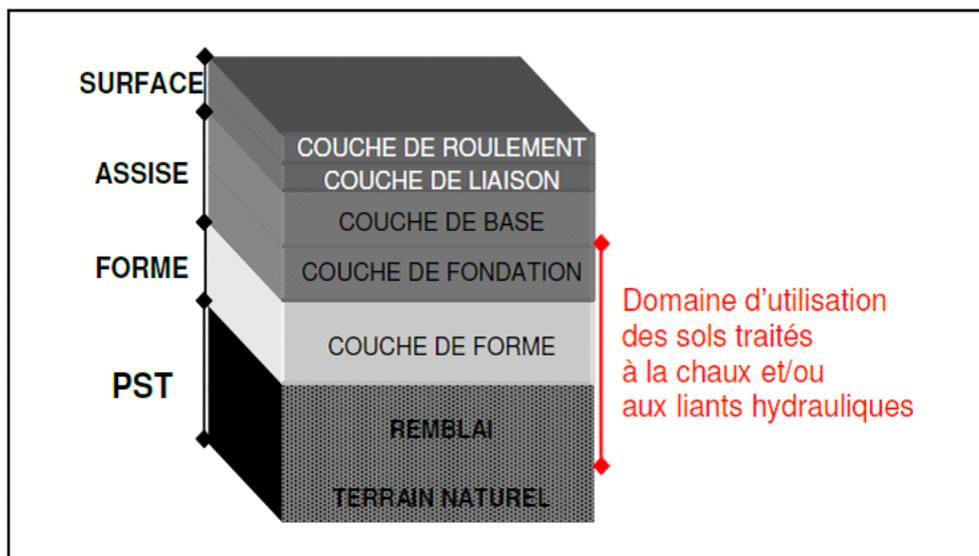


Figure I-12 : Coupe transversale d’une structure routière [adaptée de Rolland [2006] ; Bocciardi et Nicaise [2008] ; planete-tp.com 2009 ; cercle-recyclage.asso.fr [2009]

Tableau I-4 : Critères d’argilosité et de taille granulaire des sols utilisables en couches d’assise [LCPC-SETRA [2007]



Types de sols concernés par le GTS 2007		Critères limitatifs		
		Argilosité	Granularité en mm	
			Dmax (*)	D (**)
Sols fins	A ₁ , A ₂	VBS < 5 ou I _p < 20	≤ 31,5	≤ 20
Sols sableux	B ₅ , B ₆	VBS < 2,5	≤ 8	≤ 6,3
	B ₂	0,2 < VBS < 1		
Sols graveleux	B ₅ , B ₆	VBS < 2,5	≤ 31,5	≤ 20
	B ₃ , B ₄	0,1 < VBS < 1		

(*) Dmax : dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol (selon NF P11-300)
 (**) D : dimension maximale de tamis pour laquelle le passant est compris entre 80 et 90%

I-9-3 : CONDITIONNALITES DE LA PORTANCE IMMEDIATE

Le GTS 2000 LCPC-SETRA [2000] donne les conditions pour une valorisation en couche de forme en fonction de la classe de sol GTR LCPC-SETRA [1992]. Les dosages en chaux vive et en liant hydraulique sont fixés pour que l’efficacité du traitement soit assurée. Une marge de sécurité est alors assurée ainsi aux sols de terrassement traités pour leur réutilisation pour les différentes couches d’assise de chaussée d’une route. L’énergie de compactage utilisée, normale ou modifiée, dépend du type de sol, fin (A₁, A₂), sableux (B₂, B₅, B₆) ou graveleux (B₃ à B₆). La portance à l’optimum Proctor doit alors satisfaire à l’exigence minimum Tab (I-5) pour une utilisation du sol traité en assise de chaussée.

Tableau I-5 : Valeurs minimales de l’IPI pour les matériaux traités LCPC-SETRA [2007]

Type de sol	IPI minimum
A ₁ et A ₂	20
B sableux	30
B graveleux	50

I-9-4 : APTITUDE DES SOLS DE TERRASSEMENT AU TRAITEMENT A LA CHAUX ET OU LIANT HYDRAULIQUE

L’aptitude d’un sol de terrassement au traitement (NF P94-100) passe par l’évaluation du gonflement volumique (G_v) et de la résistance à la traction indirecte (R_{ti}) résultante d’une éprouvette cylindrique 5×5 cm après une immersion de 7 jours en bain thermostatique. Ces conditions de cure, explicitement défavorables par rapport a ce peut endurer le matériau dans son l’environnement,



accélèrent les réactions de prise et d'hydratation des liants hydrauliques. Cet essai, dans un délai court, nous informe si des agents chimiques, organiques ou minéraux, ont nuie à la solidification du sol traité. La figure (I-13) donne les seuils de gonflement et de résistance à la traction simple indirect donnés par le GTS en fonction des exigences techniques sur les chantiers. En convenance avec les normes du GTS LCPCSETRA (2000), le matériau de terrassement étudié peut être déclaré soit :

- Directement apte au traitement, il gonfle peu et présente une résistance de traction indirect (R_{it}) élevée
- Potentiellement apte au traitement si certaines conditions sont prises sur le chantier à savoir le drainage de la couche si le sol est légèrement sensible à l'eau, augmentation de la durée d'interdiction de circulation sur la couche d'assise tant que la résistance de la compression simple (R_c) est inférieure à 1MPa
- Inapte si les caractéristiques physiques ou mécaniques sont insuffisantes. Alors d'autres solutions sont prise pour rendre ce sol apte au traitement ajout d'autre matériau par exemple au sol inapte ect.

D'une manière général un gonflement du sol (G_v) inférieur à 5% et une résistance au cisaillement indirect (R_{ii}) supérieure à 0,2MPa indique son aptitude au traitement

Les caractéristiques mécaniques des sols de terrassement traités doivent obéir aux conditionnalités suivantes à court et long terme. Le GTS [2007] fixe l'efficacité mécanique à atteindre à court et à long terme pour des matériaux traités pour une utilisation en couches d'assise. Cette efficacité est évaluée sur des éprouvettes placées dans un moule hermétique, à $20\pm 2^\circ\text{C}$ en cure normale. Les exigences du guide sont répertoriées dans les tableaux ((I-6) et (I-7)).

A long terme ,une fois que la chaussée d'assise d'une route est exposés à son environnement, l'efficacité mécanique du sol traité l'à constituant doit être suffisamment élevée pour lui permettre de rester stable et de supporter les différentes charges auxquelles elle est soumise. Deux essais permettent de juger de cette durabilité tableau ((I-8) et (I-9)) qui sont :

- La résistance à la compression simple après immersion (R_{ci}) représente un indicateur de la sensibilité du matériau solidifié à l'eau.
- L'aplatissement de la courbe Proctor après traitement

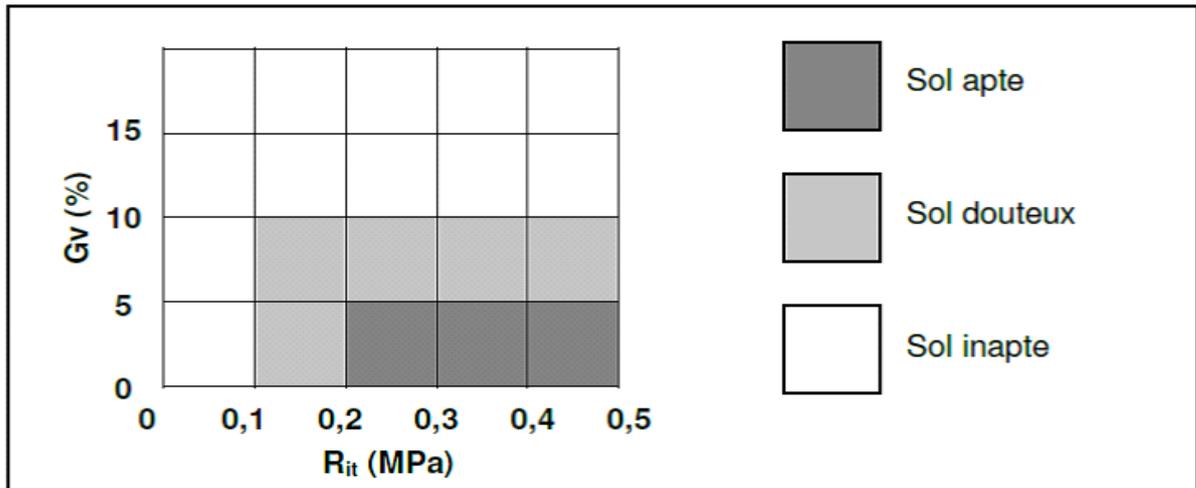


Figure I-15 : Critères d'évaluation de l'aptitude au traitement d'un sol traité à la chaux et aux liants hydrauliques [LCPC-SETRA 2000 mis en forme par Cabane [2004].

Tableau I-6 : Caractéristiques mécaniques requises pour l'utilisation d'un sol traité en couches d'assise à court terme [LCPC-SETRA 2007]

Aspect du comportement du sol traité considéré	Caractéristiques mécaniques représentatives	Critères de jugement
<p><i>Critère de traficabilité</i> Age autorisant la circulation sur la couche traitée</p>	R_c à 7 et 28j	<p>La couche d'assise peut être circulée dès $R_c \geq 1\text{MPa}$</p> <p>L'âge au bout duquel cette condition est réalisée est déduit par interpolation entre les valeurs de R_c mesurées à 7 et 28j</p>
<p><i>Critère de résistance au gel</i> Age pour lequel la résistance du matériau traité est suffisante pour qu'il ne soit pas affecté par une période de gel</p>	R_t ou R_{it} ($R_t = 0,8 R_{it}$) mesurée à l'âge du sol traité correspondant à la date probable d'apparition du gel sur le chantier considéré	La résistance au gel est jugée satisfaisante si $R_{it} > 0,25\text{MPa}$ à la première apparition statistique possible du gel

Tableau I-7 : Caractéristiques mécaniques requises pour l'utilisation d'un sol traité en couches d'assise à long terme [LCPC-SETRA 2007]



Aspect du comportement du sol traité considéré	Caractéristiques mécaniques représentatives	Critères de jugement
<i>Critère d'insensibilité à l'eau</i> Résistance à l'immersion au jeune âge	R_c après 28j de cure normale suivis de 32j d'immersion totale dans l'eau à 20°C (R_{ci}) R_c après 60j de cure normale (R_{c60})	La résistance à l'immersion au jeune âge est jugée satisfaisante si : $R_{ci}/R_{c60} \geq 0,80$ lorsque VBs $\leq 0,5$ $R_{ci}/R_{c60} \geq 0,70$ lorsque VBs $> 0,5$
Performances escomptables à long terme	R_t ou R_{it} ($R_t = 0,8 R_{it}$) et module élastique E_t ou E_{it} mesurés à 28 et 90j et, si nécessaire, à 180j dans le cas des liants à prise lente	Le couple (R_t , E) déterminé à 90j (ou éventuellement à 180j dans le cas de liant à prise lente) conduit au moins à un matériau de classe mécanique T1

Tableau I-8 : Résistance à l'immersion de sols traités

Référence	Type de sol	Traitement	R_{ci}/R_{c60}
Kergoët [2001]	Limon A ₂	5% LHR	0,90
		7% LHR	0,95
Cabane [2004]	Limon de Meaux A ₂	1% CaO + 5%CEMII/B 32,5	0,72
	Limon de Normandie A ₂	1% CaO + 5%CEMII/B 32,5	0,82
Abdo [2008] ; Chardard et Gandille [2008]	Sable limoneux B ₅	3% LHR	0,88
		4% LHR	0,83

Tableau I-9 : Seuils de classes mécaniques des sols traités [LCPC-SETRA 2007]

Type de sol	Limite T0/T1	Limite T1/T2	Limite T2/T3
Sols fins et sableux	E 2500MPa	E 4000MPa	E 6200MPa
	R_t 0,20MPa	R_t 0,44	R_t 0,80MPa
Sols graveleux	E 3300MPa	E 8200MPa	E 16200MPa
	R_t 0,24MPa	R_t 0,54MPa	R_t 1,02MPa

I-9-5 : COMMENTAIRE ET CONCLUSION



I-9-5-1 : Commentaire

On a indiqué précédemment que l'efficacité du traitement répondait à plusieurs critères définis par les essais demandés et cités ci-dessus. Le tableau (I-8) expose les études pour lesquelles le rapport R_{ci}/R_{c60} a été pris en compte, tout en assurant la durabilité du matériau. plusieurs combinaison de traitement appliquées à une même classe géotechnique de sol permettent une insensibilisation à l'eau.

Le tableau (I-9) fait apparaître la résistance à la traction indirecte R_{it} , mesurée conjointement au module d'élasticité du matériau solidifié E_{it} à 30% de la charge de rupture à 90 jours. Ce paramètre permet d'évaluer les performances à long terme du matériau en lui affectant une classe mécanique utile au dimensionnement de la couche d'assise.

I-9-5-2 : Conclusion

L'utilisation de liants hydrauliques lors du traitement pour une utilisation de sols en terrassement implique de connaître les processus physico-chimiques mis en jeu au sein des matériaux cimentaires simples tels que la pâte de ciment. Des hydrates cimentaires se développent au contact de l'eau du sol assurant ainsi la prise.

L'application d'un traitement mixte, chaux et liant hydraulique, à un sol, implique des modifications physiques immédiates de floculation et de cimentation. L'amélioration de la portance et des résistances, la compression simple, la traction et le cisaillement dépendent du type de compactage adopté.

Un compactage du côté humide, s'il est favorable pour diminuer la perméabilité du sol traité, induit de faibles performances à court terme ; un sous-compactage conduit non seulement à une forte perméabilité mais aussi à de faibles performances mécaniques. Le compactage à l'optimum Proctor donne de bonnes performances mécaniques à court et long terme ainsi qu'une durabilité satisfaisante assurée par une perméabilité faible.

Le GTS a été appliqué aux couches d'assise en [2007]. Il a permis l'amélioration des critères géotechniques des sols traités constituant les couches d'assise d'une chaussée. L'expérience développée pour les couches de forme a montré GTS [2000], que le traitement n'est pas exempt d'échec, la prise des liants hydrauliques est mise parfois en défaut.

L'inaptitude au traitement se traduit par des gonflements, une sensibilité à l'eau ou de trop faibles résistances mécaniques. Le GTS admet que certaines substances solubles, naturelles ou anthropiques, peuvent en être responsables. Ainsi, la compréhension de la chimie du système sol/eau de gâchage devient fondamentale pour assurer l'intégrité à long terme de la chaussée de route qui est une structure porteuse.



CHAPITRE II

APPROCHE EXPERIMENTALE ET RESULTATS OBTENUS AU LABORATOIRE 3SR DES SOLS TRAITES À LA CHAUX



II-1 : OBJECTIFS DE L'ETUDE EXPERIMENTALE

II-1-1 : Introduction

Les chaussées à faible trafic, comme les chaussées en général, sont construites avec différentes couches de matériaux superposées ; il s'agit presque toujours de matériaux d'apport constitués par des granulats qui sont soit simplement compactés, soit traités au préalable avec un liant hydraulique ou hydrocarboné.

Le sol naturel sur lequel doit reposer la chaussée peut être de qualité extrêmement variable selon sa nature et son état, teneur en eau surtout. On rencontre fréquemment des sols limoneux ou argileux qui sont médiocres ou même franchement mauvais, surtout dans le cas des routes rurales à faible trafic qui sont construites avec le minimum de terrassements. D'où l'idée de traiter ces sols fins humides pour améliorer leurs propriétés mécaniques : l'incorporation de chaux est actuellement un des procédés les plus utilisés et les plus efficaces.

Il s'agit de chaux dites aériennes, obtenues par cuisson du calcaire CaCO_3 , et que l'on utilise soit sous forme de chaux vive CaO , soit sous forme de chaux éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

L'action de la chaux sur l'argile du sol est connue depuis longtemps, puisque employée pour les fondations de certaines voies romaines.

Le traitement des sols à la chaux en technique routière a été utilisé depuis une trentaine d'années mais a connu un essor particulier depuis 1965 aux Etats-Unis, puis en Europe avec l'apparition d'engins de malaxage du type pulvimixer plus puissants et plus performants, permettant à la fois de traiter des sols plus cohérents et sur une épaisseur plus importante.

Dans le mécanisme de l'action de la chaux sur les sols fins limoneux ou argileux, il faut distinguer, bien que cela ne soit pas apparu clairement au début de l'utilisation de ce procédé :

- a)- les effets à court terme, que l'on peut désigner par amélioration immédiate du sol à la chaux,
- b)- les effets à longs termes, que l'on peut désigner véritablement par le terme de stabilisation.

Il faut enfin noter que le traitement à la chaux peut être utilisé comme traitement préalable à une stabilisation au ciment : ceci permet de réaliser un mélange suffisamment intime avec le ciment lorsque le sol est cohérent, et les effets de la chaux s'ajoutent alors à ceux du ciment. Cette façon de faire n'est pas prise en considération dans cet exposé

L'étude expérimentale mise en œuvre au laboratoire 3SR Grenoble est définie de la manière suivante : dans une première partie, les propriétés, à court terme et à long terme, du traitement à la chaux sont rappelées. Dans une deuxième partie, les résultats d'une série d'essais effectués à la Division Mécanique des Sols du laboratoire 3SR sont présentés.

II-1-2 : Caractéristiques principales du traitement à la chaux :

- Effets à court terme

Ils se traduisent par des modifications géotechniques immédiates du sol : Augmentation de la limite de plasticité, de l'ordre de 2 à 5 points selon la nature du sol ; cette augmentation est d'autant plus forte que l'indice de plasticité du sol non traité est plus élevé. Comme la limite de liquidité augmente aussi, mais moins, l'indice de plasticité diminue. On constate également une modification de la courbe de compactage, une diminution du poids volumique sec, une augmentation de la teneur en eau optimale et une courbe Proctors' aplatis Fig II-1.

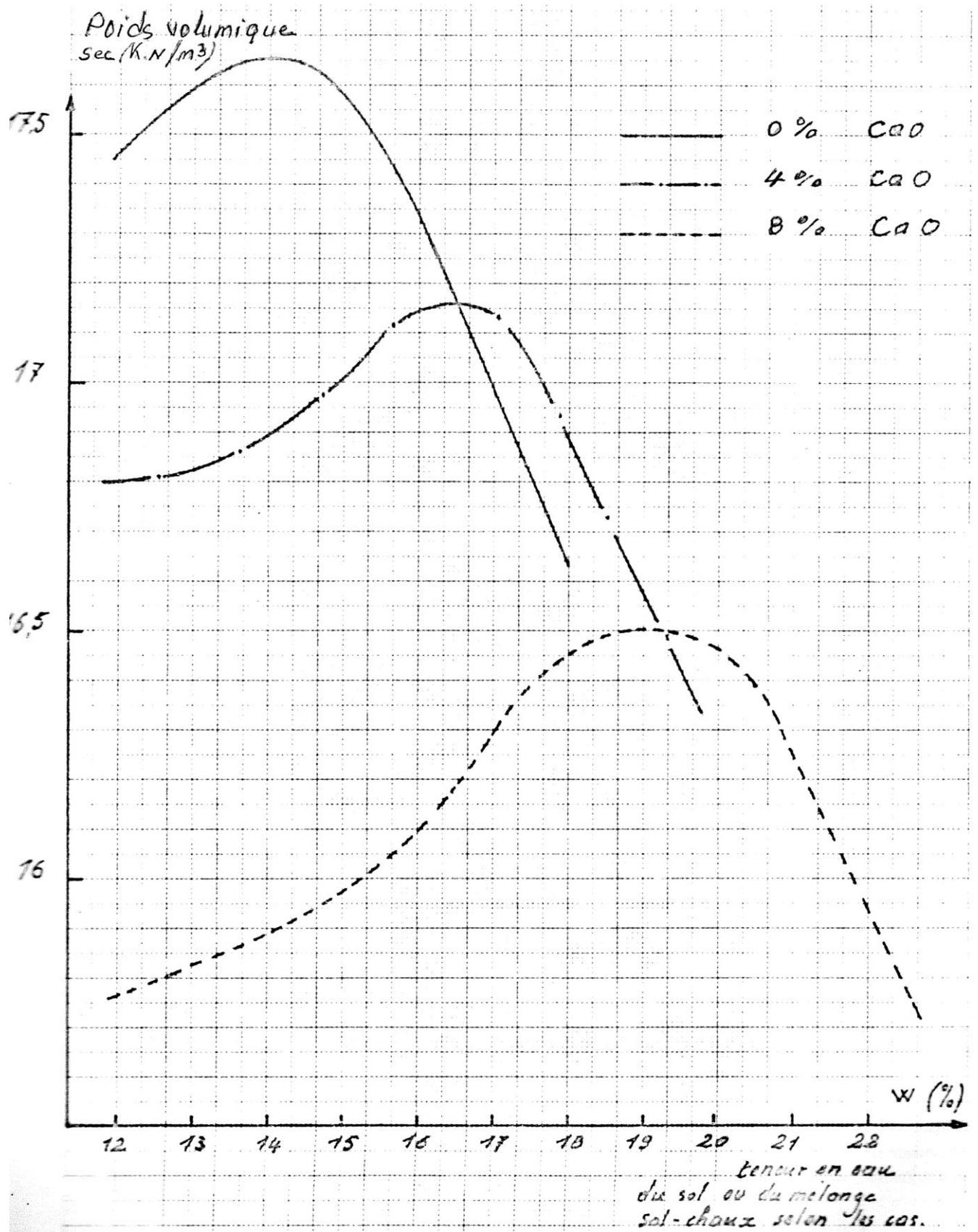


Fig II-1 : Influence du traitement à la chaux sur les caractéristiques de compactage Laboratoire 3SR Grenoble



Ces améliorations sont rapides moins d'une heure après l'adjonction de chaux et s'expliquent par une granulation du sol. Il se forme des grumeaux de sol-chaux non collants, plus petits que ceux du sol naturel et surtout plus stables en présence d'eau. Cette stabilité à l'eau des grumeaux de sol-chaux a d'ailleurs conduit le centre de recherches Routières de Belgique à mettre au point un essai destiné à évaluer l'aptitude d'un sol à être traité par la chaux : la proportion de grumeaux de sol traité qui ne se délitent pas lors d'un tamisage sous l'eau donne une bonne idée de cette aptitude. De plus, dans le cas où on utilise de la chaux vive, il se produit un assèchement du sol dû à la réaction d'extinction de la chaux et au fait que cette réaction est exothermique.

Après traitement la courbe de la variation de l'indice portant CBR immédiat du sol-chaux en fonction de la teneur en eau de compactage est analogue à celle du sol naturel, mais décalée vers les teneurs en eau plus élevées de 2 à 7 % selon la nature du sol et le dosage en chaux. Il a été remarqué au laboratoire que le traitement se traduit le plus souvent par une augmentation tout à fait notable de la portance immédiate, et ce, d'autant plus qu'il y a assèchement du sol. On observe également, pour une même teneur en eau initiale du sol naturel, une augmentation, non seulement de l'indice portant CBR immédiat, mais aussi de l'indice portant CBR après quatre jours d'immersion.

L'ensemble de ces améliorations immédiates est obtenu pour un faible dosage en chaux, de l'ordre de 1% : une augmentation du dosage en chaux à peu de conséquences à ce point de vue.

Le traitement à la chaux peut donc transformer un sol naturel limoneux ou argileux gorgé d'eau en un fond de forme bien réglé et résistant : ceci permet alors de mettre en œuvre et en particulier de compacter correctement les couches de chaussées, ce qui aurait été impossible sans augmenter considérablement leur épaisseur. D'autre part, lorsque le risque d'une pollution du corps de chaussées par le sol naturel sous-jacent existe, la couche de sol traité à la chaux constitue une couche anti-contaminante efficace.

- Effets à long terme

En plus des phénomènes décrits aux paragraphes précédents, il se produit une réaction entre la chaux et les particules argileuses contenues dans le sol : cette réaction, qui se traduit par un durcissement du mélange sol-chaux, est très lente et se poursuit durant une longue période, plusieurs années semble-t-il, à la température qui est celle des sols en place.

Ces effets ont pu être constatés in situ, en particulier sur des couches de forme autoroutières : des carottes prélevées dans la couche traitée et immergées conservent un indice portant CBR de l'ordre de 20 au bout de 3 mois et cet indice portant atteint 60 au bout d'un an ; de même les vitesses de propagation mesurées avec le vibreur Goodman indiquent une lente amélioration avec le temps.

D'autre part, plusieurs études approfondies ont été conduites au laboratoire pour examiner le développement dans le temps des résistances mécaniques dues à cette réaction de la chaux sur l'argile du sol. Celles-ci sont généralement évaluées à partir d'essais sur éprouvettes en compression simple. Leurs principales conclusions se rejoignent et sont les suivantes :

- Lorsqu'on mesure la consommation de chaux dans le temps, on constate que les résistances suivent une évolution analogue, c'est-à-dire qu'elles vont de pair avec l'avancement chimique de la réaction.

- L'évolution des résistances dans le temps peut être une courbe continue, ou marquer des paliers plus ou moins accentués. Mais le plus souvent, on constate que les résistances augmentent dans le temps suivant une allure différente c'est-à-dire qu'il se produit plusieurs phases qui pourraient correspondre à des mécanismes de réaction différents et qui s'enclencheraient successivement.

Ainsi ce phénomène apparaît clairement sur la figure 2 tirée des essais expérimentaux laboratoire 3SR PERRET (1977) ou on a porté les résistances en fonction de la quantité de chaux consommée : on observe que dans la première phase de la réaction l'augmentation de résistance avec la consommation de chaux est la même quel que soit le dosage ; dans la deuxième phase par contre, la variation de résistance dépend du dosage, et c'est avec le dosage le plus faible (3%) que le rendement de la réaction (vis -a- vis des résistances mécaniques) est le plus élevé ; mais ceci n'empêche pas que les résistances finales soient les plus élevées avec 7% de chaux.

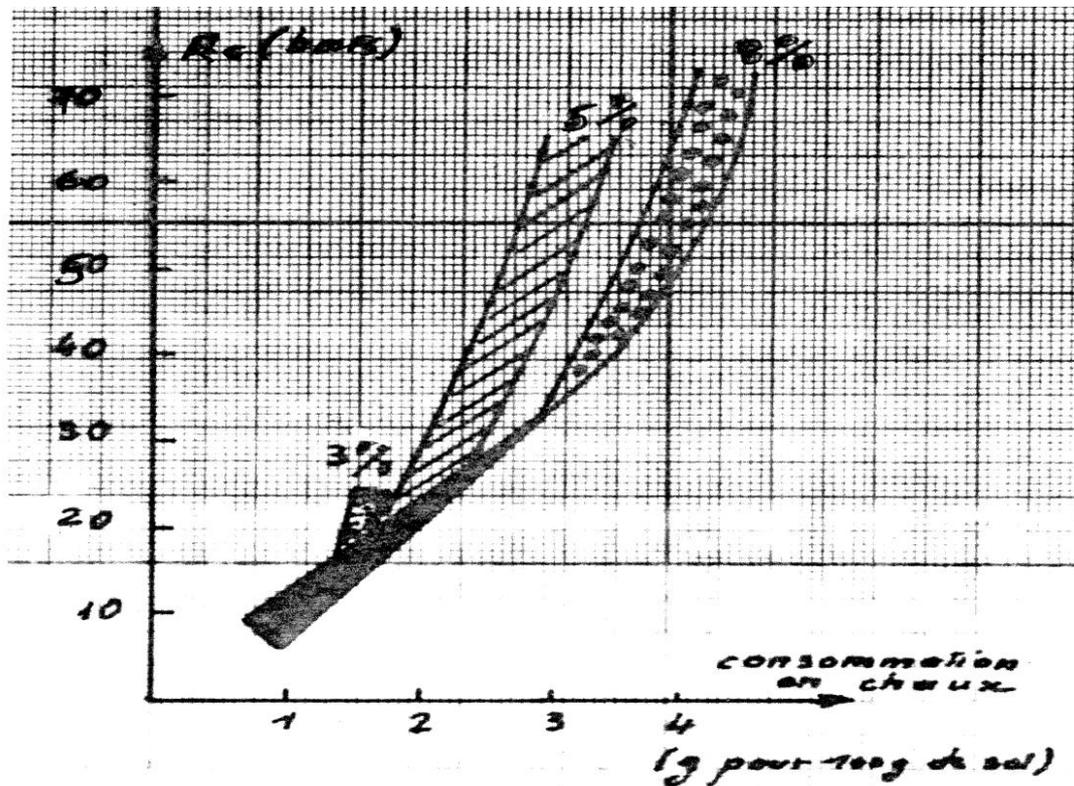


Fig II-2 : Evolution des résistances à la compression en fonction de la qualité chaux vive consommée pour différents dosages laboratoire 3SR Grenoble

M. PERRET (1977) a proposé de traduire l'évolution des résistances R_c dans le temps dans un diagramme où l'on porte en abscisse R_c et en ordonnée $(R_c - (R_c)_0) / t$, $(R_c)_0$ étant la résistance du sol non traité compacté dans les mêmes conditions. On obtient alors, et ceci a été confirmé par d'autres expérimentateurs, des segments de droite successifs (figure 3), chaque segment de droite correspondant à une « phase » de la stabilisation :

$$R_c - (R_c)_0 / t = - aR_c + b$$

a et b sont des paramètres dépendants de la nature des sols

Dans le diagramme normal, R_c en fonction du temps, cela correspondrait donc à des arcs successifs d'hyperbole équilatère. En particulier ceci met en évidence une valeur limite de R_c pour chaque phase, égale à b/a , et correspondant à un temps théoriquement infini.

Les paramètres qui influent sur la valeur des résistances atteintes sont, en dehors du dosage en chaux, la teneur en eau de compactage et la densité sèche correspondante, c'est -à- dire l'énergie de compactage. En particulier, pour beaucoup des études faites, la densité sèche des éprouvettes semble relativement élevée, et davantage proche des conditions de l'optimum Proctor modifié que de celles de l'optimum Proctor normal.

Il faut attirer l'attention sur l'influence de la teneur en eau de compactage : il est ainsi possible d'obtenir des résistances supérieures avec dosage en chaux inférieur ; avec $W = 13,5\%$ et 5% de chaux, M. PERRET (1977) a ainsi obtenu des résistances de l'ordre de 60 bars au bout d'un an, au lieu de 40 bars seulement avec $W = 8,5\%$ et 7% de chaux.

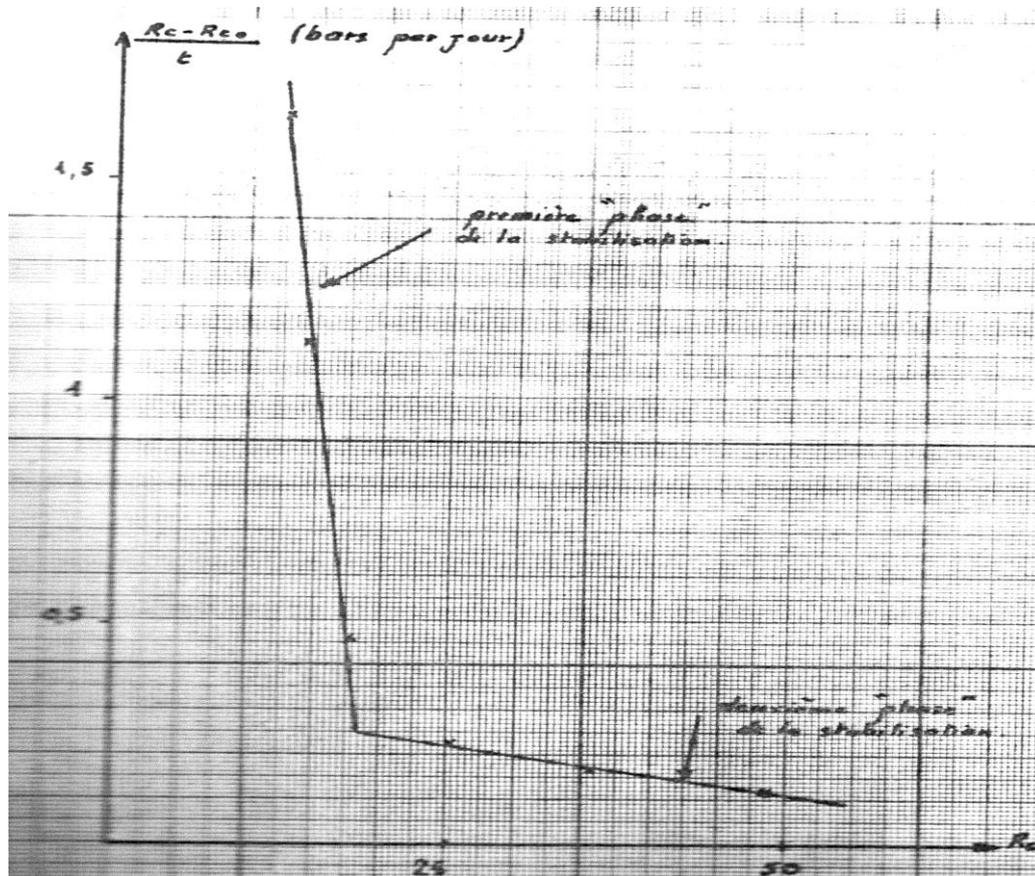


Fig II-3 : Interprétation des différentes phases de la stabilisation, évolution des résistances à la compression avec le temps laboratoire 3SR Grenoble

La nature du sol étudié joue aussi beaucoup ; en fait, c'est la quantité et la nature des particules argileuses ($< 2\mu$) qui semble le facteur prépondérant. Ainsi pour une même nature des minéraux argileux, M. PERRET (1977) a observé des lois d'évolution des résistances fonction croissante de la quantité de cette argile, ou mieux, de la surface spécifique correspondante. Par contre, si les minéraux argileux varient, les lois d'évolution des résistances peuvent se modifier fortement.

Pour conclure ce paragraphe, un certain de sols traités à la chaux semblent susceptibles d'acquérir à long terme des résistances mécaniques très élevées, de 50 à 80 bars.

Il faut également étudier la durabilité des propriétés de ce sol-chaux, c'est-à-dire leur capacité de résister à l'effet nocif de l'eau venant de la surface de la chaussée du fait des précipitations, ou bien de la nappe d'une part, des phénomènes de gel-dégel le cas échéant d'autre part. La sensibilité à l'eau du mélange sol-chaux est le plus souvent examinée en comparant la résistance à la compression d'éprouvettes immergées pendant 1 à 14 jours avec celles d'éprouvettes de même âge n'ayant pas subi d'immersion. Les résultats varient avec les conditions de compactage des éprouvettes, le dosage en chaux, etc. mais, d'une manière générale, le sol-chaux reste sensible à l'eau au jeune âge :

il faut attendre 3 mois pour les sols argileux réagissant le mieux avec la chaux à un an pour que la diminution relative de la résistance due à l'immersion soit inférieure à 25%.

II -2 : RESULTATS DE L'ETUDE MENEES AU LABORATOIRE 3SR GRENOBLE SUR LA STABILISATION A LA CHAUX

II-2-1 : Objectif

Le traitement à la chaux est habituellement réalisé pour bénéficier de tous les avantages rappelés ci-dessus des effets à court terme et à les effets à long terme. Or, la réaction entre la chaux et les particules argileuses du sol permet dans certains cas d'atteindre des résistances très élevées à long terme et ceci malgré l'influence de l'immersion ou du gel-dégel. Une étude a donc été menée en laboratoire pour examiner s'il subsistait dans le temps une certaine résistance, malgré la présence d'eau, et ceci pour un sol limoneux ne présentant pas de réactivité particulière avec la chaux.

II-2-2 : Caractéristiques géotechniques du sol étudié

Il s'agit d'un limon des plateaux venant de la région de Château-Thierry et représentatif des sols fins superficiels fréquemment rencontrés. Le sol ayant servi aux essais a été prélevé en plusieurs fois. Sur chaque lot ont été effectués divers essais d'identification. Le fuseau obtenu à partir des courbes granulométriques de 9 échantillons a été tracé sur la figure 4. Le pourcentage moyen des particules inférieures à 2μ est de 15,5%. Les limites d'Atterberg obtenues sur 23 échantillons donnent une valeur moyenne de la limites de liquidité de 32,7% et celle de l'indice de plasticité de 7,6% L'analyse minéralogique effectuée sur les particules inférieures à 2μ a montré qu'elles contenaient 1/3 de Kaolinite, 1/3 d'illite et 1/3 de smectite.

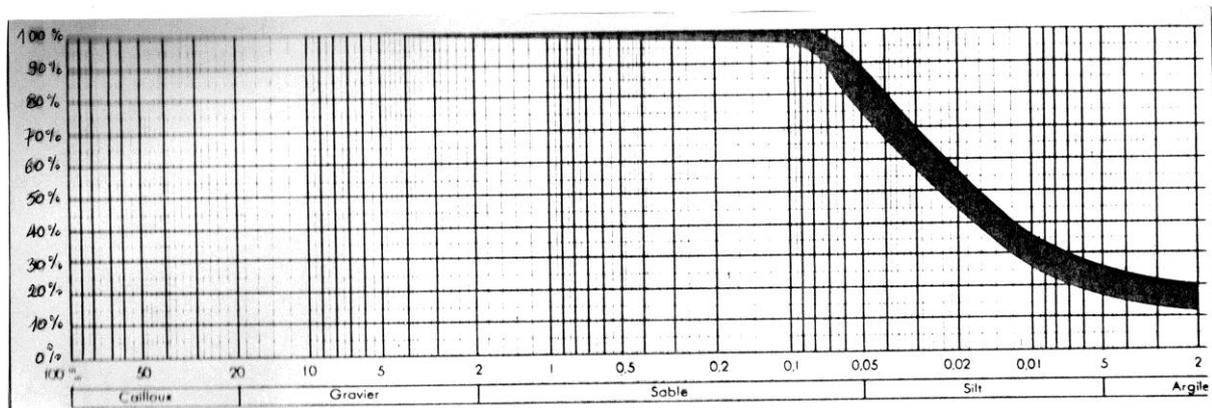


Fig II-4 : Courbe granulométrique du sol étudié laboratoire 3SR Grenoble

Les essais de compactage ont indiqué, par contre, une dispersion plus forte, surtout sur la valeur du poids volumique sec maximum atteint ; pour l'énergie de compactage Proctor modifié, la teneur en eau optimum est de 14% et le poids volumique sec correspondant varie de 17,85 à 18,4 KN/m³. Le faible indice de plasticité et le pourcentage de particules inférieures à 2μ conduisent a priori à estimer qu'il n'aura pas d'effets

II-2-3 : Objectifs recherchés :

L'Objectifs recherchés et Amélioration immédiate du sol avec la chaux. Celle-ci a été vérifié par une étude préliminaire, sur des éprouvettes cylindriques compactées avec l'énergie Proctor normal d'une part et à partir d'essais CBR d'autre part à titre de « témoin », la résistance à la compression simple d'une éprouvette de sol naturel compactée à l'optimum Proctor normal est de 2



bars . Cette même éprouvette plongée dans l'eau s'effondre en moins d'une heure. enfin on peut réaliser un essai d'imbibition capillaire en examinant la vitesse de montée de l'eau dans une éprouvette dont seule la base est en contact avec l'eau. En moins d'une heure, l'eau monte sur 8 cm et ensuite la base de l'éprouvette se désagrège.

En incorporant 2% de chaux vive au sol ayant la même teneur en eau initiale, 16 à 17%, on obtient une résistance à la compression simple de 4,3 bars au bout de sept jours et 1,9 bars si l'éprouvette a séjourné 24 heures dans l'eau. On observe au bout de deux jours une montée de l'eau sur 3,5 cm lors de l'essai l'imbibition capillaire, avec 2% de chaux éteinte il en est de même. Enfin avec 4% chaux vive, la montée de l'eau n'est que 5mm au bout de deux jours. L'amélioration immédiate de la tenue à l'eau des éprouvettes de sol-chaux est donc extrêmement nette par rapport au sol naturel.

Ceci est confirmé par l'évaluation de la portance immédiate après immersion du sol non traité. Pour le sol naturel compacté dans les conditions de l'optimum Proctor normal, on obtient un indice portant CBR de 9 au bout de 4 jours d'immersion. si la teneur en eau de compactage dépasse de 3 points l'optimum Proctor normal, cet indice portant après 4 jours d'immersion tombe à 5. Or, pour le sol traité avec 2% de chaux vive et compacté à la tenue en eau donnant la résistance en compression à sept jours maximum figure II-5 on obtient un indice portant de 30 après 4 jours d'immersion. On obtient la même valeur avec 4% de chaux vive lorsque le sol est compacté à une teneur en eau initiale de 19%.

II-2-3 : Evolution des propriétés mécaniques du sol-chaux dans le temps :

Celle-ci a été examinée à partir d'essai de résistance en Compression simple et d'essais de poinçonnement. Les éprouvettes destinées aux essais en compression sont réalisées par compactage dynamique classique en couches successives dans les moules Proctor. Elles sont conservées un certain nombre A de jours dans des sacs en matière plastique, donc à hygrométrie sensiblement constante, puis immergées un certain temps B avant l'écrasement. la notation adoptée pour les valeurs de résistance en compression correspondantes RA + B ; ainsi R27 + 1 correspond à une éprouvette conservée 27 jours dans un sac en matière plastique, puis immergée 24 heures avant l'écrasement. On a adopté une vitesse de déformation constante de 1,27 mm/minute pour ces essais d'écrasement. On a en effet constaté que la résistance augmentait légèrement avec la vitesse d'écrasement.

Pour les essais en compression simple, on a choisi de compacter systématiquement les éprouvettes avec l'énergie Proctor normal, ceci afin de se placer dans des conditions analogues à celles que l'on obtient effectivement sur les chantiers. En effet, le sol naturel situé sous la couche de sol traité à la chaux est en général humide et déformable, si bien qu'il n'est pas possible de compacter efficacement le sol-chaux en particulier, il est très rare que l'on puisse obtenir des poids volumiques sec correspondant aux conditions de l'optimum Proctor modifié. Les facteurs examinés au cours de cette expérimentation ont été :

- La nature de la chaux : vive ou éteinte,
- Le dosage en chaux : 2% ou 4%,
- La teneur en eau de compactage.

En ce qui concerne ce dernier facteur, il faut bien distinguer la teneur en eau initiale du sol avant que l'on ajoute la chaux, qui sera notée W1, et la teneur en eau du mélange sol-chaux au moment où celui-ci est compacté, qui sera noté W2 ; W2 est toujours inférieure à W1 du fait de l'ajout de matière sèche et de l'évaporation qui se produit au moment du malaxage. L'écart entre W2 et W1 est encore plus important lorsqu'on utilise de la chaux vive, à cause de l'eau consommée pour l'extinction de la chaux dans la mesure où cette réaction est exothermique. Enfin, sur le chantier l'écart atteint entre W2 et W1 peut être très variable et en particulier différent de celui obtenu en laboratoire en fonction des conditions atmosphériques (soleil, vent...).

Pour l'étude de l'évolution des résistances mécaniques, pour chaque nature de chaux et chaque dosage, le principe suivant a été retenu, l'influence de la teneur en eau de compactage est étudiée sur les résistances à cours termes ,7 jours, à partir de 5 ou 6 éprouvette compactées à diverses teneurs en eau ; ceci permet de définir une teneur en eau optimum noté $W_2 \text{ opt}$, c'est-à-dire correspondant à la résistance a 7 jours , $R_6 + 1$, maximum. Des séries d'éprouvettes identiques sont alors préparées a trois teneurs en eau différentes : $W_2 \text{ opt}$ d'une part, une valeur inférieur et une valeur supérieure a $W_2 \text{ opt}$ d'autre part, avec un écart variant de 2 a 6 points. Ces éprouvettes servent à mesurer les Résistances à 7 jours ,avec seulement deux heures d'immersion, à 28 jours ,avec 14 jours ou 1 jour d'immersion préalable, à 3 mois , 6 mois et un an , avec 1 jour d'immersion préalable a chaque fois,.

II-2-4 : Chaux vive : évolution des résistances en compression simple dans le temps :

Les résultats obtenus seront essentiellement présentés sur des séries de figure.

a) : dosage en chaux de 2%

On trouve sur la figure 5 la courbe des résistances $R_7 + 0$ en fonction de W_r . la courbe de la figure 5 bis est celle des densités sèches de ces mêmes éprouvettes. La concordance des courbes des figures 5 bis et 5 est acceptable. On peut remarquer que

- ◆ $W_r \text{ opt}$ pour $R_7 + 0$ # 16 %
- ◆ $W_r \text{ opt}$ pour $R_6 + 1$ # 17 %
- ◆ W_r correspondant a la densité sèche maximum # 18%

La figure II-5 représente les variations de la résistance à sept jours avec 0 heures seulement d'immersion .Il a été remarqué que Les premières heures d'immersion jouent un rôle prépondérant sur la diminution de la résistance du sol-chaux fig II-6.

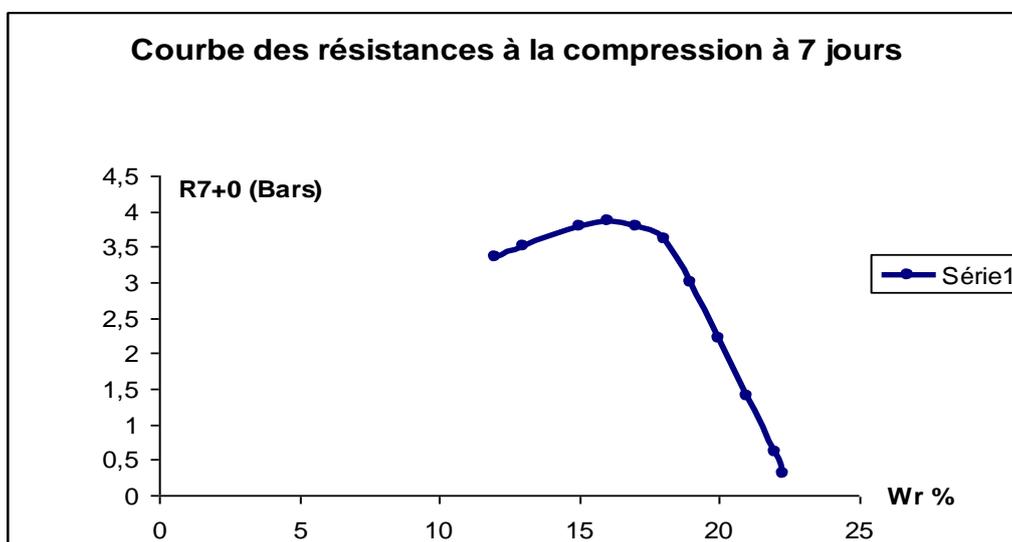


Fig II-5 : Courbe des résistances à la compression à 7 jours (sans immersion) en fonction de la teneur en eau de compactage pour 2% de chaux vive Laboratoire 3SR INPG Grenoble

D'autre part, l'effet de l'immersion se traduit par un abaissement important de la résistance.



Selon le processus décrit ci-dessus, les séries d'éprouvettes identiques ont été compactées aux trois teneurs en eau suivantes : 16,7% (W_{opt}), 19,3% ($W_r \geq W_{r opt}$) et 14% ($W_r < W_{r opt}$)

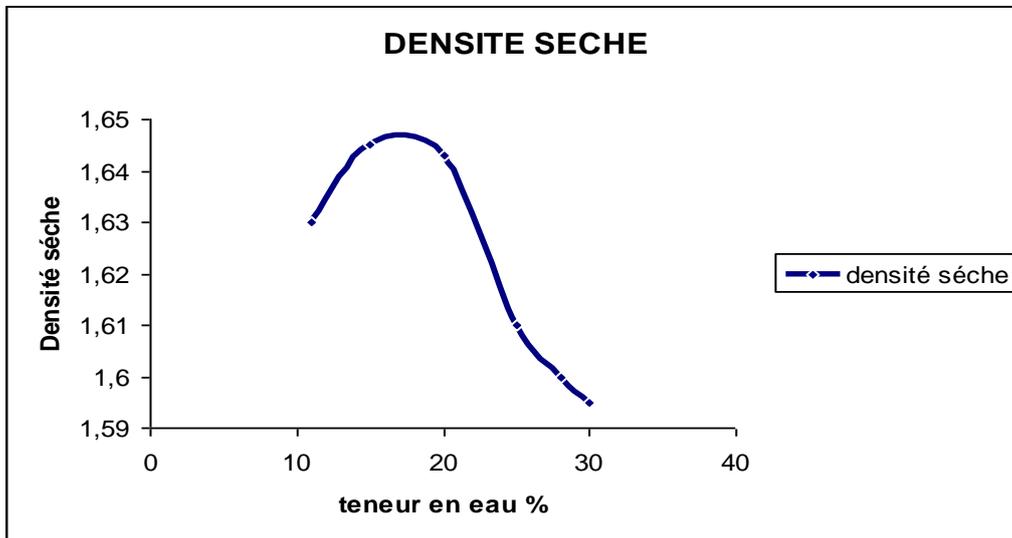


Fig II-5 bis : courbe de compactage du sol traité avec 2% de chaux vive Laboratoire 3SR INPG Grenoble

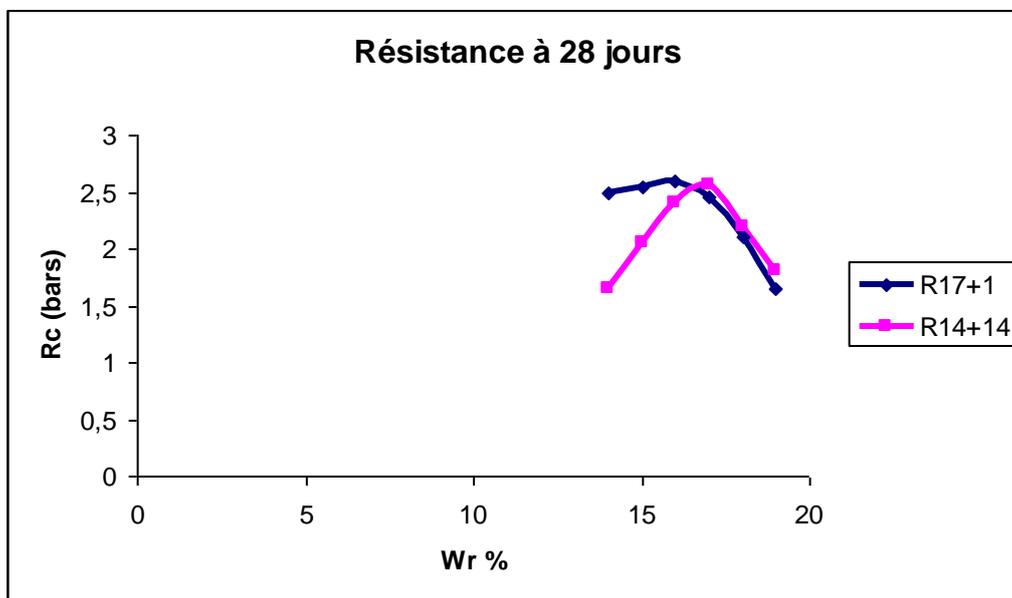


Fig II-6 : Résistance à 28 jours pour deux durées d'immersion en fonction de la teneur en eau de compactage (2% de chaux vive) Laboratoire 3SR INPG Grenoble



La figure II-6 représente les variations de la résistance à 28 jours après 14 jours ou 1 jour seulement d'immersion : l'influence d'une immersion prolongée ne se fait sentir que pour la teneur en eau de compactage la plus faible.

Les essais des résistances à 3 mois, 6 mois et 1 an, après 24 h d'immersion. On constate peu de différence entre les valeurs de ces résistances en fonction de l'âge des éprouvettes, sauf dans le cas de la teneur en eau de compactage la plus faible (ou curieusement la résistance à 1 an est plus faible que la résistance à 6 mois).

La figure II-7 résume l'évolution des résistances dans le temps, avec dans tous les cas 1 jour d'immersion préalable à l'écrasement, pour chacune des trois teneurs en eau de compactage. On voit de nouveau palier des résistances obtenues à partir de 3 mois, sauf pour la teneur en eau la plus faible.

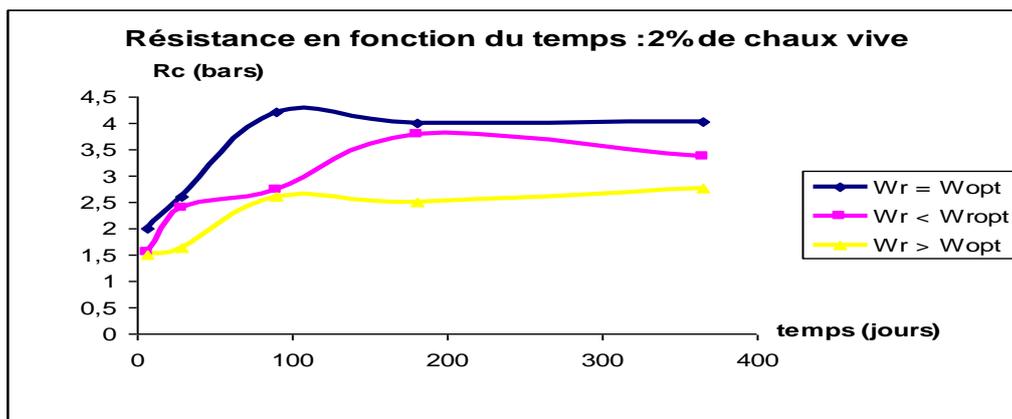


Fig II-7 : Résistance en fonction du temps pour divers teneurs en eau de compactage (2% de chaux vive) Laboratoire 3SR INPG Grenoble

On constate que L'influence d'une immersion prolongée à 28 jours est un peu nette qu'avec la chaux précédente : le rapport R_{14+14} / R_{27+1} vaut 78% pour $W_r \text{ opt}$ et 59% pour $W_r \geq W_r \text{ opt}$.

La figure II-8 résume l'évolution des résistances dans le temps avec 1 jours d'immersion préalable pour chaque éprouvette pour les trois teneurs en eau de compactage essayées.

b)- dosage en chaux de 4% chaux vive

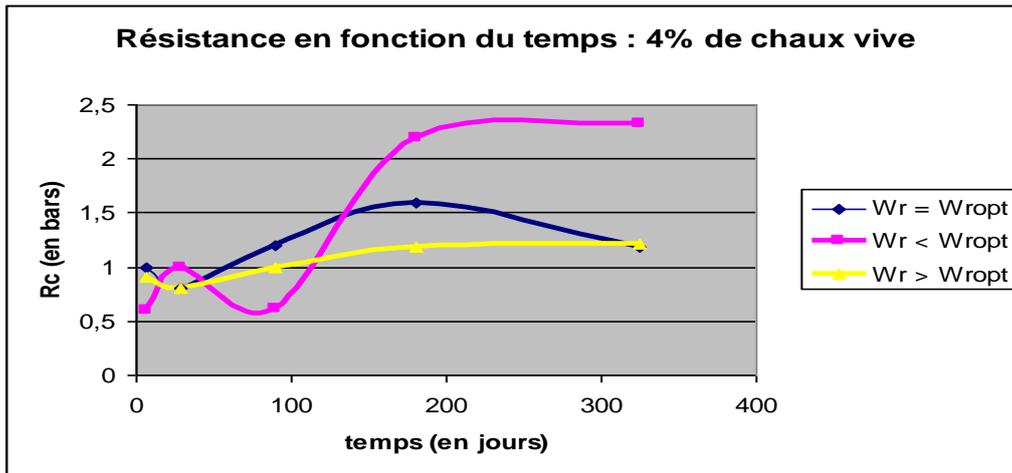


Fig II-8 : Résistance en fonction du temps pour divers teneurs en eau de compactage (4% de chaux vive) Laboratoire 3SR INPG Grenoble

II-2-5 : Chaux éteinte : évolution des résistances en compression simple dans le temps

a) : dosage en chaux de 2%

la figure II-9 indique l'allure de la variation des résistances R_{6+1} en fonction de la teneur en eau de compactage : un « palier » d'abord, un maximum légèrement au-dessus de ce palier pour $W_2 = 20,5\%$ qui est donc $W_{r_{opt}}$, puis une chute très nette ; la teneur en eau correspondant à la densité sèche maximum est pratiquement aussi $W_{r_{opt}}$ (figure II-9 bis).

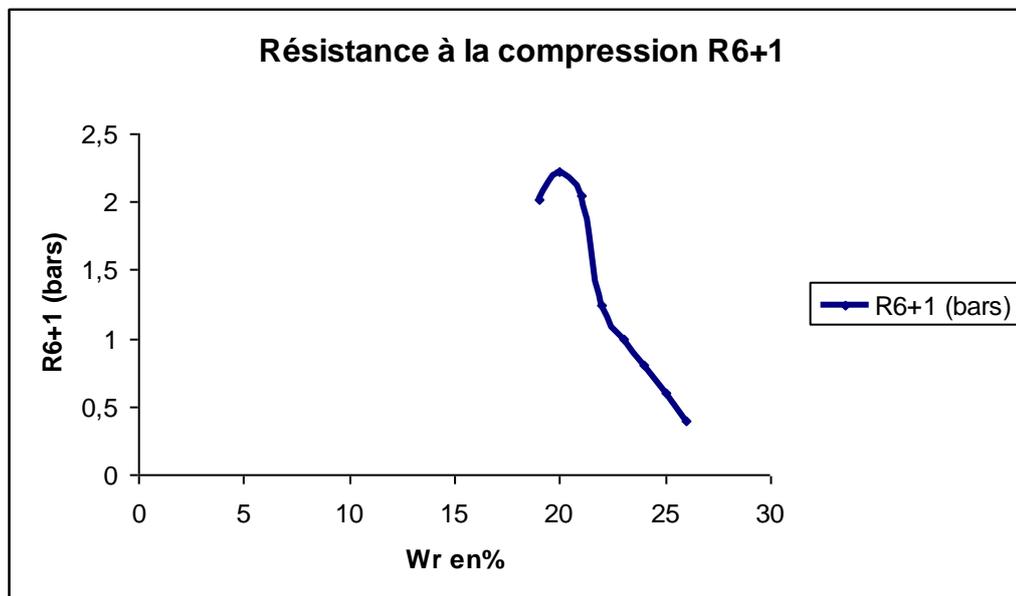


Fig II-9 : Résistance à la compression en fonction de la teneur en eau de compactage (2% de chaux éteinte) Laboratoire 3SR INPG Grenoble

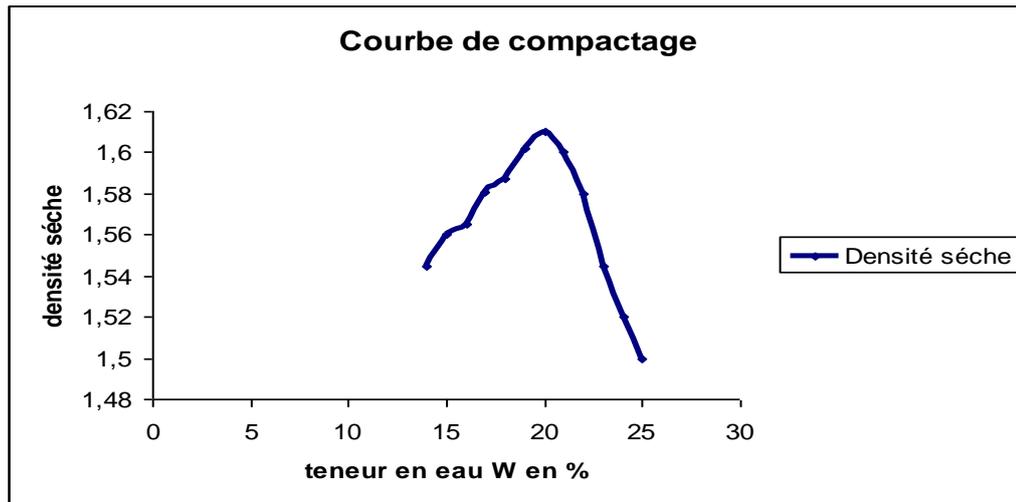


Fig II-9 bis : Courbe de compactage du sol avec 2% de chaux éteinte Laboratoire 3SR INPG Grenoble

Selon le processus décrit au début du paragraphe, des séries d'éprouvettes identiques ont été fabriquées pour les trois teneurs en eau de compactage suivantes :

$W_2 = 19,5\%$ ($W_2 \text{ opt}$), $W_2 = 24\%$ ($W_2 > W_2 \text{ opt}$) et $W_2 = 14,2\%$ ($W_2 < W_2 \text{ opt}$).

Les essais de les variations de la résistance à 7 jours, mais avec seulement deux heures d'immersion préalable, en fonction de la teneur en eau de compactage; on retrouve un "palier" et la rapport des résistances R_{6+1} / R_{7+2h} vaut alors 0,60.

L'essai de variation de la résistance à 28 jours en fonction de la teneur en eau de compactage pour deux durées d'immersion préalable (1 jour et 14 jours), on constate que plus la teneur en eau de compactage augmente, plus la résistance diminue. D'autre part, l'effet d'une immersion prolongée est très sensible, puisque pour $W_r = W_r \text{ opt}$ et $W_r > W_r \text{ opt}$ les éprouvettes correspondantes n'ont pas pu être écrasées en compression simple.

Les variations des résistances à 3 mois 6 mois et 1 an en fonction de la teneur en eau de compactage, les résistances diminuent légèrement lorsque la teneur en eau de compactage augmente. Les résistances à 3 mois sont parfois légèrement supérieures aux résistances à 1 an.

La figure II-10 représente l'évolution des résistances au cours du temps pour les trois teneurs en eau de compactage, avec une durée d'immersion préalable à l'écrasement de 24 heures. On retrouve les résultats précédents : l'influence de la teneur en eau de compactage sur les résistances à long terme est faible ; les résistances n'augmentent guère avec l'âge, sauf pour la teneur en eau de compactage la plus forte.

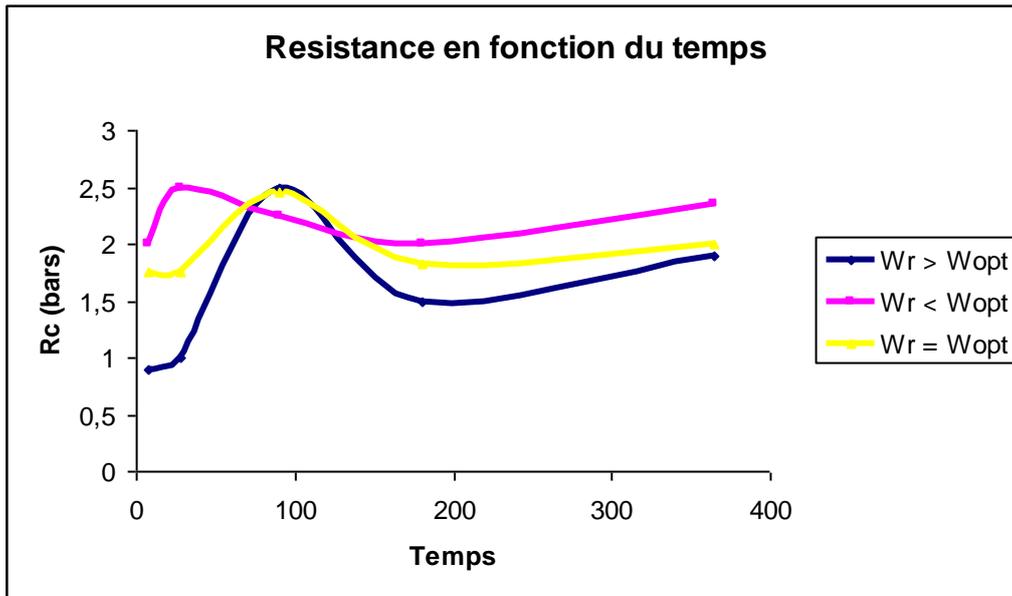


Fig II-10 : Résistance en fonction du temps pour divers teneur en eau de compactage (2% de chaux éteinte)

b)- dosage en chaux de 4%

La figure II-11 représente la variation des résistances R_{6+1} en fonction de la teneur en eau de compactage : $W_{r opt}$ vaut donc 18 a 19% ; elle est inférieure a la teneur en eau donnant la densité sèche maximum qui est de 20 % (figure II-11 bis).

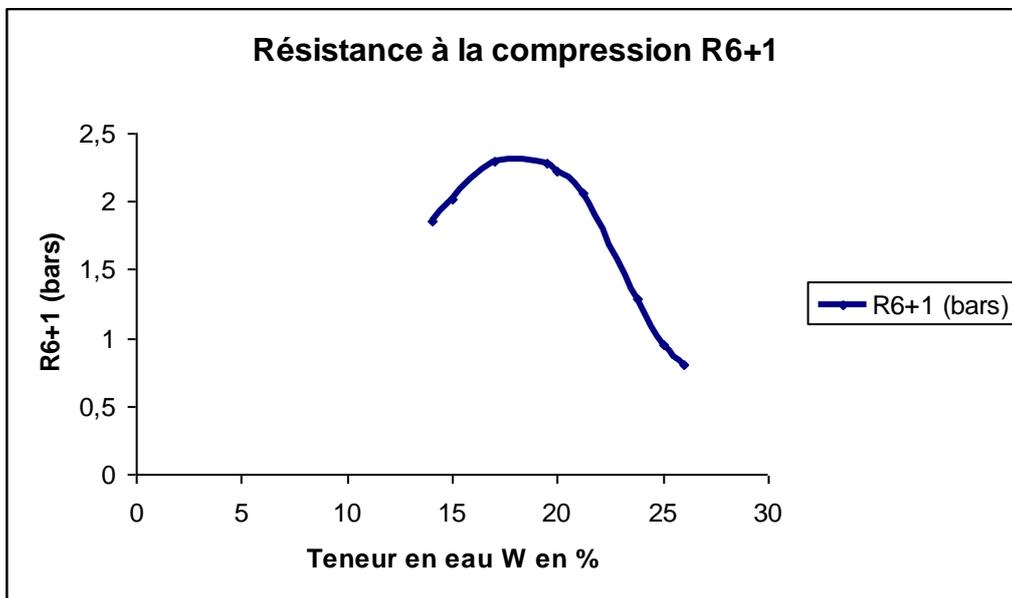


Fig II-11 : Résistance à la compression R_{6+1} en fonction de la teneur de compactage (4% de chaux éteinte) laboratoire 3SR INPG Grenoble

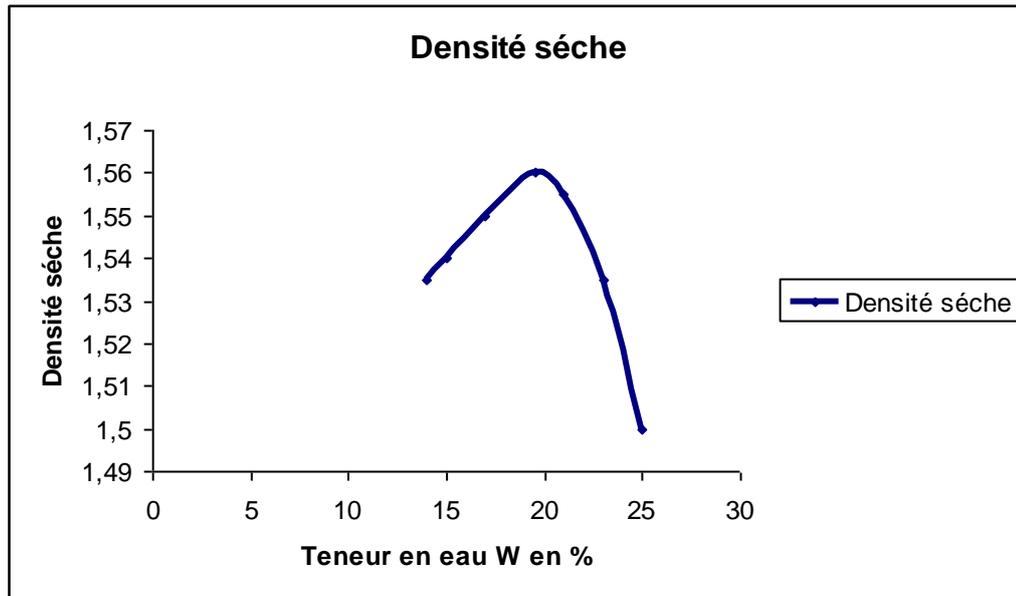


Fig II-11 bis : Courbe de compactage de sol traité avec 4% de chaux éteinte laboratoire 3SR INPG Grenoble

Les essais de la variation des résistances a sept jours en fonction de la teneur en eau de compactage, mais avec seulement 2 heures d'immersion préalable à l'écrasement. Les teneurs en eau sont trois valeurs choisies pour réaliser des séries d'éprouvettes identiques selon le processus décrit au début du paragraphe, à savoir $W_r = 18\%$ ($W_r \text{ opt}$), $W_r = 23,7\%$ ($W_2 < W_2 \text{ opt}$) et $W_2 = 14,2\%$ ($W_2 < W_2 \text{ opt}$). La résistance $R_7 + 2h$ ne présente pas de « maximum » comme $R_6 + 1$ mais diminue lorsque la teneur en eau de compactage augmente.

la variation des résistances a 28 jours, pour 1 jour et 14 jours d'immersion en fonction de la teneur en eau de compactage. On constate la encore, que les résistances les plus fortes sont atteintes pour la teneur en eau de compactage la plus faible. Enfin, l'influence d'une immersion prolongée est particulièrement néfaste pour la teneur en eau de compactage la plus forte, puisque il n'est plus alors possible de mesurer une résistance en compression.

les variations des résistances à 3 mois, 6 mois 1 ans en fonction de la teneur en eau de compactage, pour une durée d'immersion préalable à l'écrasement de 24 heure. Les résistances diminuent lorsque la teneur en eau de compactage augmente, surtout au-delà de $W_r \text{ opt}$. Pour la teneur en eau de compactage la plus élevée, la résistance à 1 an devient même inférieure aux résistances à 3 mois et 6 mois.

La figure II-12 représente l'évolution des résistances dans le temps, l'immersion préalable a l'écrasement étant de 24 heures pour chaque éprouvette. On retrouve que c'est la teneur en eau de compactage la plus faible qui donne les meilleurs résultats et que les résistances augmentent peu avec l'âge.

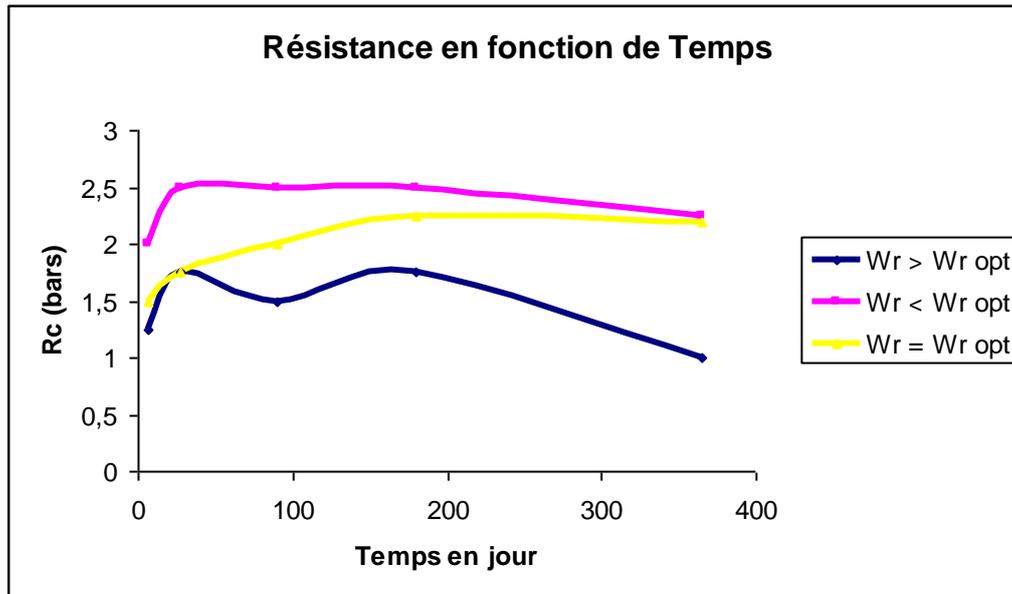


Fig II-12 : Résistance en fonction du temps pour divers teneur en eau de compactage (4% de chaux éteinte) laboratoire 3SR INPG Grenoble

II-2-6 : Conclusion sur l'évolution des résistances en compression simple dans le temps :

Pour discerner l'existence éventuelle d'une deuxième phase dans la stabilisation, la méthode d'interprétation proposée par M. PERRET (1977) a été utilisée, mais en l'appliquant aux résistances après 24 heures d'immersion et non plus aux résistances d'éprouvettes non immergées. Pour cela on porte donc sur un même graphique en abscisse R_c / t , étant l'âge (en jours) de l'éprouvette : la valeur $(R_c)_0$ obtenue sur le sol non traité est en effet ici nulle du faite de l'immersion préalable.

L'influence sur le développement des résistances des divers facteurs étudiés est récapitulée dans ce qui suit :

a)- influence de la teneur en eau de compactage

On observe en général pour les résistances R_{6+1} un maximum et donc une teneur en eau de compactage plus favorable $W_r \text{ opt}$; cependant, si la chute des résistances est nette pour des teneurs en eau de compactage supérieures à $W_r \text{ opt}$, on observe parfois des résistances voisines et peu variables avec la teneur en eau de compactage lorsque celle-ci est inférieure à $W_r \text{ opt}$ fig II-9.

Le plus souvent les résistances à long terme sont les plus élevées pour la teneur en eau de compactage la plus faible, avec cette réserve qu'alors $W_r \text{ opt}$ pour R_{6+1} n'est pas toujours bien définie. Cependant, pour le dosage de 2% de chaux vive, la teneur en eau optimum est la même pour R_{6+1} et pour la résistance à 1 ans. Même dans ce cas, la teneur en eau $W_r < W_r \text{ opt}$ est alors plus favorable que la teneur en eau $W_r > W_r \text{ opt}$. mais la teneur en eau de compactage ne doit pas être tout de même trop faible : on observe alors en effet que le sol traité ne résiste pas à l'immersion (fig II-7).

Enfin, c'est dans tous les cas la teneur en eau de compactage $W_2 > W_2 \text{ opt}$ qui donne les plus mauvais résultats à long terme.

b)- influence du dosage en chaux



On constate que si on se place à la teneur en eau de compactage la plus favorable dans chaque cas, on obtient des résistances supérieures avec 2% de chaux vive par rapport à celle obtenus avec 4% de chaux vive. Cependant, si on se trouve dans un cas de sol naturel extrêmement humide, il semble que la plage de teneur en eau pour laquelle subsiste une résistance minimum à long terme soit plus étendue avec un dosage de 4% de chaux vive : ainsi on obtient une même résistance à 1 an de 1,25 bars pour $W_r = 21,5\%$ pour 2% de chaux vive et pour $W_r = 28\%$ pour 4% de chaux vive. Enfin, la sensibilité à l'immersion prolongée à 28 jours et moins grande avec 4% de chaux vive, ou plus exactement moins dépendante de la teneur en eau de compactage.

L'augmentation du dosage de 2 à 4 % dans le cas de la chaux éteinte n'apporte aucun gain de résistance à long terme : au contraire, pour la teneur en eau de compactage la plus forte $W_r > W_{r\text{ opt}}$ les résistances atteintes sont plus faibles avec 4% de chaux éteinte. Cependant, la sensibilité à l'immersion prolongée à 28 jours est plus nette pour 2% de chaux éteinte

c)- influence de la nature de la chaux

Pour les conditions les plus favorables (teneur en eau de compactage et dosage) , la chaux vive donne les meilleurs résultats. De même les éprouvettes traitées avec la chaux vive résistent beaucoup mieux à une immersion prolongée à 28 jours. Cependant, pour une teneur en eau de compactage élevée, c'est le dosage de 2% de chaux éteinte qui donne les résistances à 1 an les plus fortes.

II-2-7 : Chaux vive : évolution de l'indice CBR dans le temps :

L'indice portant CBR mesuré par l'essai de poinçonnement correspondant est intéressant à considérer pour les sols traités à la chaux. Ce paramètre est en effet utilisé dans un certain nombre de méthodes de dimensionnement des chaussées pour caractériser la portance du sol-support.

L'évolution de cet indice a été examinée sur des éprouvettes immergées soit aussitôt avoir été compactées, soit 14 jours après le compactage durant lesquels la prise se faisait à hygrométrie sensiblement constante. Dans le premier cas, on a uniquement mesuré l'indice CBR au bout de 4 jours et 10 jours d'immersion ; dans le second cas, on a étudié une immersion prolongée jusqu'à 90 jours (mesurés après 10 jours, 30 jours, 60 jours d'immersion)

a)-dosage en chaux de 2%

Deux teneurs en eau de compactage ont été étudiées : d'une part $W_r = 19\%$ ($W_2 \# W_{2\text{ opt}}$) et d'autre part $W_r = 23\%$, c'est-à-dire $W_r > W_{r\text{ opt}}$.

L'ensemble des résultats obtenus apparaît Fig II-13 et Fig II-3 bis, chaque figure étant relative à une teneur en eau de compactage différente.

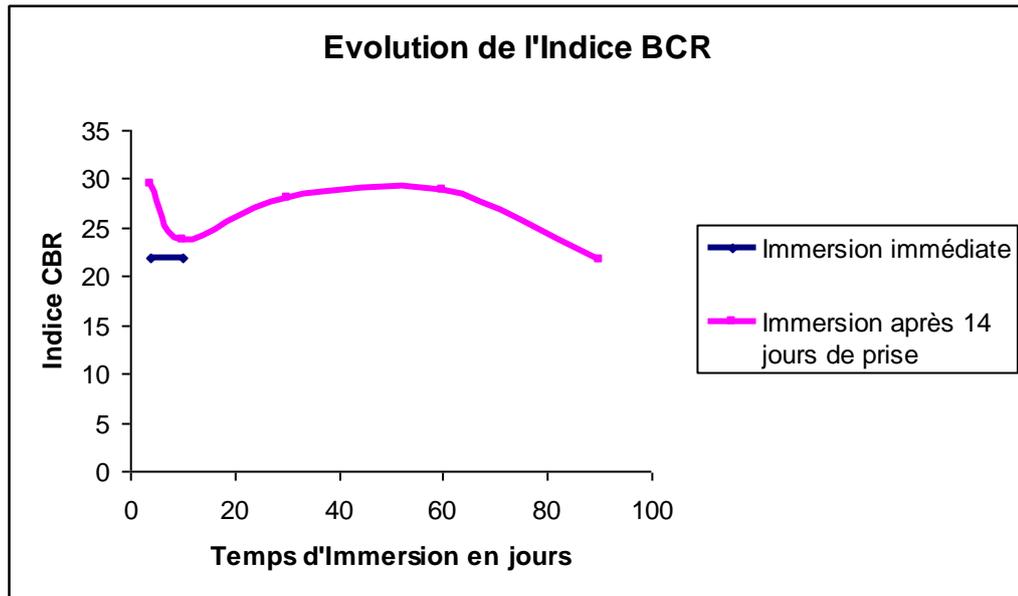


Fig II-13 : Evolution de l'indice CBR en fonction du temps d'immersion (2% de chaux vive, $W_r = 19\%$) Laboratoire 3SR INPG Grenoble

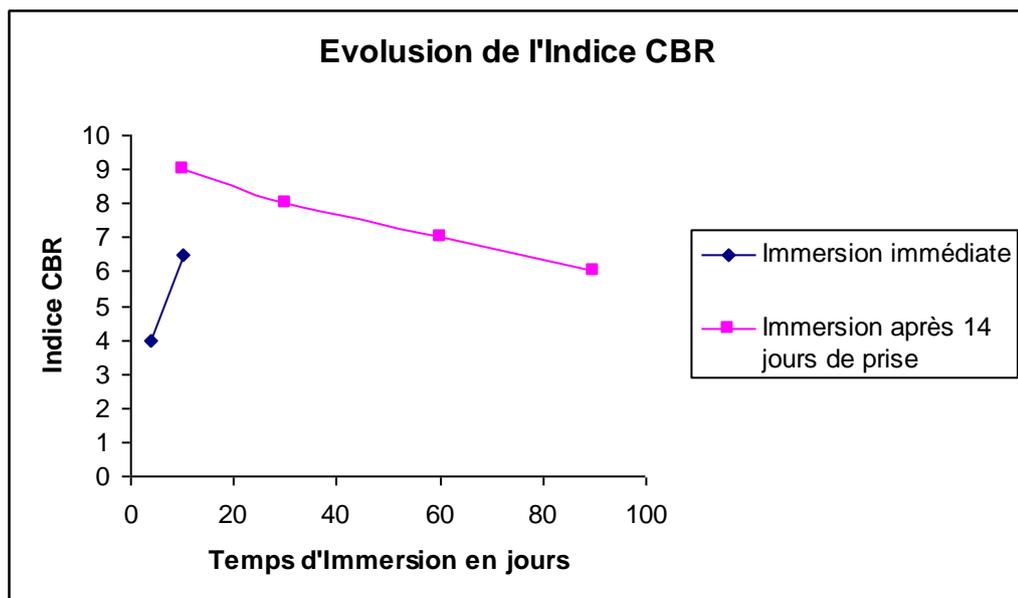


Fig II-13 bis : Evolution de l'indice CBR en fonction du temps d'immersion (2% de chaux vive, $W_r = 23\%$) Laboratoire 3SR INPG Grenoble

b)- dosage en chaux de 4%

Deux teneurs en eau de compactage ont, la aussi été étudiées : d'une part $W_r = 25\%$ ($W_r = W_{r\text{ opt}}$) et d'autre part $W_r = 28\%$ ($W_r > W_{r\text{ opt}}$).

Les résultats obtenus sont représentés Fig II-14 et Fig II-14 bis pour chacune de ces teneurs en eau. Des essais complémentaires ont été faits pour une teneur en eau de compactage de 19% : pour une immersion immédiate, on trouve encore un indice CBR de 19 après 30 jours d'immersion.

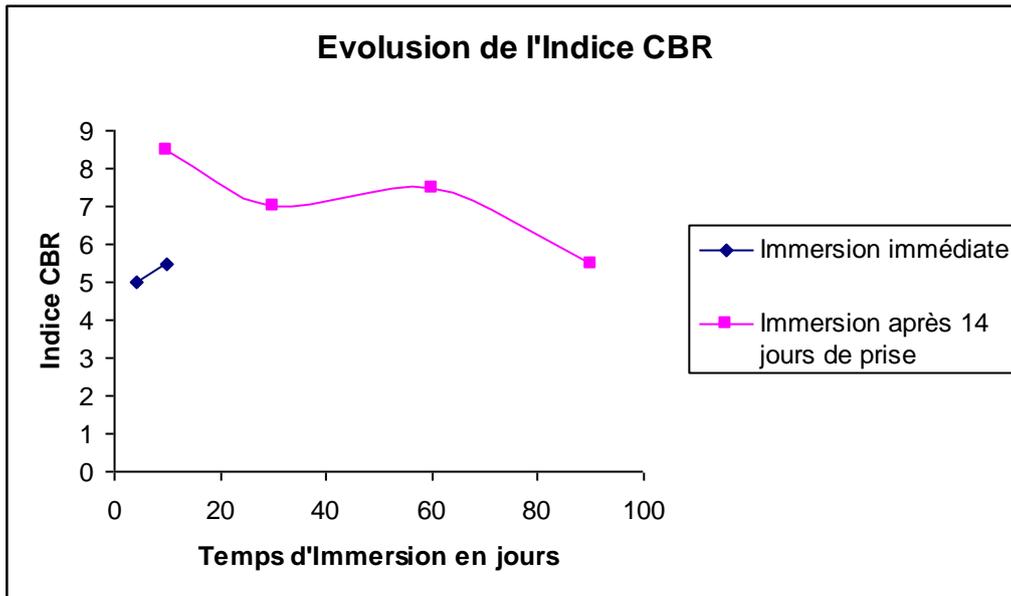


Fig II-14 : Evolution de l'indice CBR en fonction du temps d'immersion (4% de chaux vive, $W_r = 25\%$) Laboratoire 3SR INPG Grenoble

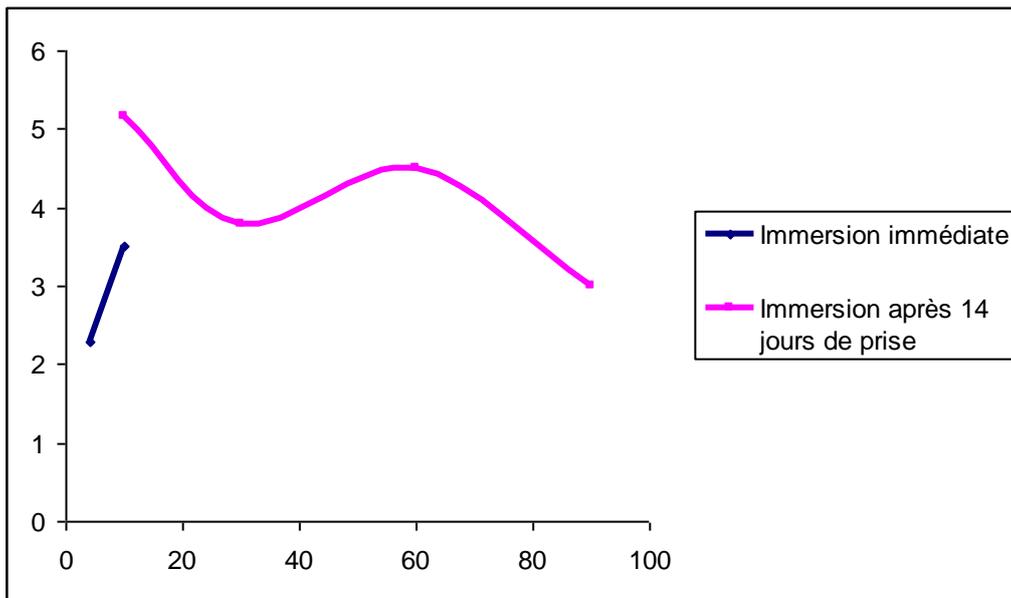


Fig II-14 bis : Evolution de l'indice CBR en fonction du temps d'immersion (4% de chaux vive, $W_r = 28\%$) Laboratoire 3SR INPG Grenoble

II-2-7 : Chaux éteinte : évolution de l'indice CBR dans le temps :

Les essais réalisés l'ont été selon le même processus qu'avec la chaux vive.

a)- dosage en chaux de 2%



Deux teneurs en eau de compactage ont été étudiées : d'une part $W_r = 19$ à 20% W_r opt, d'autre part $W_r = 15\%$ c'est-à-dire $W_r < W_r$ opt. Les résultats obtenus sont présentés Fig II-15 et Fig II-15 bis pour chacune de ces teneurs en eau.

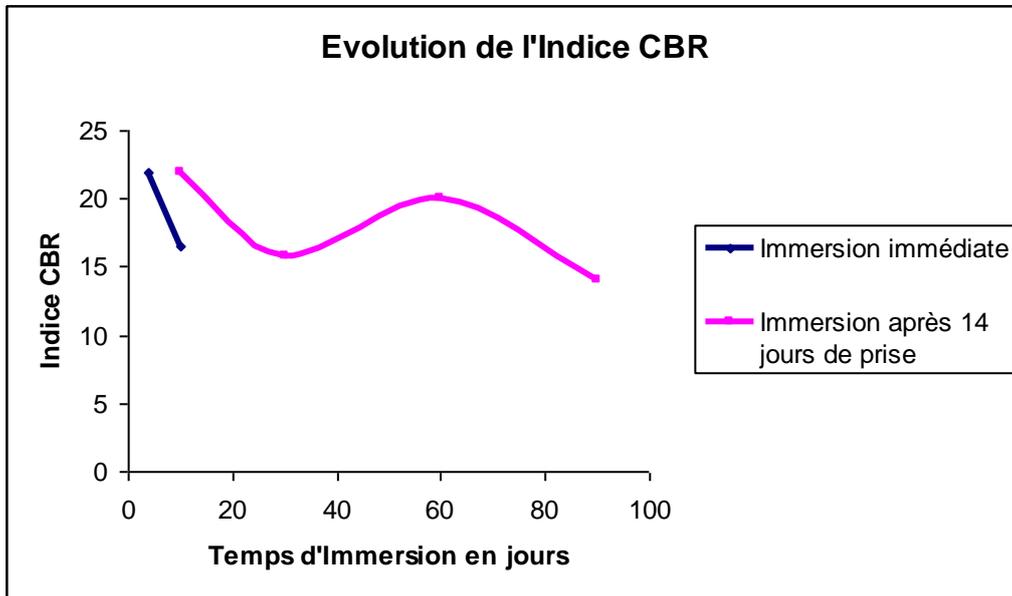


Fig II-15 : Evolution de l'indice CBR en fonction du temps d'immersion (2% de chaux éteinte, $W_r = 19\%$) Laboratoire 3SR INPG Grenoble

b)- dosage en chaux de 4%

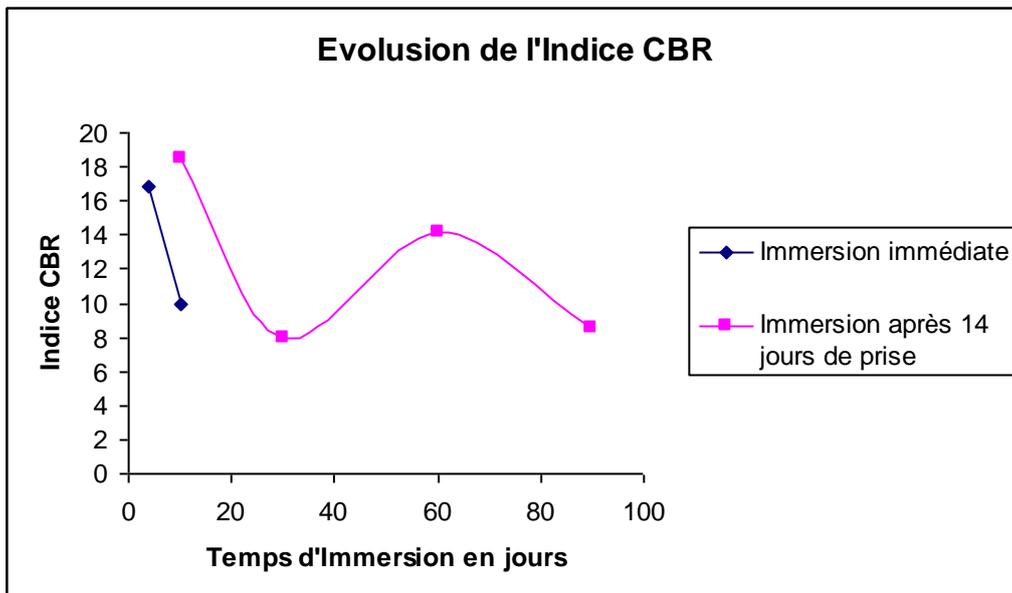


Fig II-15 bis : Evolution de l'indice CBR en fonction du temps d'immersion (4% de chaux éteinte, $W_r = 15\%$) Laboratoire 3SR INPG Grenoble

II-2-8 : Conclusion sur l'évolution des indices CBR dans le temps



On constate dans tous les cas que le fait d'attendre 14 jours avant d'immerger les éprouvettes est bénéfique. Afin de préciser davantage ce point, d'autres éprouvettes ont été fabriquées et cette fois laissés en attente 3 mois avant d'être immergées. Ceci a été réalisé d'une part pour un dosage de 2 % de chaux éteinte, avec une teneur en eau de compactage de 19,5 % les résultats sont représentés sur la figure 37. Les indices CBR après immersion sont encore améliorés par rapport à 14 jours de prise (cf. figure II-13 et II-15) de 15 % à 75% selon les durées d'immersion.

Pour comparer avec le comportement du sol naturel non traité, des essais CBR avec immersion prolongée ont également été effectués sur celui-ci. Pour une teneur en eau de compactage de 18,5%, donc voisine de l'optimum Proctor normal, l'indice CBR est de 3 après 30 jours d'immersion. Pour une teneur en eau de compactage un peu plus élevée autour de 21%, l'indice CBR après 30 jour d'immersion n'est plus que de 1,4.

Les principales constatations que l'on peut faire à partir de ces essais CBR sont les suivantes : influence de la teneur en eau de compactage : c'est, en règle générale , la teneur en eau voisine de W_r opt qui donne les indices portants les plus élevés ; cependant, pour 4% de chaux éteinte et 4% de chaux vive, une teneur en eau compactage inférieure à W_r opt est préférable . A ce sujet précisions à nouveau que W_r opt n'a pas pu être déterminée avec précision dans le cas du traitement avec 4% de chaux vive. Une teneur en eau supérieure à W_r opt donne toujours de moins bons résultats. L'Influence du dosage en chaux : en se plaçant dans les conditions de teneur en eau les plus favorables dans chaque cas, il ne sert à rien d'augmenter le dosage en chaux vive de 2 à 4 % au contraire.

En ce qui concerne la chaux éteinte, on obtient des performances analogues avec 2% ou 4%, avec un léger avantage pour 4% de chaux sur la valeur de l'indice CBR après 90 jours d'immersion.

Cependant, dans le cas d'un sol de forte teneur en eau initiale, le traitement avec 4% de chaux vive serait plus sûr.

L'Influence de la nature de la chaux : en utilisant la teneur en eau de compactage la plus favorable W_{ropt} , la chaux vive donne des indices CBR un peu plus élevés. A 90 jours d'immersion et après 14 jours de prise, on obtient avec 2% de chaux vive un indice CBR supérieure de 25% à celui obtenu avec 4% de chaux éteinte. De même, le comportement d'un sol traité avec 2 % de chaux vive et meilleur après 3 mois de prise.

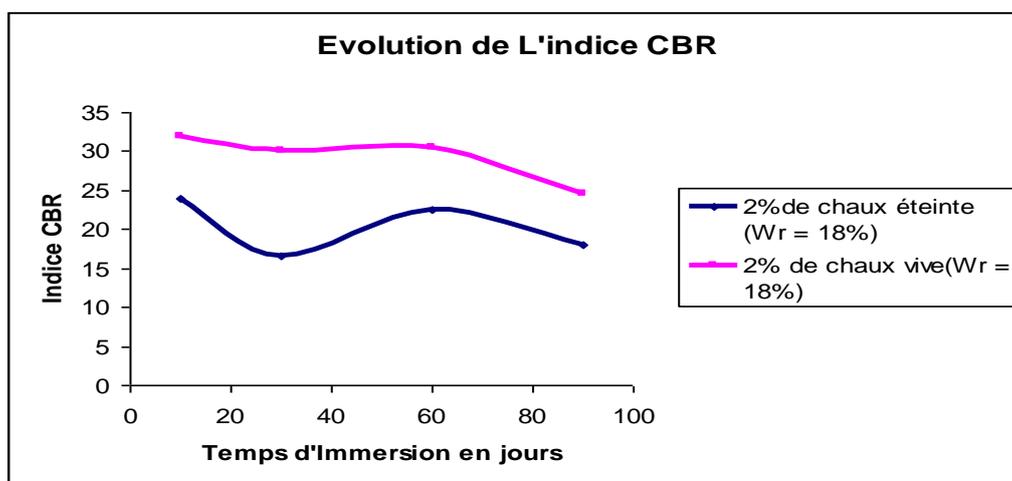


Fig II-16 : Evolution de l'Indice CBR en fonction du temps d'Immersion après 3 mois de prise
Laboratoire 3SR INPG Grenoble



II-2-9 : CONCLUSION

L'étude menée permet d'affirmer que même lorsque le sol ne présente pas d'aptitude particulière vis-à-vis du développement dans le temps de réaction entre l'argile qu'il contient et la chaux, il subsiste à long terme une certaine résistance mécanique. De plus celle-ci existe, même si la couche de sol traité à la chaux est placée dans de mauvaises conditions hydrauliques, c'est-à-dire malgré des périodes d'immersion. Bien entendu, cette résistance est beaucoup plus faible que celle que l'on obtient avec des sols réagissant bien avec la chaux. Il faut d'ailleurs rappeler à ce propos que l'étude a été faite pour une énergie de compactage adéquate, qui représente sans doute assez bien les conditions réelles pour la voirie à faible trafic, moyen trafic et trafic intense.

Les divers facteurs qui influencent cette résistance mécanique ont été examinés. Les meilleurs résultats semblent être obtenus avec la chaux vive, et un dosage de 2% de chaux vive. Ce n'est que lorsque la teneur en eau initiale du sol est extrêmement forte que l'on a intérêt à utiliser un dosage en chaux vive plus élevé. La teneur en eau de compactage du mélange sol-chaux s'avère être également un facteur essentiel, même si le sol-chaux est beaucoup moins sensible que le sol naturel non traité à des écarts de la teneur en eau de compactage par rapport à sa valeur optimum. Cette influence a été observée aussi bien sur les résistances à la compression simple que sur les indices CBR. Pour des sols traités à la chaux présentant d'aussi faibles résistances, il semble que les propriétés mécaniques du mélange sol-chaux soient mieux caractérisées par l'indice CBR, plus sensible aux variations de ces propriétés mécaniques.



CHAPITRE III

APPLICATION TECHNOLOGIQUE DES SOLS TRAITES A LA CHAUX ET OU LIANTS HYDRAULIQUE IN SITU



III : LES SOLS :

III-1 : Introduction

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20ème siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques. Ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance. D'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage, de congélation du sol et enfin la stabilisation des sols par les liants hydrauliques. Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années, un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets.

TERRAIN	ARGILLES	LIMONS	SABLES	GRAVIER	ROCHES FRACTURÉES	ROCHES
INTERVENTIONS						
INJECTIONS TRADITIONNELLES		---	-----			
CONGÉLATION	-----					
JET-GROUTING SOUS-HORIZONTAL		-----	-----			
PRETUNNEL *				-----		
RENFORCEMENT DU NOYAU PAR TUBES EN FIBRE DE VERRE	-----	-----				
PREDECOUPAGE MÉCANIQUE	-----	-----				
ARC CELLULAIRE		-----	-----			

III-2 : Définition des sols

Dans le cadre de l'amélioration des sols nous nous limiterons à l'étude des sols ayant un comportement mécanique ne pouvant pas répondre aux besoins d'un projet du génie civil.

III-2-1 : Définition géotechnique des sols

Nous schématiserons les sols comme étant composé de quatre phases. Une phase solide composé de particules minérales solides et organiques. Une phase liquide sous différentes formes appelés : eau libre, eau interstitielle et pour finir une phase gazeuse. La phase solide est le seul élément pouvant supporter des contraintes importantes.

III-2-2 : Phase solide

Trois type de sols ressortent comme étant les plus souvent rencontrés sur un chantier :

- Sols grenus

- Sols fins
- Sols organiques

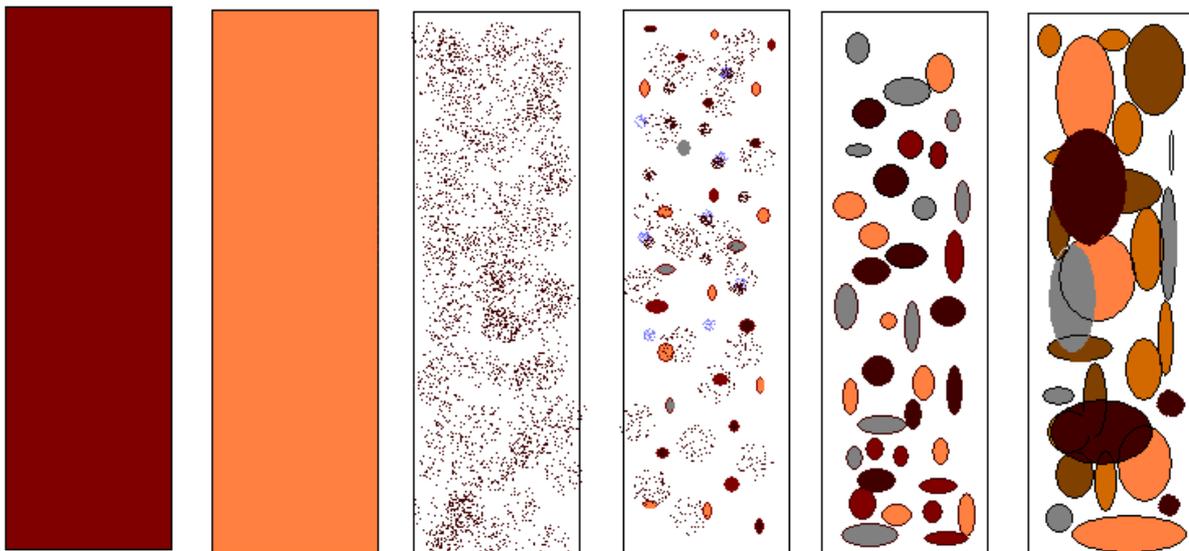
III-2-2-1 : Classification des sols : sols grenus, sols fins

Première classification : limite adopté : $20\mu\text{m}$

Sols grenus $d > 20\mu\text{m}$ Sols fins $d < 20\mu\text{m}$

Cailloux, grave, sable Limon, argile

- Blocs, cailloux (fragments de la roche mère) : éboulis de pente, alluvions grossières, $20\text{mm} < d < 200\text{mm}$.
- Grave (fragment de roche mère) : sédiments détritiques généralement formés de plusieurs minéraux $2\text{mm} < d < 20\text{mm}$.
- Sables (fragment de roche mère) : sédiment détritique généralement formés d'un seul minéral : $20\mu\text{m} < d < 2\text{mm}$.
- Limons (fragment de roche mère) : mélange de très fins de sable, mêlés en général à des particules argileuses : $2\mu\text{m} < d < 20\mu\text{m}$.
- Les argiles (altération physico-chimique de certain minéraux des roches) : particules $< 2\mu\text{m}$.



$< 2\mu\text{m} <$

$< 20\mu\text{m} <$

$< 0,2\text{mm} <$

$< 2\text{mm} <$

$< 20\text{mm} <$

III-2-2-2 : Sols organiques

Les vases et les tourbes renferment 2 types de matières organiques :

- Matière organique libre : débris végétaux et résidus animaux
- Matière organique liées : colloïde humiques fixés à la phase minéral

Suivant le degré de tourbification les propriétés physicochimiques seront différentes. Si la matière organique est un peu évoluée et abondante (tourbe fraîche) sa texture retient beaucoup d'eau et est très compressible.

III- 3 : SPECIFICITE DES SOLS TRAITES A LA CHAUX ET OU LIANT HYDRAULIQUE

III-3-1 : Introduction :



On a annoncé dans le premier chapitre les problèmes spécifiques liés au traitement des sols limoneux et d'une manière générale des sols mous. Ces problèmes d'ordre chimique en relation avec les éléments chimiques les constituant mais également leur contact avec l'eau et précisément l'eau de constitution, l'eau de percolation, et l'eau d'ajout lors de leur confection peuvent créer des perturbations assez importantes pouvant influencer sérieusement leur comportement mécanique à court et long terme. Aussi une étude pédologique est nécessaire afin de déterminer les constituants de ces sols afin d'évaluer les éléments perturbateurs. L'étude pédologique en elle-même ne suffit pas. Il faudrait également analyser tous les apports extérieurs au sol susceptible d'être porteur d'élément chimique pouvant perturber la stabilisation et de la les qualités mécaniques des sols traités, afin d'atteindre les qualités mécaniques requises pour leur emploi en tant que couche d'assise pour une route mais également pour toutes autres constructions d'ouvrages de travaux publics.

III-2-2 : Eléments perturbateurs

La stabilisation des sols traités à la chaux et au liant hydraulique décrite par la bibliographie se produit quand un contaminant passe de la phase dissoute dans l'eau à la phase solide par des réactions chimiques comme la précipitation, ou l'absorption, Quina *et al.* [2008]. Ces phénomènes physiques développent les performances mécaniques des matériaux considérés. Il a pourtant été constaté expérimentalement, que l'excès de certains éléments traces dans les sols ou dans l'eau de gâchage provoquent un décalage de la précipitation ou de l'absorption et de la perturbe l'acquisition des propriétés mécaniques requises des sols traités pour une utilisation en tant que matériaux d'assise pour tous ouvrages de travaux publics, Deschamps *et al.* [2006] ; Malviya et Chaudhary [2006] ; Chen *et al.* [2007] ; Kumpiene *et al.* [2008].

Le GTS [LCPC-SETRA 2000] signale le rôle perturbateur de certains éléments chimiques tels que les chlorures, les sulfates, les nitrates et les phosphates. Tous ces éléments chimiques en fonction de leur concentration dans le sol naturel ou dans les différents types d'eau entrant dans leur environnement, des effets néfastes sur le déroulement de la prise hydraulique et peuvent initier des désordres qui se produiront pendant l'exploitation des l'ouvrage de travaux publics.

III-2-3 : Les chlorures :

Les chlorures sont largement répandus dans la lithosphère. Leur concentration totale dans l'écorce terrestre est estimée à 1900ppm tandis qu'elle serait de 0,07 à 70ppm dans les eaux douces naturelles et de l'ordre de 17500ppm dans l'eau de mer, Bliefert et Perrault [2001].

III-2-4 : Les Sulfates :

Les deux sources naturelles les plus communes du soufre sont la pyrite, FeS_2 , présent en particulier dans les marnes et le gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ fréquemment dans les milieux sédimentaires.

III-2-5 : Les Nitrates :

Il existe principalement sous formes d'azote dans les sols. Sous forme de nitrates ils sont naturellement présents en faible quantité dans un limon sableux [Calvet 2003]. Ils sont très sensibles à l'eau et sont très facilement lessivables. Les quantités solubilisées dépendent alors de nombreux facteurs tels que les précipitations, la nature du sol, du couvert végétal ect...



III-2-6 : Les Phosphates :

Le phosphore est un élément majeur de la pédosphère. Les différentes formes de phosphates sont très peu solubles dans l'eau, leur solubilité étant maximale en milieu alcalin ou neutre Pansu et Gautheyrou [2003] ; Mathieu et Pieltain [2003]. Calvet [2003] démontre la faible solubilité des composés phosphatés.

III-2-7 : Conclusion sur les anions perturbateurs de la prise

Dans les sols traités à la chaux et ou au liant hydraulique les processus de prise du matériau implique la compréhension des phénomènes se déroulant dans le matériau cimentaire. Quatre éléments chimiques, anions, sont cités par le GTS comme étant potentiellement perturbateurs de la prise des sols traités. Les Chlorures et Sulfates sont associés à un rôle d'accélérateur de la prise et de l'hydratation des liants hydrauliques avec un risque de gonflement. Les Nitrates et les Phosphates sont retardateurs voire des inhibiteurs des réactions chimiques. Sans analyse des éléments constituant le sol naturel à traiter et les ajouts pour son traitement, il est impossible d'anticiper le risque réel de la présence de ces anions.

III-3 : TECHNOLOGIE DES SOLS TRAITES A LA CHAUX ET OU LIANT HYDRAULIQUE

III-3-1 : Introduction

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au ciment ou au liant hydraulique routier (LHR) est une technique éprouvée et parfaitement au point, qui a connu un très fort développement depuis une vingtaine d'années. Ce développement est dû essentiellement à deux phénomènes

- Le premier phénomène est lié à des impératifs économiques associés à un souci écologique croissant. En effet, alors que les profils géométriques des projets routiers deviennent de plus en plus contraignants et demandent des mouvements de terre importants dans des sols parfois difficilement réutilisables. Il convient donc d'épargner les ressources existantes, d'autant plus que le coût du transport est élevé. Ajouté à ces impératifs économiques, son succès actuel est dû également à l'apparition d'un nouveau contexte prenant en compte l'amélioration du cadre de vie et la protection de l'environnement, notamment dans la limitation de la constitution de décharges de matériaux impropres à la réutilisation et la préservation des ressources naturelles utilisées par les techniques dites traditionnelles dans l'exécution des remblais et des couches de forme.

- Le second phénomène repose sur les progrès technologiques réalisés ces dernières années par les matériels de traitement qui ont permis d'améliorer sensiblement les rendements et la qualité du travail réalisé. Aujourd'hui, la technique du traitement aux liants hydrauliques s'étend à un nombre de plus en plus élevé de sols : limons, argiles, marnes, matériaux sableux, sableux-graveleux et graveleux, craies, calcaires tendres...Ainsi, c'est une technique alternative propre, économe en granulats d'apports et en énergie, permettant de valoriser les matériaux présents in situ, présentant ainsi des atouts nécessaires sur le plan technique, économique, écologique et environnemental, dans l'exécution des remblais ou des couches de forme des travaux routiers.

III – 4 : LE TRAITEMENT DES SOLS

III – 4-1 : Définition et objet

Le traitement des sols avec un liant est une technique qui consiste à incorporer, au sein du sol, cet élément d'apport avec éventuellement de l'eau et de les mélanger plus ou moins intimement in situ, jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène pour lui conférer des propriétés nouvelles. Il s'agit d'un traitement qui utilise les affinités chimiques du sol et du liant, par opposition au traitement mécanique, comme le compactage, qui peut se superposer au premier. Le traitement des sols pour l'exécution des remblais et des couches de forme, a pour objet de rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir sans préparation, à supporter une assise de chaussée, de parking ou de plate-forme.



Fig III-1 : sol traité à la chaux « revue de l'école des pont et chaussé Paris 2010 »

III-4-2 : Les liants et les différents types de traitements

Selon l'utilisation prévue, en couches de forme ou en remblais, et ou en fonction du type de sol à stabiliser, il existe plusieurs types de traitements des sols qui ne diffèrent que par la nature du liant utilisé. En France, on utilise presque exclusivement les traitements suivants d'une manière général :

- Le traitement à la chaux dans le cas de sols fins destinés à une utilisation en remblais ou en couches de forme ;
- Le traitement au ciment ou au liant hydraulique routier LHR pour les Techniques Routières - CFTR) dans le cas de sols peu plastiques ou peu argileux destinés à une utilisation en remblais ou en couches de forme ;
- Le traitement mixte à la chaux puis au ciment ou au liant hydraulique routier destiné à une utilisation en couches de forme.

III-4-2-1 : Action des liants sur les sols :

- Action de la chaux sur les sols :

Les sols fins qui contiennent des proportions notables d'argiles et de limons, ont des propriétés routières déplorables. Ils gonflent et deviennent plastiques en présence d'eau. Il se rétractent avec la sécheresse et foisonnent sous l'effet du gel. Ils n'ont donc aucune stabilité face aux variations

climatiques. Compte tenu de ses propriétés, la chaux modifie de façon sensible le comportement des sols fins argileux ou limoneux, grâce à trois actions distinctes :

◆ Une diminution de la teneur en eau

La teneur en eau d'un mélange sol-chaux se trouve abaissée en raison de l'évaporation d'eau suite à la chaleur dégagée par la réaction d'hydratation et par l'aération provoquée par le malaxage. En moyenne, la diminution de la teneur en eau d'un sol traité est de l'ordre de 1 à 2 % pour 1 % de chaux.

◆ Des modifications immédiates des propriétés géotechniques du sol

L'incorporation de chaux dans un sol argileux, développe une floculation. L'incidence de la floculation sur le mélange sol-chaux sera une diminution de l'indice de plasticité I_p , une augmentation de l'indice portant immédiat IPI et un aplatissement de la courbe Proctor

◆ Des modifications à long terme

La chaux, en tant que base forte, élève le pH du sol et provoque l'attaque des constituants du sol (silice et alumine).



Fig III-2 : Traitement in situ d'un sol argileux par la chaux revue de l'école des ponts et chaussées Paris 2010

• Action du ciment et des liants hydrauliques routiers (LHR) sur les sols

Le traitement des sols au ciment ou aux LHR permet d'améliorer les caractéristiques initiales des matériaux et s'appliquent à des sols fins prétraités à la chaux ou des sols peu ou pas plastiques, dont les teneurs naturelles en eau trop élevées ne permettent pas de réaliser des remblais ou des couches de forme dans de bonnes conditions et avec des garanties suffisantes de qualité. Il est surtout utilisé dans le but d'obtenir un développement rapide et durable des résistances mécaniques. On obtient par ce traitement :

◆ Des modifications immédiates et à long terme des propriétés géotechniques et mécaniques du sol. Les réactions du ciment et du LHR avec un sol consistent essentiellement en une hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres, avec passage par la phase soluté suivie de la cristallisation des produits hydratés : c'est la prise hydraulique. Elle conduit rapidement au

durcissement du mélange, à l'obtention de caractéristiques mécaniques élevées et à sa stabilité à l'eau et au gel.

♦ Une diminution de la teneur en eau

La teneur en eau d'un mélange sol-ciment ou sol-LHR se trouve abaissée en raison de l'apport de matériaux secs, à la consommation de l'eau nécessaire à la prise hydraulique et à l'évaporation d'eau par l'aération du sol lors du malaxage.



Fig III-3 : Aspect visuel d'un sol après traitement revue de l'école des ponts et chaussées Paris 2010

III-5 : EXÉCUTION DES TRAVAUX

III-5-1 : Traitement type et conditions de mise en œuvre

Les conditions de mise en œuvre doivent être conformes aux recommandations du Guide Technique (GTS) Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme Sétra /LCPC - 2000). L'exécution type des travaux de traitement des sols suit, en règle générale, le processus suivant :

- Préparation du sol à traiter

Cette opération, visant à faciliter le malaxage ultérieur, consiste à procéder à l'ouverture du sol au scarificateur ou au ripper. Dans le cas d'un traitement des sols appliqué à la réutilisation des sols trop humides en remblais, l'objectif de l'étude de formulation est de déterminer le liant et le dosage minimal en liant permettant de conférer une portance immédiate suffisante pour rendre possible la mise en œuvre, l'aptitude au compactage et à supporter la circulation des engins de chantier en fonction de l'état hydrique des sols prévisible à l'exécution. D'après le guide technique Sétra / LCPC sur le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques- Application à la réalisation des remblais et des couches de forme, la vérification de l'aptitude du sol au traitement doit se faire à partir de l'essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement à la chaux et/ou aux liants hydrauliques" défini par la norme NFP 94-100, en se limitant à la seule observation des gonflements G_v reste inférieur ou égal à 10 %. Dans le cas d'un traitement des sols appliqué à la réalisation de couches de forme, l'objectif de l'étude de formulation est de déterminer les dosage en chaux éventuellement nécessaire et en ciment ou en liant hydraulique routier à incorporer successivement dans le sol pour satisfaire aux trois critères suivants :

◆ Le premier critère est relatif à la vérification de l'aptitude du sol au traitement. Elle se fait à partir de l'essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement à la chaux et/ou aux liants hydrauliques défini par la norme NF P 94-100

◆ Le deuxième critère est relatif à l'exécution. On recherche le dosage en chaux éventuellement nécessaire pour conférer au sol considéré une portance immédiate suffisante, afin d'assurer sa mise en oeuvre correcte : aptitude au compactage et à supporter la circulation des engins de chantier.

◆ Le troisième critère est relatif à la tenue de la structure sol liant. On recherche le dosage optimal en ciment ou liant hydraulique routier au sol afin d'atteindre les performances mécaniques exigées pour une couche de forme, type aptitude Gonflement-Résistance en compression R_{tb} (MPa)

III-5-2 : Compactage partiel :

La qualité du compactage est, en général, déterminée par un objectif de densification. Ainsi, pour le compactage des remblais, l'objectif de densification est une énergie de compactage, qui correspond succinctement à 95 % de la densité optimale de l'essai Proctor Normal et pour le compactage des couches de forme. On peut également développer une énergie de compactage qui correspond succinctement à 98,5 % de la densité optimale de l'essai Proctor Normal. Le guide technique Sétra / LCPC sur la Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) de septembre 2010 donne une détermination pratique des conditions de compactage, sur la base du paramètre Q/S, épaisseur unitaire de compactage, (Q étant le volume de sol compacté pendant un temps donné et S la surface balayée par le compacteur pendant le même temps). L'atelier de compactage, ainsi que le nombre de passes nécessaires, seront définis sur une planche d'essais de compactage dont les prescriptions sont les suivantes :



Fig III-4 : Compactage d'un sol traité à la chaux revue de l'école des ponts et chaussées Paris 2010

- Ajustement de l'état hydrique du sol.

Une teneur en eau optimale est indispensable pour obtenir, après compactage du mélange sol-liant, une densité maximale. Ainsi, il est possible soit d'assécher le sol par brassage mécanique, soit de l'humidifier avec une arroseuse avec rampes à eau, gicleurs ou systèmes enfouisseurs.

- Épandage du liant.

Pour réduire et maîtriser la dispersion du liant, il est préférable de retenir - dans le cas de chantiers moyens ou importants - un épandeur à dosage pondéral, asservi à la vitesse d'avancement. Le contrôle de la régularité de l'épandage et de la quantité des liants est réalisé par la méthode dite “à la bêche”.



Fig III-5 : Epandage de liant hydraulique revue de l'école des ponts et chaussées Paris 2010

- Malaxage

Pour assurer une bonne homogénéité du matériau et une profondeur importante du malaxage, il est judicieux de retenir un malaxeur ou un pulvimixer à rotor horizontal. D'autre part, le malaxage foisonnant énormément les matériaux, il faut veiller – lorsqu'on traite par bandes jointives à mordre suffisamment (20 cm) dans la partie déjà foisonnée, pour ne pas laisser de matériau non malaxé en bordures de bandes.



Fig III-6 : Malaxage d'un sol traité aux liants hydrauliques revue de l'école des ponts et chaussées Paris 2010

III-5-3 : Réglage

Le réglage définitif doit se faire par rabotage sur toute la largeur à régler et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écrtage des bosses. Il se fait le plus souvent à la niveleuse. Les matériaux provenant du rabotage doivent être évacués. L'épaisseur à raboter doit être prise en compte au stade du traitement, en prévoyant une surépaisseur suffisante du matériau traité (environ 3 cm).

- Compactage final

Il doit être réalisé immédiatement après le réglage final et, dans tous les cas, avant expiration du délai de maniabilité du mélange sol-liant, pour apporter le complément de l'énergie exigée pour obtenir la qualité de compactage recherchée suivant la couche considérée.

- Protection de surface

Cette protection superficielle, en général, un enduit gravillonné à l'émulsion de bitume, est destinée à imperméabiliser et à protéger la couche traitée des intempéries, de l'évaporation de l'eau et du trafic. Elle doit être réalisée dans les plus brefs délais après la fin du compactage final.



III-6 : CONCLUSION

Optimiser la technique de traitement des sols routiers in situ par la chaux et ou les liants hydraulique, c'est déterminer le couple couche de forme/chaussée le mieux adapté. Sachant que la couche de forme peut jouer un rôle structurel, on a donc intérêt à privilégier ses performances par la technique de traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. D'autant plus qu'elle est une technique éprouvée et parfaitement au point, grâce notamment aux progrès réalisés dans la connaissance des sols et à l'innovation des constructeurs de matériels de Travaux Publics et leurs nouveaux matériels encore plus puissants et performants. Elle présente de nombreux avantages, notamment :

- le traitement à froid (économie d'énergie et technique propre) ;
- le travail in situ et la valorisation de matériaux qui auraient été mis à la décharge (économie de transport de matériaux) ;



- la préservation de l'environnement, car elle limite l'exploitation des gisements de granulats (technique économe en granulats d'apports) ;
- une économie sur le coût global des projets. La technique du traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques est donc considérée aujourd'hui comme une technique classique dans l'exécution des remblais et des couches de forme. Elle se développe considérablement dans les couches d'assises de chaussées (couche de fondation et couche de base), ce qui prouve l'excellence de la technique.

IV : CONCLUSION GENERALE

Le traitement des sols aux liants hydrauliques (chaux, ciment...) est un procédé pratiqué par les entreprises du BTP en technique routière. Il présente comme avantages majeurs d'améliorer les propriétés géotechniques et mécaniques des sols dits « médiocres » et de permettre la réutilisation de sols en place plutôt que leur évacuation en décharge.

L'analyse du retour d'expérience montre occasionnellement une inefficacité du traitement (faibles résistances mécaniques) ou des désordres structuraux (gonflement volumique), qualifiés de perturbations de la solidification.

Afin d'optimiser la technique de traitement de sols, en raison des intérêts qu'elle porte vis-à-vis d'un objectif « zéro emprunt, zéro déchet », l'étude effectuée au laboratoire 3SR s'est engagée sur un vaste plan d'investigations, tant géotechniques que physico-chimiques et microstructurales, afin d'avancer sur la compréhension des mécanismes microstructuraux à l'origine des défaillances macrostructurales observées sur le terrain. On peut conclure que :

- Selon le GTR, les sols étudiés sont de classe (C1). Il existe une variabilité géochimique, tant du point de vue de la minéralogie de la composition chimique de la fraction solide et de la fraction soluble à l'eau. Ces sols sont ensuite traités à 2% et % de chaux vive. Le sol de la région Parisienne, Orly riche en sel phosphaté a été sommairement étudié dans cette approche au laboratoire. Les évolutions des caractéristiques des sols après traitement sont les suivantes :
- Les performances mécaniques des sols traités en aptitude ou en cure normale, R_c , sont satisfaisantes. L'analyse statistique des paramètres géotechniques des sols traités montre que les performances mécaniques des sols naturels et des sols traités sont corrélées entre elles ;
- les sols étudiés répondent à l'ensemble des critères d'aptitude (hors IPI) d'une réutilisation en assise de chaussée selon le GTS 2007 ;
- Si la structure globale des sols traités observée au MEB est similaire à celle décrite au cours de la synthèse bibliographique, la recherche minéralogique de hydrates cimentaires à 180 jours, par DRX, reste infructueuse ;
- Pour une même formulation de traitement, la composition physico-chimique de la fraction solide et de la fraction soluble à l'eau des sols évolue de manière semblable, ce qui résulte de compositions initiales identiques entre les sols tant au niveau des concentrations pseudo-totales que de la composition de la fraction soluble à l'eau ;



• Pour une même formulation de traitement, une distinction de l'évolution de la composition physico-chimique des fractions solide et soluble à l'eau, entre 28 et 180 jours, existe entre les sols, attestant une nouvelle fois de l'influence dominante de leurs caractéristiques physico-chimiques initiales.

REFERENCES

ABDO J. (2008) Traitement des sols en place aux liants hydrauliques, Journée Valorisation des sols médiocres, Paris.

AKHTER H., CARTLEDGE F.K., ROY A., TITTLEBAUM M.E. (1997)

Solidification/stabilization of arsenic salts: effects of long cure times Journal of Hazardous Materials, vol. 52, n°2-3, pp. 247- 264.

AZZOUZ F.Z. (2006) Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen Magister, Université de Tlemcen, Algérie.

BEAUCOUR J.C., RAYNAUD D. (2008) Valorisation de ressources locales : Utilisation en terrassements des marnes de l'aéroport de Paris Charles de Gaulle, Journée d'information Infrastructures aéronautiques et développement durable, STAC-LCPC,

CABANE N. (2004) LELONG (2008) Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation Thèse de doctorat, Centre des Matériaux de Grande Diffusion de l'Ecole des Mines d'Alès.

CARDE C., (1996) Caractérisation et modélisation de l'altération des propriétés mécaniques due à la lixiviation des matériaux cimentaires Thèse de doctorat, Université de Toulouse.

CHARDARD P., GANDILLE D. (2008) Traitement en place en terrassements, Journée Valorisation des sols médiocres, Paris.

CIMBETON (2004) Le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques pour l'exécution des remblais et des couches de forme, Documentation technique Route, n°89.

DONGJIN L., SWARBRICK G., WAITE D. (2005) Effect of calcite on lead-rich cementations solid waste forms Cement and Concrete Research, vol. 35, n°6, pp.1027-1037

GARIDEL-THORON R. (1979) Voirie aux Etats-Unis CTGREF

GERVAIS C. (1999) Evaluation environnementale des perspectives de valorisation en BTP de scories de première fusion de plomb et de zinc Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

HOLTZ R.D., KOVACS W. (1996) Introduction à la géotechnique Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal, 808 p.

LCPC-SETRA (1992) Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR), Fascicules I et II.



LCPC-SETRA (2000) Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Terrassement et couche de forme (GTS).

LCPC-SETRA (2007) Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des assises de chaussées.

LE BORGNE T. (2010) Influence des paramètres de cure sur le comportement d'un sol traité contenant du soufre, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Grenoble

LE BORGNE T. (2010) Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy.

LE RUNIGO B. (2008) Durabilité du limon de Jossigny traité à la chaux et soumis à différentes sollicitations hydriques : comportement physico-chimique, microstructural, hydraulique, et mécanique Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes.

PERRET P. (1977) Contribution à l'étude de la stabilisation des sols fin par la chaux. Etude globale du phénomène et application. Thèse de docteur-Ingénieur, INSA de Rennes

PICQUET I. (1995) Techniques de stabilisation physico-chimique à base de liant hydraulique appliquées aux résidus miniers sulfurés et arséniés Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.

REVUE (2004). Routes N°89 - Septembre 2004

ROBITAILLE V., TREMBLAY D. (1997) Mécanique des sols - Théorie et pratique Modulo, 680 p.

SAUSSAYE L (2012) : Traitement des sols aux liants hydraulique, aspect géotechnique et physico-chimique des perturbations de la solidification. Thèse de doctorat Université de Caen 2012

SING C., PERIE F., MOSZKOWICZ P. (1999) Application d'une méthodologie d'évaluation des procédés de stabilisation/solidification à base de liants hydrauliques Congrès, Stabilisation des déchets et environnement : vers la définition d'objectifs de stabilisation des déchets industriels par la prise en compte de l'impact potentiel sur la santé et l'environnement, Lyon Villeurbanne.

VENUAT M. (1980) Le traitement des sols à la chaux et au ciment. ERILH 1980

VIVIER M et al. (1969) Essais de traitement des limons à la chaux. Laboratoire des ponts et chaussées. Bulletin de liaison n°37

VIVIER M et al. (1969) Traitement des limons à la chaux vive en couche épaisse. Laboratoire des ponts et chaussées. Bulletin de liaison n°37

TESORIERE G. CELAURO B. GIUFFRE O. (1980) Caractère de la stabilisation à la chaux et au ciment d'un sol argileux très plastique. Revue Générale des Routes et Aérodrôme n°570

XING H., YANG X., XU C., YE G. (2009) Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil-cement Engineering Geology, vol. 103, pp.33-38.

SITES INTERNETE / IMAGES



Base de Données Analyses des Terres (BDAT), INRA

Bases de données Indicateurs de la Qualité des Sols (INDIQUASOL), INRA

cercle-recyclage. asso.fr

Google earth

planete-tp.com

NORMES UTILISEES

NF EN 196-1 (avril 2006) Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques

NF EN 13286-2 (février 2005) Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 2 : méthodes d'essai de détermination en laboratoire pour la masse volumique de référence et de la teneur en eau - Compactage Proctor

NF EN 13286-42 (septembre 2003) Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 42 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la traction indirecte des mélanges traités aux liants hydrauliques

NF EN 13286-47 (juillet 2004) Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 47 : méthode d'essai pour la détermination de l'indice portant Californien (CBR), de l'indice de portance immédiate (IPI) et du gonflement

NF EN 13286-49 (octobre 2004) Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 49 : essai de gonflement accéléré pour sol traité à la chaux et/ou avec un liant hydraulique

NF EN 13286-53 (mai 2005) Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 53 : méthode de confection par compression axiale des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques

NF P11-300 (septembre 1992) Exécution des terrassements - Classification des matériaux

NF P94-050 (septembre 1995) Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage

NF P94-068 (octobre 1998) Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche

NF P94-078 (mai 1997) Sols: reconnaissance et essais-Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR

NF P94-093 (octobre 1999) Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal. Essai Proctor modifié

NF P94-100 (août 1999) Sols : reconnaissance et essais - Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement

XP P94-041 (décembre 1995) Sols : reconnaissance et essais - Identification granulométrique - Méthode de tamisage par voie humide