



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

ÉCOLE DOCTORALE : RP2E

École National supérieure de Géologie de Nancy

Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement le 28/01/2010

pour l'obtention du grade de :

DOCTEUR DE L'I.N.P.L.

Spécialité :

Mécanique – Génie Civil

par

Tangi LE BORGNE

Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols

Directeur de thèse : Mme Farimah MASROURI

Professeur à l'INPL-ENSG

Co-directeur de thèse : M. Olivier CUISINIER

Maître de conférences à l'INPL-ENSG

Composition du jury :

Président du jury :

M. Christophe PETIT

Professeur à l'Université de Limoges

Rapporteurs :

M. Jean-Pierre MAGNAN

Directeur Technique géotechnique au LCPC

M. Jean-Claude VERBRUGGE

Professeur à l'Université Libre de Bruxelles

Examineurs :

M. Claude AIMÉ

Directeur Technique DTP Terrassement

Membres invités :

M. Patrice CHARDARD

Directeur Technique Eiffage Travaux Publics

M. Dimitri DENELE

Chargé de recherche au LCPC

À Sana

Avant-propos

Cette étude a été financée par le Syndicat Professionnel des Terrassiers de France (SPTF) ; elle a été menée au sein du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, dans le cadre d'une convention CIFRE. Cette thèse inscrite à l'INPL - Laboratoire Environnement, Géomécanique et Ouvrage (LAEGO) s'est déroulée sous la direction de Pr. F. Masrouri et sous la codirection de Dr. O. Cuisinier. Dans le comité de pilotage de cette thèse sont intervenus les représentants du Syndicat Professionnel des Terrassiers de France (SPTF), du LCPC et du LAEGO.

Remerciements

Avant tout je tiens à exprimer ma gratitude à Madame Farimah Masrouri, Professeur à l'INPL-ENSG et directrice de thèse, pour m'avoir guidé tout au long de ce travail de recherche et pour m'avoir accueilli au sein du LAEGO.

Je tiens à remercier Monsieur Olivier Cuisinier, maître de conférences à L'INPL-ENSG et co-directeur de thèse, pour tous ses conseils avisés dans de nombreux domaines : scientifiques, techniques, rédactionnels, communications, Je le remercie vivement de sa disponibilité de tous les instants. Et bien sur, je remercie également Mathieu !

Je remercie Monsieur J.P. Magnan, directeur technique géotechnique du LCPC et Monsieur J.C. Verbrugge, professeur à l'Université Libre de Bruxelles, pour avoir bien voulu accepter la tâche de rapporteur de ce mémoire.

Je tiens aussi à remercier Monsieur C. Petit, professeur à l'Université de Limoges, Monsieur C. Aimé, directeur technique de DTP Terrassement, Monsieur P. Chardard, directeur technique Eiffage Travaux Publics, Monsieur D. Deneele, chargé de recherche au LCPC, d'avoir accepté d'être membre du jury de thèse.

Dans le cadre du contrat CIFRE, je tiens à remercier C. Aimé et E. Lavallée de m'avoir accueilli au sein de DTP Terrassement.

Je remercie également J.C. Auriol et J. Garnier pour m'avoir accueilli au sein du LCPC, centre de Nantes, dans la division Reconnaissance et Mécanique des Sols et la section Construction et Durabilité des Ouvrages en Terre. Merci également à toutes les équipes du LCPC que j'ai pu côtoyer.

Mes remerciements vont aussi à J.P. David, technicien supérieur au LCPC, pour son aide dans la préparation et la réalisation des essais.

Merci également à mes collègues de bureau : Barbara et Nicolas. Mes pensées vont aussi à Cédric, François, Yves-Laurent, Mathieu, Slah, Faming et à tous les autres doctorants ou étudiants que j'ai pu croiser en 3 ans.

Enfin, j'associe à ce travail Sana, Ewan et mes parents pour leurs soutiens et leurs encouragements très précieux de tous les instants.

Sommaire

LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	xvii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1. LE TRAITEMENT DES SOLS : CONCEPTS DE BASE	5
1. CLASSIFICATION DES SOLS EN TERRASSEMENT	5
1.1. Les principaux constituants d'un sol.....	6
1.1.1. Les minéraux	6
1.1.2. La matière organique.....	7
1.1.3. L'eau.....	8
1.1.4. Conclusion.....	8
1.2. La classification du guide technique de réalisation des remblais et des couches de forme GTR	9
1.3. Conclusion.....	10
2. LE TRAITEMENT DES SOLS EN TERRASSEMENT	10
2.1. Le compactage des sols	11
2.2. Le traitement des sols à la chaux	12
2.2.1. Les différents types de chaux	12
2.2.2. Principe d'action de la chaux	14
2.3. Traitement des sols au liant hydraulique	19
2.3.1. Les différents types de liant hydraulique	19
2.3.2. Traitement des sols aux liants hydrauliques.....	21
2.4. Autres traitements.....	25
2.5. Conclusion.....	28
3. LES DÉSDORDRES RENCONTRÉS LORS DU TRAITEMENT DES SOLS À LA CHAUX ET AU LIANT HYDRAULIQUE.....	28
3.1. Influence de la minéralogie des sols.....	29
3.1.1. Granulométrie.....	29
3.1.2. Les argiles	30
3.1.3. Les minéraux soufrés	32
3.1.4. Les micas.....	36

3.2.	Influence de la matière organique	37
3.3.	Influence des substances minérales solubles	38
3.3.1.	Les sulfates solubilisés	38
3.3.2.	Les fertilisants	38
3.3.3.	Les chlorures	39
3.4.	Influence de divers composés sur les ciments et les bétons	40
3.5.	Conclusion	43
4.	MISE EN ÉVIDENCE DES PROBLÈMES RENCONTRÉS LORS DU TRAITEMENT DES SOLS.....	45
4.1.	Évaluation de l'efficacité d'un traitement	45
4.1.1.	Mesures de la résistance mécanique.....	45
4.1.2.	Mesures de gonflement	46
4.1.3.	Essais accélérant la prise	47
4.1.4.	Conclusion.....	48
4.2.	Paramètres influençant la perturbation des sols traités.....	48
4.2.1.	Influence de l'eau	48
4.2.2.	Influence de la température	51
4.2.3.	Influence de la nature du sol	52
4.2.4.	Synthèse	54
4.3.	Exemples de problèmes rencontrés en chantier, cas du soufre.....	54
4.3.1.	Exemple de l'avenue Stewart à Las Vegas, USA (Mitchell, 1986)	55
4.3.2.	Exemple du chantier de l'autoroute A28 (France)	56
4.3.3.	Autres chantiers.....	57
4.4.	Conclusion	58
5.	CONCLUSION ET OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	59
CHAPITRE 2. MATÉRIAUX ÉTUDIÉS ET DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE		61
1.	PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE DE TRAVAIL	61
1.1.	Travail sur des sols naturels.....	61
1.2.	Travail sur des sols reconstitués	62
1.3.	Choix de la méthode de préparation des matériaux.....	63
2.	LES PARAMÈTRES D'ÉTUDE	63
2.1.	Les perturbateurs	63
2.1.1.	Choix des perturbateurs.....	63
2.1.2.	Les nitrates	64
2.1.3.	Les phosphates	65
2.1.4.	Les chlorures	66
2.1.5.	Les sulfates	66

2.1.6.	Bilan des concentrations retenues pour l'étude.....	67
2.2.	Les sols	67
2.2.1.	Choix des types de sols	67
2.2.2.	Le limon du Val d'Europe.....	68
2.2.3.	Le sable de Bouër	72
2.3.	Types de traitements et liants	74
3.	MÉTHODES EXPÉRIMENTALES.....	75
3.1.	La méthode de perturbation.....	75
3.2.	Le traitement des sols	76
3.3.	Méthode de compactage	76
3.4.	Conservation des éprouvettes	77
3.5.	Les essais réalisés	78
3.5.1.	Détermination des propriétés mécaniques.....	78
3.5.2.	Caractérisations physico-chimiques.....	80
4.	PROPRIÉTÉS DES SOLS ÉTUDIÉS APRÈS TRAITEMENT	80
4.1.	Le sable de Bouër	80
4.1.1.	Données de compactage	81
4.1.2.	Délai de maniabilité	81
4.1.3.	Aptitude au traitement.....	82
4.1.4.	Résistance à la compression simple sans immersion	84
4.1.5.	Résistance à la compression simple après immersion.....	86
4.1.6.	Microstructure du Sable de Bouër après traitement.....	87
4.1.7.	Bilan des propriétés du Sable de Bouër après traitement.....	89
4.2.	Le limon du Val d'Europe	90
4.2.1.	Données de compactage	90
4.2.2.	Délai de maniabilité	91
4.2.3.	Aptitude au traitement.....	91
4.2.4.	Résistance à la compression simple sans immersion	93
4.2.5.	Résistance à la compression simple après immersion.....	95
4.2.6.	Microstructure du limon de Val d'Europe après traitement.....	97
4.2.7.	Bilan des propriétés du limon du Val d'Europe après traitement	98
5.	CONCLUSION	99

CHAPITRE 3. IDENTIFICATION DES COMPOSÉS CHIMIQUES PERTURBATEURS DU TRAITEMENT DES SOLS	101
1. INFLUENCE DE LA PRÉSENCE D'UN CHLORURE SUR LE TRAITEMENT DES SOLS	102
1.1. Influence d'un chlorure sur le traitement du sable de Bouër.....	102
1.1.1. Résultats des essais d'aptitude au traitement	102
1.1.2. Résistance à la compression simple sans immersion	104
1.1.3. Résistance à la compression simple après immersion.....	106
1.1.4. Synthèse	107
1.2. Influence d'un chlorure sur le traitement du limon du Val d'Europe	108
1.2.1. Résultats des essais d'aptitude au traitement	108
1.2.2. Résistance à la compression simple sans immersion	111
1.2.3. Résistance à la compression simple après immersion.....	112
1.2.4. Synthèse	113
1.3. Discussion : impact de la présence de chlorure sur le traitement des sols	114
2. INFLUENCE DE LA PRÉSENCE D'UN NITRATE SUR LE TRAITEMENT DES SOLS	115
2.1. Influence d'un nitrate sur le traitement du sable de Bouër.....	116
2.1.1. Résultats des essais d'aptitude au traitement	116
2.1.2. Résistance à la compression simple sans immersion	118
2.1.3. Résistance à la compression simple après immersion.....	120
2.1.4. Synthèse	121
2.2. Influence d'un nitrate sur le traitement du limon du Val d'Europe (LVE)	122
2.2.1. Résultats des essais d'aptitude au traitement	122
2.2.2. Résistance à la compression simple sans immersion	124
2.2.3. Résistance à la compression simple après immersion.....	126
2.2.4. Synthèse	127
2.3. Discussion : impact de la présence de nitrate sur le traitement des sols	130
3. INFLUENCE DE LA PRÉSENCE D'UN PHOSPHATE SUR LE TRAITEMENT DES SOLS	131
3.1. Influence d'un phosphate sur le traitement du sable de Bouër.....	131
3.1.1. Résultats des essais d'aptitude au traitement	131
3.1.2. Résistance à la compression simple sans immersion	133
3.1.3. Résistance à la compression simple après immersion.....	135
3.1.4. Synthèse	136
3.2. Influence d'un phosphate sur le traitement du limon du Val d'Europe (LVE).	137
3.2.1. Résultats des essais d'aptitude au traitement	137
3.2.2. Résistance à la compression simple sans immersion	139

3.2.3.	Résistance à la compression simple après immersion.....	141
3.2.4.	Synthèse	142
3.3.	Discussion : impact de la présence de phosphate sur le traitement des sols	144
4.	INFLUENCE DE LA PRÉSENCE D'UN SULFATE SUR LE TRAITEMENT DES SOLS	145
4.1.	Influence d'un sulfate sur le traitement du sable de Bouër	146
4.1.1.	Résultats des essais d'aptitude au traitement	146
4.1.2.	Résistance à la compression simple sans immersion	148
4.1.3.	Résistance à la compression simple après immersion.....	150
4.1.4.	Synthèse	151
4.2.	Influence d'un sulfate sur le traitement du limon du Val d'Europe (LVE).....	152
4.2.1.	Résultats des essais d'aptitude au traitement	152
4.2.2.	Résistance à la compression simple sans immersion	155
4.2.3.	Résistance à la compression simple après immersion.....	157
4.2.4.	Synthèse	158
4.3.	Discussion : impact de la présence de sulfate sur le traitement des sols	160
5.	CONCLUSION	162

CHAPITRE 4.	INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE CURE SUR LA RÉPONSE D'UN SOL À UN TRAITEMENT	165
1.	PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	166
1.1.	Caractéristiques des éléments ajoutés et dosages	166
1.2.	Conditions de cure	167
2.	INFLUENCE DES PARAMÈTRES D'ESSAIS SUR UN SOL CONTENANT UN SULFATE	169
2.1.	Influence de la température de conservation à teneur en eau initiale constante.....	169
2.1.1.	Essais à 20°C (condition n°1)	169
2.1.2.	Essais à 40°C (condition n°2)	170
2.1.3.	Synthèse : effet de la température de conservation	170
2.2.	Influence des conditions d'immersion.....	171
2.2.1.	Immersion dans une eau à 20°C (condition n°3).....	171
2.2.2.	Immersion dans une eau à 40°C (condition n°4).....	173
2.2.3.	Synthèse : influence de la température d'immersion	175
2.3.	Influence du temps de cure à teneur en eau initiale constante.....	176
2.3.1.	Immersion après 7 jours à teneur en eau initiale constante.....	176
2.3.2.	Immersion après 28 jours à teneur en eau initiale constante.....	180
2.4.	Influence des différentes conditions de cure sur la microstructure	183

2.5. Discussion : influence des conditions de cure dans le cas du mélange limon + sulfate	184
3. INFLUENCE DES PARAMÈTRES D'ESSAIS SUR UN SOL CONTENANT DU SULFURE	189
3.1. Influence de la température de conservation à teneur en eau initiale constante.....	189
3.1.1. Essais à 20°C (condition n°1)	189
3.1.2. Essais à 40°C (condition n°2)	190
3.1.3. Synthèse : effet de la température de conservation	191
3.2. Influence des conditions d'immersion.....	191
3.2.1. Immersion dans une eau à 20°C (condition n°3).....	192
3.2.2. Immersion dans une eau à 40°C (condition n°4).....	193
3.2.3. Synthèse : influence de la température d'immersion	194
3.3. Influence du temps de cure à teneur en eau initiale constante.....	195
3.3.1. Immersion après 7 jours de cure à teneur en eau initiale constante	195
3.3.2. Immersion après 28 jours de cure à teneur en eau initiale constante	198
3.4. Influence des différentes conditions de cure sur la microstructure	201
3.5. Discussion : influence des conditions de cure dans le cas du mélange limon + sulfure	202
4. DISCUSSION	206
4.1. Influence de la température de conservation	207
4.2. Influence de l'immersion.....	207
4.3. Influence de la forme sous laquelle se trouve le soufre.....	208
5. CONCLUSION	209
CONCLUSION GÉNÉRALE	213
LISTE BIBLIOGRAPHIQUE.....	217

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1 : LE TRAITEMENT DES SOLS : CONCEPTS DE BASE

Figure 1.1 : États de l'eau dans les sols, Philipponnat (2005)

Figure 1.2 : Classification des matériaux selon leur nature, GTR

Figure 1.3 : Exemple de courbes de compactage suivant la nature du sol et l'énergie de compactage, Le Borgne (2006)

Figure 1.4 : Modification des caractéristiques de compactage d'un sol suite à l'ajout de chaux, d'après le GTS (LCPC-SETRA, 2000)

Figure 1.5 : Influence de la nature du minéral, de la quantité de chaux et du temps sur la résistance à la compression simple, Bell (1996)

Figure 1.6 : Gonflement en fonction du temps d'une argile non traité et traité à 3 et 6 % de chaux, Afès et Didier (2000)

Figure 1.7 : Conductivité hydraulique en fonction de la densité de sols argileux traités ou non à la chaux, compactés à l'état optimal ou humide, Cuisinier and Le Borgne (2008)

Figure 1.8 : Évolution des limites de plasticité (PL), de liquidité (LL), et des indices de plasticité (PI) d'un sol argileux traité soit à la chaux, soit au liant hydraulique en fonction du taux de liant ajouté, Osula (1996)

Figure 1.9 : Évolution de la teneur en eau optimale (OMC) et de la masse volumique sèche optimale (MDD) d'un sol argileux traité soit à la chaux, soit au liant hydraulique en fonction du taux de liant ajouté, Osula (1996)

Figure 1.10 : Évolution de la résistance à la compression simple d'un sable argileux traité à différents pourcentage de liant hydraulique en fonction du temps, Bahar et al. (2004)

Figure 1. 11 : Impact du type de traitement sur la résistance à la compression simple, Fontaine (1984).

Figure 1. 12 : Évolution du module d'élasticité à 30% de la force de rupture, à 7 jours de temps de cure, d'un sol fin traité au CEM I, immergé ou non, en fonction du dosage en liant, Sariosseiri et Muhunthan (2008)

Figure 1.13 : Résistance à la compression simple q_u en fonction du temps de sable limoneux traité à différents dosages en hexamétaphosphate de sodium, Falamaki et al. (2008)

Figure 1.14 : Courbes de gonflement des argiles d'In Amenas en présence de différents sels, Hachichi et Fleureau (1999)

Figure 1.15 : Résistance à la compression simple en fonction du temps de différents sols mélangé à du chlorure de sodium, Singh et Braja (1999)

Figure 1.16 : Capacité de captation des ions Ca^{2+} par les argiles et quantité d'ion Ca^{2+} libérés par le ciment au cours du temps, Ben Amor (1997)

Figure 1. 17 : Résistance en compression simple de mélanges limon + bentonite traités à 1,5% de chaux et 6% de CEM II, d'après Bird (2007)

Figure 1.18 : Gonflement final après immersion en fonction de la teneur en sulfate d'un mélange kaolinite, chaux (L), laitier (S), et gypse à différent dosage, Wild et al. (1999)

Figure 1. 19 : Effets de l'incorporation au sol de diverses matières organiques à divers pourcentages, Peltier (1957)

Figure 1.20 : Évolution des contraintes à la rupture pour des pâtes de ciment hydratées avec des solutions de différentes concentrations en phosphate et nitrate de potassium ($e/c = 0,3$) (Bénard, 2005)

Figure 1.21 : Dispositif de mesure du swell test, Puppala (2005)

Figure 1.22 : Gonflement en fonction du temps de cure d'échantillons conservés à l'air ambiant, Wang (2003)

Figure 1.23 : Gonflement en fonction du temps de cure d'échantillons conservés en chambre humide ou à teneur en eau constante, Wang (2003)

Figure 1.24 : Résistance à la compression simple en fonction du temps de cure de différents mélanges sol + gypse, Ghosh and Subbarao (2007)

Figure 1. 25 : Résistance à la compression simple après (Soaked) ou non (unsoaked) immersion en fonction du temps de cure à teneur en eau constante de différents mélanges sol + gypse, Ghosh et Subbarao (2007)

Figure 1.26 : Gonflement en fonction du temps de cure d'échantillons conservés à teneur en eau constante à 40°C, Wang (2003)

Figure 1.27 : Résultat de l'essai de gonflement pour différents mélanges sol-gypse traités à la chaux, Harris et al. (2004)

Figure 1.28 : Effet de la chaux vive sur les résistances, Mitchell (1986)

CHAPITRE 2 : MATÉRIAUX ÉTUDIÉS ET DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

Figure 2.1 : Valeurs médianes des teneurs en azote total de l'horizon de surface des sols agricoles, période début 1995 à fin 1999 (INRA, 2007)

Figure 2.2 : Valeurs médianes des teneurs en phosphore assimilable de l'horizon de surface des sols agricoles, période début 1995 à fin 1999 (INRA, 2007)

Figure 2.3 : Valeurs des derniers déciles des teneurs en phosphore assimilable de l'horizon de surface des sols agricoles, période début 1995 à fin 1999 (INRA, 2007)

Figure 2.4 : Courbe Proctor et IPI du limon du Val d'Europe naturel

Figure 2.5 : Courbe granulométrique du limon du Val d'Europe (méthodes par tamisage et par sédimentation)

Figure 2.6 : Observation de surface au MEB du limon du Val d'Europe non traité (x 200)

Figure 2.7 : Observation de détail montrant l'organisation microscopique du LVE compacté (x 800)

Figure 2.8 : Observation de détail montrant les Particules argileuses recouvrant les grains de quartz et assurant la continuité avec les différents agrégats (x 1200)

Figure 2.9 : Courbe Proctor et IPI du sable de Bouër

Figure 2.10 : Courbe granulométrique du sable de Bouër (méthodes par tamisage et par sédimentation)

Figure 2.11 : Equipement de compactage des éprouvettes

Figure 2.12 : Dispositif de mesure de la résistance à la traction brésilienne

Figure 2.13 : Dispositif de mesure de la résistance à la compression simple

Figure 2.14 : Courbe Proctor du limon du Sable de Bouër

Figure 2.15 : Détermination du délai de maniabilité pour le sable de Bouër

Figure 2.16 : Essai d'aptitude : gonflement volumique du sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM I

Figure 2.17 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM I

Figure 2.18 : Essai d'aptitude : gonflement volumique du sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM II

Figure 2.19 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM II

Figure 2.20 : Evolution de la résistance à la compression simple sur le sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM I avec le temps de cure

Figure 2.21 : Evolution de la résistance à la compression simple sur le sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM II avec le temps de cure

Figure 2.22 : Observation de surface au MEB du sable de Bouër traité au CEM I

Figure 2.23 : Observation de surface au MEB du sable de Bouër traité au CEM I (x100)

Figure 2.24 : Observation de surface au MEB du sable de Bouër traité au CEM II (x 50)

Figure 2.25 : Observation de surface au MEB du sable de Bouër traité au CEM II (x 170)

Figure 2.26 : Courbe Proctor du limon du Val d'Europe traité et non traité

Figure 2.27 : Détermination du délai de maniabilité pour le limon du Val d'Europe

Figure 2.28 : Essai d'aptitude : gonflement volumique du limon du val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I

Figure 2.29 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte du limon du val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I

Figure 2.30 : Mesures de gonflement volumique sur le limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II

Figure 2.31 : Mesures de résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II

Figure 2.32 : Evolution de la résistance à la compression simple du limon du val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I avec le temps de cure

Figure 2.33 : Evolution de la résistance à la compression simple sur le limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II avec le temps de cure

Figure 2.34 : Observation de surface au MEB du limon du Val d'Europe traité à la chaux et CEM I (x 200)

Figure 2.35 : Observation de détail montrant le recouvrement des particules du sol par les phases cimentaires (x 1200)

Figure 2.36 : Observation de surface au MEB du limon du Val d'Europe traité à la chaux et CEM II (x 200)

Figure 2.37 : Observation de détail montrant le recouvrement des particules du sol par les phases cimentaires (x 500)

CHAPITRE 3 : IDENTIFICATION DES COMPOSÉS CHIMIQUES PERTURBATEURS DU TRAITEMENT DES SOLS

Figure 3.1 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange sable de Bouër et chlorure traité au liant hydraulique de type CEM I ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

Figure 3.2 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange sable de Bouër et chlorure traité au liant hydraulique de type CEM I ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

Figure 3.3 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange sable de Bouër et chlorure traité au liant hydraulique de type CEM II ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

Figure 3.4 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange sable de Bouër et chlorure traité au liant hydraulique de type CEM II ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

Figure 3.5 : Evolution de la résistance à la compression simple du mélange sable de Bouër et chlorure traité au liant hydraulique de type CEM I avec le temps de cure ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

Figure 3.6 : Evolution de la résistance à la compression simple du mélange sable de Bouër et chlorure traité au liant hydraulique de type CEM II avec le temps de cure ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

Figure 3.7 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange limon du val d'Europe et chlorure traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

Figure 3.8 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange limon du val d'Europe et chlorure traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

Figure 3.9 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange limon du val d'Europe et chlorure traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

Figure 3.10 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange limon du val d'Europe et chlorure traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II ([dosage faible] = $100 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NaCl}$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NaCl}$)

Figure 3.11 : Evolution de la résistance à la compression simple sur le mélange limon du val d'Europe et chlorure traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I avec le temps de cure ([dosage faible] = $100 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NaCl}$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NaCl}$)

Figure 3.12 : Evolution de la résistance à la compression simple sur le mélange limon du val d'Europe et chlorure traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II avec le temps de cure ([dosage faible] = $100 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NaCl}$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NaCl}$)

Figure 3.13 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange sable de Bouër et nitrate traité au liant hydraulique de type CEM I ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$)

Figure 3.14 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange sable de Bouër et nitrate traité au liant hydraulique de type CEM I ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$)

Figure 3.15 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange sable de Bouër et nitrate traité au liant hydraulique de type CEM II ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$)

Figure 3.16 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) du mélange sable de Bouër et nitrate traité au liant hydraulique de type CEM II ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$)

Figure 3.17 : Evolution de la résistance à la compression simple sur le mélange sable de Bouër et nitrate traité au liant hydraulique de type CEM I avec le temps de cure ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$)

Figure 3.18 : Evolution de la résistance à la compression simple du mélange sable de Bouër et nitrate traité au liant hydraulique de type CEM II avec le temps de cure ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$)

Figure 3.19 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange limon du val d'Europe et nitrate traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$)

Figure 3.20 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange limon du val d'Europe et nitrate traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$)

Figure 3.21 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange limon du val d'Europe et nitrate traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$)

Figure 3.22 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange limon du val d'Europe et nitrate traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$)

Figure 3.23 : Évolution de la résistance à la compression simple sur le mélange limon du val d'Europe et nitrate traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I avec le temps de cure ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$)

Figure 3.24 : Évolution de la résistance à la compression simple sur le mélange limon du val d'Europe et nitrate traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II avec le temps de cure ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$)

Figure 3.25 : Observation de surface au MEB du mélange limon + NO_3NH_4 traité au CEM II (x 150)

Figure 3.26 : Observation de surface au MEB du mélange limon + NO_3NH_4 traité au CEM II, vue de détail des phases cimentaires entre les grains de quartz (x 700)

Figure 3.27 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange sable de Bouër et phosphate traité au liant hydraulique de type CEM I ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$)

Figure 3.28 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange sable de Bouër et phosphate traité au liant hydraulique de type CEM I ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$)

Figure 3.29 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange SB + KPO_4 + CEM II ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$)

Figure 3. 30 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange SB + KPO_4 + CEM II ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$)

Figure 3. 31 : Evolution de la résistance à la compression simple du mélange SB + KPO_4 + CEM I avec le temps de cure ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$)

Figure 3.32 : Evolution de la résistance à la compression simple du mélange SB + KPO_4 + CEM II ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$)

Figure 3.33 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange LVE + KPO_4 + CaO + CEM I ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$)

Figure 3.34 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange LVE + KPO_4 + CaO + CEM I ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$)

Figure 3.35 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange LVE + KPO_4 + CaO + CEM II ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$)

Figure 3.36 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange LVE + KPO_4 + CaO + CEM II ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$)

Figure 3.37 : Evolution de la résistance à la compression simple du mélange LVE + KPO_4 + CaO + CEM I avec le temps de cure ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$)

Figure 3. 38 : Evolution de la résistance à la compression simple du mélange LVE + KPO_4 + CaO + CEM II avec le temps de cure ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$)

Figure 3.39 : Observation de surface au MEB du mélange limon + KPO_4 traité au CEM I (x 150)

Figure 3.40 : Observation de surface au MEB du mélange limon + KPO_4 traité au CEM I (x 200)

Figure 3.41 : Essai d'aptitude : gonflement volumique du mélange SB + CaSO₄, 2H₂O + CEM I ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O)

Figure 3.42 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) du mélange SB + CaSO₄, 2H₂O + CEM I ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O)

Figure 3.43 : Mesures de gonflement volumique sur le du mélange SB + CaSO₄, 2H₂O + CEM II ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O)

Figure 3.44 : Mesures de résistance à la traction indirecte (essai brésilien) du mélange SB + CaSO₄, 2H₂O + CEM II ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O)

Figure 3.45 : Evolution de la résistance à la compression simple sur le du mélange SB + CaSO₄, 2H₂O + CEM I ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O)

Figure 3.46 : Evolution de la résistance à la compression simple du mélange SB + CaSO₄, 2H₂O + CEM II avec le temps de cure ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O)

Figure 3.47 : Essai d'aptitude : gonflement volumique du mélange LVE + CaSO₄, 2H₂O + CaO + CEM I ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O)

Figure 3.48 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) du mélange LVE + CaSO₄, 2H₂O + CaO + CEM I ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O)

Figure 3.49 : Essai d'aptitude : gonflement volumique du mélange LVE + CaSO₄, 2H₂O + CaO + CEM II ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O)

Figure 3.50 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) du mélange LVE + CaSO₄, 2H₂O + CaO + CEM II ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O)

Figure 3.51 : Evolution de la résistance à la compression simple sur le mélange LVE + CaSO₄, 2H₂O + CaO + CEM I avec le temps de cure ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O)

Figure 3.52 : Evolution de la résistance à la compression simple sur le mélange LVE + CaSO₄, 2H₂O + CaO + CEM I avec le temps de cure ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O)

Figure 3.53 : Observation de surface au MEB du mélange limon + CaSO₄, 2H₂O + CaO + CEM II (×200)

Figure 3.54 : Observation de surface au MEB du mélange limon + CaSO₄, 2H₂O + CaO + CEM II, ettringite tapissant la paroi des pores (×300)

Figure 3.55 : Observation de surface au MEB du mélange limon + CaSO₄, 2H₂O + CaO + CEM II, vue de détail du tapis d'ettringite tapissant la paroi des pores (×1700)

CHAPITRE 4 : INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE CURE SUR LA RÉPONSE D'UN SOL À UN TRAITEMENT

Figure 4.1 : Évolution de la résistance à la compression simple d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante et à 20°C (condition n°1)

Figure 4.2 : Évolution de la résistance à la compression simple d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante et à 40°C (condition n°2)

Figure 4.3 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 20°C (condition n°3)

Figure 4.4 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 40°C (condition n°4)

Figure 4.5 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 20°C après avoir été conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours (condition n°5)

Figure 4.6 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 40°C après avoir été conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours (condition n°6)

Figure 4.7 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 20°C après avoir été conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours (condition n°7)

Figure 4.11 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 40°C après avoir été conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours (condition n°8)

Figure 4.12 : Observation de surface au MEB du mélange limon + CaSO₄, 2H₂O + CaO + CEM II (×100)

Figure 4.13 : Observation de surface au MEB du mélange limon + CaSO₄, 2H₂O + CaO + CEM II (×350)

Figure 4.14 : Observation de surface au MEB du mélange limon + CaSO₄, 2H₂O + CaO + CEM II (×700)

Figure 4.15 : Gonflement volumique après immersion à 20°C (%) en fonction du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion (jours) de mélanges LVE + gypse + CaO + CEM II et LVE + CaO + CEM II

Figure 4.16 : Résistance à la compression simple après immersion à 20°C (MPa) en fonction du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion (jours) de mélanges LVE + gypse + CaO + CEM II et LVE + CaO + CEM II

Figure 4.17 : Gonflement volumique après immersion à 40°C (%) en fonction du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion (jours) de mélanges LVE + gypse + CaO + CEM II et LVE + CaO + CEM II

Figure 4.18 : Résistance à la compression simple après immersion à 40°C (MPa) en fonction du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion (jours) de mélanges LVE + gypse + CaO + CEM II et LVE + CaO + CEM II

Figure 4.19 : Évolution de la résistance à la compression simple d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante et à 20°C (condition n°1)

Figure 4.20 : Évolution de la résistance à la compression simple d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante et à 40°C (condition n°2)

Figure 4.21 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 20°C (condition n°3)

Figure 4.22 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 40°C (condition n°4)

Figure 4.23 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 20°C après avoir été conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours (condition n°5)

Figure 4.24 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 40°C après avoir été conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours (condition n°6)

Figure 4.25 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 20°C après avoir été conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours (condition n°7)

Figure 4.26 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 40°C après avoir été conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours (condition n°8)

Figure 4.27 : Observation de surface au MEB du mélange limon + FeS₂ + CaO + CEM II (×500)

Figure 4.28 : Observation de surface au MEB du mélange limon + FeS₂ + CaO + CEM II, détail de la figure 4.24 (×1200)

Figure 4.29 : Observation de surface au MEB du mélange limon + FeS₂ + CaO + CEM II, détail de la présence résiduelle de pyrite et de la formation d'ettringite (×2200)

Figure 4.30 : Gonflement volumique après immersion à 20°C (%) en fonction du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion (jours) de mélanges LVE + pyrite + CaO + CEM II et LVE + CaO + CEM II

Figure 4.31 : Résistance à la compression simple après immersion à 20°C (MPa) en fonction du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion (jours) de mélanges LVE + pyrite + CaO + CEM II et LVE + CaO + CEM II

Figure 4.32 : Gonflement volumique après immersion à 40°C (%) en fonction du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion (jours) de mélanges LVE + pyrite + CaO + CEM II et LVE + CaO + CEM II

Figure 4.33 : Résistance à la compression simple après immersion à 40°C (MPa) en fonction du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion (jours) de mélanges LVE + pyrite + CaO + CEM II et LVE + CaO + CEM II

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1 : LE TRAITEMENT DES SOLS : CONCEPTS DE BASE

Tableau 1.1 : Principales propriétés de la chaux

Tableau 1.2 : Évolution de la limite de plasticité (w_p), de la limite de liquidité (w_L) et de l'indice de plasticité (I_p) d'une argile en fonction de la teneur en chaux ajoutée, d'après Rogers and Glendinning (1996)

Tableau 1.3 : R_c en fonction du type de liant utilisé, Santoni et al. (2001)

Tableau 1.4 : Seuil de perturbation du traitement des sols par les composés soufrés

Tableau 1.5 : Résultats de gonflements volumiques et de résistances à la traction indirecte de sols micacés, d'après Chopier (2007)

Tableau 1.6 : Mesures de résistance à la compression simple d'un limon et de trois sols micacés traité à 1% de chaux et 5% de liant hydraulique, d'après Cabane (2005)

Tableau 1.7 : Gonflements volumiques et résistances à la traction indirecte de mélange limon + fertilisants (nitrate et phosphate), Guichard (2006)

Tableau 1.8 : Gonflement volumique et résistance à la traction indirecte de mélange limon + fertilisants (potasse), Guichard (2006)

Tableau 1.9 : Les perturbateurs et leurs effets, (GTS, 2000)

Tableau 1.10 : Influences de divers composés sur le traitement des sols et sur les bétons

Tableau 1.11 : Critères d'aptitude de l'essai d'aptitude

Tableau 1.12 : R_c de mélange sable + kaolinite et de mélange sable + montmorillonite, d'après Mitchell et Dermatas (1992)

Tableau 1.13 : Résultats de l'étude de traitement, Baryla et al. (2000)

CHAPITRE 2 : MATÉRIAUX ÉTUDIÉS ET DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

Tableau 2.1 : Dosages retenus pour la première partie d'étude

Tableau 2.2 : Valeurs de bleu du sol du limon du Val d'Europe, vérification de l'homogénéité du matériau après préparation

Tableau 2.3 : Caractéristiques géotechniques du LVE

Tableau 2.4 : Analyses chimiques du LVE (PF= perte au feu, COT= Carbone Organique Total)

Tableau 2.5 : Propriétés physico-chimiques du limon du Val d'Europe

Tableau 2.6 : Teneurs en eau et valeurs de bleu du sol du sable de Bouër, vérification de l'homogénéité du matériau après préparation

Tableau 2.7 : Caractéristiques géotechniques du sable de Bouër

Tableau 2.8 : Analyses chimiques du sable de Bouër (PF = Perte au Feu, COT= Carbone Organique Total)

Tableau 2.9 : Propriétés physico- chimiques du sable de Bouër

Tableau 2.10 : Caractéristiques de la chaux vive utilisée (données fournisseurs)

Tableau 2.11 : Caractéristiques chimiques (%) du liant hydraulique CEM I 52,5 N (PF=Perte au Feu)

Tableau 2.12 : Objectifs de compactage

Tableau 2.13 : Résistance à la compression simple après immersion et de gonflement volumique du sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM I

Tableau 2.14 : Résistance à la compression simple après immersion et de gonflement volumique du sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM II

Tableau 2.15 : Résistance à la compression simple après immersion et de gonflement volumique du limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I

Tableau 2.16 : Résistance à la compression simple après immersion et de gonflement volumique du limon du val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II

CHAPITRE 3 : IDENTIFICATION DES COMPOSÉS CHIMIQUES PERTURBATEURS DU TRAITEMENT DES SOLS

Tableau 3.1 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange sable de Bouër et chlorure traité au liant hydraulique de type CEM I ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

Tableau 3.2 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange sable de Bouër et chlorure traité au liant hydraulique de type CEM II ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

Tableau 3.3 : Effet du NaCl à faible dosage (100 mg.kg⁻¹ NaCl) sur le traitement du sable de Bouër

Tableau 3.4 : Effet du NaCl à fort dosage (2000 mg.kg⁻¹ NaCl) sur le traitement du sable de Bouër

Tableau 3.5 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange LVE + NaCl + CaO + CEM I ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

Tableau 3.6 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange LVE + NaCl + CaO + CEM II ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

Tableau 3. 7 : Effet du chlorure à faible dosage ($100 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NaCl}$) sur le traitement du limon du Val d'Europe

Tableau 3. 8 : Effet du chlorure à fort dosage ($2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NaCl}$) sur le traitement du limon du Val d'Europe

Tableau 3. 9 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange SB + N_3NH_4 + CEM I ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ N}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ N}_3\text{NH}_4$)

Tableau 3. 10 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange SB + N_3NH_4 +CEM II ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ N}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ N}_3\text{NH}_4$)

Tableau 3. 11 : Effet du nitrate à faible dosage ($200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ N}_3\text{NH}_4$) sur le traitement du sable de Bouër

Tableau 3. 12 : Effet du nitrate à fort dosage ($2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ N}_3\text{NH}_4$) sur le traitement du sable de Bouër

Tableau 3. 13 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange LVE + N_3NH_4 + CaO + CEM I ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ N}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ N}_3\text{NH}_4$)

Tableau 3. 14 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique de mélange LVE + N_3NH_4 + CaO + CEM II ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ N}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ N}_3\text{NH}_4$)

Tableau 3. 15 : Effet du nitrate à faible dosage ($200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ N}_3\text{NH}_4$) sur le traitement du LVE

Tableau 3. 16 : Effet du nitrate à fort dosage ($2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ N}_3\text{NH}_4$) sur le traitement du LVE

Tableau 3. 17 : Résistances à la compression simple après immersion et gonflements volumiques du mélange SB + KPO_4 + CEM I ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$)

Tableau 3. 18 : Résistances à la compression simple après immersion et gonflements volumiques sur le mélange SB + KPO_4 + CEM II ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$)

Tableau 3. 19 : Effet du phosphate à faible dosage ($400 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$) sur le traitement du sable de Bouër

Tableau 3. 20 : Effet du phosphate à fort dosage ($1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$) sur le traitement du sable de Bouër

Tableau 3. 21 : Résistances à la compression simple après immersion et gonflements volumiques sur le mélange LVE + KPO_4 + CaO + CEM I ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$)

Tableau 3. 22 : Résistances à la compression simple après immersion et gonflements volumiques sur le mélange LVE + KPO_4 + CaO + CEM II ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$)

Tableau 3. 23 : Effet du phosphate sur le traitement du limon du Val d'Europe

Tableau 3. 24 : Effet du phosphate sur le traitement du limon du Val d'Europe

Tableau 3.25 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur du mélange SB + CaSO₄, 2H₂O + CEM I ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O)

Tableau 3. 26 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange SB + CaSO₄, 2H₂O + CEM II ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O)

Tableau 3. 27 : Effet du sulfate à faible dosage (1 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O) sur le traitement du sable de Bouër

Tableau 3. 28 : Effet du sulfate à fort dosage (10 g.kg⁻¹ CaSO₄, 2H₂O) sur le traitement du sable de Bouër

Tableau 3. 29 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange LVE + CaSO₄, 2H₂O + CaO + CEM I ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ gypse ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ gypse)

Tableau 3. 30 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange LVE + CaSO₄, 2H₂O + CaO + CEM II ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ gypse ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ gypse)

Tableau 3. 31 : Effet du gypse à faible dosage (1 g.kg⁻¹ gypse) sur le traitement du limon du Val d'Europe

Tableau 3. 32 : Effet du gypse à fort dosage (10 g.kg⁻¹ gypse) sur le traitement du limon du Val d'Europe

CHAPITRE 4 : INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE CURE SUR LA RÉPONSE D'UN SOL À UN TRAITEMENT

Tableau 4.1 : Récapitulatif des conditions de cure utilisées lors de l'étude des influences des paramètres d'essais (DM = délai de maniabilité) pour les deux types d'ajout : sulfate et sulfure.

Tableau 4.2 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd) et indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de LVE + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante pendant 120 minutes puis immergées à 20 °C

Tableau 4.3 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd) et indice des vides(e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de LVE + gypse + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 120 minutes puis immergées à 20 °C

Tableau 4.4 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd) et indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de LVE + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 120 minutes puis immergées à 40 °C

Tableau 4.5 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd) et indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de LVE + gypse + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 120 minutes puis immergées à 40 °C

Tableau 4.6 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de LVE + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours puis immergées à 20 °C

Tableau 4.7 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de LVE + gypse + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours puis immergées à 20 °C

Tableau 4.8 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de LVE + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours puis immergées à 40 °C

Tableau 4.9 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de LVE + gypse + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours puis immergées à 40 °C

Tableau 4.10 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours puis immergées à 20 °C

Tableau 4.11 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours puis immergées à 20 °C

Tableau 4.12 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + CaO + CEM II, conservés à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours puis immergés à 40 °C

Tableau 4.13 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours puis immergées à 40 °C

Tableau 4.14 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 120 minutes puis immergées à 20 °C

Tableau 4.15 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 120 minutes puis immergées à 40 °C

Tableau 4.16 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours puis immergées à 20 °C

Tableau 4.17 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours puis immergées à 40 °C

Tableau 4.18 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours puis immergées à 20 °C

Tableau 4.19 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ph), masse volumique sèche (pd), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours puis immergées à 40 °C

Tableau 4.20. Influence de la température de cure à teneur en eau constante

Tableau 4.21. Influence du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion et de la température d'immersion

Tableau 4.22 : Synthèse de l'influence des conditions de cure sur l'aptitude d'un sol contenant soit un sulfate soit un sulfure traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II

INTRODUCTION GÉNÉRALE

o *Cadre général*

Les travaux de terrassement interviennent dans la construction de la plupart des ouvrages de génie civil ou de bâtiment. Cette activité recouvre l'ensemble des travaux de fouille, de transport, de mise en place de terre, pratiqués pour modifier le relief d'un terrain, permettre de réaliser ou renforcer certains ouvrages. Les sols sont ainsi extraits d'un déblai, puis transportés, et enfin mis en œuvre en remblai. Les activités de terrassement (remblais, couche de forme, d'assises routières ou ferroviaires, fouilles, plate forme, etc.) représentent 18 % du chiffre d'affaires global des Travaux Publics (source FNTP, 2004). Sur les ouvrages d'infrastructures, la part du terrassement est prédominante par rapport aux autres natures d'ouvrages, elle atteint, en moyenne, un tiers du coût global sur les projets autoroutiers ou ferroviaires.

Les pratiques actuelles des terrassements sont une synthèse de techniques basées sur le retour d'expériences accumulées depuis les années 1950. Celles-ci ont été formalisées dans des guides techniques et des normes (par ex. le Guide Technique de Réalisation des remblais et des couches de forme, norme NF P 11-300 = classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières), qui conduisent à rechercher un certain type de matériau pour une certaine fonction dans l'ouvrage, ce qui exige le recours à des emprunts extérieurs aux projets lorsque la qualité et les propriétés géotechniques des matériaux rencontrés sur le site ne sont pas compatibles avec les performances recherchées. Cette approche n'est pas compatible avec les exigences du développement durable qui imposent d'employer au maximum les matériaux situés dans l'emprise des nouveaux projets d'infrastructure (zéro emprunt/zéro déchet). Dans ce contexte, le traitement à la chaux et/ou aux liants, parce qu'il permet d'améliorer les matériaux inutilisables en l'état, est une solution potentielle pour atteindre cet objectif.

Bien que le traitement des sols se soit développé en même temps que les autres techniques de terrassements, cette solution souffre cependant de nombreuses limitations. L'hydratation du ciment ou les réactions entre le liant et le sol (argiles) sont des processus

complexes, très sensibles à l'environnement dans lequel se déroulent ces réactions. C'est ainsi qu'une légère modification de la chimie du sol et de sa composition minéralogique peuvent modifier considérablement la suite de réactions attendues, et, par conséquent, la performance finale du sol traité. Les éléments chimiques qui conduisent à l'échec d'un traitement sont qualifiés d'éléments perturbateurs de prise. Même si le traitement à la chaux n'a pas les mêmes objectifs (réutilisation des sols) que le traitement à la chaux et au liant hydraulique ou au liant hydraulique seul (amélioration mécanique des sols), la présence de ces substances a, en général, un effet similaire sur le traitement à la chaux ou au ciment puisque les produits de réaction finaux sont très semblables chimiquement. Ainsi, la pratique du traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques (objet de l'étude) rencontre encore des échecs obligeant l'entreprise à remplacer le matériau traité par un autre matériau, le plus souvent un granulat. La conséquence est d'écarter de nombreux sols des pratiques de traitement, ces sols étant alors considérés comme des déchets. Le chiffre de 2 millions de m³ a été avancé en 2000 pour quantifier ces sols inaptes au traitement et pour lesquels une technique de substitution a dû être trouvée (source FNTP, 2000). Atteindre l'objectif « zéro emprunt / zéro déchets » passe par la réutilisation des matériaux contenant des perturbateurs. Pour cela, il est nécessaire d'évaluer quantitativement les effets de ces éléments chimiques et de déterminer dans quelles conditions ils peuvent avoir un impact négatif sur le traitement des sols.

o Objectifs de la thèse

De nombreux éléments chimiques sont répertoriés dans la littérature technique comme étant des éléments perturbateurs de prise. Cependant, seuls les cas du soufre et de la matière organique ont fait l'objet de nombreuses études, en laboratoire et sur des chantiers. Le premier objectif de la thèse est donc d'établir une revue exhaustive de la littérature sur les autres éléments chimiques susceptibles de perturber le traitement des sols en complétant les connaissances déjà disponibles dans le domaine du traitement des sols avec des données issues du domaine de la chimie des ciments et bétons.

La concentration d'un élément chimique dans un sol est un paramètre extrêmement variable en fonction notamment de l'origine de la formation géologique en question. Il est vraisemblable que l'impact d'un élément sur le résultat d'un traitement soit une fonction de cette concentration. Ce travail de thèse a pour second objectif la détermination du seuil d'action de plusieurs éléments chimiques potentiellement perturbateurs.

Par ailleurs, un même élément chimique peut se trouver sous différentes formes chimiques, associées à des éléments chimiques variables, ce qui pourrait avoir en soi un

impact direct sur le résultat du traitement des sols. De même, la nature du sol et le type de liant, parce qu'ils contribuent à modifier les éléments en présence peuvent jouer un rôle significatif sur les résultats d'un traitement. Le troisième objectif de la thèse est ainsi de mettre en évidence l'influence de la concentration en un élément chimique, de sa forme chimique, de la nature du sol et du type de liant sur les résultats d'un traitement.

La détection de la présence d'un élément perturbateur est un point fondamental d'une étude de traitement. Au-delà de la simple mise en évidence de la présence d'un perturbateur, les essais réalisés lors d'une étude de traitement devraient renseigner sur le comportement du sol traité dans l'ouvrage. Dans ce contexte, le quatrième objectif de cette thèse est d'établir une comparaison critique des différents essais disponibles pour mettre en évidence l'aptitude d'un sol au traitement.

o Organisation du mémoire

Le premier chapitre donne un aperçu des connaissances actuelles sur le traitement à la chaux et/ou au liant hydraulique des sols compactés et plus particulièrement sur les conditions défavorables à la prise lors de ce traitement. Afin d'améliorer notre connaissance de l'action potentielle des composés peu connus dans le domaine du traitement des sols, la recherche bibliographique a été étendue au domaine des ciments et des bétons, afin de connaître l'effet des composés cités auparavant sur les ciments ou les bétons. Enfin, ce chapitre décrit les différentes procédures expérimentales disponibles pour évaluer l'efficacité d'un traitement.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des différents matériaux utilisés pour l'étude, ainsi que la démarche expérimentale suivie lors de ce travail. Ces choix seront mis en perspective avec les objectifs de ce travail définis dans le chapitre bibliographique. Une attention particulière a été portée au choix des concentrations des différents éléments étudiés, les dosages retenus sont représentatifs, pour le dosage minimum de la moyenne retrouvée dans les sols français, pour le dosage maximum de la concentration forte retrouvée dans les sols français.

Le troisième chapitre a pour objectif de présenter des données qualitatives et quantitatives de l'impact d'un certain nombre de composés chimiques sur l'efficacité d'un traitement à la chaux et / ou au liant hydraulique. Ces travaux permettront de déterminer si ces composés peuvent être considérés comme des perturbateurs du traitement des sols. Par ailleurs, ce chapitre a pour objectif de tenter d'identifier un seuil maximal admissible pour chacun des éléments considérés.

Enfin, le dernier chapitre a pour but l'étude de l'effet de plusieurs paramètres de conditions de cure sur l'aptitude des sols vis-à-vis d'un traitement. L'influence de différents paramètres d'essais (température, humidité lors de la cure, et temps de cure avant immersion) sur la perturbation d'un des sols modèles retenus pour cette étude traité à la chaux et au liant hydraulique contenant soit un sulfate, soit un sulfure a ainsi été évaluée.

CHAPITRE 1. LE TRAITEMENT DES SOLS : CONCEPTS DE BASE

L'évolution actuelle du contexte socio-économique dans le domaine de la réalisation des ouvrages en terre (terrassement) est marquée par la nécessité de réutiliser au maximum les matériaux situés dans l'emprise des projets, même ceux dont les caractéristiques de mise en œuvre, notamment mécaniques, sont très faibles. Il est cependant possible de les améliorer par un traitement à la chaux et/ou au liant hydraulique, et ainsi permettre leur réutilisation. Dans certains cas, ce type de traitement est inefficace en raison de la présence dans le sol de composés perturbateurs. Compte tenu des enjeux, il est nécessaire d'améliorer les connaissances dans le domaine du traitement de ce type de sol afin de parvenir à les traiter efficacement et ainsi permettre leur utilisation en terrassement.

Ce premier chapitre a pour objectif de présenter l'état des connaissances sur le traitement des sols compactés et, plus particulièrement, sur les éléments perturbateurs de la prise, ainsi que les conditions défavorables à la prise lors du traitement des sols. Pour ce faire, on décrira dans une première partie les principales caractéristiques et la classification des sols utilisée dans le domaine des terrassements. Dans une seconde partie, on détaillera les connaissances sur le traitement des sols. Puis, les principaux perturbateurs du traitement des sols ainsi que leur mode d'actions seront présentés. Et enfin, dans une dernière partie, on présentera l'état des connaissances sur la mise en évidence de la perturbation du traitement des sols à partir d'essais de laboratoire.

1. CLASSIFICATION DES SOLS EN TERRASSEMENT

Le sol est un complexe multiphasique, en général il est formé des phases suivantes :

- solide : des grains solides (les minéraux ou fragments de roche) ;
- liquide : de l'eau ;
- gazeuse : de l'air.

L'assemblage des grains solides forme le squelette du sol. Autour de ce squelette, les vides ou les pores peuvent être remplis par de l'eau ou de l'air. Si l'eau remplit tous les pores, le sol est saturé.

Cette partie va présenter les principaux constituants des sols, ainsi que la classification des sols dans le domaine des terrassements.

1.1. Les principaux constituants d'un sol

1.1.1. Les minéraux

Les minéraux constituant les sols sont principalement des silicates (le quartz, les argiles, les feldspaths, les micas), des carbonates, des oxydes et des hydroxydes métalliques.

Les minéraux silicatés représentent 95 % des constituants de l'écorce terrestre (Pomerol et Renard, 1995). Le quartz est une forme cristalline très commune de la silice (SiO_2). Sa dureté et sa très faible solubilité en font un élément résistant à l'altération, il est donc très présent dans les sols. On peut également retrouver dans les sols d'autres minéraux appartenant à la famille des silicates : feldspaths, silico-aluminates potassiques, sodiques, ou calciques de la famille des tectosilicates, ou micas, de la famille des phyllosilicates, minéraux plus sensibles à l'altération qui sont donc moins présents dans les sols. Les argiles sont issues de la dégradation de ces minéraux suite à l'altération. Elles appartiennent à la famille des phyllosilicates. Ces minéraux argileux sont caractérisés par leur structure en feuillets. Le réseau cristallographique des phyllosilicates est basé sur un assemblage de tétraèdres (SiO_2), chaque tétraèdre partageant trois sommets avec les tétraèdres voisins. L'ensemble des sommets partagés constitue un assemblage plan hexagonal. Le sommet du tétraèdre qui n'est pas dans le plan est partagé avec un octaèdre $\text{Al}(\text{OH})_6$. C'est l'association de couches tétraédriques (T) et de couches octaédriques (O) qui constitue le motif (ou feuillet) du réseau cristallin de chaque argile (Caillère et Hénin, 1963).

On distingue ainsi deux types de structures.

- La structure T O : le feuillet est constitué d'une couche de tétraèdre associée à une couche d'octaèdres. Son épaisseur est de 7 Å. Chaque feuillet est relié à un autre feuillet par l'intermédiaire des liaisons labiles de type hydrogène. Cette structure est celle de la famille de la kaolinite.
- La structure T O T : elle correspond à une couche d'octaèdres encadrée par deux couches de tétraèdres. L'épaisseur du feuillet est de l'ordre de 10 Å. Les

couches tétraédriques peuvent présenter une substitution partielle des atomes de silicium par des atomes d'aluminium. Il peut également avoir une substitution des atomes d'aluminium des couches octaédriques par des atomes de magnésium voire de fer. Dans ce cas, les feuillets présentent un déficit en charges positives. Ce déficit est compensé par des cations dits compensateurs (Ca^{2+} , Na^+) qui viennent se loger sur les surfaces basales ou au sein même de l'espace interfoliaire, espace séparant deux triplets consécutifs T O T. Ces cations interfoliaires ont la particularité de pouvoir être solvatés par des molécules d'eau qui provoquent le gonflement du cristal. Il existe trois groupes d'argile T O T, la smectite, la vermiculite et l'illite.

Il existe une grande variété de minéraux non silicatés. Par exemple, les carbonates sont abondants dans les roches sédimentaires (la calcite CaCO_3 , l'aragonite CaCO_3 , la dolomite $(\text{Ca}, \text{Mg}) (\text{CO}_3)_2$). Les roches carbonatées peuvent se former par précipitation du carbonate de calcium, par action des êtres vivants, ou par érosion puis dépôt.

Les minéraux accessoires sont des minéraux présents en faible pourcentage dans les sols et n'interviennent pas dans leur définition. Parmi ces nombreux minéraux non silicatés et accessoires, on peut citer :

- les chlorures : formés par évaporation en milieu marin ou lacustre, ils peuvent constituer une grande part de certaines roches sédimentaires, les évaporites (halite ou NaCl) ;
- les sulfures : la pyrite FeS_2 , elle peut être d'origine sédimentaire, magmatique, métamorphique ou retrouvée dans des filons hydrothermaux ;
- les sulfates : l'anhydrite (CaSO_4) et sa forme hydratée, le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

1.1.2. La matière organique

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

rapidement minéralisés (quelque mois) dans les conditions de surface, ils peuvent se conserver plus longtemps par exemple dans les tourbières.

1.1.3. L'eau

L'eau contenue au sein d'un sol se décompose en (figure 1.1) :

- eau de constitution entrant dans la composition chimique des minéraux du sol ;
- eau liée ou absorbée ;
- eau interstitielle se décomposant en eau capillaire et en eau libre.

L'eau interstitielle se présente sous forme d'eau libre lorsque le sol est saturé et se trouve dans la nappe phréatique. Cette eau est soumise aux lois d'écoulements hydrauliques. L'eau interstitielle est sous forme d'eau capillaire au dessus de la nappe. L'eau capillaire est en équilibre, d'une part sous l'action de la gravité et, d'autre part, sous l'action des forces de tensions qui se développent à l'interface eau/air.

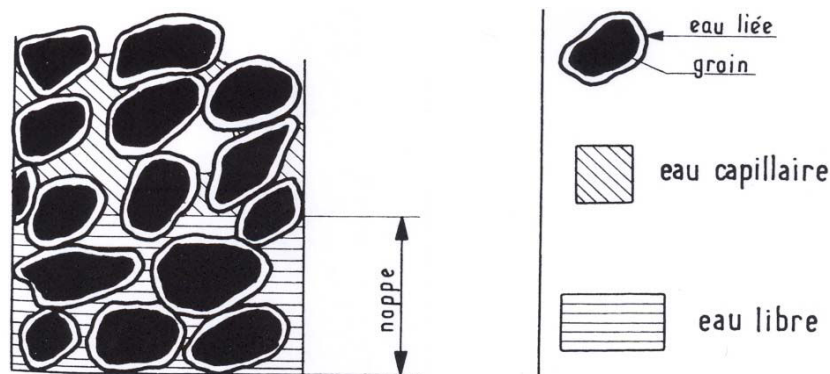


Figure 1.1 : États de l'eau dans les sols, d'après Philipponnat (2005).

Des substances minérales solubles peuvent être présentes dans l'eau contenue dans les pores du sol. On peut ainsi retrouver des sulfates, provenant de la dissolution du gypse ou de l'oxydation des pyrites. On parle de sulfates solubles ou solubilisés. On emploie encore le terme d'eau séléniteuse pour qualifier une eau riche en sulfates solubles. On peut également retrouver des fertilisants chimiques, pouvant influencer le comportement des argiles (Blot, 1993; Sridharan et *al.*, 1981).

1.1.4. Conclusion

Les constituants des sols sont donc variés, ce qui conduit à l'existence de nombreux types de sols, sols qui vont présenter des comportements géotechniques très différents. Pour faire face à cette diversité, de nombreux systèmes de classification ont été élaborés pour

identifier des groupes de sol ayant des comportements voisins en vue de leur utilisation dans un contexte particulier. Dans le domaine des terrassements, la classification du Guide Technique de Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR, LCPC-SETRA, 1992) a été élaborée. Son but est de prévoir le comportement des sols à travers la mesure de différents paramètres d'identification et d'état, et ainsi de pouvoir mieux appréhender leur comportement a priori lors de la réalisation d'un chantier. Cette classification va être décrite dans le prochain paragraphe.

1.2. La classification du guide technique de réalisation des remblais et des couches de forme GTR

Le guide GTR classe les matériaux susceptibles d'être utilisés pour la réalisation de remblais ou de couches de forme. Lors de travaux de terrassements, les matériaux naturels sont rencontrés essentiellement sous deux formes : une forme rocheuse, massive, nécessitant une forte énergie pour les désagréger, et une forme meuble, facile à extraire. Cette étude s'intéresse en particulier aux sols meubles pour lesquels la classification GTR a été élaborée. Cette classification vise en premier lieu à déterminer la nature du sol en fonction de certains paramètres de nature : la granulométrie et l'argilosité (cf. figure 1.2). Pour les sables, les sables argileux et les marnes, l'argilosité est déterminée par la valeur de bleu du sol (NF P 94-068). Pour les sols fins, leur argilosité est mesurée par l'indice de plasticité (XP P 94-512-12). Dans un deuxième temps, les sols sont ensuite classés selon leur état hydrique, de l'état très sec à l'état très humide. Une fois les sols classés suivant leur nature et leur état hydrique, le GTR fournit les recommandations pour l'utilisation de ces sols en remblais et en couche de forme, suivant les conditions météorologiques rencontrées. Une fois ces recommandations faites et selon la classe de la partie supérieure de terrassement, le GTR préconise notamment une épaisseur de couche de forme, et l'énergie de compactage à apporter suivant les types d'engins envisagés sur le chantier.

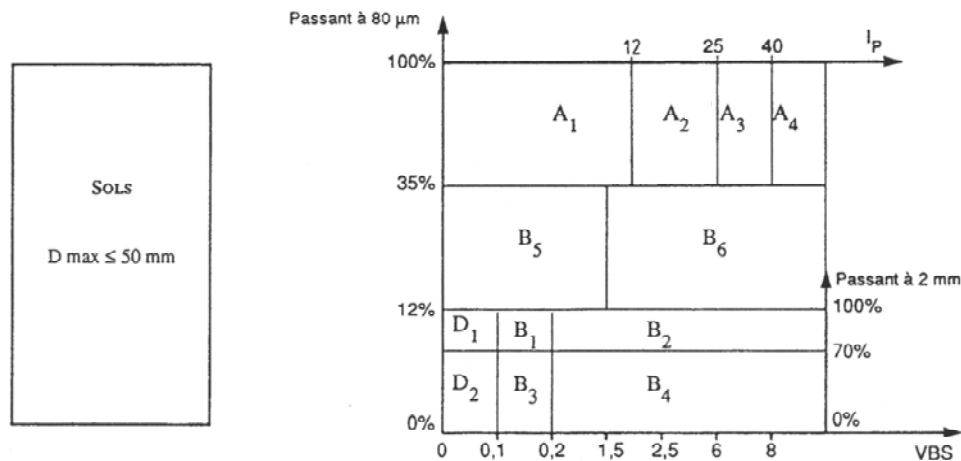


Figure 1.2 : Classification des matériaux selon leur nature, GTR (LCPC-SETRA, 1992).

1.3. Conclusion

Les sols possèdent des comportements différents suivant leur nature et leur état hydrique. Pour mieux appréhender le comportement des sols en terrassement, ils ont été classés à partir de l'identification de différents paramètres qui reprend de manière simplifiée les caractéristiques des sols et illustre leur complexité et diversité. Le GTR donne des recommandations pour pouvoir utiliser tel ou tel sol en remblais ou en couche de forme. Mais certains sols sous certaines conditions sont exclus en l'état par le GTR pour les travaux de terrassement. Par exemple, un sol de type A2 humide est difficile à mettre en œuvre en raison de ses caractéristiques mécaniques faibles. C'est la raison pour laquelle une des solutions préconisées par le GTR est de traiter ces sols à la chaux et / ou au liant hydraulique. Dans la partie suivante, le traitement à la chaux et au liant hydraulique va être plus précisément décrit.

2. LE TRAITEMENT DES SOLS EN TERRASSEMENT

Il existe plusieurs techniques permettant de valoriser les sols possédant des caractéristiques médiocres. Il s'agit de la stabilisation :

- mécanique (densification par compactage, préchargement, ...) ;
- hydraulique (drainage, rabattement de la nappe, ...) ;
- électrique (électro-osmose) ;
- thermique (congélation, cuisson, ...) ;
- chimique (ajout de produits : chaux, ciment, ...).

Ces techniques permettent de densifier le sol, de réduire la teneur en eau, de modifier la fraction argileuse, ou de changer le comportement du sol par traitement. Une méthode mixte consistant à stabiliser le sol par une technique physico-chimio-mécanique va être développée dans les prochains paragraphes. Nous détaillerons dans une première partie le compactage des sols traités, puis la deuxième partie sera consacrée au traitement à la chaux, dans une troisième partie, le traitement au liant hydraulique sera présenté, et enfin, nous donnerons des exemples d'autres traitements chimiques.

2.1. Le compactage des sols

Le compactage est la densification des sols par application d'énergie mécanique, il vise à améliorer les propriétés géotechniques des sols. Il permet l'amélioration de la résistance, la diminution de la déformabilité ainsi qu'une réduction de la perméabilité. Il peut ainsi réduire ou éliminer le risque de tassement, également augmenter la stabilité des talus, mais aussi améliorer la capacité portante. Le compactage permet aussi de limiter les variations de volumes indésirables causés, par exemple, par l'action du gel, par le gonflement et par le retrait du sol, ou bien de prévenir la liquéfaction des sols.

La densité obtenue après compactage dépend de la teneur en eau du sol. En effet, la masse volumique sèche du sol augmente avec la teneur en eau jusqu'à un optimum, puis décroît avec l'augmentation de la teneur en eau. Sur le chantier, il est important de connaître cet optimum pour obtenir des sols suffisamment denses. C'est pour cette raison, que dans les années 1930, les principes fondamentaux du compactage des sols ont été donnés par R. Proctor. Il construisait alors des barrages pour l'ancien Bureau de l'Aqueduc de Los Angeles ; il a alors exposé les principes du compactage dans une série d'articles (Engineering News Record). L'essai de compactage qu'il a mis au point s'appelle l'essai Proctor. Le compactage est fonction de quatre paramètres : la masse volumique du sol sec (ρ_d), la teneur en eau (w), le compactage (énergie et mode), et le type de sol dont l'influence est illustrée par la figure 1.3.

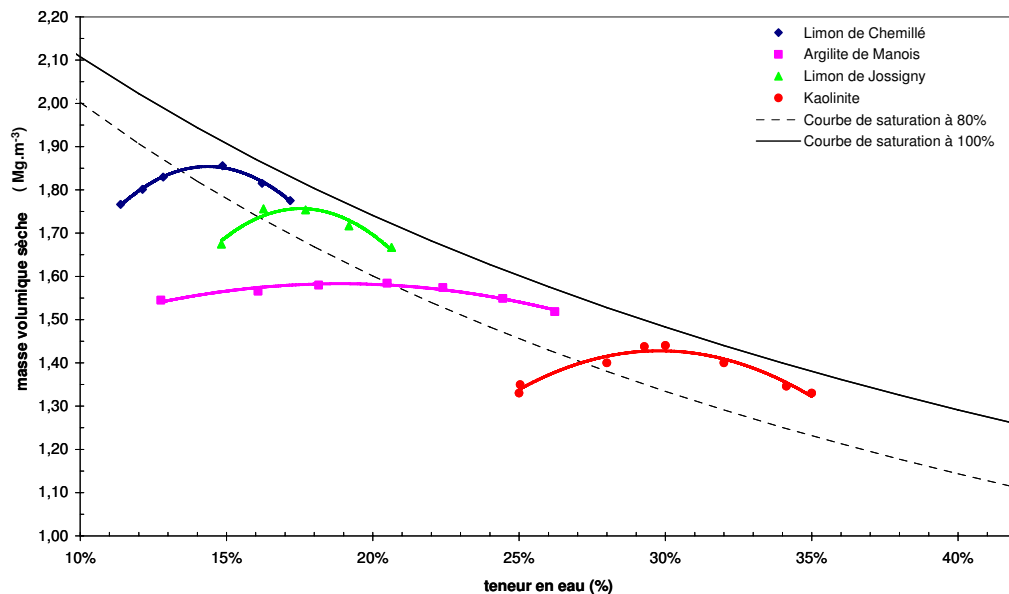


Figure 1.3 : Exemple de courbes de compactage suivant la nature du sol, Le Borgne (2006).

Le traitement des sols, par exemple à la chaux et / ou au liant hydraulique, va pouvoir modifier l'optimum Proctor du sol. Cette modification de comportement au compactage du sol traité va être détaillée dans les prochains paragraphes.

2.2. Le traitement des sols à la chaux

La technique du traitement des sols à la chaux est utilisée en France depuis les années 1960. Dans un premier temps, elle a essentiellement intéressé la réutilisation en remblais des sols sensibles et / ou humides. Par la suite, la technique s'est étendue à la réalisation des couches de formes, en commençant par la réutilisation des sols fins, puis progressivement une gamme de plus en plus étendue de matériaux. Dès 1972, un premier guide est élaboré par le LCPC et le SETRA : « Recommandation pour le traitement des sols fins à la chaux ». Le guide technique GTS « Traitement des Sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques » est le guide le plus complet en la matière (LCPC-SETRA, 2000). Ce guide complète le guide des terrassements routiers (LCPC-SETRA, 1992).

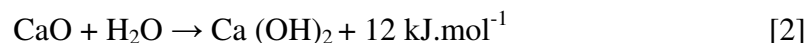
Dans cette partie, les différents types de chaux utilisés lors de travaux de terrassement seront décrits, puis le principe d'action de la chaux sur les sols sera détaillé.

2.2.1. Les différents types de chaux

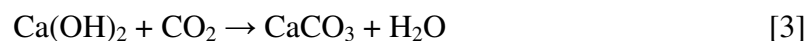
La chaux vive est obtenue par calcination de carbonate de calcium (CaCO_3), à une température supérieure à 900°C . Celui-ci est dissocié à cette température en oxyde de calcium, ou chaux vive, et en gaz carbonique (cf. équation [1]).



La chaux vive réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de chaleur puis se transforme en chaux éteinte. La chaux éteinte est employée dans de nombreux domaines tels que le bâtiment, la sidérurgie, la dépollution, ... La chaux vive est éteinte par immersion ou par aspersion. La réaction d'extinction est la suivante :



La chaux vive CaO peut, après hydratation par l'humidité ambiante (Ca(OH)₂), se carbonater sous l'action du CO₂ atmosphérique (cf équation [3]).



Les caractéristiques des chaux aériennes vis-à-vis du traitement des sols dépendent de la forme sous laquelle elles sont utilisées, diverses formes de chaux étant utilisées dans le traitement des sols. Les formes les plus communes sont la chaux vive et la chaux éteinte. Une chaux est définie par plusieurs paramètres : sa teneur en chaux libre exprimée sous forme de CaO, sa teneur en MgO, sa granulométrie définie par le tamisat à 2, 0,2 et 0,08 mm et enfin sa réactivité déterminée par l'essai de « réactivité à l'eau » définie par la norme NF P 98-102. Elle exprime la rapidité d'action d'une chaux lors de son emploi et est essentiellement fonction de la surface de contact entre la chaux et le corps avec lequel elle réagit. Elle dépend donc de la surface spécifique et de la finesse de la chaux.

Les principales propriétés de la chaux sont récapitulées dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Principales caractéristiques de la chaux.

Type de chaux	Chaux vive	Chaux éteinte
Formule	CaO	Ca(OH) ₂
Couleur	blanche	blanche
Structure cristalline	cubique	système pseudo-hexagonal
Densité relative	3,4	2,2
Masse volumique apparente (g.cm ⁻³)	0,80 à 1,10	0,40 à 0,64
Masse molaire (g.mol ⁻¹)	56,08	74,10
Solubilité à 20°C	0,125	0,165
pH de la solution saturée à 25°C	12,45	
Réactivité à l'eau	Mesurée par l'essai NF EN 459-2	-

2.2.2. Principe d'action de la chaux

L'ajout de chaux provoque une augmentation de la quantité d'ions Ca^{2+} et OH^- en solution dans le sol. Ces ions vont réagir avec les constituants du matériau, modifiant ainsi leurs caractéristiques par différents processus physico-chimiques. On distingue classiquement les actions à court terme et à long terme.

o Actions à court terme

L'ajout de chaux au sein du sol provoque une modification de sa teneur en eau. Le choix du type de chaux dépend de la teneur en eau du sol : si le sol est trop humide, la chaux vive (CaO) est utilisée car elle augmente la teneur en solide du sol, d'où une diminution relative de la teneur en eau, elle consomme de l'eau lors de son hydratation (cf équation [2]), et enfin, elle favorise l'évaporation par la chaleur de la réaction d'hydratation exothermique. Il est admis que chaque centième de chaux vive introduite dans les sols permet de réduire d'environ un centième la teneur en eau (Schaeffner et Philippe, 1970). Si le sol est à teneur en eau Proctor, la chaux éteinte, Ca(OH)_2 , pourra être utilisée. L'ajout de matière sèche provoque ici une faible diminution de la teneur en eau.

L'ajout de chaux dans un sol, par hydratation, entraîne l'augmentation des ions Ca^{2+} et OH^- dans le sol. Des échanges cationiques se produisent alors entre les ions absorbés à la

surface des particules argileuses et les cations apportés. La capacité d'échange cationique (CEC) est donc modifiée. La modification de la CEC et l'augmentation de la concentration en électrolytes ont pour effet de réduire la taille de la double couche des particules argileuses et ainsi de réduire les forces de répulsion entre elles. Celles-ci ont alors tendance à s'agréger : c'est le processus de floculation (Locat et *al.*, 1990).

Cette action entraîne une augmentation de la limite de plasticité s'accompagnant ou non d'une augmentation de la limite de liquidité (tableau 1.2). Cette évolution provoque un déplacement du domaine de plasticité vers les teneurs en eau plus importantes. Le décalage de l'indice de plasticité est lié à la quantité de chaux utilisée. L'évolution de la consistance favorise la granulation du sol lors du malaxage. Différents facteurs influencent cette granulation dont la nature du sol, la teneur en eau et le dosage en chaux.

Tableau 1.2 : Évolution de la limite de plasticité (w_p), de la limite de liquidité (w_L) et de l'indice de plasticité (I_p) d'une argile en fonction de la teneur en chaux ajoutée, d'après Rogers and Glendinning (1996).

	CaO (%)	w_p (%)	w_L (%)	I_p (%)
London clay Illite, kaolinite et smectite	0	19	52	33
	1	26	66	40
	2	36	66	30
	3	38	67	29
	7	39	65	26

Par ailleurs, le comportement lors du compactage d'un sol traité à la chaux est modifié, son aptitude à être compacté est généralement plus faible. L'optimum de compactage est décalé vers des teneurs en eau plus fortes et vers des densités de référence plus faibles (figure 1.4). La diminution de densité est due à la réorganisation des particules argileuses causée par le phénomène de floculation/agrégation. Dans le cas des sols argileux, l'allure générale de la courbe de compactage est aplatie traduisant une diminution de la sensibilité à l'eau du matériau. La modification du sol est importante dès l'ajout de chaux en faible quantité. La portance des sols est améliorée. Ainsi l'indice CBR qui permet de quantifier la portance est de 4 à 10 fois plus élevé que pour un sol non traité. Enfin, l'ampleur des modifications dues à la chaux dépend de la quantité utilisée. Il est ainsi admis que plus la quantité de chaux est importante, plus la teneur en eau optimale sera décalée vers les fortes teneurs en eau, et plus la densité sèche optimale sera faible.

Ces actions à court terme de la chaux permettent d'envisager l'utilisation de sols à l'état humide ou très humide, sols possédant une portance trop faible pour réaliser un chantier dans de bonnes conditions.

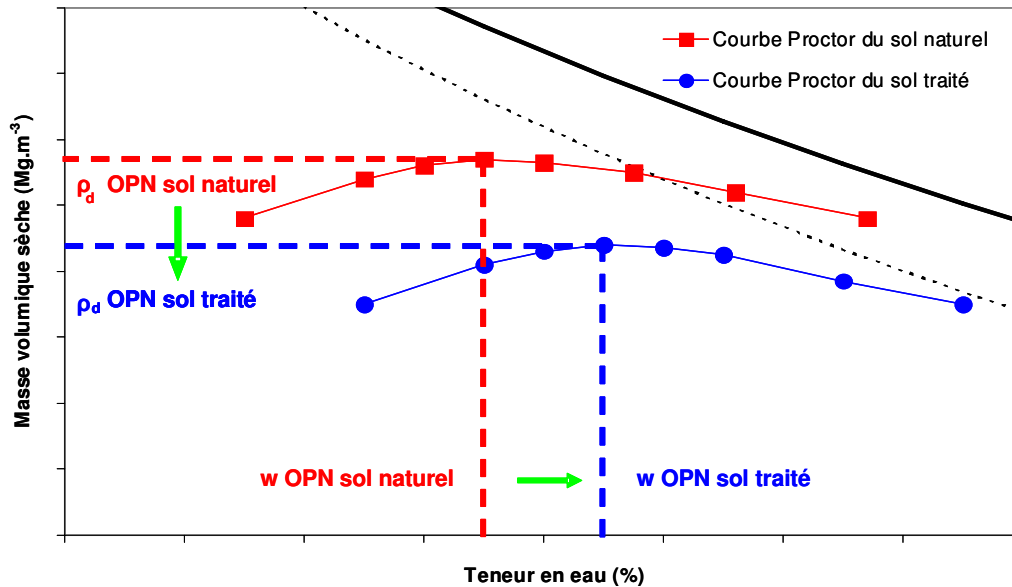


Figure 1.4 : Modification des caractéristiques de compactage d'un sol suite à l'ajout de chaux, d'après le GTS (LCPC – SETRA, 2000).

○ Actions à moyen et long terme

L'apport important d'ions OH^- dans le sol entraîne une augmentation du pH du sol jusqu'à une valeur proche du pH d'une solution saturée en portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, c'est-à-dire environ 12,4. Ce pH fort favorise la dissolution de la silice et de l'alumine contenues dans les particules de sol. Ces particules en solution réagissent avec le calcium pour former des produits cimentaires : des silicates de calcium hydratés, des aluminates de calcium hydratés, ou des aluminosilicates de calcium hydratés. Ces réactions se regroupent sous le terme de réactions pouzzolaniques. Ces réactions peuvent durer plusieurs mois, voire des années.

Une des conséquences majeures de l'ajout de chaux est une forte augmentation des caractéristiques mécaniques du matériau traité, notamment de la résistance à la compression simple et à la traction. À titre d'exemple, cet effet peut être visualisé notamment par la résistance à la compression simple notée R_c , de différents minéraux considérés individuellement, constituants essentiels des sols (figure 1.5). Bell (1996) présente le comportement mécanique caractéristique d'une kaolinite, d'une montmorillonite et de quartz en fonction de la quantité de chaux et du temps de cure. Sauf dans le cas de la montmorillonite traitée à un dosage supérieur à 4 %, l'ajout de chaux provoque une forte

augmentation de R_c . De plus, le résultat dépend du temps de cure, ce qui traduit bien le fait que les réactions pouzzolaniques se poursuivent au cours du temps.

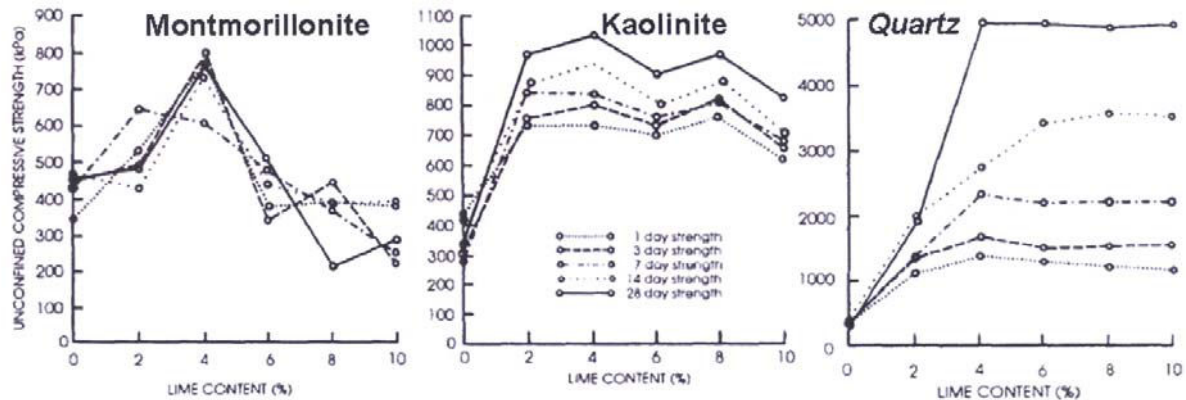


Figure 1.5 : Influence de la nature du minéral, de la quantité de chaux et du temps sur la résistance à la compression simple, Bell (1996).

Le traitement à la chaux permet aussi de réduire, voire de supprimer, le gonflement des sols argileux (p. ex. Rao et Thyagaraj, 2003). À titre d'exemple, Afès et Didier (2000) ont déterminé le potentiel de gonflement d'une argile traitée à deux pourcentages de chaux vive (3 % et 6 %). La figure 1.6 montre que le traitement à la chaux de l'argile réduit fortement le gonflement. De plus, les auteurs ont montré que plus le pourcentage de chaux introduit dans une argile est important, plus le gonflement final pour un même temps de cure diminue.

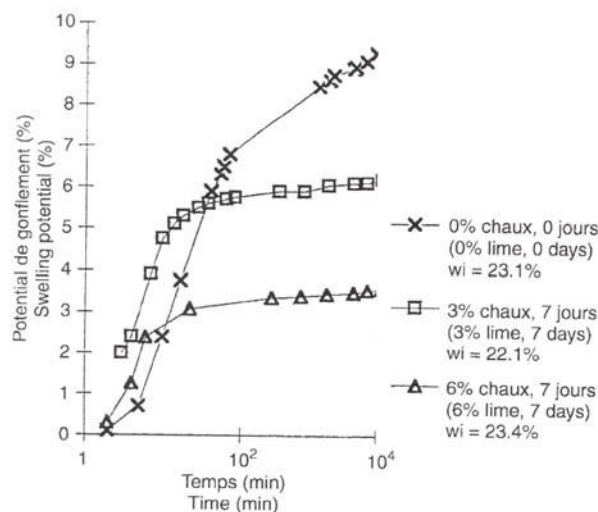


Figure 1.6 : Gonflement en fonction du temps d'une argile non traitée et traitée à 3 et 6 % de chaux, Afès et Didier (2000).

Les études sur la perméabilité des sols traités à la chaux sont très rares, et souvent ce paramètre n'est qu'un sujet annexe d'étude mécanique. Malgré ce manque d'étude, l'hypothèse la plus courante est de supposer que la perméabilité d'un sol traité est plus forte que celle d'un sol non traité, même s'il est admis qu'elle puisse baisser dans le temps suite à la formation des composés pouzzolaniques. Mais le peu de données disponibles montrent de grandes divergences. En effet, il est possible de trouver des cas où la perméabilité du sol traité est plus forte (Rajasekaran et Rao, 2002), des cas où elle est stable, et enfin, des cas où elle est plus faible. Des études ont montré que les conditions de compactage, influencent la perméabilité des sols traités (McCallister, 1990). En effet, pour une teneur en chaux donnée, les sols traités et compactés du côté sec présentent une perméabilité équivalente voire plus forte que celle des sols traités compactés à l'optimum. Au contraire, les sols traités et compactés du côté humide présentent une perméabilité plus faible que celle des sols traités compactés à l'optimum. Enfin, la figure 1.7, représentant la conductivité hydraulique en fonction de la densité sèche, montre que les sols traités à la chaux et compactés du côté humide peuvent présenter, malgré une densité plus faible, une perméabilité proche de celle des sols non traités (Cuisinier et Le Borgne, 2008).

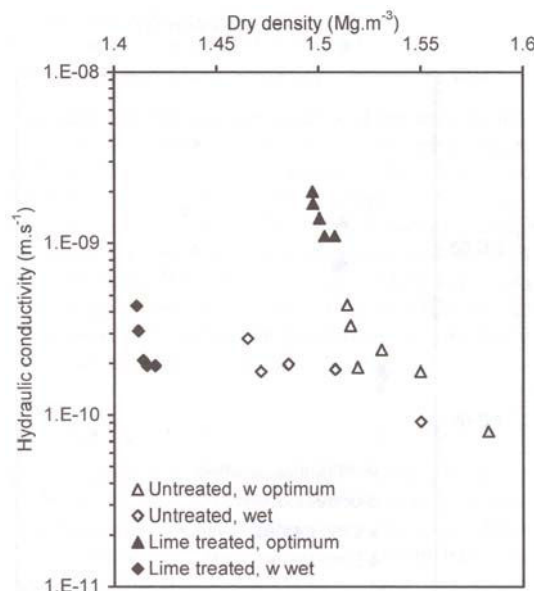


Figure 1.7 : Conductivité hydraulique en fonction de la densité de sols argileux traités ou non à la chaux, compactés à l'état optimal ou humide, Cuisinier et Le Borgne (2008).

2.3. Traitement des sols au liant hydraulique

Il fallut attendre la fin du XVIII^e siècle pour que la science et la technique naissante entrevoient le mécanisme de la prise et jettent les bases de l'industrie cimentière. Dès 1825, le ciment Portland artificiel, ainsi appelé car, après durcissement, son aspect rappelait celui de la pierre calcaire de l'île de Portland, était fabriqué industriellement en Angleterre et vers 1850 en France grâce aux travaux réalisés par Louis Vicat. Par la suite, ces liants ont été utilisés pour le traitement des sols, dès les années 1960 en France. Cette partie va décrire la grande diversité de types de liant hydraulique utilisés lors de travaux de terrassement. Dans une seconde partie, le principe d'action des liants hydrauliques sur les sols sera détaillé.

2.3.1. Les différents types de liant hydraulique

Un liant hydraulique est une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Il s'agit d'un mélange d'un ou plusieurs constituants qui présentent l'une ou plusieurs des propriétés suivantes :

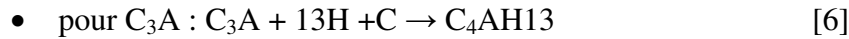
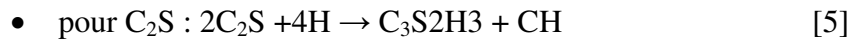
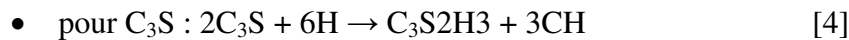
- des propriétés hydrauliques, ils forment par réaction avec de l'eau des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau ;
- des propriétés pouzzolaniques, ils ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables ;
- des propriétés physiques qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution du ressuage...)

Après avoir présenté les principales propriétés de ces constituants, nous allons les décrire plus précisément.

o Le clinker

Le clinker est un produit constitué principalement de silicates et d'aluminates de calcium anhydres, obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkérisation) (1450°C) d'un mélange dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile. Ces constituants anhydres formés lors de la clinkérisation sont une combinaison des éléments suivants : CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 et Al_2O_3 . On distingue : l'alite ou silicate tricalcique C_3S , la bélite ou silicate bicalcique C_2S , et la célite, mélange d'aluminate tricalcique C_3A et d'alumino-ferrite tétracalcique C_4AF .

L'hydratation du clinker donne des silicates de calcium hydratés de formule générale (CSH), des aluminates de calcium hydraté (CAH) et de la portlandite (CH). Les équations d'hydratation des principaux constituants du clinker sont :



La réaction du C_3A pur avec de l'eau est très violente et conduit à une prise éclair. Pour éviter ce phénomène, on ajoute du gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) au clinker. Le gypse va alors permettre de réguler la prise hydraulique. Le produit de l'hydratation du C_3A en présence de gypse est l'ettringite dite primaire, selon la réaction suivante :



o *Les autres constituants principaux des liants hydrauliques :*

De nombreux composés peuvent être présents dans les liants hydrauliques. On peut ainsi trouver des laitiers de hauts-fourneaux, qui sont des éléments résiduels issus de la production de fonte dans les hauts fourneaux. Avant d'être utilisés en cimenterie, ils sont moulus ou broyés. On utilise aussi des cendres volantes, produits de combustion du charbon brûlé sous forme pulvérisée dans les chaudières des centrales thermiques pour la production d'électricité. Certains liants contiennent également des pouzzolanes naturelles qui sont des matériaux issus des éruptions volcaniques. Elles sont constituées de tous les matériaux projetés lors d'une éruption volcanique : cendres, lapillis, ponces, et bombes. On peut également trouver des fumées de silice qui sont des particules très fines (environ 1 μm) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium. Les schistes calcinés sont aussi utilisés, produits dans un four spécial à une température d'environ 800°C. En raison de la composition des matériaux naturels et du procédé de production, le schiste calciné contient des phases du clinker (C_2S et CA). Il contient également de petites quantités de chaux libre et de sulfate de calcium. Les schistes calcinés finement broyés montrent de fortes propriétés hydrauliques et en plus des propriétés pouzzolaniques. Le calcaire est un autre constituant des liants hydrauliques. Il est obtenu par broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium ($CaCO_3$) supérieure à 75 %. Enfin, les constituants secondaires et adjuvants améliorent les propriétés physiques des ciments (ouvrabilité, rétention d'eau, ...).

Par exemple, le sulfate de calcium est généralement utilisé sous forme de gypse. Il est ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication, en vue de réguler la prise.

o *Normalisation (NF EN 197-1) :*

Les liants hydrauliques courants sont subdivisés selon la normalisation en vigueur en cinq types en fonction de leur composition :

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

Les liants hydrauliques routiers sont des liants hydrauliques destinés aux travaux de terrassement et routiers, notamment pour la réalisation d'assises de chaussées, de couches de forme et de terrassements. Ils sont conformes à la norme NF P15-108. Cette norme donne des exigences de qualité moins restrictives que celle des liants hydrauliques. En effet, par exemple, elle donne des exigences au niveau de la proportion des divers constituants avec des tolérances plus fortes.

2.3.2. Traitement des sols aux liants hydrauliques

Un liant hydraulique mélangé avec un sol va s'hydrater si la quantité d'eau est suffisante pour donner naissance à un certain nombre de constituants hydratés bien connus dans la chimie du ciment ou des liants hydrauliques (cf équations [4], [5], [6]). C'est la croissance des microcristaux formés et leur enchevêtrement progressif qui donne au mélange du liant avec le sol une certaine cohésion et une résistance qui croît avec le temps.

La vitesse et le taux d'hydratation dépendent principalement (Peltier, 1957):

- des constituants des liants hydrauliques ;
- de leur finesse ;
- de la teneur en eau ;
- de la température.

L'ajout d'un liant hydraulique dans un sol argileux entraîne, comme pour la chaux, mais à degré moindre, une diminution de la limite de liquidité s'accompagnant ou non d'une augmentation de la limite de plasticité (par ex. Osula, 1996). L'indice de plasticité diminue

d'autant plus que la quantité de liant est importante (figure 1.8). Certains auteurs précisent que l'indice de plasticité, dans les sols limoneux, augmente avec la quantité de liant puis diminue à partir d'un certain dosage (Sariosseiri et Muhunthan, 2009). Le comportement, lors du compactage d'un sol traité au liant hydraulique, est peu modifié comparé au traitement à la chaux (figure 1.9). L'optimum de teneur en eau est décalé vers les teneurs en eau plus fortes et la masse volumique sèche est équivalente ou légèrement plus faible, lorsque l'on traite un sol au liant hydraulique.

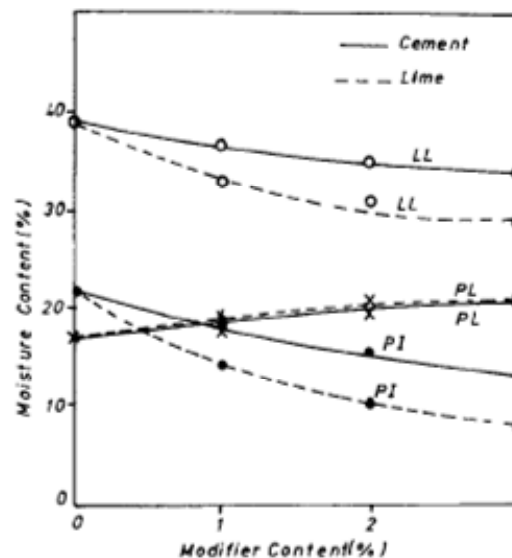


Figure 1.8 : Évolution des limites de plasticité (PL), de liquidité (LL), et des indices de plasticité (PI) d'un sol argileux traité soit à la chaux, soit au liant hydraulique en fonction du taux de liant ajouté, Osula (1996).

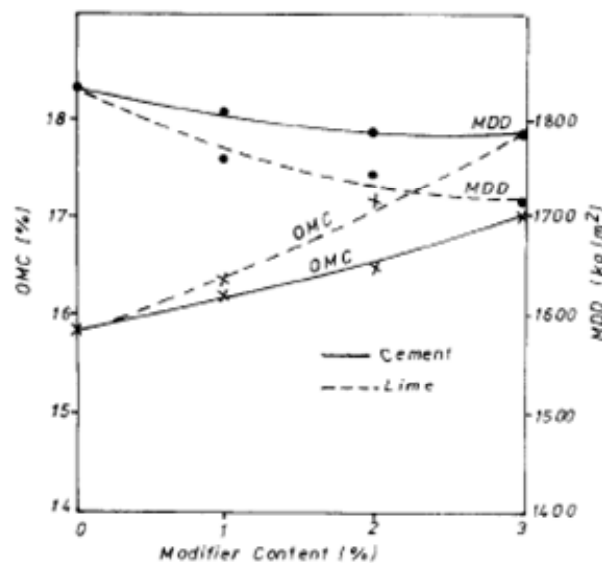


Figure 1.9 : Évolution de la teneur en eau optimale (OMC) et de la masse volumique sèche optimale (MDD) d'un sol argileux traité soit à la chaux, soit au liant hydraulique en fonction du taux de liant ajouté, Osula (1996).

Le traitement d'un sol au liant hydraulique conduit à une augmentation de la résistance à la compression simple du sol. La résistance après traitement est fonction du temps et du dosage en liant utilisé. À titre d'exemple, la figure 1.10 donne la résistance à la compression simple en fonction du temps d'un sable argileux traité à différents dosages en liant hydraulique de type CEM I. On y voit que le sol traité à 20 % de liant présente des résistances 4 fois plus fortes que pour le sol non traité.

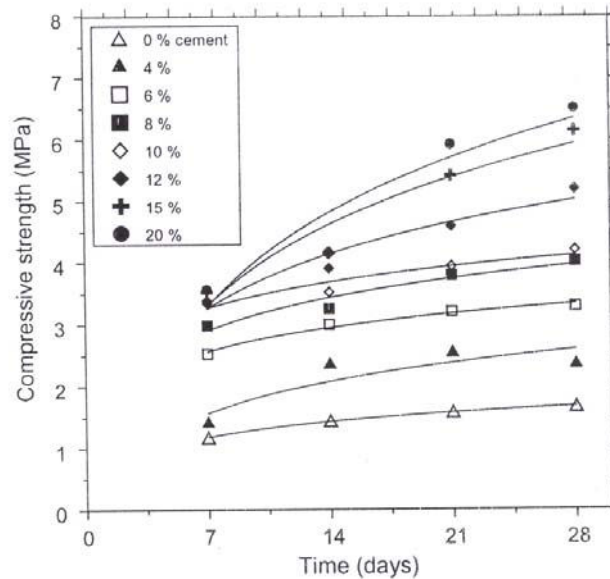


Figure 1.10 : Évolution de la résistance à la compression simple d'un sable argileux traité à différents pourcentage de liant hydraulique en fonction du temps, Bahar et al. (2004).

L'augmentation de résistance à la compression simple d'un sol traité va aussi dépendre du type de liant hydraulique utilisé. En effet, comme il a été dit précédemment, il existe de nombreux types de liants hydrauliques. La figure 1.11 représente la résistance à la compression simple en fonction du temps d'un sol amélioré avec différents types de liants, avec ou sans un prétraitement à la chaux. Le traitement à 7 % de ciment donne la résistance la plus faible. En effet, le sol traité au laitier et à la chaux, aux cendres et à la chaux, et enfin à la chaux et au ciment possèdent des résistances plus fortes.

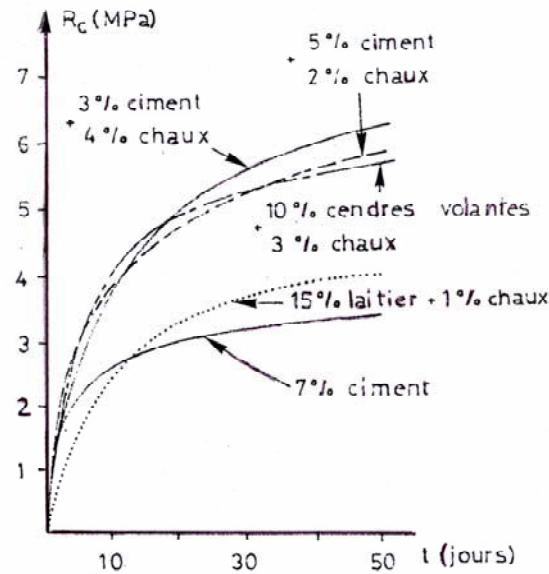


Figure 1.11 : Impact du type de traitement sur la résistance à la compression simple, Fontaine (1984).

Le traitement au liant hydraulique augmente aussi le module d'élasticité (par ex. Sariosseiri et Muhunthan, 2009). La figure 1.12 représente les modules d'élasticité à 30 % de la force de rupture en fonction du dosage de liant d'un sol fin traité au liant hydraulique de type CEM I, immergé ou non, et à 7 jours de cure. Le module d'élasticité augmente avec le pourcentage de liant, que les éprouvettes soient immergées ou non. Pour les éprouvettes conservées sans immersion, il augmente de l'ordre de 1,4 fois, lorsque l'on augmente le pourcentage de liant jusqu'à 10 %.

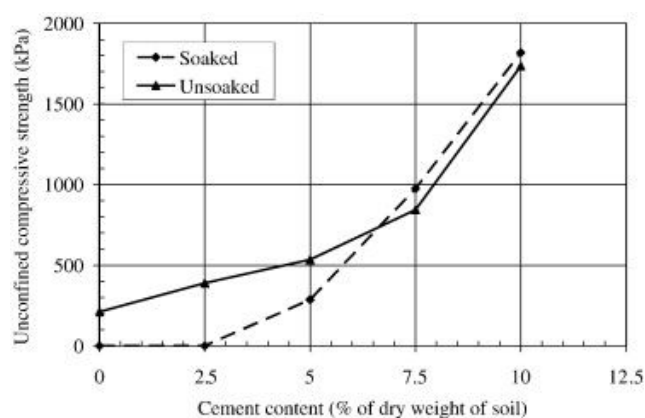


Figure 1.12 : Évolution du module d'élasticité à 30 % de la force de rupture, à 7 jours de temps de cure, d'un sol fin traité au CEM I, immergé ou non, en fonction du dosage en liant, Sariosseiri et Muhunthan (2009).

2.4. Autres traitements

Il existe d'autres méthodes de traitement, qui sont plus marginales et utilisées dans des cas particuliers. Cette stabilisation chimique consiste à ajouter un composé chimique au sol. Ce composé va soit permettre au sol d'augmenter ses caractéristiques mécaniques, soit d'éviter des gonflements trop importants. Cette stabilisation va également améliorer le comportement mécanique du sol.

Ingles et Metcalf (1970) ont montré que les sols peuvent être traités à l'aide d'acide phosphorique ou hydrofluorique. Les minéraux argileux réagissent avec l'acide phosphorique et l'action dispersive du phosphate sur les ions des argiles améliore la densification du sol. L'acide phosphorique donne de bons résultats sur les jeunes sols des régions volcaniques. Cette méthode est utilisée seulement sur les sols acides et est inefficace sur les sols alcalins. Ceci est dû au fait que l'action de ce liant dépend de l'attaque acide, dissolvant les minéraux argileux, et sur la réprécipitation en phosphate d'alumine hydraté. L'acide hydrofluorique peut stabiliser les sols, sauf les sols riches en aluminium. Cet acide va attaquer les silicates du sol et former des silicates de fluor insolubles et fortement résistants. Cette méthode, marchant bien en laboratoire, ne peut être appliquée en chantier car l'acide hydrofluorique est trop corrosif et coûteux.

À titre d'exemple, on peut citer les travaux de Falamaki et al. (2008) qui ont étudié le comportement mécanique d'un sable limoneux traité par de l'hexamétaphosphate de sodium. La figure 1.13 représente les résistances à la compression simple du sable limoneux traité à différents dosage d'hexamétaphosphate de sodium en fonction du temps. Dans cette étude, le traitement au dosage le plus élevé (5 %) donne les plus fortes résistances. Les résistances à la compression simple à 28 jours de cure sont de l'ordre 1200 kPa, 6 fois plus fortes que celles des sables non traités.

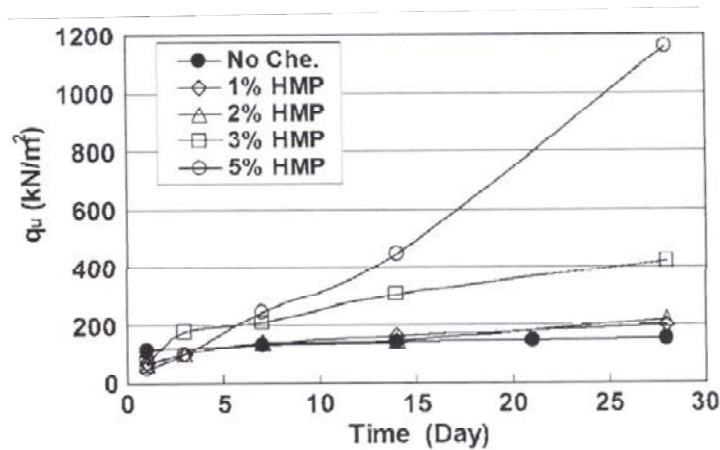


Figure 1.13 : Résistance à la compression simple q_u en fonction du temps de sable limoneux traité à différents dosages en hexamétaphosphate de sodium, Falamaki et al. (2008).

Les sels minéraux peuvent potentiellement être remplacés par des cations compensateurs initiaux des argiles. Ceci peut entraîner une réduction des gonflements des argiles lorsque du sodium est remplacé par du calcium (par exemple, Suratman, 1995). Hachichi et Fleureau, en 1999, ont étudié le gonflement d'une argile immergée dans des solutions chargées en différents sels. Les mesures de gonflement en fonction du temps d'une argile soumise à des solutions chargées en sels de chlorures sont sur la figure 1.14. Les auteurs montrent que l'ajout de sel de chlorure réduit les gonflements d'une argile de moitié lorsque le chlorure de sodium est utilisé. Singh et Das, en 1999, ont étudié les caractéristiques mécaniques de sols traités au chlorure de sodium. La figure 1.15 représente les résistances à la compression simple de différents sols en fonction du temps de cure, le sol A est le plus argileux et le sol C le moins. Ils sont mélangés à du chlorure de sodium. Les éprouvettes de sols sont laissées à l'air libre pendant toute leur cure. On voit que le traitement au chlorure de sodium améliore les résistances à la compression simple du sol le plus argileux (sol A). De plus, les auteurs précisent que cette augmentation de résistance dépend des conditions de cure, les meilleures caractéristiques sont obtenues quand le sol subit une cure à l'air libre.

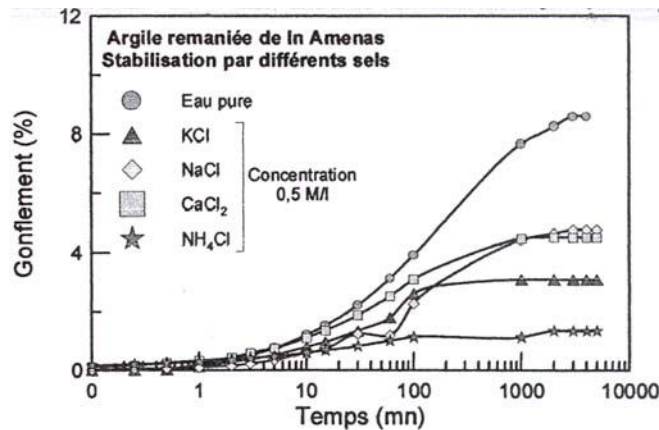


Figure 1.14 : Courbes de gonflement des argiles d'In Amenas en présence de différents sels, Hachichi et Fleureau (1999).

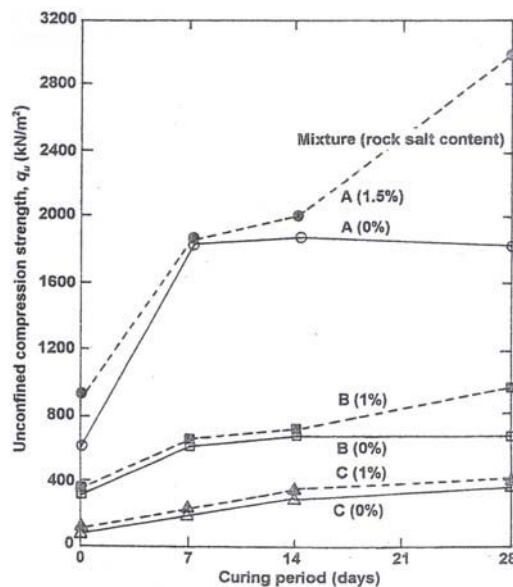


Figure 1.15 : Résistance à la compression simple en fonction du temps de différents sols mélangé à du chlorure de sodium, Singh et Das (1999).

Les polymères sont des résines qui confèrent au sol une cohésion plus forte par formation de gels qui cimentent les particules. Ces polymères peuvent diminuer les gonflements des argiles (Suratman, 1995). Santoni et al. (2001) ont étudié l'effet de l'ajout de certains agents chimiques, dont des polymères, sur les résistances à la compression simple d'un sable limoneux. Le tableau 1.3 représente les résistances à la compression simple (kPa) du sable limoneux stabilisé à l'aide de différents composés chimiques. Les résistances à la compression simple augmentent lorsque les polymères sont utilisés comme stabilisateur. Mais les résistances atteintes sont inférieures à celle du sable limoneux traité au ciment. La comparaison faite dans cette étude n'est pas tout à fait appropriée, car le pourcentage du ciment ajouté est relativement élevé.

Tableau 1.3 : Résistance à la compression simple R_c en fonction du type de liant utilisé, *Santoni et al. (2001)*.

	Sans traitement	Ciment 9 %	Polymère 1 2,5 %	Polymère 2 2,5 %	Polymère 3 2,5 %
R_c à 28 jours de cure (kPa)	4621	9562	7618	5900	7395

2.5. Conclusion

Le traitement des sols vise à améliorer les propriétés géotechniques des sols par l'ajout d'un composé chimique. Ce composé peut réagir avec les éléments du sol pour les modifier, mais aussi pour produire des nouveaux composés. Ces processus sont responsables de l'amélioration des performances mécaniques. Le recours au traitement des sols est très courant : en effet, en France, 30 à 50 % des sols fins sont traités. Pour l'essentiel, il s'agit de traitement à la chaux et/ou au liant hydraulique afin de les utiliser en remblais ou en couche de forme. Les autres stabilisateurs sont plus marginaux et ne sont employés que dans des cas très spécifiques.

Le traitement à la chaux et au liant est ainsi une solution courante d'amélioration des sols en terrassements. Dans certains cas, ce type de traitement est inefficace, et de nombreux cas d'échecs du traitement des sols ont été rapportés, les échecs étant très souvent le résultat de la présence dans le sol d'éléments perturbateurs. L'objectif de la partie suivante est de présenter l'effet de divers composés chimiques sur le traitement des sols.

3. LES DÉSORDRES RENCONTRÉS LORS DU TRAITEMENT DES SOLS À LA CHAUX ET AU LIANT HYDRAULIQUE

Le traitement des sols à la chaux et/ou au liant hydraulique est une technique qui permet d'améliorer les propriétés géotechniques à court et à long termes d'un grand nombre de sols, qui à l'état naturel sont inutilisables. Cependant, il existe des cas d'échecs du traitement des sols rapportés dans la littérature. Dans ces cas là, le sol traité peut ne pas développer de résistance mécanique ou présenter un gonflement important à la première humidification. La plupart du temps, ces échecs du traitement des sols sont imputés à des éléments chimiques, qualifiés de perturbateurs, contenus dans le sol. Plusieurs composés chimiques sont décrits comme nuisibles au traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques par les guides techniques français pour le traitement des sols (LCPC-SETRA, 2000). Mais leurs véritables

effets ne sont, pour la majorité des composés, que très peu décrits. On peut citer les composés suivants : les sulfates, les matières organiques, les minéraux argileux, les phosphates, les nitrates, les chlorures, etc..

L'objectif de cette partie est de synthétiser les informations disponibles dans la littérature sur ces éléments. Nous nous intéresserons successivement aux minéraux du sol, à la matière organique et aux substances minérales solubles. Pour élargir la recherche bibliographique sur les perturbateurs du traitement des sols, un dernier paragraphe présente l'influence de divers composés sur les ciments et les bétons, l'objectif étant d'évaluer l'effet potentiel de chaque composé.

3.1. Influence de la minéralogie des sols

Cette partie détaille l'effet sur le traitement de la taille, de la nature, et de la quantité des particules solides du sol, c'est-à-dire les minéraux.

3.1.1. Granulométrie

Les possibilités techniques de réaliser un mélange satisfaisant du sol avec le ou les produits de traitement sont notamment une fonction de la dimension des plus gros éléments du sol ($D_{\max}$). La teneur en particules fines ($<80\mu\text{m}$) du sol va permettre d'orienter en grande partie le choix du produit de traitement. En effet, un sol argileux sera plus particulièrement traité à la chaux, alors qu'un sable sera traité au liant hydraulique.

Le coefficient d'uniformité C_u est le rapport entre le D_{60} et le D_{10} qui sont respectivement les diamètres correspondant à 60 % et 10 % d'éléments de dimension inférieure. Ce coefficient va donner une information qualitative sur les valeurs de dosage qui seront nécessaires pour atteindre les caractéristiques mécaniques voulues. Plus ce coefficient est faible, plus la granulométrie du sol est homométrique. On parle alors de granulométrie serrée, le sol est creux. Quand les particules sont de même taille, elles ne peuvent se réorganiser sous l'effet du compactage, afin de densifier le sol. Au contraire, dans un sol à courbe granulométrique étalée, les petites particules viennent remplir les pores créés par les plus grosses. Dans un sol creux, il faut donc remplir les vides par le liant. La quantité de produit de traitement à prévoir peut être très importante pour pouvoir atteindre les performances visées, et devenir non viable économiquement (Peltier, 1957). Il est cependant possible de remplir au préalable ces vides par un autre matériau moins onéreux.

3.1.2. Les argiles

o *Influence de la nature des argiles*

Les résultats présentés par Bell (1996) mettent en évidence le comportement mécanique caractéristique de deux argiles, d'une kaolinite et d'une montmorillonite, et en comparant avec le quartz, traités à la chaux à différents pourcentages et à différents temps de cure (figure 1.5). Le traitement à la chaux augmente les résistances à la compression de tous les minéraux étudiés. Les résistances atteintes par la montmorillonite sont plus faibles que celles atteintes par la kaolinite. Les plus fortes résistances à la compression sont atteintes pour le quartz traité à la chaux. Croft (1967) et Molard et *al.* (1987) arrivent aux mêmes conclusions que Bell : les sols contenant de la kaolinite et de l'illite traités au liant hydraulique présentent des caractéristiques mécaniques plus fortes que les sols contenant une grande part d'argile expansive, de type montmorillonite ou palygorskite.

En 1969, Le Roux signale que les silicates apparus au cours du traitement sont de type silicates de calcium hydratés, ce qui confère d'excellentes caractéristiques mécaniques à l'argile essentiellement composée de kaolinite traitée à 5 % de chaux. De plus, il observe dans le cas des montmorillonites traitées à la chaux, la formation d'aluminate de calcium hydraté. Ces phases sont abondantes et bien cristallisées, mais les performances mécaniques de ces phases cimentaires sont inférieures à celles formées par la kaolinite traitée à la chaux (Le Roux et Rivière, 1969).

Ben Amor et *al.* (1997) proposent une autre explication aux phénomènes observés. La figure 1.16 montre que la quantité d'eau utilisée pour l'hydratation du ciment est moins importante dans le cas de la montmorillonite que dans le cas de la kaolinite. Ceci expliquerait la mauvaise stabilisation de la montmorillonite par le ciment. Cette perturbation de l'hydratation du ciment pourrait être due à la capacité de la montmorillonite à capter les ions Ca^{2+} . En effet, la figure 1.16 montre que la montmorillonite peut absorber plus d'ions Ca^{2+} que la kaolinite et que le liant hydraulique n'en apporte. La montmorillonite fixe donc les ions Ca^{2+} . Les ions ainsi captés ne sont plus disponibles pour assurer la cristallisation des composés d'hydratation du liant hydraulique.

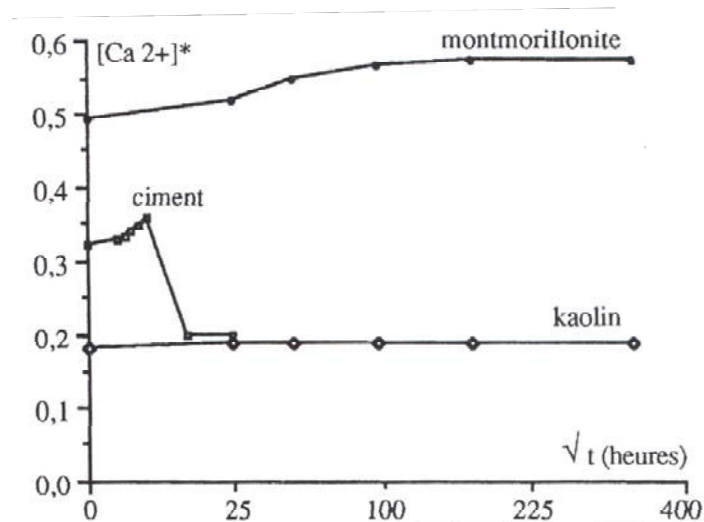


Figure 1.16 : Capacité de captation des ions Ca^{2+} par les argiles et quantité d'ion Ca^{2+} libérés par le ciment au cours du temps, Ben Amor et al. (1997).

o Influence de la quantité d'argiles

Une étude a été effectuée par Bird (2007), sur des mélanges entre limon et bentonite à différents pourcentages, traités à 1,5 % de chaux et à 6 % de liant hydraulique de type CEM II. On s'aperçoit (figure 1.17) que, pour tous les mélanges, les caractéristiques mécaniques s'améliorent avec le temps. L'ajout de bentonite, en faible quantité (5 %), au limon améliore les caractéristiques mécaniques du mélange. Lorsque la quantité d'argile est plus importante, les résistances mécaniques diminuent. Pour le mélange à 20 % de bentonite, elles sont inférieures à celle du limon seul traité.

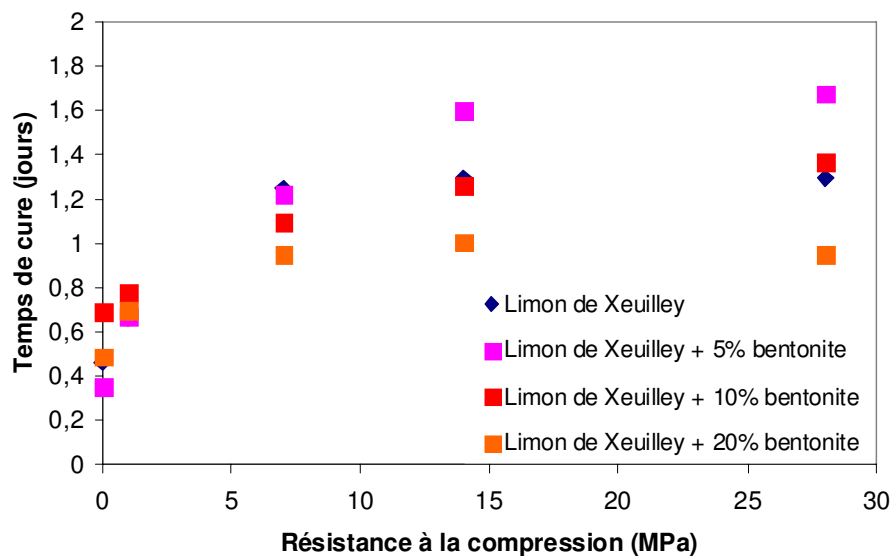


Figure 1.17 : Résistance en compression simple de mélanges limon + bentonite traités à 1,5 % de chaux et 6 % de CEM II, d'après Bird (2007).

Termini *et al.* (1998) donnent un seuil de « perturbation » pour la montmorillonite. Il indique ainsi qu'une quantité de 5 % de montmorillonite dans un sol ne posera pas de problème à un traitement de 20 % de liant hydraulique de type CEM II. Ce seuil augmente avec la quantité de liant utilisé, ainsi pour un traitement à 30 % de liant hydraulique, le seuil est de 10 % de montmorillonite.

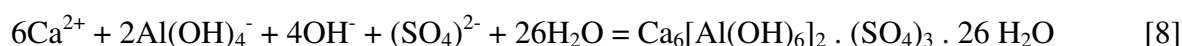
3.1.3. Les minéraux soufrés

Dans les sols et leurs environnements, ces composés peuvent se trouver sous plusieurs formes, en particulier sous forme de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou de pyrite (FeS_2). Dans certaines conditions, des composés soufrés peuvent se former et créer des dommages sur des ouvrages en terre traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (Mitchell, 1986 ; Hunter, 1988, ...). Ces dommages correspondent à des fissures et des gonflements, et sont causés par la formation de phases expansives telles que l'ettringite ($\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2 \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 26 \text{H}_2\text{O}$) ou de la thaumasite ($\text{Ca}_6[\text{Si}(\text{OH})_6]_2 \cdot (\text{SO}_4)_2 \cdot (\text{CO}_3)_2 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$). On parle de réaction de formation d'ettringite secondaire ou différée (Sherwood, 1962).

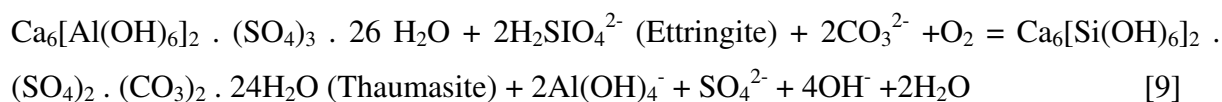
o Mécanisme de formation

Si le sol contient du sulfate, celui-ci peut réagir avec l'alumine, qui provient des liants ou de la dissolution des minéraux, la portlandite et l'eau pour former l'ettringite ou la thaumasite.

La formation de l'ettringite est donnée par la formule suivante :



Les minéraux d'ettringite peuvent croître tant que la température reste au dessus de 15°C. En dessous, l'ettringite se transforme en thaumasite. Ce changement s'effectue par substitution de l'aluminium par du silicium, et du sulfate par du carbonate :



La formation d'ettringite ou de thaumasite va provoquer un gonflement. Ce gonflement peut être expliqué non pas par une variation volumique du solide, mais par une variation volumique globale ou de l'enveloppe qui accompagne la cristallisation de l'ettringite ou de la thaumasite. Le volume de l'enveloppe de ces derniers est plus grand que le volume de l'enveloppe des réactifs initiaux. La pression créée peut atteindre des valeurs supérieures à la résistance en traction des sols traités. Plusieurs valeurs de pression de croissance cristalline

sont évoquées : 70 MPa (Dron et Brivot, 1989), 240 MPa (Ouyang *et al.*, 1987) ou 350 MPa (Mather, 1969).

Les différents éléments pour la formation de ces phases sont donc apportés par :

- la solubilisation de la silice et l'alumine des minéraux du sol par l'augmentation de pH due à l'introduction des liants ;
- la libération d'ion Ca^{2+} par les liants utilisés ;
- les composés soufrés présents dans le sol ou son environnement.

En présence d'eau, ces composés peuvent donc réagir pour former l'ettringite ou la thaumasite.

Les composés soufrés en excès, permettant la formation d'ettringite, peuvent avoir plusieurs origines :

- sulfate : par exemple gypse (Mitchell, 1986 ; Hunter, 1988 ...) ;
- sulfure et sulfite : par oxydation de la pyrite (Le Roux *et al.*, 1988 ; Thomas *et al.*, 1989 ; Rollings *et al.*, 1999).

o *Quantification du phénomène*

Comme il a été expliqué auparavant, la formation d'ettringite expansive va entraîner un gonflement des matériaux. Ainsi, Wild *et al.* (1999) ont étudié les gonflements de mélange kaolinite, chaux, gypse et laitier (figure 1.18). Les dosages en chaux variaient entre 2 et 6 % et pour les laitiers de 0 à 4 %. Les éprouvettes ont été, dans un premier temps, conservées à 30°C et 100 % d'humidité relative, puis immergées dans une eau à 30°C. Les auteurs montrent que le gonflement volumique augmente avec la quantité de sulfate présent dans le sol. Pour un mélange kaolinite + gypse traité avec 6 % de chaux, le gonflement volumique est multiplié par 5 lorsque l'on augmente la concentration de 1,8 % à 3,8 % de sulfate.

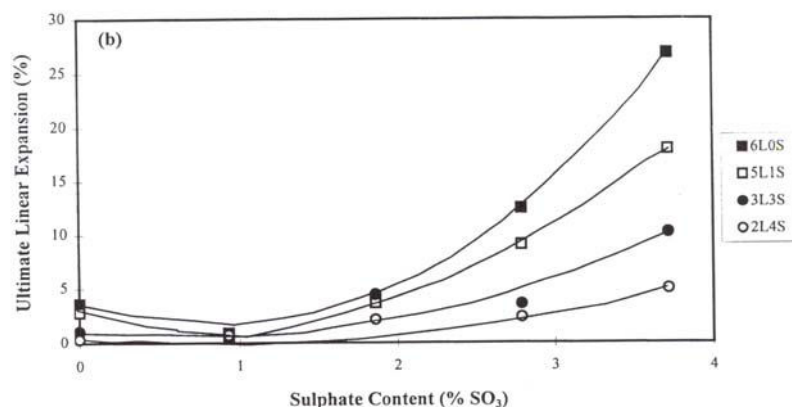


Figure 1.18 : Gonflement final après immersion en fonction de la teneur en sulfate d'un mélange kaolinite, chaux (L), laitier (S), et gypse à différent dosage (6L0S = 6 % de chaux et 0 % de laitier, ...), Wild et al. (1999).

o Discussion sur les seuils de perturbation

De nombreux auteurs ont proposé des seuils de teneur en soufre afin de se prémunir de ces perturbations a priori. Le tableau 1.4 présente une synthèse des différentes valeurs de seuil qu'il est possible de trouver dans la littérature. Les seuils de perturbation les plus faibles sont de l'ordre de 0,05 % de soufre par kilogramme de matière sèche alors que les seuils les plus forts sont de l'ordre de 1 % de soufre par kilogramme de matière sèche. Ils diffèrent d'un auteur à l'autre en fonction du traitement utilisé, du type de sol, et de la forme du soufre. Par exemple, les sols argileux semblent présenter des valeurs seuils plus faibles que les sols limoneux ou marneux. Dans tous les cas, il apparaît qu'une concentration de plus de 1 % de soufre retrouvée dans les sols semble systématiquement problématique pour le traitement à la chaux et / ou liant hydraulique. Sherwood (1962) note que la résistance à la compression simple d'un sable n'est pas affectée par la présence de sulfate (concentrations comprises entre 0,25% et 3%), alors que, dans un sol contenant des particules argileuses, une faible concentration en sulfate (0,2%) peut entraîner une baisse des résistances de l'ordre de 50%. On constate donc qu'il n'est pas possible de faire émerger un seuil unique. De plus, on peut ajouter que la notion de seuil peut être définie de plusieurs façons : d'une part, comme la concentration à partir de laquelle on détecte une influence mais le sol peut acquérir une certaine performance mécanique ; ou d'autre part, comme la concentration à partir de laquelle les performances mécaniques du matériau sont trop médiocres. Cela rend aussi l'analyse de ces problèmes compliquée, et il est ainsi difficile de faire émerger un seuil unique et équivoque.

Dans leur étude, Baryla et al. (2000) ont effectué des essais afin de mettre en évidence les phénomènes de gonflement liés à la présence d'ettringite. Des essais d'aptitude ont ainsi

été réalisés selon la norme NF P 94-100. Les résultats des essais d'aptitude se corrèlent bien avec les teneurs en sulfure et en sulfate. En effet, les zones avec plus de 1 % de soufre total sont considérées comme inaptées au traitement retenu par cet essai. Le traitement prévu (1 % de chaux et 8 % de liant hydraulique) est ainsi adapté pour les zones contenant moins de 0,1 % de soufre.

Tableau 1. 4 : Seuil de perturbation du traitement des sols par les composés soufrés.

Références	Stabilisants	Types de sol	Minéraux argileux	Forme du composé soufré	Seuil
Sherwood (1962)	Chaux	% d'argile différent			<0,25%
Dunlop et al. (1975)	Ciment				<0,09%
Kujala et al. (1986)	Ciment et gypse	Limon	Illite et chlorite	Gypse	<0,15%
Hunter (1988)	Chaux (4,5%)	Limon et argiles	Sepiolite, montmorillonite, kaolinite	Gypse	<1%
Raja (1990)	Chaux (5%)	Bentonite calcique		Sulfate de Na, K, Mg, Al	<0,05%
Perrin (1992)	Chaux	Argiles	Smectite, kaolinite, montmorillonite		<0,03%
Mitchell et Dermatas (1992)	Chaux	Sable + 30% d'argiles	Kaolinite	Sulfate de sodium et gypse	<0,3%
Rajasekaran (1994)	Chaux (3%)	Argiles marines	Montmorillonite, kaolinite, sepiolite	Sulfate de calcium et de sodium	<0,2%
Petry (1994)	Chaux				<1%
Sridhran et al. (1995)	Chaux (6%)	Black cotton	Montmorillonite	Sulfate de sodium	<0,5%
Rajasekaran et al. (1997)	Chaux (3%)	Argiles marines	Montmorillonite, chlorite, kaolinite, vermiculite	Sulfate de Na, K, Mg, Ca	<0,05%
McCallister et Tidwell (1997)	Chaux				0,01% à 0,5% risque faible à modéré
					0,5% à 1,2% risque modéré à sérieux
					>1,2% risque très sérieux
Wild et al. (1998)	Chaux (6%)	Kaolinite		Gypse	1%
Wild et al. (1999)	Chaux (6%) + scorie	Kaolinite	Kaolinite, micas	Gypse	1%
Baryla et al. (2000)	Chaux (1%) + Liant hydraulique routier (8%)	Marne (A2)		Pyrite et gypse	<0,1% adapté
					0,1 à 1% douteux
					>1% inadapté

Dans ce mémoire, on parlera de composés soufrés ou de soufre lorsque l'on regroupera par exemple les sulfures et les sulfates. Les teneurs en soufre seront exprimées en quantité de soufre par kilogramme de matière sèche.

3.1.4. Les micas

Dans certains chantiers de traitement, la présence de micas a été avancée pour expliquer des échecs. Il n'existe que très peu d'études sur l'influence de ces minéraux. Ainsi, Chopier (2007) a travaillé sur le traitement des micaschistes sériciteux. Trois micaschistes ont été traités avec différents liants hydrauliques routiers (dosage de 7 %). Seul un des trois micaschistes a donné des résultats satisfaisants pour envisager un traitement (tableau 1.5). Ces résultats ont été obtenus seulement avec un des trois liants utilisés pour cette étude, un liant hydraulique routier à base de clinker. Cette étude démontre l'importance du choix du type de liant vis-à-vis de l'aptitude d'un sol à un traitement.

Tableau 1.5 : Résultats de gonflements volumiques et de résistances à la traction indirecte de sols micacés, d'après Chopier (2007).

Formation	Classification GTR	Référence compactage		Liant	Gonflement volumique Gv%		Rtb (MPa)
		96% pd OPN (t/m³)	w _{OPN} %				
Micaschiste blanc	A1	1,71	15,2	7% ROC SC	effritements		
				7% CEM III	effritements		
				7% LIGEX 111	22,1	0,15	
Micashiste marron	A1	1,78	15	7% ROC SC	effritements		
				7% CEM III	effritements		
				7% LIGEX 111	3,9	0,38	
Micaschiste vendée	A1/B5	1,82	13,1	7% ROC SC	effritements		
				7% CEM III	effritements		
				7% LIGEX 111	19,3	0,39	

Une étude a été menée par Cabane (2005) sur le traitement des sols micacés. Il a cherché à mettre en évidence l'origine de la perturbation induite par les micas par comparaison avec le processus de stabilisation préalablement établi pour un sol de référence. Les caractéristiques mécaniques de trois sols micacés et du sol de référence ont été mesurées par des essais de résistance à la compression simple. L'auteur signale, que dans tous les cas, on constate une augmentation des résistances au cours du temps pour tous les sols étudiés traités 1 % de chaux vive et 5 % de liant hydraulique de type CEM II. À long terme, les schistes traités présentent les caractéristiques les plus faibles ; le gneiss possède un comportement intermédiaire entre les schistes et le sol de référence (tableau 1.6). L'auteur l'explique par la présence de paillettes de micas et de fragments de roches anisotropes qui induisent une microstructure favorisant un comportement fragile du matériau. Ces micas

forment des points de faiblesses mécaniques dans les ponts liants les grumeaux du sol les uns des autres.

Tableau 1.6 : Mesures de résistance à la compression simple d'un limon et de trois sols micacés traité à 1 % de chaux et 5 % de liant hydraulique, d'après Cabane (2005).

	Résistance à la compression simple à 180 jours de cure (MPa)
Limon de référence	5,1
Gneiss de Tulle	3,5
Micaschiste d'Angers	1,0
Micaschiste de St Maturin	1,8

3.2. Influence de la matière organique

Certaines matières organiques actives contenues dans un sol peuvent retarder la prise et le durcissement des ciments, surtout si elles contiennent certains composés azotés (Vénuat, 1980). L'influence de certains types de matières organiques est bien connue (Peltier, 1957). Les résistances à la compression simple à 7 jours obtenues sur un sol sablonneux traité au ciment Portland (10 %), auquel ont été ajoutées diverses matières organiques, sont indiquées sur la figure 1.19. Il suffit par exemple d'une faible teneur en sucre ou en glucose pour empêcher la prise du ciment. Par contre, la cellulose et la gélatine ne semblent avoir aucun effet sur le traitement aux concentrations étudiées. La résistance à la compression simple obtenue à divers âges sur le même sable traité en fonction de la teneur en glucose ajoutée au sol a également été étudiée. L'action du glucose est d'autant plus importante que sa concentration est forte. À faible dosage, l'auteur signale que la prise prend du retard et, une fois celle-ci amorcée, on retrouve au bout d'un temps plus ou moins long les caractéristiques mécaniques du sol de référence (7 jours pour 0,01 % et 28 jours pour 0,05 % de glucose). L'auteur indique que l'on observe les mêmes phénomènes pour les acides humiques.

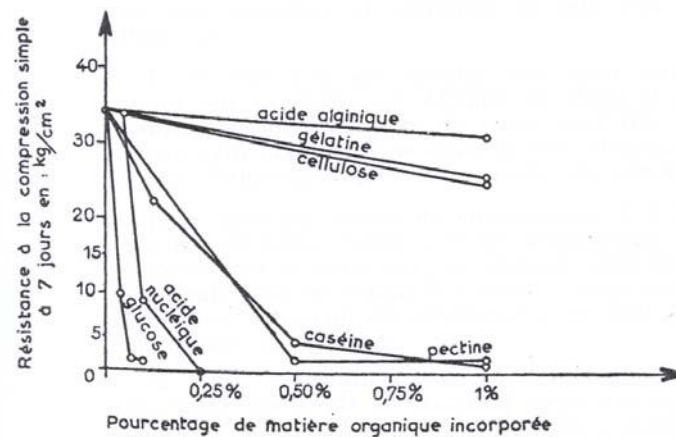


Figure 1.19 : Effets de l'incorporation au sol de diverses matières organiques à divers pourcentages (sol non traité = 0 % de matière organique incorporée), Peltier (1957).

Les acides organiques perturbent le traitement des sols, Kuno et *al.* (1989), Chen et Wang (2006). Les acides organiques (acide acétique, acides humiques, acides tanniques, ETDA) empêchent la prise parce que le pH est trop faible pour former les produits cimentaires (Tremblay et *al.*, 2002). Les huiles, les hydrocarbures non miscibles, et le sucrose retardent la prise en enrobant les particules de ciment (ralentissement de l'hydratation), et sans affecter les résistances (Tremblay et *al.*, 2002).

3.3. Influence des substances minérales solubles

Cette partie détaille l'influence de divers composés chimiques que l'on retrouve dans l'eau du sol vis-à-vis du traitement à la chaux et/ou au liant hydraulique.

3.3.1. Les sulfates solubilisés

La formation d'ettringite peut avoir pour origine un excès de soufre dû à des eaux séléniteuses. Cet enrichissement en sulfate peut avoir plusieurs origines, par exemple la dissolution de formation gypseuse (Rollings et *al.*, 1999). Les mécanismes de formation de l'ettringite sont les mêmes que dans le cas des sols contenant des minéraux soufrés (voir 4.1.3.).

3.3.2. Les fertilisants

Les fertilisants sont des substances utilisées en agriculture ou en horticulture pour enrichir un milieu de culture, comme le sol par exemple. Il n'existe que très peu d'études dédiées spécifiquement à l'impact des fertilisants sur le traitement des sols. Les effets du nitrate d'ammonium et du superphosphate, deux fertilisants courants ont été étudiés par Guichard (2006). Des mesures de gonflements volumiques et de résistances à la traction ont été réalisées sur un limon (tableau 1.7). Les données de cette étude montrent que les

résistances à la traction brésilienne baissent avec l'augmentation des concentrations en nitrates et phosphates.

Tableau 1.7 : Gonflements volumiques et résistances à la traction indirecte de mélange limon + fertilisants (nitrate et phosphate), Guichard (2006).

Sol	Polluant	Teneur (mg/kg)	Gonflement	R _{tb} (MPa)
Limon ADP	Aucun		0,7	0,32
	Nitrate	20	1,6	0,34
		60	0,2	0,30
		100	0,7	0,26
		500	1,2	0,28
		1000	1,5	0,23
		2000	0,0	0,29
	Phosphate	500	0,4	0,25
		1000	0,5	0,25
		2000	0,0	0,23

3.3.3. Les chlorures

Guichard (2006) a montré dans son étude que la potasse (KCl) n'influence pas la prise hydraulique (tableau 1.8). La présence de chlorure améliore l'efficacité du traitement à la chaux d'argiles (Rajasekaran et *al.*, 1997). En effet, la résistance à la compression simple d'un échantillon de sol traité à la chaux et au chlorure de sodium est triplée par rapport au sol non traité ; de même, pour un sol traité à la chaux et au chlorure de calcium, cette résistance est quintuplée. Il est délicat de conclure sur l'effet réel des composés chlorés sur le traitement à la chaux, étant donné que les résultats ont été obtenus sur un sol traité à la chaux auquel on a ajouté un composé chloré. La résistance à la compression simple du sol uniquement traité à la chaux n'est pas mentionnée.

Tableau 1.8 : *Gonflement volumique et résistance à la traction indirecte de mélange limon + fertilisants (potasse), Guichard (2006).*

Sol	Polluant	Teneur (mg/kg)	Gonflement volumique (%)	R _{tb} (MPa)
Limon ADP	Aucun		0,7	0,32
	Potasse	500	0,0	0,29
		2000	0,7	0,30

3.4. Influence de divers composés sur les ciments et les bétons

La quantité d'information disponible sur l'impact de chacun des composés cités auparavant sur le traitement est très variable, depuis une très grande quantité de données dans le cas du soufre, à une quasi-absence de connaissances sur l'impact potentiel des nitrates. Malgré ces lacunes de connaissances, tous les éléments précités sont répertoriés comme des éléments perturbateurs de prise dans des documents tels que le GTS (LCPC-SETRA, 2000). Dans ce contexte, et afin d'améliorer notre connaissance de l'action potentielle des composés peu connus dans le domaine du traitement des sols, la recherche bibliographique a été étendue au domaine des ciments et les bétons, afin de connaître l'effet des composés cités auparavant sur les ciments ou les bétons, et évaluer leur impact potentiel sur le traitement des sols.

o Matières organiques

Les matières organiques peuvent avoir différents effets sur les bétons. Elles peuvent provoquer un retard de prise. Ce retard se traduit par une interférence avec les réactions chimiques d'hydratation des ciments. Une fois la prise hydraulique débutée, le durcissement du béton peut ensuite se dérouler normalement. Lors d'une étude menée par la « National Ready Mixed Concrete Association », un béton fabriqué à partir d'un sable contenant des matières organiques présentait une résistance à 24 heures de temps de cure égale à 53 % de celle d'un béton similaire fabriqué avec du sable sans matière organique. Après 28 jours les résistances mesurées étaient égales (Neville, 2000). Les matières organiques peuvent provoquer une inhibition de la prise. Par exemple, Lamathe et Brouwet (1977) ont pu mettre en évidence que les acides humiques arrêtaient la prise d'un sable laitier. Enfin, les acides organiques peuvent provoquer la dégradation des caractéristiques mécaniques des bétons. En effet, de nombreux acides organiques sont décrits comme substances agressives vis-à-vis du béton par la norme AFNOR NF P 18-011.

o *Micas*

Les micas ou les produits d'altération des micas affectent de façon défavorable la résistance du béton. Fookes et Revie (cités par Neville, 2000) ont montré que la présence de 5 % de mica dans un sable réduisait la résistance du béton de l'ordre de 15 % à 28 jours de cure.

o *Composés soufrés*

Les composés soufrés sont utilisés pour réguler la prise lors de la mise en œuvre du béton (voir 3.4.2). Une fois le ciment ou le béton durci, la formation d'ettringite, par réaction du sulfate avec le calcium, l'alumine et l'eau du béton ou du ciment, est souvent destructrice à cause de l'expansion et des fissurations induites par la formation de ces nouvelles phases. Cette attaque par les sulfates provoque aussi une chute de résistance du béton due à une perte de cohésion de la pâte de ciment hydratée et à une désagrégation entre la pâte et les granulats. Les sulfates peuvent être présents dans les granulats, l'eau de gâchage, ou provenir de l'oxydation des sulfures présents dans les granulats. Plusieurs paramètres favorisent la formation d'ettringite secondaire : la teneur en alumine du ciment et en sulfate du granulat (Divet, 2001), la concentration en éléments alcalins (Damidot et Glaser, 1993), et un degré d'humidité élevé (Divet, 2001). La norme AFNOR NF EN 12620 limite la teneur en soufre totale des granulats à 1 % en masse, afin de limiter le risque de formation d'ettringite différée.

o *Azote*

Les réactions entre certains sels d'ammonium et les bétons sont reconnues depuis longtemps comme potentiellement agressifs (Lea, 1965 ; Mohan et Rai, 1978). Les détériorations engendrées par les composés azotés conduisent à une fragilisation des structures en béton et au développement de fissures (Mbessa et Péra, 2001). Par exemple, le nitrate d'ammonium produit une rapide décalcification ou le sulfate d'ammonium provoque un important gonflement (Jaubertie et Rendell, 2003). En milieu basique, les sels d'ammonium réagissent avec la portlandite : $\text{Ca(OH)}_2 + 2\text{NH}_4\text{NO}_3 = \text{Ca(NO}_3)_2 + 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{NH}_4^+ + 2\text{OH}^-$. Il peut également se former, à partir des nitrates, du nitro-aluminate de calcium (Torrenti et al., 1999). Benard (2005) met en évidence un léger effet accélérateur du nitrate de sodium et du nitrate de potassium sur l'hydratation du ciment Portland à de faibles concentrations en nitrates (< 1 à 2 mol.L^{-1} selon le contre-ion), effet qui devient légèrement retardateur aux concentrations plus grandes. L'addition de nitrate de sodium ou de nitrate de potassium aux solutions de gâchage a pour conséquence de diminuer la résistance mécanique

des pâtes de ciment. Celle-ci peut être réduite de plus de 30 % dans le cas de l'hydratation avec le nitrate de potassium au bout de 3 mois.

o Phosphore

Dans le domaine des adjuvants pour bétons, les phosphates peuvent être utilisés comme retardateurs de prise (Baron et Ollivier, 1996). Les phosphates ont un effet retardateur sur l'hydratation des pâtes de ciment. À concentration en phosphate identique, l'association du phosphate avec l'ion sodium conduit à des retards plus importants qu'avec l'ion potassium (Benard, 2005). Les phosphates peuvent aussi provoquer une perte de propriétés mécaniques. En effet, Benard (2005) met en évidence que les mortiers hydratés avec de l'eau contenant du nitrate et du phosphate possèdent des caractéristiques mécaniques de plus en plus faibles avec l'augmentation de la concentration en phosphate de l'eau de gâchage. Les très fortes concentrations en phosphates réduisent considérablement la résistance des mortiers. Ces résistances sont diminuées de plus de la moitié par rapport à la référence pour des hydratations avec une concentration en phosphate de 50 et 80 g.L⁻¹.

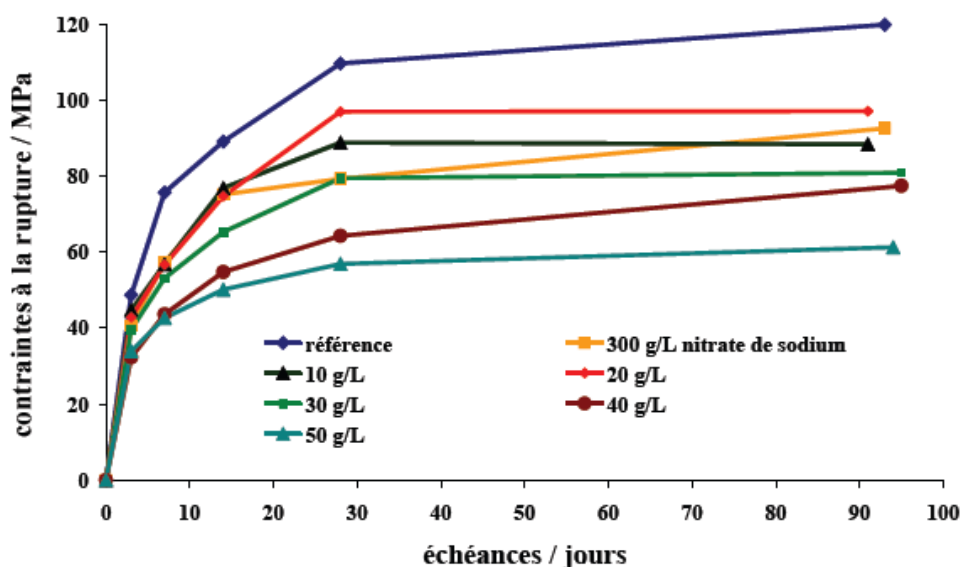


Figure 1.20 : Évolution des contraintes à la rupture pour des pâtes de ciment hydratées avec des solutions de différentes concentrations en phosphate et nitrate de potassium ($e/c = 0,3$) (Bénard, 2005).

o Chlorure

Le chlorure de calcium est connu pour accélérer la prise et le durcissement d'un ciment Portland. L'effet sur la résistance décroît avec le temps et les résistances finales sont réduites (Taylor, 1997). Certains sels de chlorure qui accélèrent la prise et le durcissement à

faible concentration, comme le chlorure de sodium, peuvent retarder la prise à plus forte concentration.

3.5. Conclusion

Plusieurs composés chimiques sont identifiés comme nuisibles au traitement des sols à la chaux et/ou au liant hydraulique par les guides techniques français pour le traitement des sols (tableau 1.9). La recherche bibliographique a permis d'établir une synthèse des informations disponibles pour les composés soufrés, certaines matières organiques, certains minéraux argileux, les minéraux micacés. En revanche, il n'existe que très peu d'études sur l'impact d'autres composés chimiques cités par le GTS sur le traitement des sols (par exemple : les phosphates, les nitrates, et les chlorures) dont l'occurrence est très fréquente. Par ailleurs, dans tous les cas, il n'est pas possible d'identifier le seuil d'influence de chacun de ces composés sur le traitement des sols à la chaux et/ou liant hydraulique

Le caractère perturbateur de ces éléments pour le traitement des sols semble cependant potentiellement se confirmer à partir de l'analyse de données issues de la chimie du ciment qui montrent que ces composés peuvent avoir un impact négatif sur les ciments et les bétons, domaine voisin du traitement des sols. Le tableau 1.10 récapitule les effets de chacun de ces composés sur le traitement des sols et dans le domaine des ciments et bétons. Mais il n'est pas souhaitable de faire une analogie directe entre ces différents domaines. En effet, il existe de nombreuses différences entre les sols traités et les bétons : les proportions en liants, les teneurs en eau, la présence d'argiles dans certains sols, les performances recherchées etc. On se pose ainsi la question de connaître l'effet des phosphates, des nitrates et des chlorures sur le traitement des sols à la chaux et/ou au liant hydraulique.

Tableau 1.9 : Les perturbateurs et leurs effets cités par le GTS, (LCPC-SETRA, 2000).

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

Tableau 1.10 : Influence potentielle de divers composés sur le traitement des sols et sur les bétons, tableau établi à partir de la bibliographie sur le traitement des sols et la chimie des ciments.

Perturbateurs supposés	Effets connus sur le traitement des sols	Effets connus sur les ciments et les bétons
Les argiles	Montmorillonites = diminution des résistances mécaniques des sols traités au liant hydraulique	
Les composés soufrés	Gonflement des sols traités à la chaux et / ou au liant hydraulique	Gonflements et diminution des résistances
Les micas	Diminution des résistances	Diminution des résistances
Les matières organiques	Diminution des résistances	Retardateur de prise ou inhibition de la prise
Les phosphates	?	Retardateur de prise et du durcissement Diminution des résistances
Les nitrates	?	Agressif vis-à-vis du béton
Les chlorures	?	Augmentation des résistances A trop forte concentration retardateur de prise

La grande diversité des éléments potentiellement perturbateurs a conduit au développement de stratégies d'études destinées à déterminer l'aptitude d'un sol au traitement

à la chaux et au liant hydraulique. La prochaine partie va ainsi décrire les principaux essais permettant de savoir si un sol est apte ou non au traitement choisi, elle présentera aussi quelques échecs de chantier liés à ces essais (voir 5.4).

4. MISE EN ÉVIDENCE DES PROBLÈMES RENCONTRÉS LORS DU TRAITEMENT DES SOLS

L'aptitude d'un sol à un traitement peut être définie comme la capacité du sol à être amélioré par les liants utilisés pour atteindre un certain niveau de performance géotechnique, la plupart du temps la résistance mécanique. Cette efficacité du traitement est évaluée par la mesure de différents paramètres géotechniques. Un sol est déclaré apte à un traitement lorsqu'il atteint un certain niveau de performance, niveau fonction de la nature de l'ouvrage à réaliser (couche de forme, couche d'assise, etc.). Il existe de nombreux essais afin de déterminer à évaluer les performances d'un sol traité et ainsi qualifier son aptitude au traitement. Comme on l'a vu dans la partie 4, il existe des perturbateurs susceptibles d'entraîner l'échec du traitement à la chaux et/ou au liant hydraulique. Il faut que ces essais puissent mettre en évidence cet échec en phase d'étude, pour garantir le bon déroulement des travaux de terrassement, sans écarter des sols susceptibles d'être utilisés, mais exclus par ces essais.

Cette partie va ainsi d'abord décrire les principaux essais permettant de déclarer un sol apte ou non vis-à-vis d'un traitement à la chaux et/ou au liant hydraulique, puis décrira les influences des différentes conditions de cure utilisées lors de ces essais. Enfin, nous présenterons quelques exemples de chantiers où des désordres sont apparus, et essayerons de comprendre la raison pour laquelle les essais n'ont pu les prédire.

4.1. Évaluation de l'efficacité d'un traitement

Les essais mis en œuvre pour vérifier l'aptitude d'un sol pour un traitement à la chaux et/ou au liant hydraulique diffèrent d'une région à l'autre du monde. De manière générale, on mesure les performances mécaniques et les gonflements des sols traités.

4.1.1. Mesures de la résistance mécanique

Les essais de résistance à la compression simple permettent de suivre l'évolution de la prise au cours du temps. Les éprouvettes permettant de mesurer cette résistance sont conservées à teneur en eau constante à une température fixée. Cette température peut varier d'un pays à l'autre, la gamme de température s'étend de 15°C à 25°C. En France, par

exemple, elle est fixée à 20°C. Il existe, toujours en France, différents critères d'aptitude pour la réalisation des couches de forme : le temps nécessaire aux résistances à la compression simple pour être supérieures à 1 MPa correspondra au temps à attendre avant d'autoriser la circulation d'engin de chantier sur les sols traités ; les résistances à la compression simple doivent atteindre 2,5 MPa avant l'arrivée des premiers gels.

Les essais de résistance à la traction indirecte ou essais brésiliens, associés à des mesures de modules élastiques permettent d'évaluer les performances du matériau à long terme. En France, le couple résistance à la traction et module d'élasticité permet de déterminer la classe mécanique du matériau traité (cf. GTS, LCPC-SETRA, 2000), ce qui va permettre de dimensionner les ouvrages. Les éprouvettes sont conservées de la même façon que celles utilisées pour mesurer les résistances à la compression simple.

Pour évaluer l'effet d'une immersion sur les sols traités, les essais de résistance à la compression simple après immersion ont été développés. En France, la procédure consiste à garder les éprouvettes à teneur en eau constante pendant 28 jours, à une température de 20°C, puis de les immerger dans une eau à 20°C, pendant 32 jours (cf. GTS (LCPC-SETRA, 2000)). Le rapport entre la résistance après immersion et la résistance sans immersion à 60 jours indique si le matériau étudié possède une bonne résistance à l'immersion au jeune âge. Ce rapport doit être supérieur à 0,8 pour un sol peu ou non argileux ($V_{BS} < 0,5$), et supérieur à 0,6 pour un sol argileux ($V_{BS} > 0,5$). Aux États-Unis, les résistances à la compression simple après immersion sont mesurées sur des éprouvettes ayant d'abord été conservées à teneur en eau constante ou à une humidité relative supérieure à 95 %, puis immergées pendant quelques heures avant l'essai à proprement dit. Wang et *al.* (2003) par exemple, ont immergé leurs éprouvettes pendant 4h avant la mesure de résistance à la compression simple.

Les mesures de résistances « R-value » sont effectuées pour évaluer la résistance potentielle d'une couche de forme ou de remblais. L'éprouvette est confinée dans un appareil (le stabilomètre), puis, on vient mesurer la pression horizontale lorsqu'une pression verticale est appliquée. Cet essai est utilisé pour dimensionner les ouvrages routiers aux États-Unis, par exemple dans l'état de Californie.

4.1.2. Mesures de gonflement

Le gonflement libre peut être mesuré par un appareillage particulier : l'éprouvette, une fois compactée, est placée entre deux pierres poreuses (figure 1.21). Elle est libre de gonfler. Le gonflement est mesuré par un capteur de déplacement (Puppala et *al.*, 2004), dans une direction, comme décrit précédemment, ou dans les « trois dimensions » (Harris et *al.*, 2004).

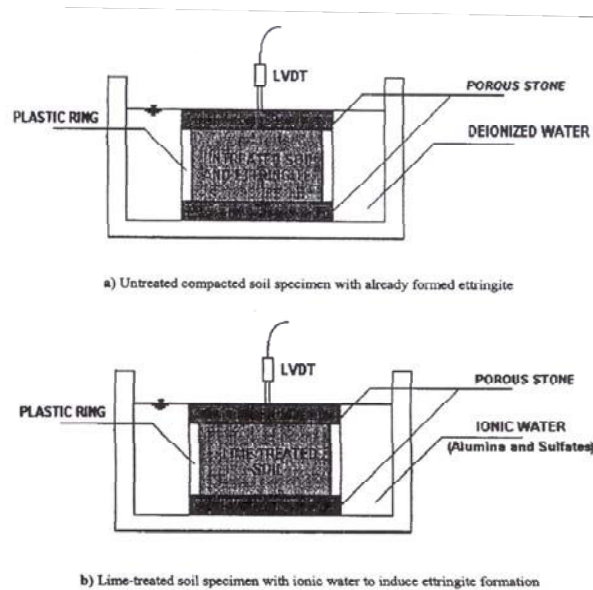


Figure 1.21 : Dispositif de mesure du swell test, Puppala (2005).

4.1.3. Essais accélérant la prise

Les essais nécessaires pour réaliser une étude de traitement sont relativement longs puisqu'il faut plusieurs mois pour déterminer la performance à long terme d'un sol traité, en raison des dosages faibles en liant et au développement de la prise sur 90 à 360 jours. Pour cette raison, des procédures accélérées ont été développées, leur objectif principal étant de vérifier que le traitement est efficace et permettra d'atteindre les performances escomptées. Pour accélérer les essais, on exploite généralement l'effet de la température qui permet d'accélérer les réactions pouzzolaniques et de prise (Le Roux et *al.*, 1988 ; Fontaine, 1984 ; Elabbadi, 1986). Une fois le temps de cure voulu atteint, on peut mesurer différents paramètres géotechniques.

Dans ce cadre, une procédure expérimentale originale a été développée en France. Son objectif principal est de mettre en évidence les phénomènes de gonflement ettringitique, donc les perturbations liées à la présence de soufre dans le sol. L'essai d'aptitude est ainsi décrit par la norme NF P 94-100. Cet essai consiste à accélérer les phénomènes de prise par immersion dans de l'eau à 40°C du matériau traité, et de mesurer les gonflements volumiques et les résistances mécaniques obtenues au bout de 7 jours d'immersion. Les résistances mécaniques consistent à mesurer la résistance à la traction indirecte, par essai brésilien. Les critères d'aptitude de cet essai sont donnés dans le tableau 1.11.

Tableau 1.11 : Critères d'aptitude de l'essai d'aptitude.

	Gv (%)	R _{tb} (MPa)
Apte	< 5	> 0,200
Douteux	> 5	< 0,200
Inapte	> 10	< 0,100

4.1.4. Conclusion

Pour déterminer si un sol est apte ou non vis-à-vis d'un traitement, il existe deux catégories d'essai : les mesures de résistances (R_c, R_{ci}, R_{tb}, ...) et les mesures de gonflement. D'un pays à l'autre, les critères d'aptitude et les modalités d'essais ne sont pas les mêmes. La conservation des éprouvettes avant d'effectuer les essais proprement dits apparaît comme une variable importante à prendre en compte. Cependant, les conditions expérimentales retenues pour ces essais et les conditions réellement attendues sur un ouvrage en terre sont très différentes. Il est donc nécessaire de vérifier dans quelles conditions peut s'effectuer le passage du laboratoire au comportement sur ouvrage. La prochaine partie décrira alors l'influence des paramètres de condition de cure et d'immersion.

4.2. Paramètres influençant la perturbation des sols traités

L'objectif principal de cette partie est de montrer comment les paramètres de conservation des éprouvettes peuvent affecter la performance mécanique d'une éprouvette de sol traité, et donc finalement l'idée que l'on peut avoir sur l'efficacité d'un traitement. L'essentiel de cette partie s'appuie sur des résultats obtenus sur des sols contenant du soufre. Afin de compléter cette partie, quelques cas réels ont été analysés pour tenter d'établir un lien entre les essais de laboratoire et le comportement d'un sol traité *in situ*.

4.2.1. Influence de l'eau

La teneur en eau de conservation de l'échantillon est un paramètre important de la cure. Il est possible de le conserver à différentes conditions d'humidité : séchage à l'air libre, à humidité relative choisie, immergé entièrement, ...

Ainsi, Wang et *al.* (2003) ont déterminé le gonflement axial d'un sol contenant du soufre et traité au ciment Portland en faisant varier les conditions de conservation (d'une faible humidité jusqu'à la saturation totale). Lorsque les éprouvettes sont conservées à l'air ambiant, les gonflements axiaux sont nuls au cours du temps (figure 1.22), quel que soit le pourcentage de ciment utilisé. Lorsque les éprouvettes sont conservées à teneur en eau

constante dans un sac étanche, le gonflement axial augmente, d'autant plus que la quantité de ciment est importante (figure 1.23). Enfin, le gonflement est le plus important lorsque les éprouvettes sont conservées dans une chambre humide à 100 % d'humidité relative (figure 1.23). En effet, pour un même dosage en liant hydraulique (9 %), les gonflements axiaux augmentent de 0,4 % pour les éprouvettes conservées à teneur en eau constante, à 3,2 % pour les éprouvettes conservées en chambre humide à 100 % d'humidité relative. Plus les conditions hydriques de conservation des éprouvettes sont humides, plus les gonflements ettringitiques sont importants. Le gonflement est également proportionnel à la quantité de liant hydraulique utilisé pour traiter le sol.

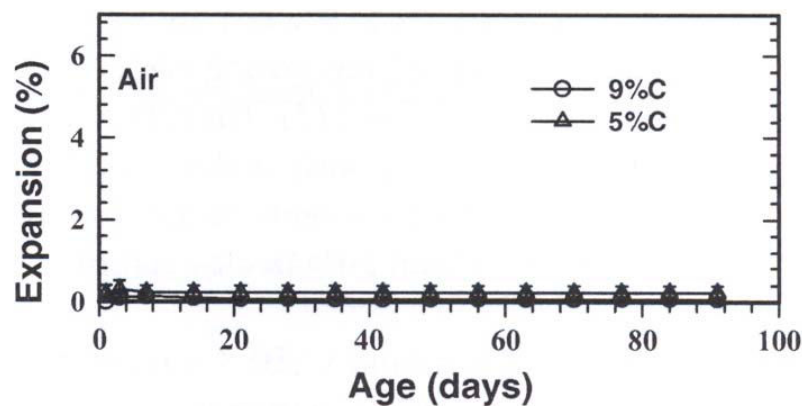


Figure 1.22 : Gonflement en fonction du temps de cure d'éprouvettes conservées à l'air ambiant, Wang et al. (2003).

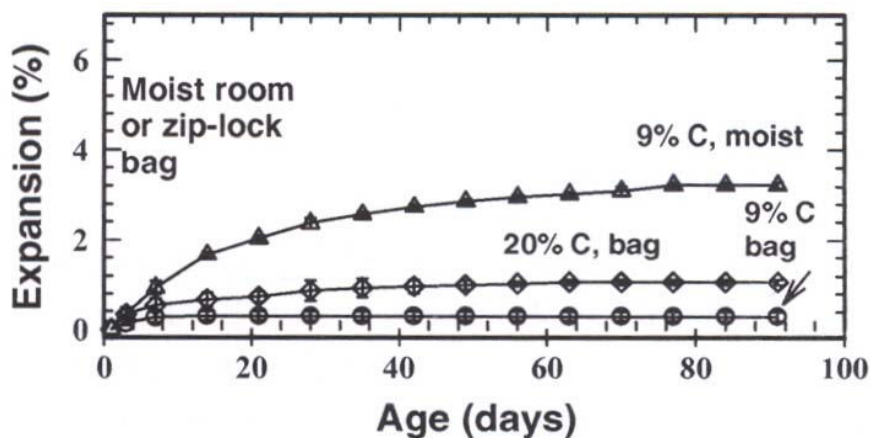


Figure 1.23 : Gonflement en fonction du temps de cure d'éprouvettes conservées en chambre humide (moist) ou à teneur en eau constante (bag), Wang et al. (2003).

Ghosh et Subbarao (2007) mesurent les résistances à la compression simple après immersion de 24 h (figures 1.24 et 1.25). Ils montrent ainsi que l'ajout de gypse dans une cendre volante, traitée à la chaux, va augmenter les résistances à la compression simple des

éprouvettes non immergées surtout au jeune âge. Lorsque ces éprouvettes sont immergées, les résistances à la compression simple varient. Pour les éprouvettes ayant subi un temps de cure faible avant immersion (7 jours), les résistances atteintes sont trop faibles pour résister à l'immersion. En revanche, lorsque les éprouvettes sont conservées plus longtemps avant immersion, ils gardent une certaine résistance, en effet, les résistances des éprouvettes de cendres volantes traitées à 10 % de chaux, subissant une cure de 90 jours, gardent leur bon comportement mécanique malgré l'immersion (environ 6 MPa).

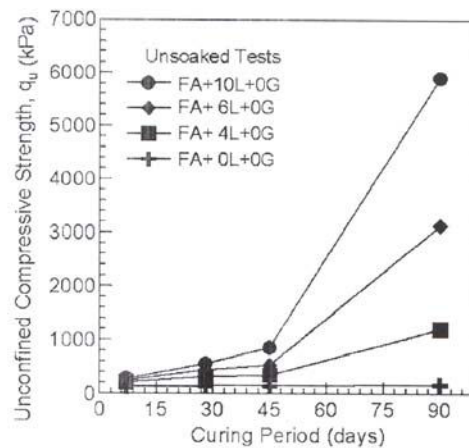


Figure 1. 24 : Résistance à la compression simple en fonction du temps de cure de différents mélanges sol + gypse, Ghosh et Subbarao (2007).

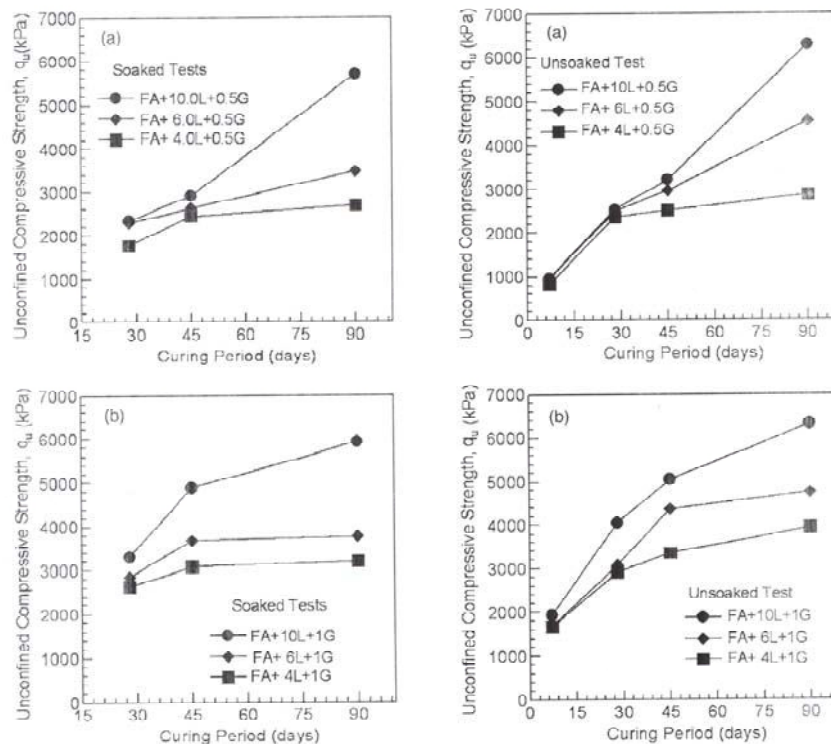


Figure 1. 25 : Résistance à la compression simple après (Soaked) ou non (unsoaked) immersion en fonction du temps de cure à teneur en eau constante de différents mélanges sol + gypse, Ghosh et Subbarao (2007).

En conclusion, on peut noter, que lorsque les éprouvettes sont conservées à l'air libre (séchage), on observe une absence de gonflement, la cure étant associée à une augmentation de la résistance à la compression simple. Ceci semble vérifié même quand la concentration en soufre augmente jusqu'à une valeur importante (cf tableau des seuils). Dans ces conditions de conservation, la prise semble se dérouler normalement, au moins à court terme (au moins jusqu'à 90 jours). Lorsque les éprouvettes sont conservées à teneur en eau constante, le gonflement est très faible, ce gonflement augmente quand les éprouvettes sont conservées en chambre humide. En revanche, l'immersion des éprouvettes est associée à un fort gonflement et une diminution significative de la résistance à la compression simple. Cependant, malgré cette baisse, les éprouvettes peuvent conserver un bon comportement mécanique, avec un niveau de performance satisfaisant, pour utiliser le matériau.

4.2.2. Influence de la température

Comme il a été décrit dans la partie 3.1.1., l'essai d'aptitude consiste à immerger dans un bain à 40°C des éprouvettes, puis à mesurer le gonflement et la résistance à la traction indirecte (essai brésilien). La température de 40°C permet d'augmenter la cinétique de prise.

Par exemple, en 7 jours, on atteint les mêmes performances qu'un échantillon conservé 28 jours à 20°C (Fontaine, 1984).

Wang *et al.* (2003) ont étudié l'effet de la température sur le gonflement d'un sol contenant du sulfate. Les éprouvettes sont conservées à teneur en eau constante et à 40°C. En comparant les données de la figure 1.23 aux données de la figure 1.26, on peut constater que l'augmentation de la température provoque une augmentation du gonflement, quelle que soit la teneur en liant ajouté.

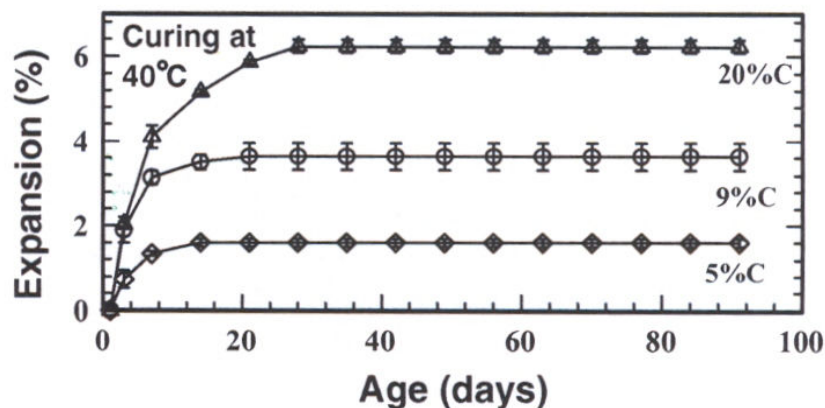


Figure 1. 26 : Gonflement en fonction du temps de cure d'éprouvettes conservées à teneur en eau constante à 40°C, Wang *et al.* (2003).

Une augmentation de la température de conservation des éprouvettes permet d'accélérer la prise lors du traitement des sols. Les résistances à la compression sont donc plus importantes pour un même temps de cure. Lorsque le sol contient du soufre, la température accélère le processus de formation d'ettringite expansive, ce qui provoque le gonflement (Wang *et al.*, 2003).

4.2.3. Influence de la nature du sol

Comme on l'a vu précédemment (voir 3.3.3.), la quantité de soufre dans le sol va influencer son aptitude ou non au traitement. Harris *et al.* (2004) montrent (figure 1.27) tout d'abord que le traitement à la chaux d'un sol diminue les gonflements volumiques. Les auteurs montrent également que plus la quantité de sulfate ajouté au sol est importante plus le gonflement augmente. Le seuil de perturbation au sulfate varie d'un sol à l'autre (tableau 1.4).

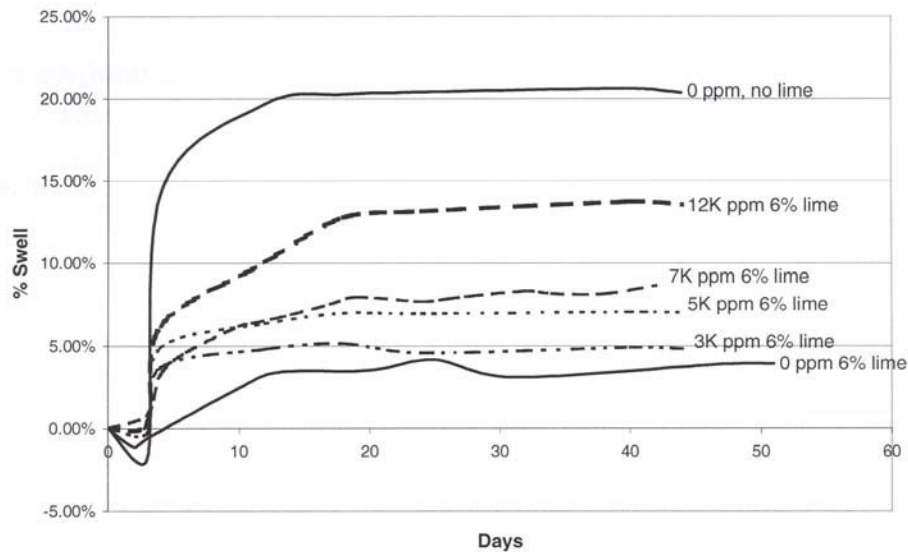


Figure 1. 27 : Résultat de l'essai de gonflement pour différents mélanges sol-gypse traités à la chaux, Harris et al. (2004).

L'aptitude d'un sol contenant du sulfate va aussi dépendre de la minéralogie du sol : Sherwood (1962) montre que la résistance à la compression simple d'un sable traité à 10 % de liant hydraulique n'est pas affectée par une teneur en sulfate de 3 %, alors qu'un sol contenant une fraction argileuse subit une perte de 50 % en résistance mécanique en présence de 0,2 % de sulfate. La présence de kaolinite (riche en aluminium) facilite plus la formation d'ettringite que la présence de montmorillonite (Mitchell and Dermatas, 1992). Le tableau 1.12 donne la résistance à la compression simple après immersion et le gonflement volumique d'éprouvettes conservées au préalable pendant 6 mois à teneur en eau constante, il s'agit de mélanges sable + bentonite + 10 % de gypse et sable + kaolinite + 10 % de gypse, traités à 5 % de chaux. Le mélange sable + kaolinite + gypse possède des résistances plus fortes que le mélange sable + bentonite + gypse. De plus, les gonflements volumiques du mélange sable + kaolinite + gypse sont plus forts.

Tableau 1.12 : R_c de mélange sable + kaolinite et de mélange sable + montmorillonite, d'après Mitchell et Dermatas (1992).

	30 % bentonite + 70 % de sable	30 % kaolinite + 70 % de sable
R_{ci} après 6 mois de cure (kPa)	1780	2355
Gv (%)	0,0	18,5

4.2.4. Synthèse

Lorsque l'on traite un sol contenant du soufre à la chaux et/ou au liant hydraulique, il peut y avoir formation d'ettringite. Différents paramètres peuvent avoir un impact sur le résultat du traitement d'un sol contenant du soufre.

En effet, le matériau contenant du soufre, les liants et l'eau du système apportent tous les éléments nécessaires à la formation d'ettringite : sulfate, silice, alumine, calcium et eau. Cette phase expansive nécessite une grande quantité d'eau : 26 moles d'eau pour une mole d'ettringite. La présence d'eau, en grande quantité, est donc indispensable à la formation de l'ettringite, et donc au gonflement. L'immersion d'éprouvettes de sol entraîne une diminution de leurs résistances à la compression simple. En revanche, il est difficile d'estimer si l'impact de l'immersion sur les résistances à la compression simple est significatif, tant les modalités d'essai sont variées.

En outre, la température favorise la formation d'ettringite, ce qui peut être notamment mis en évidence par l'étude du gonflement d'un sol traité contenant du sulfate en fonction de la température de cure (figure 1.26). Cependant, l'élévation de la température conduit aussi à une modification de la résistance à la compression simple des sols contenant du soufre traités à la chaux et/ou liant hydraulique.

En plus de la température et des conditions hydriques, il semble que d'autres paramètres interviennent comme la nature du sol ou la cure avant la sollicitation hydrique, c'est-à-dire le temps de cure entre le compactage des éprouvettes et le moment où l'on modifie les conditions hydriques, par exemple l'immersion.

4.3. Exemples de problèmes rencontrés en chantier, cas du soufre

L'objectif de cette partie est de présenter quelques études de cas où de grandes différences sont apparues entre les résultats des études menées selon les procédures décrites ci-dessus et les performances effectivement obtenues sur chantier. L'accent sera mis sur la recherche de l'origine de ces différences en prenant en compte notamment la différence entre les conditions d'essais et les conditions auxquelles est soumise une couche de sol traité sur chantier.

4.3.1. Exemple de l'avenue Stewart à Las Vegas, USA (Mitchell, 1986)

La construction d'une sous-couche d'une importante artère de Las Vegas (5 km) a nécessité un traitement à la chaux du matériau du projet. Les résultats des études de laboratoire ont montré qu'un traitement de 4 % de chaux permettait d'obtenir les performances mécaniques désirées. L'étude de traitement pour ce projet a consisté à réaliser des essais de compactage et de mesurer les résistances « R-Value » du sol traité. Les bons résultats des différents essais réalisés ont permis de dimensionner les épaisseurs des différentes couches (figure 1.28). Le chantier s'est déroulé sans difficulté au printemps 1975.

Malgré la bonne qualité de la route après le chantier, deux ans plus tard, des fissures dues au gonflement des couches inférieures sont apparues en surface de la route. Durant le printemps 1978, les désordres sont devenus importants dans certaines zones, alors que dans d'autres zones, la route est restée de bonne qualité.

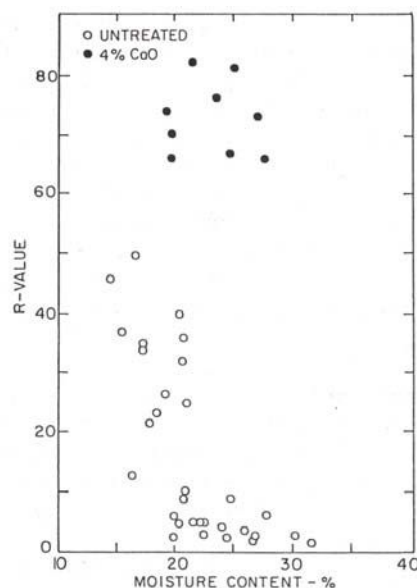


Figure 1.28: Effet de la chaux vive sur les résistances, Mitchell (1986).

Les causes de cet échec du traitement ont ensuite été recherchées. Il a été mis en évidence que les phénomènes observés n'étaient pas dus à un mauvais dimensionnement des couches concernées, ou au non respect des spécifications de chantier. De plus, les matériaux compactés dans les zones où les désordres ont été observés possédaient une densité plus faible et une teneur en eau plus forte que celles spécifiées pour le chantier.

De nouveaux essais ont été ensuite réalisés pour comprendre les causes de l'échec au traitement. Ces nouveaux essais ont mis en évidence la présence de gypse, calcite, sulfate de sodium dans le matériau naturel. Les auteurs expliquent les gonflements observés sur la route, d'une part par la présence d'argile gonflante, et d'autre part, par la formation d'ettringite, celle-ci étant localisée essentiellement dans les zones à désordres. En effet, les matériaux, la chaux et l'eau apportent tous les constituants nécessaires à la formation d'ettringite expansive. Ces gonflements sont provoqués par l'excès d'eau.

En conclusion, l'auteur explique que la présence de chaux dans le matériau va améliorer ses caractéristiques mécaniques et donc les valeurs du « R-value » test. C'est l'apport d'eau en excès qui va entraîner le gonflement observé. Enfin, le « R-value » mesure une résistance sur des éprouvettes confinées, le confinement réduit peut-être le gonflement volumique dû à la formation d'ettringite.

4.3.2. Exemple du chantier de l'autoroute A28 (France)

Baryla et *al.* (2000) décrivent le chantier de l'autoroute A28 reliant Alençon à Tours par Le Mans. Les matériaux utilisés pour réaliser la couche de forme sont les matériaux naturels du site. Sur une des sections, une marne provenant d'un déblai voisin a été utilisée. L'étude du traitement de cette marne a été conduite de façon classique en laboratoire selon les préconisations françaises du GTS, avec un dosage de 1 % de chaux vive et 8 % de liant hydraulique routier. Des mesures de résistances à la compression simple avec ou sans immersion (respectivement R_{ci} et R_c) et de résistances à la traction indirecte, par essai brésilien (R_{tb}) ont été réalisées à différents temps de cure. Les résultats obtenus lors de cette étude de traitement sont donnés dans le tableau 1.13. Les essais réalisés montrent un bon comportement mécanique du matériau, sauf en ce qui concerne les résistances à la compression simple immergée. Le rapport R_{ci}/R_c est faible (0,16) et inférieur à 0,6, indiquant une forte sensibilité à l'eau.

Tableau 1. 13 : Résultats de l'étude de traitement, Baryla et al. (2000).

Teneur en eau de compactage	Taux de compactage par rapport à la densité à l'OPM (%)	Temps de cure (jours)	Nature des essais	Résistance moyenne (MPa)	Rapport $R_{ci}/R_{c_{60j}}$
WOPM	95	7	Rc	1,6	
		28		2,49	
		60		2,9	
		90		3,03	
		28 + 32j d'immersion	Rci	0,47	0,16
		28	Rtb	0,38	
		90		0,43	

Les conclusions de l'étude amènent à considérer que le traitement était bien adapté, malgré l'indice R_{ci}/R_c . L'influence de cet indice a en effet été minimisée, car le profil en travers retenu assurait un excellent drainage de l'ouvrage et ne devait donc pas permettre au cas testé de se produire sur le terrain.

Après d'importantes précipitations, quelques zones ont commencé à présenter des boursouflures et à se dégrader sous le trafic de chantier. Ces zones ont continué à se dégrader pendant deux mois.

En raison de la nature du sol et des désordres observés (gonflements), la présence de composés soufrés a été recherchée (gonflement ettringitique). Des analyses chimiques ont été entreprises et ont confirmé la présence de composés soufrés. La conséquence de ces désordres s'est traduite par la substitution de la couche traitée sur environ 5 à 6 km. On peut conclure que l'essai d'aptitude est discriminant pour détecter les sols contenant trop de soufre et qui sont alors inaptés au traitement. En ce qui concerne l'échec du chantier, on peut dire que la perturbation des sols traités peut être imputée d'une part à la présence de composés soufrés dans le sol et, d'autre part, à l'expression de ces composés soufrés lors d'un apport d'eau important (cf 5.3).

4.3.3. Autres chantiers

o Étude de Rollings et al. en 1999, exemple de la Bush Road

Une section de la route située dans l'état de Georgie, États-Unis, présentait des bosses 6 mois après sa construction. Les études menées sur cette section de route ont montré que les bosses provenaient du gonflement de la couche de forme en sol traité au liant hydraulique. Ce

gonflement était causé par la formation d'ettringite expansive. La source de sulfate permettant la formation d'ettringite provenait de l'eau ayant servi au traitement du sable argileux. Les premiers signes de dégradation de la route sont apparus pendant le printemps, après une saison très humide, l'eau était donc fortement présente et a provoqué la formation d'ettringite. De plus, les endroits où les désordres étaient les plus importants se trouvent être au niveau des jointures de la route, dans des zones, où l'eau peut facilement s'écouler et stagner. L'humidité favorise donc la formation d'ettringite, provoquant un gonflement, des fissurations et une pénétration plus importante d'eau, augmentant encore la réaction ettringitique. L'accélération de la dégradation de la route est donc due au phénomène lui-même, qui s'autoalimente, mais, l'auteur précise que les dommages sont devenus plus fréquents en été avec l'augmentation des températures.

En conclusion, les phénomènes de gonflement ettringitique peuvent apparaître sur des sols ne contenant pas de composé soufré à l'origine. Mais ce composé soufré peut être apporté par l'eau servant à traiter le matériau. En outre, on voit que plus la température et la quantité d'eau sont importantes dans le système, plus le gonflement ettringitique est important.

o *Étude de Thomas et al. en 1989, exemple de la stabilisation au ciment de Minestones:*

En Grande Bretagne, les terrils traités au liant hydraulique (8 à 10 %) sont utilisés pour la construction de routes. Les auteurs ont pu observer des déformations des couches en terril traité dues à l'expansion de celles-ci. Ces sols contiennent une phase soufrée : la pyrite.

Les gonflements observés sont dus d'abord à l'oxydation de la pyrite. En effet, l'oxydation de la pyrite en sulfate, d'une densité plus faible, provoque un gonflement. Puis, ces sulfates réagissent avec les éléments du sol, avec l'eau et les produits de réaction des liants pour former de l'ettringite, minéral expansif.

Les auteurs concluent en indiquant que les critères d'aptitude doivent prendre en compte la teneur en pyrite ou sulfure du sol.

4.4. Conclusion

Les sols contenant du soufre posent problème lors du traitement à la chaux et/ou au liant hydraulique. En effet, des phases expansives peuvent se former (par exemple l'ettringite). Sur le chantier, ces phases peuvent provoquer d'importants dégâts. Comme on a pu le voir, elles se forment en présence d'un excès d'eau, par exemple le long d'une structure, de joint, ...

Il existe de nombreux essais pour vérifier si un sol est apte à un traitement donné. Ces essais ne sont pas toujours suffisants pour déceler un problème dans le cas du soufre. La

question se pose donc de savoir quels essais peut-on utiliser pour vérifier l'aptitude du sol ? Cette interrogation concerne le cas du soufre mais aussi plus généralement la détection de l'influence négative d'un composé chimique quelconque. L'essai d'aptitude semble adapté pour les problèmes dus à la présence de soufre, mais c'est un essai qui a pour principe d'accélérer la prise en utilisant une température de 40°C. Or, la température peut accélérer la formation d'ettringite. L'essai n'est-il pas trop pessimiste ?

5. CONCLUSION ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Ce chapitre a permis de faire une revue générale des connaissances disponibles dans la littérature sur le domaine du traitement des sols à la chaux et / ou au liant hydraulique en terrassements. Une attention particulière a été portée à l'étude de l'influence de composés chimiques perturbateurs sur le traitement des sols, éléments qui sont responsables de gonflement important du sol traité, d'une baisse de la performance mécanique voire de l'absence totale de prise.

Si l'influence de certains composés sur le traitement des sols est relativement bien connue, c'est le cas des composés soufrés et des matières organiques, de nombreux autres éléments sont soupçonnés de pouvoir altérer les effets du traitement. Ainsi il existe encore des chantiers où apparaissent des échecs sans que les composés cités auparavant soient incriminés. Des éléments comme par exemple les phosphates, les nitrates ou les chlorures sont ainsi mis en cause comme étant les perturbateurs responsables de ces échecs. Les données sur leurs effets sur le traitement des sols sont très peu disponibles. Il est donc nécessaire d'étudier ces effets.

Un problème posé par la présence de ces éléments dans les sols est d'évaluer le seuil de concentration à partir duquel cet élément va avoir un impact suffisamment important pour que la performance du sol traité soit insuffisante par rapport au niveau de performance minimale exigé dans l'ouvrage. L'analyse de la littérature met en évidence la difficulté de faire émerger un seuil unique, valable pour tous les sols, pour un élément donné. Ceci tient autant au peu de données disponibles qu'à l'influence couplée de différents paramètres sur la performance d'un sol traité (nature du liant, humidité, type de sol, etc.)

Par ailleurs, cette revue de la bibliographie a permis de montrer qu'il existe de nombreuses procédures expérimentales pour mettre en évidence la réussite ou l'échec d'un traitement des sols. Ces procédures de laboratoire ne permettent pas d'approcher le comportement du sol in situ.

Dans ce contexte, le travail s'est attaché à améliorer les connaissances sur l'influence de différents composés chimiques sur le traitement des sols. Après un chapitre regroupant les détails des dispositifs expérimentaux et informations sur les matériaux étudiés, le chapitre 3 est consacré à la quantification de l'impact de quatre éléments chimiques supposés perturbateurs de la prise. L'objectif est de déterminer si ces éléments peuvent être réellement qualifiés d'éléments perturbateurs de prise aux concentrations étudiées. Dans ce chapitre, les travaux ont été menés pour tenter d'identifier le seuil à partir duquel un élément peut être considéré comme perturbateur de prise en prenant en compte la nature du sol, du liant, etc. Le chapitre 4 est consacré à l'étude de l'influence des conditions expérimentales sur la performance géotechnique d'un sol contenant un perturbateur, après son traitement à la chaux et / ou au liant hydraulique. La température, l'humidité et le temps de cure ont été explicitement pris en compte.

CHAPITRE 2. MATÉRIAUX ÉTUDIÉS ET DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents matériaux utilisés pour l'étude ainsi que la démarche expérimentale suivie lors de ce travail. Ces choix seront mis en perspective avec les objectifs définis dans le chapitre bibliographique. On décrira successivement la méthode de travail choisie, les différents matériaux sélectionnés (composés chimiques et leurs concentrations, sols et liants), ainsi que les procédures expérimentales retenues pour l'ajout de composés chimiques au sol, le traitement des sols, le compactage des sols et les essais. Enfin, dans une dernière partie, les principales propriétés des sols retenus pour l'étude seront détaillées.

1. PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE DE TRAVAIL

Pour mener à bien l'identification des perturbateurs de la prise lors du traitement des sols, *a priori* on peut envisager d'aborder la problématique de deux manières distinctes:

- en travaillant sur des sols naturels, sols contenant des éléments chimiques perturbateurs ou pour lesquels un traitement classique à la chaux et / ou au liant hydraulique a été reconnu inefficace (Mitchell, 1986 ; Baryla et *al.*, 2000 ; Cabane et *al.*, 2005) ;
- en travaillant sur des sols reconstitués, c'est-à-dire des sols préparés en laboratoire confectionnés à partir d'un sol naturel auquel on ajoute un composé chimique supposé altérer les effets du traitement (Wild et *al.*, 1999 ; Harris et *al.*, 2004 ; Ghosh et Subbarao, 2007).

Cette première partie va décrire les avantages et inconvénients de ces deux méthodes et exposer le choix réalisé pour ce travail.

1.1. Travail sur des sols naturels

Travailler sur un sol naturel pour lequel le traitement à la chaux et au liant hydraulique est inefficace, implique de rechercher la ou les causes de cet échec, et ainsi remonter aux

processus physico-chimiques responsables de l'échec du traitement. En suivant cette démarche, Cabane (2004) a étudié le comportement d'un sol réputé apte au traitement afin d'établir un modèle descriptif des mécanismes conduisant à un traitement réussi. Puis, il a comparé ces résultats aux observations menées sur plusieurs sols déclarés inaptes au traitement lors des études géotechniques ou ayant posés des problèmes sur les chantiers. Cependant, cette méthode n'a pas permis de faire ressortir l'action d'un élément particulier et d'identifier la cause de la perturbation. Cabane (2004) souligne ainsi dans les conclusions de son étude : « *Cette étude montre surtout que les sols sont très complexes. Plusieurs agents perturbateurs sont souvent présents dans un même sol et leurs effets se combinent pour nuire à la stabilisation* ».

Cette méthode possède l'avantage de répondre directement à des problématiques très proches de l'application : quelles sont les caractéristiques qui font que des sols sont aptes et qu'est-ce qui les différencie de sols inaptes ? Cette méthode a permis, par exemple à Mitchell (1986) ou Baryla et *al.* (2000), d'identifier les causes des problèmes rencontrés lors de l'utilisation de sols contenant du soufre. En revanche, il n'est pas possible de mener d'étude de laboratoire pour faire émerger l'influence comparée de paramètres tels que la concentration en éléments (tableau 1.4.), la nature des éléments du sol, etc. Par ailleurs, les sols naturels peuvent contenir plusieurs agents perturbateurs dont les effets peuvent se combiner.

1.2. Travail sur des sols reconstitués

Travailler sur un sol reconstitué, consiste à mélanger à un sol de référence un composé chimique à des dosages déterminés que l'on intègre dans l'eau de compactage. Un sol de référence est un sol pour lequel lors d'une étude géotechnique, le traitement a été reconnu efficace. Cette procédure permet de quantifier la variation des paramètres géotechniques et physico-chimiques obtenus sur un même sol, avec ou sans le composé supposé perturbateur. Cette méthode a été utilisée, entre autres, pour une étude sur les éléments perturbateurs de la prise dans les sols traités aux liants hydrauliques (Guichard, 2006). Elle a également été utilisée par Ghosh et Subbarao (2007). Si elle permet de faire ressortir explicitement et de quantifier l'action d'un composé chimique quel qu'il soit, cette méthode présente l'inconvénient principal de reposer sur l'utilisation de sols modèles, qui sont une vision simplifiée de la réalité. Afin d'être le plus représentatif d'un sol réel, elle nécessite de s'assurer de l'équilibre entre le sol et le composé chimique ajouté. De plus, il convient d'ajouter le composé à des concentrations représentatives des sols rencontrés en chantier.

1.3. Choix de la méthode de préparation des matériaux

La première méthode qui consiste à étudier un sol naturel peut poser des difficultés pour mettre en évidence l'action d'un élément en particulier, ainsi que la concentration seuil à partir de laquelle il peut avoir un impact sur le résultat du traitement. Cette étude étant notamment focalisée sur la mise en évidence de l'influence d'un composé particulier et la recherche des seuils de perturbation, nous avons choisi la deuxième méthode, c'est-à-dire de travailler sur des mélanges de sols et de composés chimiques.

2. LES PARAMÈTRES D'ÉTUDE

Les différents paramètres pris en compte dans cette étude sont :

- les éléments perturbateurs et leurs concentrations ;
- la nature des sols ;
- les liants et les types de traitement.

2.1. Les perturbateurs

2.1.1. Choix des perturbateurs

Dans le guide de traitement des sols (LCPC-SETRA, 2000), certaines substances sont mentionnées comme susceptibles de réagir avec les liants et le sol, et peuvent donc venir affecter le traitement. C'est le cas des substances chimiques naturelles telles que les matières organiques, les composés soufrés (gypse, pyrite), ou bien encore les composés chlorés (NaCl). C'est le cas également des substances chimiques introduites dans les sols par l'activité anthropique, comme les engrais (nitrates, phosphates, soufre).

Il a été décidé de mener cette étude sur certains éléments pour lesquels il n'existe que peu ou pas de résultats disponibles dans la bibliographie (*cf.* chapitre 1) :

- les fertilisants azotés ;
- les fertilisants phosphatés ;
- les chlorures ;
- les composés soufrés, ils serviront aussi de référence car leur effet est le mieux connu.

Les composés soufrés ont été intégrés dans l'étude, afin de valider les procédures sélectionnées mais aussi de compléter les connaissances déjà acquises sur un perturbateur connu mais pour lesquels des données aussi essentielles que le seuil de perturbation ou

l'influence des conditions de cure restent encore très débattues. Dans tous les cas, il s'agit de valeurs mesurées dans les horizons superficiels des sols.

2.1.2. Les nitrates

L'azote est un élément important intervenant dans la croissance végétale. C'est la raison pour laquelle, les apports azotés sont très utilisés en agriculture. L'engrais azoté le plus utilisé est l'ammonitrate ou nitrate d'ammonium (NO_3NH_4). Ainsi, nous avons choisi de travailler avec une forme pure de nitrate d'ammonium, les fabricants d'engrais ne donnant pas les compositions exactes de leurs produits. La figure 2.1. présente les médianes des concentrations en azote total de l'horizon de surface des sols agricoles de la période de 1995 à 1999, pour différentes parties du territoire français. La médiane est définie comme étant la valeur centrale d'un caractère séparant une population en deux parties égales. Des concentrations moyennes autour de 2 g de nitrate assimilable par kilogramme de sol sec se retrouvent régulièrement en France. Lorsque l'on considère les concentrations fortes en France, on retrouve des valeurs de l'ordre de 10 g d'azote total par kilogramme de sol sec. Cependant ces concentrations sont largement supérieures à des valeurs retrouvées dans certains sols reconnus inaptes au traitement, utilisés lors de travaux de terrassement, sols dans lesquels la concentration en nitrates était de l'ordre de 200 mg par kilogramme de sol sec (Measson, 2007).

Dans ce cas, les concentrations retenues sont, pour le dosage faible, 200 mg de nitrate d'ammonium NO_3NH_4 par kg de sol sec et, pour le dosage fort, 2000 mg de nitrate d'ammonium par kg de sol sec.

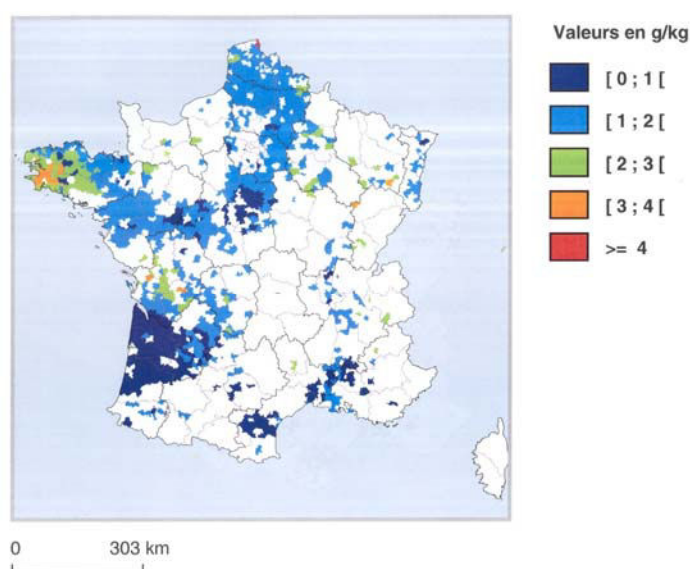


Figure 2.1 : Valeurs médianes des teneurs en azote total de l'horizon de surface des sols agricoles, période début 1995 à fin 1999 (INRA, 2007)

2.1.3. Les phosphates

Le phosphore est également un élément important pour le développement des végétaux, ce qui justifie son utilisation abondante en agriculture.

La figure 2.2 présente les médianes des concentrations en phosphates assimilables de l'horizon de surface de certains sols agricoles français pour la période 1995-1999. Des concentrations moyennes autour de 400 mg de phosphate assimilable par kilogramme de sol sec se retrouvent régulièrement dans les régions de Bretagne, de Pays de Loire, de Picardie, d'Aquitaine, d'Alsace, ou du Rhône Alpes. Si l'on regarde les concentrations fortes retrouvées par exemple dans l'est de la France (figure 2.3.), on peut rencontrer des concentrations de l'ordre 1200 mg de phosphate assimilable par kilogramme de sol sec. Ces concentrations concernent les horizons supérieurs des sols et donnent une bonne indication des concentrations fortes retrouvées dans les sols utilisés pour les travaux de terrassement.

Les concentrations choisies pour l'étude sont donc pour la faible concentration 400 mg de phosphate de potassium par kilogramme de sol sec, et pour le dosage fort 1200 mg de phosphate de potassium par kilogramme de sol sec. L'engrais phosphaté le plus utilisé est le superphosphate. Ce produit est obtenu par attaque à l'acide sulfurique de roche phosphorée, ce produit contient donc des sulfates. Pour éviter d'ajouter deux composés potentiellement perturbateurs de prise, il a été choisi de travailler avec un autre engrais phosphaté : le phosphate de potassium (KPO_4).

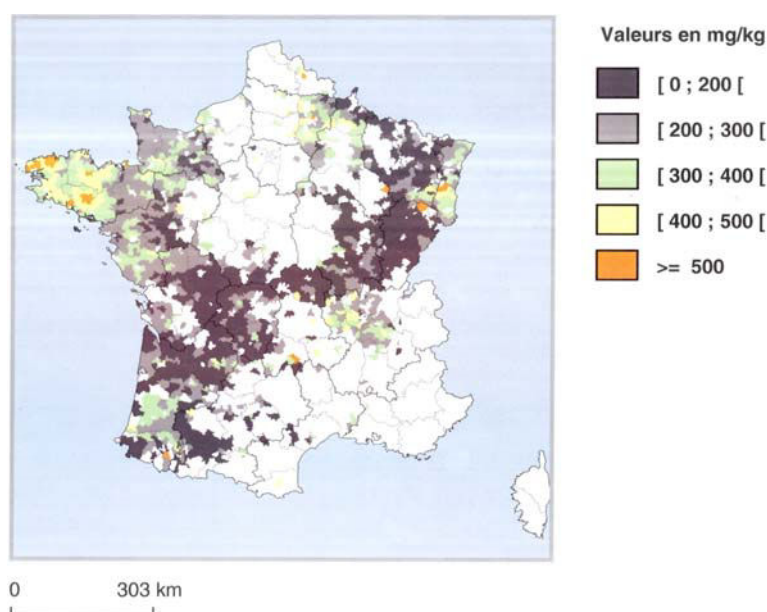


Figure 2.2 : Valeurs médianes des teneurs en phosphore assimilable de l'horizon de surface des sols agricoles, période début 1995 à fin 1999 (INRA, 2007)

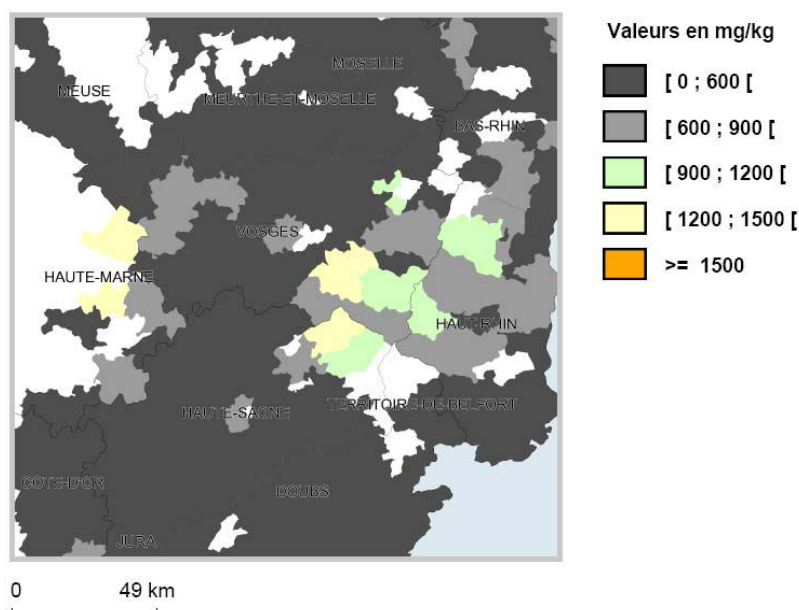


Figure 2.3 : Valeurs des derniers déciles des teneurs en phosphore assimilable de l'horizon de surface des sols agricoles, période début 1995 à fin 1999 (INRA, 2007)

2.1.4. Les chlorures

Le chlore est un élément abondant dans la nature ; sa forme la plus répandue est le chlorure de sodium (NaCl). Le chlore stable présent dans les sols provient essentiellement des mers et des dépôts continentaux de roches salines (potasse d'Alsace, par exemple). Les données sur les concentrations en chlore retrouvées dans les sols ou dans son environnement ont été relevées dans des documents fournis par l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN). Cet institut édite des fiches résumant le comportement d'éléments chimiques dans les principaux compartiments des écosystèmes terrestres et aquatiques. Dans ce contexte, une fiche sur le radionucléide ^{36}Cl a été éditée, donnant des informations sur les concentrations dans l'environnement du chlore stable. Il est ainsi apparu que, dans les sols, les concentrations en chlore d'origine marine varient de 8 à 1800 mg.kg^{-1} de sol sec en fonction de l'éloignement de la mer, avec une valeur moyenne de 100 mg.kg^{-1} de sol sec. Dans les eaux douces, la concentration moyenne en chlore stable est de 7 mg.L^{-1} .

La forme NaCl a été retenue pour étudier l'impact des chlorures dans cette étude. Les concentrations pour l'étude ont été choisies à 100 mg.kg^{-1} de chlorure de sodium pour le dosage faible et à 2000 mg.kg^{-1} de chlorure de sodium pour le dosage fort.

2.1.5. Les sulfates

Comme il a été mentionné dans la synthèse bibliographique, les composés soufrés sont perturbateurs du traitement des sols à la chaux et au liant hydraulique, même si les seuils de perturbation ne sont pas encore été établis de façon absolue. Nous les avons donc choisis, car

ils vont permettre de valider notre méthode. Dans cette étude, nous avons décidé de travailler sur le soufre sous forme de gypse.

Une eau pour être potable doit avoir une concentration en sulfate inférieure à 250 mg de sulfate par litre. Dans les formations à veines de gypse des nappes de l'Artois, la concentration en sulfate peut atteindre une valeur de 1 g.L^{-1} , valeurs qui rendent cette eau non potable. Les concentrations choisies pour l'étude sont issues de la norme NF P 18-011 relative à la classification des environnements agressifs.

Elles sont pour le dosage faible, 1000 mg de sulfate de calcium par kilogramme de sol sec, et pour le dosage fort, 10 000 mg de sulfate de calcium par kilogramme de sol sec.

2.1.6. Bilan des concentrations retenues pour l'étude

Le tableau 2.1. récapitule les dosages choisis pour l'étude, avec un dosage minimum qui représente la moyenne retrouvée dans les sols français, et un dosage maximum qui représente une concentration forte retrouvée dans les sols français.

Tableau 2.1 : Dosages retenus pour la première partie d'étude

Éléments étudiés	Dosage minimum	Dosage maximum
Composé azoté	200 mg de nitrate d'ammonium /kg de sol sec	2000 mg de nitrate d'ammonium / kg de sol sec
Composé phosphaté	400 mg de phosphate de potassium /kg de sol sec	1200 mg de phosphate de potassium /kg de sol sec
Composé chloré	100 mg de chlorure de sodium /kg de sol sec	2000 mg de chlorure de sodium /kg de sol sec
Composé soufré	1000 mg de sulfate de calcium hydraté /kg de sol sec	10000 mg de sulfate de calcium hydraté /kg de sol sec

2.2. Les sols

2.2.1. Choix des types de sols

La bibliographie a permis de montrer, notamment dans le cas des sulfates, que la nature du sol pouvait affecter le résultat d'un traitement des sols. Dans ce contexte, deux sols ont été sélectionnés pour cette étude, pour lesquels le traitement à la chaux et/ou au liant hydraulique est préconisé par le GTR ou le GTS. Le traitement de ces sols a déjà été reconnu efficace en chantier ou en laboratoire.

Le premier sol choisi (sable de Bouër, SB) est un sol intermédiaire avec peu de fines aux comportements différents des sols fins, un sable argileux classé B2 par le GTR. Ce sol

permettra d'évaluer l'effet des perturbateurs sur un sol traité uniquement au liant hydraulique. Le second sol (limon du Val d'Europe, LVE) est un sol fin limoneux classé A2 par le GTR, sol fréquemment rencontré en chantier et souvent traité à la chaux et/ou au liant hydraulique. La principale différence entre ces deux sols est la présence d'une importante fraction argileuse dans le limon. Ces travaux permettront ainsi d'apprécier l'impact de la présence d'argile sur l'impact d'un composé chimique supposé perturbateur.

2.2.2. Le limon du Val d'Europe

Parmi l'ensemble des limons, notre choix s'est fixé sur un limon du bassin parisien, très souvent rencontré sur les chantiers de traitement des sols. Le choix pour cette étude s'est porté sur le limon de Jossigny, ce sol présentant l'avantage d'avoir fait l'objet de nombreuses études (par exemple Cui, 1993 ; Le Runigo, 2008). Pour des raisons de facilité de prélèvement, un limon, aux mêmes origines et aux mêmes comportements, a été prélevé à environ 5 km du site de Jossigny, à l'intérieur du boulevard circulaire du Val d'Europe, sur la commune de Magny le Hongre (77).

Une masse d'environ 1,5 tonne a été prélevée à la pelle mécanique après avoir enlevé la terre végétale et 1 mètre de sol. Le sol a été séché en chambre climatique à 40°C. Le matériau a été ensuite concassé (concasseur à mâchoires) pour broyer les mottes de sol sèches. Puis, le sol a été tamisé à 2mm. Après ces deux étapes, la fraction de limon de Val d'Europe inférieure à 2mm a été homogénéisée par quartage du matériau en 4 lots. L'homogénéité des lots a ensuite été vérifiée (tableau 2.2). Le matériau a enfin été conditionné en fût jusqu'à utilisation.

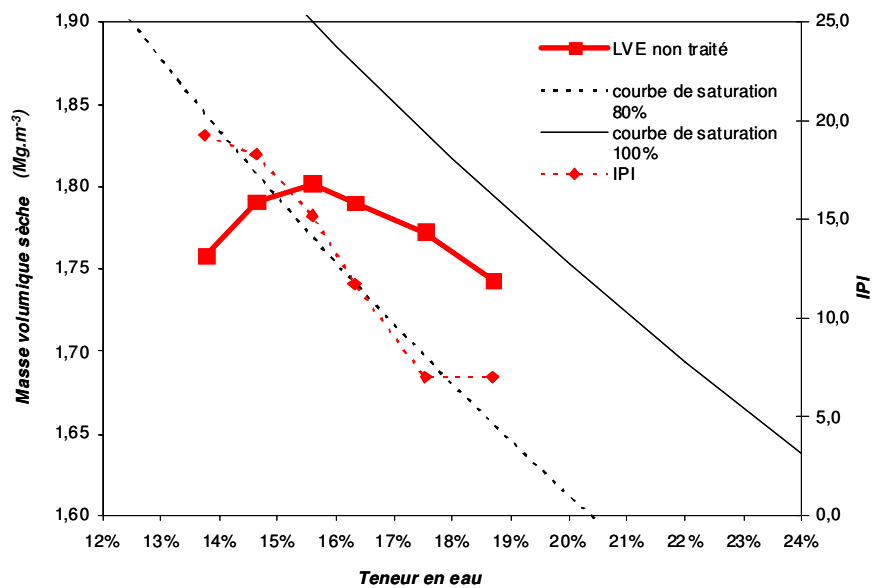
Tableau. 2.2 : Valeurs de bleu du limon du Val d'Europe, vérification de l'homogénéité du matériau après préparation

N°	Lot A	Lot B	Lot C	Lot D
V _{BS}	4,38	4,48	4,24	4,41

Le tableau 2.3 donne les principales caractéristiques géotechniques du limon du Val d'Europe. L'évolution de la masse volumique sèche du sol (essai Proctor) et de l'indice portant immédiat (IPI), en fonction de sa teneur en eau est donnée dans la figure 2.4. La courbe granulométrique est représentée sur la figure 2.5. D'après l'ensemble de ces caractéristiques, ce limon est un sol fin dont la plasticité moyenne le classe selon le GTR en sol A2 (NF P 11-300). Sa teneur en eau à l'optimum Proctor est de 15,5 % et sa masse volumique sèche optimale est de 1,80 Mg.m⁻³.

Tableau 2.3 : Caractéristiques géotechniques du LVE

	Limon du Val d'Europe
Granulométrie	
$D_{\max}$ (mm)	5
< 2mm (%)	99,9
< 80 μ m (%)	94,6
Propriétés physiques	
Limite de plasticité (%)	20,8
Limite de liquidité (%)	36,5
Indice de plasticité (%)	15,7
V_{BS} (g de bleu pour 100 g de sol)	4,43
Masse volumique des particules (Mg/m^3)	2,7
Référence de compactage (Proctor normal)	
w (%)	15,5
ρ_d ($Mg.m^{-3}$)	1,80

**Figure 2.4 : Courbe Proctor et IPI du limon du Val d'Europe naturel**

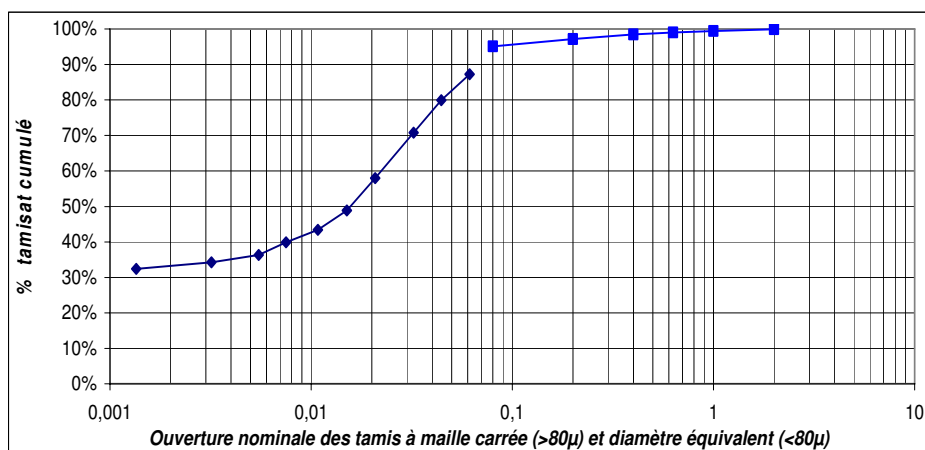


Figure 2.5 : Courbe granulométrique du limon du Val d'Europe (méthodes par tamisage et par sédimentation)

Les principales caractéristiques physico-chimiques du limon de Val d'Europe sont données dans les tableaux 2.4 et 2.5. Une analyse par diffraction des rayons X sur une poudre du matériau broyé a permis de montrer que ce limon est composé en majorité de quartz. Une analyse sur lame orientée de la fraction inférieure à 2 μm montre que la fraction argileuse est composée de kaolinite et de micas. L'observation en microscopie électronique en balayage d'une éprouvette de limon non traitée compacté à 98,5 % de l'optimum Proctor selon le protocole décrit en 4.3 de ce chapitre montre que le mode de compactage induit à la fois une dispersion des particules argileuses entre les grains de quartz mais également un plaquage de celles-ci sur les grains de quartz (figures 2.6 et 2.7). Cela a pour conséquence de laisser des pores de plusieurs dizaines de micromètres entre les agrégats que constituent les grains de quartz reliés entre eux par les minéraux argileux (figure 2.8).

Tableau 2.4 : Analyses chimiques du LVE (PF= perte au feu, COT= Carbone Organique Total)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₂	MnO	CrO	P ₂ O ₅	PF	COT
79,58	0,63	0,24	0,05	0,03	0,04	0,09	-	0,01	-	-	0,03	1,70	0,18

Tableau 2.5 : Propriétés physico-chimiques du limon du Val d'Europe

	Limon du Val d'Europe LVE
pH du sol (NF ISO 10390)	8,4
Teneur en carbonates (%)	2,1

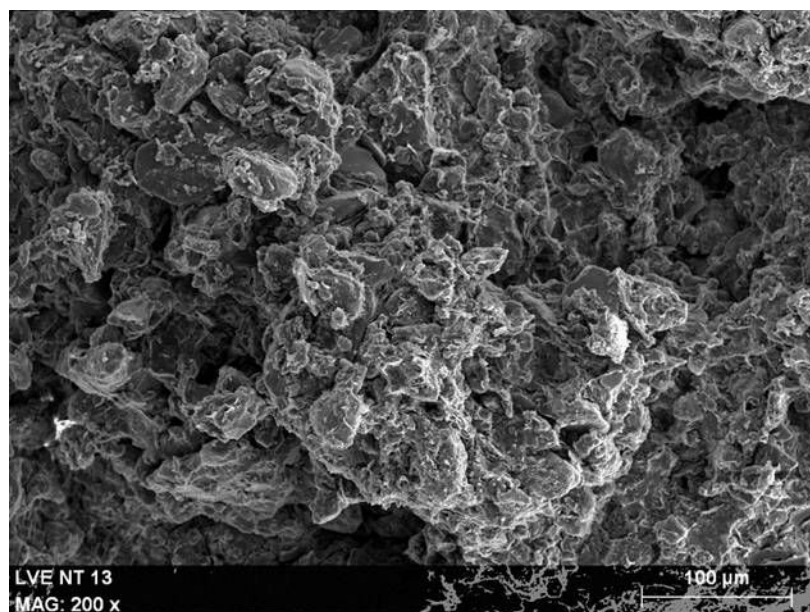


Figure 2.6 : Observation de surface au MEB du limon du Val d'Europe non traité (x 200)

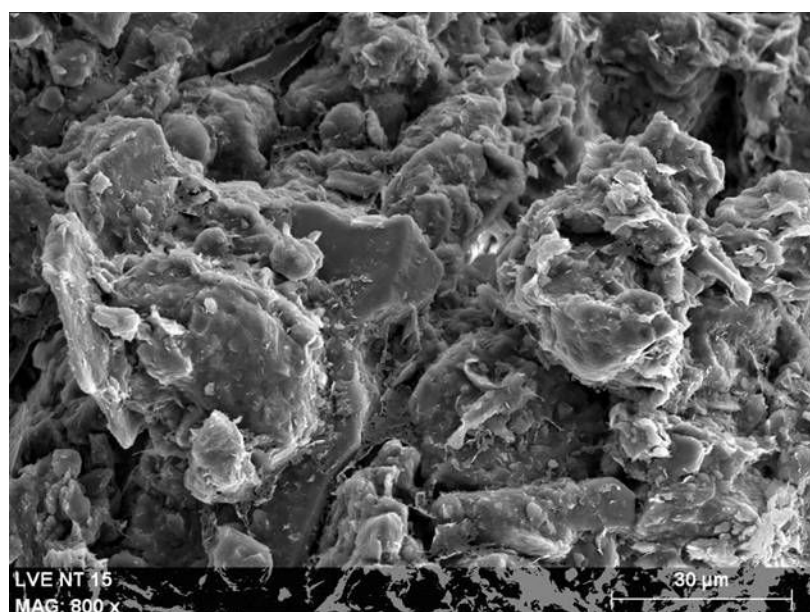


Figure 2.7 : Observation de détail montrant l'organisation microscopique du LVE compacté (x 800)

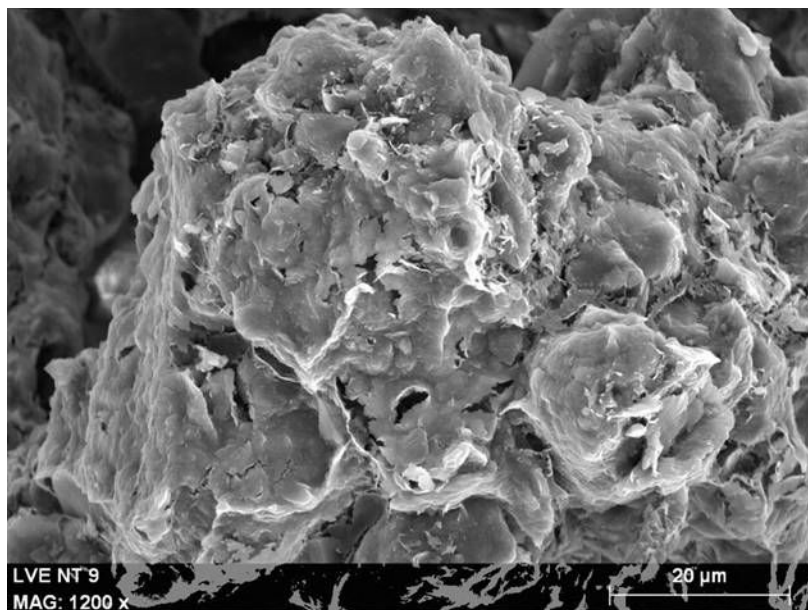


Figure 2.8 : Observation de détail montrant les particules argileuses recouvrant les grains de quartz et assurant la continuité avec les différents agrégats (x 1200)

2.2.3. Le sable de Bouër

Le sable sélectionné a été utilisé sur le chantier du lot 33 Melleray-Connere du TGV Atlantique. Une étude réalisée par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers a permis de montrer que, 20 ans après la fin du chantier, les performances mécaniques du sable traitée était très bonnes, ce qui nous a amené à retenir ce sable comme matériau de référence pour l'étude.

Ce sol a été prélevé à la carrière du lieu-dit « La butte de Bouër », sur la commune de la Bazoge, en 2007. Cette carrière est encore exploitée. Une masse d'environ 2 tonnes a été prélevée sur une butte de dépôt de ce sable. Le sol a ensuite été séché en chambre climatique à 40°C. Le matériau a été tamisé à 2 mm. Après cette étape, la fraction de sable de Bouër inférieure à 2 mm a été homogénéisée par quartage du matériau en 4 lots. L'homogénéité des lots a ensuite été vérifiée (tableau 2.6). Le matériau a enfin été conditionné en fût jusqu'à utilisation.

Tableau 2.6 : Valeurs de bleu du sol du sable de Bouër, vérification de l'homogénéité du matériau après préparation

N°	Lot A	Lot B	Lot C	Lot D
V _{BS}	0,22	0,18	0,20	0,21

Le tableau 2.7 donne les principales caractéristiques géotechniques du sable de Bouër. Sa courbe granulométrique est représentée sur la figure 2.10. L'évolution de la masse volumique sèche du sol (essai Proctor) et de l'indice portant immédiat (IPI), en fonction de sa

teneur en eau est donnée sur la figure 2.9. D'après ces caractéristiques, ce sol est sableux avec peu de fine, selon le GTR, on le classe en sol B2 (NF P 11-300). La teneur en eau à l'optimum Proctor est de 13,0 % et sa masse volumique sèche optimale est de $1,72 \text{ Mg.m}^{-3}$. Les principales caractéristiques physico-chimique du sable de Bouër sont données dans les tableaux 2.8 et 2.9. Une analyse par diffraction des rayons X sur une poudre du matériau broyé a permis de montrer que ce sable est composé en majorité de quartz. Aucune observation au MEB n'a été effectuée sur des éprouvettes de sable brut, en effet, les procédures de préparation n'étaient pas adaptées à des éprouvettes possédant de trop faibles caractéristiques mécaniques.

Tableau 2.7 : Caractéristiques géotechniques du sable de Bouër

	Sable de Bouër
Granulométrie	
$D_{\max}$ (mm)	2
< 2mm (%)	99,9
< 80 μm (%)	5,2
Propriétés physiques	
V_{BS} (g de bleu pour 100 g de sol sec)	0,2
Masse spécifique des grains (Mg/m^3)	2,61
Référence de compactage	
w (%)	13,0
γ_d (Mg.m^{-3})	1,72

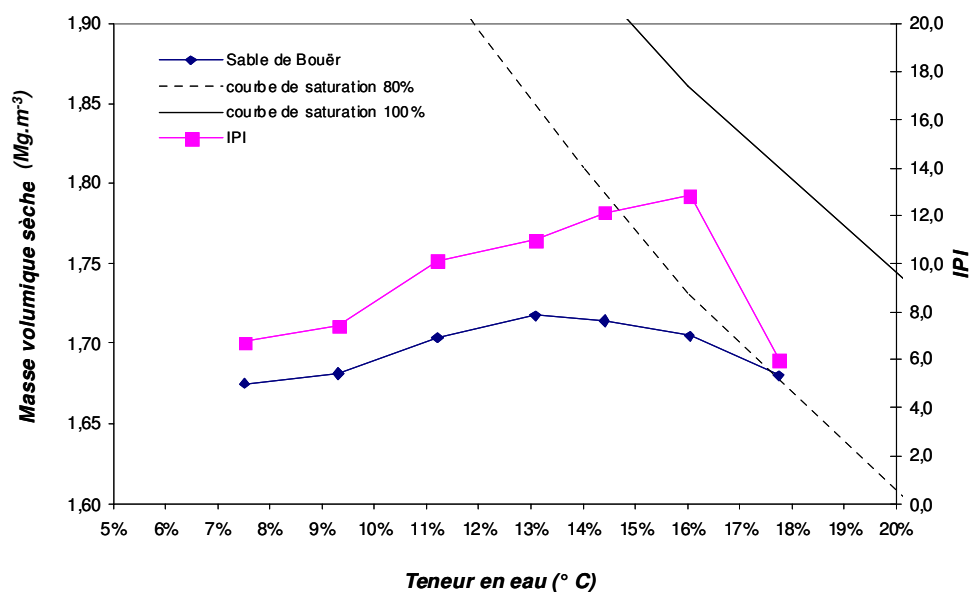


Figure 2.9 : Courbe Proctor et IPI du sable de Bouër

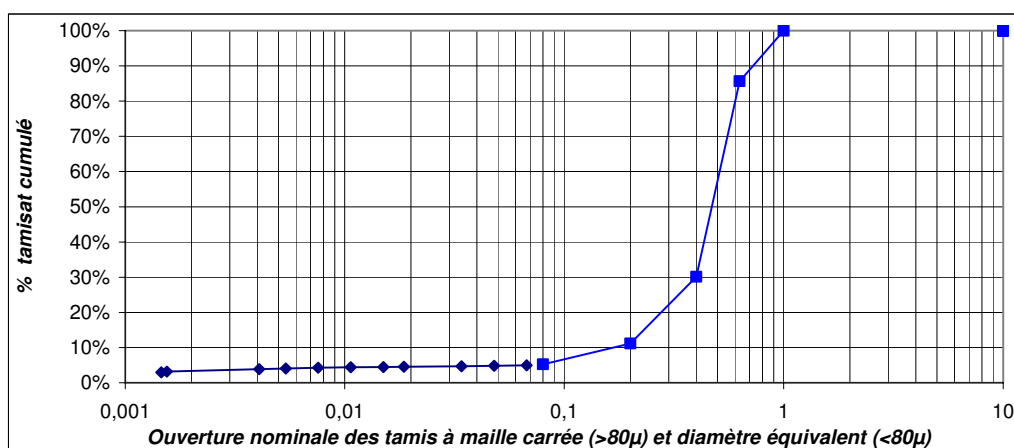


Figure 2.10 : Courbe granulométrique du sable de Bouër (méthodes par tamisage et par sédimentation)

Tableau 2.8 : Analyses chimiques du sable de Bouër (PF = Perte au Feu, COT= Carbone Organique Total)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₂	MnO	CrO	P ₂ O ₅	PF	COT
96,48	0,03	0,05	-	-	0,03	0,01	-	0,01	-	-	-	0,30	0,04

Tableau 2.9 : Propriétés physico- chimiques du sable de Bouër

	Sable de Bouër
pH du sol (NF P)	6,2
Teneur en carbonates (%)	0,2

2.3. Types de traitements et liants

Le traitement choisi a été adapté au type de sol étudié, suivant ainsi les recommandations du guide du traitement des sols (LCPC-SETRA, 2000). Les dosages utilisés au cours de l'étude ont été fixés à des valeurs usuelles pour ce type de matériau en France, recommandé par le GTS (LCPC-SETRA, 2000). Ils sont représentatifs des dosages habituellement utilisés en chantier. Le limon est traité à la chaux et aux liants hydrauliques (traitement mixte), et le sable est traité uniquement au liant hydraulique, ce sol contenant très peu de fines. Les dosages retenus sont :

- pour le limon : 1,5 % de chaux vive et 6 % de liant hydraulique ;
- pour le sable : 6 % de liant hydraulique.

La chaux vive utilisée pour l'étude répond à la norme NF P 98-101. Les principales caractéristiques de la chaux vive utilisée sont données dans le tableau 2.10. Les liants hydrauliques choisis pour l'étude possèdent peu de constituants secondaires pour limiter l'effet

de ces derniers, et éviter de possibles interactions avec les composés chimiques ajoutés aux sols. Les ciments utilisés sont :

- CPA CEM I 52.5 N de l'usine de St Pierre la Cour-Lafarge (tableau 2.11) ;
- CPJ CEM II B LL 32.5 R de l'usine de St Pierre la Cour-Lafarge.

Tableau 2.10 : Caractéristiques de la chaux vive utilisée (données fournisseur)

CaO (%)	CaO libre (%)	MgO (%)	CO ₂ (%)	<80 µm (%)	Réactivité t ₆₀ (min)
92,8	90,9	1,0	1,4	70,7	3,3

Tableau 2.11 : Caractéristiques chimiques (%) du liant hydraulique CEM I 52,5 N (PF=Perte au Feu)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl ⁻	P ₂ O ₅	PF
20,20	4,85	2,80	64,35	0,90	0,98	0,16	3,05	0,02	0,24	1,65

Pour chaque liant un stock a été constitué dès le début de l'étude. Des précautions spéciales ont été prises afin de s'assurer du maintien des caractéristiques dans le temps des différents liants. Ainsi, la chaux a été conservée dans des sachets sous vide de 500 g ou 1 kg. À chaque ouverture et fin de sachet, un essai de réactivité a été réalisé selon la norme NF P 98-102. On mesure la réactivité t₆₀ qui correspond à la durée nécessaire pour que le mélange entre la chaux vive et l'eau atteigne une température de 60°C. Les liants hydrauliques ont été conservés dans des fûts étanches. Les résistances à la compression sur un mortier de référence ont été effectuées selon la norme (NF EN 197-1) pour vérifier leur bonne conservation. Sur toute la durée de l'étude, aucune évolution significative de ces paramètres n'a été observée.

3. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

3.1. La méthode de perturbation

La méthode de perturbation doit permettre d'obtenir un sol le plus représentatif possible d'un sol naturel. Pour cela, il convient de s'assurer d'une répartition homogène du composé chimique étudié dans le sol. La méthode utilisée s'inspire des études menées sur les métaux lourds dans les sols (essais en batch) ou en écotoxicologie. Pour que les éléments chimiques étudiés puissent bien se répartir dans le sol, il est préconisé de les dissoudre dans de l'eau avant de les introduire au sol. Ces méthodes ont fait l'objet de développements et de vérifications pour s'assurer de la bonne répartition du composé dans le sol, et ont abouti à la

rédaction de normes (Hlavackova, 2005 ; Ribera et Saint-Denis, 1999 ; NF ISO 11268-1 ; NF ISO 11269-2).

À partir de ces méthodologies, une méthode de mélange d'un sol de référence avec un perturbateur a été élaborée pour cette étude. Les principales étapes de préparation d'un mélange sont décrites ci-dessous :

- mise en solution du composé chimique étudié dans de l'eau déminéralisée ;
- humidification du sol à l'état hydrique très humide pour permettre une meilleure répartition du composé chimique dans le sol, à l'aide d'un malaxeur ;
- laisser s'équilibrer suffisamment longtemps pour permettre une bonne diffusion du composé étudié dans le sol, pour cette étude, nous avons laissé nos sols s'équilibrer pendant 1 mois.

Cette méthode de perturbation a été utilisée tout au long de l'étude.

3.2. Le traitement des sols

Une seule et même procédure de traitement a été utilisée tout au long de l'étude. Cette procédure a été adaptée de la norme NF P 94-093 qui décrit les essais Proctor normaux et modifiés. Les étapes de la méthode de traitement sont décrites ci-dessous :

- mélange du sol avec de l'eau déminéralisée afin d'atteindre la teneur en eau visée pour le compactage ;
- conservation du mélange pendant 24h dans un sac plastique étanche de manière à homogénéiser la teneur en eau au sein du matériau ;
- contrôle de la teneur en eau du mélange ;
- pour le limon : on incorpore la chaux à l'aide d'un malaxeur à couteaux, puis mise au repos du mélange obtenu pendant 1 heure, enfin, incorporation du liant hydraulique, toujours à l'aide du malaxeur à couteaux ;
- pour le sable : on incorpore directement le liant hydraulique à l'aide du malaxeur à couteaux ;
- confection des éprouvettes par compactage statique, avec un délai maximum de 30 min après traitement, temps suffisamment court par rapport aux délais de maniabilité mesurés, et ainsi garantir un compactage satisfaisant.

3.3. Méthode de compactage

Les éprouvettes sont confectionnées par compression axiale selon la norme EN 13286-53. Le compactage du mélange sol-liants s'effectue dans un moule cylindrique de volume

connu en exerçant une pression axiale à l'aide de pistons aux deux extrémités du moule. Des cales d'espacement amovibles sont utilisées entre les embases des pistons et le corps du cylindre pendant l'opération de remplissage et de compactage afin de réduire les gradients de densité dans l'éprouvette (figure 2.11).

La qualité de compactage des éprouvettes a été vérifiée en passant certaines éprouvettes au banc Gamma (NF EN 12697-7). La masse volumique sèche varie au sein de l'éprouvette de l'ordre de 5 %.

Les objectifs de compactage sont :

- Teneur en eau : $w_{OPN} \pm 1 \%$;
- Masse volumique : $98,5 \% \rho_{dOPN} \pm 0,5 \%$.

Tableau 2.12 : Objectifs de compactage

Sol	Teneur en eau %	Masse volumique sèche (Mg/m^3)
Limon du Val d'Europe	21 ± 1	$1,63 < \rho_d < 1,65$
Sable de Bouër	10 ± 1	$1,80 < \rho_d < 1,82$



Figure 2.11 : Équipement de compactage des éprouvettes

3.4. Conservation des éprouvettes

Deux modes de conservation ont été utilisés dans cette étude :

- une conservation à teneur en eau initiale constante ; les échantillons sont alors emballés dans du papier cellophane, puis dans du papier aluminium ;
- une conservation par immersion ; après compactage, les éprouvettes sont immergées totalement dans l'eau à température voulue (NF P 94-100).

Les échantillons immergés ou laissés à teneur en eau initiale constante ont été conservés à deux températures différentes suivant les essais réalisés, 20 ou 40°C $\pm$ 2°C.

3.5. Les essais réalisés

Différents paramètres géotechniques et analyses physico-chimiques ont été suivis au cours du temps de cure ou d'immersion afin de caractériser l'effet de l'ajout de composés chimiques sur le traitement de nos sols.

3.5.1. Détermination des propriétés mécaniques

Plusieurs types d'essais ont été entrepris pour déterminer les propriétés mécaniques des sols traités. Il s'agissait de déterminer la résistance mécanique, en compression ou en traction, ainsi que le gonflement. L'influence des conditions de cure a aussi été prise en compte. Ainsi, différentes procédures ont été suivies, celles-ci étant décrites successivement dans cette partie. Pour pouvoir déterminer si l'influence d'un composé est significative, plusieurs essais sur les matériaux non perturbés ont été réalisés.

o Procédure I : Essai d'aptitude

L'essai d'aptitude a pour but de déterminer rapidement si un traitement est efficace. C'est un essai très usité, en France, lors des études préliminaires à un chantier. Pour cette raison, nous avons réalisé cet essai sur nos mélanges sols + composés chimiques. Ces essais ont été conduits selon la norme NF P 94-100 ; ils ont ainsi été réalisés sur des éprouvettes de diamètre et de hauteur 50 mm. Dans un premier temps, les éprouvettes ont été conservées à teneur en eau constante à 20°C, pendant un temps correspondant à 1,5 fois le délai de maniabilité. Trois éprouvettes, sorties de leurs trousse de fabrication, sont utilisées afin de mesurer les gonflements volumiques après immersion. Ces éprouvettes sont immergées dans une eau à 40°C après les avoir enveloppées dans un géotextile. Trois autres éprouvettes, conservées dans leurs trousse de fabrication, sont utilisées afin de mesurer les résistances à la traction indirecte par essai brésilien (figure 2.12), après immersion dans une eau à 40°C. Après 7 jours d'immersion, les gonflements volumiques et les résistances à la traction brésilienne sont mesurés. Pour l'essai brésilien, conformément à la norme NF EN 13286-42, la vitesse de déplacement de presse a été fixée à 0,05 mm.min⁻¹. Pour les gonflements volumiques, les volumes sont mesurés par pesées hydrostatiques (NF P 94-064). Les critères d'aptitude pour cet essai sont donnés dans le tableau 1.12.



Figure 2.12 : *Dispositif de mesure de la résistance à la traction brésilienne*

o *Procédure II : Essai de compression simple sans immersion*

Les essais de détermination de la résistance à la compression simple sans immersion ont été conduits selon la norme NF EN 13286-41, ils ont été ainsi réalisés sur des échantillons de diamètre 50 mm et de hauteur 100 mm. La vitesse de déplacement de la presse utilisée a été fixée à 1 mm.min^{-1} (figure 2.13). Les critères d'aptitude sont donnés dans le chapitre I (5.2.1).

o *Procédure III : Essai de compression simple après immersion*

Des essais de résistance à la compression simple après immersion ont également été réalisés. Selon cette procédure, les éprouvettes sont conservées, dans un premier temps, à teneur en eau initiale constante puis, après un temps défini, elles sont immergées dans de l'eau à la température voulue, le temps désiré. Il existe donc plusieurs variantes selon les besoins des différentes étapes de l'étude. Dans un premier temps, pour l'étude des perturbateurs du traitement des sols (cf. chapitre 3), la procédure utilisée a été définie ainsi : les éprouvettes sont conservées pendant 28 jours à teneur en eau initiale constante, puis elles sont immergées pendant 32 jours dans une eau à 20°C . Les résistances à la compression simple après immersion sont comparées à celles mesurées sur des échantillons conservés à teneur en eau constante pendant 60 jours. Les critères d'aptitude de cet essai sont donnés dans le chapitre I (5.2.1). Dans un second temps, le temps de conservation à teneur en eau initiale, le temps d'immersion et la température de l'eau d'immersion varient pour mesurer l'influence de chacun de ces paramètres sur le traitement des sols (cf. chapitre 4).



Figure 2.13 : Dispositif de mesure de la résistance à la compression simple

3.5.2. Caractérisations physico-chimiques

La microscopie électronique à balayage (MEB) a permis de caractériser certaines phases et de pouvoir connaître l'influence des différents composés chimiques sur la microstructure des sols traités. Cette méthode consiste à balayer sous vide la surface d'un fragment de sol sec métallisé (environ 1 cm³) avec un faisceau d'électrons. L'exploitation des électrons secondaires permet de reconstituer une image de la surface de l'échantillon. La métallisation de l'échantillon a pour but de rendre l'échantillon conducteur. Les observations ont été réalisées sur un MEB Hitachi S 570. L'équipement utilisé permet également d'effectuer des analyses ponctuelles qualitatives.

Des analyses de sols ont été réalisées pour déterminer la teneur en certains éléments, afin de caractériser les sols de référence ou de vérifier les concentrations de composés chimiques ajoutés aux sols. La technique d'analyse utilisée est la spectrométrie d'émission atomique à source plasma (ICP-AES).

4. PROPRIÉTÉS DES SOLS ÉTUDIÉS APRÈS TRAITEMENT

4.1. Le sable de Bouër

Dans cette partie, le traitement du sable de référence sans ajout, va être décrit et évalué à l'aide d'essais d'aptitude, de résistance à la compression simple et de résistance à la compression simple après immersion.

4.1.1. Données de compactage

Après traitement, quel que soit le ciment utilisé, la teneur en eau à l'optimum Proctor du sable de Bouër diminue à une valeur d'environ 10 % et la masse volumique sèche augmente à $1,83 \text{ Mg.m}^{-3}$ (figure 2.14).

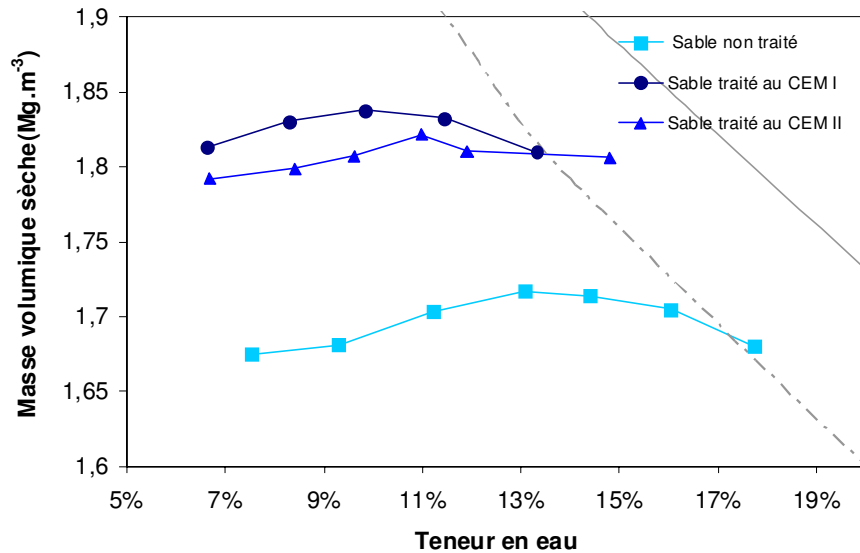


Figure 2.14 : Courbe Proctor du limon du Sable de Bouër

4.1.2. Délai de maniabilité

Le délai de maniabilité (NF EN 13286-45) est la durée, comptée à partir de la fin du malaxage, pendant laquelle la prise d'un liant reste nulle ou très faible. Les délais de maniabilité ont été mesurés par compactage Proctor normal différé. Les sols traités sont compactés de la même façon que lors de l'essai Proctor normal, en augmentant la valeur de t sur différents échantillons du mélange. La durée t correspond au temps entre la fin du malaxage (traitement) et le compactage des éprouvettes. Une fois compactées, on détermine leurs masses volumiques sèches. Le délai de maniabilité d'un mélange traité est ainsi déterminé comme le temps t qui correspond à la masse volumique apparente sèche $\rho(t)$ égale à 98 % de $\rho(0)$.

La figure 2.15 montrent les courbes de masse volumiques sèches en fonction du temps entre le traitement et le compactage. Le délai de maniabilité du sable de Bouër traité avec l'un ou l'autre des liants hydrauliques est de 700 minutes.

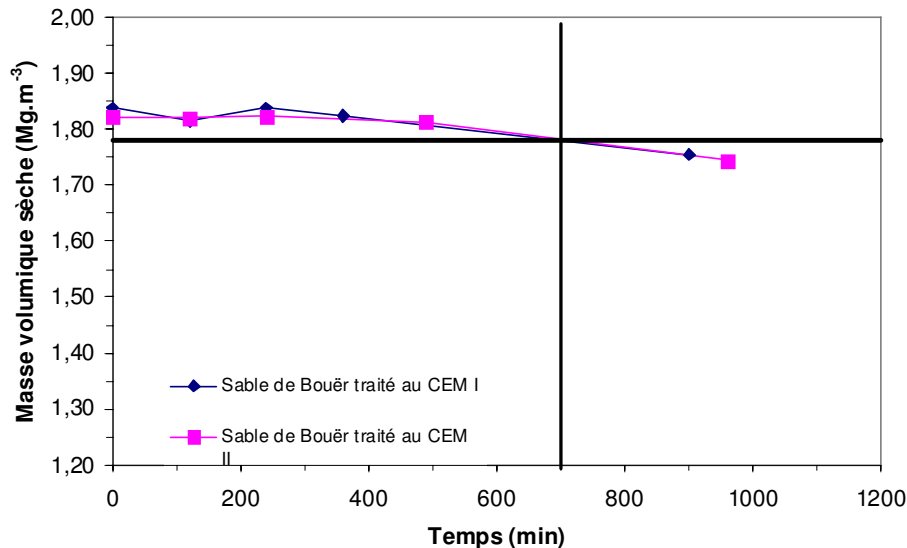


Figure 2.15 : Détermination du délai de maniabilité pour le sable de Bouër

4.1.3. Aptitude au traitement

Pour étudier l'aptitude au traitement, considérons les résultats obtenus à partir des mesures de gonflement volumique et de résistance à la traction indirecte. Celles-ci ont été réalisées dans ce cas précis sur le sable de Bouër traité aux liants hydrauliques de type CEM I ou CEM II.

o Sable de Bouër traité à un liant hydraulique de type CEM I

Les résultats des mesures de gonflement volumique, exprimés en pourcentage, sont représentés sur la figure 2.16. Les histogrammes en bleu et blanc représentent les 9 mesures faites sur le sable traité au CEM I. L'histogramme bleu donne la valeur moyenne de ces mesures pour ce sable de référence traité. On constate ainsi que le gonflement volumique varie, entre 0,29 % et 0,64 %, la moyenne étant de 0,47 %. L'écart type est faible, de l'ordre de 0,11 %.

La figure 2.17 représente les résultats des mesures de résistance à la traction indirecte (essai brésilien). Comme pour les résultats des gonflements volumiques, les 9 mesures de résistance à la traction indirecte sont données sous forme d'histogramme, les valeurs pour ce sable de référence sont données en bleu. Les mesures de résistance à la traction indirecte varient entre 0,177 MPa et 0,220 MPa. La moyenne de résistance à la traction indirecte est de 0,201 MPa. L'écart type est de 0,013 MPa.

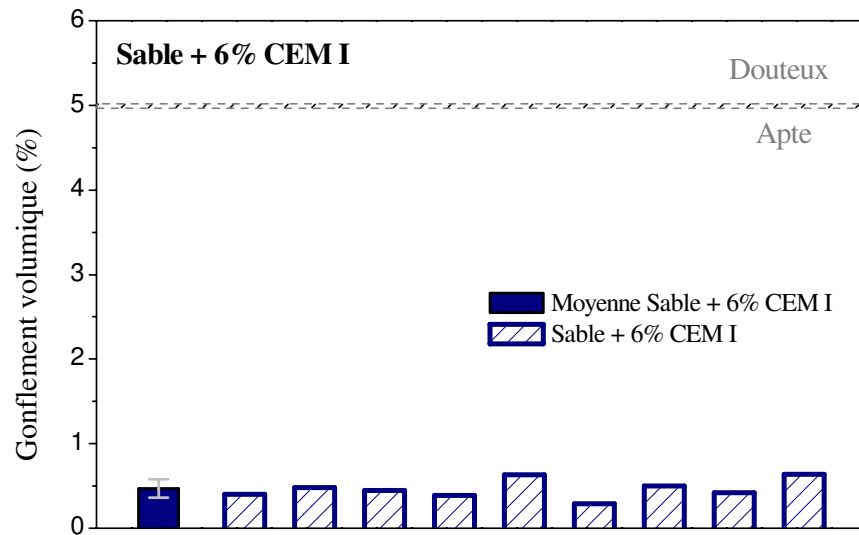


Figure 2.16 : Essai d'aptitude : gonflement volumique du sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM I

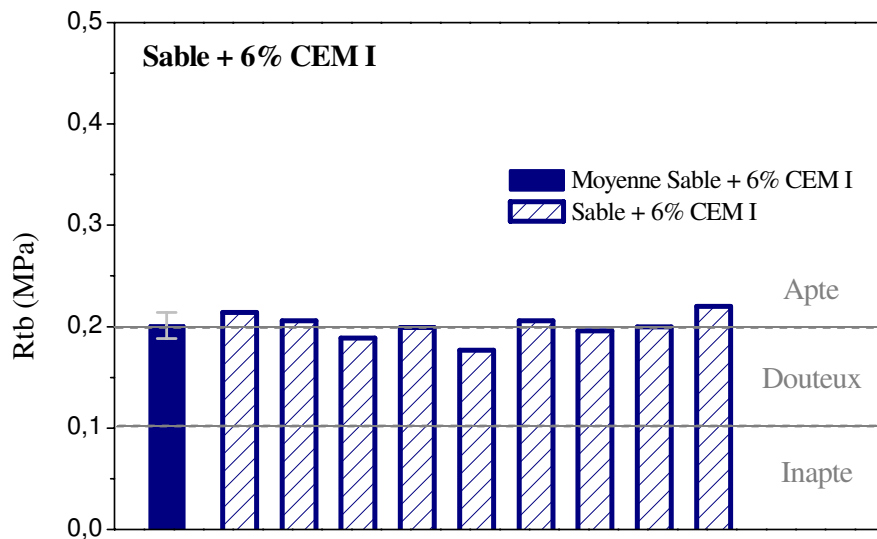


Figure 2.17 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM I

o Sable de Bouër traité à un liant hydraulique de type CEM II

Les résultats des mesures de gonflement volumique, exprimés en pourcentage, sont représentés sur la figure 2.18. Les mesures de gonflement volumique varient entre 0,34 % et 0,86 %. La moyenne de gonflement volumique est de 0,59 %. L'écart type est de 0,16 %.

La figure 2.19 représente les résultats des mesures de résistance à la traction indirecte (essai brésilien), exprimés en MPa. Les mesures de résistance à la traction indirecte varient entre 0,095 MPa et 0,120 MPa. La moyenne de résistance à la traction brésilienne est de 0,105 MPa. L'écart type est de 0,010 MPa.

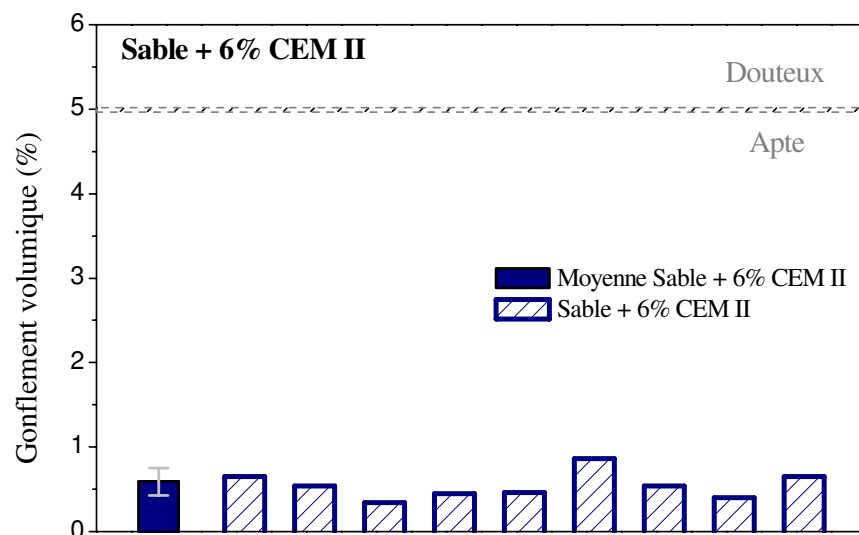


Figure 2.18 : Essai d'aptitude : gonflement volumique du sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM II

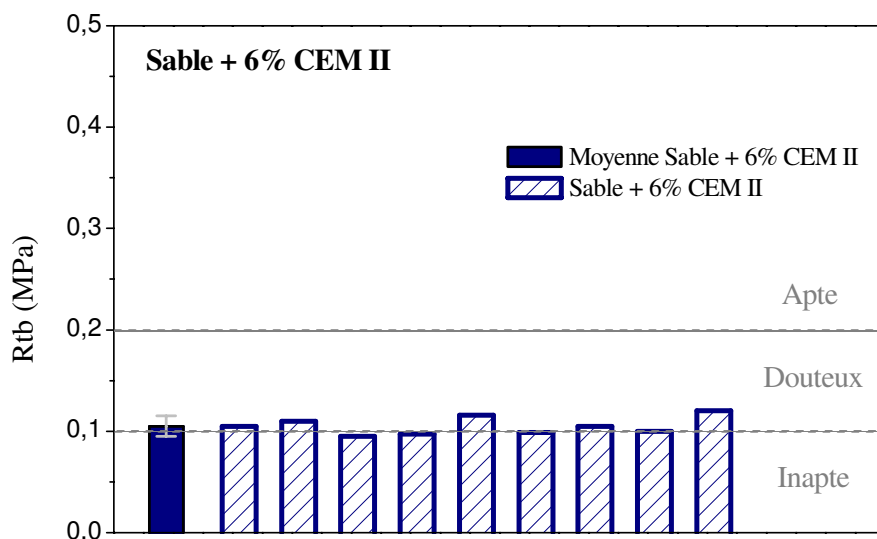


Figure 2.19 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM II

L'essai d'aptitude permet de déclarer le sable traité au liant hydraulique de type CEM I apte au traitement, malgré des valeurs de résistance à la traction brésilienne proche de 0,200 MPa (limite entre apte et douteux, cf. Tableau 1.12). Dans le cas du traitement avec le CEM II, le résultat se situe à la limite entre les domaines douteux et inapte.

4.1.4. Résistance à la compression simple sans immersion

Des essais mécaniques sur des éprouvettes non immergées de sable de Bouër traité aux liant hydraulique de type CEM I et CEM II ont permis d'évaluer leur résistance à la compression simple.

o *Sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM I*

La figure 2.20 représente la résistance à la compression simple en fonction du temps de cure du sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM I. En gris, apparaissent les bornes minimum et maximum correspondant à l'écart type calculé à partir des résultats de 10 essais de résistance à la compression simple pour le sable de référence. Après 180 jours de cure, la résistance à la compression simple est de 2,047 MPa pour ce sable traité avec du CEM I.

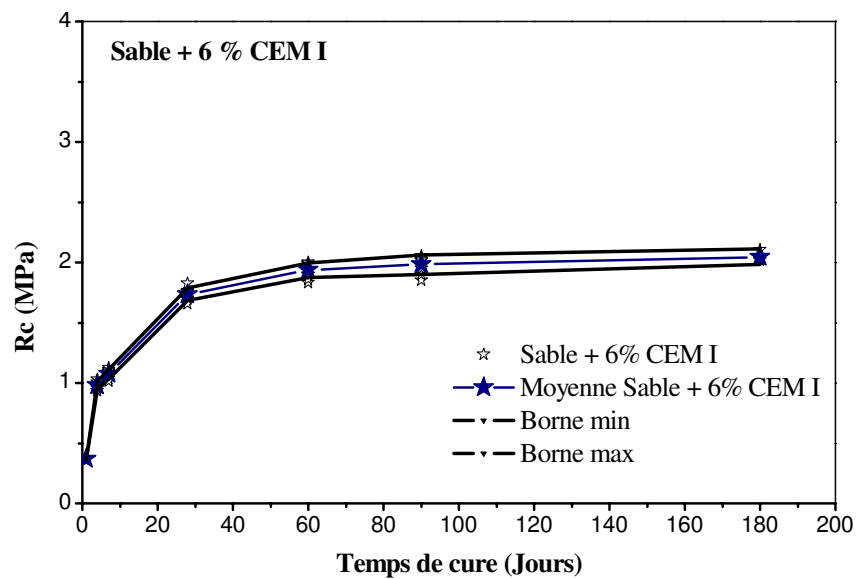


Figure 2.20 : Évolution de la résistance à la compression simple sur le sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM I avec le temps de cure

o *Sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM II*

La figure 2.21 donne la résistance à la compression simple en fonction du temps de cure du sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM II. Après 180 jours de cure, la résistance à la compression simple vaut 1,573 MPa pour le sable de référence traité au liant hydraulique de type CEM II.

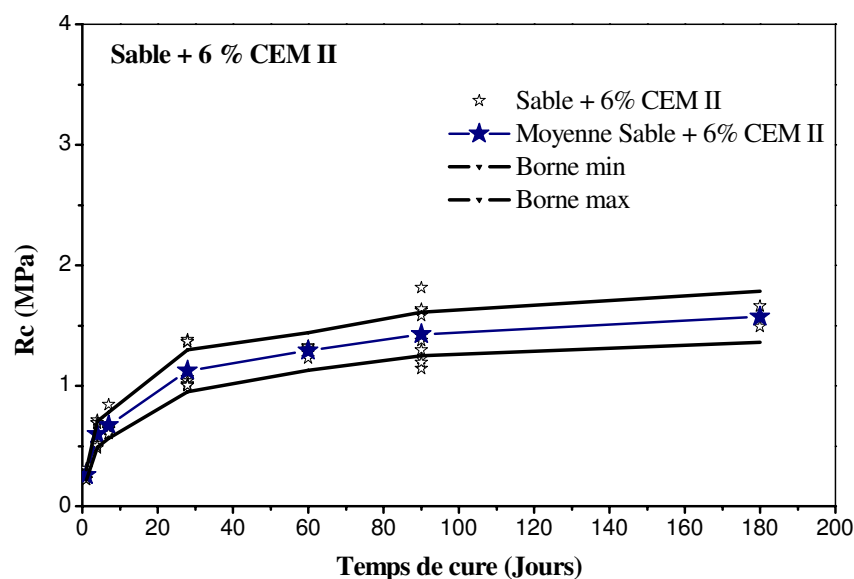


Figure 2.21 : Evolution de la résistance à la compression simple sur le sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM II avec le temps de cure

4.1.5. Résistance à la compression simple après immersion

Des essais mécaniques après immersion sur des éprouvettes de sable de Bouër traité aux liants hydrauliques de type CEM I et CEM II ont permis d'évaluer leurs résistances à la compression simple immergée.

○ Sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM I

Les résultats des mesures de résistance à la compression simple après immersion sont donnés dans le tableau 2.13. Le premier ensemble donne les résultats obtenus pour 8 mesures faites sur le sable traité au liant hydraulique de type CEM I, ensuite vient la moyenne de ces valeurs. Dans la première colonne, est répertoriée la moyenne des résistances à la compression simple (R_c) après une cure de 60 jours sans immersion (à teneur en eau constante), en MPa. Dans la deuxième colonne, on retrouve les mesures des résistances à la compression simple après immersion (R_{ci}), en MPa. La troisième colonne indique les rapports entre les résistances à la compression simple après immersion (R_{ci}) et les résistances à la compression simple non immergé (R_c). Les mesures de gonflement volumique après immersion, en pourcentage figurent dans la dernière colonne.

Les rapports R_{ci}/R_c varient donc entre 0,75 et 0,99 pour le sable de référence traité au liant hydraulique de type CEM I. Ces rapports sont supérieurs à 0,6, le sol traité est donc insensible à l'immersion conformément aux critères utilisés dans cet essai (cf. Chapitre 1, 5.1.1).

Tableau 2.13 : Résistance à la compression simple après immersion et de gonflement volumique sur le sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM I

	R _c 60 jours (MPa)	R _{ci} (MPa)	R _{ci} /R _c	Gv (%)
Sable + 6 % CEM I	1,936	1,879	0,97	0,16
		1,926	0,99	0,05
		1,918	0,99	0,15
		1,673	0,86	0,14
		1,610	0,83	0,14
		1,604	0,83	0,17
		1,461	0,75	0,12
		1,543	0,80	0,21
Moyenne sable + 6 % CEM I	1,936	1,702	0,88	0,14

o *Sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM II*

Le tableau 2.14 présente les résultats des mesures de résistance à la compression simple après immersion. Les rapports R_{ci}/R_c varient donc entre 0,75 et 0,89 pour le sable de référence traité au liant hydraulique de type CEM II. Ces rapports sont supérieurs à 0,6, le sol traité est donc insensible à l'immersion.

Tableau 2.14 : Résistance à la compression simple après immersion et de gonflement volumique sur le sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM II

	R _c 60 jours (MPa)	R _{ci} (MPa)	R _{ci} /R _c	Gv (%)
Sable + 6 % CEM II	1,289	1,054	0,82	0,05
		1,078	0,84	0,12
		1,007	0,78	0,23
		1,102	0,86	0,12
		1,107	0,86	0,37
		1,053	0,82	0,40
		1,141	0,89	0,15
		0,966	0,75	0,05
Moyenne sable + 6 % CEM II	1,289	1,064	0,83	0,19

4.1.6. Microstructure du Sable de Bouër après traitement

L'observation au MEB des éprouvettes de sable de Bouër traité au liant CEM I permet de mettre en évidence le recouvrement des grains de quartz par les phases cimentaires (figure 2.22). Ce ciment assure la transition entre les différents éléments. On remarque une fermeture

de la porosité par le développement des hydrates du ciment (figure 2.23). Ces observations sont identiques pour les éprouvettes de sable de Bouër traité au liant CEM II (figures 2.24 et 2.25).

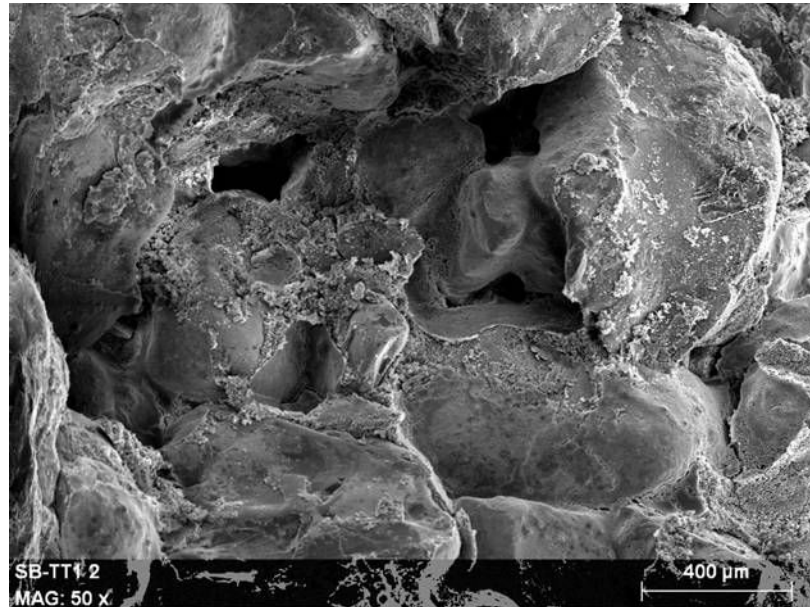


Figure 2.22 : Observation de surface au MEB du sable de Bouër traité au CEM I (x 50)

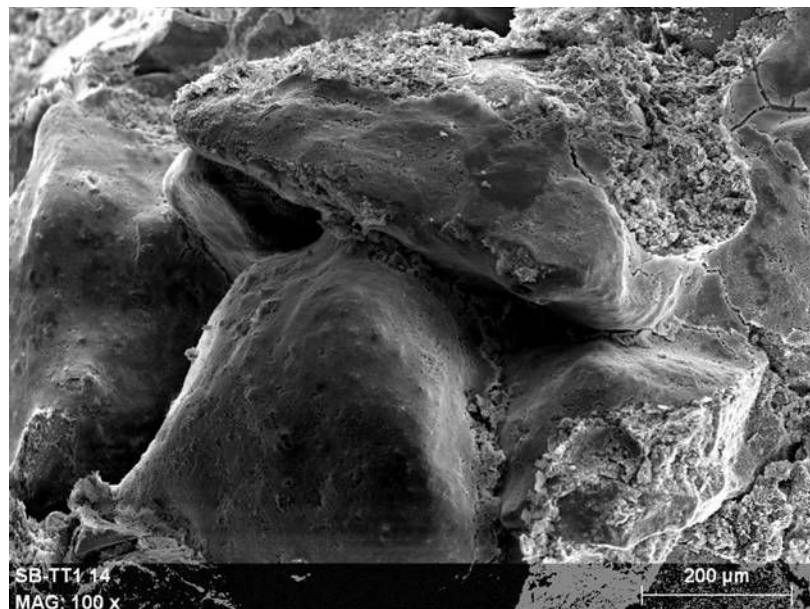


Figure 2.23 : Observation de détails de surface au MEB du sable de Bouër traité au CEM I (x 100)

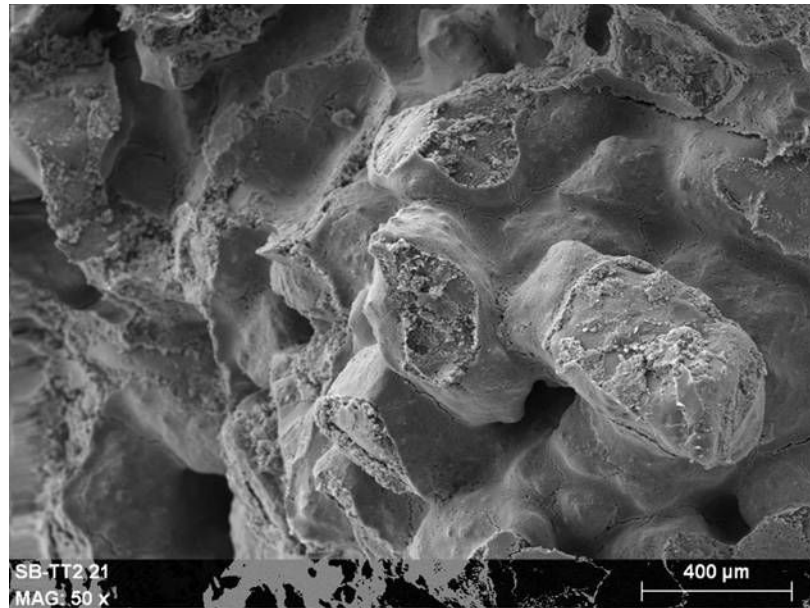


Figure 2.24 : Observation de surface au MEB du sable de Bouër traité au CEM II (x 50)

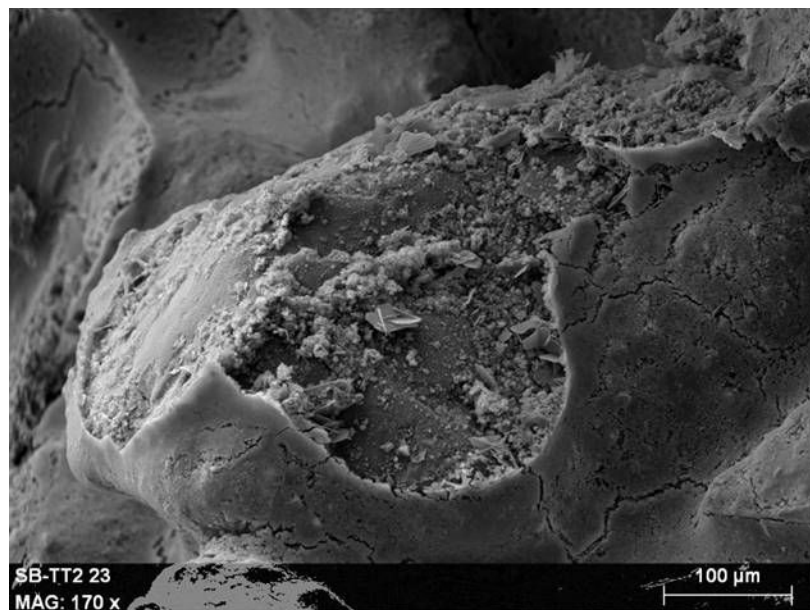


Figure 2.25 : Observation de détail de surface au MEB du sable de Bouër traité au CEM II (x 170)

4.1.7. Bilan des propriétés du Sable de Bouër après traitement

Le sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM I possède des caractéristiques mécaniques moyennes. En effet, les mesures de résistance à la traction brésilienne de l'essai d'aptitude sont à la limite du domaine des sols douteux et aptes (0,200 MPa). Les mesures de résistance à la compression simple sont également moyennes, à 180 jours, elles sont de 2,047 MPa, inférieures à 2,5 MPa. Le sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM II possède des caractéristiques mécaniques relativement faibles. En

effet, les mesures de résistance à la traction brésilienne classent le sol à la limite des sols douteux et inaptes au traitement. De plus, les mesures de résistance à la compression simple sont également faibles, à 180 jours, elles sont de 1,573 MPa.

Le but de la première partie de l'étude est de comparer le sable de référence à des mélanges sable + composés chimiques. Même si les caractéristiques mécaniques du sable sont faibles, les essais ont montré qu'il existait une prise. L'étude des effets de composés chimiques sur le traitement des sols avec les deux types de liant CEM I et CEM II a donc été poursuivie.

4.2. Le limon du Val d'Europe

Dans cette partie, le traitement du limon du Val d'Europe LVE va être évalué à l'aide d'essais d'aptitude, d'essais de résistance à la compression simple et enfin d'essais de résistance à la compression simple après immersion.

4.2.1. Données de compactage

Après traitement, quel que soit le ciment utilisé, la teneur en eau à l'optimum Proctor du limon du Val d'Europe augmente à 21 % et la masse volumique diminue à $1,67 \text{ Mg.m}^{-3}$ (figure 2.26).

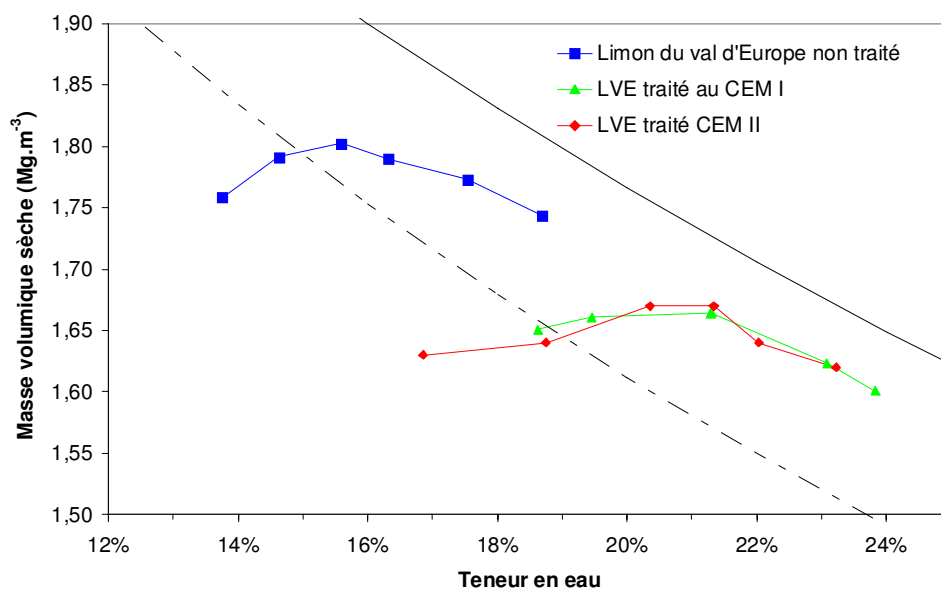


Figure 2.26 : Courbe Proctor du limon du Val d'Europe traité et non traité

4.2.2. Délai de maniabilité

Les délais de maniabilité pour les mélanges limon et liant hydraulique de type CEM I ou de type CEM II ont été mesurés par compactage Proctor normal différé. Sur la figure 2.27 sont représentées les courbes de masse volumique sèche en fonction du temps entre le traitement et le compactage. Pour le limon du Val d'Europe, le délai de maniabilité a été déterminé à 90 min lorsque l'on utilise le liant hydraulique de type CEM I et à 120 min lorsque l'on utilise le liant hydraulique de type CEM II.

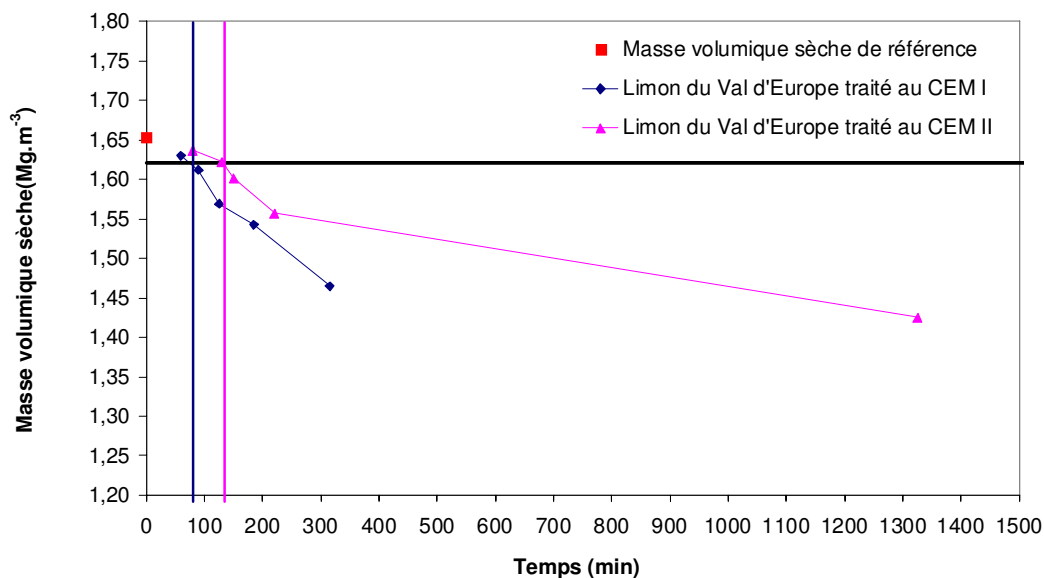


Figure 2.27 : Détermination du délai de maniabilité pour le limon du Val d'Europe

4.2.3. Aptitude au traitement

Afin d'évaluer l'aptitude au traitement, considérons les résultats obtenus à partir des mesures de gonflement volumique et de résistance à la traction indirecte. Celles-ci ont été réalisées dans ce cas précis sur plusieurs éprouvettes de limon du Val d'Europe traité à la chaux et aux liants hydrauliques de type CEM I ou CEM II.

o Limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I

Les résultats des mesures de gonflement volumique, exprimées en pourcentage, sont représentés sur la figure 2.28. Le gonflement volumique varie entre 0,18 % et 0,47 %. La moyenne de gonflement volumique est de 0,33 %. Il n'y a pas d'écart important entre les différentes mesures de gonflement volumique, l'écart type est ainsi de 0,09 %. La figure 2.29 représente les résultats des mesures de résistance à la traction indirecte (essai brésilien). Les mesures de résistance à la traction indirecte varient entre 0,457 MPa et 0,576 MPa. La

moyenne des résistances à la traction brésilienne est de 0,516 MPa. L'écart type est de 0,041 MPa.

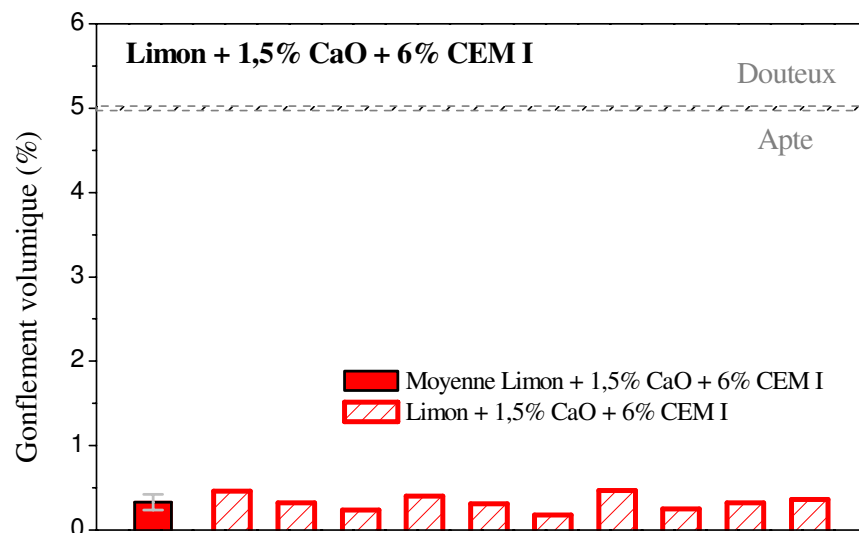


Figure 2.28 : Essai d'aptitude : gonflement volumique du limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I

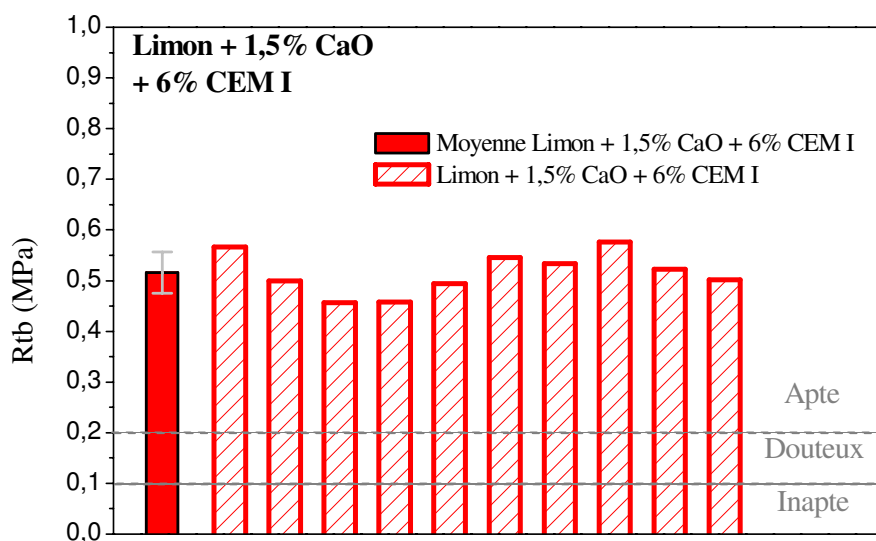


Figure 2.29 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte du limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I

o Limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II

Les valeurs des mesures de gonflement volumique, exprimés en pourcentage, sont indiquées sur la figure 2.30. Le gonflement volumique varie entre 0,12 % et 0,32 %. La moyenne de gonflement volumique est de 0,21 %. Il n'y a pas d'écart important entre les différentes mesures de gonflement volumique, l'écart type est ainsi de 0,07 %.

La figure 2.31 représente les résultats des mesures de résistance à la traction indirecte (essai brésilien), exprimés en MPa. La résistance à la traction indirecte varie entre 0,404 MPa

et 0,501 MPa. La moyenne des résistances à la traction brésilienne est de 0,436 MPa. L'écart type est de 0,030 MPa.

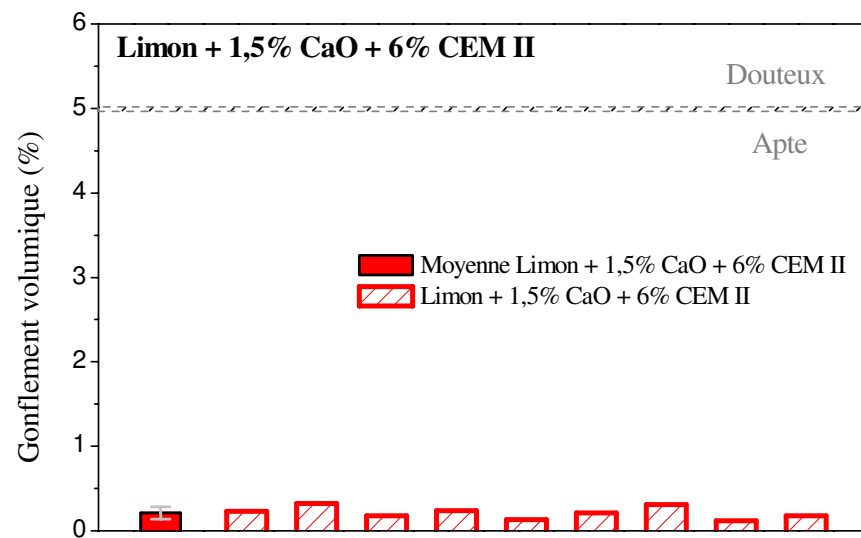


Figure 2.30 : Mesures de gonflement volumique sur le limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II

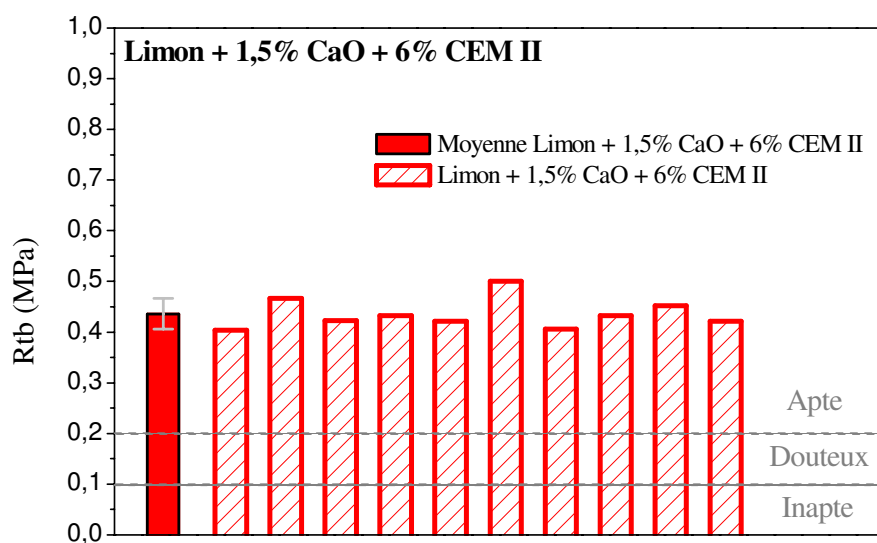


Figure 2.31 : Mesures de résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II

4.2.4. Résistance à la compression simple sans immersion

Des essais mécaniques sur des éprouvettes non immergées de limon du Val d'Europe traité à la chaux et aux liants hydrauliques de type différents ont fourni leur résistance à la compression simple.

o Limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I

Les mesures de résistance à la compression simple en fonction du temps de cure sont indiquées dans la figure 2.32. La courbe du limon du Val d'Europe de référence est en rouge.

En gris sont représentées les bornes minimum et maximum correspondant à l'écart type calculé sur dix mesures de résistance à la compression simple pour le limon de référence. Après 180 jours de cure, la résistance à la compression simple est de 7,778 MPa pour le limon du Val d'Europe de référence traité.

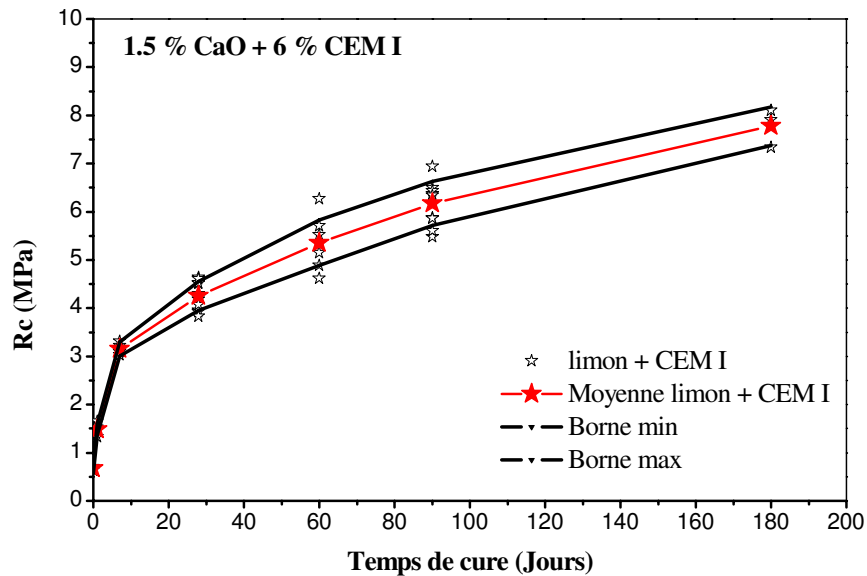


Figure 2.32 : Évolution de la résistance à la compression simple du limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I avec le temps de cure

○ Limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II

La figure 2.33 représente les valeurs de résistance à la compression simple en fonction du temps de cure. La courbe rouge correspond à celle du limon du Val d'Europe de référence. Après 180 jours de cure, la résistance à la compression simple vaut 6,978 MPa pour le limon de référence traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II.

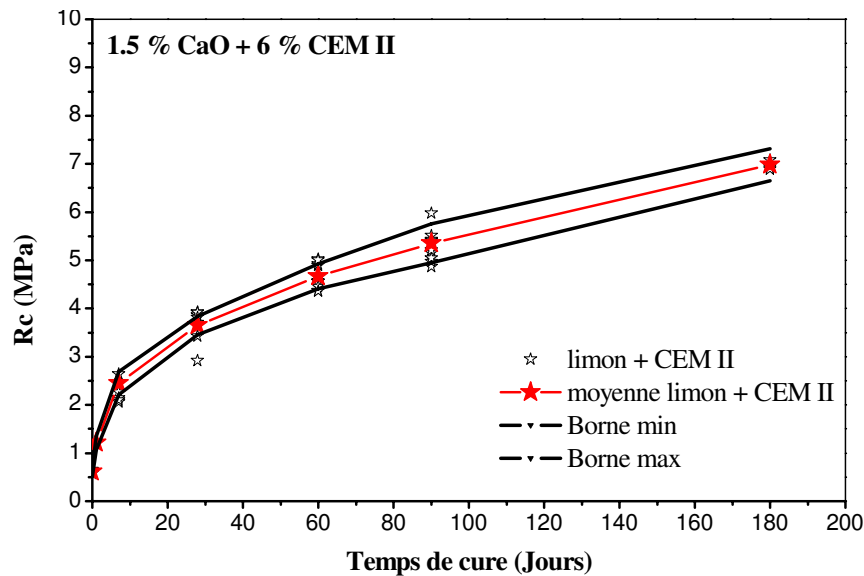


Figure 2.33 : Évolution de la résistance à la compression simple sur le limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II avec le temps de cure

4.2.5. Résistance à la compression simple après immersion

Des essais mécaniques sur des éprouvettes après immersion de mélange de limon du Val d'Europe traité à la chaux et aux liants hydrauliques de type différents ont fourni leurs résistances à la compression simple.

o Limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I

Les résultats des valeurs de résistance à la compression simple après immersion sont répertoriés dans le tableau 2.15. Le premier ensemble donne les résultats obtenus pour plusieurs mesures faites sur le limon traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I, ensuite vient la moyenne de ces valeurs. Les rapports R_{ci}/R_c varient donc entre 0,85 et 0,89 pour le limon de référence traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I. Ces rapports sont supérieurs à 0,8, ce qui traduit un impact relativement faible de l'immersion sur les propriétés mécaniques du sol après traitement.

Tableau 2.15 : Résistance à la compression simple après immersion et de gonflement volumique sur le limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I

	R _c 60 jours (MPa)	R _{ci} (MPa)	R _{ci} /R _c	Gv (%)
Limon + 1,5 % CaO + 6 % CEM I	5,357	4,574	0,85	0,12
		4,564	0,85	0,24
		4,702	0,88	0,15
		4,754	0,89	0,32
		4,543	0,85	0,21
		4,568	0,85	0,32
		4,543	0,85	0,12
		4,654	0,87	0,15
Moyenne limon		4,613	0,86	0,20

o *Limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II*

La résistance à la compression simple après immersion figure dans le tableau 2.16. Les rapports R_{ci}/R_c varient donc entre 0,74 et 0,92 pour le limon de référence traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II. La moyenne de ces rapports (0,84) est supérieure à 0,8 le sol traité est donc insensible à l'immersion.

Tableau 2.16 : Résistance à la compression simple après immersion et de gonflement volumique sur le limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II

	R _c 60 jours (MPa)	R _{ci} (MPa)	R _{ci} /R _c	Gv (%)
Limon + 1,5 % CaO + 6 % CEM II	4,668	3,468	0,74	0,32
		3,931	0,84	0,22
		3,675	0,79	0,15
		4,307	0,92	0,29
		4,081	0,87	0,28
		4,279	0,92	0,65
		4,171	0,89	0,07
		3,531	0,76	0,15
Moyenne limon + 1,5 % CaO + 6 % CEM I		3,930	0,84	0,27

4.2.6. Microstructure du limon de Val d'Europe après traitement

L'observation en microscopie électronique en balayage d'une éprouvette de limon traitée à la chaux et au liant hydraulique montre que l'addition de chaux vive et de liant hydraulique de type CEM I entraîne une fermeture de la microstructure de nos échantillons avec développement d'un ciment dense entre les particules de sol (figure 2.34).

La figure 2.35 illustre l'effet de l'addition mixte de chaux et de ciment qui conduit au développement d'un recouvrement des particules. Celui-ci est probablement l'expression de phases amorphes ou d'un gel qui induisent une modification du comportement mécanique macroscopique.

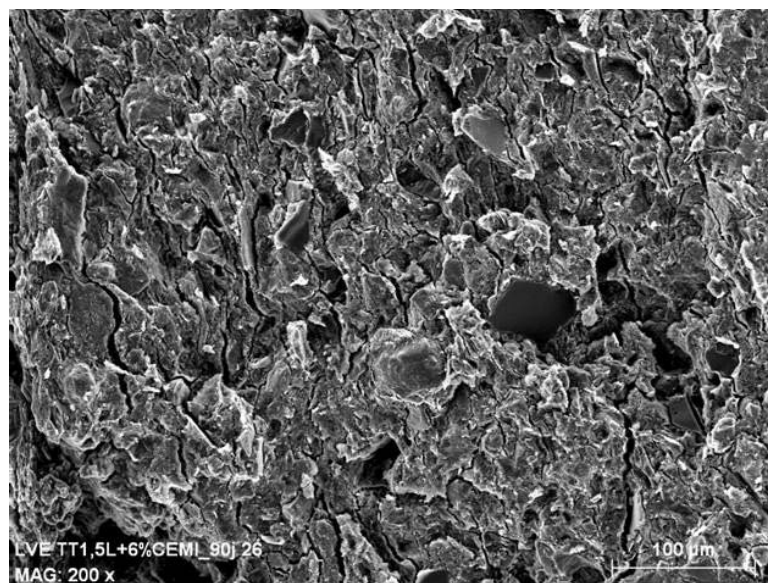


Figure 2.34 : Observation de surface au MEB du limon du Val d'Europe traité à la chaux et CEM I (x 200)

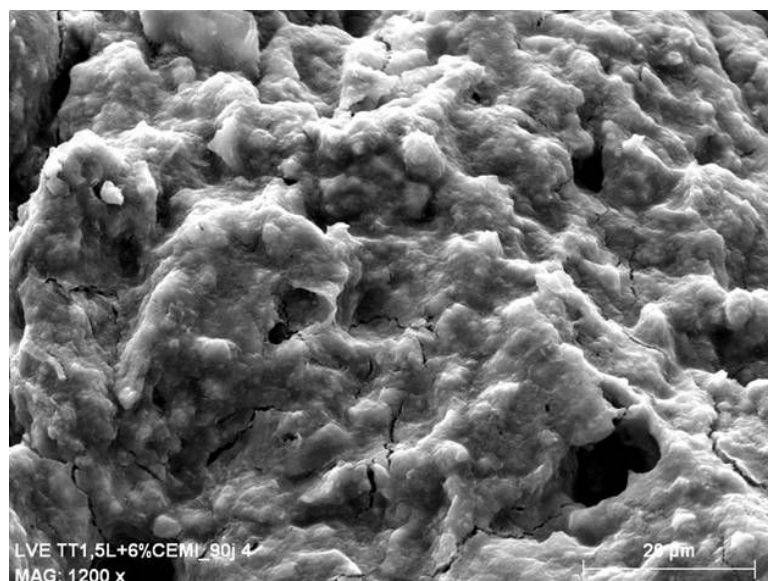


Figure 2.35 : Observation au MEB, recouvrement des particules du sol par les phases cimentaires (x 1200)

Les observations réalisées sur les éprouvettes de limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I sont identiques pour les éprouvettes de limon traité au CEM II (figures 2.36 et 2.37).

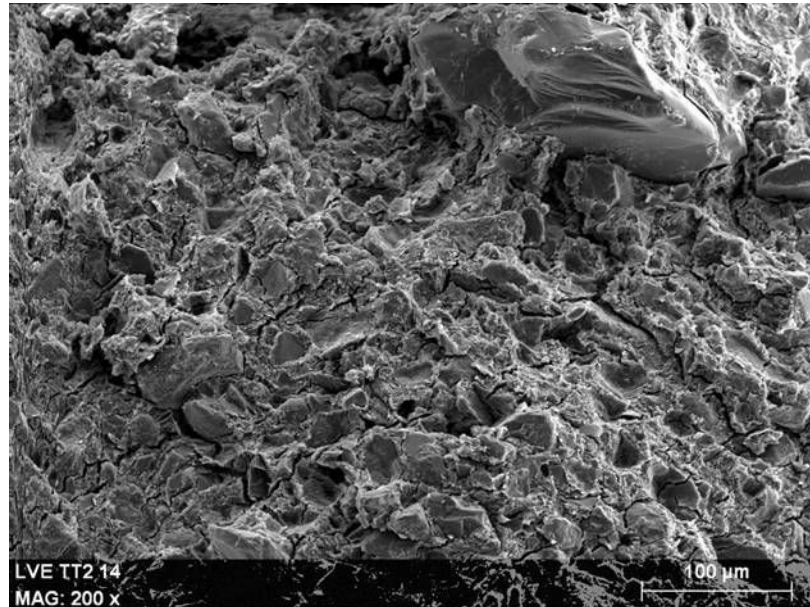


Figure 2.36 : Observation de surface au MEB du limon du Val d'Europe traité à la chaux et CEM II (x 200)

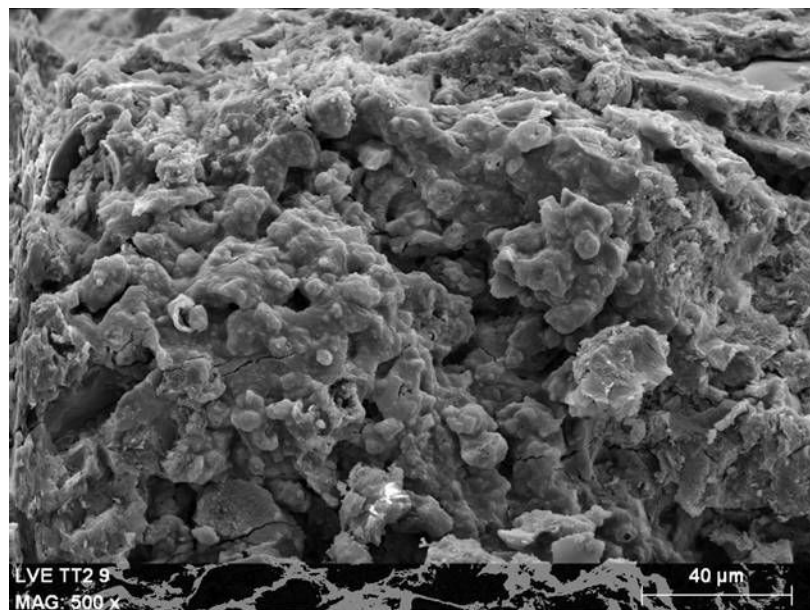


Figure 2.37 : Observation de détail au MEB montrant le recouvrement des particules du sol par les phases cimentaires (x 500)

4.2.7. Bilan des propriétés du limon du Val d'Europe après traitement

Le limon du Val d'Europe traité à la chaux et aux liants hydrauliques de type CEM I ou CEM II possède de très bonnes caractéristiques mécaniques. Les essais d'aptitude permettent de classer le limon apte aux traitements. Les résistances à la compression simple

sont supérieures aux conditions exposées dans le GTS (LCPC-SETRA, 2000). Enfin, le limon est insensible à l'immersion.

5. CONCLUSION

Ce chapitre a permis de présenter la méthode de travail retenue, à savoir l'utilisation de sol reconstitué au laboratoire pour étudier l'influence de certains composés chimiques sur le traitement des sols. Les sols à traiter seront reconstitués en mélangeant un élément chimique à des dosages représentatifs de ceux observés dans les sols, ceci permettra le cas échéant de conclure sur l'effet perturbateur d'un constituant dans un cadre général et de savoir s'il existe un seuil de perturbation. Cette méthode de travail devrait permettre de mettre en évidence l'action isolée d'un seul perturbateur, de la présence de fines, et de la concentration.

Afin de quantifier l'impact des composés chimiques retenus sur le traitement des sols, différents procédures expérimentales permettant d'évaluer la résistance et le gonflement des sols traités ont été retenues. Ces procédures ont été décrites dans ce chapitre.

Enfin, les propriétés de résistance à la compression simple, à la traction et le gonflement après immersion des sols retenus dans l'étude et traités avec les liants sélectionnés ont été déterminées. Ces données géotechniques ont été complétées par une analyse au MEB de la microstructure des sols utilisés dans l'étude, avant et après traitement. Elles serviront de données de référence pour quantifier l'impact d'un perturbateur dans le reste du travail, et notamment le chapitre III, qui doit permettre de répondre aux objectifs suivants :

- Identification des composés chimiques réellement perturbateurs du traitement des sols.
- Mise en évidence de seuils de perturbation.

CHAPITRE 3. IDENTIFICATION DES COMPOSÉS CHIMIQUES PERTURBATEURS DU TRAITEMENT DES SOLS

Le premier objectif de cette partie est de parvenir à évaluer qualitativement et quantitativement l'impact d'un certain nombre de composés chimiques sur l'efficacité du traitement des sols à la chaux et/ou au liant hydraulique. Ces travaux permettront de déterminer si ces composés peuvent être considérés ou non comme des éléments perturbateurs du traitement des sols. Par ailleurs, la bibliographie a permis de montrer que le dosage, la nature du liant et le type de sol joue un grand rôle sur l'effet d'un traitement. Les résultats seront donc traités en prenant en compte explicitement ces paramètres. De plus, l'analyse des données disponibles a montré que des teneurs maximales admissibles avaient été proposées pour qu'un traitement soit réussi, notamment dans le cas des composés soufrés. Une grande disparité du seuil à partir duquel un effet du perturbateur est observé avait été relevée. Le deuxième objectif de cette partie est de tenter d'identifier un seuil maximal admissible pour chacun des éléments considérés.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons tout d'abord cherché à déterminer l'impact de la présence d'un perturbateur dans chacun des deux sols de référence (cf chapitre 2). Ainsi, les effets de l'ajout de chlorure, nitrate et phosphate sur le traitement seront successivement abordés. Dans un dernier temps, la notion de seuil maximal admissible sera discutée.

Dans les cas significatifs, c'est-à-dire quand un élément altère le traitement (baisse de performance mécanique ou gonflement volumique), nous avons procédé à des investigations physico-chimiques à partir d'observations en microscopie électronique à balayage.

1. INFLUENCE DE LA PRÉSENCE D'UN CHLORURE SUR LE TRAITEMENT DES SOLS

Le chlorure a été ajouté à nos sols sous forme de chlorure de sodium, NaCl. Les concentrations pour l'étude ont été choisies à 100 mg.kg^{-1} pour le dosage faible et à 2000 mg.kg^{-1} pour le dosage fort (cf. 2.1.5). Cette partie présente le gonflement volumique, la résistance à la traction brésilienne et la résistance à la compression simple avant et après immersion des mélanges sable de Bouër + NaCl, puis sur les mélanges limon du Val d'Europe + NaCl. Ces mélanges ont été traités selon les modalités détaillées dans le chapitre 2 (cf. partie 3.3).

1.1. Influence d'un chlorure sur le traitement du sable de Bouër

1.1.1. Résultats des essais d'aptitude au traitement

On a évalué l'aptitude au traitement à partir du gonflement volumique et de la résistance à la traction indirecte. Celles-ci ont été réalisées dans ce cas précis sur des mélanges sable de Bouër + NaCl traités aux liants hydrauliques de type CEM I et CEM II.

o Mélange sable de Bouër + NaCl + CEM I

Le gonflement volumique est représenté sur la figure 3.1 et comparé avec les valeurs du sable traité sans NaCl. Ainsi, pour le faible dosage en chlorure, le gonflement volumique varie entre 0,33 % et 0,63 %, alors que, pour le dosage fort, la variation est comprise entre 0,12 % et 0,32 %. Le gonflement volumique n'est pas affecté de manière significative par l'ajout de NaCl, pour les concentrations retenues dans cette étude.

La figure 3.2 représente la résistance à la traction indirecte (essai brésilien). Pour le faible dosage en NaCl, la résistance à la traction indirecte varie entre 0,19 MPa et 0,21 MPa, alors que, pour le dosage fort, la variation est comprise entre 0,23 MPa et 0,24 MPa. Ces résultats permettent de montrer que le NaCl, à forte concentration, modifie la résistance à la traction indirecte, en l'améliorant de l'ordre de 15 % par rapport au sol de référence ne contenant pas de NaCl avant traitement.

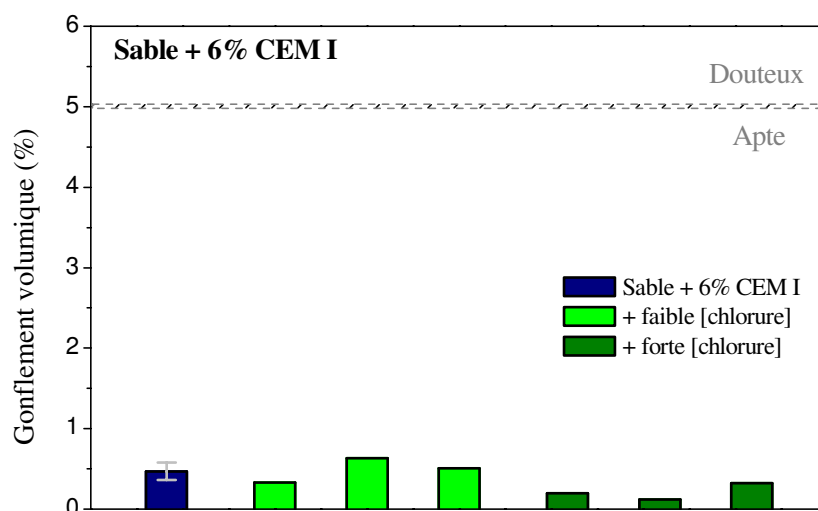


Figure 3.1 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange sable de Bouër + NaCl + CEM I ([dosage faible] = 100 mg.kg^{-1} NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg^{-1} NaCl)

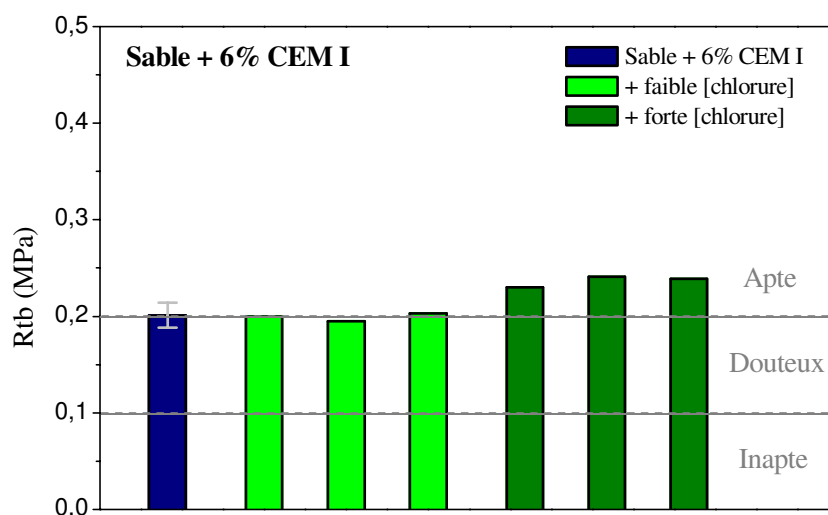


Figure 3.2 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange sable de Bouër + NaCl + CEM I ([dosage faible] = 100 mg.kg^{-1} NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg^{-1} NaCl)

o Mélange sable de Bouër + NaCl + CEM II

Le gonflement volumique mesuré lors des essais est reporté sur la figure 3.3. Pour le faible dosage en NaCl, le gonflement volumique varie entre 0,11 % et 0,78 %, alors que, pour le dosage fort, la variation est entre 0,25 % et 0,50 %. Il n'y a donc pas d'impact de la présence du NaCl sur le gonflement pour les concentrations retenues dans cette étude.

La figure 3.4 représente les résultats des mesures de résistance à la traction indirecte (essai brésilien). Pour le faible dosage en NaCl, la résistance à la traction indirecte varie entre 0,07 MPa et 0,11 MPa, pour le dosage fort, les mesures varient entre 0,09 MPa et 0,15 MPa. La résistance à la traction indirecte n'est pas modifiée lorsque le NaCl est présent à la faible

concentration, alors que, présent au fort dosage, le NaCl conduit à une résistance à la traction indirecte supérieure de 20 % à celle obtenue lorsque le sol n'en contient pas.

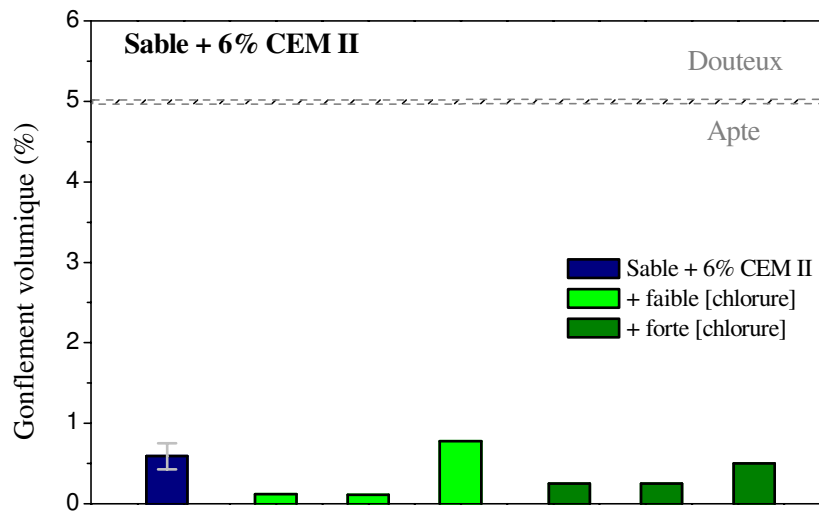


Figure 3.3 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange sable de Bouër + NaCl + CEM II ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

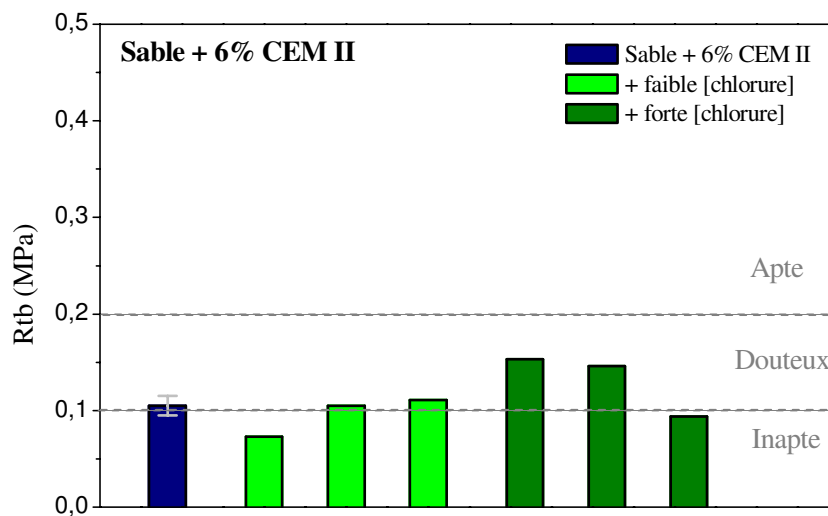


Figure 3.4 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange sable de Bouër + NaCl + CEM II ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

1.1.2. Résistance à la compression simple sans immersion

Des essais mécaniques sur des éprouvettes non immergées de mélanges de sable de Bouër + NaCl traités aux liants hydrauliques de type différent ont servi à évaluer la résistance à la compression simple.

o Mélange sable de Bouër + NaCl + CEM I

La figure 3.5 représente les mesures de résistance à la compression simple en fonction du temps de cure. Les résistances à la compression simple sont plus élevées avec le ciment CEM I. Après 180 jours de cure, la résistance à la compression simple est de 2,59 MPa pour le dosage fort et de 2,27 MPa pour le dosage faible, alors que pour le sable de référence traité, elle vaut 2,05 MPa, soit une augmentation de 21,1 %. De plus, les gains de résistance à la compression simple sont très importants au jeune âge : la cinétique de prise est accélérée par l'ajout de NaCl à fort dosage. La résistance à la compression reste stable à partir de 28 jours pour le sable perturbé, alors que pour le sable seul traité, le plateau de résistance est atteint en 60 jours.

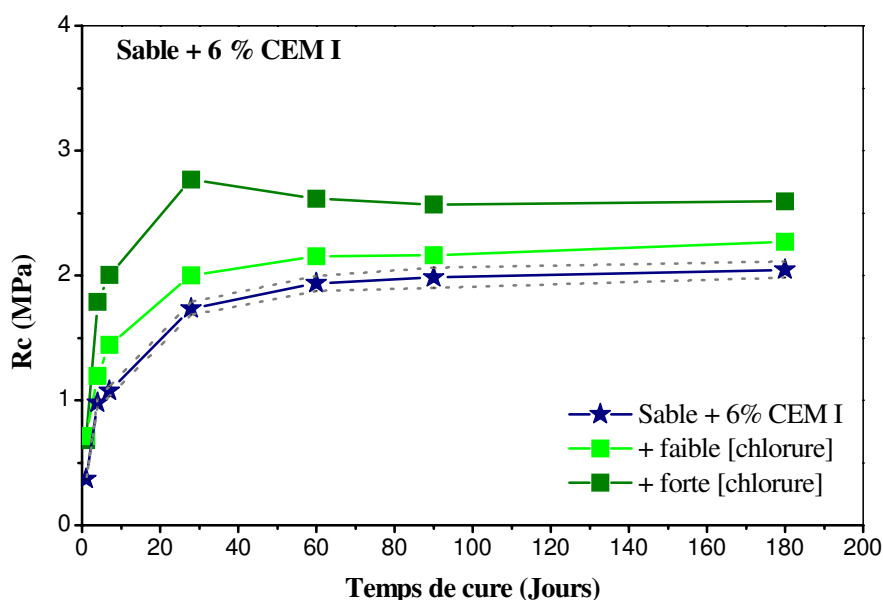


Figure 3. 5 : Evolution de la résistance à la compression simple du mélange sable de Bouër + NaCl + CEM I ([dosage faible] = 100 mg.kg^{-1} NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg^{-1} NaCl)

o Mélange sable de Bouër + NaCl + CEM II

La figure 3.6 représente les mesures de résistance à la compression simple en fonction du temps de cure. Les résistances à la compression simple du mélange Sable de Bouër + NaCl + CEM II sont du même ordre de grandeur que celle du sable de référence traité. Après 180 jours de cure, la résistance à la compression simple vaut 1,57 MPa pour le sable de référence traité, 1,76 MPa pour le dosage fort en chlorure et 1,92 MPa pour le dosage faible. Ces résistances sont comprises dans l'intervalle des valeurs pour le sol non perturbé, elles ne sont donc pas significativement influencées par la présence de NaCl dans le sol au moment du traitement.

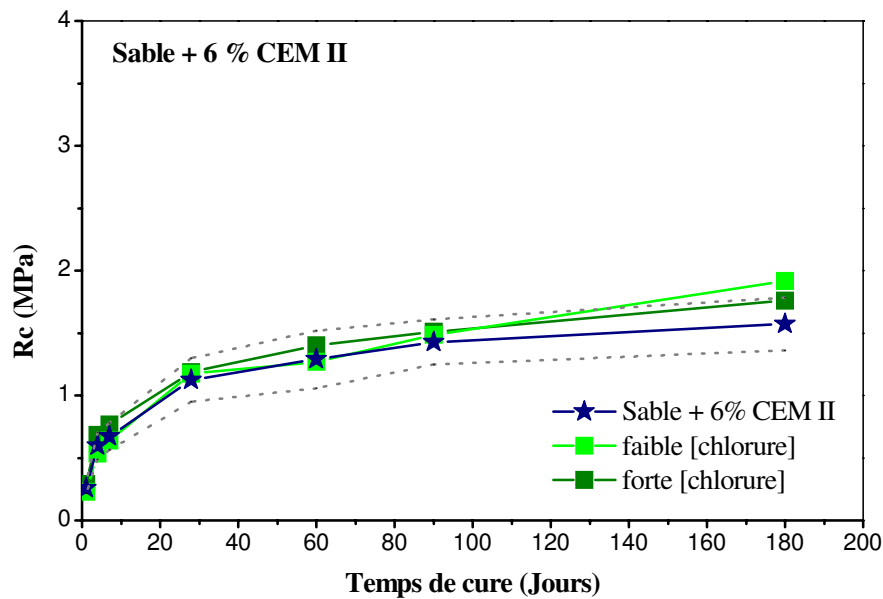


Figure 3.6 : Evolution de la résistance à la compression simple du mélange sable de Bouër + NaCl + CEM II en fonction du temps ([dosage faible] = 100 mg.kg^{-1} NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg^{-1} NaCl)

1.1.3. Résistance à la compression simple après immersion

o Mélange sable de Bouër + NaCl + CEM I

Les résultats des mesures de résistance à la compression simple après immersion sont donnés dans le tableau 3.1. Les rapports R_{ci}/R_c varient entre 0,73 et 0,84 pour le faible dosage en NaCl et de 0,78 à 0,93 pour le fort dosage. Les rapports R_{ci}/R_c et les gonflements volumiques, lorsque du NaCl est présent dans le sol avant son traitement au liant hydraulique de type CEM I, sont du même ordre de grandeur que ceux du sable de référence ne contenant pas de NaCl. Ces rapports sont supérieurs ou très proches de 0,8, les échantillons peuvent donc être considérés comme insensibles à l'immersion.

Tableau 3.1 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflements volumiques du mélange sable de Bouër + NaCl + CEM I ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

	R _c 60 jours (MPa)	R _{ci} (MPa)	R _{ci} /R _c	Gv (%)
Sable + 6% CEM I	1,94	1,70	0,88	0,14
+ faible [chlorure]	2,15	1,70	0,79	0,01
		1,57	0,73	0,18
		1,81	0,84	0,44
+ forte [chlorure]	2,61	2,42	0,93	0,13
		2,13	0,82	0,13
		2,04	0,78	0,09

o Mélange sable de Bouër + NaCl + CEM II

Les résultats des mesures de résistance à la compression simple après immersion sont reportés dans le tableau 3.2. Les rapports R_{ci}/R_c varient entre 0,91 et 0,95 pour le faible dosage en NaCl et de 0,89 à 0,94 pour le fort dosage. Les rapports R_{ci}/R_c et les gonflements volumiques dans le cas du traitement au liant hydraulique de type CEM II sont du même ordre de grandeur que celles du sable de référence. Par ailleurs, ces rapports sont supérieurs à 0,8, les échantillons sont donc insensibles à l'immersion.

Tableau 3.2 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange sable de Bouër + NaCl + CEM II ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

	R _c 60 jours (MPa)	R _{ci} (MPa)	R _{ci} /R _c	Gv (%)
Sable + 6% CEM II	1,29	1,06	0,83	0,19
+ faible [chlorure]	1,27	1,15	0,91	0,17
		1,20	0,95	0,04
		1,17	0,92	0,46
+ forte [chlorure]	1,40	1,26	0,90	0,28
		1,32	0,94	0,17
		1,26	0,89	0,27

1.1.4. Synthèse

Les tableaux 3.3 et 3.4 récapitulent les résultats obtenus lors de l'étude de l'effet du NaCl sur le traitement du sable, respectivement pour le faible et le fort dosage en chlorure. On constate que l'ajout de ce chlorure entraîne une augmentation des résistances surtout à court terme. L'effet du chlorure apparaît favorisé lorsque le CEM I est utilisé.

Tableau 3. 3 : Effet du NaCl à faible dosage ($100 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NaCl}$) sur le traitement du sable de Bouër.

Traitement	Liant hydraulique de type CEM I	Liant hydraulique de type CEM II
Gonflement volumique	Aucune influence	
Résistance à la traction brésilienne	Augmentation des R_{tb} (15 %)	Augmentation des R_{tb} (20 %)
Résistance à la compression simple	Augmentation des R_c (21 % à 180 jours de cure)	Aucune influence
Résistance à la compression simple après immersion	Aucune influence	

Tableau 3. 4 : Effet du NaCl à fort dosage ($2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NaCl}$) sur le traitement du sable de Bouër.

Traitement	Liant hydraulique de type CEM I	Liant hydraulique de type CEM II
Gonflement volumique	Aucune influence	
Résistance à la traction brésilienne	Aucune influence	
Résistance à la compression simple	Augmentation des R_c (11 %)	Aucune influence
Résistance à la compression simple après immersion	Aucune influence	

1.2. Influence d'un chlorure sur le traitement du limon du Val d'Europe

1.2.1. Résultats des essais d'aptitude au traitement

On considère ici les résultats des mesures de gonflement volumique et de résistance à la traction indirecte. Celles-ci ont été réalisées dans ce cas précis sur les mélanges limon du Val d'Europe (LVE) + NaCl, traités au CEM I puis CEM II.

o Mélange limon du Val d'Europe + NaCl + CaO + CEM I

Le gonflement volumique, exprimé en pourcentages, est donné sur la figure 3.7. Pour le faible dosage en NaCl, le gonflement volumique varie entre 0,03 % et 0,34 %, pour le dosage fort, les variations sont comprises entre 0,29 % et 0,40 %. Il apparaît ainsi que le

gonflement volumique n'est pas significativement affecté par la présence de NaCl dans le sol lors du traitement.

Sur la figure 3.8, on présente la traction indirecte (essai brésilien). Au faible dosage en NaCl, les mesures de résistance à la traction indirecte varient entre 0,47 MPa et 0,67 MPa, pour le dosage fort, les variations sont entre 0,39 MPa et 0,68 MPa. La moyenne de résistance à la traction indirecte augmente de l'ordre de 14 % lorsque le NaCl est présent lors du traitement.

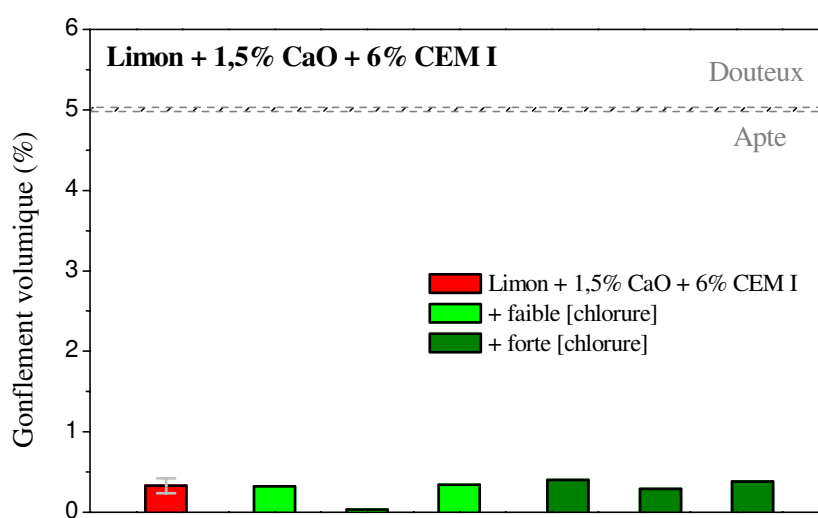


Figure 3.7 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange LVE + NaCl + CaO + CEM I ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

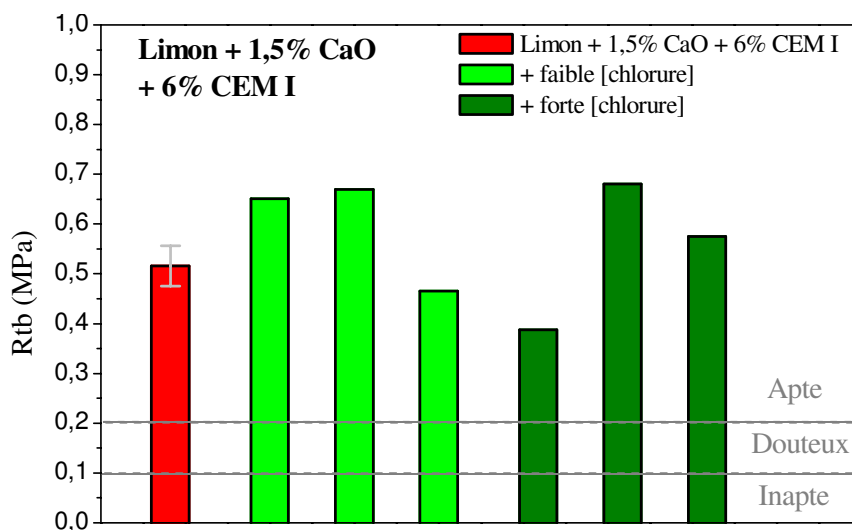


Figure 3.8 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le LVE + NaCl + CaO + CEM I ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

o *Mélange limon du Val d'Europe + NaCl + CEM II*

Les valeurs de gonflement volumique sont reportées sur la figure 3.9. Au faible dosage en NaCl, le gonflement volumique varie entre 0,06 % et 0,11 %, pour le dosage fort, les variations sont entre 0,11 % et 0,16 %. Le gonflement volumique n'est pas affecté significativement par la présence de NaCl.

La figure 3.10 concerne les résultats des mesures de résistance à la traction indirecte (essai brésilien). Au faible dosage en NaCl, la résistance à la traction indirecte varie entre 0,45 MPa et 0,53 MPa, pour le dosage fort, les variations sont entre 0,45 MPa et 0,50 MPa. La résistance à la traction indirecte varie donc peu lorsque le NaCl est présent aux concentrations choisies dans le cadre de cette étude.

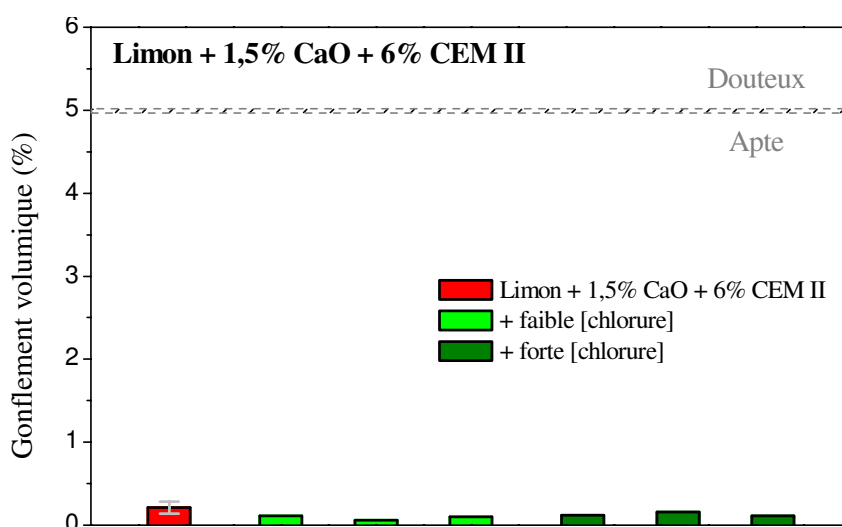


Figure 3.9 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange LVE + NaCl + CaO + CEM II ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

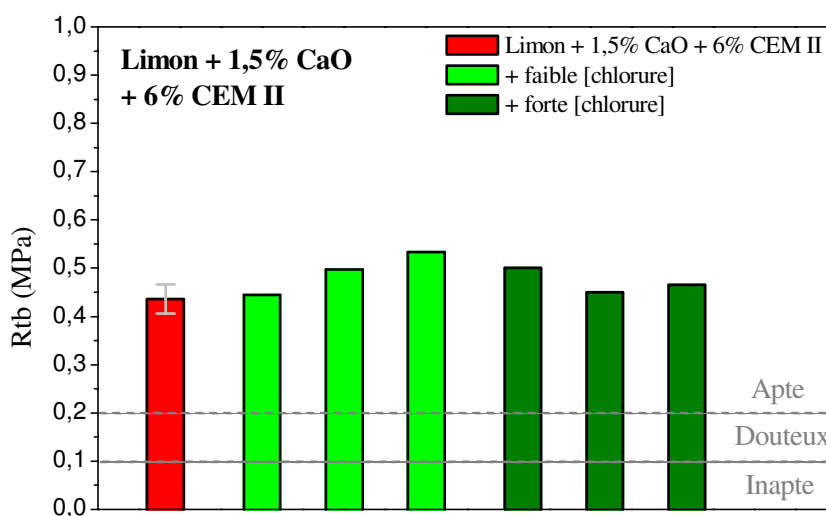


Figure 3.10 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange LVE + NaCl + CaO + CEM II ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

1.2.2. Résistance à la compression simple sans immersion

Des essais mécaniques sur des éprouvettes non immergées de mélange LVE + NaCl traité à la chaux et aux liants hydrauliques de type différents ont permis d'obtenir leur résistance à la compression simple.

o Mélange limon du Val d'Europe + NaCl + CaO + CEM I

Les résultats des mesures de résistance à la compression simple en fonction du temps de cure sont indiqués sur la figure 3.11. Après 180 jours de cure, la résistance à la compression simple est de 7,37 MPa pour le dosage fort et de 7,68 MPa pour le dosage faible, alors que pour le limon de référence traité, elle est de 7,78 MPa. Ainsi, la résistance à la compression simple n'est pas altérée en présence de NaCl dans le limon, puis traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I.

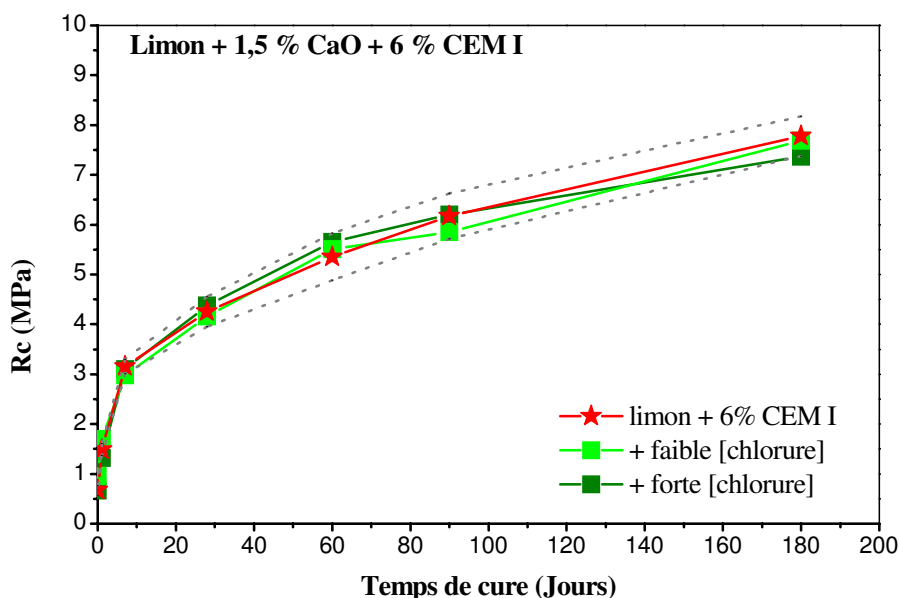


Figure 3.11 : Evolution de la résistance à la compression simple sur le mélange LVE + NaCl + CaO + CEM I avec le temps de cure ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

o Mélange limon du Val d'Europe + NaCl + CaO + CEM II

Les résultats des mesures de résistance à la compression simple en fonction du temps de cure sont indiqués dans la figure 3.12. À 180 jours, la résistance à la compression simple est de 7,20 MPa pour le dosage fort et de 6,94 MPa pour le dosage faible, et pour le limon de référence traité, elle est de 6,98 MPa. La résistance à la compression simple, lorsque l'on ajoute du NaCl au limon, puis traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II, est significativement la même que celle du limon de référence traité.

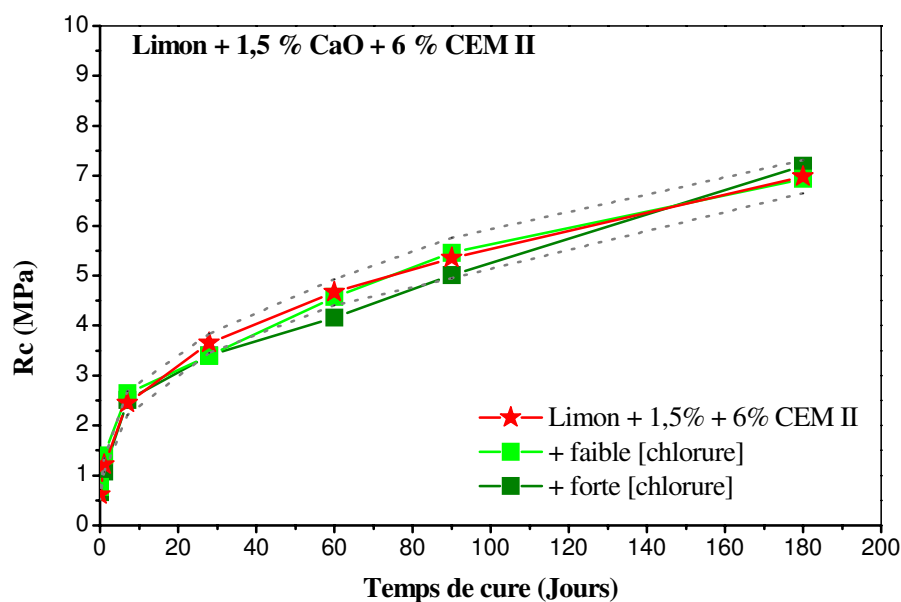


Figure 3.12 : Evolution de la résistance à la compression simple sur le mélange LVE + NaCl + CaO + CEM II ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

1.2.3. Résistance à la compression simple après immersion

Des essais de résistance à la compression simple après immersion sur des éprouvettes de mélange du limon du Val d'Europe et de NaCl traité à la chaux et à deux types différents de liants hydrauliques ont été réalisés, les résultats sont donnés dans cette partie.

o Mélange limon du Val d'Europe + NaCl + CaO + CEM I

Les résultats des mesures de résistance à la compression simple après immersion sont donnés dans le tableau 3.5. Les rapports R_{ci}/R_c varient entre 0,86 et 0,94 pour le faible dosage en NaCl et pour le fort dosage il est compris entre 0,83 à 0,90. Aucun effet significatif de la présence de NaCl n'a été mis en évidence sur les valeurs des rapports R_{ci}/R_c et les gonflements volumiques, dans le cas du traitement à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I.

Tableau 3. 5 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange LVE + NaCl + CaO + CEM I ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

	R _c 60 jours (MPa)	R _{ci} (MPa)	R _{ci} /R _c	Gv (%)
Limon + 1,5% CaO + 6% CEM I	5,36	4,61	0,86	0,20
+ faible [chlorure]	5,51	5,17	0,94	0,23
		4,80	0,87	0,15
		4,87	0,88	0,43
+ forte [chlorure]	5,66	5,11	0,90	0,09
		4,71	0,83	0,04
		4,94	0,87	0,32

o Mélange limon du Val d'Europe + NaCl + CaO + CEM II

Les résultats des mesures de résistance à la compression simple après immersion sont donnés dans le tableau 3.6. Les rapports R_{ci}/R_c varient entre 0,78 et 0,85 pour le faible dosage en NaCl et pour le fort dosage la variation est de 0,74 à 1,05. Les rapports R_{ci}/R_c et les gonflements volumiques, dans le cas du traitement à la chaux et au CEM II, ne sont pas affectés par la présence de NaCl.

Tableau 3. 6 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange LVE + NaCl + CaO + CEM II ([dosage faible] = 100 mg.kg⁻¹ NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NaCl)

	R _c 60 jours (MPa)	R _{ci} (MPa)	R _{ci} /R _c	Gv (%)
Limon + 1,5% CaO + 6% CEM II	4,67	3,93	0,84	0,27
+ faible [chlorure]	4,58	3,58	0,78	0,13
		3,89	0,85	0,10
		3,70	0,81	0,07
+ forte [chlorure]	4,16	4,37	1,05	0,44
		4,05	0,97	0,70
		3,07	0,74	0,49

1.2.4. Synthèse

Le tableau 3.7 récapitule les résultats obtenus lors de l'étude de l'effet du NaCl à faible dosage sur le traitement du limon ; les résultats pour le fort dosage sont présentés dans le tableau 3.8. Dans le cas du limon, l'augmentation des résistances due à l'ajout de ce chlorure se manifeste uniquement lors du traitement à la chaux et au liant hydraulique de type

CEM I, l'augmentation étant du même ordre de grandeur pour les deux concentrations en chlorure considérées.

Tableau 3. 7 : Effet du chlorure à faible dosage ($100 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NaCl}$) sur le traitement du limon du Val d'Europe.

Traitement	Chaux vive + Liant hydraulique de type CEM I	Chaux vive + Liant hydraulique de type CEM II
Gonflement volumique	Aucune influence	
Résistance à la traction brésilienne	Augmentation des Rtb (16 %)	Aucune influence
Résistance à la compression simple	Aucune influence	
Résistance à la compression simple après immersion	Aucune influence	

Tableau 3. 8 : Effet du chlorure à fort dosage ($2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NaCl}$) sur le traitement du limon du Val d'Europe.

Traitement	Chaux vive + Liant hydraulique de type CEM I	Chaux vive + Liant hydraulique de type CEM II
Gonflement volumique	Aucune influence	
Résistance à la traction brésilienne	Augmentation des Rtb (14 %)	Aucune influence
Résistance à la compression simple	Aucune influence	
Résistance à la compression simple après immersion	Aucune influence	

1.3. Discussion : impact de la présence de chlorure sur le traitement des sols

Les résultats obtenus précédemment permettent d'évaluer l'impact de la présence de chlorure de sodium dans un sol lors de son traitement avec un liant hydraulique, avec ou sans chaux. Ainsi, aucun impact négatif n'a été mis en évidence. Au contraire, une amélioration des performances a été obtenue dans certains cas (cf. tableaux 3.3 et 3.6). La présence du chlorure lors du traitement a amélioré de 21,1 % la résistance à la compression simple de sable de Bouër traité avec du CEM I. Une accélération de la prise a également été mise en

évidence dans le cas des essais de résistance à la compression simple sur le mélange SB + NaCl traité au CEM I.

Ces résultats permettent aussi d'apprécier l'impact de la nature du sol, du type de traitement et de la concentration de NaCl dans le sol au moment du traitement. La nature du sol traité, et donc la présence d'argile semble apparaître comme un facteur atténuant l'effet de la présence de chlorure, les effets du chlore étant comparativement moins sensibles dans le cas du LVE que du sable de Bouër. Par ailleurs, les résultats apparaissent dépendre fortement de la nature du produit de traitement, l'impact de la présence de chlorure étant plus marqué dans le cas du CEM I. Dès la plus faible concentration, le chlorure de sodium a influencé les résultats. Ces résultats rejoignent ceux obtenus par Rajasekaran et *al.* (1997) qui a montré que la résistance à la compression simple de sols argileux traités à la chaux augmente lorsque l'on ajoute du chlorure, que se soit du chlorure de sodium, du chlorure de potassium, du chlorure de calcium ou du chlorure de magnésium. Par contre, Guichard (2006) a montré que l'ajout de potasse (KCl) n'avait pas d'effet sur le traitement d'un limon par un liant hydraulique routier (cf. chapitre I), ce qui confirme que les résultats soient dépendants de la nature du produit de traitement. En outre, dans le domaine des ciments (Chapitre 1, 3.2), les chlorures sont utilisés comme accélérateurs de prise. Les chlorures sont en effet accélérateurs de l'hydratation des silicates de calcium, principalement le C_3S , en raison d'un léger changement de l'alcalinité de la solution interstitielle ou en agissant comme catalyseur des réactions d'hydratation (Neville, 2000).

En conclusion, aux concentrations choisies, le NaCl ne peut pas être considéré comme un perturbateur de prise lors du traitement des sols. Sa présence conduit à modifier le résultat d'un traitement des sols, en l'améliorant. Les quelques données disponibles dans la littérature rejoignent cette conclusion. Ces résultats montrent aussi que l'impact du chlorure dépend non seulement de sa concentration mais aussi de la nature de l'agent de traitement et du sol.

2. INFLUENCE DE LA PRÉSENCE D'UN NITRATE SUR LE TRAITEMENT DES SOLS

Le nitrate a été ajouté à nos sols sous forme de nitrate d'ammonium. Les concentrations choisies sont pour le dosage faible, de 200 mg de nitrate d'ammonium par kilogramme de sol sec, et pour le dosage fort, de 2000 mg de nitrate d'ammonium par kilogramme de sol sec. Cette partie va présenter les résultats des mesures de gonflement volumique, résistance à la

traction brésilienne, résistance à la compression simple avec ou sans immersion, obtenus sur les mélanges sables + nitrate, dans un premier temps, puis sur les mélanges limon + nitrate. Ces mélanges ont été traités selon les modalités détaillées dans le chapitre 2.

2.1. Influence d'un nitrate sur le traitement du sable de Bouër

2.1.1. Résultats des essais d'aptitude au traitement

Les résultats des mesures de gonflement volumique et de résistance à la traction indirecte réalisées sur des mélanges sable de Bouër + NO_3NH_4 + CEM I ou CEM II sont donnés dans les paragraphes ci-dessous.

o Mélange sable de Bouër + NO_3NH_4 + CEM I

Les mesures de gonflement volumique varient entre 0,02 % et 0,23 % à faible dosage en nitrate, et sont entre 0,12 % et 0,29 % à fort dosage (cf. figure 3.13). Le gonflement volumique ne varie donc pas significativement en présence de NO_3NH_4 dans le sol au moment du traitement.

Pour le faible dosage, les mesures de résistance à la traction indirecte varient entre 0,19 MPa et 0,20 MPa, pour le dosage fort, les variations sont entre 0,21 MPa et 0,23 MPa (cf. figure 3.14). Lorsque le NO_3NH_4 est ajouté à la faible concentration, la résistance à la traction indirecte est peu affectée. En revanche, lorsque le NO_3NH_4 est présent au fort dosage, la résistance à la traction indirecte augmente légèrement de l'ordre de 10 %.

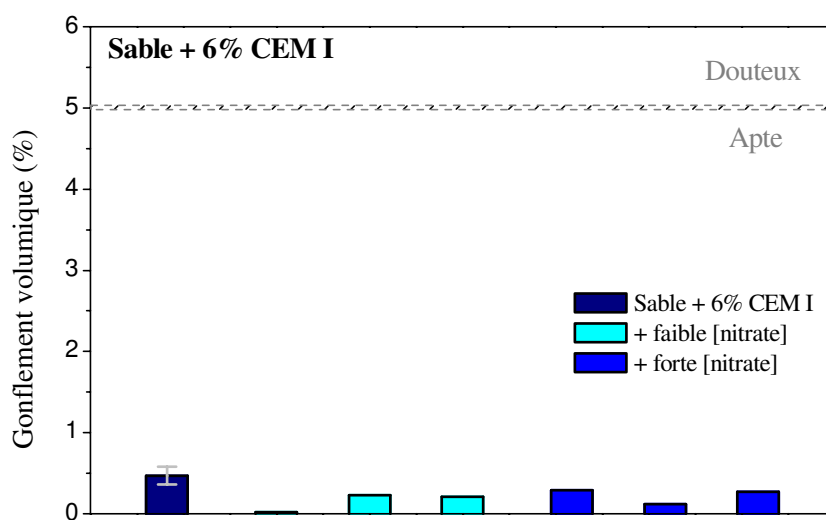


Figure 3.13 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange SB + NO_3NH_4 + CEM I [dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$)

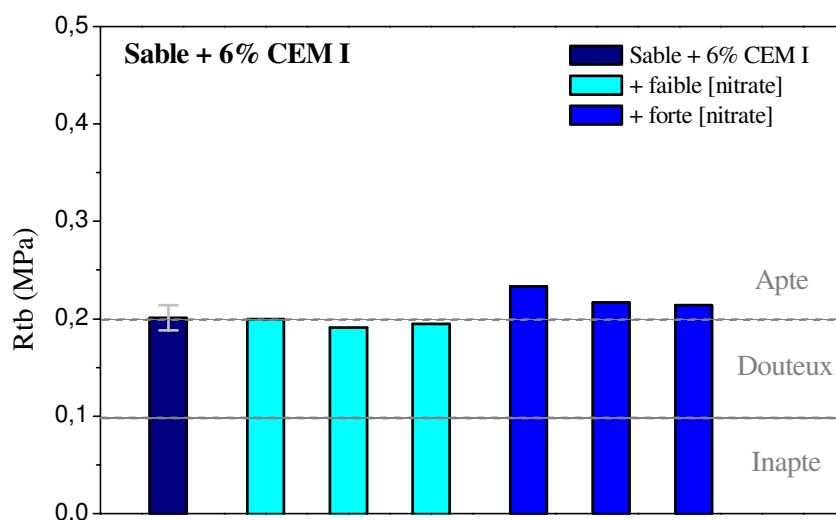


Figure 3.14 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange SB + NO_3NH_4 + CEM I ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$)

o Mélange sable de Bouër + NO_3NH_4 + CEM II

Le gonflement volumique varie entre 0,27 % et 0,78 % à faible dosage en NO_3NH_4 , et pour le dosage fort, les variations de mesures sont entre 0,22 % et 0,36 % (cf. figure 3.15). Aucune influence significative de NO_3NH_4 n'a donc été mise en évidence.

Pour le faible dosage en NO_3NH_4 , la résistance à la traction indirecte varie entre 0,08 MPa et 0,10 MPa, pour le dosage fort, les variations de mesures sont entre 0,08 MPa et 0,10 MPa (cf. figure 3.16). La résistance à la traction indirecte ne varie pas significativement en présence de NO_3NH_4 .

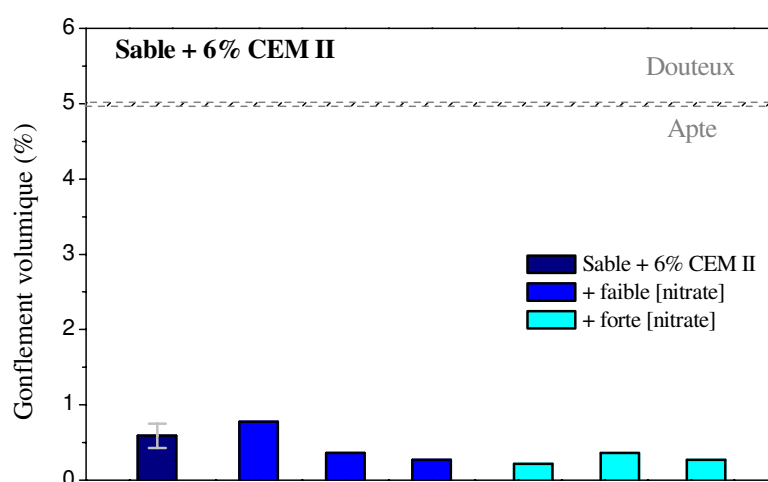


Figure 3.15 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange SB + NO_3NH_4 + CEM II ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$)

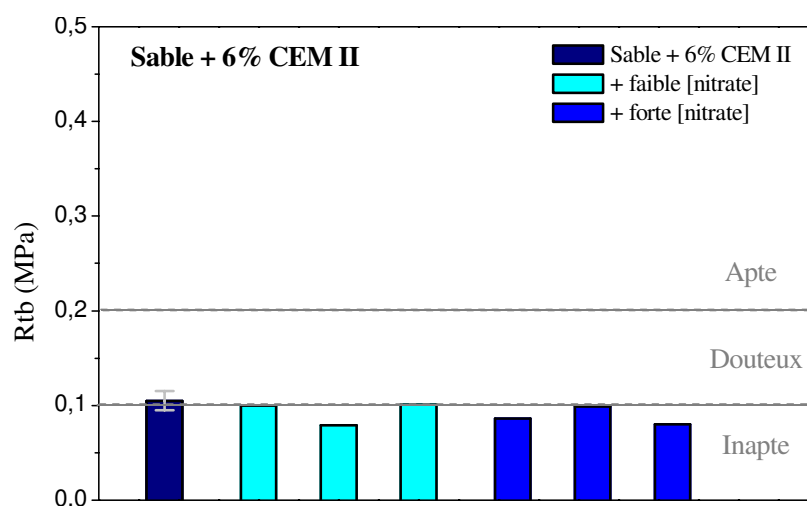


Figure 3.16 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) du mélange SB + NO_3NH_4 + CEM II ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$)

2.1.2. Résistance à la compression simple sans immersion

Les résultats des essais de résistance à la compression simple réalisés sur des éprouvettes non immergées de mélanges SB + NO_3NH_4 traités aux liants hydrauliques de type différent sont décrits ci-dessous.

o Mélange sable de Bouër + NO_3NH_4 + CEM I

Après 180 jours de cure, les résistances à la compression simple sont de 2,41 MPa pour le dosage fort et de 2,27 MPa pour le dosage faible, alors que pour le sable de référence traité, elle est de 2,05 MPa, soit une augmentation de 15 % pour le dosage fort par rapport au cas où le sol ne contient pas de NO_3NH_4 (cf. figure 3.17).

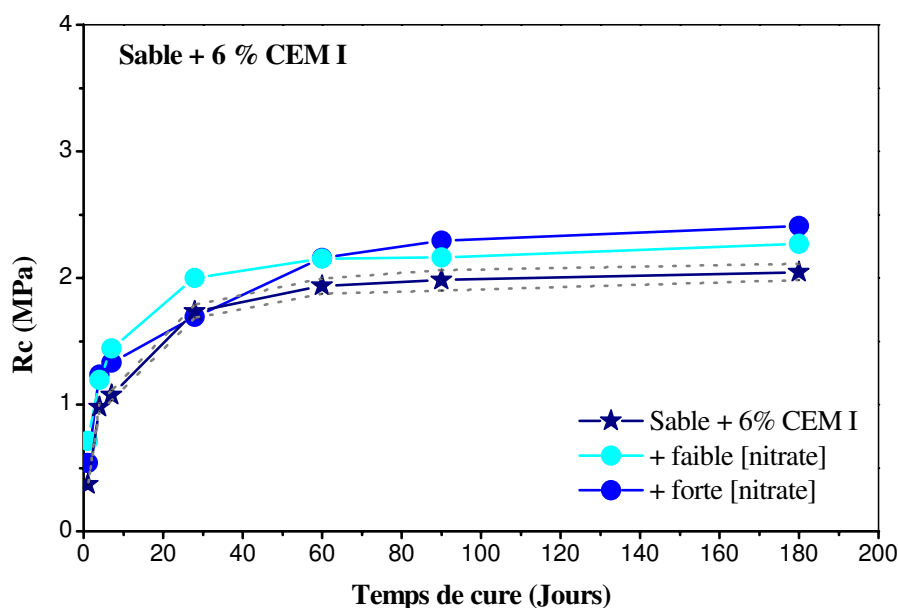


Figure 3.17 : Évolution de la résistance à la compression simple sur le mélange SB + NO_3NH_4 + CEM I avec le temps de cure ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$)

o Mélange sable de Bouër + NO_3NH_4 + CEM II

La résistance à la compression simple, dans le sable contenant du NO_3NH_4 , traité au CEM II, est du même ordre de grandeur que celle du sable de référence pur traité (figure 3.18). Après 180 jours de cure, la résistance à la compression simple est de 1,65 MPa pour le dosage fort et de 1,48 MPa pour le dosage faible, et pour le sable de référence traité, elle est de 1,57 MPa.

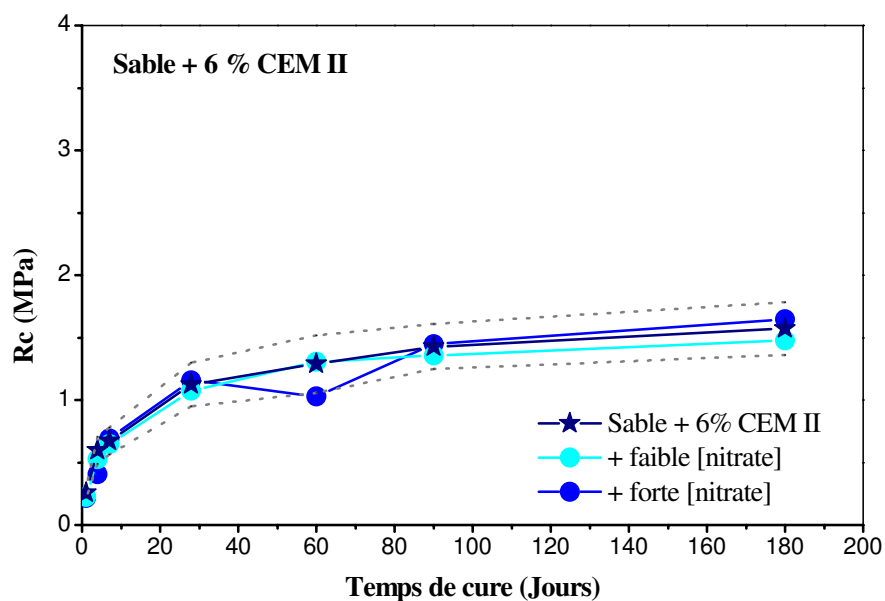


Figure 3.18 : Évolution de la résistance à la compression simple du mélange SB + NO_3NH_4 + CEM II avec le temps de cure ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$)

2.1.3. Résistance à la compression simple après immersion

Les essais mécaniques sur des éprouvettes de mélanges du sable de Bouër et de NO_3NH_4 traités aux liants hydrauliques de type différent ont permis d'obtenir leur résistance à la compression simple après leur immersion.

o Mélange sable de Bouër + NO_3NH_4 + CEM I

Les rapports R_{ci}/R_c varient entre 0,66 et 0,77 pour le faible dosage en NO_3NH_4 et de 0,97 à 1,03 pour le fort dosage (tableau 3.9). Le gonflement volumique, lorsque le sable contient du NO_3NH_4 lors de son traitement au liant hydraulique de type CEM I, est du même ordre que celui du sable de référence. Lorsque l'on ajoute à faible dosage du NO_3NH_4 au sable, puis traité au CEM I, les rapports R_{ci}/R_c diminuent de l'ordre de 19 % et sont en dessous de 0,8. Alors que lorsque l'on ajoute le NO_3NH_4 à fort dosage, les rapports R_{ci}/R_c augmentent légèrement (14 %).

Tableau 3. 9 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange SB + NO_3NH_4 + CEM I ([dosage faible] = 200 mg.kg⁻¹ NO_3NH_4 ; [dosage fort] = 2000 mg.kg⁻¹ NO_3NH_4)

	R_c 60 jours (MPa)	R_{ci} (MPa)	R_{ci}/R_c	Gv (%)
Sable + 6% CEM I	1,94	1,70	0,88	0,14
+ faible [nitrate]	2,00	1,40	0,70	0,33
		1,32	0,66	0,14
		1,53	0,77	0,08
+ forte [nitrate]	2,16	2,19	1,02	0,28
		2,09	0,97	0,27
		2,22	1,03	0,22

o Mélange sable de Bouër + NO_3NH_4 + CEM II

Les rapports R_{ci}/R_c varient entre 0,75 et 0,85 pour le faible dosage en nitrate et de 1,07 à 1,10 pour le fort dosage (tableau 3.10). Les gonflements volumiques sont les mêmes que celles du sable de référence. En présence de NO_3NH_4 à faible dosage, les rapports R_{ci}/R_c sont voisins de ceux du sable de référence. En revanche, pour le fort dosage en nitrate, les rapports R_{ci}/R_c augmentent de l'ordre de 22 %.

Tableau 3. 10 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange SB + NO_3NH_4 + CEM II ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$)

	R_c 60 jours (MPa)	R_{ci} (MPa)	R_{ci}/R_c	Gv (%)
Sable + 6% CEM II	1,29	1,06	0,83	0,19
+ faible [nitrate]	1,31	1,11	0,85	0,11
		1,10	0,85	0,18
		0,98	0,75	0,07
+ forte [nitrate]	1,03	1,13	1,10	0,55
		1,11	1,08	0,29
		1,11	1,07	0,39

2.1.4. Synthèse

Les tableaux 3.11 et 3.12 récapitulent les résultats obtenus sur l'étude de l'effet du nitrate d'ammonium sur le traitement du sable, respectivement pour le faible dosage et le fort dosage. Dans le cas du sable traité, la présence à fort dosage de nitrate d'ammonium conduit à une augmentation des résistances à la traction brésilienne dans le cas du liant hydraulique de CEM I. De plus, l'immersion des échantillons diminue les rapports R_{ci}/R_c pour le dosage faible et le liant CEM I, et augmente les mêmes rapports R_{ci}/R_c , lorsque le nitrate d'ammonium est présent à fort dosage, et ce quel que soit le liant utilisé.

Tableau 3. 11 : Effet du nitrate à faible dosage ($200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$) sur le traitement du sable de Bouër.

Traitement	Liant hydraulique de type CEM I	Liant hydraulique de type CEM II
Gonflement volumique	Aucune influence	
Résistance à la traction brésilienne	Aucune influence	
Résistance à la compression simple	Aucune influence	
Résistance à la compression simple après immersion	Diminution des R_{ci} (19 %)	Aucune influence

Tableau 3. 12 : Effet du nitrate à fort dosage ($2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$) sur le traitement du sable de Bouër.

Traitement	Liant hydraulique de type CEM I	Liant hydraulique de type CEM II
Gonflement volumique	Aucune influence	
Résistance à la traction brésilienne	Augmentation des R_{tb} (10 %)	Aucune influence
Résistance à la compression simple	Aucune influence	
Résistance à la compression simple après immersion	Augmentation des R_{ci} (14 %)	Augmentation des R_{ci} (22 %)

2.2. Influence d'un nitrate sur le traitement du limon du Val d'Europe (LVE)

2.2.1. Résultats des essais d'aptitude au traitement

Les résultats des mesures de gonflement volumique et de résistance à la traction indirecte sur des mélanges LVE + NO_3NH_4 traité à la chaux et aux liants hydrauliques de type différent sont présentés ci-dessous.

o Mélange limon du Val d'Europe + NO_3NH_4 + CaO + CEM I

Pour le faible dosage en NO_3NH_4 , les mesures de gonflement volumique varient entre 0,12 % et 0,29 %, pour le dosage fort, le gonflement volumique varie entre 0,25 % et 0,57 % (figure 3.19). Le gonflement volumique est donc peu affecté par la présence de NO_3NH_4 .

Pour le faible dosage en NO_3NH_4 , les mesures de résistance à la traction indirecte varient entre 0,48 MPa et 0,51 MPa, pour le dosage fort, elles varient entre 0,56 MPa et 0,60 MPa (figure 3.20).

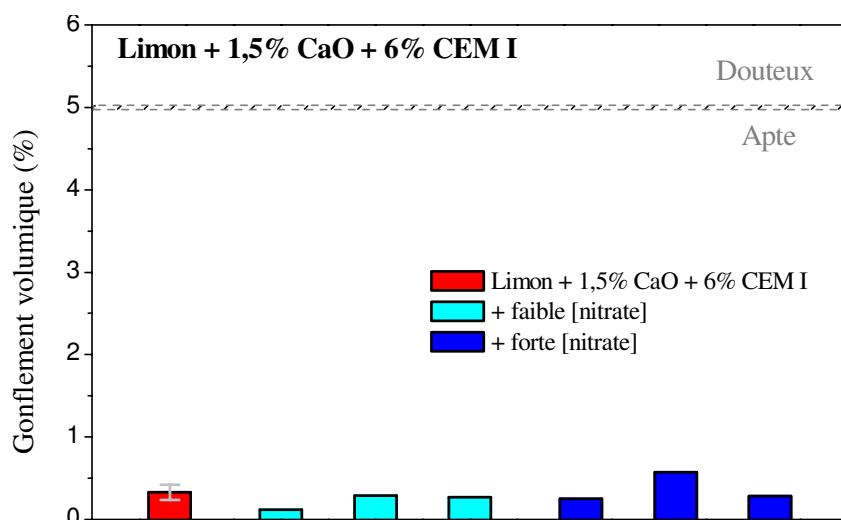


Figure 3.19 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange LVE + NO_3NH_4 + CaO + CEM I ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$)

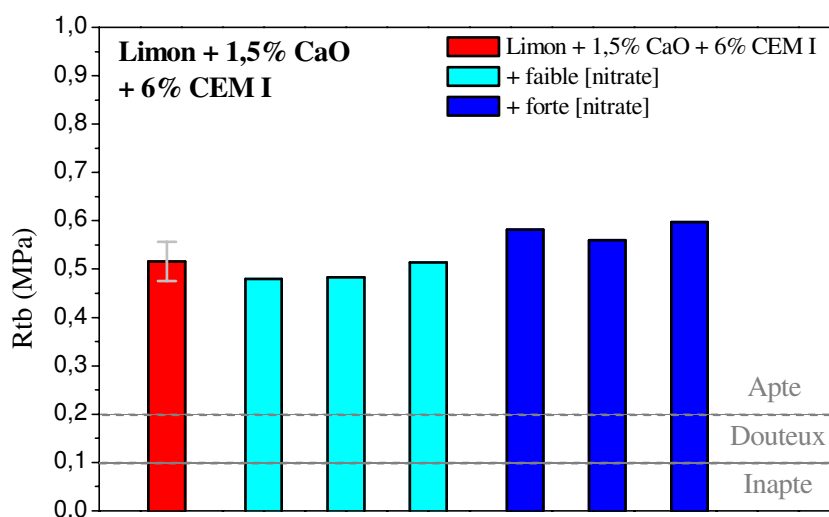


Figure 3. 20 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange LVE + NO_3NH_4 + CaO + CEM I ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$)

o Mélange limon du Val d'Europe + NO_3NH_4 + CaO + CEM II

Pour le faible dosage en NO_3NH_4 , le gonflement volumique est compris 0,21 % et 0,34 %, alors que pour le dosage fort, il varie entre 0,19 % et 0,31 % (figure 3.21). La figure 3.21 montre ainsi que le gonflement volumique n'est pas altéré par la présence NO_3NH_4 , quel que soit le dosage considéré.

Pour le faible dosage en NO_3NH_4 , la résistance à la traction indirecte varie entre 0,41 MPa et 0,59 MPa, pour le dosage fort, elles varient entre 0,40 MPa et 0,50 MPa (figure 3.22). Il n'y a donc pas d'impact de la présence de nitrate sur la résistance à la traction indirecte.

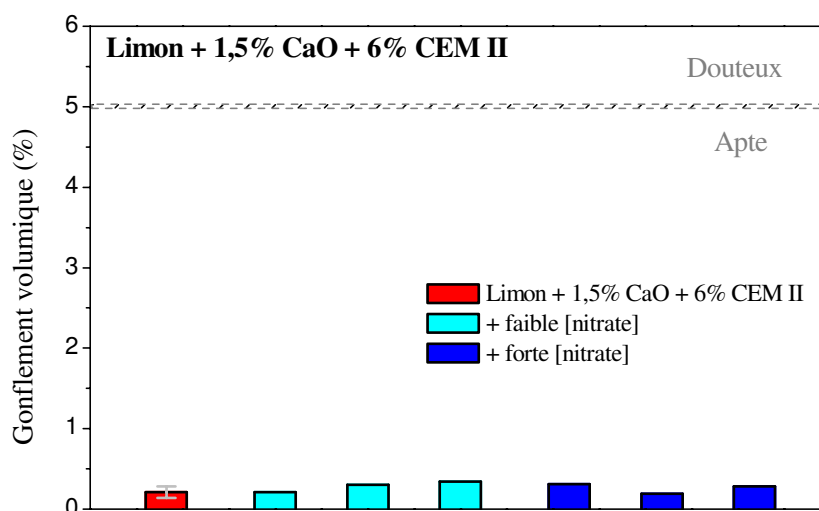


Figure 3.21 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange LVE + NO_3NH_4 + CaO + CEM II ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$)

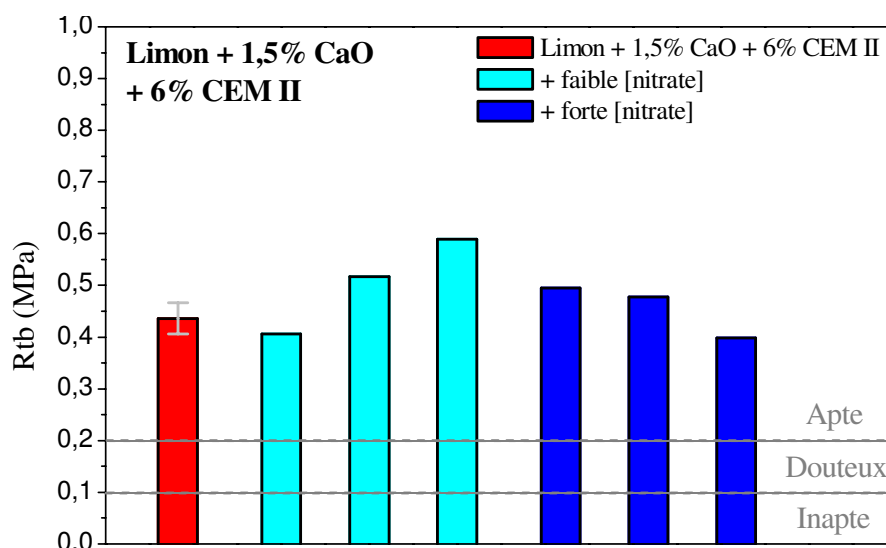


Figure 3.22 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange LVE + NO_3NH_4 + CaO + CEM II ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$)

2.2.2. Résistance à la compression simple sans immersion

Les résultats des essais mécaniques réalisés sur des éprouvettes non immergées de mélanges du limon Val d'Europe et de nitrate traités à la chaux et aux liants hydrauliques de type différent sont présentés et discutés dans cette partie.

o Mélange limon du Val d'Europe + NO_3NH_4 + CaO + CEM I

Les résistances à la compression simple sont légèrement plus fortes lorsque le LVE contient du NO_3NH_4 au moment de son traitement avec du CEM I (figure 3.23). On observe ainsi qu'après 180 jours de cure, les résistances à la compression simple sont de 8,17 MPa pour le dosage fort et de 8,44 MPa pour le dosage faible, alors que pour le limon de référence

traité, elle est de 7,78 MPa. Les résistances à la compression simple du mélange LVE + NO_3NH_4 + CaO + CEM I sont plus faibles aux jeunes âges (7 et 28 jours) que celles du sol de référence (-14 % à 28 jours).

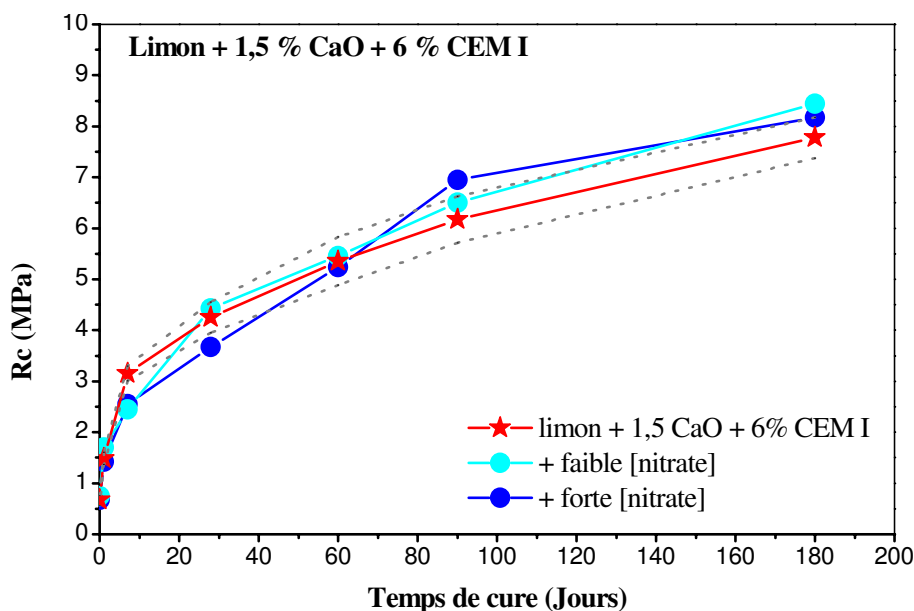


Figure 3. 23 : Évolution de la résistance à la compression simple sur le mélange LVE + NO_3NH_4 + CaO + CEM I avec le temps de cure ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$)

o Mélange limon du Val d'Europe + NO_3NH_4 + CaO + CEM II

Les résistances à la compression simple ne changent pas en présence du NO_3NH_4 à faible dosage dans le limon préalablement à son traitement à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II (figure 3.24). Après 180 jours de cure, les résistances à la compression simple sont de 6,90 MPa pour le dosage faible, alors que pour le limon de référence traité, elle est de 6,98 MPa. La résistance à la compression simple du mélange LVE + NO_3NH_4 à fort dosage traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II est plus faible après 180 jours de cure (4,76 MPa), elles atteignent dès 60 jours un maximum de résistance. Cette diminution est de l'ordre de 32 %.

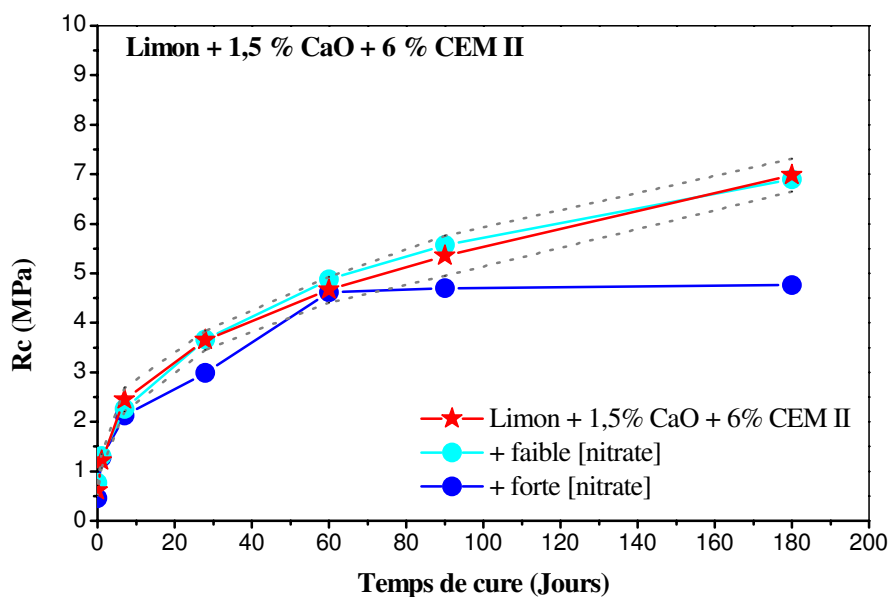


Figure 3. 24 : Évolution de la résistance à la compression simple sur le mélange LVE + NO_3NH_4 + CaO + CEM II avec le temps de cure ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$)

2.2.3. Résistance à la compression simple après immersion

Les résultats des essais de résistance à la compression simple sur des éprouvettes de mélanges LVE + NO_3NH_4 traités à la chaux et aux liants hydrauliques de type différent sont donnés ci-dessous.

o Mélange limon du Val d'Europe + NO_3NH_4 + CaO + CEM I

Les rapports R_{ci}/R_c varient entre 0,80 et 0,92 pour le faible dosage en nitrate et de 0,82 à 0,87 pour le fort dosage (tableau 3.13). Les gonflements volumiques, en présence de nitrate, dans le limon sont du même ordre de grandeur que celles du limon de référence. De plus, pour le traitement mixte chaux + CEMI, les rapports R_{ci}/R_c n'évoluent pas significativement avec la présence de nitrate dans le sable.

Tableau 3. 13 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange LVE + NO_3NH_4 + CaO + CEM I ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$)

	R_c 60 jours (MPa)	R_{ci} (MPa)	R_{ci}/R_c	Gv (%)
Limon + 1,5% CaO + 6% CEM I	5,36	4,61	0,86	0,20
+ faible [nitrate]	5,46	4,39	0,80	0,22
		4,77	0,87	0,21
		5,04	0,92	0,05
+ forte [nitrate]	5,24	4,36	0,83	0,36
		4,31	0,82	0,17
		4,53	0,87	0,22

o Mélange limon du Val d'Europe + NO_3NH_4 + CaO + CEM II

Les rapports R_{ci}/R_c varient entre 0,62 et 0,80 pour le faible dosage en nitrate et de 0,69 à 0,72 pour le fort dosage (tableau 3.14). Aucune influence de la présence de nitrate dans le limon sur le gonflement volumique lors de l'immersion n'a été constatée dans le cas du traitement à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II. Dans ces conditions, la présence de nitrate entraîne une diminution des rapports R_{ci}/R_c de l'ordre de 15 %. Il est important de noter que ces rapports restent supérieurs à 0,6, valeur qui représente le minimum acceptable pour considérer qu'un sol est insensible à l'immersion.

Tableau 3. 14 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique de mélange LVE + NO_3NH_4 + CaO + CEM II ([dosage faible] = $200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$; [dosage fort] = $2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{NO}_3\text{NH}_4$)

	R_c 60 jours (MPa)	R_{ci} (MPa)	R_{ci}/R_c	Gv (%)
Limon + 1,5% CaO + 6% CEM II	4,67	3,93	0,84	0,27
+ faible [nitrate]	4,87	3,84	0,80	0,15
		3,44	0,71	0,14
		3,01	0,62	0,18
+ forte [nitrate]	4,61	3,17	0,69	0,12
		3,32	0,72	0,15
		3,33	0,72	0,30

2.2.4. Synthèse

Les tableaux ci-dessous récapitulent les résultats obtenus sur l'étude de l'influence de la présence de NO_3NH_4 sur le traitement du limon, le tableau 3.15 pour le faible dosage et le

tableau 3.16 pour le fort dosage. On observe un retard de prise lors du traitement du CEM I et une baisse finale des R_c avec le CEM II lorsque le NO_3NH_4 est présent à fort dosage dans le sol à traiter. Les résistances à la compression simple, ainsi que les rapports R_{ci}/R_c sont plus faibles sur les mélanges LVE + NO_3NH_4 traités à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II.

Tableau 3. 15 : Effet du nitrate à faible dosage ($200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$) sur le traitement du LVE.

Traitement	Chaux vive + Liant hydraulique de type CEM I	Chaux vive + Liant hydraulique de type CEM II
Gonflement volumique	Aucune influence	
Résistance à la traction brésilienne	Aucune influence	
Résistance à la compression simple	Aucune influence	
Résistance à la compression simple après immersion	Aucune influence	Diminue les R_{ci} (15 %)

Tableau 3. 16 : Effet du nitrate à fort dosage ($2000 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ NO}_3\text{NH}_4$) sur le traitement du LVE.

Traitement	Chaux vive + Liant hydraulique de type CEM I	Chaux vive + Liant hydraulique de type CEM II
Gonflement volumique	Aucune influence	
Résistance à la traction brésilienne	Aucune influence	
Résistance à la compression simple	Retardateur de prise (-14 % à 28 jours de cure)	Diminue les R_c (32 %)
Résistance à la compression simple après immersion	Aucune influence	Diminue les R_{ci} (15 %)

Des observations au MEB ont été réalisées de manière à tenter de mettre en évidence l'impact de la présence de nitrate sur la microstructure du limon traité. On observe au MEB (cf. figure 3.25 et 3.26) une structure fermée des éprouvettes de mélange limon + NO_3NH_4 traité à la CaO et au CEM II, où on distingue les grains de quartz et la présence de phases cimentaires entre ces grains et contribuant au gain de performance. En comparant les observations MEB du limon LVE traité au CEM II avec et sans nitrate (chapitre 2), on n'observe aucune différence significative. Les différentes analyses conduites n'ont pas permis

de mettre en évidence de phase cimentaire contenant des nitrates. Les morphologies des phases cimentaires ne semblent pas affectées par la présence de nitrates.

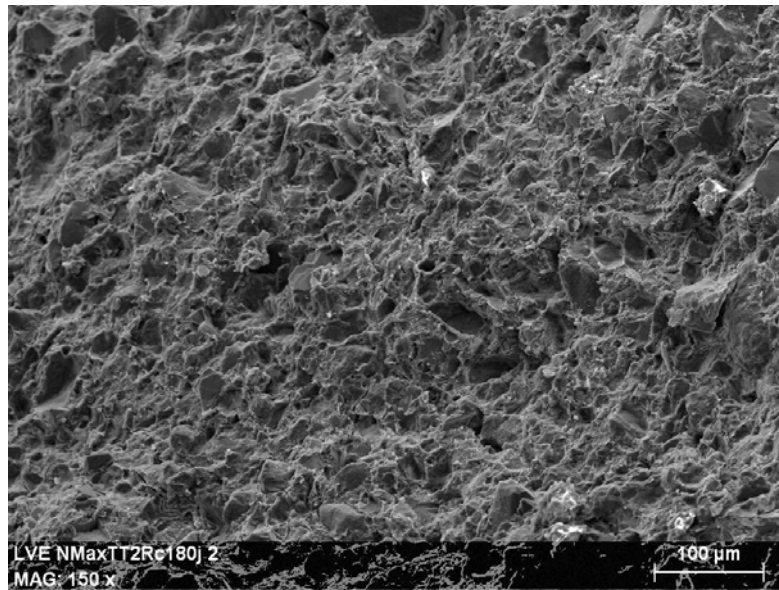


Figure 3.25 : Observation de surface au MEB du mélange limon + NO_3NH_4 traité au CEM II (x150)

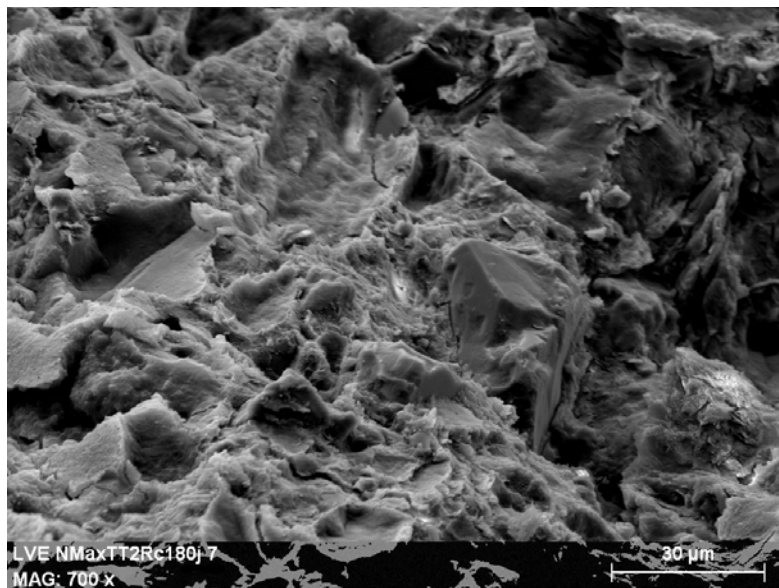


Figure 3.26 : Observation de surface au MEB du mélange limon + NO_3NH_4 traité au CEM II, vue de détail des phases cimentaires entre les grains de quartz (x 700)

2.3. Discussion : impact de la présence de nitrate sur le traitement des sols

Ces études permettent d'apprécier qualitativement l'effet de la présence de nitrates (NO_3NH_4) sur le résultat d'un traitement de sol, et de souligner l'influence de la nature du sol et du type de traitement.

Le premier paramètre à prendre en compte est la nature du sol. Ainsi, dans le cas du sable de Bouër, on observe une amélioration des performances, la présence de nitrate d'ammonium augmente de 15 % la résistance à la compression simple du sable de Bouër traité au liant hydraulique de type CEM I. La présence de nitrate dans le LVE traité au CEM II conduit à une résistance à la compression simple inférieure de l'ordre de 32 % à celle obtenue dans les mêmes conditions de traitement mais lorsque le limon ne contient pas de nitrate au moment du traitement. Ces différences sont cependant peut-être une conséquence de l'emploi d'un traitement mixte chaux/ciment dans le cas du LVE.

Un second paramètre à considérer est le type de liant employé, qui joue un rôle significatif. Ainsi, l'impact de la présence de nitrate est plus marqué lors de l'utilisation de CEM II pour les deux sols.

Si aucun impact significatif de la présence de nitrate n'a été mis en évidence grâce au MEB, on peut se référer aux données disponibles dans le domaine des ciments et des bétons, pour tenter d'expliquer l'impact du nitrate sur la performance mécanique du sol traité. Les mécanismes de l'attaque chimique du nitrate d'ammonium sur les bétons ont été décrits dans le chapitre 1 (cf. 3.4). L'attaque chimique du nitrate résulte en une dissolution des phases cimentaires. Ainsi, la porosité du matériau augmente et les performances mécaniques globales diminuent (Carde & François, 1996). La baisse des performances mécaniques observée rejoint les résultats de Benard (2006) qui observe un retard dans l'hydratation et une diminution de la résistance mécanique de la pâte de ciment lorsque l'on ajoute à l'eau de gâchage des nitrates.

En conclusion, la performance du sol est affectée par la présence du nitrate. Cependant, si l'on considère les critères qui permettent de déterminer si un sol traité présente une performance suffisante pour envisager son emploi en terrassement, il apparaît que les performances mécaniques restent satisfaisantes pour permettre d'envisager l'utilisation de ces sols en terrassement. À long terme, les résistances à la compression simple, par exemple pour le limon sont supérieures à 4,5 MPa, et les rapports R_{ci}/R_c sont supérieurs à 0,6. En conclusion, aux concentrations choisies, le nitrate d'ammonium, malgré une baisse des performances mécaniques, ne peut pas être considéré comme un perturbateur de prise lors du

traitement des sols, au sens où il empêcherait l'utilisation du sol en terrassement. Ici, nous mettons aussi en évidence le fait que les résultats dépendent non seulement de la présence des nitrates et de sa concentration, mais encore de la nature des liants et du sol.

3. INFLUENCE DE LA PRÉSENCE D'UN PHOSPHATE SUR LE TRAITEMENT DES SOLS

Le phosphate a été ajouté à nos sols sous forme de phosphate de potassium, KPO_4 . Les concentrations choisies pour l'étude sont pour la faible concentration de 400 mg de KPO_4 par kilogramme de sol sec, et pour le dosage fort de 1200 mg de KPO_4 par kilogramme de sol sec (Cf. 2.1.4).

Cette partie va présenter les résultats des mesures de gonflement volumique, résistance à la traction brésilienne, résistance à la compression simple avec ou sans immersion, obtenus sur les mélanges sable de Bouër + KPO_4 dans un premier temps, puis sur les mélanges LVE + KPO_4 . Ces mélanges ont été traités selon les modalités évoquées dans le chapitre 2.

3.1. Influence d'un phosphate sur le traitement du sable de Bouër

3.1.1. Résultats des essais d'aptitude au traitement

Les résultats des mesures de gonflement volumique et de résistance à la traction indirecte, réalisées dans ce cas précis sur des mélanges sable de Bouër (SB) + KPO_4 traités aux liants hydrauliques de type différent, sont donnés dans cette partie.

o Mélange sable de Bouër + KPO_4 + CEM I

Pour le faible dosage en KPO_4 , les mesures de gonflement volumique sont comprises entre 0,08 % et 0,24 %, pour le dosage fort, elles varient entre 0,05 % et 0,19 % (figure 3.27). Pour le faible dosage en KPO_4 , les mesures de résistance à la traction indirecte varient entre 0,20 MPa et 0,21 MPa, pour le dosage fort, les mesures varient entre 0,20 MPa et 0,21 MPa (figure 3.28). On peut donc conclure que la présence de phosphate dans le sable au moment du traitement n'affecte pas significativement les résultats de l'essai d'aptitude : le gonflement volumique et la résistance à la traction.

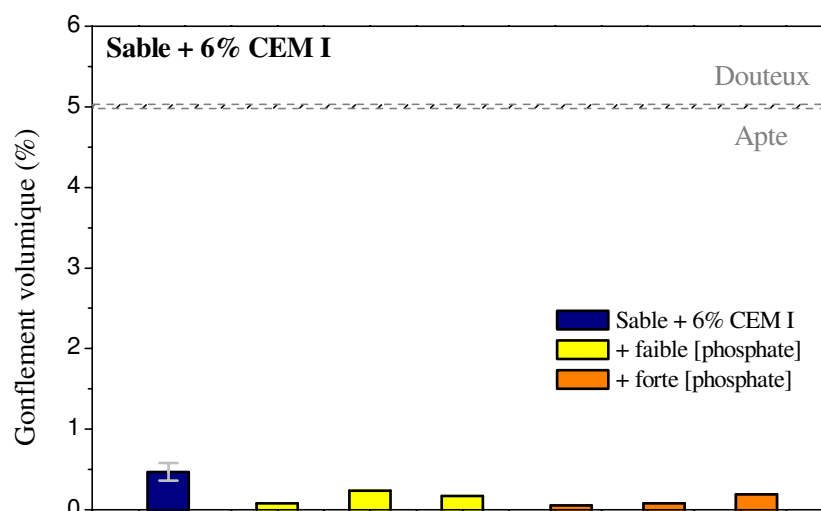


Figure 3.27 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange SB + KPO_4 + CEM I ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$)

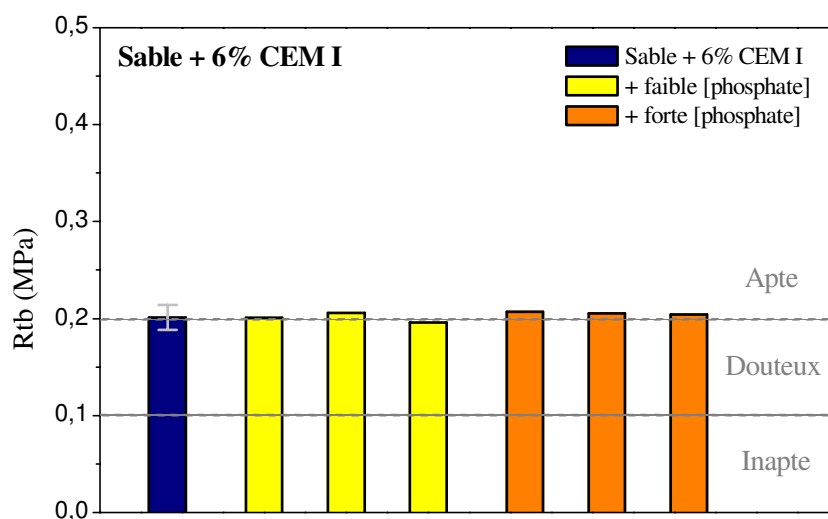


Figure 3. 28 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange SB + KPO_4 + CEM I ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$)

o Mélange sable de Bouër + KPO_4 + CEM II

Pour le faible dosage en KPO_4 , les mesures de gonflement volumique sont du même ordre de grandeur que pour le sable ne contenant pas de phosphate au moment du traitement (figure 3.29). Par ailleurs, pour le faible dosage en KPO_4 , les mesures de résistance à la traction indirecte sont comprises entre 0,12 MPa et 0,12 MPa, pour le dosage fort, les variations des mesures varient entre 0,11 MPa et 0,13 MPa (figure 3.30). La résistance à la traction indirecte n'est pas altérée par la présence de phosphate au moment du traitement.

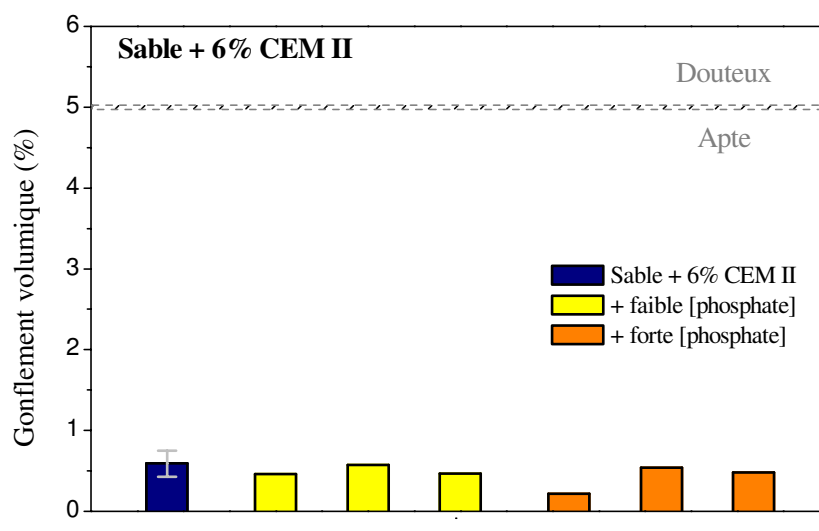


Figure 3.29 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange SB + KPO_4 + CEM II ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$)

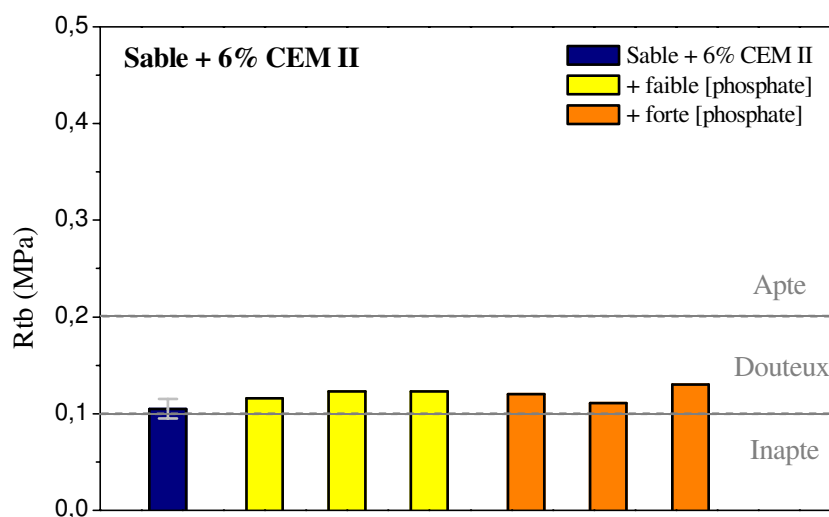


Figure 3.30 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange SB + KPO_4 + CEM II ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$)

3.1.2. Résistance à la compression simple sans immersion

o Mélange sable de Bouër + KPO_4 + CEM I

Après 180 jours de cure, les résistances à la compression simple sont de 2,51 MPa pour le dosage fort et de 2,48 MPa pour le dosage faible, alors que pour le sable de référence traité, elle est de 2,05 MPa. Après 180 jours de cure, la résistance à la compression simple lorsque le sable contient du phosphate est supérieure de 22 % à la résistance atteinte lorsqu'il n'y a pas de phosphate, dans le cas d'un traitement au liant hydraulique de type CEM I (figure 3.31).

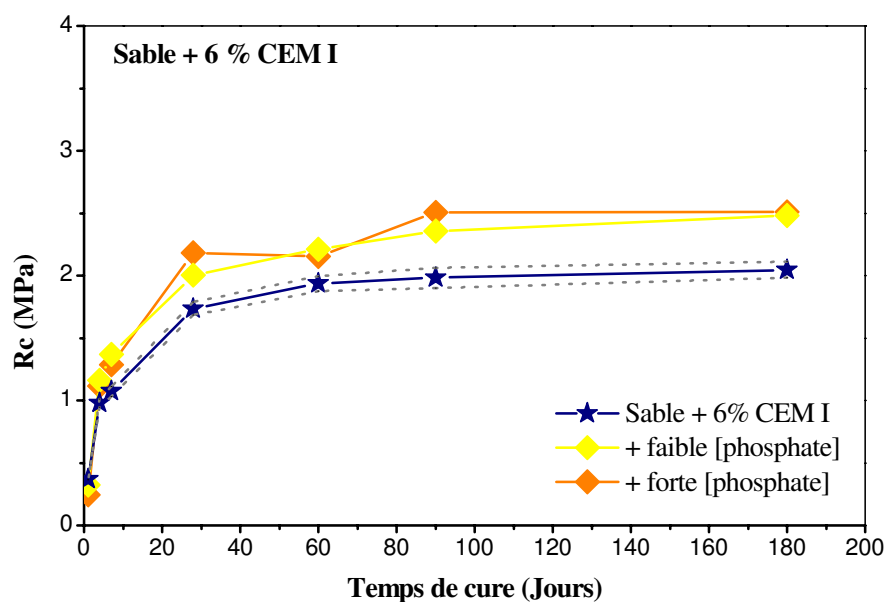


Figure 3.31 : Evolution de la résistance à la compression simple du mélange SB + KPO_4 + CEM I avec le temps de cure ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$)

o Mélange sable de Bouër + KPO_4 + CEM II

Après 180 jours de cure, la résistance à la compression simple vaut 1,872 MPa pour le dosage fort et 1,778 MPa pour le dosage faible et, pour le sable de référence traité, elle est de 1,573 MPa. La résistance à la compression simple, lorsque l'on ajoute du phosphate au sable traité au liant hydraulique de type CEM II, est plus forte dans le cas du dosage fort que celle du sable de référence traité (figure 3.32). Cette augmentation est de l'ordre de 19 %.

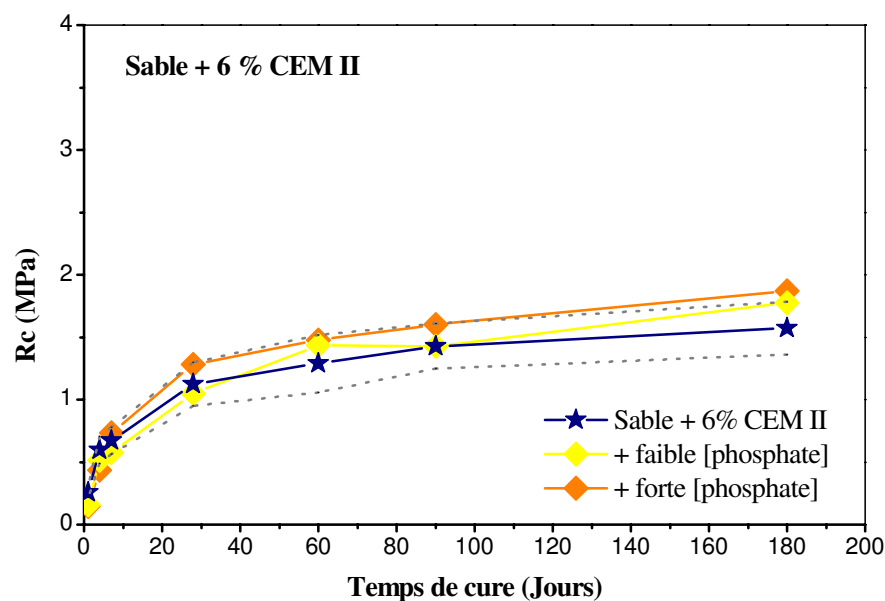


Figure 3.32 : Evolution de la résistance à la compression simple du mélange SB + KPO_4 + CEM II ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$)

3.1.3. Résistance à la compression simple après immersion

Les résistances à la compression simple après immersion de mélanges de sable de Bouër et de KPO_4 traités aux liants hydrauliques de types différents sont données dans cette partie.

o Mélange sable de Bouër + KPO_4 + CEM I

Les rapports R_{ci}/R_c varient entre 0,78 et 0,80 pour le faible dosage en KPO_4 et de 0,82 à 0,84 pour le fort dosage (tableau 3.17). Les rapports R_{ci}/R_c et les gonflements volumiques, dans le cas du traitement au CEM I, ne sont pas affectés par la présence de phosphate de manière significative.

Tableau 3. 17 : Résistances à la compression simple après immersion et gonflements volumiques du mélange SB + KPO_4 + CEM I ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$)

	R_c 60 jours (MPa)	R_{ci} (MPa)	R_{ci}/R_c	Gv (%)
Sable + 6% CEM I	1,94	1,70	0,88	0,14
+ faible [phosphate]	2,21	1,76	0,80	0,07
		1,73	0,78	0,36
		1,73	0,78	0,33
+ forte [phosphate]	2,16	1,82	0,84	0,01
		1,76	0,82	0,15
		1,80	0,83	0,18

o Mélange sable de Bouër + KPO_4 + CEM II

Les rapports R_{ci}/R_c varient entre 0,80 et 0,81 pour le faible dosage en KPO_4 et de 0,84 à 0,88 pour le fort dosage (tableau 3.18). Les rapports R_{ci}/R_c et les gonflements volumiques, ne sont pas impactés pas la présence de phosphate.

Tableau 3. 18 : Résistances à la compression simple après immersion et gonflements volumiques sur le mélange SB + KPO_4 + CEM II ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$)

	R_c 60 jours (MPa)	R_{ci} (MPa)	R_{ci}/R_c	Gv (%)
Sable + 6% CEM II	1,29	1,06	0,83	0,19
+ faible [phosphate]	1,44	1,15	0,80	0,28
		1,15	0,80	0,35
		1,16	0,81	0,12
+ forte [phosphate]	1,48	1,31	0,88	0,23
		1,24	0,84	0,22
		1,26	0,85	0,02

3.1.4. Synthèse

Les tableaux 3.19 (faible dosage) et 3.20 (fort dosage) récapitulent les résultats obtenus sur l'étude de l'effet du KPO_4 sur le traitement du sable. On peut alors remarquer que l'ajout de KPO_4 n'altère pas le traitement, la résistance à la compression simple du sable traité au liant hydraulique du type CEM I est même plus forte que celle de référence.

Tableau 3. 19 : Effet du phosphate à faible dosage ($400 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$) sur le traitement du sable de Bouër

Traitement	Liant hydraulique de type CEM I	Liant hydraulique de type CEM II
Gonflement volumique	Aucune influence	
Résistance à la traction brésilienne	Aucune influence	
Résistance à la compression simple	Augmentation des R_c (21 %)	Aucune influence
Résistance à la compression simple après immersion	Aucune influence	

Tableau 3. 20 : Effet du phosphate à fort dosage ($1200 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ KPO}_4$) sur le traitement du sable de Bouër

Traitement	Liant hydraulique de type CEM I	Liant hydraulique de type CEM II
Gonflement volumique	Aucune influence	
Résistance à la traction brésilienne	Aucune influence	
Résistance à la compression simple	Augmentation des Rc (22 %)	Aucune influence
Résistance à la compression simple après immersion	Aucune influence	

3.2. Influence d'un phosphate sur le traitement du limon du Val d'Europe (LVE).

3.2.1. Résultats des essais d'aptitude au traitement

Les mesures de gonflement volumique et de résistance à la traction indirecte réalisées sur les mélanges LVE + KPO_4 traités à la chaux et aux liants hydrauliques de types différents sont données ci-dessous.

o Mélange limon du Val d'Europe + KPO_4 + CaO + CEM I

Pour le faible dosage en KPO_4 , le gonflement volumique varie entre 0,31 % et 0,55 % ; pour le dosage fort, il varie entre 0,06 % et 0,11 % (figure 3.33). Le gonflement volumique varie peu en présence de KPO_4 .

Pour le faible dosage en KPO_4 , les mesures de résistance à la traction indirecte varient entre 0,39 MPa et 0,67 MPa, pour le dosage fort, les variations des mesures sont entre 0,43 MPa et 0,63 MPa (figure 3.34). La résistance à la traction indirecte du mélange LVE + CEM I ne varie pas significativement en présence de KPO_4 dans le limon.

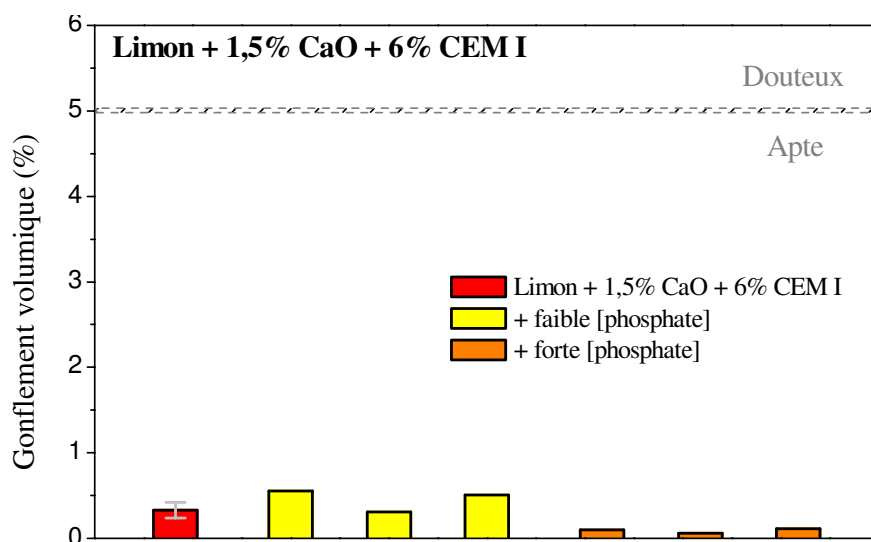


Figure 3.33 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange LVE + KPO_4 + CaO + CEM I ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$)

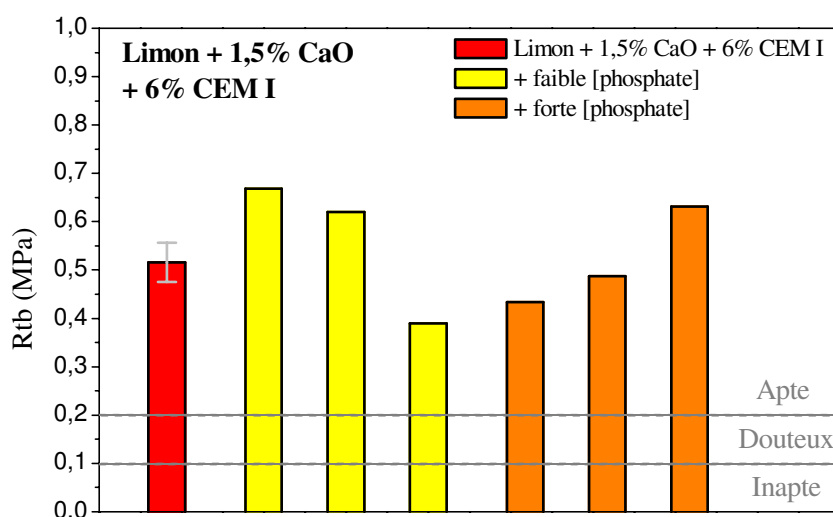


Figure 3.34 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange LVE + KPO_4 + CaO + CEM I ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$)

o Mélange limon du Val d'Europe + KPO_4 + CaO + CEM II

Avec le faible dosage en KPO_4 , les mesures de gonflement volumique sont comprises entre 0,05 % et 0,19 %, alors que pour le dosage fort elles varient entre 0,07 % et 0,24 % (figure 3.35). On peut donc considérer qu'il n'y a pas d'impact de la présence de phosphate sur le gonflement volumique.

Pour le faible dosage en KPO_4 , les mesures de résistance à la traction indirecte varient entre 0,28 MPa et 0,47 MPa, pour le dosage fort, elles varient entre 0,31 MPa et 0,40 MPa (figure 3.36). La résistance à la traction indirecte diminue lorsque KPO_4 est ajouté à dosage fort. Cette diminution est de l'ordre de 18 %.

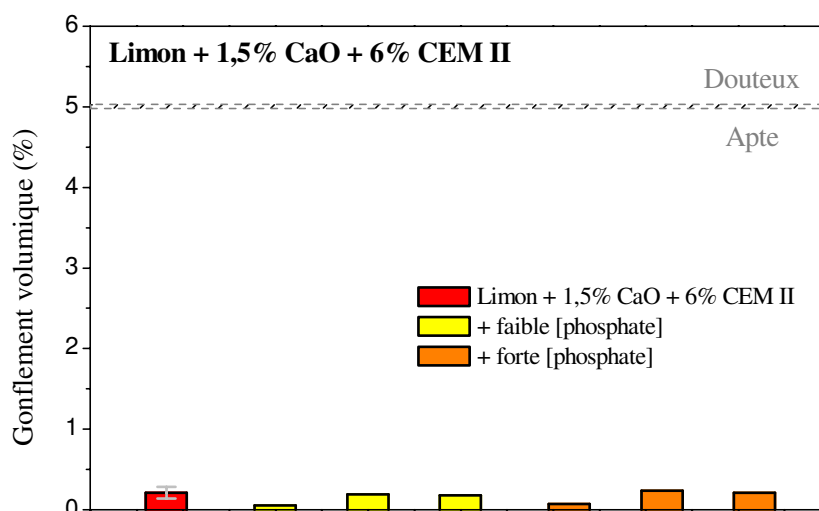


Figure 3.35 : Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange LVE + KPO_4 + CaO + CEM II ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$)

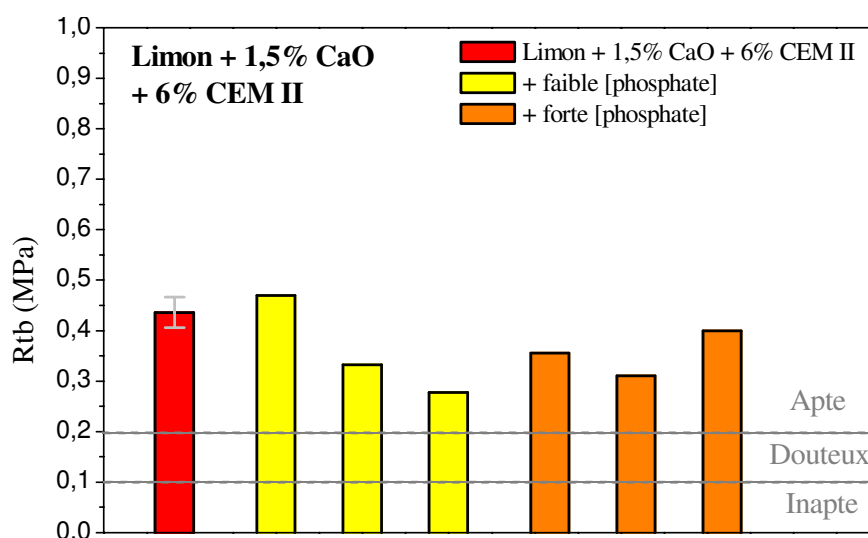


Figure 3.36 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sur le mélange LVE + KPO_4 + CaO + CEM II ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$)

3.2.2. Résistance à la compression simple sans immersion

Les résultats des essais mécaniques réalisés sur des éprouvettes non immergées de mélanges LVE + KPO_4 traités à la chaux et aux liants hydrauliques de types différents sont donnés ci-dessous.

o Mélange limon du Val d'Europe + KPO_4 + CaO + CEM I

Après 180 jours de cure, la résistance à la compression simple est de 7,61 MPa pour le dosage faible en phosphate, alors que pour le limon de référence traité, elle est de 7,78 MPa : au dosage faible, les phosphates n'impactent donc pas la résistance à la compression simple

dans ces conditions de traitement (figure 3.37). En revanche, une baisse de la résistance à la compression simple de l'ordre de 22 % a été mise en évidence lorsque les phosphates sont présents au dosage fort.

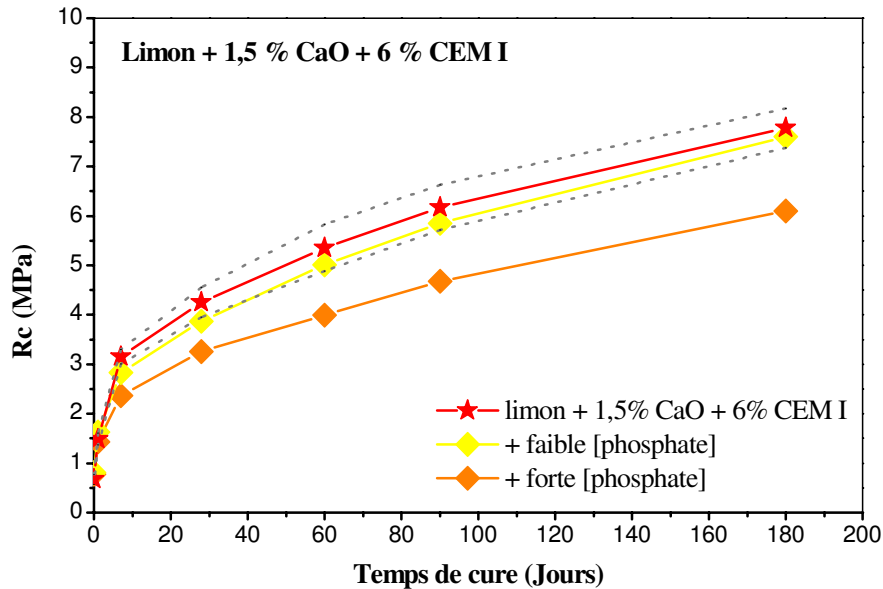


Figure 3.37 : Evolution de la résistance à la compression simple du mélange LVE + KPO_4 + CaO + CEM I avec le temps de cure ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$)

o Mélange limon du Val d'Europe + KPO_4 + CaO + CEM II

La résistance à la compression simple, lorsque l'on ajoute du KPO_4 au limon, puis traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II, est plus faible que celle du limon de référence traité (figure 3.38) (diminution de 18 %). Après 180 jours de cure, la résistance à la compression simple est de 5,69 MPa pour le dosage fort et de 5,93 MPa pour le dosage faible, et pour le limon de référence traité, elle est de 6,98 MPa.

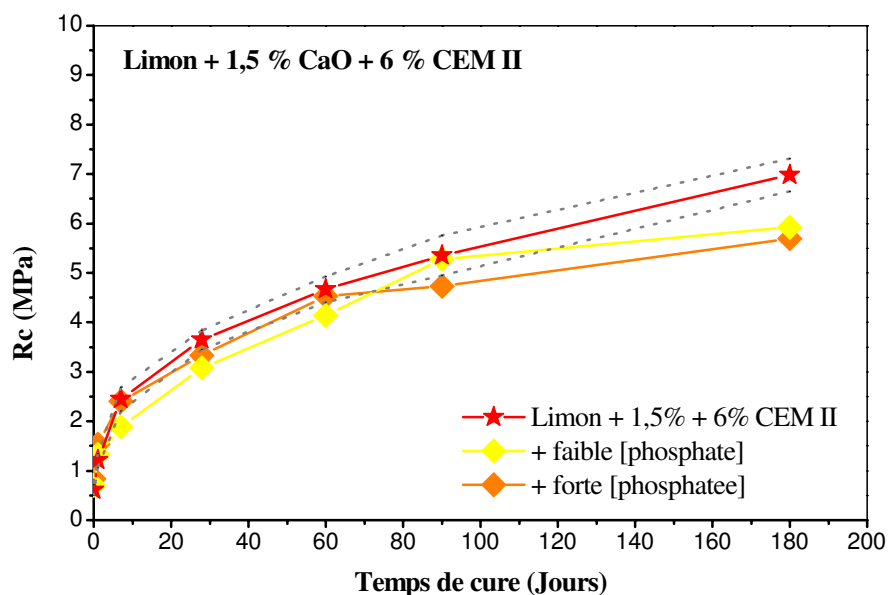


Figure 3.38 : Evolution de la résistance à la compression simple du mélange LVE + KPO_4 + CaO + CEM II avec le temps de cure ([dosage faible] = $400 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$; [dosage fort] = $1200 \text{ mg.kg}^{-1} KPO_4$)

3.2.3. Résistance à la compression simple après immersion

Les essais mécaniques sur des éprouvettes de mélanges LVE + KPO_4 traités à la chaux et aux liants hydrauliques de type différent ont permis d'obtenir leur résistance à la compression simple après immersion.

o Mélange limon du Val d'Europe + KPO_4 + CaO + CEM I

Les rapports R_{ci}/R_c varient entre 0,72 et 0,75 pour le faible dosage en chlorure et de 0,81 à 0,95 pour le fort dosage (tableau 3.21). Lorsque l'on ajoute du KPO_4 à dosage faible, les rapports R_{ci}/R_c diminuent légèrement, mais ils restent supérieurs à 0,6. Les gonflements volumiques, lorsque le limon contient du phosphate, avec un traitement à la chaux et à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I, sont du même ordre de grandeur que celles du limon de référence.

Tableau 3. 21 : Résistances à la compression simple après immersion et gonflements volumiques sur le mélange LVE + KPO_4 + CaO + CEM I ([dosage faible] = 400 mg.kg⁻¹ KPO_4 ; [dosage fort] = 1200 mg.kg⁻¹ KPO_4)

	R _c 60 jours (MPa)	R _{ci} (MPa)	R _{ci} /R _c	Gv (%)
Limon LVE + 1,5% CaO + 6% CEM I	5,36	4,61	0,86	0,20
+ faible [phosphate]	5,01	3,59	0,72	0,20
		3,59	0,72	0,49
		3,78	0,75	0,07
+ forte [phosphate]	4,00	3,79	0,95	0,14
		3,35	0,84	0,10
		3,23	0,81	0,22

o Mélange limon du Val d'Europe + KPO_4 + CaO + CEM II

Les rapports R_{ci}/R_c varient entre 0,74 et 0,88 pour le faible dosage en KPO_4 et de 0,72 à 1,01 pour le fort dosage (tableau 3.22). Les rapports R_{ci}/R_c et les gonflements volumiques, ne sont pas altérés par la présence de KPO_4 dans le limon, ceci pour un traitement à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II.

Tableau 3. 22 : Résistances à la compression simple après immersion et gonflements volumiques sur le mélange LVE + KPO_4 + CaO + CEM II ([dosage faible] = 400 mg.kg⁻¹ KPO_4 ; [dosage fort] = 1200 mg.kg⁻¹ KPO_4)

	R _c 60 jours (MPa)	R _{ci} (MPa)	R _{ci} /R _c	Gv (%)
Limon + 1,5% CaO + 6% CEM II	4,67	3,93	0,84	0,27
+ faible [phosphate]	4,14	3,64	0,88	0,15
		3,49	0,84	0,14
		3,08	0,74	0,12
+ forte [phosphate]	4,54	4,12	0,91	0,29
		4,56	1,01	0,28
		3,28	0,72	0,40

3.2.4. Synthèse

Les tableaux 3.23 et 3.24 récapitulent les résultats obtenus sur l'étude de l'effet du phosphate sur le traitement du limon, respectivement pour le faible dosage et le fort dosage. À faible dosage, l'ajout de phosphate n'influence pas le traitement du limon à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I. Au contraire, on observe une baisse des performances mécaniques lorsque le phosphate est ajouté à faible dosage au sol, lors du traitement au CEM II. À fort dosage, l'ajout de phosphate provoque une baisse des performances

mécaniques, pour le traitement au CEM I : une baisse de la résistance à la compression simple et une baisse des rapports R_{ci}/R_c , pour le traitement au CEM II : une baisse de la résistance à la traction brésilienne et une baisse de la résistance à la compression simple.

Tableau 3. 23 : Effet du phosphate à faible dosage sur le traitement du limon du Val d'Europe.

Traitement	Chaux vive + Liant hydraulique de type CEM I	Chaux vive + Liant hydraulique de type CEM II
Gonflement volumique	Aucune influence	
Résistance à la traction brésilienne	Aucune influence	Diminution des R_{tb} (19 %)
Résistance à la compression simple	Aucune influence	Diminution des R_c (15 % à 180 jours de cure)
Résistance à la compression simple après immersion	Aucune influence	

Tableau 3. 24 : Effet du phosphate à fort dosage sur le traitement du limon du Val d'Europe.

Traitement	Chaux vive + Liant hydraulique de type CEM I	Chaux vive + Liant hydraulique de type CEM II
Gonflement volumique	Aucune influence	
Résistance à la traction brésilienne	Aucune influence	Diminution des R_{tb} (18 %)
Résistance à la compression simple	Diminution des R_c (22 % à 180 jours de cure)	Diminution des R_c (18 % à 180 jours de cure)
Résistance à la compression simple après immersion	Diminution des Rapport R_{ci}/R_c (15 %)	Aucune influence

On observe au MEB une structure relativement fermée des éprouvettes de mélange limon + KPO_4 traité à la CaO et au CEM I (cf. figures 3.39 et 3.40), où on distingue les grains de quartz et la présence de phases cimentaires entre ces grains et contribuant au gain de performance. En comparant les observations MEB du limon LVE traité au CEM I avec et sans nitrates, aucune différence significative n'a pu être mise en évidence. On n'observe pas de phases contenant des phosphates ou du phosphore et pas d'effets visuels, modification de la microstructure du limon traité, qui tendent à prouver ou expliquer l'effet d'altération du traitement dans le cas du CEM I.

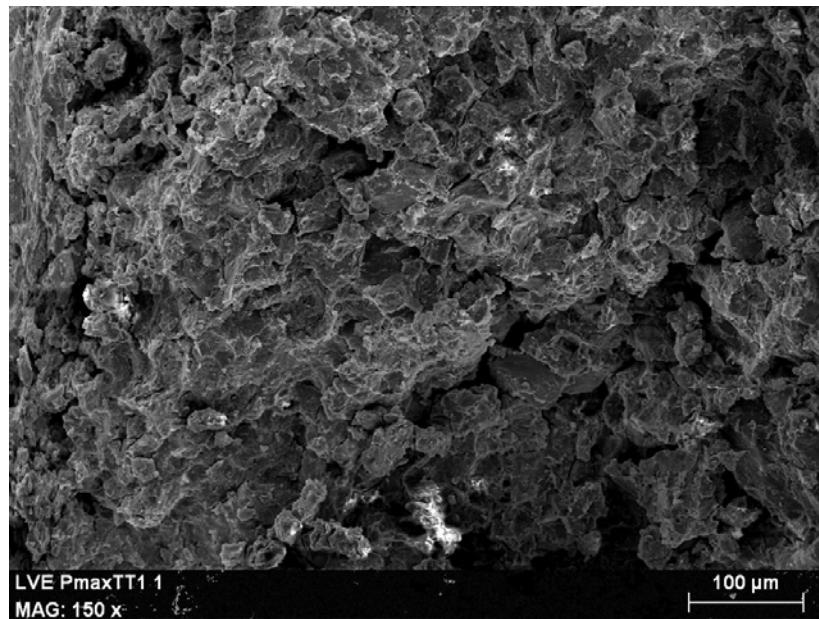


Figure 3.39 : Observation de surface au MEB du mélange limon + KPO_4 traité au CEM I ($\times 150$)

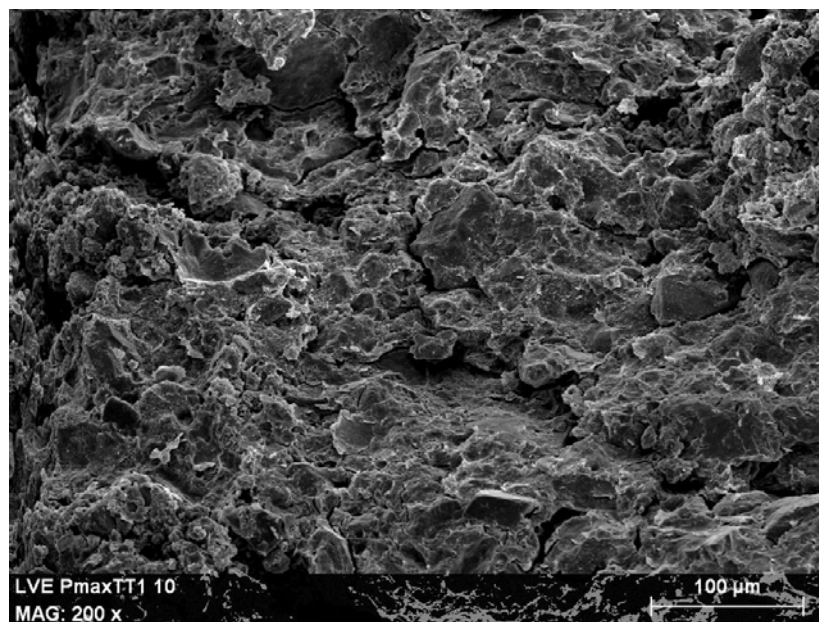


Figure 3.40 : Observation de surface au MEB du mélange limon + KPO_4 traité au CEM I ($\times 200$)

3.3. Discussion : impact de la présence de phosphate sur le traitement des sols

Les différents essais permettent d'évaluer l'impact de KPO_4 lors du traitement d'un sol. L'ajout de KPO_4 à faible ou forte concentration améliore les caractéristiques mécaniques du sable traité au CEM I, avec une augmentation de la résistance à la compression simple de l'ordre de 22 %. Par contre, l'ajout de KPO_4 au limon induit une légère baisse des

performances du traitement mixte chaux / ciment (baisse de 22 % la résistance à la compression simple lors du traitement avec le CEM I). Malgré tout, les mélanges LVE + KPO_4 présentent des caractéristiques mécaniques satisfaisantes pour envisager leur utilisation lors de travaux de terrassements.

La nature du sol traité, et donc la présence d'argile, est apparue comme un facteur décisif dans le résultat, l'ajout de phosphate au limon étant négatif pour ses performances mécaniques. Dans le cas du limon traité, une influence a également été mise en évidence lors de l'utilisation de CEM I ou CEM II, alors que, dans le cas du sable traité, l'influence s'est manifestée seulement lors de l'utilisation du CEM I. Guichard (2006) n'observait aucune influence des phosphates sur le traitement et a déterminé que le mélange limon et phosphate était apte au traitement choisi.

Le phosphate est utilisé comme retardateur de prise dans le domaine du béton. Ce retard est dû à l'absorption ou à la formation d'une couche protectrice sur les grains de clinker par la précipitation de composés phospho-calciques (Cau Dit Coumes et Courtois, 2002). Ces composés vont empêcher l'hydratation du clinker et donc la prise (Bénard *et al.*, 2008).

Dans la plupart des cas, notre travail montre que le mélange sol + phosphate traité possède des caractéristiques mécaniques intéressantes. À long terme, les résistances à la compression simple, par exemple pour le limon, sont supérieures à 5 MPa, et les rapports R_{ci}/R_c sont supérieurs à 0,6. Nos sols sont donc utilisables lors de travaux de terrassement. En conclusion, aux concentrations que nous avons choisies, le phosphate de potassium ne peut pas être considéré comme perturbateur de prise lors du traitement des sols, malgré une baisse des performances mécaniques. Nos essais mettent aussi en évidence le fait que les résultats dépendent non seulement de la présence de phosphates et de sa concentration mais aussi de la nature du liant et du sol.

4. INFLUENCE DE LA PRÉSENCE D'UN SULFATE SUR LE TRAITEMENT DES SOLS

Afin d'évaluer l'influence des sulfates sur le traitement des sols, nous avons utilisé du gypse, $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ en addition à l'eau de gâchage. Les concentrations choisies pour l'étude sont pour le dosage faible, 1 g de $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ par kg de sol sec, et pour le dosage fort, 10 g de $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ par kg de sol sec (Cf. 2.1.4).

Cette partie va présenter les résultats des mesures de gonflement volumique, résistance à la traction brésilienne, résistance à la compression simple avec ou sans immersion, obtenus sur les mélanges sable de Bouër (SB) + $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$, dans un premier temps, puis ensuite sur les mélanges limon du Val d'Europe (LVE) + $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$. Ces mélanges ont été traités selon les modalités évoquées dans le chapitre 2.

4.1. Influence d'un sulfate sur le traitement du sable de Bouër

4.1.1. Résultats des essais d'aptitude au traitement

Le gonflement volumique et la résistance à la traction indirecte des mélanges sable + $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ traités aux liants hydrauliques de type différent sont donnés dans cette partie.

o Mélange sable de Bouër + $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ + CEM I

Pour le faible dosage en gypse, le gonflement volumique est compris entre 0,24 % et 0,64 %, et pour le dosage fort, entre 0,74 % et 1,04 % (figure 3.41). Le gonflement volumique augmente de l'ordre de 50 %. Lorsque l'on ajoute du gypse à dosage fort le sol reste cependant apte au traitement au sens de la norme NF P 94-100.

Pour le faible dosage en sulfate, les mesures de résistance à la traction indirecte varient entre 0,19 MPa et 0,22 MPa, pour le dosage fort, les variations sont entre 0,21 MPa et 0,23 MPa (figure 3.42). La résistance à la traction indirecte du mélange sable + CEM I varie peu lors de l'addition de sulfate sous forme de gypse au sol.

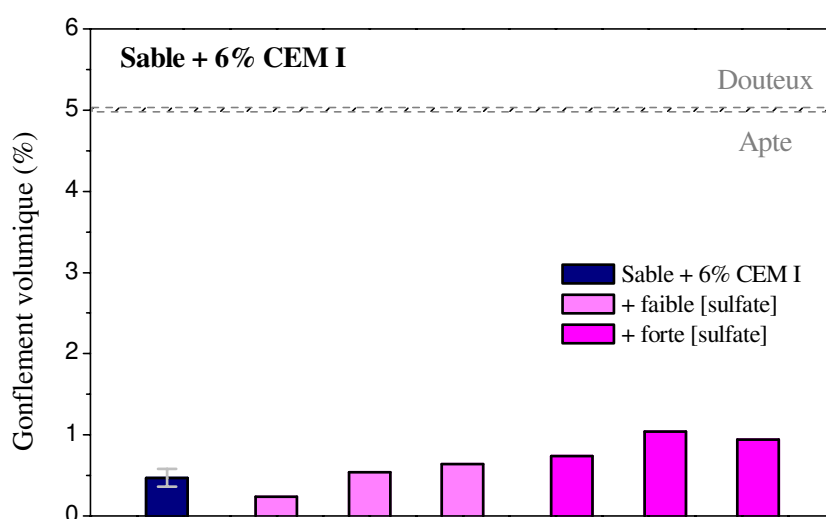


Figure 3.41 : Essai d'aptitude : gonflement volumique du mélange SB + $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ + CEM I ([dosage faible] = $1 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$; [dosage fort] = $10 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$)

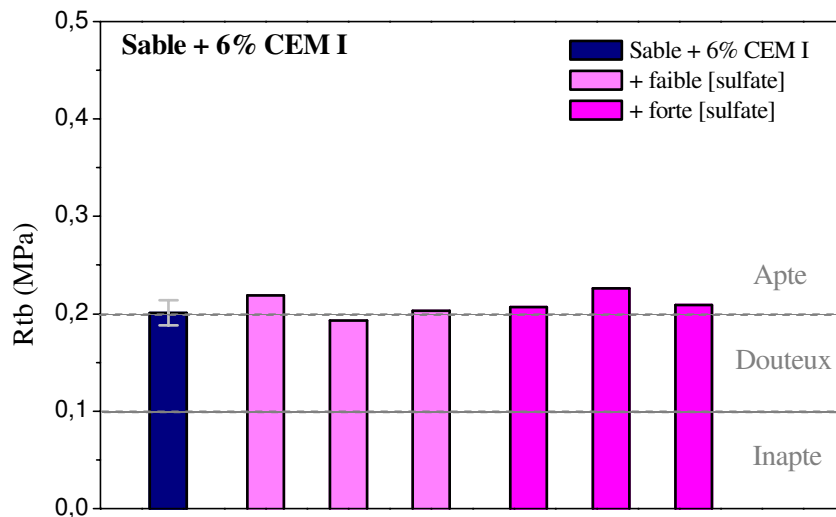


Figure 3.42 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) du mélange SB + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CEM I ([dosage faible] = $1 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; [dosage fort] = $10 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

o Mélange sable de Bouër + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CEM II

Pour le faible dosage en sulfate, le gonflement volumique varie entre 0,10 % et 0,18 %, et au dosage fort, le gonflement volumique est compris entre 2,21 % et 3,15 % (figure 3.43). La présence de sulfate au dosage fort multiplie donc le gonflement par un facteur 5 par rapport au cas où le sol ne contient pas de sulfate, mais reste inférieur à 5 %, valeur limite pour classer le sol apte ou douteux (NF P 94-100).

Pour le faible dosage en gypse, les mesures de résistance à la traction indirecte varient entre 0,08 MPa et 0,11 MPa, au dosage fort, les variations des mesures sont entre 0,11 MPa et 0,15 MPa (figure 3.44). Les mesures de résistance à la traction indirecte varient peu lorsque le gypse est ajouté à faible dosage. En revanche, les valeurs de résistance à la traction indirecte augmentent pour le fort dosage en gypse (augmentation de 19 %).

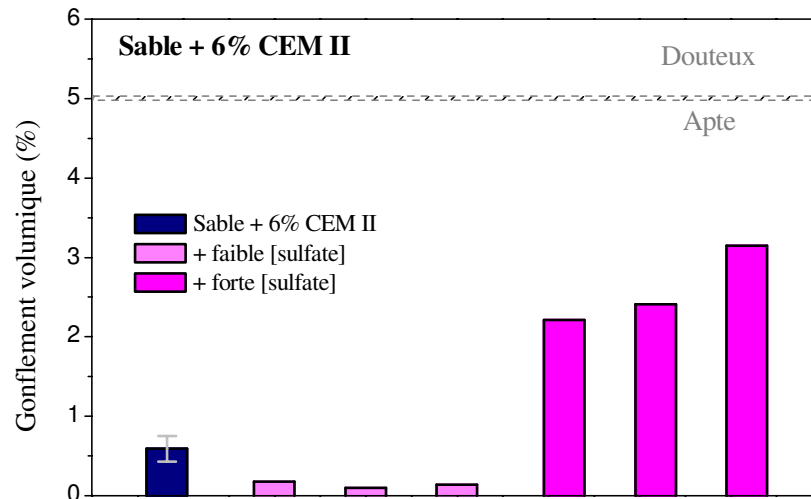


Figure 3.43 : Mesures de gonflement volumique sur le du mélange SB + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CEM II ([dosage faible] = $1 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; [dosage fort] = $10 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

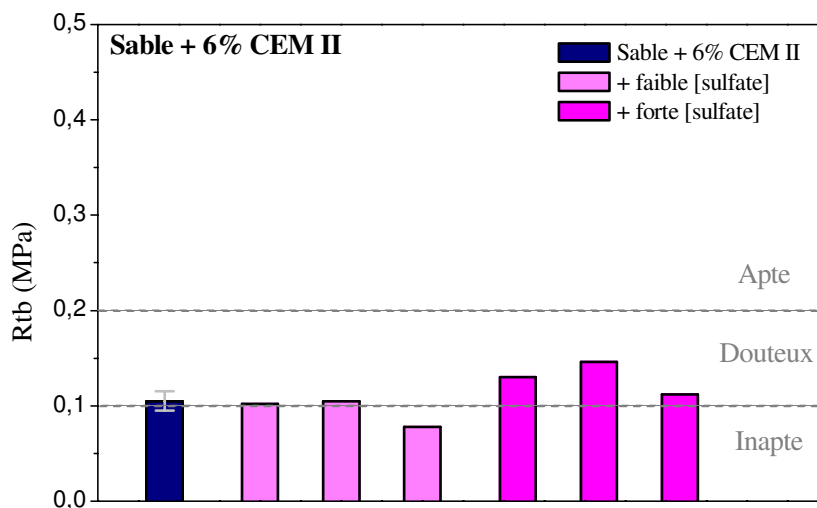


Figure 3.44 : Mesures de résistance à la traction indirecte (essai brésilien) du mélange SB + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CEM II ([dosage faible] = $1 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; [dosage fort] = $10 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

4.1.2. Résistance à la compression simple sans immersion

La résistance à la compression simple des éprouvettes non immergées de mélanges du sable + gypse traités aux liants hydrauliques de type différent est donnée ci-dessous.

o Mélange sable de Bouër + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CEM I

Après 180 jours de cure, les résistances à la compression simple sont de 2,75 MPa pour le dosage fort et de 1,81 MPa pour le dosage faible, alors que pour le sable de référence traité, elle est de 2,05 MPa. Les résistances à la compression simple sont plus fortes dans le

cas du sol contenant du sulfate à fort dosage avec un traitement au liant hydraulique de type CEM I (figure 3.45). Cette augmentation est de l'ordre de 25 %.

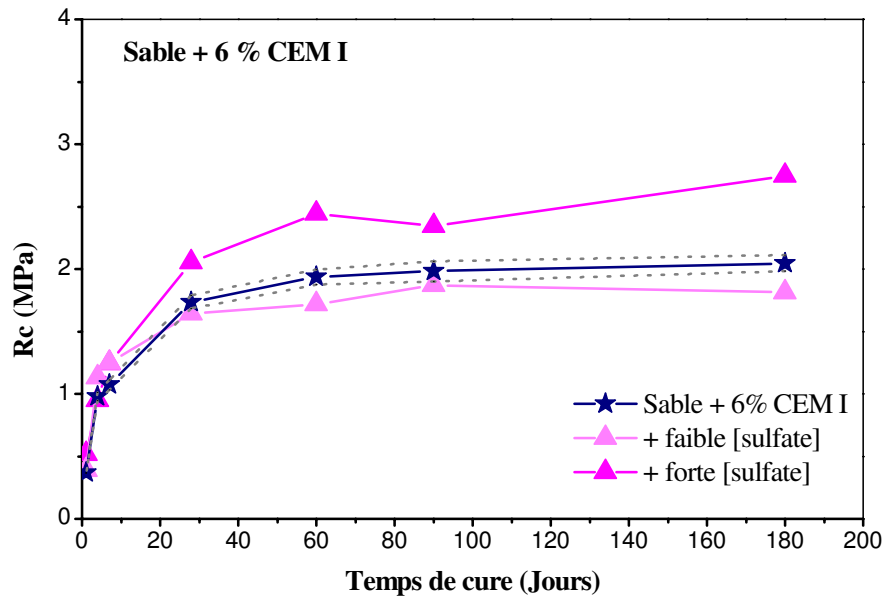


Figure 3.45 : Évolution de la résistance à la compression simple sur le du mélange $SB + CaSO_4, 2H_2O + CEM I$ ([dosage faible] = $1 \text{ g.kg}^{-1} CaSO_4, 2H_2O$; [dosage fort] = $10 \text{ g.kg}^{-1} CaSO_4, 2H_2O$)

o Mélange sable de Bouër + $CaSO_4, 2H_2O + CEM II$

Après 180 jours de cure, la résistance à la compression simple est de 1,89 MPa pour le dosage fort et de 1,81 MPa pour le dosage faible et, pour le sable de référence traité, elle est de 1,57 MPa. La résistance à la compression simple n'est pas affectée par la présence de gypse. (figure 3.46).

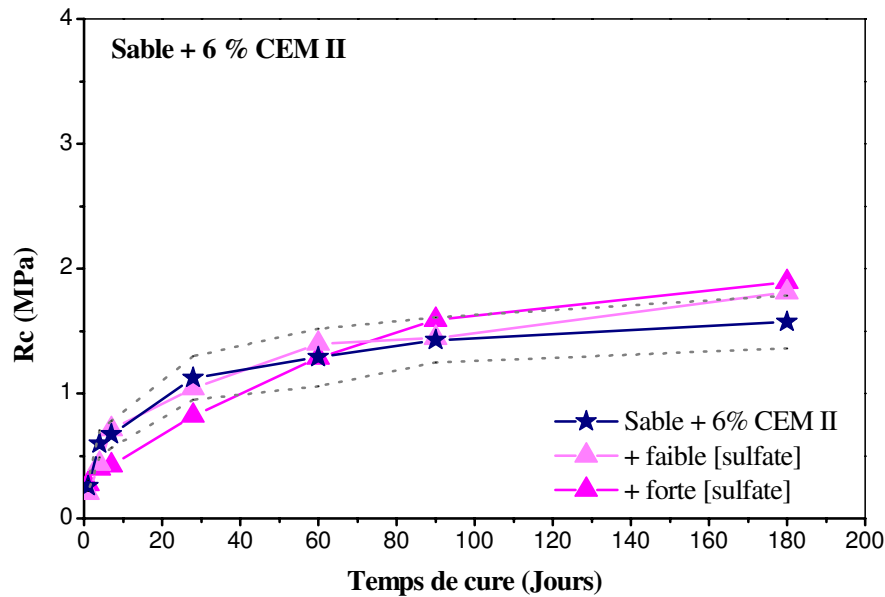


Figure 3.46 : Évolution de la résistance à la compression simple du mélange SB + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CEM II avec le temps de cure ([dosage faible] = $1 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; [dosage fort] = $10 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

4.1.3. Résistance à la compression simple après immersion

Les résistances à la compression simple après immersion sur des éprouvettes des mélanges sable + gypse traités aux liants hydrauliques de type différent sont présentées à présent ci-dessous.

o Mélange sable de Bouër + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CEM I

Les rapports R_{ci}/R_c varient entre 0,99 et 1,05 pour le faible dosage en sulfate et de 0,67 à 0,69 pour le fort dosage (tableau 3.25). Les rapports R_{ci}/R_c , diminuent en présence de gypse de l'ordre de 21 %. Le gonflement volumique, lorsque l'on ajoute du gypse au sable, puis l'on traite au CEM I, n'est en revanche pas modifié de manière significative par la présence de gypse.

Tableau 3.25 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur du mélange SB + $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ + CEM I ([dosage faible] = $1 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$; [dosage fort] = $10 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$)

	R_c 60 jours (MPa)	R_{ci} (MPa)	R_{ci}/R_c	Gv (%)
Sable + 6% CEM I	1,94	1,70	0,88	0,14
+ faible [sulfate]	1,72	1,71	0,99	0,14
		1,88	1,09	0,12
		1,80	1,05	0,16
+ forte [sulfate]	2,44	1,69	0,69	0,07
		1,64	0,67	0,29
		1,69	0,69	0,26

o Mélange sable de Bouër + $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ + CEM II

Les rapports R_{ci}/R_c varient entre 0,78 et 0,81 pour le faible dosage en sulfate et de 0,61 à 0,64 à fort dosage (tableau 3.26). Le rapport R_{ci}/R_c , diminue de 22 % dans le cas où le sable contient du gypse au fort dosage. Le gonflement volumique, lorsque l'on ajoute du gypse au sable, puis on traite au liant hydraulique de type CEM II, sont significativement les mêmes que celles du sable de référence.

Tableau 3. 26 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange SB + $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ + CEM II ([dosage faible] = $1 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$; [dosage fort] = $10 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$)

	R_c 60 jours (MPa)	R_{ci} (MPa)	R_{ci}/R_c	Gv (%)
Sable + 6% CEM II	1,29	1,06	0,83	0,19
+ faible [sulfate]	1,40	1,14	0,81	0,04
		1,10	0,78	0,15
		1,11	0,79	0,15
+ forte [sulfate]	1,29	0,80	0,62	0,02
		0,82	0,64	0,30
		0,78	0,61	0,24

4.1.4. Synthèse

Les tableaux 3.27 (faible dosage) et 3.28 (fort dosage) récapitulent les résultats obtenus sur l'étude de l'effet du gypse sur le traitement du sable. A faible dosage, l'ajout de sulfate n'altère pas le traitement du sable quelque soit le liant utilisé. On peut dire que la présence de sulfate ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), à fort dosage, augmente les gonflements volumiques et

diminue les rapports R_{ci}/R_c . Par contre les résistances du sable traité sont supérieures au sable de référence, de l'ordre de 25 % lorsque le CEM I est utilisé.

Tableau 3. 27 : Effet du sulfate à faible dosage ($1 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) sur le traitement du sable de Bouër.

Traitement	Liant hydraulique de type CEM I	Liant hydraulique de type CEM II
Gonflement volumique	Aucune influence	
Résistance à la traction brésilienne	Aucune influence	
Résistance à la compression simple	Aucune influence	
Résistance à la compression simple après immersion	Augmentation des rapports R_{ci}/R_c (19 %)	Aucune influence

Tableau 3. 28 : Effet du sulfate à fort dosage ($10 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) sur le traitement du sable de Bouër.

Traitement	Liant hydraulique de type CEM I	Liant hydraulique de type CEM II
Gonflement volumique	Augmentation du Gv (50 %)	Augmentation du Gv (500 %)
Résistance à la traction brésilienne	Aucune influence	Augmentation des R_{tb} (19 %)
Résistance à la compression simple	Augmentation des R_c (25 %)	Aucune influence
Résistance à la compression simple après immersion	Diminution des rapports R_{ci}/R_c (21 %)	Diminution des rapports R_{ci}/R_c (22 %)

4.2. Influence d'un sulfate sur le traitement du limon du Val d'Europe (LVE)

4.2.1. Résultats des essais d'aptitude au traitement

Les mesures de gonflement volumique et de résistance à la traction indirecte ont été réalisées sur des mélanges limon de Val d'Europe + gypse traités à la chaux et aux liants hydrauliques CEM I et CEM II.

- o Mélange limon du Val d'Europe + $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM I

Pour le faible dosage en gypse, les mesures de gonflement volumique varient entre 0,46 % et 0,52 %, pour le dosage fort, les mesures sont comprises entre 3,13 % et 3,63 % (figure 3.47). Le gonflement volumique est multiplié par 10, en présence de sulfate à fort dosage.

Pour le faible dosage en gypse, les mesures de résistance à la traction indirecte varient entre 0,55 MPa et 0,67 MPa ; pour le dosage fort, les mesures varient entre 0,55 MPa et 0,72 MPa (figure 3.48). La résistance à la traction indirecte augmente de 18 %, lorsque le sulfate est ajouté aux concentrations choisies sans qu'il y ait un effet significatif de la teneur en gypse.

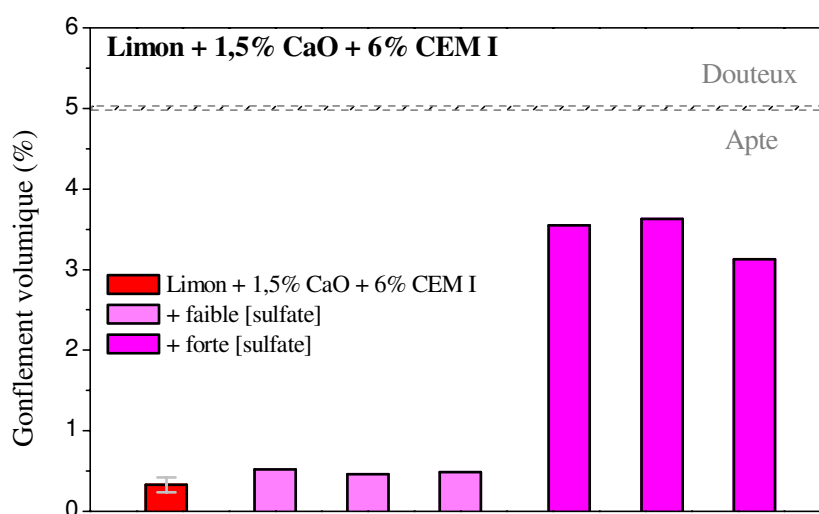


Figure 3.47 : Essai d'aptitude : gonflement volumique du mélange LVE + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM I ([dosage faible] = $1 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; [dosage fort] = $10 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

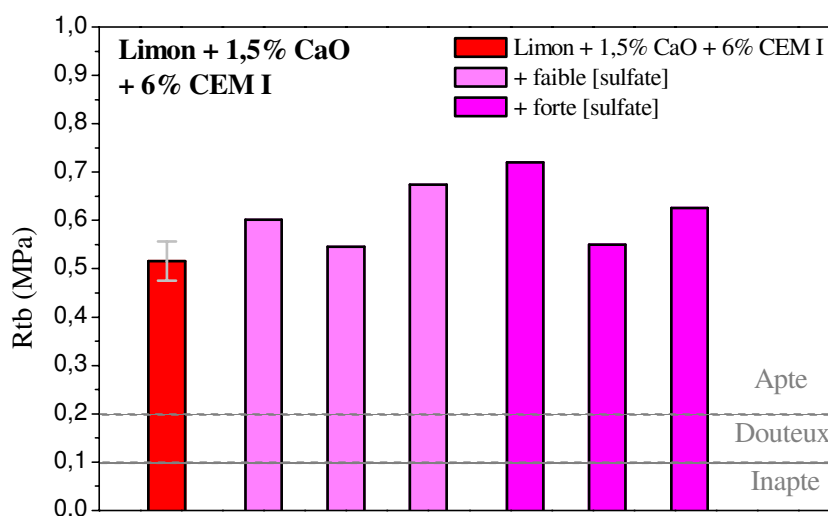


Figure 3.48 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) du mélange LVE + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM I ([dosage faible] = $1 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; [dosage fort] = $10 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

o *Mélange limon du Val d'Europe + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM II*

Pour le faible dosage en gypse, les mesures de gonflement volumique varient entre 0,26 % et 0,41 % ; pour le dosage fort, les mesures varient entre 12,84% et 18,88 % (figure 3.49). Le gonflement volumique augmente très fortement lorsque l'on ajoute du sulfate au fort dosage, il est multiplié par 70.

Pour le faible dosage en gypse, les mesures de résistance à la traction indirecte varient entre 0,44 MPa et 0,59 MPa ; pour le dosage fort, les mesures varient entre 0,32 MPa et 0,38 MPa (figure 3.50). La résistance à la traction indirecte diminue de l'ordre de 19% lorsque le sulfate est présent à dosage fort.

Comme l'impose la norme NF P 94-100 (cf. chapitre 2), les trois éprouvettes sur lesquelles le gonflement volumique est mesuré sont libres de gonfler dans les trois dimensions. Cette norme impose également que les trois autres éprouvettes soient conservées dans leurs étuis lors de l'immersion avant de mesurer la résistance à la traction indirecte par essai brésilien, afin de pouvoir conserver leurs formes cylindriques. Ainsi, les trois premières éprouvettes gonflent de l'ordre de 15 %, alors que les trois autres éprouvettes confinées ne gonflent que de l'ordre de 1,5 %. Il est ainsi possible de mesurer une résistance. Le confinement des éprouvettes permet de réduire le gonflement volumique et l'acquisition de performance mécaniques du mélange LVE + gypse.

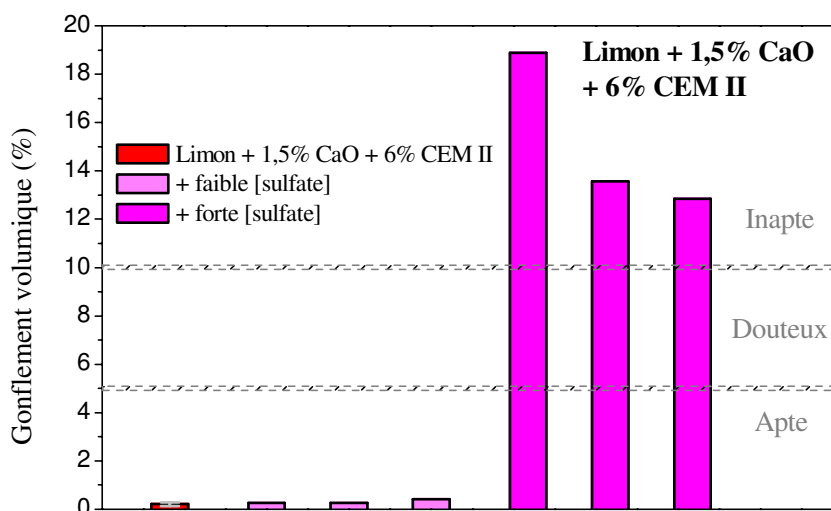


Figure 3.49 : Essai d'aptitude : gonflement volumique du mélange LVE + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM II
([dosage faible] = $1 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; [dosage fort] = $10 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

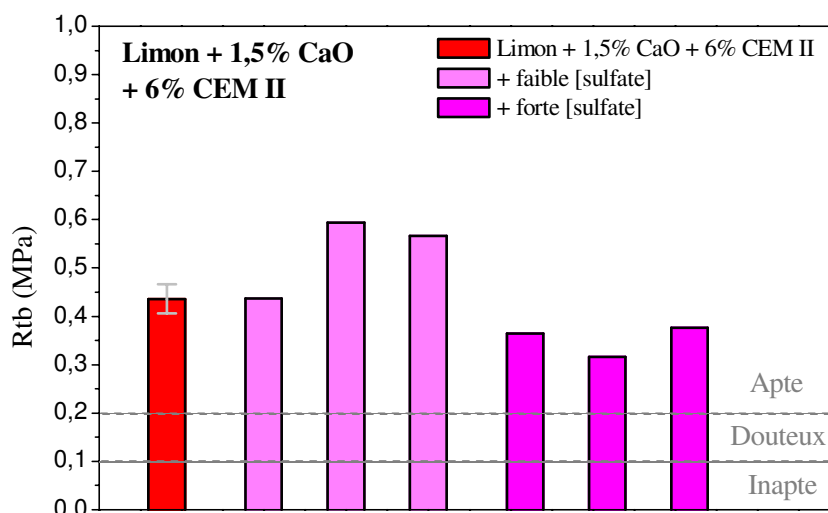


Figure 3.50 : Essai d'aptitude : résistance à la traction indirecte (essai brésilien) du mélange LVE + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM II ([dosage faible] = $1 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; [dosage fort] = $10 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

4.2.2. Résistance à la compression simple sans immersion

La résistance à la compression simple des éprouvettes non immergées des mélanges LVE + gypse traité à la chaux et aux liants hydrauliques de type différents est présenté ci-après.

o Mélange limon du Val d'Europe + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM I

Après 180 jours de cure, les résistances à la compression simple sont de 8,30 MPa pour le dosage faible, et de 7,78 MPa pour le dosage fort, alors que, pour le limon de référence traité, elle est de 7,78 MPa. La résistance à la compression simple du limon n'est pas altérée par la présence de soufre dans le cas du traitement à la chaux et au liant hydraulique de type CEM I (figure 3.51).

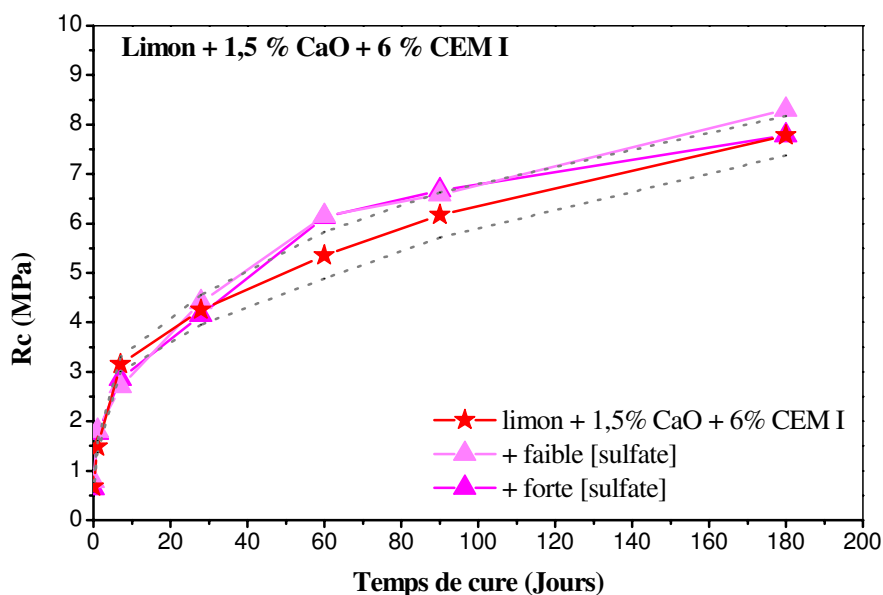


Figure 3.51 : Évolution de la résistance à la compression simple sur le mélange LVE + $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM I avec le temps de cure ([dosage faible] = $1 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$; [dosage fort] = $10 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$)

o Mélange limon du Val d'Europe + $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM II

Après 180 jours de cure, les résistances à la compression simple sont de 5,85 MPa pour le dosage fort et de 6,77 MPa pour le dosage faible et, pour le limon de référence traité, elle est de 6,98 MPa. La résistance à la compression simple obtenue après traitement à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II, du limon contenant du sulfate au dosage fort, est plus faible que celle du limon de référence traité (figure 3.52). Cette diminution est de l'ordre de 16 %.

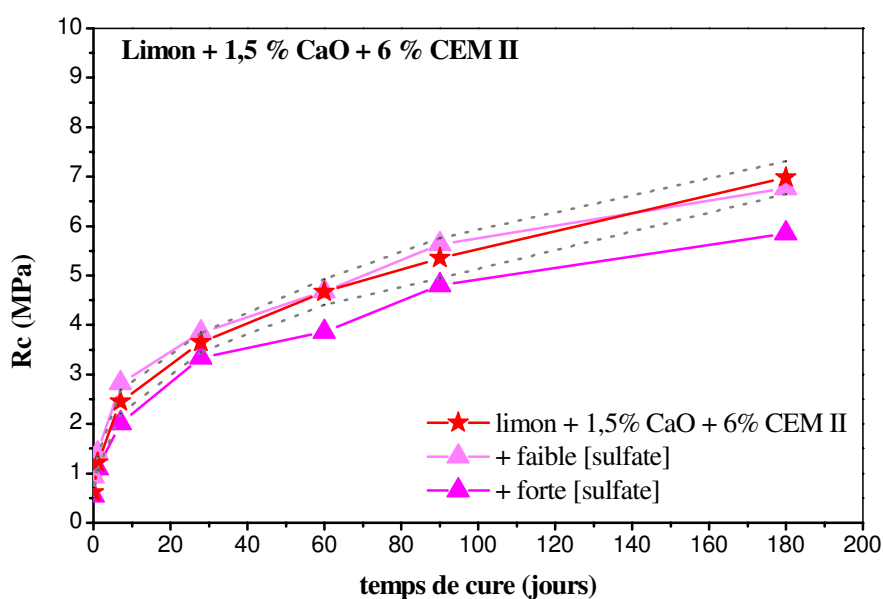


Figure 3.52 : Évolution de la résistance à la compression simple sur le mélange LVE + $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM I avec le temps de cure ([dosage faible] = $1 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$; [dosage fort] = $10 \text{ g.kg}^{-1} \text{ CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$)

4.2.3. Résistance à la compression simple après immersion

Les essais mécaniques sur des éprouvettes de mélange LVE + gypse traités ont permis d'obtenir leur résistance à la compression simple après immersion.

o *Mélange limon du Val d'Europe + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM I*

Les rapports R_{ci}/R_c varient entre 0,88 et 0,96 pour le faible dosage en sulfate et de 0,78 à 0,89 pour le fort dosage (tableau 3.29). Les gonflements volumiques, sont plus forts que celles du limon de référence (1,52 % en moyenne pour le fort dosage et 0,20 % pour le sol de référence). Malgré cela, les rapports R_{ci}/R_c des mélanges limon et sulfate traités sont du même ordre de grandeur que celui obtenu avec le sol de référence ne contenant pas de perturbateur.

Tableau 3. 29 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange LVE + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM I ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ gypse ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ gypse)

	R_c 60 jours (MPa)	R_{ci} (MPa)	R_{ci}/R_c	Gv (%)
Limon + 1,5% CaO + 6% CEM I	5,36	4,61	0,86	0,20
+ faible [sulfate]	6,15	5,40	0,88	0,12
		5,80	0,96	0,10
		4,60	0,95	0,12
+ forte [sulfate]	6,13	4,87	0,79	1,48
		5,48	0,89	1,70
		4,76	0,78	1,39

o *Mélange limon du Val d'Europe + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM II*

Les rapports R_{ci}/R_c varient entre 0,77 et 0,94 pour le faible dosage en sulfate et de 0,88 à 0,96 pour le fort dosage (tableau 3.30). Avec ces conditions de traitement, le gonflement volumique, est augmenté en présence de sulfate (de 1,62 % à 2,54 % pour le dosage fort) par rapport au limon de référence (0,27 %). Malgré cela, les rapports R_{ci}/R_c des mélanges limon et sulfate traités sont significativement les mêmes que celle du sol de référence.

Tableau 3. 30 : Résistance à la compression simple après immersion et gonflement volumique sur le mélange LVE + CaSO₄ · 2H₂O + CaO + CEM II ([dosage faible] = 1 g.kg⁻¹ gypse ; [dosage fort] = 10 g.kg⁻¹ gypse)

	R _c 60 jours (MPa)	R _{ci} (MPa)	R _{ci} /R _c	Gv (%)
Limon + 1,5% CaO + 6% CEM II	4,67	3,93	0,84	0,27
+ faible [sulfate]	4,68	4,38	0,94	0,13
		4,08	0,87	0,42
		3,60	0,77	0,03
+ forte [sulfate]	3,86	3,39	0,88	1,62
		3,73	0,96	2,54
		3,69	0,95	2,16

4.2.4. Synthèse

Le tableau 3.31 récapitule les résultats obtenus sur l'étude de l'effet du sulfate à faible dosage sur le traitement du limon, les résultats pour le fort dosage en sulfate sont dans le tableau 3.32. On observe une augmentation des gonflements volumiques quel que soit le type de liant hydraulique. Lorsque le liant est de type CEM I, les performances du mélange limon + sulfate sont légèrement supérieures à celles du limon de référence. Lorsque le liant est de type CEM II, les performances du mélange limon + sulfate sont plus faibles que celles du limon de référence. Quelque soit la concentration et le type de liant utilisé, l'ajout de sulfate ne provoque pas de baisse des rapports R_{ci}/R_c.

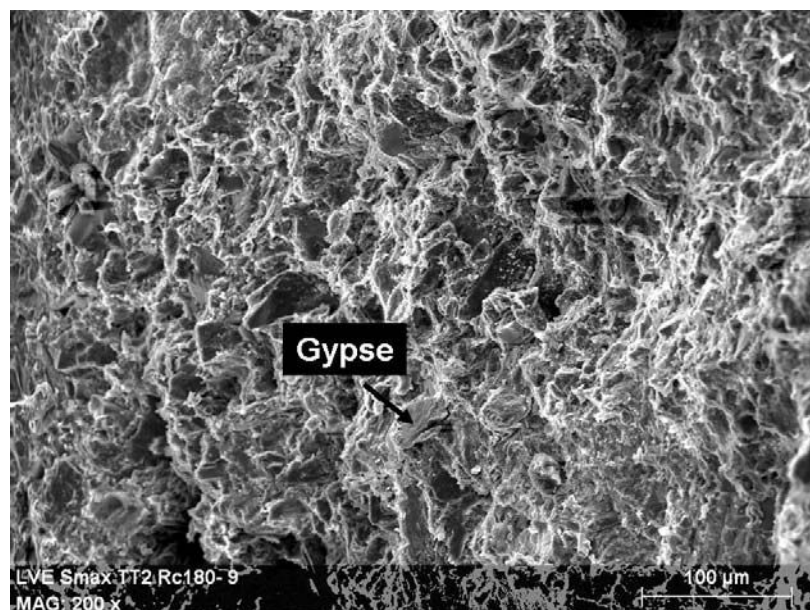
Tableau 3. 31 : Effet du gypse à faible dosage (1 g.kg⁻¹ gypse) sur le traitement du limon du Val d'Europe.

Traitement	Chaux vive + Liant hydraulique de type CEM I	Chaux vive + Liant hydraulique de type CEM II
Gonflement volumique	Aucune influence	
Résistance à la traction brésilienne	Augmentation des R_{tb} (17 %)	Augmentation des R_{tb} (22 %)
Résistance à la compression simple	Aucune influence	
Résistance à la compression simple après immersion	Aucune influence	

Tableau 3. 32 : Effet du gypse à fort dosage (10 g.kg^{-1} gypse) sur le traitement du limon du Val d'Europe.

Traitement	Chaux vive + Liant hydraulique de type CEM I	Chaux vive + Liant hydraulique de type CEM II
Gonflement volumique	Augmentation du Gv (1000 %)	Augmentation du Gv (7000 %)
Résistance à la traction brésilienne	Augmentation des R_{tb} (18 %)	Diminution des R_{tb} (19 %)
Résistance à la compression simple	Aucune influence	Diminution des R_c (16 %)
Résistance à la compression simple après immersion	Aucune influence	

Les observations au MEB des éprouvettes de mélange LVE + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM II montrent : la dispersion de grains de gypse au sein de la microstructure du sol (figures 3.53 et 3.54) et la formation d'ettringite qui se caractérise par la formation de cristaux en aiguilles, parfois organisés en gerbes qui recouvrent les particules primaires du sol (figure 3.55). Il y a une corrélation étroite entre la présence des cristaux de gypse et la formation de l'ettringite. En effet, cette dernière se forme au voisinage immédiat de particules de gypse. La lente hydratation du gypse (par l'eau présente initialement) conduit à la formation d'ettringite (réaction [8] du chapitre 1).

**Figure 3.53** : Observation de surface au MEB du mélange limon + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM II ($\times 200$)

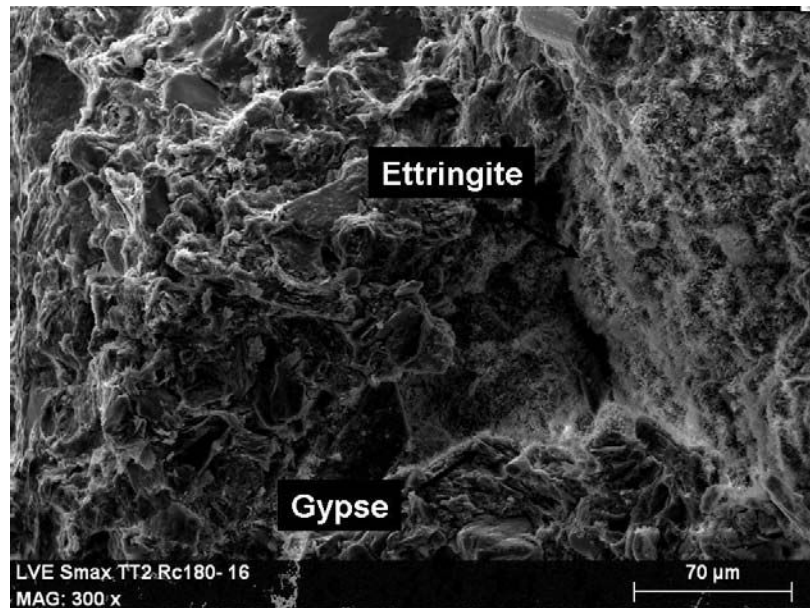


Figure 3.54 : Observation de surface au MEB du mélange limon + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM II, ettringite tapissant la paroi des pores ($\times 300$)

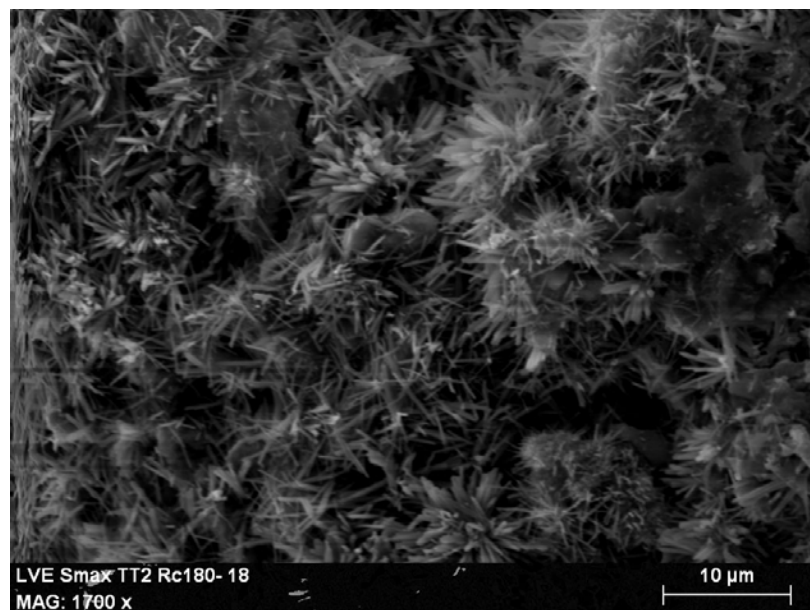


Figure 3.55 : Observation de surface au MEB du mélange limon + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM II, vue de détail du tapis d'ettringite tapissant la paroi des pores ($\times 1700$)

4.3. Discussion : impact de la présence de sulfate sur le traitement des sols

La présence de sulfates dans les sols utilisés dans cette étude se traduit dans certains cas par l'apparition d'un gonflement parfois très important des éprouvettes. Ce gonflement résulte de la formation d'ettringite au cours de la cure, comme l'illustrent les observations en

microscopie électronique à balayage. La mise en évidence d'un gonflement important n'est pas systématiquement corrélée à une baisse de la performance mécanique du sol traité. Les éprouvettes ayant subi des gonflements importants peuvent présenter des performances mécaniques égales, voire supérieures, au matériau traité dans les mêmes conditions mais ne contenant pas de gypse. Ce comportement paradoxal peut s'expliquer par la méthode de mélange du sol et du perturbateur retenue dans le cadre de cette étude ainsi que le mode opératoire propre à cet essai. En effet, selon cette procédure, le composé chimique ajouté est réparti d'une manière homogène dans le sol et donc dans l'éprouvette (figure 3.53). Le gonflement est donc relativement uniforme. De plus, dans les conditions expérimentales de l'essai d'aptitude (cf. Chapitre 2, paragraphe 3.5.1.), l'éprouvette sur laquelle est déterminée la résistance mécanique est maintenue confinée lors de la phase d'immersion à 40°C. Ce confinement limite probablement le gonflement macroscopique latéral, et donc favorise le développement de la résistance mécanique.

Ces résultats permettent d'évaluer l'influence de la nature du liant, du type de sol ainsi que de la concentration en sulfates sur les propriétés mécaniques d'un sol traité contenant des sulfates (cf tableaux 3.21 et 3.23). La nature du liant apparaît ainsi comme un élément déterminant pour le gonflement d'un sol traité, quelles que soient les conditions d'essais. Ainsi, les gonflements obtenus étaient systématiquement plus forts dans le cas de l'utilisation d'un CEM II que pour le CEM I. De même, l'impact de la présence des sulfates à une concentration donnée dépend de la nature du sol, la présence de sulfates dans le limon menant à des gonflements plus importants, notamment dans le cas de l'essai d'aptitude.

La question du seuil de perturbation du sulfate peut être aussi abordée à partir de ces résultats qui montrent que le seuil de perturbation, correspondant à la concentration à partir de laquelle le sol est inapte au traitement, par exemple, pour le limon traité au CEM I n'est pas atteint. Dans ce cas, le seuil est supérieur à 1 % de sulfate de calcium dans le sol. Le seuil est plus faible pour le limon du Val d'Europe traité au CEM II, il est compris entre 0,1 % et 1 %. La notion de seuil est donc liée aux concentrations en élément chimique, mais aussi à la nature du sol et aux produits de traitement. On illustre ici la grande disparité des valeurs de seuils de perturbations mises en évidence par certains auteurs (cf. tableau 1.2). L'influence de la présence de sulfate ne peut donc pas s'apprécier uniquement sur un simple critère de quantité, concentration en sulfate dans un sol.

Enfin, nous mettons ici en évidence l'influence des conditions d'essai retenues pour évaluer l'influence de la présence de sulfates, et finalement l'aptitude au traitement d'un sol. Ainsi, les résultats des essais d'aptitude permettent de déclarer la plupart des mélanges

contenant des sulfates comme inaptés au traitement. Cet essai semble pénalisant. En effet, le gonflement volumique fort peut exclure le sol d'un traitement, malgré une faible diminution des résistances à la compression simple (R_c), des résistances à la traction brésilienne R_{tb} , des rapports résistances à la compression simple après immersion sur résistances à la compression simple (R_{ci}/R_c). Ainsi, si les essais d'aptitude permettent de révéler l'action des sulfates, dans des conditions bien identifiées et pour des utilisations particulières, on ne peut pas se baser uniquement sur ce type d'essai pour décider d'écarter un matériau contenant des sulfates.

5. CONCLUSION

Pour les conditions retenues au cours de cette étude, les chlorures, nitrates et le phosphates ne constituent pas un obstacle à un traitement efficace des sols. Si, pour certaines des conditions étudiées, une altération des effets du traitement est observée, la performance mécanique du matériau est encore largement satisfaisante pour envisager une utilisation en terrassement, compte tenu des critères utilisés pour évaluer la bonne efficacité d'un traitement en France. Les concentrations testées sont des concentrations maximales pour les sols en France. Ainsi, la présence seule de ces éléments ne semble pas être à même d'expliquer l'échec du traitement dans certains cas tel que l'on observe sur chantier. La présence de ces éléments chimiques à ces concentrations n'exclut donc pas l'utilisation des sols étudiés pour des travaux de terrassements.

Ces résultats nous amènent à nous interroger sur la notion même de perturbateur du traitement des sols à la chaux et / ou au liant hydraulique. En effet, pour un même composé, et une même concentration, nous avons constaté que l'influence du composé était très variable. Elle dépend au moins de la nature du sol et de l'agent de traitement (type de liant, dosage et existence d'un pré-traitement à la chaux). En effet, l'ajout de phosphates baisse les performances mécaniques du limon traité, alors que cet ajout améliore celles du sable traité. De plus, dans le cas du traitement au liant hydraulique de type CEM I, l'impact de la présence de chlorure est plus forte. Ces résultats tendent à montrer qu'un élément chimique ne peut pas être considéré comme perturbateur de prise dans l'absolu : sa présence en une quantité donnée dans un sol ne préjuge pas *a priori* de la réussite ou de l'échec du traitement. Ceci est confirmé par les résultats obtenus dans le cas du sulfate où le gonflement volumique du limon traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II est très important, entraînant alors une exclusion de ce type de traitement pour ce liant. Les résultats obtenus en modifiant seulement

le type de liant hydraulique (CEM I) indiquent que le gonflement volumique est limité, et permettent alors de conclure à l'aptitude du sol au traitement utilisé. Une analyse chimique du sol seule ne sera donc pas suffisante pour évaluer cette aptitude au traitement des sols.

Par ailleurs, un autre élément émerge. Il s'agit de l'influence des conditions dans lesquelles sont menées les essais géotechniques (conditions hydriques et thermiques) ainsi que des critères utilisés pour décider de la réussite ou non d'un traitement à la chaux et/ou au ciment. Le cas des sulfates est à ce titre exemplaire. En effet, pour la concentration maximale considérée, certains essais mettent en évidence un échec du traitement (figure 3.48), alors qu'un succès de ce même traitement est obtenu pour d'autres essais. Il est donc difficile, dans un cas général, de déterminer si un élément est perturbateur ou non du traitement des sols en se basant uniquement sur sa nature et sa concentration dans le sol. Ces essais de laboratoire montrent qu'il est indispensable de prendre en compte à la fois les propriétés du sol, la nature et la concentration de l'élément chimique, ainsi que les conditions d'essai.

Dans ce contexte, le prochain chapitre sera consacré à l'étude de l'influence des conditions d'essais des différentes procédures existantes pour évaluer l'aptitude au traitement d'un sol. L'objectif de cette partie sera de mettre en évidence le rôle respectif de la température et de l'humidité en cours d'essai sur le comportement géotechnique d'un sol contenant un perturbateur.

CHAPITRE 4. INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE CURE SUR LA RÉPONSE D'UN SOL À UN TRAITEMENT

Ce chapitre a pour but d'étudier l'effet des conditions de cure, température et humidité, sur la réponse des sols vis-à-vis d'un traitement à la chaux et/ou au liant hydraulique, la cure correspondant au délai entre le moment où le sol est compacté et l'instant où la performance mécanique et le gonflement volumique de l'éprouvette sont déterminés. En effet, les résultats obtenus au chapitre 3 ont mis en évidence l'importance des conditions de cure retenues dans chacune des modalités d'essais utilisées pour évaluer l'impact d'un composé sur le traitement, et donc des critères utilisés pour décider de la réussite ou non du traitement. Cette problématique est aussi reliée à la nécessité de pouvoir établir un lien entre les propriétés d'un sol traité en laboratoire et le comportement de ce même sol *in situ*, ce lien étant très difficile à établir aujourd'hui comme a pu le montrer la bibliographie (cf. partie 4.3). En effet, les conditions de cure retenues en laboratoire peuvent être très éloignées des conditions sur un site.

Afin de mener cette étude, nous avons concentré notre attention sur un seul des perturbateurs étudiés dans le chapitre 3, le soufre. Cet élément a été retenu car c'est celui qui est le plus répandu, et donc auquel on est le plus souvent confronté lors de la réalisation de chantiers réels. Par ailleurs, le soufre peut se trouver sous plusieurs formes chimiques (sulfate, sulfure, etc ...). Ainsi, un objectif supplémentaire de cette partie vise à mettre en évidence un impact éventuel de la forme chimique sous laquelle se trouve cet élément sur le comportement d'un sol lors de son traitement.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons évalué l'influence de différents paramètres d'essais, température, humidité lors de la cure, et temps de cure avant immersion, sur l'influence du soufre sur le résultat d'un traitement des sols à la chaux et au liant hydraulique. Le premier point de ce chapitre va expliquer la démarche adoptée pour répondre aux

interrogations posées ci-dessus. Ensuite, l'effet des conditions de cure et d'immersion sur le traitement d'un sol contenant du sulfate sera étudié au point 2, le cas d'un sol contenant du sulfure sera abordé au point 3.

1. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Le programme expérimental de cette partie a été axé sur l'influence des paramètres de la cure. Ainsi, nous avons choisi de concentrer les travaux sur un type de sol, pour un type de traitement, qui ne sont donc plus des variables comme dans le chapitre 2. À la vue des résultats du chapitre 3, nous avons choisi le limon de Val d'Europe et le traitement à la chaux et au CEM II, traitement qui est apparu beaucoup plus sensible aux actions des composés chimiques, et qui donc pourrait faciliter la mise en évidence de l'influence des conditions de cure. Dans ce chapitre, nous allons étudier les conditions de cure et d'immersion sur le comportement d'un sol contenant du gypse ou de la pyrite lors de son traitement.

1.1. Caractéristiques des éléments ajoutés et dosages

Les composés perturbateurs utilisés pour cette partie d'étude sont des minéraux contenant du soufre sous deux formes chimiques différentes : le gypse ou sulfate de calcium hydraté et la pyrite ou sulfure de fer. Nous avons choisi de prendre des concentrations extrêmes retrouvées dans certains sols. Les concentrations choisies auparavant (cf. chapitre 2) étaient représentatives des concentrations retrouvées dans les sols français, une valeur moyenne et une valeur forte. Ces teneurs étaient raisonnables afin de prendre en compte la globalité des sols rencontrés. Dans cette partie d'étude, la stratégie initiale a été modifiée : nous ne cherchons plus un seuil de perturbation, mais nous cherchons à déterminer si les paramètres d'essai influencent l'aptitude d'un sol contenant un élément soufré vis-à-vis d'un traitement. Afin de pouvoir établir une comparaison entre les résultats obtenus avec le sulfate et le sulfure, nous avons choisi d'introduire une même quantité de soufre total. Ainsi, la teneur en soufre est de 4,6 %, ce qui correspond à une teneur 25 fois supérieure au dosage maximal défini précédemment (Tableau 2.1). Cela correspond à 250 g de gypse pour 1 kg de sol (sulfate) et à 93,8 g de pyrite pour 1 kg de sol (sulfure).

Les propriétés du gypse utilisé dans cette partie ont été présentées dans le chapitre 2 (cf 2.1.5.). Les grains de pyrite (FeS_2) pure à 95 % et de dimension compris entre 3 - 10 mm

ont été broyés avant introduction dans notre sol. Ces grains, après broyage, possédaient un passant moyen de 50 μm . Des analyses chimique et par diffraction aux rayons X ont permis de s'assurer de la pureté de ce minéral. Enfin, une analyse par diffraction aux rayons X a été réalisée sur le mélange LVE + pyrite et a bien montré tous les éléments du sol et du composé ajouté.

Pour mener cette partie de l'étude, et afin de concentrer les travaux sur l'effet des conditions de cure, un seul sol a été sélectionné ainsi qu'un seul type de traitement. Nous avons choisi de travailler sur le limon du Val d'Europe, qui est le plus proche d'un sol naturel contenant du soufre. Par ailleurs, les résultats du chapitre 3 montrent que ce sol est plus sensible aux différentes conditions expérimentales, l'utiliser dans ce chapitre devrait faciliter la mise en évidence de l'effet de conditions de cure. C'est ce dernier point qui nous a aussi conduit à retenir le traitement à la chaux vive et au liant de type CEM II.

1.2. Conditions de cure

Lorsque l'on compare les procédures d'essai retenues dans le chapitre 3, on constate qu'elles diffèrent par la température, 20°C ou 40°C, de cure et les conditions hydriques dans lesquelles la cure s'effectue, à teneur en eau constante ou immergée. Afin de comprendre l'influence de chacun de ces paramètres, nous avons choisi d'étudier leur influence spécifiquement. Ainsi, le tableau 4.1 récapitule toutes les différentes modalités de cure et d'immersion utilisées pour les deux types d'ajout : sulfate et sulfure.

Dans tous les cas, il s'est agit d'étudier les conditions de conservation des éprouvettes entre le moment de leur fabrication et celui où une propriété géotechnique a été déterminée, c'est-à-dire d'étudier l'effet des conditions de cure. Dans la plupart des cas, la cure s'effectue dans un premier temps à teneur en eau constante, phase suivie dans un deuxième temps par une immersion, immersion prolongée jusqu'à la mesure du paramètre géotechnique. Un paramètre important qui a été pris en compte est la durée relative de la phase à teneur en eau constante et de la phase d'immersion.

Dans un premier temps, le paramètre température va être étudié. Les éprouvettes sont donc conservées à teneur en eau initiale constante de 20°C (condition n°1). La deuxième condition de conservation est une conservation à teneur en eau constante mais sous 40°C. (condition n°2). La condition n°1 correspond aux conditions de cure utilisées pour les essais de résistance à la compression simple, lors du chapitre 3. Ensuite, on va considérer l'influence

de la température pendant l'immersion, cette dernière se faisant dans un bain à 20°C (condition 3) ou à 40°C (condition 4). L'immersion débutera après que le délai de maniabilité se soit écoulé (120 minutes). La condition n°4 correspond aux conditions de cure suivies lors de l'essai d'aptitude. Enfin, le temps de cure à teneur en eau initiale constante avant immersion va varier à 7 jours (conditions n°5 et n°6) et à 28 jours (conditions n°7 et n°8). La condition n°8 correspond aux conditions de cure utilisées lors de l'essai de résistance à la compression simple après immersion du chapitre 3.

L'influence de ces conditions de cure avant essai va être évaluée par différents paramètres géotechniques : le gonflement volumique, la résistance à la compression simple avant et après immersion, la teneur en eau des éprouvettes. Les procédures expérimentales suivies lors de ces essais ont été décrites dans le chapitre 2, la masse volumique humide (ρ_h) ou sèche (ρ_d) et l'indice des vides (e).

Tableau 4.1 : Récapitulatif des conditions de cure utilisées lors de l'étude des influences des paramètres d'essais (DM = délai de maniabilité) pour les deux types d'ajout : sulfate et sulfure.

Condition	Température de cure à teneur en eau initiale constante	Temps de cure avant immersion à teneur en eau initiale constante	Immersion	Température d'immersion
1	20°C	-	NON	-
2	40°C	-	NON	-
3	20°C	DM : 2 h	OUI	20°C
4	20°C	DM : 2 h	OUI	40°C
5	20°C	7 jours	OUI	20°C
6	20°C	7 jours	OUI	40°C
7	20°C	28 jours	OUI	20°C
8	20°C	28 jours	OUI	40°C

2. INFLUENCE DES PARAMÈTRES D'ESSAIS SUR UN SOL CONTENANT UN SULFATE

2.1. Influence de la température de conservation à teneur en eau initiale constante

2.1.1. Essais à 20°C (condition n°1)

Les résultats des mesures de résistance à la compression simple en fonction du temps de cure, sont représentés sur la figure 4.1. Pendant le temps de cure, les éprouvettes ont été conservées à teneur en eau initiale constante et à la température fixée à 20°C, ce qui correspond aux conditions de conservation 1 (tableau 4.1). Les résultats obtenus lors du chapitre 3 ont également été reportés dans la figure 4.1 (dosage minimum = 0,06 % de sulfate ; dosage maximum = 0,6 % de sulfate). Les résistances à la compression simple sont légèrement plus faibles lorsque le limon du Val d'Europe contient du sulfate à fort dosage lors de son traitement à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II du sulfate. Après 180 jours de cure, les résistances à la compression simple sont de 6,98 MPa pour le limon de référence et de 5,53 MPa pour le limon mélangé au sulfate, soit une perte de 26 %. Aucun gonflement significatif des éprouvettes n'a été enregistré lors de la période de cure. On peut également noter que l'augmentation par 25 du dosage en sulfate ne réduit pas significativement la résistance à la compression simple.

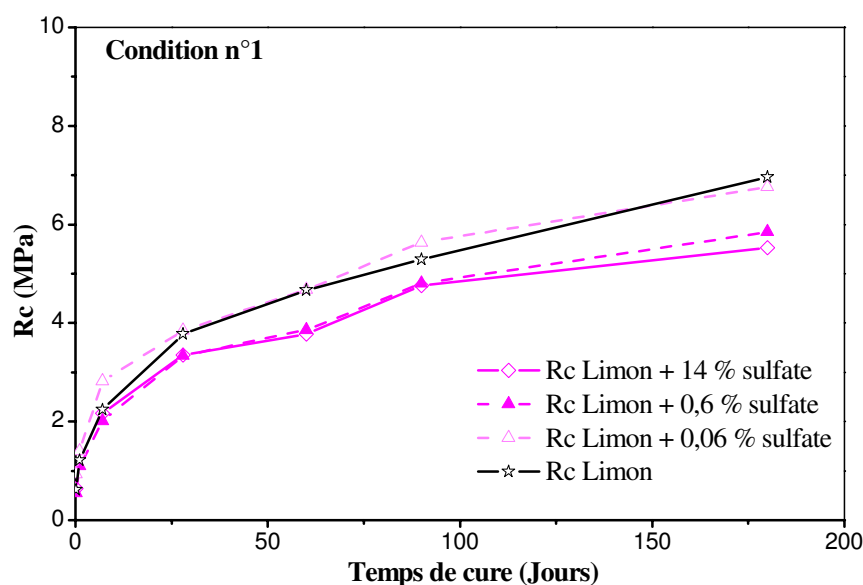


Figure 4.1 : Évolution de la résistance à la compression simple d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante et à 20°C (condition n°1)

2.1.2. Essais à 40°C (condition n°2)

Les résultats des mesures de résistance à la compression simple en fonction du temps de cure sont représentés sur la figure 4.2. Les éprouvettes ont été conservées à teneur en eau constante et à la température fixe de 40°C (condition de cure n°2, tableau 4.1). Après 21 jours de cure, la résistance à la compression simple est de 5,15 MPa pour le limon de référence et de 6,09 MPa pour le limon mélangé au sulfate, soit une augmentation de l'ordre de 18 %. La résistance se stabilise dès 14 jours de cure, avec ou sans sulfate, la prise a donc été considérée comme terminée après 14 jours de cure. Comme on observe un palier synonyme de stabilisation des réactions et que ce travail ne s'intéresse qu'à la prise, le temps de cure a été arrêté à 21 jours.

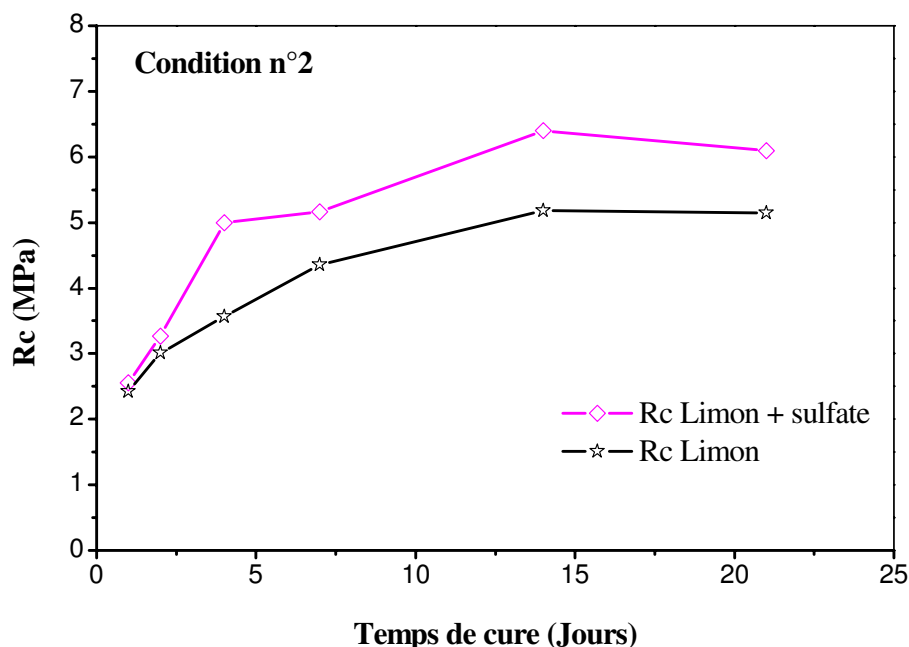


Figure 4.2 : Évolution de la résistance à la compression simple d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante et à 40°C (condition n°2)

2.1.3. Synthèse : effet de la température de conservation

La résistance atteinte à 20°C à long terme, c'est-à-dire après 90 jours de cure est similaire à celle atteinte à 40°C après 14 jours de cure, pour le limon de référence. Le premier effet de l'augmentation de la température de cure est donc d'accélérer la prise du mélange, d'un facteur supérieur à 6. En revanche, la résistance à la compression simple à long terme est de l'ordre de 7 MPa dans le cas du limon sans sulfate à 20°C, alors qu'elle n'est que de 5 MPa à 40°C. La situation est contraire lorsque l'on considère le cas du limon contenant du sulfate

puisque à 20°C la résistance à la compression simple à long terme est de l'ordre de 5 MPa alors qu'elle est de 6 MPa à 40°C. Par ailleurs, on peut noter que la condition de conservation 2, après 21 jours, permet au LVE contenant du sulfate d'avoir une résistance à la compression simple supérieure à celle obtenue à 20°C après 180 jours. Cette augmentation est de l'ordre de 28 %.

Ainsi, le passage d'une température de conservation de 20 à 40°C conduit à des modifications profondes du comportement mécanique du limon traité, tant au niveau de la cinétique que de la performance atteinte. De plus, la présence de sulfate conduit soit à une baisse de la performance mécanique, à 20°C, soit à une amélioration de celle-ci à 40°C. Par ailleurs, ce travail est focalisé sur les processus qui prennent place au cours de la prise. Ainsi, dans le cas des essais à 20°C, le temps de cure nécessaire pour acquérir la majorité de la prise est de l'ordre de 90 jours alors qu'à 40°C, il n'était plus que de l'ordre de 21 jours. Dans la suite du travail, nous avons donc choisi de considérer des temps de cure entre 0 et 90 jours pour les essais à 20°C et entre 0 et 21 jours pour les essais à 40°C.

2.2. Influence des conditions d'immersion

L'influence des conditions d'immersion a été évaluée en travaillant sur des éprouvettes conservées d'abord à teneur en eau initiale constante pendant 120 minutes, correspondant au délai de maniabilité mesuré sur le limon traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II (cf. chapitre 2), puis elles ont été immergées à deux températures : 20 et 40°C, jusqu'à la fin de la prise, soit 90 jours pour une $T = 20^\circ\text{C}$ et 21 jours pour $T = 40^\circ\text{C}$.

2.2.1. Immersion dans une eau à 20°C (condition n°3)

Les résultats des mesures de gonflement volumique et de résistance à la compression simple après immersion en fonction du temps d'immersion sont représentés sur la figure 4.3. Ces conditions de conservation pendant la cure correspondent à la condition n°3 (tableau 4.1). Les caractéristiques des éprouvettes au cours de la cure sont données dans les tableaux 4.2 et 4.3.

La résistance à la compression simple augmente dans un premier temps (jusqu'à 1 jour d'immersion), puis diminue fortement (entre 1 et 3 jours d'immersion). La résistance est alors plus faible que celle avant immersion. Après 90 jours d'immersion à 20°C, la résistance à la compression simple est de 3,64 MPa pour le limon de référence (sans sulfate) et de 0,62 MPa

pour le limon mélangé au gypse, soit une performance inférieure de 83 %. Après 90 jours d'immersion à 20°C, le gonflement volumique est de 1,55 % pour le limon de référence et de 25,22 % pour le limon mélangé au gypse. Le gonflement volumique est donc 16 fois plus fort en ajoutant du gypse au limon du Val d'Europe traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II.

Pour une immersion à 20°C, on constate un fort gonflement du matériau avec perturbateur, les éprouvettes gonflent fortement dans les premiers temps d'immersion (jusqu'à 7 jours). En même temps, le développement d'une prise hydraulique s'effectue dans les tous premiers temps d'immersion (jusqu'à 1 jour), puis les performances mécaniques du mélange limon + gypse se détériorent, ceci se traduit par une résistance à la compression simple presque 6 fois inférieure à la résistance atteinte par le même limon traité avec le même traitement mais sans perturbateur.

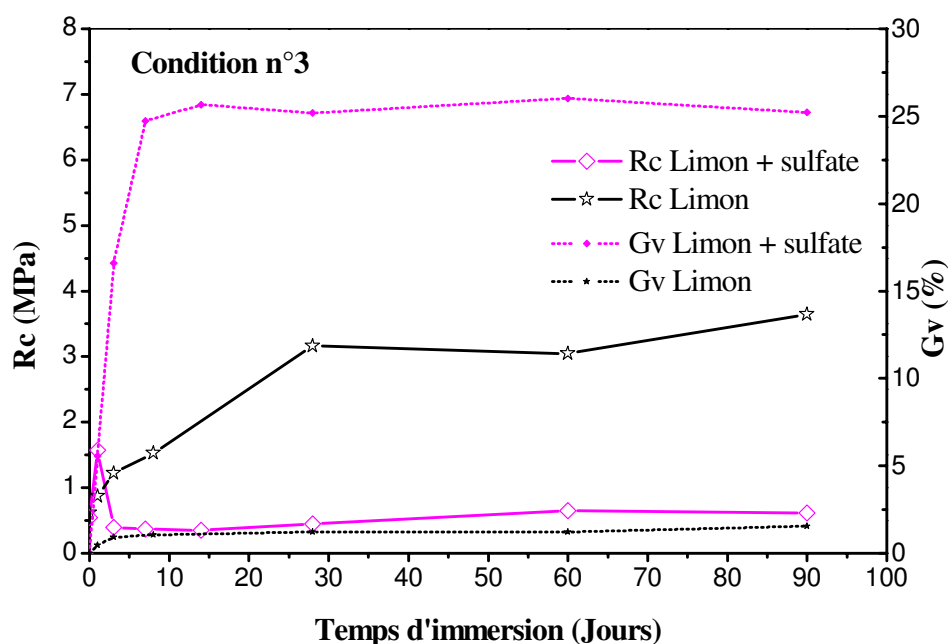


Figure 4.3 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 20°C (condition n°3)

Tableau 4.2 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d) et indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de LVE + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante pendant 120 minutes puis immergées à 20 °C

Temps d'immersion (jours)	avant immersion	1	3	7	28	60	90
$w(\%)$	20,5	22,2	22,3	22,3	22,6	23,2	23,3
$\rho_h (\text{Mg.m}^{-3})$	1,97	2,00	1,99	1,99	1,99	2,00	1,99
$\rho_d (\text{Mg.m}^{-3})$	1,64	1,64	1,63	1,63	1,63	1,62	1,62
e	0,65	0,65	0,66	0,66	0,66	0,66	0,67

Tableau 4.3 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d) et indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de LVE + gypse + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 120 minutes puis immergées à 20 °C

Temps d'immersion (jours)	avant immersion	1	3	7	28	60	90
$w(\%)$	20,0	22,2	22,4	23,3	22,6	23,2	23,3
$\rho_h (\text{Mg.m}^{-3})$	1,97	1,96	1,87	1,80	1,82	1,82	1,82
$\rho_d (\text{Mg.m}^{-3})$	1,60	1,61	1,53	1,46	1,48	1,47	1,48
e	0,67	0,68	0,76	0,85	0,82	0,83	0,83

2.2.2. Immersion dans une eau à 40°C (condition n°4)

L'évolution en fonction du temps du gonflement volumique et de la résistance à la compression simple après immersion est représentée sur la figure 4.4. Les éprouvettes ont été conservées à teneur en eau constante et à une température de 20°C pendant 2 heures, délai correspondant au délai de maniabilité, puis elles ont été immergées dans une eau à 40°C, ce qui correspond à la condition de conservation n°4 (tableau 4.1).

Dans le cas du mélange LVE plus sulfate, les deux premiers jours d'immersion, la résistance à la compression simple reste équivalente à celle avant immersion, puis augmente. Après 21 jours d'immersion à 40°C, la résistance à la compression simple vaut 4,65 MPa pour le limon de référence et 1,58 MPa pour le limon contenant du sulfate. La présence de sulfate conduit donc à une performance mécanique inférieure de l'ordre de 66 % à celle atteinte lorsque le LVE ne contient pas de sulfate. Dans le cas du mélange LVE + sulfate traité, les éprouvettes gonflent lors du premier jour d'immersion, le gonflement volumique est ainsi de 15 après 2 jours d'immersion. À long terme, après 21 jours d'immersion à 40°C, les

gonflements volumiques sont de 1,66 % pour le limon de référence et de 16,40 % pour le limon mélangé au sulfate, soit environ 10 fois plus fort.

Ces résultats permettent ainsi d'apprécier l'influence de la présence de sulfate sur le comportement du limon traité lorsque la cure est effectuée dans un bain thermostaté à 40°C. L'immersion à 40°C, conduit ainsi à un gonflement, de l'ordre de 16 %, qui se stabilise à cette valeur au bout de 2 jours d'immersion, alors que le limon ne contenant pas de sulfate présente un gonflement inférieur à 2 %. Par ailleurs, on observe le développement d'une prise hydraulique dans le cas du LVE contenant du sulfate. Cependant, la performance atteinte est presque 3 fois inférieure à la résistance atteinte par le même limon traité lorsqu'il ne contient pas de sulfate. Il est intéressant de noter que la performance mécanique du LVE contenant du sulfate commence à augmenter significativement lorsque le gonflement se stabilise, c'est-à-dire au bout de deux jours.

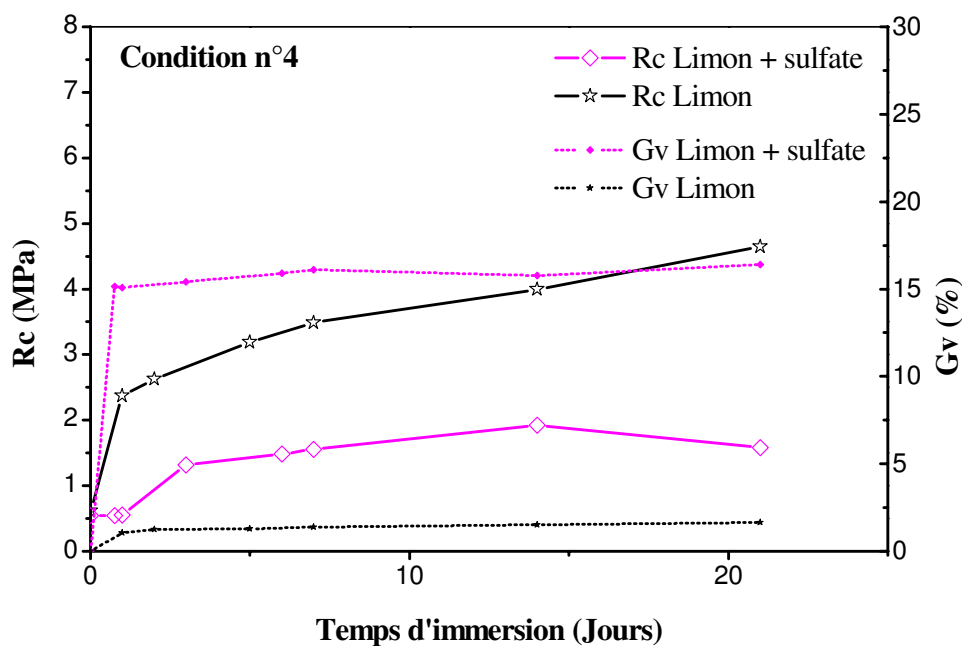


Figure 4.4 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 40°C (condition n°4)

Tableau 4.4 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d) et indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de LVE + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 120 minutes puis immergées à 40 °C

Temps d'immersion (jours)	Sans immersion	1	2	4	7	14	21
$w(\%)$	20,1	22,0	21,9	22,1	21,8	21,9	22,5
$\rho_h (\text{Mg.m}^{-3})$	1,97	1,99	1,98	1,99	1,99	1,99	1,99
$\rho_d (\text{Mg.m}^{-3})$	1,64	1,63	1,62	1,63	1,63	1,64	1,62
e	0,65	0,66	0,66	0,66	0,66	0,65	0,66

Tableau 4.5 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d) et indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de LVE + gypse + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 120 minutes puis immergées à 40°C

Temps d'immersion (jours)	Sans immersion	1	2	4	7	14	21
$w(\%)$	20,0	22,2	22,5	22,3	22,6	23,7	23,3
$\rho_h (\text{Mg.m}^{-3})$	1,97	1,88	1,87	1,87	1,87	1,88	1,86
$\rho_d (\text{Mg.m}^{-3})$	1,64	1,54	1,53	1,53	1,52	1,52	1,51
e	0,65	0,76	0,76	0,77	0,78	0,78	0,79

2.2.3. Synthèse : influence de la température d'immersion

Les résultats obtenus dans cette partie permettent de mettre en évidence l'influence couplée de la température d'immersion et de la présence de sulfate sur les propriétés du limon du Val d'Europe. Tout d'abord, dans le cas du limon seul, on constate que l'augmentation de la température de cure permet d'accélérer la cinétique de prise, la performance atteinte étant supérieure de l'ordre de 27 % lorsque l'immersion a lieu à 40°C. Le gonflement après immersion reste limité, de l'ordre de 2 %, pour les deux températures étudiées. Ensuite, la température modifie radicalement le comportement dans le cas du limon contenant du sulfate. On constate en effet qu'à 20°C, le limon + sulfate ne développe pas de performance mécanique significative alors qu'à 40°C, le mélange atteint une résistance à la compression simple de l'ordre de 1,5 MPa, performance égale à environ 34 % de la résistance à la compression simple du limon ne contenant pas de sulfate dans les mêmes conditions de traitement et de conservation. En revanche, le gonflement volumique atteint est de l'ordre de 25 % pour une température de 20°C, alors qu'il atteint 16 % lorsque la température d'immersion est de 40°C.

Ainsi, si le passage de 20°C à 40°C, n'entraîne pas de modification très importante du comportement du limon traité ne contenant pas de sulfate, il modifie profondément la performance du mélange limon + sulfate traité. Dans ce cas, le passage de 20 à 40°C permet le passage d'une résistance à la compression simple de l'ordre de 400 kPa à plus de 1,5 MPa.

2.3. Influence du temps de cure à teneur en eau initiale constante

Le dernier paramètre étudié est le temps de cure à teneur en eau initiale constante avant l'immersion.

2.3.1. Immersion après 7 jours à teneur en eau initiale constante

o Immersion dans une eau à 20°C (condition n°5)

Les résultats des mesures de gonflement volumique et de résistance à la compression simple après immersion sont donnés sur la figure 4.5 et les tableaux 4.6 et 4.7. Après 90 jours d'immersion à 20°C, la résistance à la compression simple est de 3,14 MPa pour le limon de référence et de 1,96 MPa pour le limon mélangé au sulfate, soit une diminution de l'ordre de 38 %. Le gonflement volumique augmente en présence du sulfate : après 90 jours d'immersion à 20°C, le gonflement volumique est de 0,72 % pour le limon de référence et de 9,18 % pour le limon contenant du sulfate, soit une multiplication par 13. Lorsque l'on immerge les sols à 20°C après 7 jours de cure, on observe ainsi un fort gonflement dans les premiers temps de l'immersion (avant 14 jours), et les résistances diminuent immédiatement, puis une faible prise se développe, se caractérisant par une résistance à la compression simple d'environ 2 MPa, trois fois plus faible que celle du limon de référence.

On constate une chute de la résistance à la compression simple entre 0 et 1 jour d'immersion pour les deux matériaux. Cette chute est probablement une conséquence de la procédure expérimentale suivie pour réaliser ces essais. En effet, la mesure à 0 jour correspond à une valeur de la résistance à la compression simple avant immersion du sol alors que la mesure à 1 jour a été faite sur une éprouvette immergée. Bollens et Verbrugge (2005) ont montré que la cohésion d'un sol traité est fonction de deux composantes, une liée aux cimentations et une résultant de la succion du matériau. L'immersion induisant une chute de la succion, elle est associée à une baisse de résistance mécanique. Ce phénomène pourrait expliquer cette chute de résistance qui apparaît entre 0 et 1 jour d'immersion.

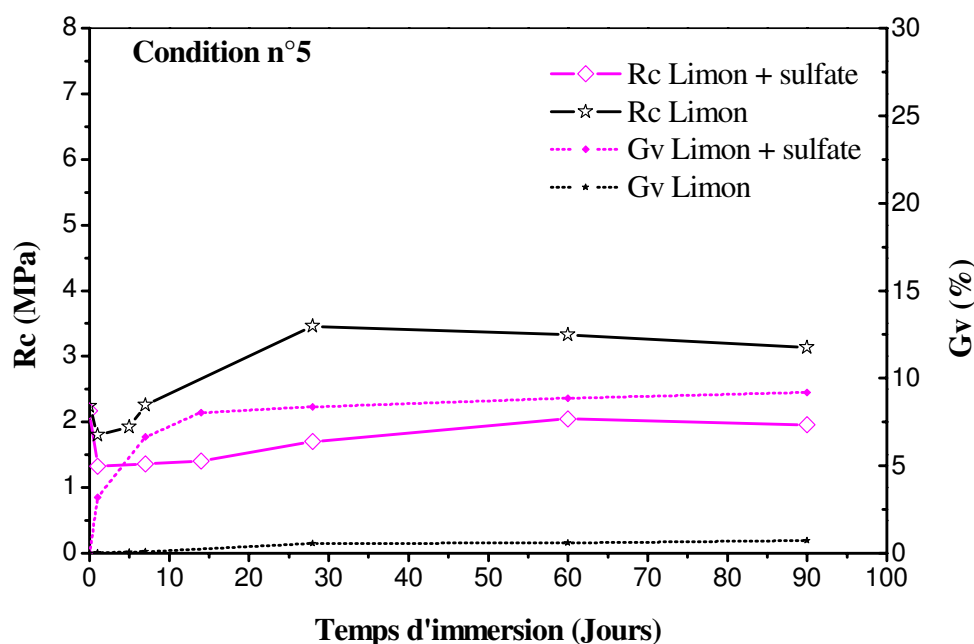


Figure 4.5 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 20°C après avoir été conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours (condition n°5)

Tableau 4.6 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de LVE + gypse + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours puis immergées à 20 °C

Temps d'immersion (jours)	Sans immersion	1	3	7	28	60	90
$w(\%)$	20,7	21,8	22,2	22,7	23,1	22,4	23,3
ρ_h (Mg.m ⁻³)	1,98	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
ρ_d (Mg.m ⁻³)	1,64	1,65	1,64	1,63	1,62	1,63	1,62
e	0,65	0,64	0,65	0,66	0,66	0,65	0,67

Tableau 4.7 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de LVE + gypse + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours puis immergées à 20 °C

Temps d'immersion (jours)	Sans immersion	1	3	7	28	60	90
$w(\%)$	20,0	25,4	27,5	28,4	29,1	30,0	30,8
ρ_h (Mg.m ⁻³)	1,97	1,97	1,95	1,94	1,94	1,94	1,94
ρ_d (Mg.m ⁻³)	1,64	1,57	1,53	1,51	1,50	1,49	1,49
e	0,65	0,72	0,77	0,79	0,80	0,81	0,82

○ *Immersion dans une eau à 40°C (condition n°6)*

Les résultats des mesures de gonflement volumique et de résistance à la compression simple après immersion en fonction du temps d'immersion sont représentés sur la figure 4.6 et les tableaux 4.8 et 4.9. Les éprouvettes ont été conservées à teneur en eau constante et à une température de 20°C pendant 7 jours, puis elles ont été immergées dans une eau à 40°C. La résistance à la compression simple n'est pas significativement influencée par la présence de sulfate dans le limon du Val d'Europe. Après 21 jours d'immersion à 40°C, la résistance à la compression simple est de 3,95 MPa pour le limon de référence et de 3,84 MPa pour le limon mélangé au sulfate. De même, dans les deux cas les cinétiques de prise sont très proches. Le gonflement volumique augmente en présence de sulfate dans le limon du Val. Après 21 jours d'immersion à 40°C, le gonflement volumique est de 0,61 % pour le limon de référence et de 3,13 % pour le limon mélangé au sulfate, soit 5 fois plus fort, il reste cependant relativement limité.

Pour une immersion à 40°C, on constate ainsi un gonflement moyen du matériau, de l'ordre de 3%. On observe également le développement d'une prise hydraulique qui se traduit par une résistance à la compression simple proche de celle du même limon traité avec le même traitement mais sans perturbateur.

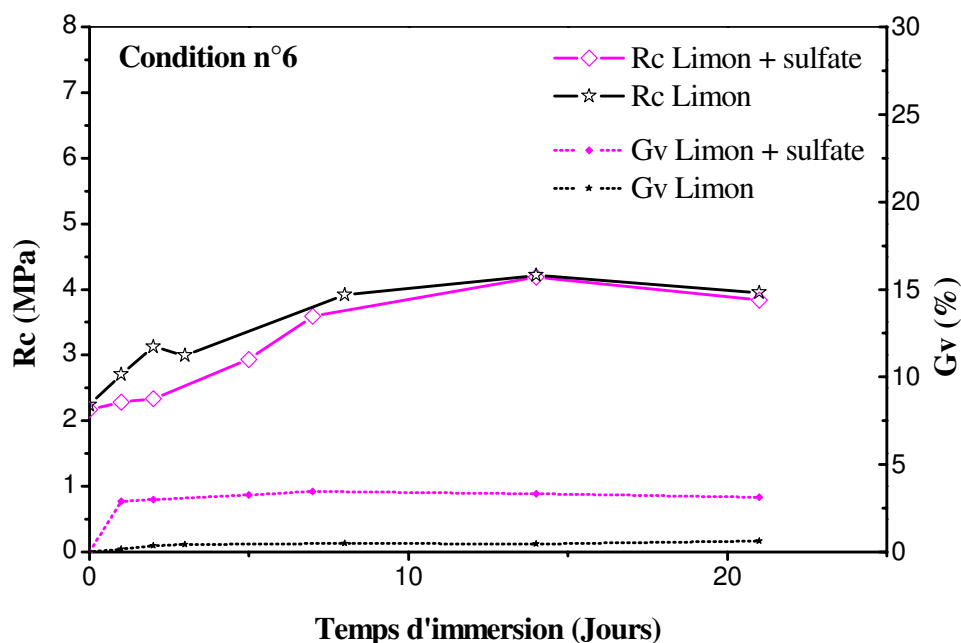


Figure 4.6 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 40°C après avoir été conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours (condition n°6)

Tableau 4.8 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de LVE + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours puis immergées à 40 °C

Temps d'immersion (jours)	Sans immersion	1	2	4	7	14	21
$w(\%)$	20,2	21,1	21,3	21,3	21,3	21,8	22,2
$\rho_h (\text{Mg.m}^{-3})$	1,97	2,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99
$\rho_d (\text{Mg.m}^{-3})$	1,64	1,65	1,64	1,64	1,64	1,64	1,63
e	0,65	0,64	0,65	0,65	0,65	0,65	0,66

Tableau 4.9 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de LVE + gypse + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours puis immergées à 40 °C

Temps d'immersion (jours)	Sans immersion	1	2	4	7	14	21
$w(\%)$	19,8	27,8	24,7	25,3	25,4	25,4	25,8
$\rho_h (\text{Mg.m}^{-3})$	1,98	1,97	1,97	1,97	1,97	1,97	1,98
$\rho_d (\text{Mg.m}^{-3})$	1,64	1,54	1,58	1,57	1,57	1,57	1,57
e	0,65	0,75	0,71	0,72	0,72	0,72	0,72

o Synthèse

Lorsque l'on compare le comportement final des éprouvettes, après les périodes de cure considérées, on constate qu'à 20°C le comportement des deux matériaux, le limon avec ou sans sulfate au moment du traitement, est radicalement différent. En effet, une immersion à 20°C après 7 jours de cure à teneur en eau constante, conduit à une résistance à la compression simple inférieure de 38 % dans le cas du LVE contenant du sulfate par rapport au limon seul. De même, la présence de sulfate entraîne l'apparition d'un gonflement volumique de l'ordre de 12 %. Lorsque l'immersion est réalisée après 7 jours de cure dans un bain à 40°C, la performance et la cinétique de la prise sont similaires pour les deux matériaux. Cependant, le gonflement du matériau est plus fort en présence de sulfate, de l'ordre de 3 %, mais la différence avec le limon seul est plus faible.

2.3.2. Immersion après 28 jours à teneur en eau initiale constante

○ Immersion dans une eau à 20°C (conditions n°7)

Le gonflement volumique et la résistance à la compression simple après immersion sont représentés sur la figure 4.7 et dans les tableaux 4.10 et 4.11. Les éprouvettes ont été conservées à teneur en eau constante et à une température de 20°C pendant 28 jours, puis elles ont été immergées dans une eau à 20°C jusqu'à la réalisation de l'essai.

On constate ainsi que la présence de sulfate dans le limon conduit à une baisse de la résistance à la compression simple du limon. Après 90 jours d'immersion à 20°C, la résistance à la compression simple est de 4,13 MPa pour le limon de référence et de 2,68 MPa pour le limon contenant du sulfate, soit une perte de performance de l'ordre de 35 %. Par ailleurs, le gonflement volumique augmente en présence du sulfate dans le limon du Val d'Europe : après 90 jours d'immersion à 20°C, le gonflement volumique est de 0,55 % pour le limon de référence et presque 10 fois fort pour le limon mélangé au sulfate (5,15 %).

Lorsque l'on immerge les sols à 20°C, après 28 jours de cure, on constate un gonflement et une prise moyenne s'exprimant par une résistance à la compression légèrement supérieure à 2,5 MPa, mais plus faible que celle du même limon, traité de la même manière, mais sans sulfate (-35%).

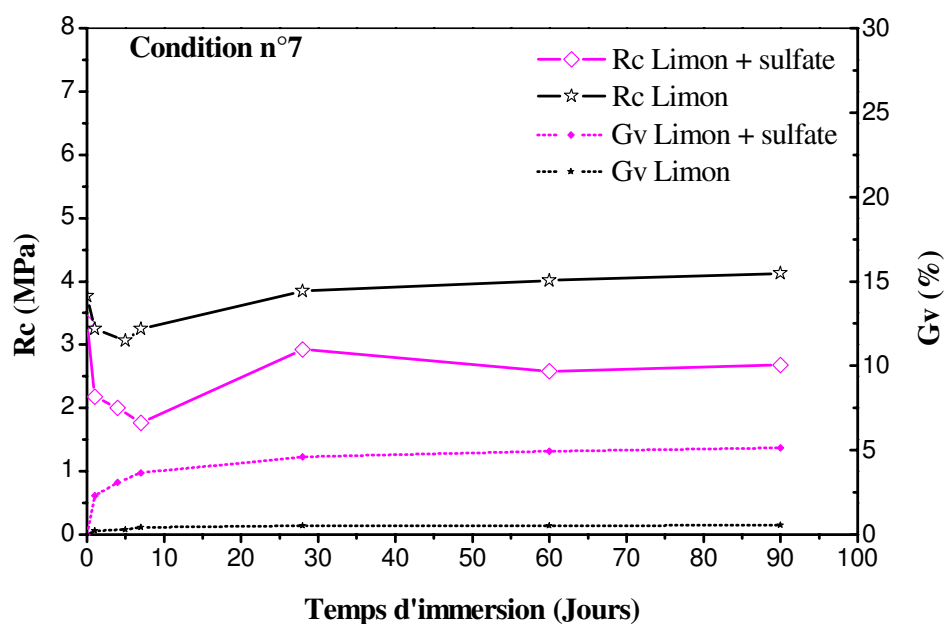


Figure 4.7 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 20°C après avoir été conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours (condition n°7)

Tableau 4.10 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours puis immergées à 20 °C

Temps d'immersion (jours)	Sans immersion	1	3	7	28	60	90
$w(\%)$	20,1	21,3	21,9	21,3	22,3	21,8	22,2
$\rho_h (\text{Mg.m}^{-3})$	1,98	2,00	2,00	1,99	2,00	2,00	2,00
$\rho_d (\text{Mg.m}^{-3})$	1,64	1,65	1,64	1,64	1,63	1,64	1,64
e	0,65	0,64	0,64	0,64	0,65	0,64	0,65

Tableau 4.11 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours puis immergées à 20 °C

Temps d'immersion (jours)	Sans immersion	1	3	7	28	60	90
$w(\%)$	20,2	25,4	25,3	25,7	26,7	27,2	27,6
$\rho_h (\text{Mg.m}^{-3})$	1,97	1,99	1,98	1,98	1,97	1,99	2,00
$\rho_d (\text{Mg.m}^{-3})$	1,64	1,73	1,58	1,57	1,56	1,56	1,57
e	0,65	0,56	0,71	0,72	0,73	0,73	0,72

o Immersion dans une eau à 40°C (condition n°8)

Le gonflement volumique et la résistance à la compression simple après immersion sont représentés sur la figure 4.8 ainsi que dans les tableaux 4.12 et 4.13. Les éprouvettes ont été conservées à teneur en eau constante et à une température de 20°C pendant 28 jours, puis immergées dans une eau à 40°C. La résistance à la compression simple n'est pas significativement influencée par la présence de sulfate. Après 21 jours d'immersion à 40°C, les résistances à la compression simple sont de 4,43 MPa pour le limon de référence et de 4,13 MPa pour le limon contenant du sulfate. Par ailleurs, après 21 jours d'immersion à 40°C, le gonflement volumique du limon contenant du sulfate (1,75 %) est presque 4 fois plus fort que celui du limon de référence (0,47 %).

Pour une immersion à 40°C, on observe ainsi un faible gonflement du matériau (1,75 %). On observe également le développement d'une prise hydraulique qui se traduit par une résistance à la compression simple proche de celle du limon de référence.

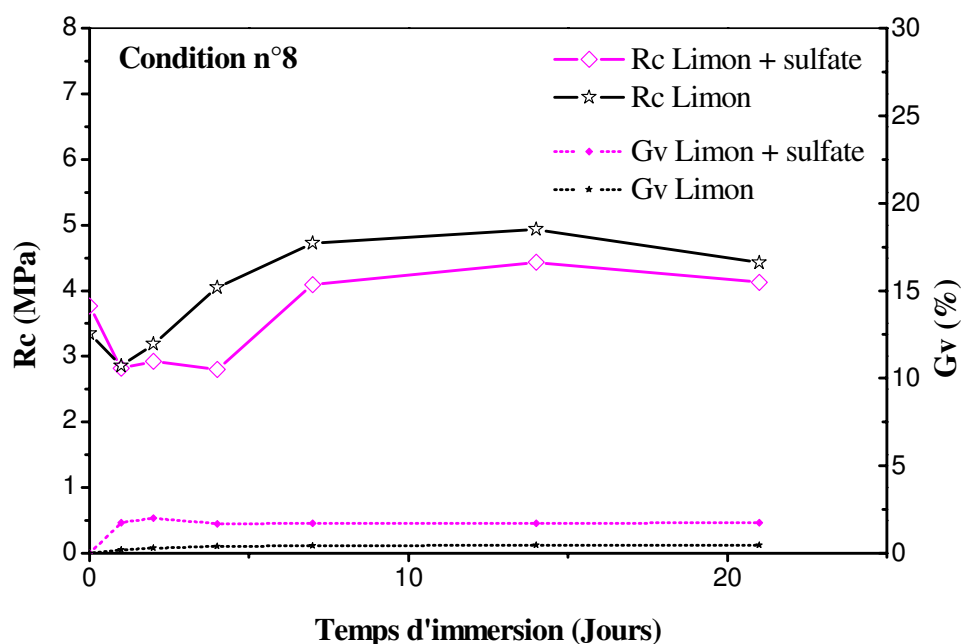


Figure 4.11 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 40°C après avoir été conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours (condition n°8)

Tableau 4.12 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + CaO + CEM II, conservés à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours puis immergés à 40 °C

Temps d'immersion (jours)	Sans immersion	1	2	4	7	14	21
$w(\%)$	20,5	21,5	21,8	21,6	21,6	22,1	22,2
$\rho_h (\text{Mg.m}^{-3})$	1,98	2,00	2,00	1,99	2,00	2,00	1,99
$\rho_d (\text{Mg.m}^{-3})$	1,64	1,64	1,64	1,64	1,65	1,64	1,63
e	0,65	0,65	0,65	0,65	0,64	0,65	0,65

Tableau 4.13 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + gypse + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours puis immergées à 40 °C

Temps d'immersion (jours)	Sans immersion	1	2	4	7	14	21
$w(\%)$	20,7	24,1	24,3	24,1	24,5	24,6	24,8
$\rho_h (\text{Mg.m}^{-3})$	1,98	1,98	1,98	1,99	1,98	1,99	1,99
$\rho_d (\text{Mg.m}^{-3})$	1,64	1,60	1,60	1,60	1,59	1,60	1,60
e	0,65	0,69	0,69	0,69	0,70	0,69	0,69

o Synthèse

Lorsque l'on compare le comportement final des éprouvettes, après les périodes de cure considérées, on constate qu'à 20°C le comportement des deux matériaux, le limon avec ou sans sulfate au moment du traitement, est radicalement différent. En effet, une immersion à 20°C après 28 jours de cure à teneur en eau constante conduit à une résistance à la compression simple inférieure de 35 % dans le cas du LVE contenant du sulfate par rapport au limon seul. De même, la présence de sulfate entraîne l'apparition d'un gonflement volumique de l'ordre de 5 %. Lorsque l'immersion est réalisée après 28 jours de cure dans un bain à 40°C, la performance et la cinétique de la prise sont similaires pour les deux matériaux. De plus, le gonflement des deux matériaux est du même ordre de grandeur.

2.4. Influence des différentes conditions de cure sur la microstructure

Les observations au MEB des éprouvettes de mélange LVE + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM II montrent la présence de grains de gypse qui ont résisté malgré l'immersion. Tout le gypse n'est pas dissous et des grains sont encore présents (figure 4.12). On observe une association étroite entre les cristaux de gypse et l'ettringite. Il apparaît que de l'ettringite précipite et forme des cristaux enchevêtrés qui recouvrent la surface des grains du limon (figure 4.13). La quantité d'ettringite semble plus importante que dans le cas des éprouvettes conservées à teneur en eau initiale constante (figure 4.14).

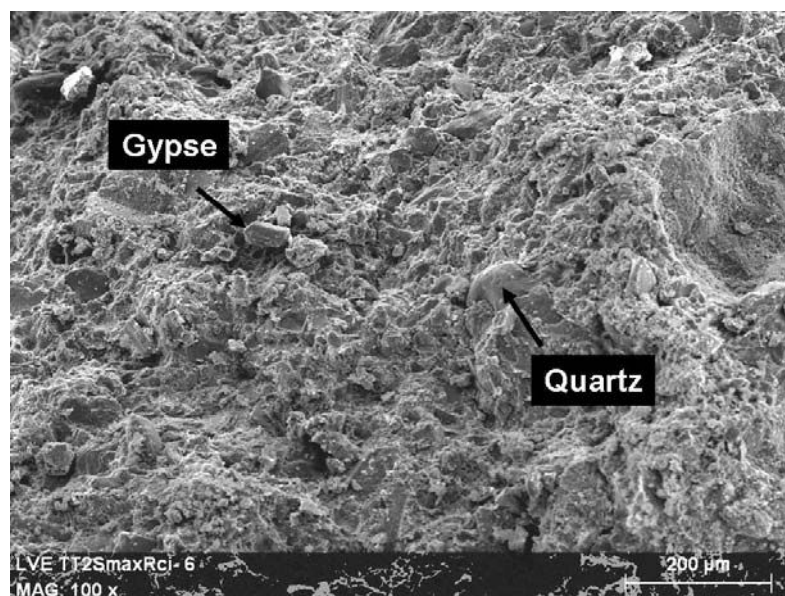


Figure 4.12 : Observation de surface au MEB du mélange limon + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM II ($\times 100$)

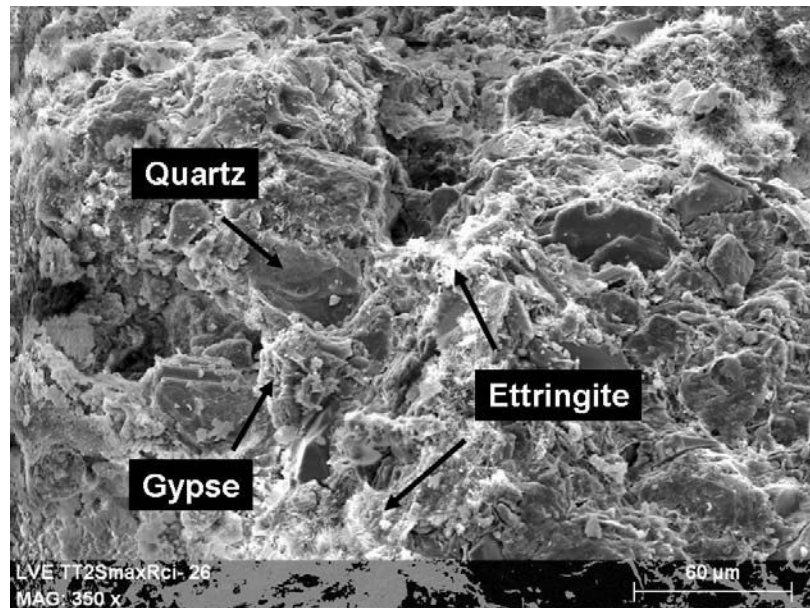


Figure 4.13 : Observation de surface au MEB du mélange limon + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM II ($\times 350$)

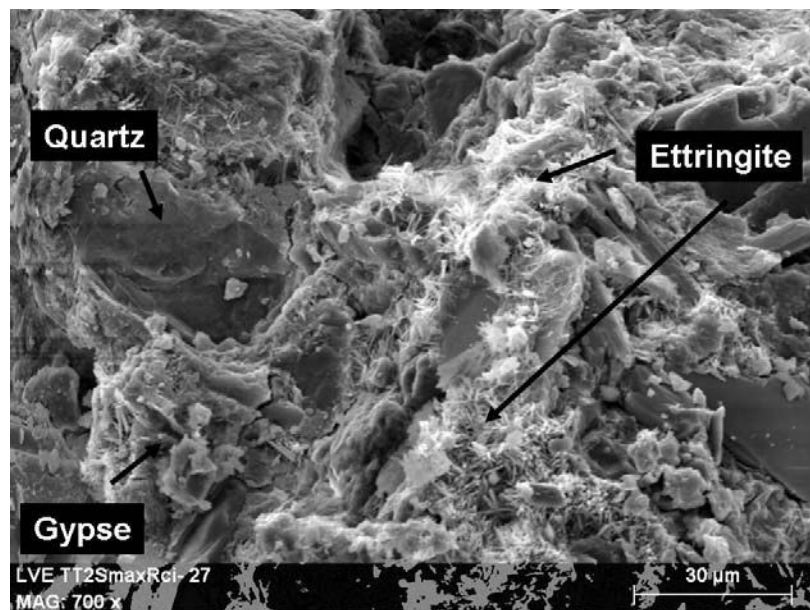


Figure 4.14 : Observation de surface au MEB du mélange limon + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CaO + CEM II ($\times 700$)

2.5. Discussion : influence des conditions de cure dans le cas du mélange limon + sulfate

Les travaux menés dans cette partie de l'étude permettent d'apprécier l'influence des conditions de conservation des éprouvettes pendant la cure sur la performance mécanique et le gonflement du LVE traité à la chaux et au ciment de type CEM II d'une part et, d'autre part, sur le même limon mélangé au préalable avec 14 % de sulfate et traité dans les mêmes

conditions. Les différentes modalités de cure comprennent toutes un temps de conservation de l'éprouvette à teneur en eau constante, temps compris entre le délai de maniabilité (2 heures) et 28 jours, suivi d'une période d'immersion, effectuée dans un bain à 20 ou 40°C. Les résultats précédents sont représentés en fonction de ce paramètre sur les figures 4.15 à 4.18. Les valeurs de résistance à la compression simple en fonction de la période d'immersion sont aussi indiquées afin d'apprécier la cinétique de prise. Sur ces figures, les résultats obtenus dans le cas du LVE avec ou sans sulfate au moment du traitement sont fournis.

o Résultats obtenus pour une température de 20°C

La figure 4.15 donne les valeurs du gonflement en fonction du délai entre la préparation de l'éprouvette et son immersion dans un bain à 20°C. On constate ainsi que, dans le cas du limon ne contenant pas de sulfate lors du traitement, le gonflement reste très proche de zéro, quel que soit le temps de conservation à teneur en eau constante avant immersion. En revanche, ce paramètre influence fortement le gonflement du mélange limon + sulfate qui passe de 25 % lorsque l'immersion est effectuée après le délai de maniabilité à environ 5 % pour un temps de conservation à teneur en eau constante de 28 jours.

Lorsque l'on prend en compte la résistance à la compression simple (figure 4.16), on peut remarquer que le temps de conservation à teneur en eau constante avant immersion influence peu la résistance à la compression simple du limon ne contenant pas de sulfate traité si l'on considère les valeurs de résistance à la compression simple déterminée à partir de 28 jours. En revanche, dans le cas du mélange limon + sulfate, le passage d'un temps de conservation à teneur en eau constante avant immersion de quelques heures à 28 jours permet au matériau de passer d'une résistance à la compression simple de 600 kPa à environ 2,6 MPa. Dans tous les cas, la performance atteinte dans le cas du mélange limon + sulfate est inférieure à celle atteinte par le limon seul traité.

Avec ces conditions de conservation, on peut donc conclure que le temps de conservation à teneur en eau constante permet de réduire le gonflement du mélange limon + sulfate mesuré lors de l'immersion à 20°C. Il permet aussi à ce matériau de multiplier la résistance du mélange par 4 environ.

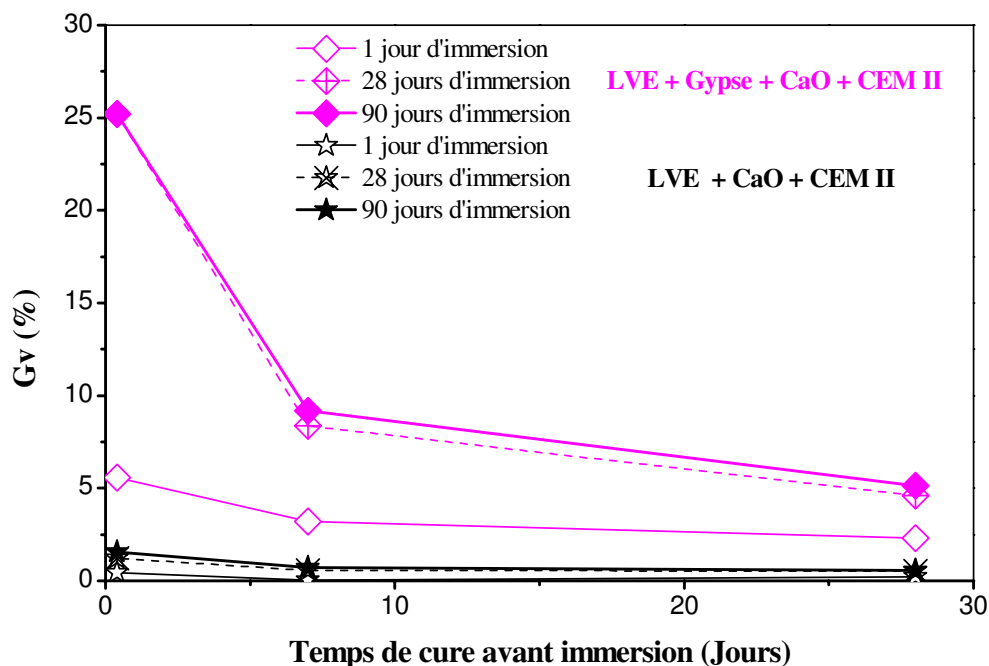


Figure 4.15 : Gonflement volumique après immersion à 20°C (%) en fonction du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion (jours) de mélanges LVE + gypse + CaO + CEM II et LVE + CaO + CEM II

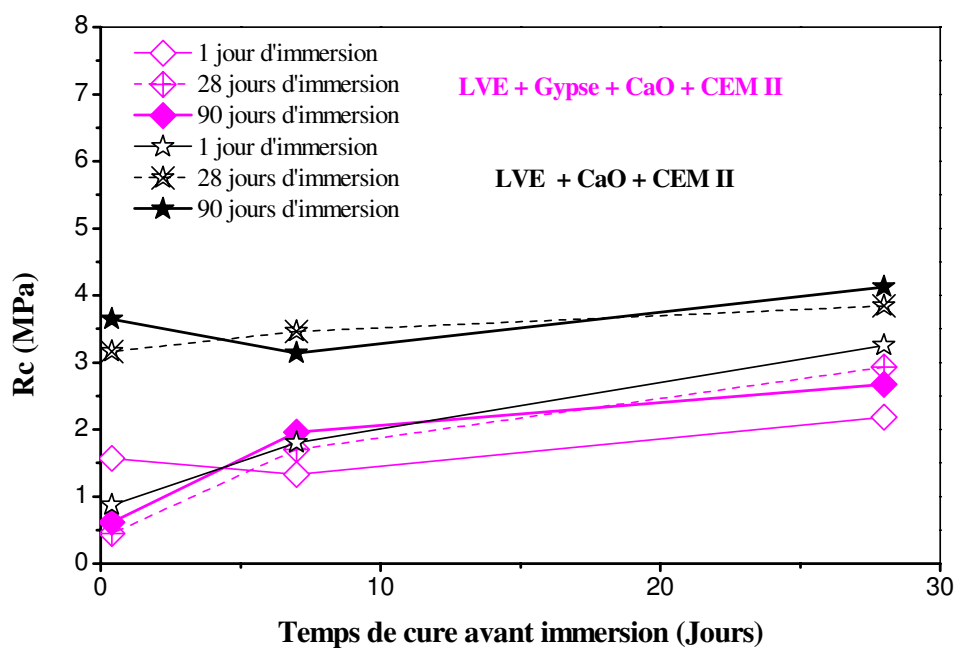


Figure 4.16 : Résistance à la compression simple après immersion à 20°C (MPa) en fonction du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion (jours) de mélanges LVE + gypse + CaO + CEM II et LVE + CaO + CEM II

o Résultats obtenus pour une température de 40°C

Si le gonflement volumique du LVE seul n'est pas affecté par le temps de conservation à teneur en eau constante avant immersion, on constate une baisse du

gonflement volumique dans le cas du mélange LVE + sulfate. Il passe en effet de 15 % pour un temps de conservation à teneur en eau constante avant immersion de quelques heures à une valeur comparable à celle du LVE seul lorsque le temps de conservation à teneur en eau constante avant immersion est de 28 jours (figure 4.17).

La résistance à la compression simple du LVE seul traité n'est que peu affectée par le temps de conservation à teneur en eau constante avant immersion, ce paramètre ne jouant pas de rôle significatif sur la cinétique de prise. Dans le cas du mélange LVE + sulfate, on constate que l'augmentation du délai de conservation à teneur en eau constante avant immersion permet d'améliorer significativement sa résistance à la compression simple, on multiplie en effet la résistance par 3. Un point remarquable est que la valeur de la résistance à la compression simple est du même ordre de grandeur pour les deux matériaux étudiés au bout de 7 jours de cure à teneur en eau constante (figure 4.18).

Dans ces conditions, l'augmentation du temps de conservation à teneur en eau constante avant immersion permet de limiter l'impact de la présence de sulfate sur le comportement du limon. En effet, le gonflement est presque annulé lorsque le temps de conservation à teneur en eau constante avant immersion est porté à 28 jours. Dans les mêmes conditions, il n'y a plus d'impact de la présence de sulfate sur la résistance à la compression simple du limon.

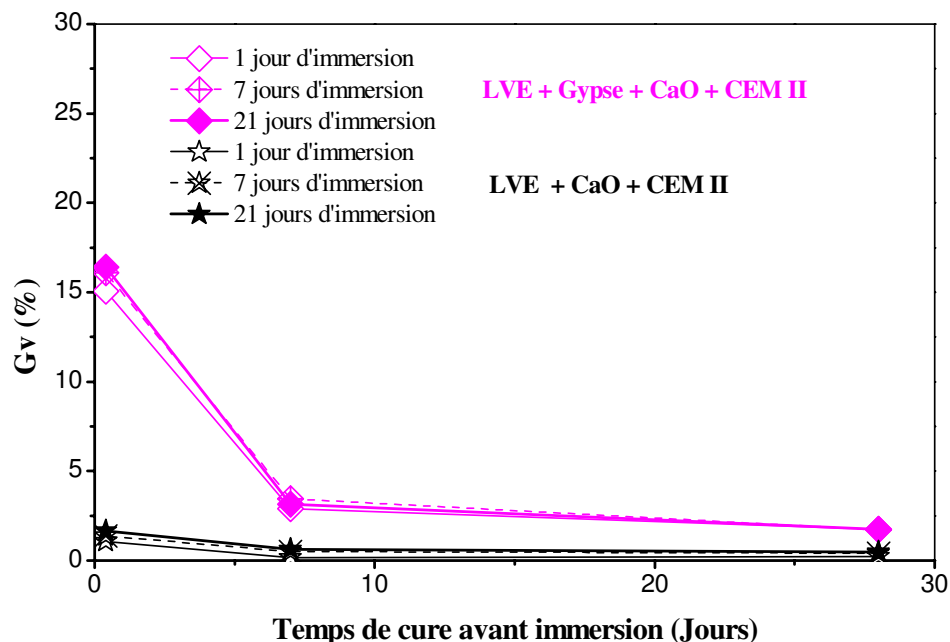


Figure 4.17 : Gonflement volumique après immersion à 40°C (%) en fonction du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion (jours) de mélanges LVE + gypse + CaO + CEM II et LVE + CaO + CEM II

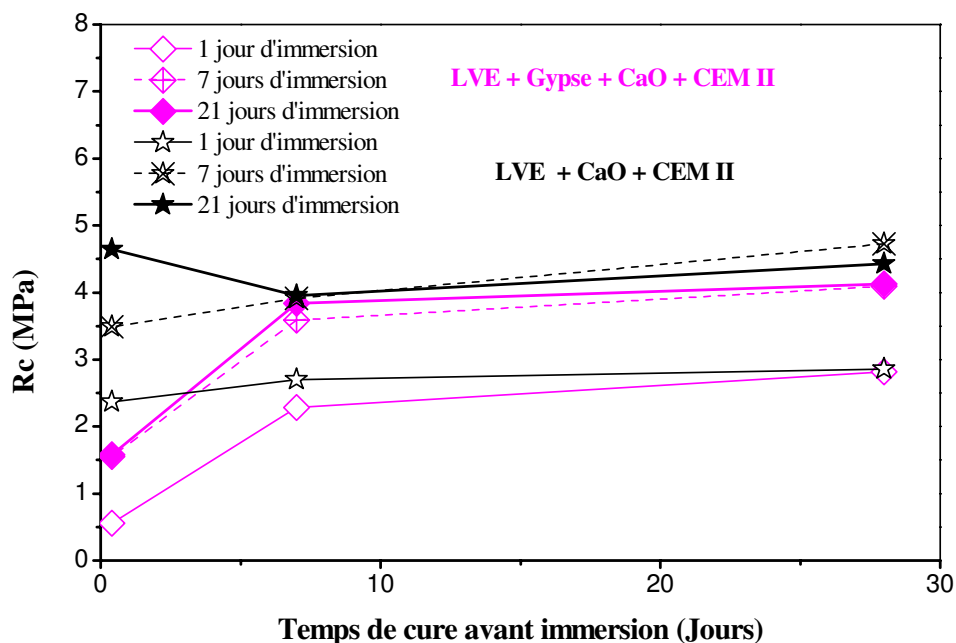


Figure 4.18 : Résistance à la compression simple après immersion à 40°C (MPa) en fonction du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion (jours) de mélanges LVE + gypse + CaO + CEM II et LVE + CaO + CEM II

o Bilan

Quelle que soit la température du bain thermostaté dans lequel les éprouvettes sont immergées, le temps de conservation à teneur en eau constante avant immersion permet de réduire l'influence de la présence de sulfate sur le gonflement et la résistance à la compression simple du LVE traité à la chaux et au ciment CEM II. Ainsi, le passage de 20 à 40°C pour le bain thermostaté permet une atténuation maximale des effets de la présence du sulfate dans le LVE au moment du traitement. La combinaison de 28 jours de conservation à teneur en eau constante avant immersion et d'une immersion prolongée permet de réduire le gonflement du mélange LVE + sulfate à moins de 5 % pour les deux températures, alors que dans ces conditions le gonflement du limon seul traité est de l'ordre du pourcent. En revanche, on peut noter qu'avec ces conditions de conservation, l'utilisation du bain à 20°C conduit à une résistance à la compression simple du limon + sulfate inférieure d'environ 30 % à celle du limon seul traité alors que, si le bain est à 40°C, il n'y a pas de différence significative entre la performance des deux limons.

Ces résultats indiquent que des conditions de cure « accélérée » par l'utilisation d'une température de 40°C conduisent à créer d'autres situations, c'est à dire limiter fortement, voire supprimer, l'influence de la présence de sulfate sur le comportement mécanique. Il faut rappeler que ces résultats ont été obtenus pour une quantité de soufre relativement importante

(4,6 % massique de soufre), par rapport à ce qui peut être trouvé dans la nature (cf. chapitre II).

3. INFLUENCE DES PARAMÈTRES D'ESSAIS SUR UN SOL CONTENANT DU SULFURE

La démarche suivie pour évaluer l'impact d'un sulfure suit la même démarche que précédemment (tableau 4.1). Différentes conditions de cure ont été suivies, en fonction du temps de conservation à teneur en eau constante avant immersion, et de la température du bain dans lequel sont immergées les éprouvettes. On rappelle que la concentration en sulfure ajoutée à notre sol a été fixée à 93,8 g de pyrite par kilogramme de sol sec, soit environ 4,9 % de soufre par kilogramme de sol. Cette teneur en soufre, introduit sous une forme réduite est équivalente à la teneur en soufre introduit sous forme de sulfate dans le LVE retenue dans le point précédent.

3.1. Influence de la température de conservation à teneur en eau initiale constante

Le premier paramètre étudié est la température. L'influence de ce paramètre a été évaluée en travaillant à teneur en eau initiale constante et à deux températures : 20 et 40°C, ce qui correspond aux procédures de conservation 1 et 2 décrites dans le tableau 4.1.

3.1.1. Essais à 20°C (condition n°1)

Les résultats des mesures de résistance à la compression simple en fonction du temps de cure sont représentés sur la figure 4.19. Les éprouvettes ont été conservées à teneur en eau constante et à une température de 20°C. La résistance à la compression simple du mélange limon + sulfure, après 180 jours de cure, est de 3,24 MPa alors qu'elle est de 6,98 MPa pour le limon seul traité. On constate ainsi que la présence de pyrite altère fortement la prise hydraulique puisque la résistance à la compression simple du matériau contenant la pyrite est égale à 40 % environ de celle du limon seul traité. En revanche, aucun gonflement volumique n'a été observé sur les éprouvettes contenant du sulfure.

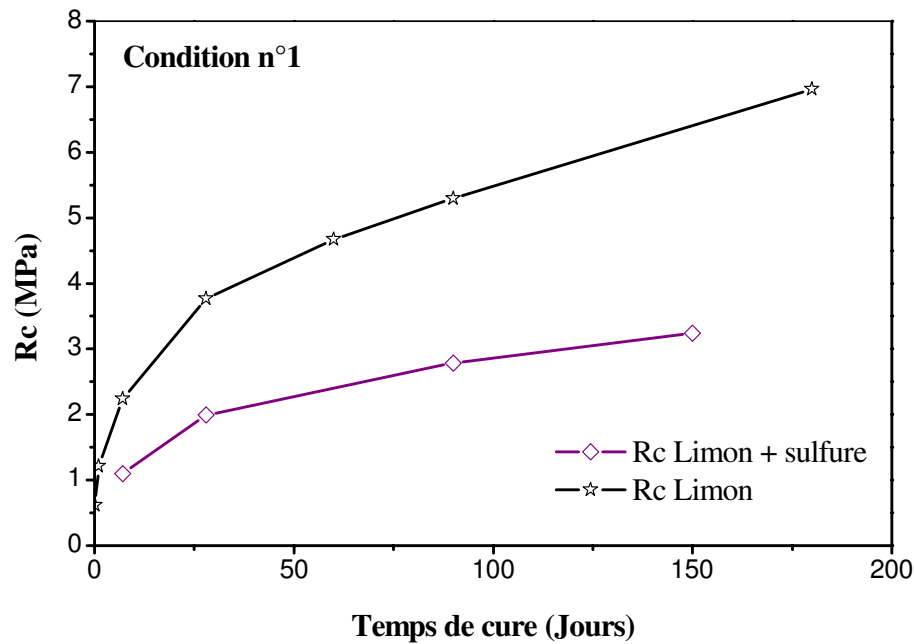


Figure 4.19 : Évolution de la résistance à la compression simple d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante et à 20°C (condition n°1)

3.1.2. Essais à 40°C (condition n°2)

Les résultats des mesures de résistance à la compression simple en fonction du temps de cure, sont représentés sur la figure 4.20. Les éprouvettes ont été conservées à teneur en eau constante et à une température de 40°C (condition n°2, Tableau 4.1). On remarque tout d'abord que, pour les deux matériaux, la résistance à la compression simple est stabilisée après 14 jours de cure, la prise est donc terminée après 21 jours à 40°C et à teneur en eau constante. La résistance à la compression simple diminue légèrement en présence du sulfure. Après 21 jours de cure, les résistances à la compression simple sont de 5,15 MPa pour le limon de référence et de 4,20 MPa pour le mélange limon sulfure, soit une valeur inférieure de 18 %.

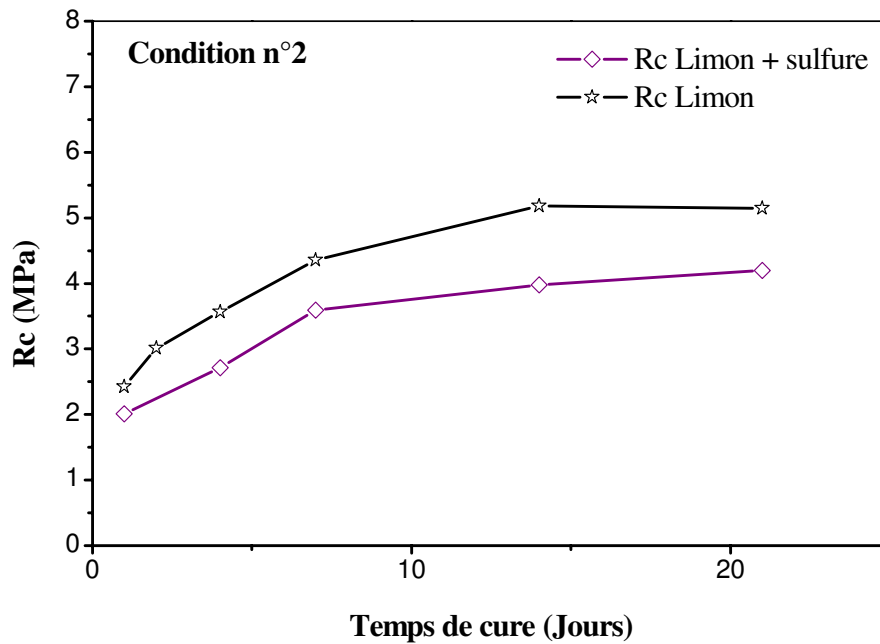


Figure 4.20 : Évolution de la résistance à la compression simple d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante et à 40°C (condition n°2)

3.1.3. Synthèse : effet de la température de conservation

Dans l'ensemble, la résistance à la compression simple du mélange limon plus sulfure est plus faible que celle du limon de référence pour les deux températures de cure à teneur en eau constante retenues dans cette étude. La diminution est plus importante lorsque les éprouvettes sont conservées à 20°C (47 % pour 90 jours de cure) qu'à 40°C (18 % à 21 jours de cure). Une température de 40°C de conservation à teneur en eau constante apparaît ainsi limiter l'influence de la présence du sulfure sur la résistance à la compression simple du limon traité à la chaux et au CEM II. En revanche, aucun gonflement volumique significatif des éprouvettes n'a été enregistré.

3.2. Influence des conditions d'immersion

L'influence de l'immersion a été évaluée en travaillant sur des éprouvettes conservées d'abord à teneur en eau initiale constante pendant 120 minutes, correspondant au délai de maniabilité mesuré sur le limon traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II, puis immergées à deux températures : 20°C et 40°C.

3.2.1. Immersion dans une eau à 20°C (condition n°3)

Les résultats des mesures de gonflement volumique et de résistance à la compression simple après immersion en fonction du temps d'immersion sont représentés sur la figure 4.21 et dans le tableau 4.14. Les éprouvettes ont été conservées à teneur en eau constante et à une température de 20°C pendant 2 heures correspondant au délai de maniabilité, puis elles ont été immergées dans une eau à 20°C. La résistance à la compression simple est plus faible dans le cas du mélange limon + sulfure traité que pour le limon seul traité dans les mêmes conditions. Ainsi, après 90 jours d'immersion à 20°C, la résistance à la compression simple est de 3,64 MPa pour le limon seul traité et de 2,22 MPa pour le mélange limon + sulfure traité, soit une différence de l'ordre de 39 %. On peut aussi remarquer que la prise semble terminée pour les deux matériaux, la résistance n'évoluant quasiment plus entre 60 et 90 jours d'immersion. Les gonflements volumiques sont plus forts en présence de sulfure : après 90 jours d'immersion à 20°C, le gonflement volumique est de 1,55 % pour le limon seul traité et d'environ 3,45 % pour le mélange limon + sulfure traité.

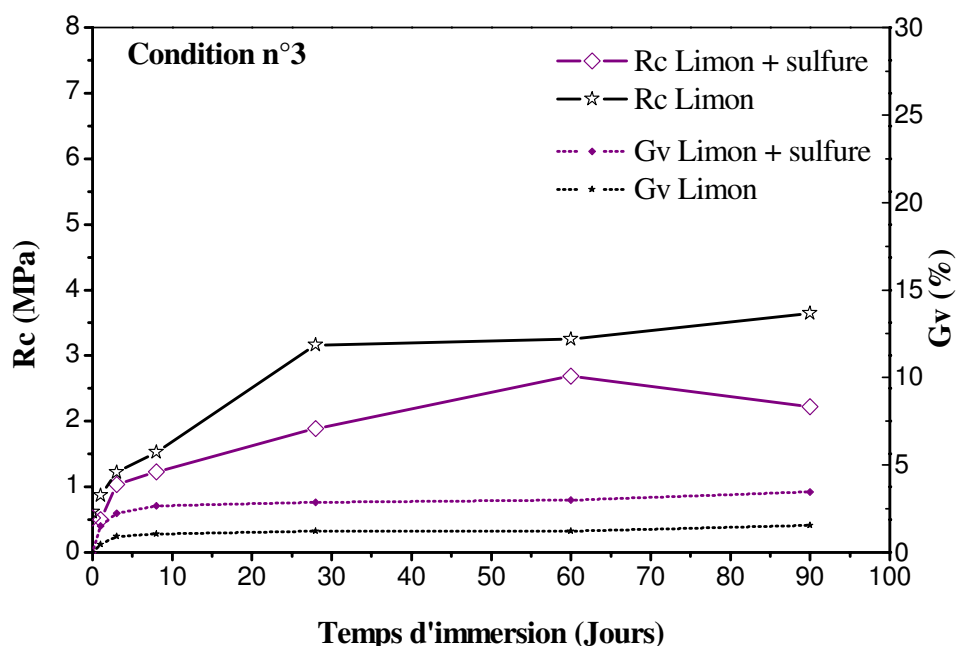


Figure 4.21 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 20°C (condition n°3)

Tableau 4.14 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 120 minutes puis immergées à 20 °C

Temps d'immersion (jours)	Sans immersion	1	3	7	28	60	90
$w(\%)$	20,1	22,9	23,6	23,0	24,3	24,9	27,8
$\rho_h (\text{Mg.m}^{-3})$	1,98	2,03	2,03	2,02	2,02	2,03	2,02
$\rho_d (\text{Mg.m}^{-3})$	1,65	1,65	1,64	1,64	1,63	1,63	1,58
e	0,64	0,64	0,65	0,64	0,66	0,66	0,71

3.2.2. Immersion dans une eau à 40°C (condition n°4)

Les résultats des mesures de gonflement volumique et de résistance à la compression simple sont représentés en fonction du temps d'immersion sur la figure 4.22, les caractéristiques des éprouvettes sont regroupées dans le tableau 4.15. Les éprouvettes ont été conservées à teneur en eau constante et à une température de 20°C pendant 2 heures, correspondant au délai de maniabilité, puis elles ont été immergées dans une eau à 40°C. La résistance à la compression simple du mélange limon + sulfure traité est inférieure de 19 % à celle du limon seul traité : après 21 jours d'immersion à 40°C. On peut aussi noter que si la prise paraît terminée pour le mélange limon + sulfure traité après 21 jours d'immersion, elle ne l'est pas dans le cas du limon seul traité. Par ailleurs, le gonflement volumique n'est pas significativement influencé par la présence de sulfure dans le limon. En effet, après 21 jours d'immersion à 40°C, le gonflement volumique est de 1,66 % pour le limon seul traité et de 1,45 % pour le mélange limon + sulfure traité.

Pour une immersion à 40°C, on constate ainsi un faible gonflement volumique des sols. L'ajout de pyrite n'influence pas le développement d'une prise hydraulique qui se traduit par une résistance à la compression simple proche de 4 MPa, proche de celle du limon de référence traité.

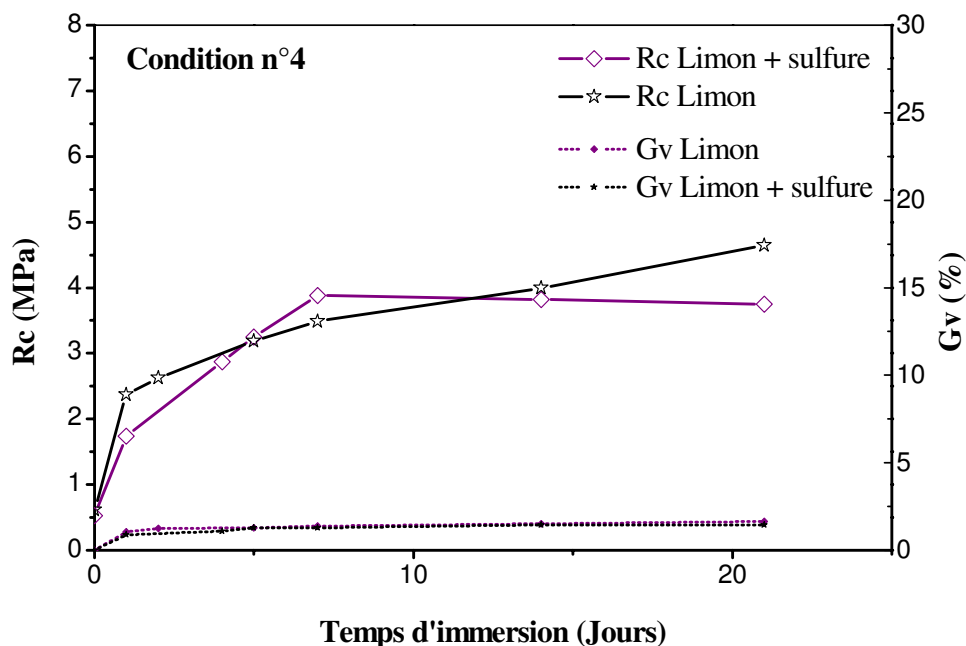


Figure 4.22 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 40°C (condition n°4)

Tableau 4.15 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 120 minutes puis immergées à 40 °C

Temps d'immersion (jours)	Sans immersion	1	2	4	7	14	21
$w(\%)$	20,3	22,4	22,6	22,7	23,1	23,2	23,2
$\rho_h (\text{Mg.m}^{-3})$	1,99	2,00	1,99	1,99	2,00	2,00	1,99
$\rho_d (\text{Mg.m}^{-3})$	1,65	1,63	1,62	1,63	1,62	1,62	1,62
e	0,64	0,66	0,67	0,66	0,67	0,67	0,67

3.2.3. Synthèse : influence de la température d'immersion

Les résultats obtenus permettent de montrer que l'impact de la température d'immersion sur le comportement mécanique du limon traité, contenant ou non du sulfure. On constate ainsi que dans le cas d'une immersion à 20°C, un faible gonflement se produit (3,45 %), une prise hydraulique se développe, permettant d'atteindre une résistance à la compression simple supérieure de l'ordre de 2 MPa après 90 jours. la présence de sulfure conduit à une résistance à la compression simple inférieure d'environ 39 % à celle atteinte dans le cas du limon seul traité. Dans le cas d'une immersion à 40°C, le gonflement

volumique et la résistance à la compression simple du limon ne sont pas influencés par la présence de la pyrite après 21 jours d'immersion.

3.3. Influence du temps de cure à teneur en eau initiale constante

Le dernier paramètre étudié est le temps de cure à teneur en eau initiale constante avant l'immersion. L'influence de ce paramètre a été évaluée en travaillant sur des éprouvettes conservées d'abord à teneur en eau initiale constante pendant 7 ou 28 jours, puis immergées à deux températures : 20 et 40°C.

3.3.1. Immersion après 7 jours de cure à teneur en eau initiale constante

o Immersion dans une eau à 20°C (condition n°5)

Les résultats des mesures de gonflement volumique et de résistance à la compression simple après immersion en fonction du temps d'immersion sont représentés sur la figure 4.23, les caractéristiques des éprouvettes sont regroupées dans le tableau 4.16. On constate ainsi en premier lieu que le gonflement volumique reste quasiment nul tout au long de la cure même si le limon contient du sulfure. La présence de sulfure n'influence donc pas le gonflement volumique du limon traité dans le cas d'une immersion à 20°C. En revanche, la résistance à la compression simple du limon contenant du sulfure traité est inférieure de 26 % à celle atteinte par le limon seul traité dans les mêmes conditions.

Lorsque l'on immerge les sols à 20°C après 7 jours de cure à teneur en eau constante, on observe ainsi un gonflement limité (1,5 %) et l'acquisition d'une prise se caractérisant par une résistance à la compression simple supérieure à 2 MPa, soit une diminution de 27 % par rapport au même limon traité, sans perturbateur.

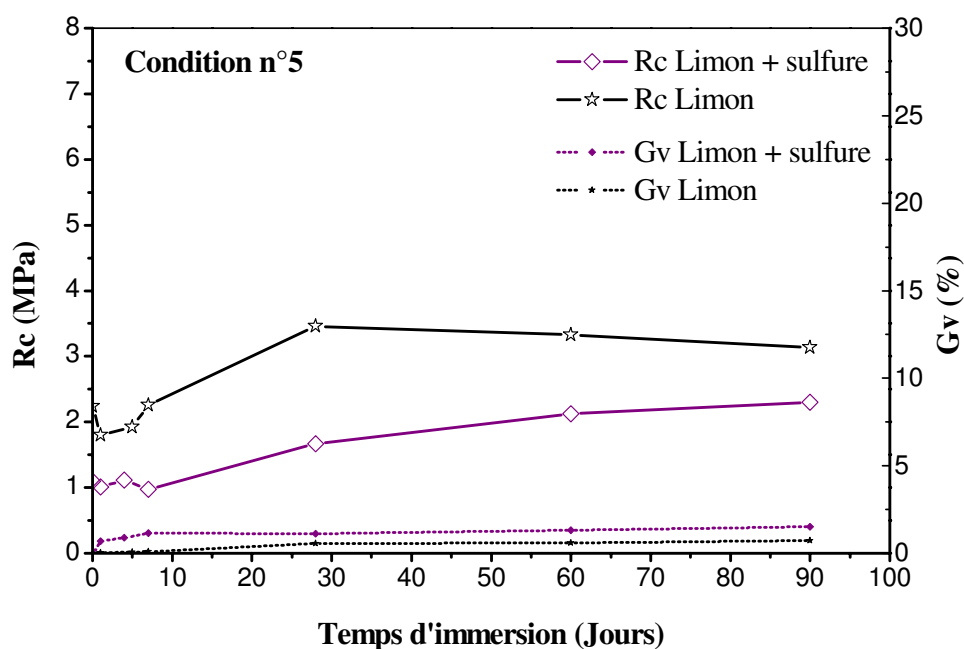


Figure 4.23 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 20°C après avoir été conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours (condition n°5)

Tableau 4.16 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours puis immergées à 20 °C

Temps d'immersion (jours)	Sans immersion	1	3	7	28	60	90
$w(\%)$	20,1	23,3	24,0	23,3	24,0	24,5	25,5
$\rho_h (\text{Mg.m}^{-3})$	1,98	2,03	2,04	2,03	2,05	2,05	2,03
$\rho_d (\text{Mg.m}^{-3})$	1,65	1,65	1,65	1,64	1,65	1,65	1,62
e	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,67

o Immersion dans une eau à 40°C (condition n°6)

Les résultats des mesures de gonflement volumique et de résistance à la compression simple après immersion en fonction du temps d'immersion sont représentés sur la figure 4.24, les propriétés des éprouvettes dans le tableau 4.17. La résistance à la compression simple est plus faible en présence de sulfure dans le limon traité. Après 21 jours d'immersion à 40°C, la résistance à la compression simple est de 3,95 MPa pour le limon seul traité et de 2,90 MPa pour le mélange limon + sulfure, soit une perte de l'ordre de 26 %. Le gonflement volumique n'est pas significativement influencé par la présence de sulfure dans le limon traité. Après 21

jours d'immersion à 40°C, les gonflements volumiques sont de 0,61 % pour le limon de référence et de 1,05 % pour le limon mélangé à la pyrite.

Pour une immersion à 40°C, on constate que le gonflement est faible, du même ordre que celui du limon seul traité. On observe le développement d'une prise se caractérisant par une résistance à la compression simple supérieure à 2,5 MPa. Cette résistance est ainsi plus faible que celle du limon traité sans perturbateur, la différence est de l'ordre de 36 %.

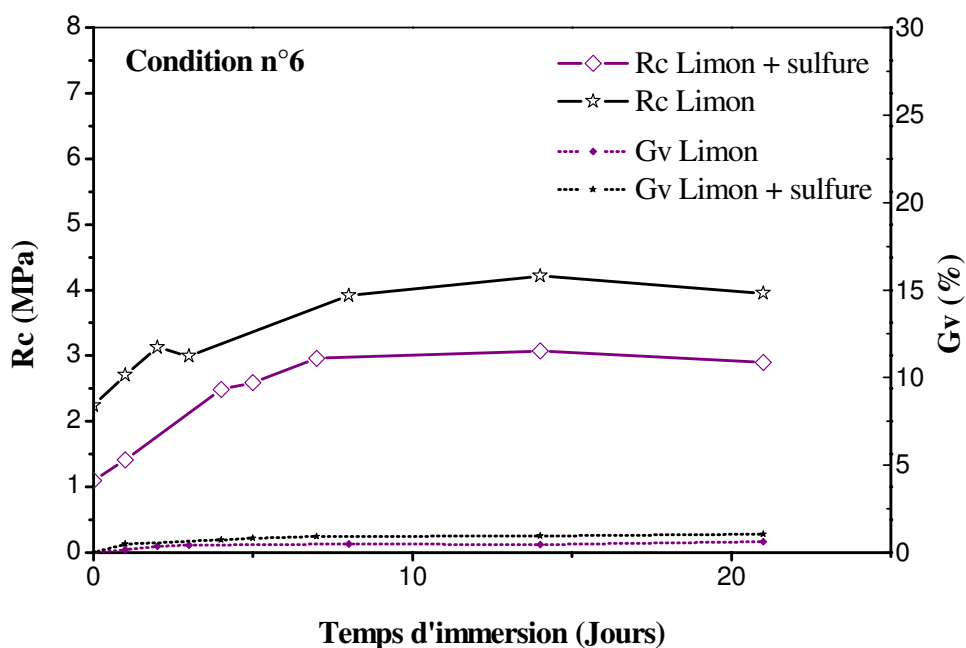


Figure 4.24 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 40°C après avoir été conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours (condition n°6)

Tableau 4.17 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 7 jours puis immergées à 40 °C

Temps d'immersion (jours)	Sans immersion	1	2	4	7	14	21
$w(\%)$	20,2	23,2	22,9	23,0	22,9	23,4	23,6
$\rho_h (\text{Mg.m}^{-3})$	1,98	2,02	2,03	2,02	2,02	2,02	2,02
$\rho_d (\text{Mg.m}^{-3})$	1,65	1,64	1,65	1,64	1,64	1,64	1,63
e	0,64	0,65	0,64	0,64	0,64	0,65	0,66

o *Synthèse*

Les éprouvettes de limon traité ayant subi une cure à teneur en eau constante de 7 jours possèdent une résistance après immersion plus faible quand on ajoute de la pyrite au sol, alors que le gonflement est du même ordre de grandeur que le limon de référence. Ceci se produit quelle que soit la température d'immersion. Cependant, à 20°C, on observe que l'écart entre le matériau contenant de la pyrite et le matériau de référence diminue : l'effet du sulfure sur le traitement semble se réduire au cours de l'immersion.

3.3.2. Immersion après 28 jours de cure à teneur en eau initiale constante

o *Immersion dans une eau à 20°C (condition n°7)*

Les résultats des mesures de gonflement volumique et de résistance à la compression simple après immersion en fonction du temps d'immersion sont représentés sur la figure 4.25 et les caractéristiques des éprouvettes sont données dans le tableau 4.18. La présence de sulfure dans le limon traité conduit à une résistance à la compression simple après 90 jours d'immersion de 0,95 MPa alors que, avec les mêmes conditions, le limon seul traité atteint une résistance de 4,12 MPa. Le sulfure conduit une performance inférieure de 77 % avec ces conditions de traitement. Par ailleurs, le gonflement volumique augmente en ajoutant de la pyrite au limon du Val d'Europe traité. Après 90 jours d'immersion à 20°C, le gonflement volumique est de 0,55 % pour le limon de référence et 6 fois plus fort pour le limon mélangé à la pyrite (3,37 %).

Lorsque l'on immerge les éprouvettes de limon + sulfure à 20°C, après 28 jours de cure à teneur en eau constante, on observe un gonflement volumique 6 fois plus important que dans le cas du limon seul traité. Dès le premier jour d'immersion, la résistance à la compression simple chute en présence de sulfure. À 90 jours d'immersion, elle est inférieure à 1 MPa et 4 fois plus faible que celle du même sol traité avec les mêmes liants, mais sans perturbateur.

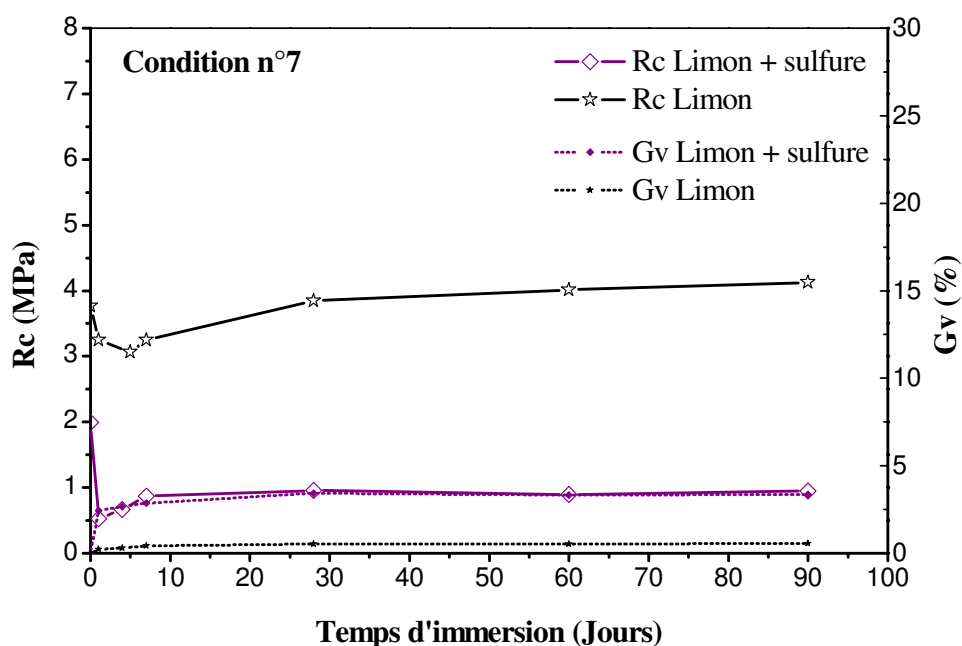


Figure 4.25 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 20°C après avoir été conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours (condition n°7)

Tableau 4.18 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours puis immergées à 20 °C

Temps d'immersion (jours)	Sans immersion	1	3	7	28	60	90
$w(\%)$	20,4	23,4	24,1	24,6	25,9	26,4	27,8
ρ_h (Mg.m ⁻³)	1,98	1,99	1,98	2,01	2,01	2,02	2,03
ρ_d (Mg.m ⁻³)	1,65	1,61	1,56	1,61	1,59	1,60	1,58
e	0,64	0,68	0,69	0,67	0,70	0,69	0,70

o Immersion dans une eau à 40°C (condition n°8)

Les résultats des mesures de gonflement volumique et de résistance à la compression simple après immersion en fonction du temps d'immersion sont représentés sur la figure 4.26 et dans le tableau 4.19. La résistance à la compression simple est plus faible quand on ajoute de la pyrite au limon. Après 21 jours d'immersion à 40°C, la résistance à la compression simple est divisée par 3 entre le limon de référence (4,43 MPa) et le limon mélangé à la pyrite (1,33 MPa). Lors de l'immersion des éprouvettes à 40°C, on constate un faible gonflement volumique de l'ordre de 2,35 % pour le limon perturbé et traité, soit un gonflement 5 fois plus fort que celui du limon de référence.

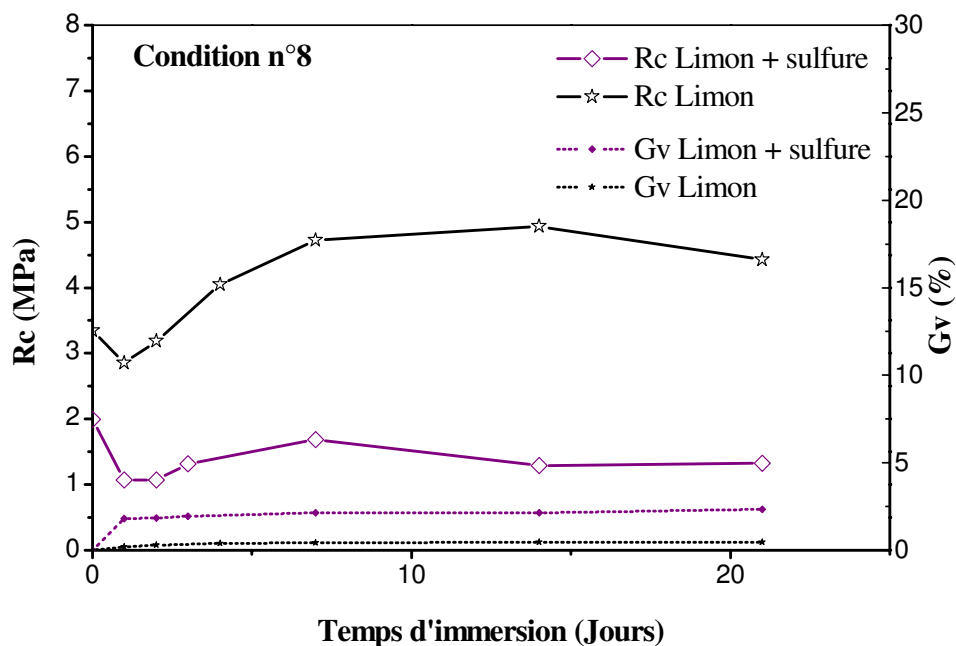


Figure 4.26 : Évolution de la résistance à la compression simple et du gonflement volumique d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, immergées dans une eau à 40°C après avoir été conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours (condition n°8)

Tableau 4.19 : Teneur en eau (w), masse volumique humide (ρ_h), masse volumique sèche (ρ_d), indice des vides (e) en fonction du temps d'immersion d'éprouvettes de mélange LVE + pyrite + CaO + CEM II, conservées à teneur en eau initiale constante à 20°C pendant 28 jours puis immergées à 40 °C

Temps d'immersion (jours)	Sans immersion	1	2	4	7	14	21
$w(\%)$	20,4	23,9	23,6	23,5	23,1	24,4	24,3
$\rho_h (\text{Mg.m}^{-3})$	1,98	2,00	2,01	2,01	2,02	2,01	2,01
$\rho_d (\text{Mg.m}^{-3})$	1,65	1,61	1,63	1,63	1,64	1,62	1,62
e	0,64	0,67	0,66	0,66	0,65	0,67	0,67

o Synthèse

Lorsque l'on immerge dans une eau de 20°C ou de 40°C, les éprouvettes conservées au préalable à teneur en eau initiale constante à 20°C, pendant 28 jours, le gonflement volumique est plus fort pour les sols contenant de la pyrite. La résistance à la compression simple diminue dans les premiers jours d'immersion. Par rapport au limon seul traité, la résistance à la compression simple du limon perturbé à la pyrite diminue 4 fois après une immersion à 20°C et 3 fois à 40°C.

3.4. Influence des différentes conditions de cure sur la microstructure

Les observations au MEB des éprouvettes de mélange LVE + FeS_2 + CaO + CEM II ont été effectuées sur des éprouvettes ayant subi la condition n°7 de cure et une immersion de 90 jours, le gonflement volumique est de l'ordre de 3,37 % et la résistance à la compression simple est de 0,95 MPa. Les figures 4.27 et 4.28 montrent que la déstabilisation de la pyrite laisse des plages bien identifiables. En effet, l'immersion dissout en partie la pyrite, ce qui contribue à la formation de l'ettringite. La figure 4.29 montre la présence résiduelle de pyrite et la corrélation étroite entre la présence de pyrite et le développement d'ettringite en gerbes. La pyrite est la source en sulfate nécessaire à la formation d'ettringite.

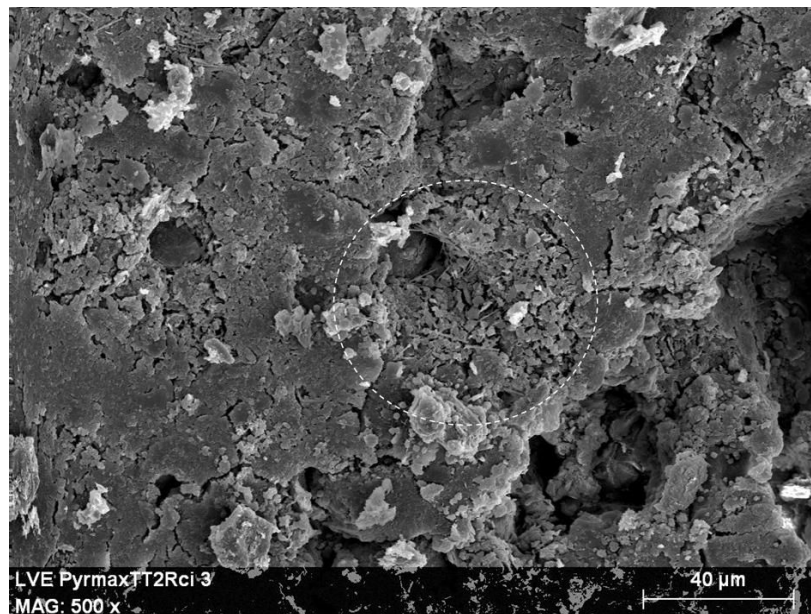


Figure 4.27 : Observation de surface au MEB du mélange limon + FeS_2 + CaO + CEM II ($\times 500$)

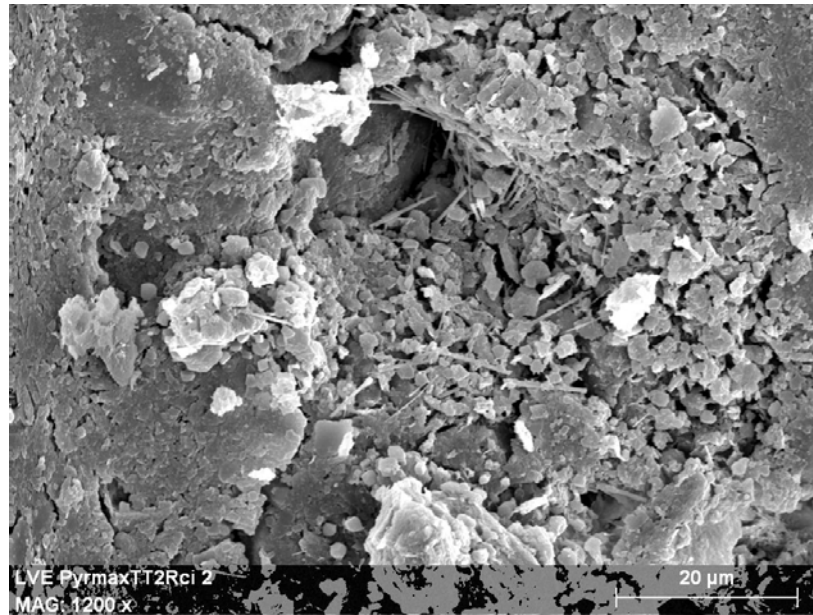


Figure 4.28 : Observation de surface au MEB du mélange limon + FeS₂ + CaO + CEM II, détail de la figure 4.24 (×1200)

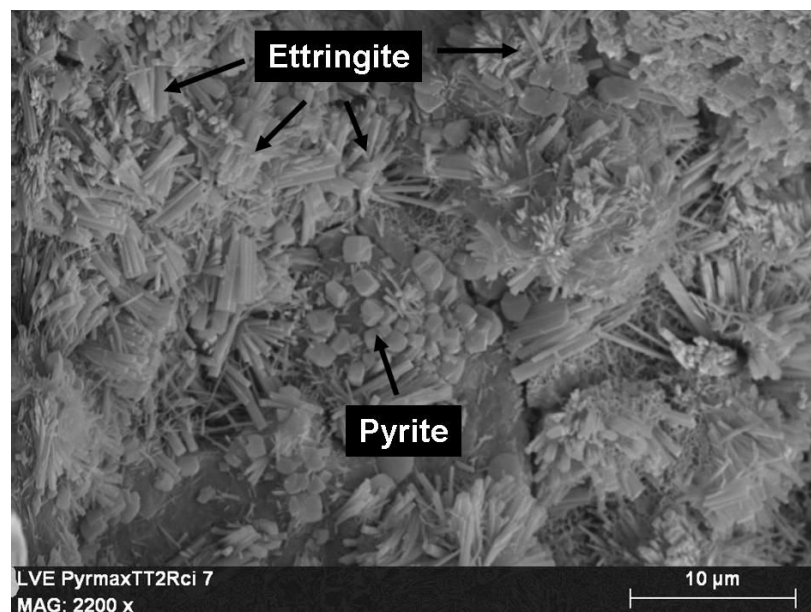


Figure 4.29 : Observation de surface au MEB du mélange limon + FeS₂ + CaO + CEM II, détail de la présence résiduelle de pyrite et de la formation d'ettringite (×2200)

3.5. Discussion : influence des conditions de cure dans le cas du mélange limon + sulfure

Les résultats de cette partie du travail permettent d'évaluer l'impact des conditions de conservation des éprouvettes pendant la cure, c'est-à-dire la période entre leur préparation et la réalisation de l'essai mécanique. On peut ainsi déterminer comment ces conditions de cure

modifie le comportement d'un limon contenant du sulfure (4,9 % sous forme S), en prenant comme référence le même limon, traité de la même manière (1,5 % CaO et 6 % CEMII). Les résultats précédents sont exprimés en fonction du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion, ce qui correspond aux résultats obtenus en suivant les conditions 3 à 8 (tableau 4.1). Cela correspond aux figures 4.30 à 4.33.

o *Résultats obtenus pour une température d'immersion de 20°C*

Dans le cas du mélange limon plus sulfure traité, le gonflement volumique est minimum pour un temps de cure avant immersion de 7 jours, le gonflement étant alors du même ordre de grandeur que celui mesuré dans le cas du limon seul traité (figure 4.30). On peut aussi remarquer que le temps de cure à teneur en eau constante influence fortement la résistance à la compression simple du mélange limon + sulfure traité (figure 4.31). En effet, elle passe de 2,2 MPa, pour 2 h de cure avant immersion et 90 jours d'immersion, à environ 1 MPa si le temps d'immersion, après le même délai de cure avant immersion, est limité à 28 jours. Par rapport aux valeurs obtenues pour le limon non traité, on passe d'un rapport de 39 % à 77 %.

Avec ces conditions de conservation, on constate que l'augmentation du temps de conservation des éprouvettes avant immersion contribue à favoriser l'impact de la présence de sulfure dans le limon traité.

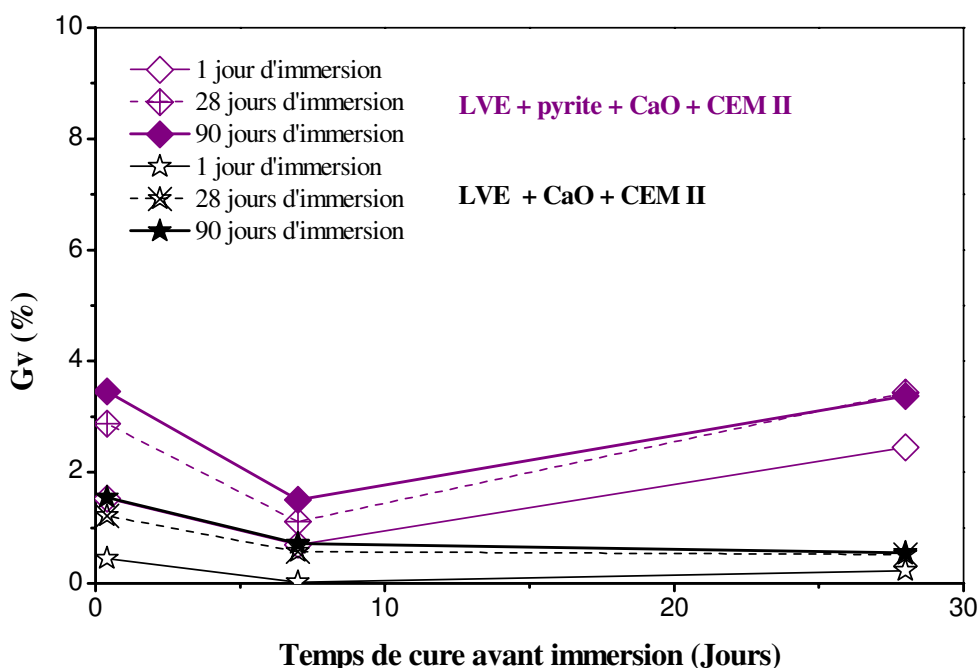


Figure 4.30 : Gonflement volumique après immersion à 20°C (%) en fonction du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion (jours) de mélanges LVE + pyrite + CaO + CEM II et LVE + CaO + CEM II

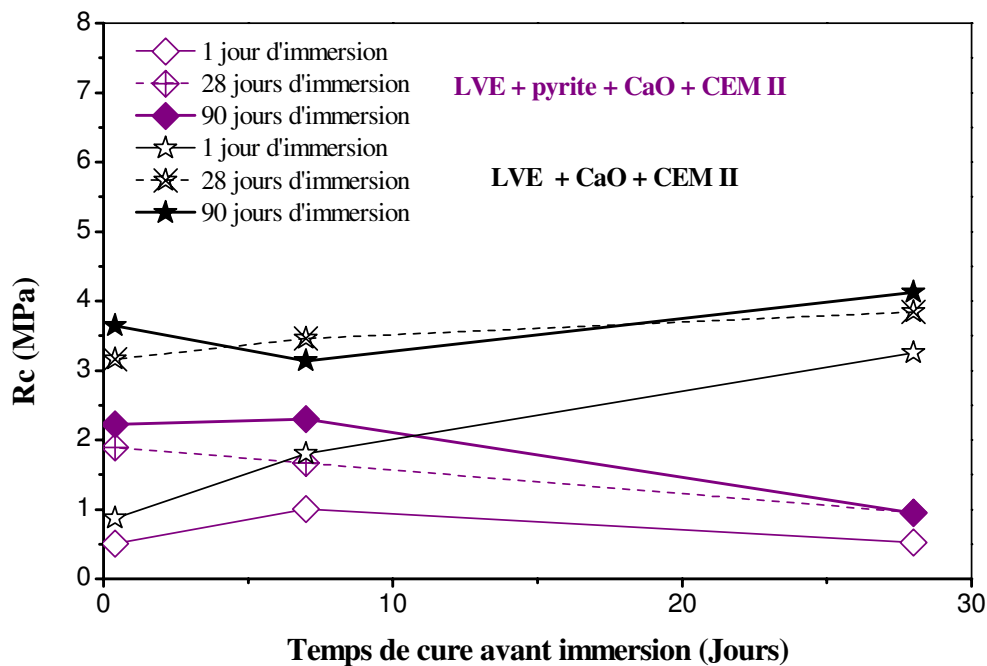


Figure 4.31 : Résistance à la compression simple après immersion à 20°C (MPa) en fonction du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion (jours) de mélanges LVE + pyrite + CaO + CEM II et LVE + CaO + CEM II

o Résultats obtenus pour une température d'immersion de 40°C

Lorsque la température d'immersion est de 40°C, on constate que le gonflement du mélange limon + sulfure traité reste inférieur à 2 %, quel que soit le temps de conservation à teneur en eau constante avant immersion (figure 4.32). Cependant, on note une tendance à l'augmentation du gonflement du mélange limon + sulfure traité avec l'augmentation du temps de conservation à teneur en eau constante avant immersion. Du point de vue mécanique (figure 4.33), l'augmentation du temps de conservation à teneur en eau constante avant immersion à 40°C contribue à réduire la résistance à la compression simple du mélange limon + sulfure traité : elle passe ainsi de 4 MPa environ à environ 1,5 MPa. À l'opposé, le temps de conservation à teneur en eau constante avant immersion à 40°C n'a pratiquement aucune influence sur la résistance à la compression simple du limon seul traité.

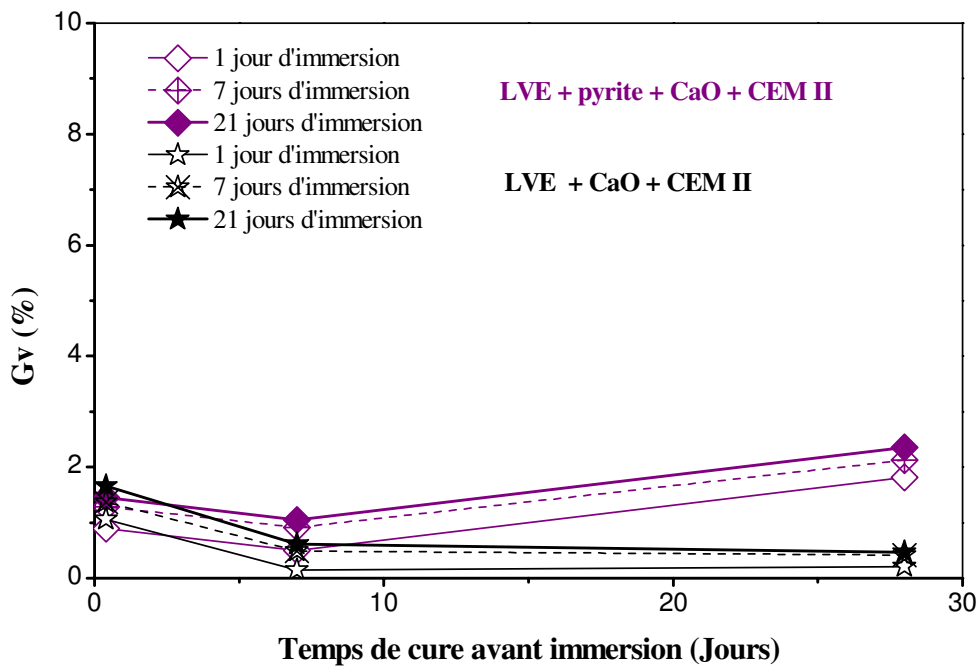


Figure 4.32 : Gonflement volumique après immersion à 40°C (%) en fonction du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion (jours) de mélanges LVE + pyrite + CaO + CEM II et LVE + CaO + CEM II

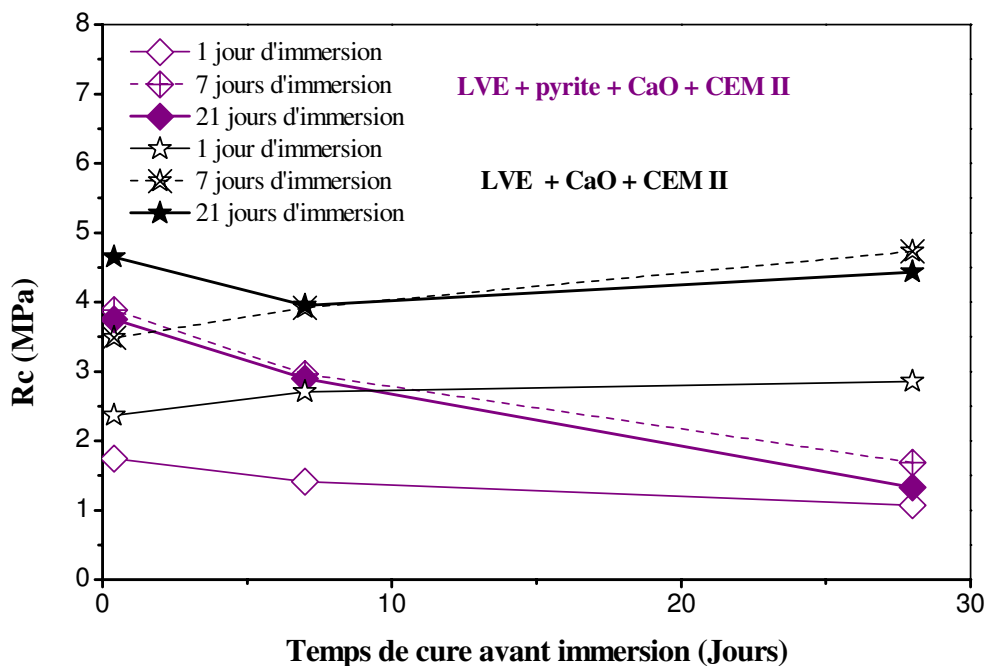


Figure 4.33 : Résistance à la compression simple après immersion à 40°C (MPa) en fonction du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion (jours) de mélanges LVE + pyrite + CaO + CEM II et LVE + CaO + CEM II

o Bilan

Ainsi, on constate que le délai de conservation des éprouvettes avant leur immersion est un paramètre qui contrôle la performance mécanique du mélange limon + sulfure traité :

plus il est grand, plus la performance mécanique atteinte est faible. L'impact sur le gonflement est moins marqué. La température du bain d'immersion joue surtout un rôle sur la performance finale des deux matériaux traités. La performance mécanique à 40°C est supérieure à celle atteinte avec un bain à 20°C. Le gonflement est plus réduit dans le cas d'un bain à 40°C. L'augmentation de la température d'immersion à 40°C mène à créer des situations différentes et non à accélérer les phénomènes observés à 20°C.

4. DISCUSSION

Il s'agit maintenant de synthétiser les résultats obtenus sur des éprouvettes de limon seul, de limon + sulfate et de limon + sulfure, afin d'évaluer l'influence respective de la température de conservation et d'immersion, du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion, et enfin de la forme du composé soufré sur le traitement. Ceci permettra de mesurer l'impact des conditions de conservation des éprouvettes lors de la réalisation des différents essais destinés à évaluer l'aptitude d'un sol vis-à-vis d'un traitement. Les tableaux 4.20 et 4.21 donnent une synthèse de l'ensemble des résultats obtenus. Ils donnent le rapport entre la caractéristique mesurée quand le sol contient du soufre et celle quand le sol n'en contient pas au moment du traitement. Ces rapports ont été calculés à partir des valeurs mesurées après 90 jours de cure lorsque la température de conservation est de 20°C et de 21 jours lorsqu'elle est de 40°C, c'est-à-dire à partir du moment où nous avons considéré le processus de prise comme achevé.

Tableau 4.20. Influence de la température de cure à teneur en eau constante.

Condition	R _c sulfate / R _c limon seul		Gv sulfate / Gv limon seul		R _c sulfure / R _c limon seul		Gv sulfure / Gv limon seul	
	20°C (90 jours)	40°C (21 jours)	20°C (90 jours)	40°C (21 jours)	20°C (90 jours)	40°C (21 jours)	20°C (90 jours)	40°C (21 jours)
1 & 2 (cure à teneur en eau constante)	0,90	1,18	1,00	1,00	0,53	0,82	1,00	1,00

Tableau 4.21. Influence du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion et de la température d'immersion.

Condition	R _c sulfate / R _c limon seul		Gv sulfate / Gv limon seul		R _c sulfure / R _c limon seul		Gv sulfure / Gv limon seul	
	20°C (90 jours)	40°C (21 jours)	20°C (90 jours)	40°C (21 jours)	20°C (90 jours)	40°C (21 jours)	20°C (90 jours)	40°C (21 jours)
3 & 4 (immersion après DM)	0,17	0,34	16,27	9,88	0,61	0,81	2,23	0,87
5 & 6 (immersion après 7 jours à w = cte)	0,62	0,97	12,75	5,13	0,73	0,73	2,08	1,72
7 & 8 (immersion après 28 jours à w = cte)	0,65	0,93	9,36	3,72	0,23	0,30	6,13	5,00

4.1. Influence de la température de conservation

Une conservation à teneur en eau constante ne provoque aucun gonflement des éprouvettes quelle que soit la température. Lors d'une conservation à 20°C, l'ajout de sulfate ou de pyrite, aux concentrations choisies, provoque une diminution de la résistance à la compression simple. L'influence de l'ajout est plus importante dans le cas de l'ajout de sulfure sous forme de pyrite. Lors d'une conservation à 40°C, l'ajout de sulfate sous forme de sulfate de calcium hydraté augmente la résistance à la compression simple, alors que l'ajout de pyrite provoque une diminution, mais plus faible que dans le cas d'une conservation à 20°C. L'augmentation de température de 20°C à 40°C ne pénalise pas l'aptitude d'un sol contenant un composé soufré, au contraire, soit les résistances sont plus fortes dans le cas du mélange limon + sulfate, soit l'écart de résistance avec le sol de référence diminue dans le cas du mélange limon + pyrite.

4.2. Influence de l'immersion

L'immersion provoque une augmentation des gonflements volumiques d'un sol contenant du sulfate. Quand le gonflement volumique est important, les résistances mécaniques diminuent par rapport au sol de référence. Le gain de résistance mécanique dû au traitement peut s'annuler lorsque le gonflement est très fort (>25%), quand l'immersion se fait très tôt et à 20°C. L'immersion pénalise moins le traitement d'un sol contenant de la pyrite lorsque les éprouvettes sont immergées très vite après confection : moins de gonflement volumique et les résistances mécaniques sont proches de celles du sol de référence (20°C) ou

équivalent à celle du sol de référence (40°C). Le temps permet probablement au sol traité de former les phases cimentaires responsables du gain de résistance. Cette cimentation s'effectue malgré l'immersion, sauf dans le cas du mélange limon du Val d'Europe + sulfate immergé très tôt à 20°C.

L'augmentation du temps de cure à teneur en eau initiale avant immersion de 120 minutes à 7 jours et 28 jours provoque une diminution des gonflements volumiques pour les sols contenant du gypse, et réduit l'écart entre les résistances mécaniques par rapport au sol de référence entre le sol de référence et le sol contenant du sulfate. Enfin, l'augmentation de l'indice des vides est moins forte ; ceci s'explique par le fait que les phases cimentaires ont eu le temps de se créer avant immersion et que les phases expansives sont moins abondantes. Le temps de cure à teneur en eau initiale avant immersion permet aux éprouvettes d'acquérir une prise, cette dernière va réduire les gonflements volumiques. Dans le cas des sols perturbés à la pyrite, le temps de cure avant immersion entraîne une augmentation des gonflements volumiques et des écarts entre le mélange limon + pyrite et le sol de référence.

4.3. Influence de la forme sous laquelle se trouve le soufre

Le tableau 4.22 récapitule les données permettant de mettre en évidence l'influence de la forme sous laquelle se trouve le soufre. Pour permettre à un sol contenant des sulfates de développer une prise, les conditions les plus favorables sont : une conservation à teneur en eau de compactage constante, à une température de 40°C, et enfin s'il y a immersion, une conservation à teneur en eau constante pendant par exemple 28 jours. Au contraire, un apport d'eau tôt après le compactage, par immersion à 20°C, va provoquer des gonflements volumiques importants et empêcher la prise de se développer. L'influence des pyrites sur le traitement du limon se traduit par une baisse des résistances à la compression simple même lorsque les éprouvettes sont conservées à teneur en eau constante. L'immersion semble moins pénalisante pour un sol auquel on ajoute de la pyrite que pour un ajout de sulfate de calcium hydraté, à condition que l'immersion se fasse tôt après compactage. En effet, lorsque le temps de cure avant immersion est important (28 jours), l'influence de la présence de pyrite est marquée par une faible prise, caractérisée par une résistance à la compression simple inférieure à 1 MPa, par exemple pour une immersion à 20°C.

Pour expliquer ces différences de comportement entre le sulfate et le sulfure, il faut prendre en compte le mode de formation de l'ettringite (équation [8], cf. chapitre 1, paragraphe 3.1.3.). Cette équation montre que la formation d'ettringite se fait à partir de sulfate. Ainsi, lorsque des sulfures sont présents dans le système, il est nécessaire de procéder

à leur oxydation avant de pouvoir former de l'ettringite. La formation de l'ettringite est donc contrôlée par la vitesse d'oxydation du sulfure. Ce contrôle a été mis en évidence dans le cas des ciments. Des auteurs (par exemple : Divet, 2001) ont ainsi montré que la quantité d'ettringite produite dépend de la surface spécifique de la phase qui contient le sulfure : plus elle est élevée, plus la vitesse d'oxydation du sulfure est grande et donc la quantité de sulfate libérée est élevée.

L'utilisation de la même pyrite mais préparée d'une manière différente (granulométrie par exemple) pourrait conduire à des conclusions différentes, notamment sur la comparaison entre l'effet d'un sulfate et d'un sulfure. Les résultats dépendent donc de la forme chimique sous laquelle se trouve un élément mais aussi des caractéristiques physiques de cette phase (habitus, granulométrie, etc.).

Tableau 4.22 : Synthèse de l'influence des conditions de cure sur l'aptitude d'un sol contenant soit un sulfate soit un sulfure traité à la chaux et au liant hydraulique de type CEM II

	Ajout de sulfate	Ajout de pyrite
Augmentation de la température de cure à teneur en eau constante de 20°C à 40°C	Augmente les performances mécaniques du sol traité	Réduit l'écart entre la résistance à la compression simple du sol perturbé et du sol de référence
Immersion des éprouvettes	Provoque un fort gonflement volumique et une très faible prise quand l'immersion est réalisée dans une eau à 20°C et très tôt après compactage	A peu d'impact (20°C) ou pas d'impact (40°C) quand l'immersion est réalisée très tôt après compactage
Augmentation du temps de cure à teneur en eau constante avant immersion	Diminue le gonflement volumique et l'influence du sulfate sur la résistance à la compression simple	Augmente le gonflement volumique et l'influence du pyrite sur la résistance à la compression simple

5. CONCLUSION

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'influence des conditions d'essai sur l'aptitude d'un sol contenant un élément soufré vis-à-vis d'un traitement. Pour

cette étude, le traitement choisi a été un traitement mixte, 1,5 % de chaux vive et 6 % de liant hydraulique de type CEM II. On a pu ainsi montrer que l'augmentation de température de 20°C à 40°C n'est pas pénalisant pour l'aptitude d'un sol contenant un élément soufré. En effet, l'ajout de sulfate de calcium au limon avant traitement augmente ses caractéristiques mécaniques, lorsque les éprouvettes sont conservées à 40°C et à teneur en eau initiale constante. Pour juger de l'aptitude d'un sol contenant du soufre sous forme de sulfates, l'apport d'eau est un élément prépondérant. En effet, dès que ce type de sol est immergé un gonflement volumique se produit, il est dû à l'expansion créée par la formation d'ettringite. Ce gonflement peut inhiber la prise. Mais si le gonflement se produit très tôt après compactage des éprouvettes, la prise peut ensuite se développer ; c'est le cas lors d'une immersion à 40°C. De même, si l'apport d'eau aux éprouvettes est réalisé après un certain temps à teneur en eau constante, le gonflement volumique se réduit, la prise peut se développer et l'influence des sulfates se réduit malgré l'immersion. En revanche, l'influence des pyrites dans les sols traités semble moins forte lors de l'immersion que dans le cas d'ajout de sulfates. Une augmentation du temps de cure à teneur en eau constante va augmenter le gonflement volumique et réduire la résistance à la compression simple du sol contenant de la pyrite.

Les essais de résistance à la compression simple sans immersion sont réalisés sur des éprouvettes conservées à teneur en eau constante. L'apport d'eau pour créer l'ettringite, minéral hydraté, est faible ; en effet, seule la quantité d'eau présente dans le sol contenant du sulfate lors du compactage est disponible. Il faut en effet 26 moles d'eau pour former une mole d'ettringite. Ces conditions d'essai sont ainsi favorables au développement d'une prise pour le sol contenant du sulfate. En revanche, l'apport d'eau pour un sol contenant des pyrites est moins prépondérant et les essais de résistance à la compression simple permettent de détecter une diminution des performances mécaniques.

Les essais de résistance à la compression simple après immersion ou essai de résistance à l'immersion au jeune âge consistent à conserver les éprouvettes à teneur en eau de compactage constante à 20°C pendant 28 jours, puis à les immerger à 20°C pendant 32 jours. Ces conditions d'essai peuvent permettre aux éprouvettes d'acquérir une certaine prise et de provoquer un gonflement volumique limité, malgré une quantité prépondérante de sulfate dans le sol. Au contraire, le temps de cure avant immersion est suffisamment long pour détecter une perturbation du traitement par les pyrites.

Enfin, l'essai d'aptitude consiste à immerger les éprouvettes à 40°C, très tôt après compactage. Cet essai va permettre de mettre en évidence efficacement la perturbation du

traitement par un sulfate. Mais la température d'immersion de 40°C va réduire le gonflement volumique et permettre l'acquisition d'une prise, alors que lors d'une immersion à 20°C, le gonflement sera plus important et la résistance plus faible. Dans le chapitre III, on observait un gonflement volumique de l'ordre de 15 % sur des éprouvettes de sol contenant du gypse à dosage maximum et traité au CEM II, parallèlement, la résistance à la traction brésilienne pour le même sol était très satisfaisante malgré ce fort gonflement. Ce phénomène peut s'expliquer en partie par la température de 40°C qui favorise le développement d'une prise, mais aussi du confinement des éprouvettes dans les trousseaux de compactage pendant l'immersion.

Au vu de ces résultats, on peut conclure qu'il est nécessaire actuellement d'associer différents essais pour bien identifier l'aptitude d'un sol à un traitement. Le développement d'un essai prenant en compte tous ces paramètres permettrait de mieux et plus facilement évaluer l'aptitude d'un sol pour un traitement et donc de mieux évaluer les risques lors de la phase chantier.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'étude de l'influence de certains composés chimiques sur l'efficacité du traitement des sols en terrassements à la chaux et / ou au liant hydraulique. Ces travaux présentent un grand intérêt en raison de l'évolution du contexte socio-économique actuel, qui exige de réemployer au maximum les matériaux situés dans l'emprise d'une infrastructure, et donc de limiter les emprunts extérieurs, pour atteindre un objectif ambitieux « zéro emprunt, zéro déchet ». L'identification, la caractérisation et la prévision de l'influence de ces composés sont donc des enjeux majeurs.

Le premier chapitre a été tout d'abord consacré à un rappel des principes du traitement des sols en terrassements. Les modes d'action de la chaux et des liants hydrauliques ont été décrits ainsi que les modifications du comportement géotechnique des sols qu'ils engendrent. Dans un second temps, une synthèse bibliographique sur les principaux désordres générés par la présence de certains composés a été proposée. Les données disponibles issues du domaine du traitement des sols sont relativement rares hormis dans le cas des composés soufrés et des matières organiques. Ainsi, pour compléter cette revue, il a été fait appel aux résultats obtenus dans le domaine de la chimie des ciments et bétons. La dernière partie de ce chapitre a été consacrée aux procédures de laboratoire disponibles pour évaluer l'aptitude d'un sol au traitement à la chaux et ou au liant, et à la difficulté à relier résultats de laboratoire et comportement d'un sol une fois mis en place sur un chantier.

Le deuxième chapitre a tout d'abord permis d'exposer la méthode de travail retenue pour la thèse, le point essentiel étant d'utiliser des sols de référence mélangés aux composés chimiques potentiellement perturbateurs, plutôt que des sols contenant naturellement des perturbateurs. Ce choix a été réalisé pour faciliter la mise en évidence de l'influence de chaque composé de manière indépendante. Ensuite, les différentes techniques expérimentales employées ont été décrites.

Le troisième chapitre a été l'occasion de s'interroger sur l'influence des nitrates, phosphates, chlorure et sulfates sur le traitement des sols en prenant en compte un certain nombre de paramètres (concentration, type de liant, conditions de cure). Ces essais ont été

complétés par de nombreuses observations au microscope qui ont permis d'appuyer les conclusions formulées à partir des seules observations macroscopiques. Ces résultats ont permis de démontrer que l'impact d'un élément chimique sur les performances mécaniques d'un sol traité ne dépend pas que de sa concentration dans le sol, même dans le cas des composés soufrés. La performance d'un sol traité dépend aussi des conditions de cure entre le traitement et la réalisation de l'essai mécanique. Le caractère perturbateur d'un élément chimique résulte donc de la combinaison de multiples paramètres. On peut identifier les propriétés intrinsèques au sol (concentration d'un élément, forme chimique, argilosité), les caractéristiques du liant (teneur en clinker, chaux, etc.) mais aussi les facteurs environnementaux (température, humidité). Ces résultats conduisent aussi à s'interroger sur la notion même de seuil de perturbation, seuil à partir duquel un élément peut entraîner un échec du traitement. L'aptitude d'un sol au traitement ne peut donc pas être définie de manière absolue mais au regard de la combinaison de certains de ces paramètres.

Le quatrième chapitre a permis d'avancer dans la compréhension de l'influence couplée de la température et de l'humidité sur la performance mécanique d'un sol contenant un composé soufré traité à la chaux et au liant hydraulique. En effet, les éprouvettes de sol contenant du gypse possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques lorsqu'elles sont conservées à teneur en eau initiale constante. En revanche, lorsqu'elles sont immergées, elles gonflent et les performances mécaniques sont plus faibles que celles du limon sans perturbateur. L'augmentation de température de 20°C à 40°C ne pénalise pas l'aptitude d'un sol contenant un composé soufré, en effet, la résistance est plus forte lorsque les éprouvettes sont conservées à teneur en eau constante ou immergées à 40°C, au contraire des gonflements volumiques qui sont plus faibles. L'augmentation du temps de cure avant immersion va permettre aux éprouvettes de mélange limon + gypse traité à la chaux et au CEM II d'acquérir une résistance et de réduire fortement le gonflement volumique, au contraire pour le mélange limon + pyrite traité, l'augmentation du temps de cure va pénaliser l'aptitude du sol vis-à-vis du traitement. Ces différentes données permettent de conclure sur la nécessité d'associer différentes procédures d'essais pour bien identifier l'aptitude des sols au traitement.

Ces travaux montrent que l'influence d'un élément chimique donné, et donc l'aptitude au traitement d'un sol contenant cet élément, dépend :

- de la nature du sol ;
- de la nature du liant ;
- du dosage en liant ;
- de la nature chimique de l'élément potentiellement perturbateur
- des propriétés physiques de cet élément perturbateur;
- de la concentration en élément perturbateur ;
- de la nature de l'eau en présence ;
- des conditions de cure (température, humidité).

Un élément chimique, ou un composé, ne peut donc être classé comme perturbateur de prise d'une manière systématique. Il est nécessaire de prendre en compte tous les éléments ci-dessus, qui varient en fonction de la nature et l'origine géologique du sol. Pour cette raison, il semble avant tout indispensable de disposer d'outils pertinents pour évaluer l'aptitude au traitement d'un sol au cas par cas. Ce travail a aussi montré que l'utilisation des procédures actuelles d'évaluation de l'aptitude au traitement d'un sol pourrait aboutir à des conclusions contradictoires. Dans ces cas là, il n'est pas possible d'évaluer la prise de risque quant à la réutilisation de ce sol sur un chantier.

Ces observations ne reposent cependant que sur l'analyse de résultats obtenus sur des matériaux « simplifiés » par rapport à un sol naturel qui peut, par exemple, contenir de nombreux composés potentiellement perturbateurs. Les processus complexes qui entrent en jeu lors de l'étude du traitement des sols obligent l'expérimentateur à des choix qui, il le sait, limiteront le champ de son investigation et, donc, de sa compréhension. Les conclusions formulées tout au long de ce mémoire permettent la suggestion de quelques pistes pour la poursuite du travail engagé depuis longtemps au laboratoire.

Plusieurs perspectives apparaissent.

1. Il semble ainsi en premier lieu indispensable de développer une méthodologie d'évaluation de l'aptitude au traitement des sols, qui permettent à la fois de mettre en évidence l'existence d'un risque potentiel d'échec au traitement (par ex. la présence de sulfate), et de cerner les conditions de cure sous lesquelles le composé va avoir un impact négatif

significatif pour empêcher la réutilisation du sol (type de liant, dosage, hygrométrie, etc.).

2. Le développement d'un tel essai est nécessaire pour bien maîtriser le passage du laboratoire au chantier, en termes de conditions hydriques et thermiques.
3. Si l'on connaît la nature des composés chimiques potentiellement perturbateurs présents dans le sol, il serait utile de réaliser des études spécifiques des mécanismes par lesquels chaque élément peut interagir avec un liant donné, en fonction des conditions de cure, etc.
4. Cette étude s'est intéressée essentiellement à la prise, c'est-à-dire au gain de performance. On a notamment montré que la présence de soufre en grande quantité n'était pas forcément préjudiciable sur le gain de performance : on pourrait donc envisager d'utiliser de tels matériaux sur chantier. Cependant, il est indispensable de disposer d'informations quant au comportement à long terme de ces sols sous l'influence de sollicitations environnementales telles que les variations saisonnières d'humidité et de température.

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

Afès M., Didier G., *Stabilisation des sols gonflants : cas d'une argile en provenance de Mila (Algérie)*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 59 : pp. 75-83, 2000.

AFNOR NF EN 197-1 (2001) : Ciment. Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

AFNOR NF EN 12620 (2008) : Granulat pour béton.

AFNOR NF EN 12697-7 (2003) : Mélanges bitumeux. Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Partie 7 : Détermination de la masse volumique apparente des éprouvettes bitumineuses par les rayons gamma.

AFNOR NF EN 13286-41 (2003) : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 41 : Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques.

AFNOR NF EN 13286-42 (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.

AFNOR NF EN 13286-45 (2004) : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 45 : Méthodes d'essai pour la détermination du délai de maniabilité.

AFNOR NF EN 13286-53 (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.

AFNOR NF ISO 10390 (2005) : Qualité du sol : Détermination du pH.

AFNOR NF ISO 11268-1 (1994) : Qualité du sol. Effets des polluants vis-à-vis des vers de terre (*Eisenia fetida*). Partie 1 : Détermination de la toxicité aiguë en utilisant des substrats de sol artificiel.

AFNOR NF ISO 11269-2 (2006) : Qualité du sol : Détermination des effets des polluants sur la flore du sol. Partie 2 : Effet des substances chimiques sur l'émergence et la croissance des végétaux supérieurs.

AFNOR NF P 11-300 (1992) : Exécution des terrassements. Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

AFNOR NF P 15-108 (2000) : Liants hydrauliques : Liants hydrauliques routiers. Composition, spécifications et critères de conformité.

- AFNOR NF P 18-011** (1992) : Bétons : Classification des environnements agressifs.
- AFNOR NF P 94-057** (1992) : Sols : Reconnaissance et essais. Analyse granulométrique des sols. Méthode par sédimentation.
- AFNOR NF P 94-064** (1993) : Sols : Reconnaissance et essais. Masse volumique sèche d'un élément de roche. Méthode par pesée hydrostatique.
- AFNOR NF P 94-068** (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 tache.
- AFNOR NF P 94-077** (1997) : Sols : Reconnaissance et essais. Essai de compression uniaxiale.
- AFNOR NF P 94-078** (1997) : Sols : Reconnaissance et essais. Indice CBR après immersion- Indice CBR immédiat- Indice Portant Immédiat.
- AFNOR NF P 94-093** (1999) : Sols : Reconnaissance et essais. Détermination des références de compactage d'un matériau.
- AFNOR NF P 94-100** (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.
- AFNOR NF P 98-101** (1991) : Assises de chaussées. Chaux aérienne calcique pour sols et routes. Spécifications.
- AFNOR NF P 98-102** (1991) : Assises de chaussées. Chaux aérienne calcique pour sols et routes. Essai de réactivité de la chaux vive à l'eau.
- AFNOR NF P 98-232-3** (2001) : Essais relatifs aux chaussées. Détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques. Partie 3 : Essai de compression diamétrale sur les matériaux traités aux liants hydrauliques et pouzzolaniques.
- AFNOR XP P94-512-12** (2005) : Reconnaissance et essais géotechniques. Essais de laboratoire sur les sols. Partie 12 : Détermination des limites d'Atterberg.
- AFNOR XP P 94-047** (1998) : Sols : Reconnaissance et essais. Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un matériau. Méthode par calcination.
- ASTM Designation D 1633-00** (2000) : Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders.
- ASTM Designation D 2844-01** (2001) : Standard Test Method for Resistance R-Value and Expansion Pressure of Compacted Soils.
- Bahar R., Benazzoug M., Kenai S.**, *Performance of compacted cement-stabilised soil*, Cement & Concrete Composites 26, pp. 811-820, 2004.
- Baron J., Ollivier J.-P.**, *Les bétons, bases et données pour leur formulation. Construction béton*, édition Eyrolles, 1996.
- Baryla J.-M., Chenais V., Gavois L., Havard H.**, *Effet de sulfates et sulfures sur des marnes traitées à la chaux et au liant routier sur un chantier autoroutier*, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 224, Réf 4301, pp. 39-48, 2000.

- Bell F.G.**, *Lime stabilization of clay minerals and soils*, Engineering Geology, 42, pp. 223-237, 1996.
- Ben Amor K., Termini M., Camps J.P., Laquerbe M.**, *Stabilisation à froid de matériaux montmorillonitiques par du ciment Portland*, Matériaux et Constructions, Vol 30, pp. 355-361, 1997.
- Bénard P.**, *Etude de l'action des phosphates présents dans l'eau de gâchage sur l'hydratation d'un ciment Portland*, Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 2005.
- Bénard P., Garrault S., Nonat A., Cau-dit-Coumes C.**, *Influence of orthophosphate ions on the dissolution of tricalcium silicate*, Cement and Concrete Research, 38, pp. 1137-1141, 2008.
- Bird J.**, *Aptitude des sols au traitement*, Rapport de stage de Master 2 de l'Institut National Polytechnique de Lorraine et l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie et le Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages, 2007.
- Blot G.**, *Influence des engrais sur le comportement des suspensions argileuses*, Bulletin de Liaison Laboratoire des Ponts et Chaussées, 184, Réf 3698, pp. 27-38, 1993.
- Bollens Q., Verbrugge J.C.**, *Time dependant evolution of the shear strength of a silty soil treated with lime*, International Symposium on the Treatment and Recycling Materials for Transport Infrastructures (TREMTI), communication C008, 2005.
- Cabane N.**, *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, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, Université Jean Monnet, 2004.
- Cabane N., Nectoux D., Gaudon P. et Fouletier M.**, *Les sols micacés sont-ils inaptes à la stabilisation ?*, International Symposium on the Treatment and Recycling Materials for Transport Infrastructures (TREMTI), 2005.
- Caillère S., Hénin S.**, *Minéralogie des argiles*, édition Masson & Cie, 1963.
- Carde C., François R.**, *Modelling the loss of strength and porosity increase due to the leaching of cement pastes*, Cement and Concrete Composites, 21, pp. 181-188, 1999.
- Caut Dit Coumes C., Courtois S.**, *Cementation of a low-level radioactive waste of complex chemistry. Investigation of the combined action of borate, chloride, sulfate and phosphate on cement hydration using response surface methodology*, Cement and Concrete Research, 33, pp. 305-316, 2003.
- Chen H., Wang Q.**, *The behaviour of organic matter in the process of soft soil stabilization using cement*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 65 , pp. 445-448, 2006.
- Chopier C.**, *Aptitude des sols au traitement, cas des micaschistes sériciteux*, Master II, Institut National Polytechnique de Lorraine, Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers, 2007.
- Croft J.B., B.E.**, *The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization*, Géotechnique, 17 , pp. 119-135, 1967.

- Cui Y.J.**, *Etude du comportement d'un limon compacté non saturé et de sa modélisation dans un cadre élastoplastique*, Thèse de Doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées 1993.
- Cuisinier O., Le Borgne T.**, *Relationship between microstructure and hydraulic conductivity in compacted lime-treated soils*, Proceeding in the Transportation Geotechnics Conference, Nottingham, pp. 643-649, 2008.
- Czereweko M.A., Cripps J.C., Duffell, Reid J.M.**, *The distribution and evaluation of sulfur species in geological materials and manmade fills*, Cement & Concrete Composites, 25, pp. 1025-1034, 2003.
- Damidot D., Glaser F.P.**, *Thermodynamic investigation of the CaO-Al₂O₃-CaSO₄-K₂O-H₂O system at 25°C*, Cement and concrete research, 23, pp 1195-1204, 1993.
- Degirmenci N., Okucu A., Turabi A.**, *Application of phosphogypsum in soil stabilization*, Building and Environment, pp. 1-6, 2006.
- Divet L.**, *Les réactions sulfatiques internes au béton – Contribution à l'étude des mécanismes de la déformation différée de l'ettringite*, Thèse de Doctorat CNAM, 2001.
- Duchaufour P.**, *Abrégé de pédologie, sol végétation, environnement*, Masson (Paris), édition 2004.
- Dunlap W.A., Epps J.A., Biswas B.R., Gallaway B.M.**, *United States Air Force Soil Stabilization Index System : A validation*, 1975, cité par Rajasekaran G. (1995).
- Dron R., Brivot F.**, *Le gonflement ettringitique*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°161, pp. 25-32, 1989.
- Elabbadi H.**, *Mécanisme de durcissement des briques en terre stabilisées à la chaux. Conditions de cure et choix des terres*, Thèse de doctorat, ENSM Paris et Université Paris VI, 1986.
- Falamaki A., Shariatmadari N., Noorzad A.**, *Strength Properties of Hexametaphosphate Treated Soils*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp. 1215-1218, 2008.
- Fontaine D.**, *Traitement des arènes granitiques aux liants hydrauliques*, Thèse de Doctorat ENSMP et Paris VI, 1984.
- Ghosh A., Subbarao C.**, *Strength Characteristics of Class F Fly Ash Modified with Lime and Gypsum*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Vol. 133, N°7, pp. 757-766, 2007.
- Guichard C.**, *Eléments perturbateurs de la prise dans les sols traités aux liants hydrauliques : Définition, détection, seuils et remèdes*, Mémoire de projet de fin d'études, Institut National des Sciences et des Arts, INSA, Strasbourg, 2006.
- Hachichi A., Fleureau J-M.**, *Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie*, Revue Française Géotechnique N°86, pp. 37-51, 1999.

- Harris P. J., Sebesta S., Tom S.,** *Hydrated Lime Stabilization of Sulfate-Bearing Vertisols in Texas*, Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, N°1868, TRB, National Research Council, pp. 31-39, 2004.
- Hlavackova P.,** *Evaluation du comportement du cuivre et du zinc dans une matrice de type sol à l'aide de différentes méthodologies*, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2005
- Hunter Dal,** *Lime-Induced Heave in Sulfate-Bearing Clay Soils*, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 114, N°2, pp. 150-167, 1988.
- Ingles O.G., Metcalf J.B.,** *Soil stabilization : principles and practice*. Butterworths, Sidney, 1970.
- Jauberthie R., Rendell F.,** *Physicochemical study of the alteration surface of concrete exposed to ammonium salts*, Cement and Concrete Research, 33, pp. 85-91, 2003.
- Kujala K.** *Stabilization of Harmful wastes and muds*, Proceedings of the 1st International Symposium Environmental Technology, 540-548, 1986.
- Kuno G., Kutara K., Miki H.,** *Chemical stabilization of soft soils containing humic acid*, Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 1381-1384, 1989.
- Lamathe J., Brouwet J.,** *Action des acides humiques sur la prise d'une grave-laitier, leur dosage dans un sable*, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 91, Réf 2068, pp. 43-48, 1977.
- LCPC-SETRA,** "Réalisation des remblais et des couches de forme", Fascicule I, Guide technique, 93 p 1992.
- LCPC-SETRA,** "Réalisation des remblais et des couches de forme", Fascicule II, Guide technique, 102 p, 1992.
- LCPC – SETRA.** *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des remblais et des couches de forme*. Guide technique. 240 p., 2000.
- Lea F.M.,** *The action of ammonium salts on concrete*, Magazine of concrete research, vol. 17, n°52, pp 115-116, 1965.
- Le Borgne T.,** *Relation entre l'état initial et la perméabilité des sols fins traités à la chaux*. Rapport de stage Master 2 de l'Université de Clermont-Ferrand, 2006.
- Le Roux A., Rivière A.,** *Traitements des sols argileux par la chaux*, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 40, Sept-Oct, Réf. 653, 1969.
- Le Roux A., Toubreau P., Auxire N.,** *Mise en évidence de l'aptitude au traitement des sols argileux*, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 154, Réf 3279, pp. 11-16, 1988.
- Le Runigo B.,** *Durabilité d'un limon traité à la chaux et soumis à différentes sollicitations hydrauliques : comportements physico-chimique, microstructural, hydraulique et mécanique*, Mémoire de Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, 2008.

- Locat J., Bérubé M-A., Choquette M.,** *Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays : shear strength development*, Canadian Geotechnical Journal, J.27, pp. 294-304, 1990.
- Mather C.,** *Sulfate soundness, sulfate attack and expansive cement in concrete*. US Army Engineer Waterways Experiment Station Vickberg, Misc paper C-69-8, 1969.
- Mbessa M., Péra J.,** *Durability of high-strength concrete in ammonium sulfate solution*, Cement and Concrete Research, 31, pp. 1227-1231, 2001.
- McCallister L.D.,** *The effects of leaching on lime-treated expansive clays*, PhD de l'Université du Texas, Alington, 1990.
- McCallister L.D., Tidwell L.,** *Double lime treatment to minimize sulphate-lime induced heave in expansive clays*, 1997, cité par Rajasekaran G. (1995).
- Measson M.,** *Compte rendu de la réunion du 27/04/07*, Communication personnelle, 2007.
- Mehta P.K.,** *Mechanism of expansion associated with ettringite formation*. Cement and Concrete Research n°3, pp. 1-6, 1973.
- Mitchell J. K.,** *Practical problems from surprising soil behavior*, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 112, N°3, pp. 259-289, 1986.
- Mitchell J.K., Dermatas D.,** *Clay soil heave caused by lime sulfate reactions*, ASTM Special Technical Publication 1135, pp. 41-64, 1992.
- Mohan D., Rai M.,** *Deterioration of concrete in fertilizer factories*, ASTM special technical publication, pp 388-396, 1978.
- Molard J.P., Camps J.P., Laquerbe M.,** *Etude de l'extrusion et de la stabilisation par le ciment d'argiles monominérales*, Matériaux et Constructions, 20, 44-50, 1987.
- Neville A.M.,** *Propriétés des bétons*, CRIB Centre de Recherche Interuniversitaire sur le béton, Sherbrooke-Laval, éditions Eyrolles, 2000.
- Odler I., Colan-Subauste J.,** *Investigations on cement expansion associated with ettringite formation*, Cement and Concrete Research 29, 731-735, 1999.
- Osula D.O.A.,** *A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite*, Engineering Geology 42, 71-81, 1996.
- Ouyang C., Nami A., Chang W.,** *Sulfate attack resistance of Portland cement mixtures containing phosphogypsum*, ACI special publication, sp-100, Vol 2, pp. 2007-20026, 1987.
- Peltier R.,** *La stabilisation des sols*, Revue Générale des Routes et Aérodrômes N°304, 37-60, 1957.
- Perrin L.,** *Expansion of lime-treated clays containing sulphates*, Proceedings of the Seventh International Conference on Expansive Soils, ASCE Expansive Soils Research Council, New-York, 1, pp. 409-414, 1992.
- Petry T.M.,** *Studies of factors causing and influencing localized heave of lime treated clay soils*, Contract Report US Army Engineers, Waterways Experiment Station, Wicksburg, 1994
- Philipponnat G., Hubert B.,** *Fondations et ouvrages en terre*, Edition Eyrolles 2005.

- Pomerol C. et Renard M.**, *Eléments de Géologie*, Edition Armand Colin, 1995.
- Puppala A. J., Griffin J. A., Hoyos L. R., Chmotid S.**, *Studies on Sulfate-Resistant Cement Stabilization Methods to Address Sulfate-Induces Soil Heave*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 391-402, 2004.
- Raja A.** *Influence of sulphates on consolidation and swelling behaviour of lime treated calcium bentonite*, 1990, cité par Rajasekaran G. (1995).
- Rajasekaran G.**, *Physico-chemical behaviour of lime treated marine clay*, PhD Thesis, Indian Institute of Technology, Madras, (1994).
- Rajasekaran G.**, *Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays*, Ocean Engineering vol. 32, 1133-1159, 2005.
- Rajasekaran G., Murali K., Srinivasaraghavan R.**, *Effect of chlorides and sulphates on lime treated marine clays*, Soils and Foundations, Vol. 37, N° 2, 105-115, 1997.
- Rajasekaran G. and Rao S.**, *Permeability and characteristics of lime treated marine clay*, Ocean Engineering, vol. 29, pp. 113-127, 2002.
- Rao S. and Thyagaraj T.**, *Lime slurry stabilization of an expansive soil*, Geotechnical Engineering, Institution of civil Engineers, London, 133-146, 2003.
- Ribera D., Saint-Denis M.**, *Le ver Eisenia Fetida : Intérêts et perspectives en écotoxicologie terrestre*, Bulletin de la société Zoologique de France, Vol. 124, pp. 411-420, 1999.
- Rogers C.D.F., Gledinning S.**, *Modification of clays soils using lime*, Lime Stabilization Telford Ed., Londres, pp. 99-112, 1996.
- Rollings R. S., Burkes J. P., Rollings M. P.**, *Sulfate Attack on Cement-Stabilized Sand*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 125, N°5, 364-372, 1999.
- Santoni R. L., Tingle J. S., Webster S. L.**, *Stabilization of Silty-Sand with Nontraditional Additives*, Transport Research Board 2001 Annual Meeting
- Sariosseiri F., Muhunthan B.**, *Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils*, Engineering Geology, 104, 119-125, 2009.
- Schaeffner M., Philippe A.**, *Abaissement de la teneur en eau d'un sol par addition de chaux vive*, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 49 Nov-Déc, 1970.
- Sherwood P.T.**, *Effect of sulphate on cement and sulphate treated soil*, Highways Research Board Bulletin, 353, pp. 98-107, 1962.
- Shi C., Day R. L.**, *Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators. Part II. Reaction products and mechanism*, Cement and Concrete Research 30, 607-613, 2000.
- Singh G., Das B.M.**, *Soil Stabilization with Sodium Chloride*, Transportation Research Record, 1673, paper n° 99-0079, pp. 46-55, 1999.
- Sridharan A., Nagaraj T.S., Sivapullaiah**, *Heaving of soil due to acid contamination*, Proceeding of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 383-386, 1981.

Sridharan A., Sivapullaiah P.V., Ramesh H.N., *Consolidation behaviour of lime treated sulphatic soils*, Proceeding of the International of Symposium Compression Consolidation Clayey Soils, Hiroshima, Japan, pp. 183-188, 1995.

Taylor, *Cement Chemistry*, 2e edition, Thomas Telfort, 1997.

Termini M., Ben Amor K., Camps J.P., *Making building products by extrusion and cement stabilization : limits of process with montmorillonite clay*, Applied Clay Science 13, 245-253, 1998.

Thomas M.D.A., Kettle R.J., Morton J.A., *Expansion of Cement-Stabilized Minestone due to the Oxidation of Pyrite*, Transportation Research Record 1219, 113-120, 1989.

Torrenti J-M., Didry O., Ollivier J-P., Plas F., *la dégradation des bétons*, HERMES, 214 p, 1999.

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

Vénuat M., *Le traitement des sols à la chaux et au ciment*, auteur-éditeur : CERILH, 1980.

Wang L., Roy A., Seals R. K., Metcalf J., B., *Stabilization of Sulfate-Containing Soil by Cementitious Mixtures Mechanical Properties*, Transportation Research Record, 1837, Paper N° 03-3724, 12-19, 2003.

Wang L., Roy A., Seals R. K., Byerly Z., *Suppression of Sulfate Attack on a Stabilized Soil*, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 88, N°6, 1600-1606, 2005.

Wild S., Kinuthia J.M., Jones G.I., Higgins D.D., *Effects of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime-stabilized sulphate-bearing clay soils*, Engineering Geology, Vol. 51, 37-53, 1998.

Wild S., Kinuthia J.M., Jones G.I., Higgins D.D., *Suppression of swelling associated with ettringite formation in lime stabilized sulphate bearing clay soils by partial substitution of lime with ground granulated blastfurnace slag*, Engineering Geology, Vol. 51, 257-277, 1999.

AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR

Monsieur Jean-Claude VERBRUGGE, Professeur, Université Libre de Bruxelles, Belgique

Monsieur Jean-Pierre MAGNAN, Professeur, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur LE BORGNE Tangi

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

**« Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du
traitement des sols »**

NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 54501
VANCEUVRE CEDEX

en vue de l'obtention du titre de :

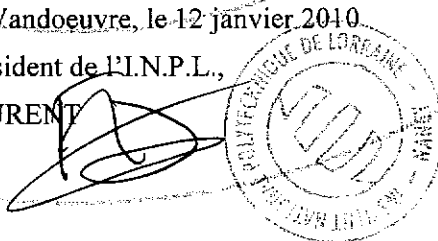
DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : « Mécanique – Génie Civil »

Fait à Vandoeuvre, le 12 janvier 2010.

Le Président de l'I.N.P.L.,

F. LAURENT



Résumé

Pour améliorer les sols possédant des caractéristiques mécaniques faibles, il est possible d'utiliser un traitement à la chaux et/ou au liant hydraulique. Dans certains cas, ce type de traitement est inefficace en raison de la présence dans le sol de perturbateurs. Cependant, sauf dans le cas des composés soufrés, il existe très peu de données sur la perturbation due à d'autres composés chimiques, comme par exemple les fertilisants utilisés en agriculture. Dans ce contexte, une étude a été entreprise pour identifier clairement l'influence de composés chimiques réellement perturbateurs de la prise (performance à court terme), à la fois géotechniquement et physico-chimiquement.

Au lieu de travailler directement sur un sol naturel qui peut contenir plusieurs perturbateurs pouvant se combiner, une approche originale a été proposée : introduire un composé chimique dans un sol pour lequel le traitement à la chaux et/ou aux liants hydrauliques a été reconnu efficace. Ces éléments chimiques ont été ajoutés au sol à différentes concentrations, puis les variations de paramètres géotechniques et physico-chimiques ont été mesurées pour les sols perturbés ou non. Nous avons ainsi étudié les effets de quatre composés chimiques : le sulfate, le chlorure, le phosphate, et le nitrate, sur deux sols différents, un limon et un sable, traités par deux liants hydrauliques différents. Le gonflement volumique, la résistance à la compression simple, et à la traction indirecte ont été mesurés pour évaluer les effets de chacun des composés considérés sur les propriétés mécaniques des sols traités. Ces mesures seront complétées par des observations microtexturales (MEB), minéralogiques (DRX) et chimiques.

Il apparaît que les fertilisants (phosphates et nitrates) peuvent altérer les effets du traitement, mais le sol contenant un de ces fertilisants reste apte au traitement et peut donc être utilisé pour des travaux de terrassement. De plus, aucun essai n'a permis de mettre en évidence une influence du chlorure sur le traitement du limon. La température de conservation, les conditions d'immersion et le temps de conservation avant immersion influence les résultats et le résultat final déterminant si un sol contenant un composé soufré est apte vis-à-vis d'un traitement. Pour conclure, l'étude permet de mettre en évidence les difficultés, dans un cas général, de déterminer si un élément est perturbateur ou non du traitement des sols, sans considérer un système intégrant la nature du sol, la nature des liants, l'élément chimique et sa concentration, et enfin les conditions d'essai.

Mots clefs : Sols, traitement à la chaux et/ou au liant hydraulique, chlorure, phosphate, nitrate, composé soufré, conditions de cure.

Abstract

To improve soils with poor mechanical properties, it is possible to use a treatment with lime and/or hydraulic binder. But, in some cases, this type of treatment can be totally ineffective. For example, deleterious chemical compounds in the ground can alter the hardening reactions of the binder. However, except in the case of sulphate, there are few studies dealing with the potential influence of other chemical compounds like, for example, agricultural fertilizers. In this context, the aim of this paper is to characterise the effects of chloride, phosphate, nitrate, and sulphate on soil treatment.

An original procedure was used in that study. Instead of using natural soil containing deleterious compounds, a suitable soil for stabilisation was mixed with one deleterious compound at a given concentration, similar to its concentration in a soil. The geotechnical and physicochemical parameters were determined, both for the disturbed and the undisturbed soils, allowing the quantification of the influence of each compound taken separately. The action of each supposed deleterious compound was evaluated by determining the swelling, the diametral compression strength, and the unconfined compression strength. These experiments were supplemented by microstructural, mineralogical, and chemical observations. Such evaluation was performed with two soils, a silt and a sand, and two different hydraulic binders.

The results showed that fertilizers (phosphate and nitrate) tend to lower the mechanical characteristics of the silt, but, the soils containing the fertilizers are still suitable for soil stabilisation, and are also usable for earthworks. The study does not evidenced any impact of chloride on the mechanical behaviour of the tested soils. Temperature, humidity condition, and cure time affect the results and the final result to determine the suitability of the sulphate soil for a treatment. The presence of a given chemical compound at a given concentration in the soil is not sufficient enough to determine the suitability of the soil for a treatment.

Key words: soils, lime and/or cement stabilisation, chloride, phosphate, nitrate, and sulphate, condition of cure.