



LE TRAITEMENT DES SOLS A LA CHAUX POUR LA CONSTRUCTION D'OUVRAGES HYDRAULIQUES DE FAIBLE HAUTEUR ÉTAT DE L'ART ET DE LA PRATIQUE

LIVRET 2
DOCUMENT D'INFORMATION
À USAGE DES MAÎTRES D'OUVRAGE
DES MAÎTRES D'ŒUVRE
DES BUREAUX D'ÉTUDES
DES ENTREPRISES
ET DES BUREAUX DE CONTRÔLE



Membres du consortium DigueELITE



Ce document s'adresse principalement aux maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre, aux bureaux d'études, aux entreprises et aux bureaux de contrôle pour l'étude, la construction, le contrôle de l'exécution des travaux et le suivi de digues, de petits barrages et de canaux hydrauliques en sol traité à la chaux dont la hauteur n'excède pas une quinzaine de mètres.

Photo de couverture : traitement sur plate-forme dédiée d'un sol A1 à 2 % de chaux destiné à la construction d'une carapace sur un ouvrage existant – chantier expérimental de Vlassenbroek (B) - octobre 2019 - photo Lhoist

LE TRAITEMENT DES SOLS A LA CHAUX POUR LA CONSTRUCTION D'OUVRAGES HYDRAULIQUES DE FAIBLE HAUTEUR ÉTAT DE L'ART ET DE LA PRATIQUE

LIVRET 2



Membres du consortium DigueELITE



Sommaire

Avant-propos

Introduction générale

Résumé

A. DONNEES GENERALES	21
1. Pourquoi traiter un sol à la chaux ?	21
1.1 L'expérience des terrassements	21
1.2 La chaux	21
1.2.1 Action de la chaux sur les sols limono-argileux	22
1.2.2 Les actions à court terme de la chaux sur les sols	22
1.2.3 Les actions à moyen et long termes de la chaux sur les sols	25
1.3 Les avantages du traitement des sols à la chaux	26
1.4 Le champ d'application du traitement des sols à la chaux	26
1.4.1 Les perturbateurs de prise	26
1.4.2 Les argiles plastiques très cohérentes	27
1.4.3 Les blocs	27
2. L'application du traitement des sols à la chaux aux ouvrages hydrauliques	28
2.1 Des références anciennes	28
2.2 Classification des fonctions d'usage du composant sol-chaux	29
2.3 Les sols utilisables après traitement à la chaux	31
B. PROPRIETES DES SOLS TRAITES A LA CHAUX	33
3. Propriétés mécaniques et hydrauliques des sols fins traités à la chaux	33
4. Compléments relatifs à certaines propriétés hydrauliques	41
4.1 Rétention d'eau	41
4.2 Perméabilité	42
4.3 Résistance à l'érosion interne	44
4.4 Résistance à l'érosion de surface	46
5. La résistance à l'érosion de surface par surverse d'un sol traité à la chaux	47
5.1 Principe de l'essai pour déterminer la résistance à l'érosion de surface par surverse	47
5.2 Synthèse des résultats des essais de surverse réalisés sur le démonstrateur du Vidourle et des plots expérimentaux de Salin de Giraud	49
5.3 Conclusions sur l'évaluation de la résistance à l'érosion de surface par surverse d'un sol traité à la chaux	50
6. Autres propriétés des sols fins traités à la chaux	52
6.1 Influence des paramètres de mise en œuvre et de cure sur les effets du traitement	52
6.2 Résistances mécaniques des sols traités à la chaux	53
6.3 Maîtrise de l'aléa fissuration des sols fins traités et non traités	53
6.3.1 Fissuration de retrait	53
6.3.2 Risque lié aux mouvements en fondation d'ouvrage	56
6.4 Résistance au gel	57
6.5 Pressions interstitielles	57
6.6 Migration des ions Ca ²⁺ dans le milieu et valeur du pH vis-à-vis de l'environnement	58
6.7 Portance des sols traités à la chaux pour le dimensionnement des assises	59

C. CONCEPTION ET ETUDES	61
7. Caractérisation des gisements et études de laboratoire	61
7.1 Introduction	61
7.2 Les études préalables	61
7.2.1 Principe général	61
7.2.2 Études préliminaires	61
7.2.3 Avant-projet	61
7.2.4 Projet	62
7.2.5 Assistance à la passation des contrats de travaux	63
7.3 Caractérisation des gisements	63
7.3.1 Principe général	63
7.3.2 Études préliminaires	63
7.3.3 Avant-projet et projet	63
7.4 Etudes de traitement	67
7.4.1 Études relatives à la fonction maniabilité (M)	67
7.4.2 Études relatives aux fonctions stabilité (S), étanchéité (P), protection contre l'érosion interne (EI)	68
7.4.3 Études relatives à la fonction protection de surface (ES)	70
7.4.4 Études relatives à la fonction évacuation (EV)	70
7.5 Chantiers expérimentaux	71
7.6 Chantier expérimental, planche d'essai, épreuve de convenance	73
8. Éléments utiles à la conception des ouvrages	74
8.1 Éléments utiles à la conception relatifs à la fonction maniabilité (M)	74
8.2 Éléments utiles à la conception relatifs à la fonction stabilité (S)	74
8.3 Éléments utiles à la conception relatifs à la fonction étanchéité (P)	74
8.3.1 Cas des ouvrages à charge permanente	74
8.3.2 Cas des ouvrages à charge non permanente	74
8.4 Éléments utiles à la conception relatifs à la fonction protection contre l'érosion interne (EI)	75
8.5 Éléments utiles à la conception relatifs à la fonction protection de surface (ES)	75
8.6 Éléments utiles à la conception relatifs à la fonction évacuation (EV)	76
D. EXECUTION DES TRAVAUX	77
9. Introduction	77
10. Dossier de consultation des entreprises (travaux)	77
11. Planche d'essais	77
12. Épreuve de convenance	79
13. Exécution des travaux	79
13.1 Vérification des matériels	79
13.2 Construction de l'ouvrage	80
13.2.1 Extraction des sols	80
13.2.2 Constitution d'un dépôt provisoire de sol naturel	80
13.2.3 Identification de l'état hydrique du sol naturel	81
13.2.4 Traitement de la fondation de l'ouvrage	81
13.2.5 Homogénéisation du sol avant traitement	82
13.2.6 Humidification du sol avant traitement	83
13.2.7 Traitement de sol en place (arrosage, épandage, malaxage)	84
13.2.8 Traitement de sol en centrale	88
13.2.9 Finesse de mouture	89
13.2.10 Mise en œuvre des sols traités à la chaux	91
13.2.11 Compactage des couches de remblai	93
13.2.12 Accrochage des couches	95

13.2.13 Zones d'accès difficile	97
13.2.14 Traficabilité des engins de chantier	98
13.2.15 Conditions météorologiques	98
13.2.16 Protections relatives à l'environnement	98
13.3 Instrumentation de l'ouvrage	99
13.4 Travaux de finition	100
E. CONTROLE DES TRAVAUX	101
14. Introduction	101
15. Contrôle de la mise en œuvre	101
15.1 Teneur en eau	102
15.2 Caractéristiques de la chaux	102
15.3 Traitement en place	103
15.4 Traitement en centrale	105
15.5 Mouture du sol traité à la chaux	105
16. Contrôle du compactage	106
16.1 Réception des compacteurs	106
16.2 Contrôle en continu	106
16.3 Contrôle ponctuel	107
17. Levé topographique final	109
18. Documents de suivi de l'exécution	110
F. SUIVI DES OUVRAGES	111
19. Méthodes de suivi	111
19.1 Inspection visuelle	111
19.2 Instrumentation	111
19.3 Auscultation et suivi par prélèvements et essais	111
20. Application à l'ouvrage expérimental du Vidourle	111

Annexe 1 Liste des ouvrages hydrauliques réalisés en France et à l'étranger ayant fait usage
du traitement de sol à la chaux aérienne calcique

Annexe 2 Suivi du démonstrateur DigueELITE

Annexe 3 Essais de laboratoire : normes, modes opératoires et publications

Annexe 4 Mode opératoire pour la préparation d'éprouvettes en matériau traité

Liste des abréviations

ADP	Aéroports de Paris
CBR	essai CBR (Californian Bearing Ratio)
CBR_i	essai CBR (Californian Bearing Ratio) après immersion
CCTP	Cahier des Clauses Techniques Particulières
Cerema	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CFTR	Comité français pour les techniques routières
CIGB	Commission Internationale des Grands Barrages
CIRIA	Construction and Industry Research and Information Association
DCE	Dossier de consultation des entreprises
EDF	Électricité De France
EFA	Erosion Function Apparatus
EPTB Vidourle	Établissement Public Territorial de Bassin du Vidourle
GTR	Guide Technique Sétra/LCPC « Réalisation des remblais et des couches de forme » (fascicules 1 et 2)
GTS	Guide technique Sétra/LCPC « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme »
HET	Hole Erosion Test (Essai d'érosion de conduit)
HPE	Hauteur des Plus hautes Eaux
IDRRIM	Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité
INRAE	Institut national de la recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
IPI	essai Indice Portant Immédiat
JET	Jet Erosion Test (essai d'érosion de surface)
JNGG	Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées
LFP	Lime Fixation Point (Point de fixation de la chaux)
LGV	ligne à grande vitesse
Loi MOP	loi relative à la Maîtrise d'Ouvrage Publique (loi n° 85-704 du 12 décembre 1985)
Mission G2	mission d'étude géotechnique de conception
Mission G3	mission d'étude géotechnique d'exécution
MoJET	Mobile Jets Erosion Test (essai d'érosion de surface)
OPN	Optimum Proctor Normal
PNEC	Predicted No Effect Concentration
PST	Partie supérieure des terrassements
REACH	Registration, Evaluation and Authorization of Chemicals
TerDOUEST	Terrassements Durables des Ouvrages En Sols Traités (Programme de recherche ANR achevé en 2012)
Sétra	Service d'études techniques des routes et autoroutes
SOTREDI	SOil TREATment for DIkes (projet de recherche interne Lhoist)
SMDE	Système de Mesure De l'Érosion (société ARCOR Technologies)
SYMADREM	Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Digue du Delta du Rhône et de la Mer
ZEC	Zone d'Expansion des Crues

Liste des symboles

c'	(kPa)	cohésion effective
C_c		coefficient de compressibilité
C_s		coefficient de gonflement
C_v	(m ² /s)	coefficient de consolidation
CSLI	(inch)	Clopper Soil Loss Index
D	(%)	dosage massique en chaux
E	(MPa)	module d'Young
E_c	(MPa)	module d'élasticité en compression
E_{it}	(MPa)	module d'élasticité en compression diamétrale (traction indirecte ou essai brésilien)
E_{v2}	(MPa)	module de chargement à la plaque E_{v2}
G_{max}	(MPa)	module de cisaillement maximal
CBR	(%)	indice CBR
CBR_i	(%)	indice CBR après immersion
$I_{e,HET}$		indice d'érosion de Fell (essai HET)
IPI		indice portant immédiat
I_p	(%)	indice de plasticité
k	(m/s)	perméabilité saturée
$k_{d,HET} / k_{d,JET}$	(cm ³ /(N.s))	coefficient d'érosion de Hanson (essais HET et JET)
R_c	(MPa)	résistance à la compression simple
R_{it}	(MPa)	résistance à la compression diamétrale (traction indirecte)
s	(kPa)	suction
Sr	(%)	degré de saturation
V_{BS}	(g/100g)	valeur au bleu de méthylène
w	(%)	teneur en eau
W_L	(%)	limite de liquidité
W_n	(%)	teneur en eau du sol naturel
W_{OPN}	(%)	teneur en eau optimale Proctor Normal
W_p	(%)	limite de plasticité
W_s	(%)	limite de retrait
ν		coefficent de Poisson
ρ_{dfc}	(Mg/m ³)	masse volumique sèche en fond de couche
ρ_{dm}	(Mg/m ³)	masse volumique sèche moyenne
$\rho_{dmaxOPN}$	(Mg/m ³)	masse volumique sèche maximale à la teneur en eau optimale Proctor Normal
σ_c	(kPa)	pseudo contrainte de consolidation
$\tau_{c,HET}$	(Pa)	contrainte critique d'érosion de conduit (essai HET)
$\tau_{c,JET}$	(Pa)	contrainte critique d'érosion de surface (essai JET)
φ'	(°)	angle de frottement interne effectif

Avant-propos

Le traitement des sols à la chaux est une technique éprouvée qui s'est particulièrement développée pendant ces soixante dernières années. Ainsi, un savoir-faire s'est construit, en France particulièrement, qui a largement profité aux projets d'infrastructures et d'aménagement, des plus grands aux plus petits. Cependant, les exemples d'applications dans le domaine des ouvrages hydrauliques sont peu nombreux et plutôt méconnus. Cela s'explique en partie par la prudence des acteurs de ce domaine face aux enjeux qui sont les leurs, mais aussi par leur manque de connaissances des apports de cette technique et des progrès réalisés.

Un important travail d'études, d'investigations et de réalisations en vraie grandeur, entrepris depuis plus d'une quinzaine d'années, a permis de mettre en évidence tout le profit que le domaine des ouvrages hydrauliques pouvait tirer du traitement de sol à la chaux. L'acquisition de ces bases scientifiques permet aujourd'hui d'ouvrir la voie au déploiement de cette technique dans le domaine concerné.

En 2013, le programme de recherche DigueELITE, piloté par ISL Ingénierie et regroupant INRAE, EDF, Lhoist France et Arcor Technologies, a reçu le soutien du FUI (Fond Unique Interministériel) pour réaliser un important programme de recherche sur ce sujet dans le domaine des ouvrages hydrauliques en terre, et en particulier des digues de protection contre les inondations. Les actions de recherche ont été réparties selon 4 thèmes principaux (Work Packages) :

- WP1 : matériau,
- WP2 : conception et dimensionnement,
- WP3 : réalisation et suivi,
- WP4 : essai de surverse.

Ces actions ont conduit, en 2015, à la réalisation sur le Vidourle, dans le sud de la France, d'un démonstrateur qui a été soumis à des essais de surverse en avril 2016 et en juin 2017. Des observations et des conclusions importantes en ont été tirées quant au comportement des matériaux sol-chaux et à la conception d'ouvrages résistants et durables.

En complément de ce projet, dans le cadre du programme de sécurisation des digues fluviales du Grand Delta du Rhône, le SYMADREM maître d'ouvrage de l'opération de renforcement des digues du Grand Rhône de Salin de Giraud et de Port Saint Louis, a réalisé en 2017 la construction de plots expérimentaux en sol-chaux afin d'étudier leur résistance à l'érosion de surface en procédant aux mêmes essais de surverse.

Ces deux réalisations majeures viennent compléter les connaissances capitalisées depuis 2005 par la communauté scientifique publique et privée grâce aux travaux de recherche académique et expérimentale menés sur ce sujet. Les publications produites dans le cadre de ces études sont nombreuses et une liste bibliographique est consultable à la fin du document.

En novembre 2015, afin d'informer les donneurs d'ordre et concepteurs d'ouvrages hydrauliques sur la technique du traitement à la chaux, DigueELITE a publié un document d'information général sur le sujet intitulé « *Utilisation des sols traités à la chaux dans les ouvrages hydrauliques – Document d'information* » [1].

À l'issue du programme DigueELITE, le consortium a décidé de publier un document synthétique plus complet, dans le but principal de mettre à disposition des acteurs de la communauté des ouvrages hydrauliques les principaux enseignements du programme de recherche DigueELITE et des autres travaux. Cette publication donne les éléments utiles et indispensables à connaître pour réaliser l'étude, la conception, le dimensionnement, la construction et le suivi des ouvrages hydrauliques faisant appel au composant sol-chaux.

Un premier document « *Le traitement des sols à la chaux : une technique éprouvée appliquée à la construction d'ouvrages hydrauliques – Livret 1 - Document d'information à usage des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre* » [2] a été publié en mars 2019. Il permet au lecteur de s'approprier rapidement les principaux éléments de la technique du traitement de sol à la chaux appliquée aux ouvrages hydrauliques, ses avantages, performances et limites. Il s'adresse principalement aux maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre et présente de manière condensée les éléments essentiels de cette technique incluant ses performances, avantages et limites.

Il est accompagné par la présentation de quatre études de cas pour lesquels la technique de traitement de sol a été utilisée.

Le présent document complète le Livret 1 et constitue le Livret 2. Il est enrichi des connaissances acquises depuis cette première parution. Il développe plus en détail les différents points importants de l'application de cette technique et donne à l'ensemble de la communauté concernée : maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre, bureaux d'études, entreprises et bureaux de contrôle, les éléments techniques et méthodologiques nécessaires pour intégrer l'utilisation du composant sol-chaux à la construction ou à la réparation d'ouvrages hydrauliques n'excédant pas une quinzaine de mètres de hauteur.

Ces documents ne se substituent pas aux règles habituelles de conception et de réalisation des ouvrages hydrauliques préconisées par les organismes spécialisés et décrites dans les bulletins, guides et recommandations en usage. Ils apportent un éclairage complémentaire en offrant de nouvelles possibilités technico-économiques et renvoient aux documents de référence lorsque nécessaire.

La prise en compte de ces éléments permettra de construire des ouvrages performants et durables.

Le consortium DigueELITE remercie l'EPTB Vidourle et le SYMADREM d'avoir permis de valoriser dans ce document les connaissances acquises dans le cadre de la construction d'ouvrages en vraie grandeur réalisés en 2015 sur le Vidourle et en 2017 à Salin de Giraud.

Introduction générale

La doctrine et l'expertise française en matière de traitement de sol à la chaux pour la réalisation des terrassements lors de la construction d'infrastructures linéaires de transports et de plates-formes sont rassemblées dans le « *Guide Technique - Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme* » [3] (communément nommé « GTS ») paru en janvier 2000 sous l'égide du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (devenu Ifsttar, puis Université Gustave Eiffel) et du Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (partie intégrante aujourd'hui du Cerema). Ce document a été établi grâce à un important travail commun de toute la profession (organismes techniques, laboratoires des Ponts et Chaussées, maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre, entreprises, constructeurs de matériels et fournisseurs de liants). En décembre 2018, la norme européenne EN 16907-4, publiée en décembre 2019 dans sa version française NF EN 16907-4 « *Terrassements – Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques* » [4], plutôt que de présenter une synthèse des pratiques européennes, difficilement réalisable étant donné les disparités géologiques et climatiques, rassemble sous forme normative les principales d'entre elles. L'essentiel du savoir-faire français cohabite donc avec celui d'autres pays, autorisant l'application des spécifications les mieux adaptées au contexte local, c'est-à-dire celles inspirées du GTS [3] pour ce qui concerne le territoire français.

Le présent document est un prolongement à ces référentiels techniques préexistants. Son champ d'application s'ouvre à la construction d'ouvrages hydrauliques d'une hauteur inférieure à une quinzaine de mètres ou à la réparation d'ouvrages hydrauliques avec l'utilisation de sols traités à la chaux (digues fluviales, petits barrages-réservoirs ou écrêteurs de crue). Son rôle est de donner aux donneurs d'ordre, aux bureaux d'études, aux entreprises, aux organismes de contrôle les éléments justifiant l'application de cette technique, les avantages qu'elle procure et la méthodologie à employer.

En effet, les performances obtenues permettent d'envisager la pratique du traitement de sol à la chaux de façon plus étendue que la simple réutilisation des sols trop humides. Les résultats obtenus en matière de résistance mécanique, de résistance à l'érosion interne et externe démontrent, qu'en respectant les règles de caractérisation des gisements des sols naturels, de réalisation d'études de laboratoire et de mise en œuvre, la technique de traitement de sol à la chaux présente un intérêt technico-économique et dans une certaine mesure environnementale dans le domaine des ouvrages hydrauliques, hors ouvrages maritimes pour lesquels des études sont en cours.

En outre, il a été démontré que la perméabilité du matériau sol-chaux est similaire à celle du sol non traité lorsque des conditions particulières de teneur en eau et de mode de compactage sont appliquées (teneur en eau côté humide et compactage au compacteur vibrant à pieds dameurs).

Dans le résumé qui suit, le lecteur trouvera en quelques pages, les principales conclusions tirées des derniers travaux de recherche et de la réalisation de chantiers expérimentaux.

Le document est ensuite composé de six parties dont les objectifs principaux sont les suivants.

Partie A

- Rappeler les propriétés de la chaux et son action sur les sols.
- Préciser les applications possibles du composant sol-chaux dans un ouvrage hydraulique selon les fonctions d'usage.

Partie B

- Présenter les propriétés mécaniques et hydrauliques du composant sol-chaux, en particulier les grandeurs utiles pour la conception :
 - o résultats obtenus en laboratoire et in situ,
 - o quantification de la résistance à l'érosion interne et à l'érosion de surface mesurée en vraie grandeur sur les démonstrateurs.

Partie C

- Décrire l'ingénierie et la réalisation d'un projet d'ouvrage hydraulique ayant recours au traitement des sols à la chaux :
 - o déroulé des études,
 - o caractérisation des gisements et études de laboratoire,
 - o éléments de conception.

Partie D

- Présenter les méthodologies applicables à la construction d'ouvrages en sol traité à la chaux :
 - o DCE, planches d'essais et épreuve de convenance,
 - o exécution des travaux.

Partie E

- Identifier les points importants relatifs au contrôle de la construction d'ouvrages en sol traité à la chaux.

Partie F

- Exposer le suivi d'un ouvrage hydraulique en sol traité à la chaux.

Résumé

Les études entreprises depuis plus d'une quinzaine d'années par un nombre important de laboratoires et d'organismes de recherche publics et privés ont permis de confirmer les connaissances sur le traitement de sol à la chaux et de les compléter en vue de son application pratique à la construction d'ouvrages hydrauliques n'excédant pas une quinzaine de mètres de hauteur. Les recherches intensives, multi-échelle, ont mis clairement en évidence les apports du traitement à la chaux en matière de performances hydrauliques, notamment vis-à-vis des mécanismes d'érosion interne et externe.

Il a été démontré, à la fois en laboratoire mais également dans des cas d'ouvrages expérimentaux en vraie grandeur, que la conductivité hydraulique d'un sol traité à la chaux peut être du même ordre de grandeur que celle du même sol sans traitement, moyennant une mise en œuvre adaptée (teneur en eau côté humide et compactage par pétrissage).

Le traitement à la chaux améliore de manière importante la résistance d'un sol à l'érosion interne et externe. Ceci a été mesuré en laboratoire à de nombreuses reprises et sur un nombre important de sols différents au moyen de l'essai d'érosion de conduit HET. La même conclusion est également vérifiée en ce qui concerne la résistance à l'érosion de surface qui a été étudiée grâce à différents appareillages d'essais de laboratoire (JET, MoJET, EFA). Il faut d'ailleurs signaler que la résistance développée via le traitement à la chaux était, dans de nombreux cas, supérieure aux limites des dispositifs de mesure d'érosion existants.

Grâce à l'implication des maîtres d'ouvrage de l'EPTB du Vidourle et du SYMADREM, la réalisation de chantiers expérimentaux en vraie grandeur (démonstrateur le long de la rivière Vidourle dans le cadre du projet DigueELITE en 2015, plots expérimentaux de Salin de Giraud en 2017) a été déterminante dans l'avancée des connaissances et la quantification in situ de la résistance à l'érosion externe par surverse des sols traités à la chaux. D'autres ouvrages expérimentaux, en particulier la construction d'une carapace en sol fin traité à la chaux entreprise par Lhoist en 2019 à Vlassenbroek (Belgique) sont venus enrichir les connaissances acquises. Les essais de laboratoire ne permettant pas de reproduire fidèlement les conditions d'une sollicitation hydraulique correspondant à une surverse, un dispositif spécifique a été développé par INRAE et utilisé pour la première fois en France à l'occasion de trois campagnes d'essais sur ces ouvrages. Cet appareillage permet de générer une sollicitation hydraulique en vraie grandeur dans un canal d'écoulement placé sur le talus de l'ouvrage avec une hauteur de lame d'eau en crête supérieure à 0,30 m et une vitesse en pied de talus de l'ordre de 5m/s.

Les résultats obtenus ont montré qu'après le lessivage rapide de la couche superficielle de sol altéré, le sol traité présente une résistance à l'érosion par surverse d'au moins 3 à 10 fois supérieures à celle du même sol non traité. Dans le cas des plots expérimentaux de Salin de Giraud, le résultat est encore plus significatif, l'absence d'érosion des talus en sol traité à la chaux étant à comparer avec des profondeurs d'érosion d'environ 2 mètres et une fosse d'érosion de grande dimension sur la section réalisée en sol non traité.

Ces efforts de recherche importants menés avec progressivité (études en laboratoire, construction d'ouvrages expérimentaux en vraie grandeur, développement d'outils innovants pour la quantification de la résistance à l'érosion, mesures des performances atteintes in situ) permettent d'exploiter avec un grand niveau de confiance la technique de traitement de sol à la chaux pour la construction d'ouvrages hydrauliques. Ces travaux apportent une preuve chiffrée des performances réellement atteintes sur des ouvrages construits à l'échelle 1, avec des moyens de traitement de sol et de mise en œuvre conventionnels.

La démarche adoptée durant les travaux de recherche s'appuie sur une approche segmentée selon les fonctions d'usage recherchées dans les ouvrages à construire ou à réparer : maniabilité, stabilité, étanchéité, résistance à

l'érosion interne et/ou externe, résistance à l'évacuation. Le contenu des études de laboratoire à réaliser avant les travaux dépend donc des fonctions d'usage recherchées. Dans le cas où les différents paramètres du chantier ne seraient pas tous connus et maîtrisés, il est conseillé, lorsque d'un point de vue économique l'enjeu le permet, de réaliser un chantier expérimental lors de la phase étude pour vérifier la faisabilité du projet et l'obtention des résultats escomptés.

Compte tenu des connaissances actuelles et des récents apports, il est possible dès à présent d'avoir recours au traitement de sol à la chaux dans le domaine des ouvrages hydrauliques pour les fonctions suivantes qui sont détaillées dans le § 2.2 :

- fonction maniabilité (M), conformément au guide GTS [3],
- fonction stabilité (S), moyennant la justification de la stabilité conformément aux pratiques de la profession,
- fonction étanchéité (P), dans le cas d'ouvrage à charge non permanente et/ou à étanchéité rapportée, et moyennant les précautions d'usage concernant la gestion de la fissuration et la vérification de la résistance à l'érosion interne,
- fonction protection contre l'érosion interne (EI), moyennant la vérification en laboratoire,
- fonction protection de surface (ES) (surverse et ruissellement), si les matériaux sont proches de ceux testés sur le démonstrateur du Vidourle et des plots expérimentaux de Salin de Giraud (sols A1 ou A2), ou pour les autres cas moyennant des essais en laboratoire ou de préférence in situ sur plots expérimentaux afin de vérifier la résistance à l'érosion de surface.

Remarques :

1. Cette liste met en avant les paramètres propres à chacune des fonctions proposées qu'il est nécessaire d'évaluer pour connaître l'aptitude du sol traité à la chaux à satisfaire la fonction considérée. Selon le rôle joué par le composant sol-chaux, celui-ci pourra répondre aux exigences correspondant à une seule fonction ou à une combinaison de plusieurs fonctions. Ces paramètres s'ajoutent aux paramètres nécessaires à la détermination de la composition du sol-chaux et à la caractérisation de ses propriétés générales.
2. La fonction évacuation (EV) correspond au cas où le composant doit résister à des écoulements à forte vitesse (chenal, etc.). Cette fonction n'a pas encore fait l'objet de recherche et demande à être documentée.

Des situations extrêmes, notamment en matière de fondation (par exemple : très compressible, très hétérogène) ou de sollicitations particulières (sismiques par exemple), devront bien entendu faire l'objet d'une attention toute particulière lors de la phase étude en amont du projet.

Pour la réalisation de chantiers courants, il convient de mettre en place une série d'actions permettant à la maîtrise d'œuvre et aux entreprises de s'assurer que les connaissances et la technicité sont suffisantes pour réussir la construction des ouvrages, ou, à défaut, d'acquérir et maîtriser ces connaissances (sensibilisation, formation, retour d'expérience). L'apport de la maîtrise d'œuvre représente aussi un point-clé dans la réussite de tels ouvrages. Un accompagnement et une surveillance lors de la réalisation des travaux sont indispensables.

La réussite dans la construction d'ouvrages hydrauliques de qualité en sol traité à la chaux est essentiellement conditionnée par la maîtrise des phases suivantes.

- **Concevoir l'ouvrage en tenant compte des performances du sol traité à la chaux :**
 - déterminer précisément les sollicitations auxquelles fera face l'ouvrage,
 - déterminer les fonctionnalités qui pourront être reprises par le composant sol-chaux,
 - déterminer les moyens à mettre en œuvre pour justifier le recours à ces fonctionnalités,
 - comparer les solutions techniques courantes avec les solutions en sol traité à la chaux d'un point de vue technique, économique, environnemental, délai d'exécution, etc.

- **Entreprendre une reconnaissance des sols** en nature, état hydrique et quantité disponible.
- **Mener suffisamment en amont, et idéalement dès la phase étude, une étude de laboratoire** sur les conditions de traitement de sol.
- **Établir un dossier de spécifications clair et précis** comprenant notamment en plus des pratiques et étapes propres aux travaux de terrassement classique des digues en terre :
 - les conditions d'extraction et le cas échéant d'homogénéisation et de mise en dépôt provisoire des ressources en matériaux,
 - la méthodologie de traitement de sol à utiliser,
 - les caractéristiques des matériels de traitement et de mise en œuvre,
 - le débit de production attendu,
 - les modalités pratiques de mise en œuvre,
 - la description des épreuves à réaliser au préalable et les facteurs contrôlés,
 - les opérations de contrôle à mener pendant la construction de l'ouvrage.
- **Exiger une réponse technique détaillée** de la part des entreprises soumissionnaires (moyens proposés, expériences antérieures, plan d'assurance qualité) et s'assurer de leurs compétences en traitement de sol.

Comme dans les cas de chantier du Vidourle ou de Salin de Giraud, pour les ouvrages dont la fonction principale est d'être résistante au phénomène d'érosion externe ou d'érosion interne, la teneur en eau à la mise en œuvre ainsi que le dosage en chaux du sol traité doivent être maîtrisés, dans les conditions opérationnelles de chantier. Toutes les opérations, depuis l'extraction du sol naturel, sa mise éventuelle en dépôt provisoire, son traitement, sa mise en œuvre, doivent permettre d'obtenir et de conserver en permanence cet objectif. On recherchera une mouture du sol traité la plus fine possible en ayant comme objectif une valeur maximale de mouture de l'ordre de 0/30 mm. Le contrôle du dosage en chaux et de la qualité des opérations de traitement, surtout lorsqu'il s'agit de traitement en place ou sur plate-forme dédiée, doit également être spécifié et organisé. Pour garantir la qualité requise, les autres paramètres importants sont le respect des exigences demandées en matière d'épaisseur des couches unitaires et d'énergie de compactage préconisée associée à l'uniformité de sa répartition.

Les spécifications établies par la maîtrise d'œuvre doivent être respectées par l'entreprise qui devra veiller à l'adéquation des moyens mis en place, tant au niveau du matériel que de la qualification du personnel. Le maître d'œuvre joue également un rôle important dans le suivi et le contrôle de l'exécution des travaux. La mise en place de son plan de contrôle doit lui permettre de suivre et d'évaluer en continu les performances obtenues, et éventuellement d'apporter des facteurs correctifs ou de faire évoluer les modalités d'exécution des travaux en fonction des résultats obtenus et des conditions réellement rencontrées.

Des conceptions ambitieuses, dépassant le cadre des connaissances validées à ce jour, permettraient d'utiliser de manière optimisée les caractéristiques du sol traité à la chaux.

À ce titre, l'article « Petits barrages submersibles » [5] évoque des pistes d'optimisation prometteuses, dans le domaine des petits barrages, mais applicables également aux digues. Par exemple, les auteurs considèrent que le recours à des sols traités à la chaux peut avoir des retombées bénéfiques sur le coût et la conception des digues résistantes à la surverse, le rôle de la revanche et le niveau de sûreté des ouvrages.

A. DONNEES GENERALES

1. Pourquoi traiter un sol à la chaux ?

1.1 L'expérience des terrassements

Le traitement des sols à la chaux est une technique ancienne utilisée dès l'Antiquité, qui connaît un regain d'intérêt depuis les années 60 avec le lancement des programmes de modernisation des infrastructures de transport (autoroutes, LGV, aéroports, etc.). Aujourd'hui, cette technique, considérée comme sûre et économique, est devenue incontournable. En autorisant la valorisation de sols médiocres, elle permet de préserver les ressources naturelles en matériaux nobles, de réduire à la fois les mises en décharge et les délais de réalisation, et de réaliser des économies sur le coût des terrassements.

Malgré l'expérience acquise, les développements du traitement à la chaux dans les ouvrages hydrauliques sont encore timides. En France, on peut citer entre autres la réalisation, à partir des années 80, du barrage-réservoir de Michelbach en Alsace, de petits barrages écrêteurs de crues en Normandie, de bassins réservoirs sur le site des Aéroports de Paris (ADP, Roissy en France), du déplacement et de la reconstruction de digues dans le département du Nord, etc. Des exemples existent aussi à l'étranger. Une liste d'ouvrages hydrauliques en France et à l'étranger ayant fait usage du traitement de sol à la chaux aérienne calcique figure en Annexe 1.

Ce développement mesuré s'explique d'une part par la sévérité des exigences vis-à-vis des mesures contre l'action de l'eau, et, d'autre part, par une certaine réserve de la part des concepteurs d'ouvrages hydrauliques vis-à-vis du traitement des sols. En effet, l'eau retenue étant susceptible de circuler à l'intérieur ou à la surface d'un ouvrage hydraulique, il est primordial de s'assurer que les composants, la conception et la réalisation prennent en compte les conséquences d'une défaillance qui peut être catastrophique pour la sûreté de l'ouvrage.

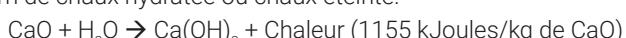
Aujourd'hui, les progrès technologiques des constructeurs de matériels, le savoir-faire des concepteurs et entrepreneurs, et les guides ou normes donnant les principales règles de bonne pratique et spécifications techniques, ont conduit à la mise au point de matériels performants et de méthodologies de mise en œuvre capables de satisfaire les exigences les plus sévères, y compris celles relatives aux ouvrages hydrauliques.

1.2 La chaux

La chaux est obtenue par calcination du calcaire vers 900°C. Lorsque ce calcaire est majoritairement constitué de carbonate de calcium (CaCO_3), on obtient une chaux dite calcique, composée essentiellement d'oxyde de calcium (CaO).



Cette chaux est communément appelée chaux vive, car, en présence d'eau, elle s'hydrate très rapidement, selon une réaction fortement exothermique qui conduit à la formation d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2), plus connu sous le nom de chaux hydratée ou chaux éteinte.



Placée en atmosphère humide, la chaux hydratée a la propriété de fixer le CO_2 de l'air pour reformer du carbonate de calcium. Cette propriété est exploitée dans les mortiers et enduits de construction où la chaux joue le rôle d'un liant durcissant au contact de l'air. D'où l'appellation « **chaux aérienne calcique** » pour désigner la chaux issue de calcaire pur. Dans la suite du document, on la désignera plus simplement par le terme générique « chaux ».

La chaux est produite dans des sites industriels. Ses applications sont multiples. En Europe, la chaux utilisée en traitement des sols doit satisfaire aux spécifications de la Norme NF EN 459-1 [6]. Comme celle-ci couvre une gamme importante de types et de classes de chaux ayant des propriétés d'usage spécifiques et distinctes, il est essentiel de préciser le type et la classe de chaux désirés lorsqu'il est fait référence à ce document. Le marquage CE, obligatoire, atteste de la conformité de la chaux aux exigences européennes sur les produits de construction.

1.2.1 Action de la chaux sur les sols limono-argileux

L'action la plus rapide et spectaculaire, lorsqu'on traite un sol à la chaux vive, est la réduction de la teneur en eau. Cela s'explique par l'apport de matière sèche qu'est la chaux mais surtout par la forte exothermicité de la réaction d'hydratation. Le dégagement de chaleur est quasi instantané et immédiatement mobilisé pour évaporer l'eau en excès, ce qui fait de la chaux vive le produit idéal pour le traitement de sols humides, fortement représentés en Europe.

Sous le climat tempéré français, c'est quasi exclusivement la chaux vive qui est préconisée. En présence de sols secs, l'utilisation de chaux hydratée, en poudre ou en suspension dans l'eau (lait de chaux) est possible, mais reste exceptionnelle. En effet, pour une même teneur en calcium, les coûts de transport et de stockage sont plus faibles pour la chaux vive que pour la chaux hydratée car le volume massique de cette dernière est de l'ordre du double de celui de la chaux vive.

Quelle que soit la forme de chaux utilisée, on distingue les actions à court terme et celles à moyen et long terme.

1.2.2 Les actions à court terme de la chaux sur les sols

Les sols limoneux et argileux sont sensibles à l'eau : trop humides, ils deviennent plastiques, collants et perdent toute portance. Lorsqu'on traite un tel sol à la chaux vive, l'action immédiate est la réduction de la teneur en eau. Théoriquement, 1 % de chaux vive permet de faire baisser la teneur en eau d'un sol d'environ 1 %. Mais l'abaissement peut aller en pratique jusqu'à 5 % en conditions très favorables (période chaude et ventée). En parallèle, la chaux modifie la structure des argiles présentes dans le sol en provoquant leur flocculation. Il en résulte une baisse de la plasticité et une modification de la mouture du sol après malaxage (Figure 1).

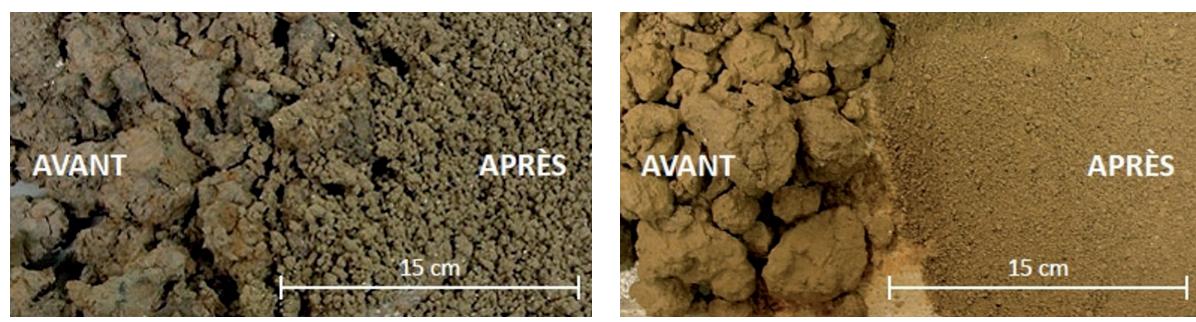


Figure 1 : Exemples de moutures de sols argileux et limoneux humides avant et après traitement à la chaux (photos Lhoist)

Comme dit précédemment, en présence de sols secs, l'utilisation de chaux hydratée, en poudre ou en suspension dans l'eau (lait de chaux) est possible mais reste peu pratiquée en Europe à ce jour. Dans ce cas, l'action à court terme porte essentiellement sur la neutralisation de l'activité des argiles par la chaux, telle qu'indiqué ci-après.

À côté de la réduction de teneur en eau dans le cas de la chaux vive, les autres actions à court terme sont le résultat d'échanges cationiques, en milieu aqueux, entre les ions Ca^{2+} provenant de la chaux et certains cations des minéraux argileux du sol. Les conséquences sont multiples :

- diminution de l'indice de plasticité (I_p),
- augmentation de la limite de retrait (w_s),
- atténuation du retrait-gonflement,
- réduction de la densité sèche à l'OPN (ρ_{dmaxOPN}),
- augmentation de la teneur en eau OPN (w_{OPN}),
- augmentation de l'indice portant immédiat (IPI).

Le dosage en chaux nécessaire pour bénéficier de ces actions à court terme dépend de la nature des argiles et de la teneur en eau du sol. Il est généralement de l'ordre de 1 à 3 % par rapport à la masse sèche du sol mais peut aller au-delà pour des matériaux très argileux. La Figure 2 représente l'action à court terme de la chaux sur les paramètres caractéristiques d'un sol argileux (limites d'Atterberg, limite de retrait), la Figure 3 illustre le comportement à court terme d'un sol traité à la chaux vis-à-vis de son aptitude à être mis en œuvre et compacté.

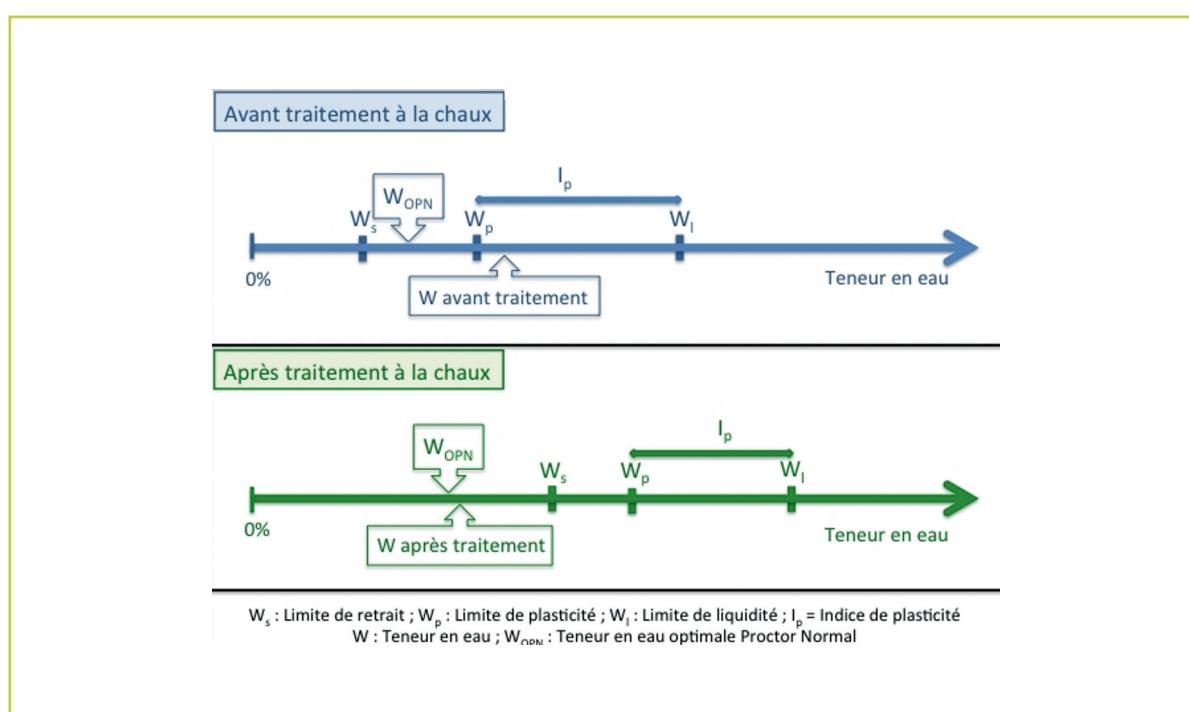


Figure 2 : Action de la chaux sur les limites d'Atterberg et la limite de retrait

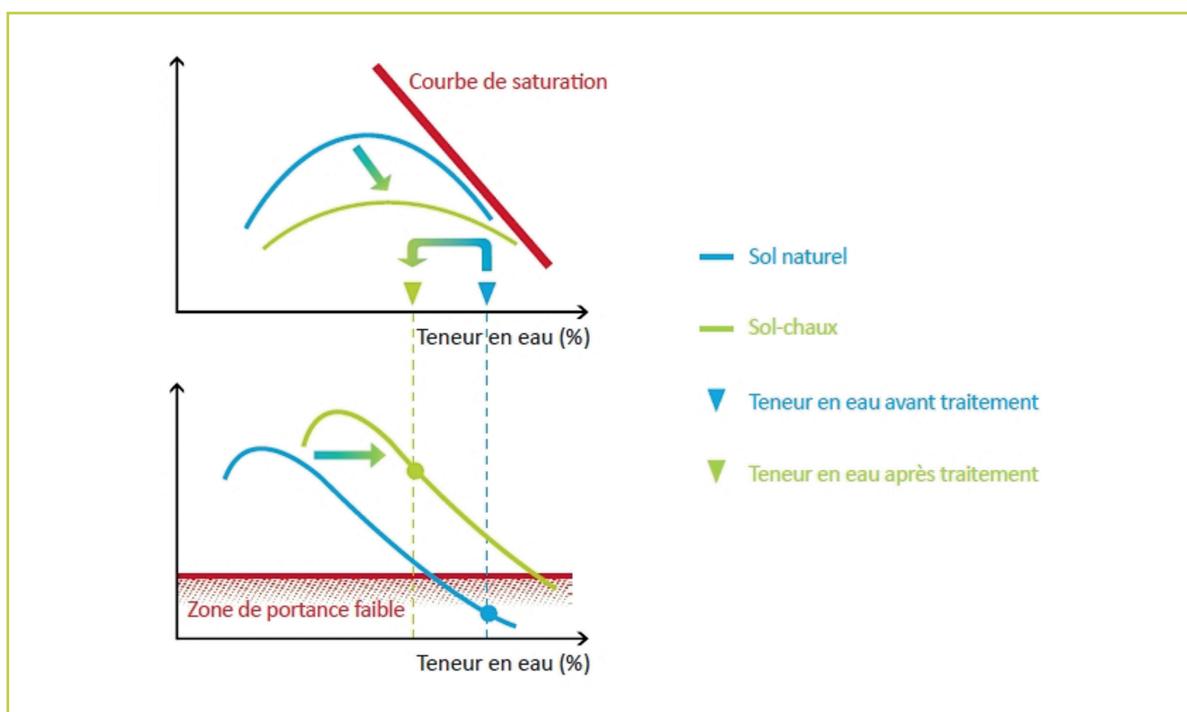


Figure 3 : Courbes types Proctor et IPI d'un sol limono-argileux avant et après traitement à la chaux

Remarque : La courbe Proctor du matériau traité à la chaux est plus aplatie que celle du matériau argileux naturel. L'incorporation de chaux à un sol naturel modifie favorablement la sensibilité à l'eau de ce dernier comme l'illustre la Figure 4.



Figure 4 : Comportement d'éprouvettes après ¼ d'heure d'imbibition dans l'eau (sol A1 non traité à gauche et éprouvette du même sol traité à 2 % de chaux à droite) ; éprouvettes confectionnées 24 heures avant la mise en imbibition

1.2.3 Les actions à moyen et long terme de la chaux sur les sols

Les actions à moyen et long terme de la chaux sur les sols sont le résultat de réactions dites pouzzolaniques, c'est-à-dire de la combinaison du calcium apporté par la chaux avec les minéraux du sol (silice et alumine dissoutes) pour former un composé cimentaire à prise lente. Elles se traduisent par une augmentation des performances mécaniques, une résistance aux sollicitations statiques et dynamiques accrue, ainsi que par une meilleure tenue à l'eau et au gel. Les principales retombées sont :

- l'augmentation de la résistance à l'immersion (mesuré par le biais de l'essai CBR après immersion dans l'eau),
- l'augmentation progressive des performances mécaniques (résistance, cohésion, module),
- l'augmentation de la résistance à l'érosion (interne et de surface).

À titre d'exemple, la Figure 5 illustre l'augmentation de la résistance en compression simple de sols traités à la chaux en fonction du temps et du dosage en chaux.

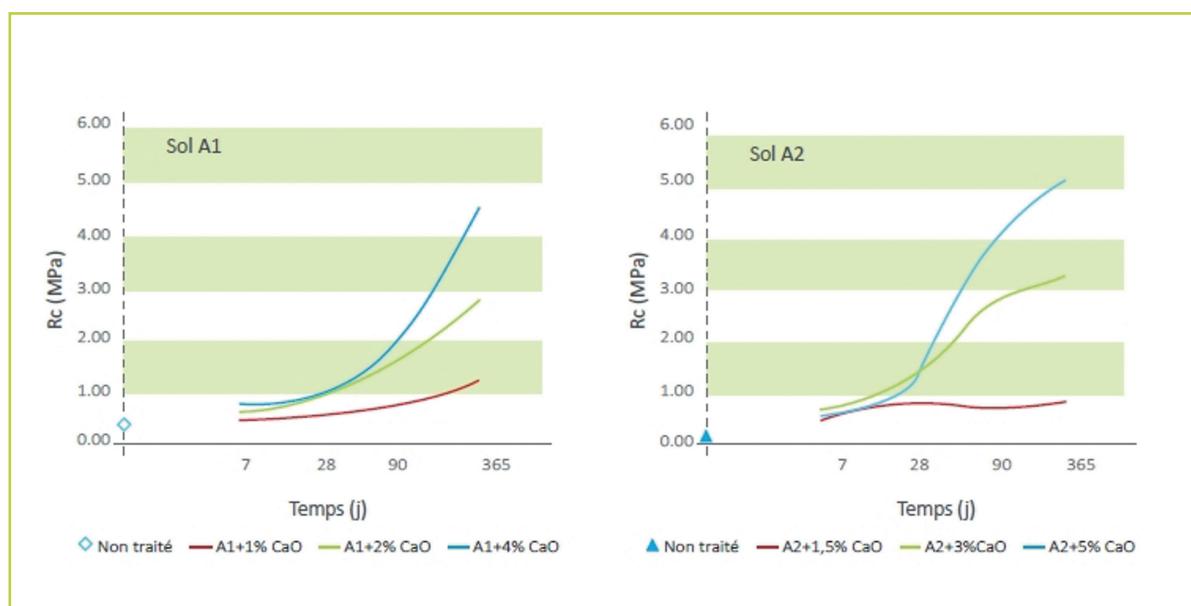


Figure 5 : Exemples d'évolution de la résistance en compression simple en fonction du temps et du dosage en chaux pour un sol A1 et un sol A2 ; le sol naturel est représenté à 0 jour de cure

La cinétique des réactions sol-chaux dépend de la nature des argiles présentes dans le sol et de la température au moment des travaux. Toutefois, contrairement aux liants hydrauliques qui n'autorisent des délais de maniabilité (ou de mise en œuvre) qu'entre une et quelques heures, les délais permis par la chaux sont beaucoup plus longs et largement compatibles avec les contraintes de réalisation et la bonne conduite des travaux. Il est même d'usage dans le cas du recyclage des sols fins, de traiter un sol à la chaux, de le stocker et de le reprendre plusieurs semaines après pour le mettre en œuvre.

Pour bénéficier des actions à moyen et long terme de la chaux, il faut disposer de sols contenant une fraction argileuse suffisamment abondante (passant à $2 \mu\text{m}$) et active. À titre indicatif, il est souhaitable que l'indice de plasticité du sol soit supérieur ou égal à cinq ($I_p \geq 5$). Dans le cas des sols très argileux, ce sont les considérations de chantier (efficacité des équipements, méthodologie d'exécution) qui orientent la décision.

Quoiqu'il en soit, il est indispensable de s'appuyer sur des études de laboratoire pour déterminer le dosage approprié en fonction des performances visées. Celui-ci peut varier de 2 à 4 % pour les limons faiblement argileux, et peut dépasser 4 %, voire 6 % pour les sols très argileux.

Des valeurs chiffrées de propriétés mécaniques et hydrauliques obtenues avec différents sols traités à la chaux comparées à celles obtenues avec les mêmes sols non traités sont données dans la partie B du document. Ces données proviennent de sources bibliographiques ou de mesures réalisées en laboratoire ou in situ dans le cadre de chantiers expérimentaux.

1.3 Les avantages du traitement des sols à la chaux

L'intérêt le plus reconnu du traitement à la chaux est de permettre le réemploi de sols humides ou aux caractéristiques médiocres, généralement les sols limono-argileux mais aussi certains schistes et marnes ainsi que certaines craies - selon des processus différents - en leur conférant des propriétés nouvelles :

- facilité et souplesse d'extraction et de mise en œuvre (maniabilité),
- moindre sensibilité à l'eau en cas d'intempéries ou d'immersion,
- stabilité dimensionnelle de la fraction argileuse lors de cycles séchage-imbibition,
- augmentation des performances mécaniques (portance, cohésion, résistance...).

À l'échelle d'un projet, cela se traduit par :

- la gestion optimisée des matériaux disponibles sur le site,
- la réduction des emprunts extérieurs et des mises en dépôt,
- la réduction du trafic poids lourds (chantier → dépôt ; emprunt → chantier),
- la réduction des immobilisations pour intempéries,
- la diminution de la durée des travaux,
- la réduction du coût des terrassements.

Il a été démontré à maintes reprises qu'en présence de sols médiocres sur le site d'un projet routier ou ferroviaire, un traitement à la chaux permettait de réduire le coût des travaux de terrassement de 20 à 40 % par rapport à la solution de substitution par des matériaux d'emprunt.

Sur des ouvrages de type digue fluviale, les premiers calculs réalisés aboutissent à des économies pouvant aller jusqu'à 35 à 40 % sur le coût des travaux comparativement à des solutions traditionnelles. Dans ce cas, une partie des économies réalisées provient de la suppression de certains dispositifs tels que les filtres, les protections en enrochements, les dispositifs anti-fouisseurs, etc.

1.4 Le champ d'application du traitement des sols à la chaux

Comme pour toute technique de construction, le champ d'application du traitement des sols à la chaux est défini par des limites qu'il est indispensable de connaître pour bien maîtriser son exécution. Ces limites dépendent essentiellement des caractéristiques géotechniques des matériaux naturels et de leur composition chimique et minéralogique.

1.4.1 Les perturbateurs de prise

La présence de certains composés dans le sol peut avoir un effet négatif sur l'efficacité du traitement à la chaux, ou encore sur le comportement du sol traité à moyen terme. Il s'agit :

- des sulfates (sous forme de gypse, de plâtre), et des sulfures (pyrites), qui peuvent entraîner des gonflements différés dans le temps suite à la formation d'ettringite (produit réactionnel gonflant, issu de la recombinaison du calcium avec les alumates et sulfates présents dans le sol en présence d'eau). Les conséquences sont un risque de gonflement excessif pouvant mettre en péril l'ouvrage une fois construit. En cas de suspicion de présence de sulfates, on procédera à un essai de gonflement accéléré suivant la norme NF EN 13286-49 [7], pour évaluer le risque de gonflement ettringitique.

- des matières organiques, susceptibles de retarder ou de d'atténuer l'effet du traitement en consommant une partie de la chaux afin de corriger l'acidité du sol. On estime que si la teneur en matières organiques du sol excède 3 %, il y a lieu de mener une étude spécifique pour évaluer les effets sur les performances du sol traité.
- des phosphates et nitrates, présents dans les terrains agricoles ou industriels, et qui sont de possibles retardateurs ou inhibiteurs de durcissement.
- des chlorures, qui, en faible proportion, sont susceptibles d'accélérer la prise et donc de réduire le délai de maniabilité. Ils ne sont pas considérés comme des perturbateurs en tant que tels, mais leurs effets sont incertains lorsqu'ils sont en proportion importante.
- des minéraux de type micas, dont la morphologie en paillettes fragilise les liaisons cimentaires et altère l'efficacité du traitement.

En règle générale, les effets des éléments perturbateurs s'évaluent à l'aide d'essais d'immersion dans l'eau. Lorsque les résultats ne sont pas satisfaisants (gonflements inacceptables, chutes importantes de résistance par rapport à des éprouvettes non immersées), plusieurs solutions sont envisageables : augmentation du dosage en chaux, application d'une méthodologie de mise en œuvre particulière, recherche d'autres matériaux naturels, abandon de la technique. Il est évident que la décision doit être prise en connaissance de cause, à partir d'études en laboratoire soignées.

1.4.2 Les argiles plastiques très cohérentes

De récentes études menées en laboratoire et la réalisation de chantiers expérimentaux, dont le projet TerDOUEST, ont démontré par la pratique que la technique de traitement à la chaux de sols très argileux (classes A3/A4) pouvait être utilisée pour la construction d'ouvrages de faible hauteur. Ces avancées permettent d'envisager la réutilisation de telles classes de sols pour la construction d'ouvrages ou de parties d'ouvrages hydrauliques, sous réserve de s'assurer de la conformité des performances au regard des fonctions à saisir.

L'emploi de ces sols très plastiques requiert néanmoins des précautions, tant au stade de l'étude qu'à celui de la méthodologie d'exécution des travaux. En particulier, en raison de la forte cohésion, l'attention est attirée sur la difficulté de mélanger les composants (le sol naturel, la chaux et éventuellement l'eau). Cela peut nécessiter par exemple un traitement en deux opérations, entrecoupées le cas échéant par un temps dit de maturation permettant à la flocculation de se produire grâce à la chaux afin d'obtenir une mouture satisfaisante. Dans ce cas, il est recommandé de définir la méthodologie de traitement dans la phase préparatoire et de la valider par des planches d'essais au démarrage des travaux. Pour ces classes de sols et en l'état actuel de la technologie, l'usage de malaxeurs à arbre horizontal est à privilégier.

1.4.3 Les blocs

La quantité et la taille des éléments blocailleux présents dans le sol doivent être compatibles avec les capacités des matériels de malaxage. À l'heure actuelle, ces matériels (malaxeurs à arbre horizontal, centrale de traitement) admettent des éléments pouvant atteindre 100 à 150 mm suivant la nature pétrographique des éléments rocheux. Dès que la présence de gros éléments présente un risque d'endommagement des outils du malaxeur, il convient de procéder à l'élimination de la fraction grossière au moyen de différentes techniques (décohésion ou scarification du sol en place pour faire remonter les blocs en surface, concassage en place, andainage, criblage, etc.).

Dans le cas des centrales de traitement, au même titre que les blocs, les mottes peuvent gêner le fonctionnement de la centrale. En plus de la préparation évoquée précédemment, il faut donc éliminer ces blocs ou les réduire par différents procédés qui sont généralement intégrés à la centrale (grille de scalpage relevable, émotteur, crible, etc.). Une préparation du sol avant son passage en centrale (brassage à la pelle, pré-malaxage, utilisation d'engins agricoles spécifiques tels que les herses ou fraises rotatives pour émietter les mottes) est aussi possible et souvent nécessaire pour les sols moyennement argileux à argileux.

2. L'application du traitement des sols à la chaux aux ouvrages hydrauliques

2.1 Des références anciennes

L'utilisation de sols fins traités à la chaux dans les ouvrages hydrauliques n'est pas nouvelle. Plusieurs publications témoignent du recours, notamment en France dans la 2^e moitié du XIX^e siècle, à des corrois argileux traités à la chaux pour réduire la teneur en eau des sols, ou éviter le retrait argileux et réaliser ainsi des étanchéités de barrages ou de canaux « tenaces et flexibles » selon les termes de l'époque. Les applications se font plus rares dans la première moitié du XX^e siècle.

À partir du milieu du XX^e siècle, on note un retour du traitement à la chaux pour améliorer le comportement de sols médiocres, notamment des sols gonflants et dispersifs. On relève plusieurs exemples d'utilisation de tels sols traités à la chaux, sous forme de protections ou de carapaces, y compris sur des barrages de hauteur significative, aux USA, en Afrique du Sud, au Swaziland, en Australie, en Thaïlande.

Un des exemples les plus documentés est celui de la remise en état, au début des années 70, d'un tronçon du canal d'irrigation Friant-Kern en Californie, par traitement en place à la chaux vive d'argiles gonflantes (Figure 6 et Figure 7). Les matériaux du site, très plastiques (I_p de 35 à 45) ont été récupérés, malgré leur humidité élevée, traités à 4 % de chaux vive et réutilisés en revêtement des berges et du fond du canal pour protéger les sols naturels sous-jacents, stabiliser les berges et assurer l'étanchéité. Depuis cette époque, il se réalise régulièrement aux États-Unis des digues de protection en sol traité à la chaux, entre autres le long du Mississippi.

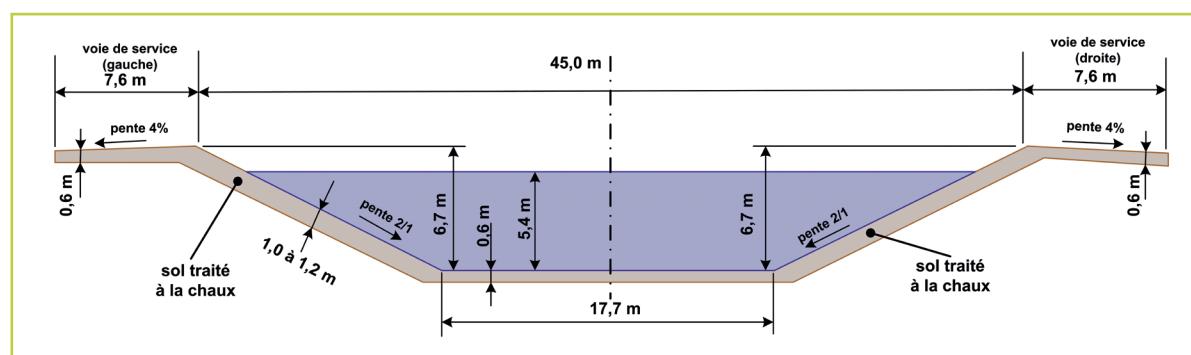


Figure 6 : Profil en travers du canal de Friant-Kern après remise en état par mise en œuvre d'un revêtement en sol traité à la chaux



Berges en sol traité à la chaux (photo Lhoist)

Berges en sol traité à la chaux ; nettoyage de surface après vidange du canal (photo Lhoist)

Figure 7 : Vue des berges du canal de Friant Kern (USA) en sol traité à la chaux

Un autre exemple significatif est le barrage de 40 m de haut et 1500 m de long construit au tout début des années 80 à Mnjoli au Swaziland avec l'utilisation en noyau de sols dispersifs ($I_p = 25$ en moyenne), protégés contre l'érosion interne sur la face aval du noyau par une couche des mêmes sols dispersifs traités à 2 % de chaux hydratée.

À partir des années 80, le domaine des ouvrages hydrauliques a bénéficié du déploiement du traitement des sols dans les domaines routiers et ferroviaires, de ses avancées technologiques et des résultats obtenus. Au-delà de la simple amélioration du comportement des sols médiocres, le traitement est progressivement apparu comme un moyen de conférer aux sols des propriétés intéressantes pouvant être prises en compte dans la conception des ouvrages hydrauliques. Ainsi, des batardeaux temporaires, des petits barrages et des digues ont été réalisés, en particulier en Europe, en mobilisant les propriétés mécaniques et hydrauliques des sols traités à la chaux.

Des petits barrages écrêteurs de crues ont aussi été réalisés ces 20 dernières années, en Normandie ainsi qu'en République Tchèque, par utilisation de sols limono-argileux humides traités à la chaux pour faciliter leur mise en œuvre et améliorer la stabilité des ouvrages.

On trouvera en Annexe 1 une liste plus complète d'ouvrages de référence identifiés. Le comportement de ces ouvrages, toujours en service de nos jours, est jugé excellent.

Au vu des bons résultats obtenus, des actions de recherche ont été engagées, à l'initiative d'investisseurs privés et publics, pour mieux caractériser les propriétés des sols traités à la chaux et exploiter leurs performances. Le programme de recherche français DigueELITE suivi par la construction de plots expérimentaux à l'initiative du SYMADREM en sont des exemples.

C'est suite à l'émergence de cette pratique que la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) a confié à son Comité technique P "Barrages en Matériaux Cementés" le soin de rédiger un bulletin intitulé « Barrages en Sol Cementé » traitant du sujet. Par « Cementé » il faut entendre lié par une réaction de cimentation, en l'occurrence la combinaison argile-chaux pour ce qui nous concerne, et par « Sol », il faut entendre sol fin naturel contenant une fraction notable d'argile, par opposition aux sables et graves, naturels ou élaborés et plus ou moins propres. Ce bulletin a été approuvé par la CIGB au Congrès de Marseille en juin 2022 et est accessible sur le site de la CIGB.

2.2 Classification des fonctions d'usage du composant sol-chaux

Selon le rôle qu'on veut lui faire jouer dans l'ouvrage hydraulique, le composant sol-chaux peut satisfaire différentes fonctions. Les six fonctions suivantes sont proposées.

Fonction maniabilité (M) : cette fonction correspond au cas le plus simple de la facilité de mise en œuvre (ouvrbabilité) lorsqu'on est en présence de sols limono-argileux humides.

Fonction stabilité (S) : cette fonction correspond au cas pour lequel la stabilité mécanique d'un ouvrage sous son propre poids, et éventuellement sous charges et sollicitations extérieures (sollicitations sismiques par exemple), est assurée grâce au traitement à la chaux.

Fonction étanchéité (P) : cette fonction correspond au cas où le composant sol-chaux doit permettre à l'ouvrage de stocker ou de retenir de l'eau, de manière non permanente.

Fonction protection contre l'érosion interne (EI) : cette fonction correspond au cas où la résistance à l'écoulement interne est primordiale.

Fonction protection de surface (ES) : cette fonction correspond au cas où l'ouvrage doit faire obstacle à la venue d'eau ou résister à son action ou son passage (barrage écrêteur de crue, digue de protection ou digue résistante à la surverse).

Fonction évacuation (EV) : cette fonction correspond au cas où l'ouvrage intègre les dispositifs d'évacuation propres aux ouvrages hydrauliques.

Dans le cas des fonctions M et S, on peut se satisfaire des méthodes de traitement en place traditionnelles. Cependant, pour les autres fonctions, la fabrication et la mise en œuvre du composant sol-chaux demandent le recours à des techniques d'exécution plus contraignantes. Elles exigent en particulier la maîtrise de l'homogénéité du matériau compacté quelle que soit la taille du projet ou la nature des aléas. En effet, assurer l'homogénéité est indispensable pour réduire le risque d'écoulements localisés, dans la masse (propice au déclenchement d'érosion interne) ou en surface (propice au déclenchement de l'érosion de surface).

Le Tableau 1 résume les particularités propres à chacune des fonctions proposées. Ce sont les paramètres nécessaires pour évaluer la capacité du sol traité à la chaux à satisfaire la fonction considérée. Selon le rôle joué par le composant sol-chaux, celui-ci pourra répondre aux exigences correspondant à une seule fonction ou à une combinaison de plusieurs fonctions. Ces paramètres s'ajoutent aux paramètres nécessaires à la détermination de la composition du sol-chaux et à la caractérisation de ses propriétés générales.

Tableau 1 : Les différentes fonctions proposées pour le composant sol-chaux et leurs particularités

Fonction recherchée	Maniabilité (M)	Stabilité (S)	Étanchéité (P)	Protection contre l'érosion interne ⁽¹⁾ (EI)	Protection de surface ⁽²⁾ (ES)	Évacuation ⁽³⁾ (EV)
Propriétés du composant sol chaux	Facilité de mise en œuvre (sols humides et/ou argileux)	Stabilité sous poids propre et éventuellement sous sollicitations sismiques	Étanchéité	Résistance à l'érosion interne	Résistance à l'érosion externe	Résistance aux écoulements à forte vitesse (chenal, etc.)
Procédé de traitement recommandé ⁽⁴⁾	En place ou en centrale	En place ou en centrale	En place avec homogénéisation ⁽⁵⁾ ou en centrale	En place avec homogénéisation ⁽⁵⁾ ou en centrale	En place avec homogénéisation ⁽⁵⁾ ou en centrale	En centrale
Paramètres étudiés	<ul style="list-style-type: none"> • Portance • Compacité du matériau compacté 	<ul style="list-style-type: none"> • Résistance au cisaillement (cohésion) • Résistance à la traction et/ou à la compression 	<ul style="list-style-type: none"> • Homogénéité • Perméabilité 	<ul style="list-style-type: none"> • Homogénéité • Résistance à l'érosion de conduit 	<ul style="list-style-type: none"> • Homogénéité • Résistance à l'érosion de surface dans le cas d'un écoulement de surverse 	<ul style="list-style-type: none"> • Homogénéité • Résistance à l'érosion de surface pour un évacuateur
Propriétés vérifiées pour le composant sol-chaux	<ul style="list-style-type: none"> • Pratique courante • Codifié (GTS : Guide traitement des sols, Norme NF EN 16907-4) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pratique courante • Codifié (GTS : Guide traitement des sols, Norme NF EN 16907-4, Eurocode 7) 	<ul style="list-style-type: none"> • Maîtrisé si préconisations de mise en œuvre respectées • Vérifié sur digue de Rouen 	<ul style="list-style-type: none"> • Maîtrisé si préconisations de mise en œuvre respectées • Vérifié par essai HET et sur digue de Rouen 	<ul style="list-style-type: none"> • Maîtrisé si préconisations de mise en œuvre respectées • Vérifié par essais Jet, Mojet, et sur démonstrateur du Vidourle et plot d'essai de Salin de Giraud 	<ul style="list-style-type: none"> • A documenter

- [1] L'érosion de conduit est le stade ultime des mécanismes d'érosion interne et est étudiée en laboratoire à l'aide du « Hole Erosion Test » (ou HET). La contrainte critique du HET est actuellement le paramètre le plus opérationnel pour quantifier la résistance d'un matériau à l'érosion interne.
- [2] En l'état actuel des connaissances, la détermination des performances et spécifications relatives à la fonction protection de surface (ES) se fait, soit par analogie avec un matériau déjà testé, soit par la réalisation d'un chantier expérimental à intégrer dans la phase étude.
- [3] La fonction évacuation (EV) qui se distingue de la fonction protection de surface (ES) par l'ampleur des sollicitations, en particulier des vitesses et des charges hydrauliques, est actuellement en phase de réflexion.
- [4] Le procédé de traitement recommandé se réfère à la technologie disponible au moment de la rédaction. Comme la technologie est susceptible de progresser, les recommandations peuvent évoluer. L'objectif est d'obtenir une qualité de mélange (mouture, homogénéité) compatible avec l'obtention des performances requises. Par exemple, une mouture 0/20 mm a été obtenue avec un sol ($I_p = 7$) traité en centrale, et une mouture 0/31,5 mm a été obtenue avec un sol ($I_p = 40$) traité en place.
- [5] Lorsque cela est nécessaire, notamment en présence d'un gisement hétérogène, l'opération d'homogénéisation consiste à extraire le matériau, à le stocker en couches horizontales, puis à l'extraire du stock par couches verticales (à l'aide d'une chargeuse ou d'une excavatrice) avant de le mettre en œuvre. Pour les sols à forte argilosité et/ou fortement humides, un prétraitement à la chaux est envisageable lors de l'opération d'homogénéisation. Ce prétraitement doit être suivi par un traitement final à la chaux pour atteindre le dosage nécessaire à l'obtention des propriétés visées.

2.3 Les sols utilisables après traitement à la chaux

En l'état actuel des connaissances et des enseignements tirés des études en laboratoire et en vraie grandeur, il est possible de dresser une liste de sols dont l'utilisation en ouvrages hydrauliques, après traitement à la chaux, est envisageable en tenant compte de la fonction d'usage du composant sol chaux dans l'ouvrage. Les classes de sol correspondent à la classification des sols définie par la norme NF P 11-300 [8].

Pour la fonction maniabilité (M), il est recherché la maniabilité et donc la facilité de mise en œuvre. Le contexte est celui des remblais courants. Les sols utilisables sont tous ceux pour lesquels le traitement à la chaux est possible. Ils sont cités dans les tableaux d'utilisation des matériaux en remblai dans le « Guide des terrassements des remblais et des couches de forme – Fascicule 1 – Principes généraux » [9] (communément nommé « GTR »). Le traitement à la chaux est réalisé pour obtenir un niveau d' IPI ≥ 8 en fonction de l'argilosité du sol permettant de réaliser la mise en œuvre dans de bonnes conditions de traficabilité et de compactage. En cours de chantier, le dosage en chaux peut être adapté en fonction des conditions hydriques pour atteindre les performances mentionnées ci-dessus. Dans des conditions hydriques favorables (état « m » du sol), le recours au traitement n'est pas nécessaire.

Pour la fonction stabilité (S), il est recherché des caractéristiques mécaniques permettant d'assurer la stabilité de l'ouvrage de manière pérenne (cohésion et angle de frottement interne) définies par l'étude de stabilité. Dans ce cas, un traitement à la chaux uniforme de l'ensemble de l'ouvrage est nécessaire. En première approche, les classes de sols utilisables après traitement à la chaux sont les suivants :

- A1, A2, B5, B6,
- C1A1, C1A2, C1B5, C1B6.

À condition que les méthodologies d'exécution soient performantes et que les caractéristiques mécaniques obtenues soient compatibles avec la fonction d'usage attendue (stabilité), cette liste peut être étendue aux sols suivants :

- A3,
- C1A3,
- C2A1, C2A2, C2A3, C2B5, C2B6, R34.

Dans certains cas, la réalisation de chantiers expérimentaux peut être recommandée pour vérifier les performances réellement obtenues et préciser les conditions d'utilisation de tels sols.

Pour les fonctions étanchéité (P) et protection de surface (ES), le choix des sols utilisables est limité pour l'instant aux seuls sols fins A1 et A2 pour lesquels de récents retours d'expériences, dont ceux de DigueELITE, permettent d'envisager leur emploi. Les conclusions du programme de recherche *TerDOUEST* : « *Enseignements de TerDOUEST - Propositions de compléments au Guide Traitement des Sols* » [10] permettent aussi d'envisager l'extension aux sols A3 toutefois cela nécessite des démarches complémentaires (essais à conduire dans le cadre d'études de laboratoire complétées par la réalisation de chantiers expérimentaux). Pour ces fonctions, l'état hydrique du sol traité au moment de son compactage doit être à la limite de la frontière « m/h », soit à environ $1,10 \times w_{OPN}$ tout en garantissant un $IPI \geq 8$ pour assurer une bonne traficabilité des engins et une portance minimale.

Pour la fonction protection contre l'érosion interne (EI), les résultats des études menées en laboratoire dans le cadre du remblai de Héricourt (*TerDOUEST*) et des digues du Vidourle et de Salin de Giraud permettent d'envisager le traitement à la chaux des sols fins A1, A2, A3 et certains A4 pour améliorer leur résistance à l'érosion interne. Néanmoins, pour les sols à forte plasticité A3 et A4 il convient de rappeler que la méthodologie de fabrication des mélanges et de leur mise en œuvre doit être validée par des essais en vraie grandeur avant toute utilisation sur chantier. On veillera à l'obtention d'une finesse de mouture satisfaisante, à l'obtention des teneurs en eau prescrites et au respect des objectifs de densification requis.

Pour la fonction évacuation (EV), c'est-à-dire la résistance à l'érosion de surface dans le cadre d'un écoulement à forte vitesse, il est encore trop tôt pour avancer des propositions. Des études complémentaires sont nécessaires. Toutefois, il est permis de penser que les sols fins A1 et A2, qui se prêtent bien au traitement à la chaux avec des exigences d'homogénéité et de performances élevées, devraient bénéficier de ce fait d'un avantage par rapport à d'autres types de sols.

B. PROPRIETES DES SOLS TRAITES A LA CHAUX

Outre la diminution de la teneur en eau permettant ainsi de meilleures conditions de mise en œuvre, l'incorporation de chaux provoque une série de réactions physico-chimiques au sein du matériau. Elles conduisent à la formation de composés cimentaires qui agissent comme un liant entre les particules. Grâce à ces réactions, les propriétés mécaniques qui en résultent sont améliorées dans des proportions parfois très importantes. Ces évolutions conduisent à une augmentation de la résistance mécanique, de la tenue à l'eau et au gel du composant sol-chaux et à un accroissement important de sa résistance aux phénomènes d'érosion interne et externe.

D'autre part, à condition que certaines conditions de teneur en eau et de mode de compactage soient respectées, l'ajout de chaux n'augmente pas la perméabilité d'un sol mais au contraire peut la diminuer. Ces conditions de mise en œuvre favorisent la formation de phases cimentaires compactes à l'échelle de la microstructure du sol traité et modifient sa porosité en diminuant significativement la quantité de macropores qui régissent sa perméabilité.

3. Propriétés mécaniques et hydrauliques des sols fins traités à la chaux

Les tableaux ci-après (Tableau 2 à Tableau 8) recensent, à titre indicatif, les valeurs de plusieurs propriétés mécaniques et hydrauliques relevées dans la bibliographie par comparaison avec les valeurs mesurées lors de la construction et du suivi des différents ouvrages expérimentaux de Rouen, du Vidourle (DigueELITE), des plots expérimentaux de Salin de Giraud et du chantier expérimental de Vlassenbroek, particulièrement bien documentés.

Les valeurs sont données pour le sol non traité et le même sol traité à différents temps de cure.

Les données bibliographiques sont essentiellement issues des documents référencés [11] à [21] dans la liste bibliographique donnée en fin de document. Pour avoir plus de précisions sur les conditions d'exécution des essais (teneur en eau, masse volumique, etc.) on se reportera à ces publications.

Le comportement des ouvrages fait l'objet d'un suivi dans le temps donnant lieu à des communications lors d'évènements particuliers tels que les manifestations « Diges » organisés par INRAE, les journées JNGG, ainsi qu'à des publications de la CIGB et du CFBR et dans des revues spécialisées. On se reportera à ces publications pour compléter les résultats figurant dans le présent document.

Dans la suite du document, le paragraphe 4 illustre sous forme graphique les propriétés hydrauliques à court terme des sols fins traités à la chaux qui sont présentées dans les tableaux 6 à 8. Le paragraphe 5 détaille les enseignements majeurs tirés des chantiers expérimentaux du Vidourle et de Salin de Giraud à propos de la résistance à l'érosion de surface d'un sol fin traité à la chaux en cas de surverse.

Enfin, le paragraphe 6 donne des informations complémentaires sur certaines propriétés particulières des sols traités à la chaux.

Tableau 2 : Propriétés mécaniques des sols fins traités à la chaux (tableau 1/4)

Paramètre étudié	Méthode d'essais	Commentaires	Cas de chantier	Sol et traitement	PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES (1/4)			
					Sol naturel	Résultats obtenus sur sol naturel et sol traité à la chaux à différents temps de cure		
Module de cisaillement maximal Gmax	Essais de laboratoire Méthode vibrationnelle	Données bibliographiques	Sol A1 traité à 2% CaO	0,2 GPa	0,8 GPa (7 jours)	1,3 GPa (28 jours)	2,8 GPa (90 jours)	
			Sol A1 traité à 4% CaO	-	0,6 GPa (7 jours)	1,4 GPa (28 jours)	2,4 GPa (90 jours)	
		Digue de Rouen	Sol A2 traité à 2,5% CaO	-	0,8 GPa (15 à 30 jours)	1,0 GPa (30 jours)	3,0 à 5,0 GPa (180 jours)	
	Digue du Vidourle	Sol A1 traité à 2% CaO	0,1 GPa	0,5 GPa (7 jours)	2,2 GPa (365 jours)			
		Module séquent sous contrainte de confinement de 150 kPa, essais non saturés			1,2 à 1,4 GPa (365 jours)			
			Module de référence sous chargement axial de référence (1 kPa)		50 MPa (30 jours)	110 MPa (365 jours)		
Module d'Young E	Essais de laboratoire en petites déformations (mesure avec jauge de contrainte collées sur échantillons)		Sol A2 traité à 2,5% CaO	3 à 5 MPa	30 à 50 MPa (60 jours)			
			Digue de Rouen		valeur stable pour des temps de cure supérieurs			
	Essais de laboratoire triaxiaux CD et CU en grandes déformations			1,6 MPa	37,8 MPa (28 jours)	52,7 MPa (180 jours)	81,6 MPa (380 jours)	
		Pressiomètre Ménard						
	Essais dilatométriques en forage NF P 94-443-1	4 cycles avec déviateur 0,25 MPa, -1,00 MPa, -1,25 MPa 1,25 MPa moyenne sur trois voies			cycle 1 : 560 MPa - cycle 2 : 480 MPa cycle 3 : 420 MPa - cycle 4 : 400 MPa (365 jours)			

Tableau 3 : Propriétés mécaniques des sols fins traités à la chaux (tableau 2/4)

Paramètre étudié	Méthode d'essais	Commentaires	Cas de chantier	Sol et traitement	PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES (2/4)	
					Sol naturel	Résultats obtenus sur sol naturel et sol traité à la chaux à différents temps de cure
Coefficient de Poisson ν	Essais de laboratoire		Digue de Rouen	Sol A2 traité à 2,5% CaO	$\approx 0,15$	valeur croissant avec la déformation jusqu'à 0,60 pour déformations de 0,3%
			Digue du Vidourle	Sol A1 traité à 2% CaO	0,29 à 0,36 (méthode Grindosonic)	-
			Digue de Salin de Giraud	Sol A1 traité à 2% CaO	0,19	(7 jours) 0,14 (28 jours) 0,15 (90 jours) 0,18 (90 jours)
Coefficient de compressibilité C_c	Essais œdométriques		Données bibliographiques	Sol A4 traité à 5% CaO	0,20 à 0,30	0,14 à 0,45
			Digue de Rouen	Sol A4 traité à 3% CaO	0,26	0,25 (7 jours) 0,23 (28 jours)
			Digue du Vidourle	Sol A2 traité à 2,5% CaO	0,16	valeur constante pour des temps de cure supérieurs (75 jours)
Coefficient de gonflement C_s	Essais œdométriques		Données bibliographiques	Sol A1 traité à 2 CaO %	0,042	0,053 (7 jours) 0,029 (28 jours)
			Digue de Rouen	Sol A1 traité à 2 CaO %	0,05 à 0,06	0,01 (3 jours)
			Digue du Vidourle	Sol A2 traité à 2,5% CaO	-	0,007 (75 jours) 0,007 (210 jours)
Contrainte de pré-consolidation σ_c	Essais œdométriques		Données bibliographiques	Sol A1 traité à 2% CaO	0,003	0,002 (7 jours) 0,001 (28 jours)
			Digue du Vidourle	Sol A4 traité à 5% CaO	32 à 100 kPa	490 à 660 kPa (3 jours)
			Digue du Vidourle	Sol A1 traité à 2% CaO	109 kPa	565 kPa (7 jours) 503 kPa (30 jours)

Tableau 4 : Propriétés mécaniques des sols fins traités à la chaux (tableau 3/4)

Paramètre étudié	Méthode d'essais	Commentaires	Cas de chantier	Sol et traitement	PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES (3/4)		
					Sol naturel	Résultats obtenus sur sol naturel et sol traité à la chaux à différents temps de cure	
Angle de frottement interne effectif ϕ'	Essais de laboratoire triaxiaux	Conditions CU valeurs de pics	Données bibliographiques	Sol A2 traité à 3% CaO	37°	35° (30 jours)	38° (730 jours)
		Digue de Rouen	Sol A2 traité à 2,5% CaO	-	37° (45 jours)	39° (405 jours)	
		Digue du Vidourle	Sol A1 traité à 2% CaO	33°	46° (7 jours)	42° (30 jours)	
		Digue du Vidourle	Sol A1 traité à 2% CaO	36°	39° (390 jours)	39° (390 jours)	
		Données bibliographiques	Sol A2 traité à 3% CaO	5 kPa (180 jours)	40 kPa (195 jours)	80 kPa (195 jours)	140 kPa (730 jours)
		Données bibliographiques	Sols A1 et A2	20 à 50 kPa (14 jours)	40 à 100 kPa (90 jours)	100 à 200 kPa (90 jours)	100 à 200 kPa (365 jours)
Cohésion effective c'	Essais de laboratoire triaxiaux	Conditions CU	Digue de Rouen (Essai De Bel et al. 2009)	Sol A2 traité à 2,5% CaO	20 kPa (30 jours)	60 kPa (30 jours)	300 kPa (225 jours)
		Digue de Rouen (essais Makkil et al. 2015; Fleureau et Lhoist 2011)	Sol A2 traité à 2,5% CaO	-	71 kPa (45 jours)	90 kPa (210 jours)	550 kPa (450 jours)
		Digue du Vidourle	Sol A1 traité à 2% CaO	11 kPa	28 kPa (7 jours)	90 kPa (210 jours)	110 kPa (405 jours)
		Digue de Rouen (essais Makkil et al. 2015; Fleureau et Lhoist 2011)	Sol A2 traité à 2,5% CaO	20 kPa	75 kPa (75 jours)	110 kPa (390 jours)	
		Essais de laboratoire triaxiaux	Conditions CD valeurs de pics				

Tableau 5 : Propriétés mécaniques des sols fins traités à la chaux (tableau 4/4)

Paramètre étudié	Méthode d'essais	Commentaires	Cas de chantier	Sol et traitement	PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES (4/4)			
					Résultats obtenus sur sol naturel et sol traité à la chaux à différents temps de cure			
Résistance à la compression simple R_c	Essais de laboratoire NF EN 13286-41	Digue de Rouen traité à 2,5% CaO	Sol A2 traité à 2,5% CaO	0,35 MPa	0,67 MPa (7 jours)	0,84 MPa (30 jours)	1,61 MPa (180 jours)	2,64 MPa (365 jours)
			Digue du Vidourle traité à 2% CaO	0,21 MPa	0,32 MPa (7 jours)	0,39 MPa (28 jours)	0,53 MPa (90 jours)	0,73 MPa (180 jours)
			Digue de Salin de Giraud traité à 2% CaO	0,17 MPa	0,23 MPa (7 jours)	0,28 MPa (28 jours)	0,28 MPa (90 jours)	1,20 MPa (365 jours)
		Chantier de Vlaamsbroek traité à 2% CaO	Sol A1 traité à 2% CaO	-	0,40 MPa (7 jours)	0,60 MPa (28 jours)	1,10 MPa (90 jours)	1,10 MPa (180 jours)
			Digue de Rouen traité à 2,5% CaO	0,018 MPa	0,048 MPa (7 jours)	0,070 MPa (30 jours)	0,110 MPa (180 jours)	0,272 MPa (365 jours)
			Digue du Vidourle traité à 2% CaO	0,018 MPa	0,027 MPa (7 jours)	0,054 MPa (90 jours)	0,063 MPa (180 jours)	0,150 MPa (365 jours)
Résistance à la traction indirecte R_{tr}	Essais de laboratoire NF EN 13286-42 NF EN 13286-43	Digue de Salin de Giraud traité à 2% CaO	Sol A1 traité à 2% CaO	-	0,020 MPa (7 jours)	0,030 MPa (28 jours)	0,041 MPa (90 jours)	

Tableau 6 : Propriétés hydrauliques des sols fins traités à la chaux (tableau 1/3)

PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES (1/3)					
Paramètre étudié	Méthode d'essais	Commentaires	Cas de chantier	Sol et traitement	Résultats obtenus sur sol naturel et sol traité à la chaux à différents temps de cure
Perméabilité saturée k	Données bibliographiques			Sol A1 traité à 2% CaO	8 × 10 ⁻¹¹ m/s (28 jours)
				k	8 × 10 ⁻¹¹ m/s (180 jours)
		Essais de laboratoire triaxiaux	Conditions CD	Sol A2 traité à 3% CaO	4 × 10 ⁻¹¹ m/s (28 jours)
				Sol A2 traité à 5% CaO	4 × 10 ⁻¹¹ m/s (28 jours)
				Sol A3 traité à 4% CaO	4 × 10 ⁻¹¹ m/s (28 jours)
	Digue de Rouen	Digue de Rouen		Sol A2 traité à 2,5% CaO	1,1 × 10 ⁻⁹ m/s (28 jours)
				Digue du Vidourle	6,8 × 10 ⁻⁹ m/s (28 jours)
		Digue du Vidourle		Sol A1 traité à 2% CaO	2,2 × 10 ⁻⁸ m/s (28 jours)
				Sol A1 traité à 3% CaO	1,0 × 10 ⁻⁸ m/s (28 jours)
				Essais en forage dans tube crépiné (sonde 2 packers)	7,7 × 10 ⁻¹⁰ m/s (28 jours)
	Essais in situ	Digue de Rouen	Sol A2 traité à 2,5% CaO	1,5 × 10 ⁻⁹ m/s (180 jours)	4,5 × 10 ⁻⁹ m/s (180 jours)
					8,5 × 10 ⁻⁹ m/s (380 jours)

Tableau 7 : Propriétés hydrauliques des sols fins traités à la chaux (tableau 2/3)

Paramètre étudié	Méthode d'essais	Commentaires	Cas de chantier	PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES (2/3)		
				Sol et traitement	Sol naturel	Résultats obtenus sur sol naturel et sol traité à la chaux à différents temps de cure
Contrainte critique d'érosion de conduit $\tau_{c,HET}$	Essais de laboratoire Hole Erosion Test (HET) XP P94-065	Digue de Rouen	Sol A2 traité à 2,5% CaO	179 Pa	contrainte critique d'érosion > limite de l'essai (28 jours et 180 jours)	
		Digue du Vidourle	Sol A1 traité à 2% CaO	95 Pa	2030 Pa (2 jours)	contrainte critique d'érosion > limite de l'essai (28 jours)
		Digue de Salin de Giraud	Sol A1 traité à 2% CaO	35 Pa et 139 Pa	179 Pa (7 jours)	1815 Pa (28 jours + 32 jours d'immersion)
		Chantier de Vlassenbroek	Sol A1 traité à 2% CaO	154 Pa	634 Pa (8 jours)	833 Pa (90 jours)
		Digue de Rouen	Sol A2 traité à 2,5% CaO	4,02	Non calculée sur sol traité après 28 jours contrainte critique > limite de l'essai	1080 Pa (28 jours)
	Essais de laboratoire Hole Erosion Test (HET) XP P94-065	Digue du Vidourle	Sol A1 traité à 2% CaO	3,45	3,24 (2 jours)	Non mesurée sur sol traité après 28 jours contrainte critique > limite de l'essai (3,27 (28 jours + 32 jours d'immersion))
		Digue de Salin de Giraud	Sol A1 traité à 2% CaO	4,17 et 3,90	4,25 (7 jours)	6,09 (90 jours)
		Chantier de Vlassenbroek	Sol A1 traité à 2% CaO	3,56	5,15 (8 jours)	4,88 (28 jours)
Caractérisation de la résistance à l'érosion interne						
Indice d'érosion de Fell $I_{e,HET}$						

Tableau 8 : Propriétés hydrauliques des sols fins traités à la chaux (tableau 3/3)

PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES (2/3)						
Paramètre étudié	Méthode d'essais	Commentaires	Cas de chantier	Sol et traitement	Résultats obtenus sur sol naturel et sol traité à la chaux à différents temps de cure	
					Sol naturel	Sol traité à la chaux(âge)
Contrainte critique d'érosion de surface	Essais JET ASTM D 5852	Essais JET en laboratoire	Digue de Rouen	Sol A2 traité à 2,5% CaO	5,9 Pa à 17,1 Pa (suivant la contrainte critique appliquée en début d'essai)	Contrainte critique > limite de l'essai (28 jours)
$\tau_{c,JET}$		Essais JET in situ	Digue du Vlidourle	Sol A1 traité à 2% CaO		Contrainte critique > limite de l'essai
		Essais JET en laboratoire	Digue de Salin de Giraud	Sol A1 traité à 2% CaO	0 Pa	135 Pa (7 jours) 600 Pa (90 jours)
		Essais JET in situ	Chantier de Vlas-senbroek	Sol A1 traité à 2% CaO		165 Pa à 225 Pa (330 jours)
		Essais en laboratoire	Digue de Rouen	Sol A2 traité à 2,5% CaO		Non calculé sur le sol traité car contrainte critique > limite de l'essai
		Essais in situ	Digue du Vlidourle	Sol A1 traité à 2% CaO	17 à 45 cm ³ /N.s	Non calculé sur le sol traité car contrainte critique > limite de l'essai
Coefficient d'érosion de Hanson $k_{d,JET}$	Essais JET ASTM D 5852	Essais en laboratoire dispositif LJET	Digue de Salin de Giraud	Sol A1 traité à 2% CaO	1 cm ³ /N.s	Non calculé sur le sol traité car contrainte critique > limite de l'essai
		Essais in situ	Chantier de Vlas-senbroek	Sol A1 traité à 2% CaO		0,3 à 3,3 cm ³ /N.s (330 jours)

Caractérisation de la résistance à l'érosion interne

4. Compléments relatifs à certaines propriétés hydrauliques

Dans le contexte des ouvrages hydrauliques, quelques éléments illustratifs des principaux facteurs permettant de caractériser le comportement d'un sol fin traité à la chaux en présence d'eau sont donnés dans ce paragraphe. Ces résultats proviennent d'essais de laboratoire réalisés dans le cadre de travaux académiques ou de réalisation de chantiers expérimentaux.

4.1 Rétention d'eau

Les courbes de rétention d'eau obtenues dans les cas des sols fins A1, A2 et A3 non traités et traités à la chaux suivant plusieurs dosages et temps de cure sont données Figure 8. Cette représentation est issue du document « *Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel* » [11]. Les valeurs de succion sont déterminées soit par la méthode au papier filtre (PF) ou par la méthode au potentiomètre (WP) par mesure de l'humidité relative.

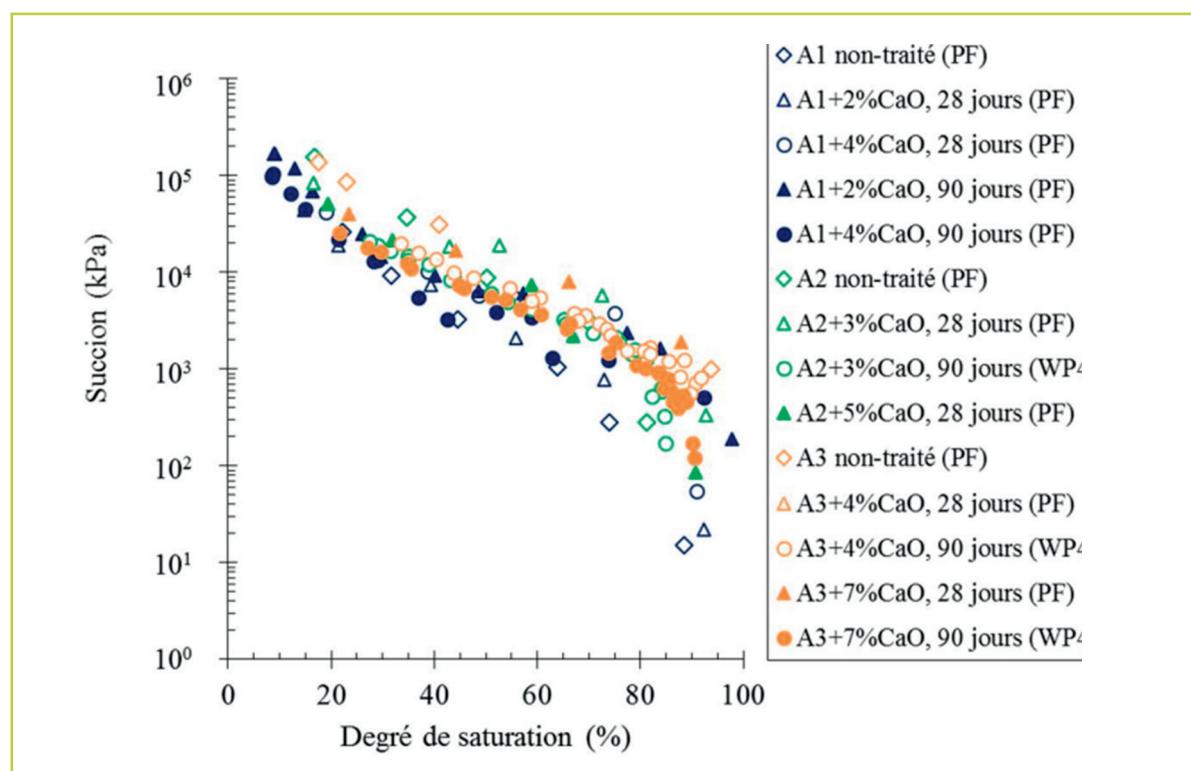


Figure 8 : Courbes de succion [11]

Suivant l'auteur cette représentation complète des différents cas de sols fins non traités et traités à la chaux montre que :

- les courbes de rétention d'eau des sols A2 et A3 non traités et traités à la chaux se superposent,
- les courbes de rétention du sol A1 non traité et traité à la chaux se situent légèrement en-dessous des cas des sols A2 et A3, probablement en raison de la plus faible argilosité du sol A1,
- pour les sols A2 et A3 le traitement à la chaux a peu d'effet sur les courbes de rétention d'eau, quel que soit le dosage en chaux et le délai de cure,
- pour le sol le moins argileux (sol A1) on ne note pas de différence entre le sol non traité et le sol traité à la chaux pour un haut niveau de succion ($Sr < 40\%$),
- pour de plus faibles valeurs de succion ($Sr > 40\%$) le sol A1 traité à la chaux se situe à un niveau légèrement supérieur à celui du sol non traité; cette observation démontre probablement une structure plus granulaire du sol traité que celle du sol non traité.

4.2 Perméabilité

Avant la réalisation des récentes études conduites sur les sols traités à la chaux, les connaissances sur la perméabilité des sols traités étaient peu développées. Souvent les conclusions d'une étude à l'autre étaient contradictoires, voire controversées. En particulier, il était communément admis, a priori, que le traitement d'un sol à la chaux avait pour effet d'augmenter sa perméabilité en raison d'une diminution de la masse volumique du sol traité par rapport à celle du même sol non traité à énergie de compactage constante. Il est donc apparu important d'entreprendre de nouvelles études afin d'améliorer les connaissances sur la perméabilité des sols traités à la chaux, paramètre à maîtriser nécessairement dans la construction d'ouvrages hydrauliques.

Les essais de laboratoire menés dans le cadre du projet SOTREDI (SOil TREATment for Dikes) entrepris par Lhoist entre 2005 et 2011 ont montré que la perméabilité d'un sol A2 ($I_p = 12,7$ et $V_{BS} = 3,1$ g/100g) traité à la chaux était équivalente à celle obtenue sur le même sol sans traitement, à condition de le compacter dans un état humide et avec un mode de compactage par pétrissage. L'étude réalisée a consisté à comparer la perméabilité mesurée en laboratoire au perméamètre à charge constante avec :

- deux modes de compactage : classique à la dame Proctor Normal (compactage dynamique) et avec une dame Proctor Normal de conception modifiée de façon à simuler le mode de compactage par pétrissage développé par un compacteur à pieds dameurs,
- deux teneurs en eau : w_{OPN} et $w_h (\approx 1,2 \times w_{OPN})$.

Les essais ont été exécutés sur le sol naturel et sur le sol traité à 2 % et 3 % de chaux après une cure de 28 jours à 20°C. Pour le sol traité à 2 % CaO, des mesures ont également été réalisées après des cures de 28 jours + 2 mois d'immersion et 28 jours + 5 mois d'immersion dans l'eau, toujours à 20 °C. Les résultats sont donnés par le Tableau 9 et la Figure 9.

Tableau 9 : Perméabilité d'un limon A2 non traité et traité à 2 % CaO mesurée à w_{OPN} et w_h en fonction du mode de compactage

Mode de compactage	Sol	Temps de cure	Perméabilité obtenue à w_{OPN} (m/s)	Perméabilité obtenue à $w_h (\approx 1,2 \times w_{OPN})$ (m/s)
Compactage dynamique	Non traité		12×10^{-9}	$< 0,1 \times 10^{-9}$
	Traité 2 % CaO	28 jours	33×10^{-9}	$4,9 \times 10^{-9}$
		28 jours + 2 mois immersion	33×10^{-9}	$4,8 \times 10^{-9}$
		28 jours + 5 mois immersion	16×10^{-9}	$4,9 \times 10^{-9}$
	Traité 3 % CaO	28 jours	42×10^{-9}	$5,2 \times 10^{-9}$
Compactage par pétrissage	Non traité			$< 0,1 \times 10^{-9}$
	Traité 2 % CaO	28 jours	$5,7 \times 10^{-9}$	$0,1 \times 10^{-9}$
		28 jours + 2 mois immersion	$7,8 \times 10^{-9}$	$0,11 \times 10^{-9}$
		28 jours + 5 mois immersion	$6,3 \times 10^{-9}$	$< 0,1 \times 10^{-9}$
	Traité 3 % CaO	28 jours	47×10^{-9}	$3,5 \times 10^{-9}$

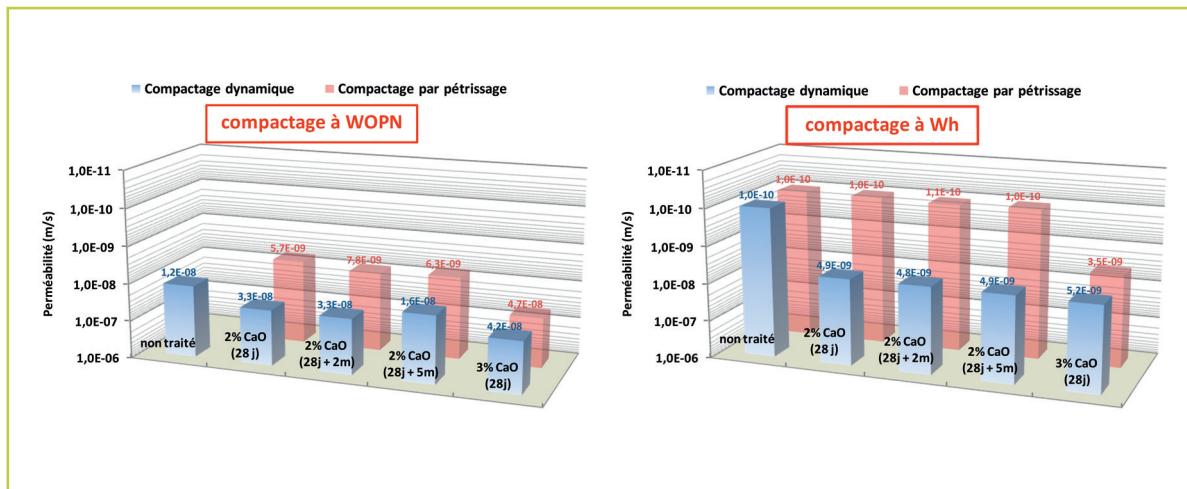


Figure 9 : Évolution de la perméabilité d'un limon A2 non traité et traité à 2 % de CaO en fonction du temps de cure et du mode de compactage

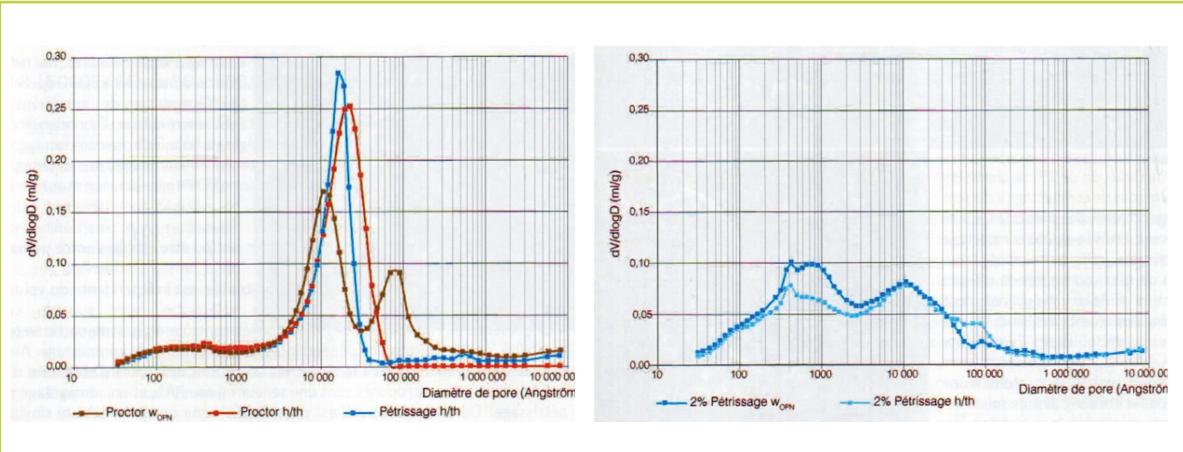
Les résultats confirment que pour le sol naturel un compactage dans un état hydrique élevé apporte une perméabilité plus faible que celle correspondant à un compactage à w_{OPN} (passage de $k = 12 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ pour un compactage à w_{OPN} , à $k < 0,1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ pour un compactage à w_h). Pour le sol traité à la chaux et pour un compactage à w_{OPN} les perméabilités obtenues, quel que soit le mode de compactage (dynamique ou pétrissage), sont du même ordre de grandeur que celle déterminée sur le sol naturel par compactage dynamique à cette teneur en eau. Pour un compactage côté humide, quelle que soit la modalité concernée (mode de compactage, traitement, cure), la perméabilité mesurée à wh est toujours plus faible que celle déterminée à w_{OPN} .

On peut donc en conclure qu'un sol fin de classe A2 traité à la chaux a le même comportement vis-à-vis de la perméabilité que le sol non traité.

Le facteur déterminant dans l'obtention de faibles valeurs de perméabilité concerne le mode de compactage. Un compactage par pétrissage conduit toujours, grâce à une densification plus efficace et à un remaniement du sol par cisaillement, à l'obtention de perméabilités plus faibles que celles obtenues avec un mode de compactage au compacteur vibrant à cylindre lisse. Dans le cas de teneur en eau élevée, la perméabilité du sol traité à la chaux (comprise entre $3 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ et $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$) est du même ordre de grandeur que la perméabilité du sol non traité à cette même teneur en eau.

Dans le cadre de cette étude, la mesure de la perméabilité a été complétée par des investigations à l'échelle de la microstructure du mélange sol-chaux au moyen d'essais de porosimétrie (Figure 10) qui ont permis de mettre en évidence que :

- pour un sol A2 non traité, la distribution porale est très différente en fonction de la teneur en eau de compactage ; pour un mode de compactage dynamique, un compactage à w_{OPN} conduit à une répartition porale bimodale (présence de 2 classes de pores respectivement de 0,1 à 3 µm d'une part et de 3 µm à 0,1 mm d'autre part). Le même mode de compactage, mais avec une teneur en eau élevée ($w_h \approx 1,2 \times w_{OPN}$) a pour conséquence de faire disparaître les macropores entraînant une diminution de la perméabilité du sol. Dans cette condition de teneur en eau élevée, on observe qu'un compactage par pétrissage entraîne une diminution du diamètre des micropores, réduisant ainsi encore plus la perméabilité du sol.
- le traitement du même sol à 2 % de chaux provoque l'apparition d'une nouvelle classe de pores (nanopores de très petites dimensions comprises entre 0,003 µm et 0,3 µm). Dans le cas du sol traité et compacté par pétrissage à w_{OPN} ou w_h , on observe que la distribution porale est de type trimodale avec une très forte diminution des macropores qui régissent la perméabilité.



Distribution porale du limon A2 non traité en fonction des conditions de compactage (teneur en eau et mode de compactage)

Distribution porale du limon A2 traité à 2 % CaO en fonction des conditions de compactage (teneur en eau et mode de compactage)

Figure 10 : Distribution porale du limon A2 non traité et traité à 2 % CaO

Les observations obtenues grâce à la porosimétrie ont été confirmées par l'étude de la morphologie et de la microstructure du sol naturel ou traité réalisée au microscope électronique à balayage. En particulier, on a pu déduire de ces observations que dans le cas du sol traité à la chaux, le mode de compactage par pétrissage à teneur en eau élevée wh favorise la formation de liaisons cimentaires compactes entre les grains de sol, conduisant ainsi à de faibles valeurs de perméabilité.

Il est donc possible de conclure que la perméabilité des sols fins traités suit des règles similaires à celles qui s'appliquent aux sols fins non traités, à savoir que les conditions les plus favorables pour l'obtention d'un faible niveau de perméabilité sont les suivantes :

- les matériaux mis en œuvre doivent être préparés du côté humide de w_{OPN} entre 1,05 et $1,15 \times w_{OPN}$
- le compactage doit s'accompagner d'une opération de pétrissage, par exemple à l'aide d'un compacteur vibrant à pieds dameurs.

4.3 Résistance à l'érosion interne

La résistance à l'érosion interne d'un sol est évaluée par l'essai HET (Hole Erosion Test) réalisé en laboratoire. Il fait l'objet de la norme NF XP P94-065. L'essai est décrit dans le document « *L'essai d'érosion de conduit HET Hole Erosion Test* » [23] et est utilisé par plusieurs laboratoires en France (Figure 11). L'essai peut être réalisé sur des échantillons de sol intacts obtenus par carottage ou sur des éprouvettes reconstituées en laboratoire. Le dispositif permet de déterminer la valeur de la contrainte critique d'érosion de conduit qui correspond au seuil d'initiation de l'érosion, et le coefficient d'érosion correspondant à la cinétique ; le sol peut être classé qualitativement suivant sa vitesse d'érosion dans la classification de Fell.

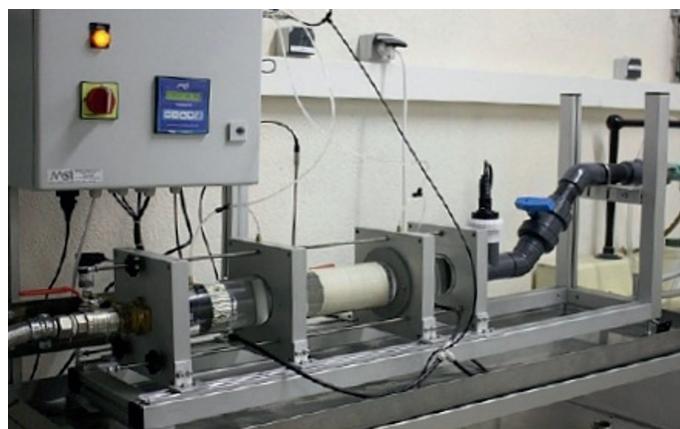


Figure 11 : Dispositif de mesure de résistance à l'érosion interne (essai HET)(photo INRAE)

La Figure 12 donne un exemple de résultats obtenus sur un sol A1 non traité et traité à 2 % de chaux pour des temps de cure compris entre 3 et 240 jours.

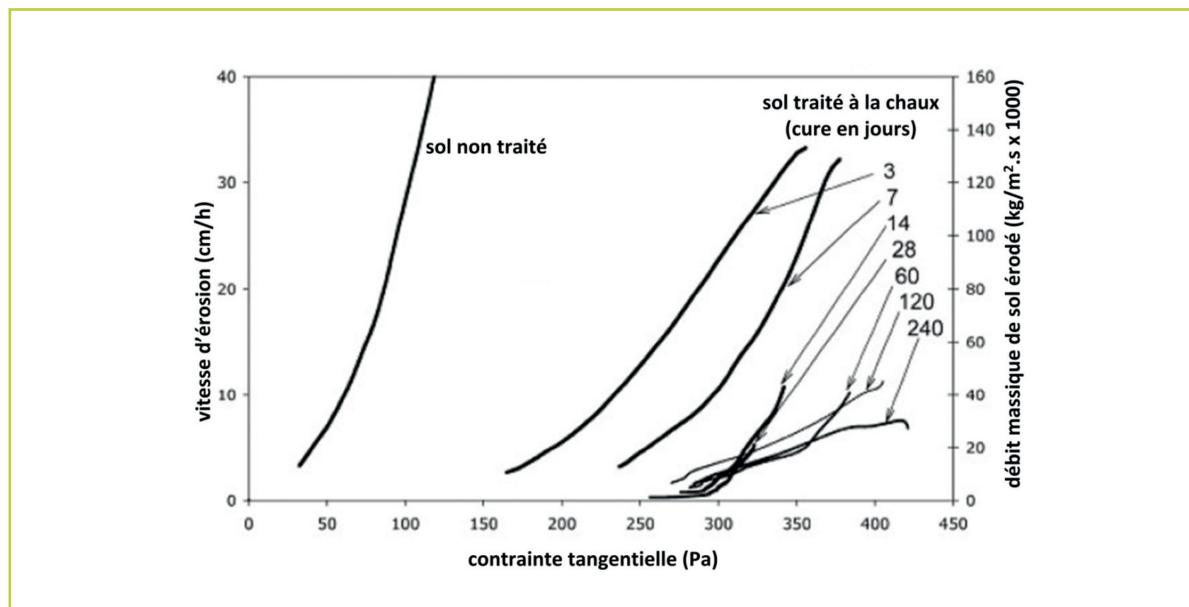


Figure 12 : Courbes d'érosion de conduit (essai HET) sur limon argileux du Rhône (sol A1) non traité et traité à 2 % de chaux après différents temps de cure

Les courbes d'érosion qui sont présentées permettent de bien différencier le comportement du sol traité à la chaux par rapport au sol naturel vis-à-vis d'un écoulement interne. La contrainte critique, qui correspond à l'initialisation du phénomène d'érosion, passe de 53 Pa dans le cas du sol non traité à 190 Pa pour le sol traité après seulement un temps de cure de 3 jours. Pour le sol traité à la chaux, la valeur de la contrainte critique continue d'augmenter, principalement pour des temps de cure compris entre 3 et 14 jours pour atteindre environ 300 Pa. Pour des temps de cure supérieurs, la contrainte critique reste stable à une valeur élevée ; en revanche, la vitesse d'érosion diminue très sensiblement. En présence d'eau les performances de résistance à l'érosion interne pour le sol traité à la chaux diminuent légèrement mais restent à un niveau très élevé et nettement supérieur à celui observé sur le sol non traité. La Figure 13 donne un exemple de résultats obtenus avec le sol mis en œuvre sur la digue du Vidourle. La contrainte critique d'érosion de conduit passe de 95 Pa pour le sol non traité à 2030 Pa pour le sol traité après une courte période de cure de 2 jours. Après une période de cure plus longue suivie d'un périodes d'immersion de l'échantillon (28 jours + 32 jours d'immersion), la contrainte critique reste à un niveau élevé de 1815 Pa.

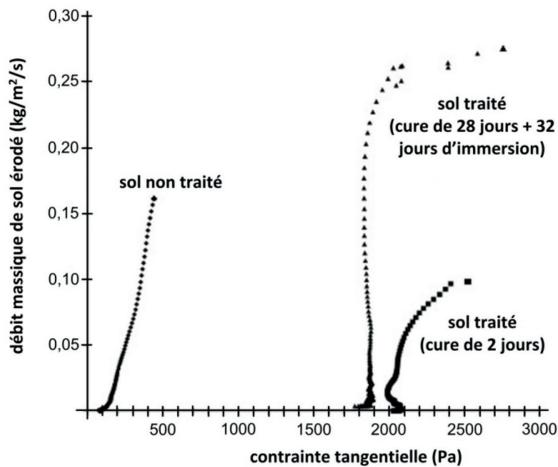


Figure 13 : Courbes d'érosion de conduit (essai HET) sur le sol A1 de la digue du Vidourle non traité et traité à 2 % de chaux après une cure en état immergé

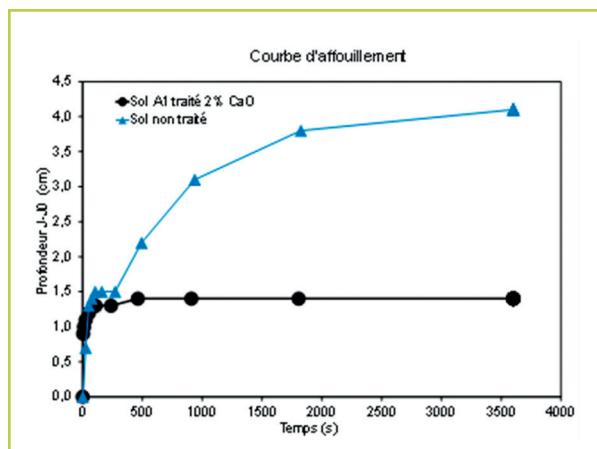
4.4 Résistance à l'érosion de surface

Pour caractériser la résistance à l'érosion de surface, l'appareillage JET (Jet Erosion Test) dérivé de la norme ASTM 5852 [24] est utilisé soit en laboratoire soit in situ car facilement transportable. À partir de la mesure de la profondeur d'affouillement engendrée sous l'action d'un jet d'eau impactant perpendiculairement la surface du sol, la contrainte critique d'érosion de surface est déterminée ainsi que le coefficient d'érosion de Hanson.

La Figure 14 montre le dispositif JET (vue de gauche) et un résultat de la mesure in situ de la profondeur d'affouillement obtenu sur le chantier expérimental de Vlassenbroek sur un limon A2 traité à 2 % de chaux (vue de droite).



Dispositif de mesure de résistance à l'érosion de surface pouvant être utilisé en laboratoire ou in situ (photo INRAE)



Courbes d'affouillement obtenues sur un sol A2 traité à 2 % de chaux après 2 ans et 7 mois de cure et sur sol non traité (chantier expérimental de Vlassenbroek - mesures INRAE- juin 2022)

Figure 14 : Détermination in situ de la résistance à l'érosion de surface (essai JET)

5. La résistance à l'érosion de surface par surverse d'un sol traité à la chaux

5.1 Principe de l'essai pour déterminer la résistance à l'érosion de surface par surverse

Les différents essais disponibles aujourd'hui pour quantifier la résistance à l'érosion de surface d'un sol ne sont pas adaptés au phénomène de surverse.

- En l'absence de corrélation établie entre la résistance à l'érosion interne et l'érosion de surface, l'essai du Hole Erosion Test [25] ne permet pas de conclure.
- L'essai in situ de JET est intéressant, car il est représentatif de ce qui se passe en pied de digue, et donne un résultat quantitatif [26]. Toutefois, le résultat du JET n'est pas actuellement utilisé pour le dimensionnement car il n'est pas suffisamment représentatif de l'action de l'eau sur le talus lors d'une surverse.

Il est donc problématique actuellement de qualifier un sol constitutif d'un tronçon de digue existant vis-à-vis de sa résistance à la surverse à partir des essais cités ci-dessus.

Pour cette raison, dans le cadre du projet DigueELITE, le centre d'INRAE d'Aix-en-Provence a développé un simulateur de surverse de terrain. Cet appareillage consiste à provoquer un écoulement à surface libre sur forte pente dans un canal délimité entre deux parois latérales posées ou fichées sur la crête, la pente du talus aval et le pied de talus de l'ouvrage (Figure 15). Un dispositif de mesure permet de quantifier l'érosion de surface observée entre les deux parois latérales. Ce simulateur a été utilisé en 2016 et 2017 sur le démonstrateur du Vidourle, puis en 2018 sur les plots expérimentaux de Salin de Giraud.

Une série de séquences d'écoulements d'une durée unitaire de 30 à 60 minutes est réalisée en augmentant progressivement le débit à chaque séquence. L'érosion résultant de chaque séquence d'écoulement est mesurée. La norme ASTM D6460 [27], dont l'essai consiste à simuler un écoulement de surverse en laboratoire, a servi à dimensionner le simulateur de surverse et le protocole expérimental associé.



Vue générale d'un essai de surverse (Salin de Giraud, mai 2018) (photo Lhoist)



Vue d'un écoulement à 420 l/s/m sur un sol traité à la chaux (Salin de Giraud, mai 2018) (photo INRAE)

Figure 15 : Réalisation d'essais de surverse avec le dispositif expérimental d'INRAE

Dans cet exemple, la phase initiale est réalisée avec un débit nominal de 95 l/s/m et la phase finale avec un débit de 570 l/s/m. Pour le débit maximal, la lame d'eau en crête est d'environ 0,30 m et la vitesse en pied de talus de l'ordre de 6 m/s. À chaque palier de débit la sollicitation hydraulique est déterminée en mesurant le débit entrant, la vitesse de l'écoulement et la hauteur d'eau (Figure 16).

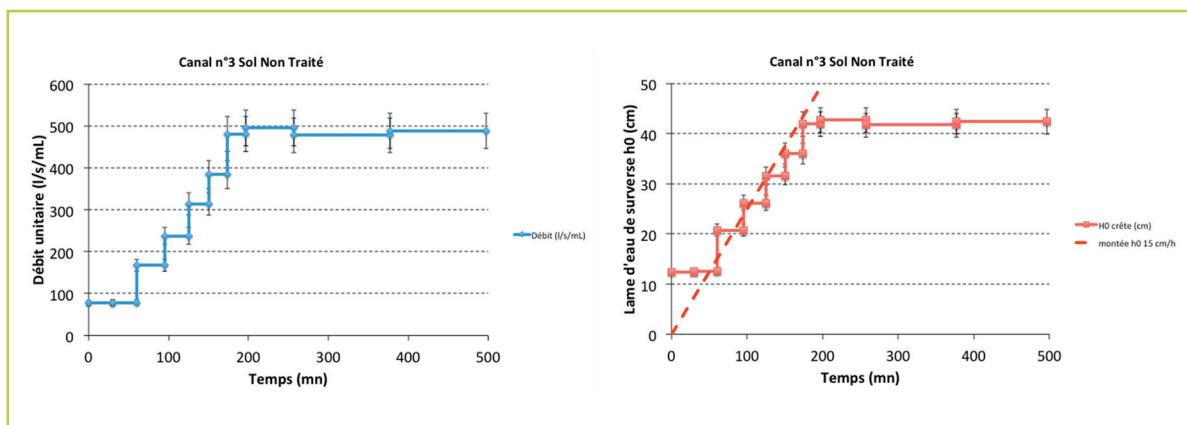
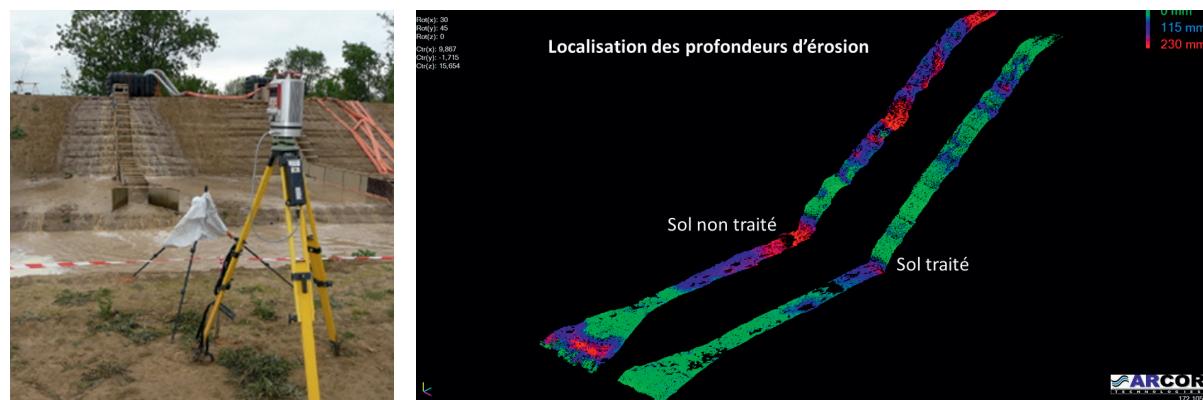


Figure 16 : Exemple de sollicitations hydrauliques obtenues avec le dispositif INRAE sur les plots expérimentaux de Salin de Giraud (mai 2018) ; paliers de débits à gauche, hauteur et vitesse de montée de lame d'eau déversante à droite

Après chaque séquence correspondant à une valeur de débit, la quantité de sol érodée est mesurée suivant différentes techniques ; la plus précise utilise un scanner 3D de type LIDAR terrestre, dont le principe consiste à mesurer à très haute résolution des distances par réflexion d'une onde lumineuse sur un objet. Sur ce principe, le système SMDE « Système de Mesure et de Détection de l'Érosion » a été développé par la société ARCOR Technologies et utilisé dans le cadre du projet DigueELITE (Figure 17). Avec son logiciel de post traitement, ce dispositif permet de calculer dans un système de coordonnées absolues les coordonnées des points scannés avec une résolution inférieure au millimètre, de lever la surface interne des canaux entre chaque palier de débit (Figure 17) et de quantifier l'érosion.



Scanner 3D LIDAR (photo DigueELITE) Qualification de l'érosion de surverse sur les deux canaux d'essai sur le démonstrateur du Vidourle par le système SMDE (mai 2017)

Figure 17 : Dispositif in situ du SMDE

Après chaque séquence d'écoulement, les indicateurs suivants sont calculés :

- **volume érodé (m^3)** : quantité de matière érodée mesurée sur une surface donnée,
- **érosion unitaire (m^3/m^2)** : quantité de matière érodée mesurée par unité de surface [*],
- **profondeur d'érosion (m) ponctuelle, moyenne ou maximale** : valeur de l'épaisseur de la couche érodée mesurée en un point, en moyenne ou maximale pour une surface donnée.

[*] : cet indicateur correspond au CSLI (Clopper Soil Loss Index de la norme ASTM D6460 [27]) ; il est assimilable à une érosion moyenne ou à une épaisseur de couche érodée moyenne.

5.2 Synthèse des résultats des essais de surverse réalisés sur le démonstrateur du Vidourle et des plots expérimentaux de Salin de Giraud

Dans les deux cas de chantiers sur lesquels le dispositif a été utilisé, on observe un lessivage de la partie superficielle de l'ouvrage lors de la première séquence d'écoulement à faible débit. Sur le démonstrateur du Vidourle, la partie superficielle du remblai, non revêtue de terre végétale et altérée par les conditions météorologiques pendant une période de cure de 10 mois, a été érodée dès le premier écoulement. De même, sur les plots expérimentaux de Salin de Giraud, la couche de terre végétale non enherbée a été érodée dès le premier écoulement.

Après ce lessivage de la surface du talus, le comportement du sol, non traité ou traité à la chaux, est très différencié sous l'effet des séquences successives d'écoulement à débit croissant.

Les résultats obtenus sur le démonstrateur du Vidourle donnés à la Figure 18 illustrent le phénomène observé.

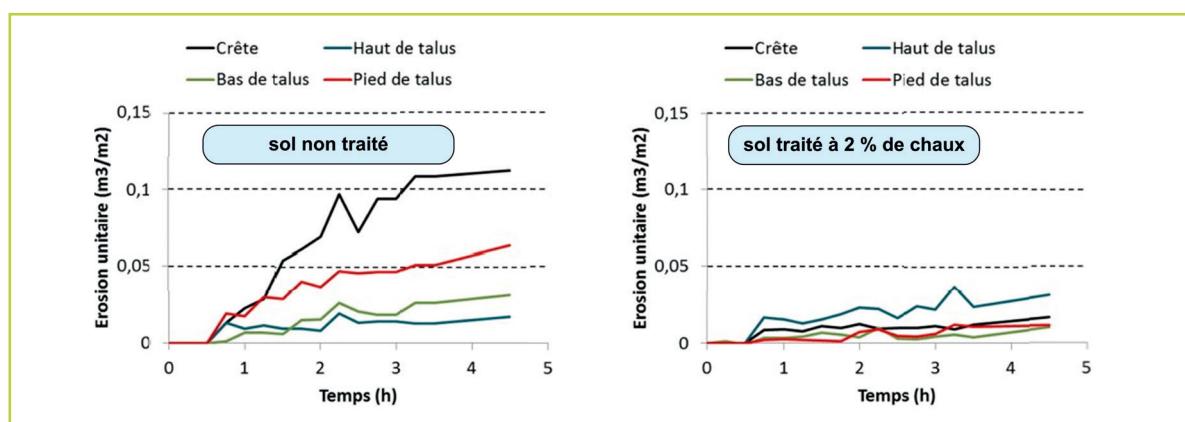


Figure 18 : Érosion unitaire en fonction du temps à débit d'écoulement croissant obtenue sur les sols non traité et traité à 2 % de chaux (démonstrateur du Vidourle, avril 2016)

Dans le cas du sol traité à la chaux, l'érosion unitaire reste faible quelle que soit la zone concernée (crête de digue, parties haute et basse du talus aval et pied de digue). Comparativement, le sol naturel présente une forte érosion surtout localisée au niveau de la crête de digue et du pied de talus. Dans ces deux zones l'érosion du sol non traité est 5 à 10 fois supérieure à celle du sol traité.

La Figure 19 donne les valeurs des profondeurs d'érosion moyenne et maximale mesurées sur les plots de Salin de Giraud en fonction des différentes séquences d'écoulements. L'épaisseur de terre végétale comprise entre 0,30 et 0,40 m y est reportée. Pour les deux cas de sols, au débit minimum, la terre végétale s'érode rapidement à une vitesse de l'ordre de 60 cm/h.

Pour le sol non traité on constate, après le lessivage de la couche de terre végétale, que l'érosion se déclenche à partir d'une lame d'eau d'environ 0,40 m, se poursuit de façon continue puis s'accélère après 3 heures d'écoulement pour atteindre une vitesse d'érosion de 12 cm/h.

Pour le sol traité à la chaux, seule la couche de terre végétale est érodée. Le composant sol-chaux ne subit pas d'érosion significative, quels que soient le débit et la durée de l'écoulement qui s'est prolongé jusqu'à 8 heures 30 environ dont 5 heures 30 à un débit unitaire d'environ 370 l/s/ml correspondant à une lame d'eau déversante d'environ 0,35 m.

La photographie Figure 20 montre l'état des canaux d'écoulement à la fin des essais.

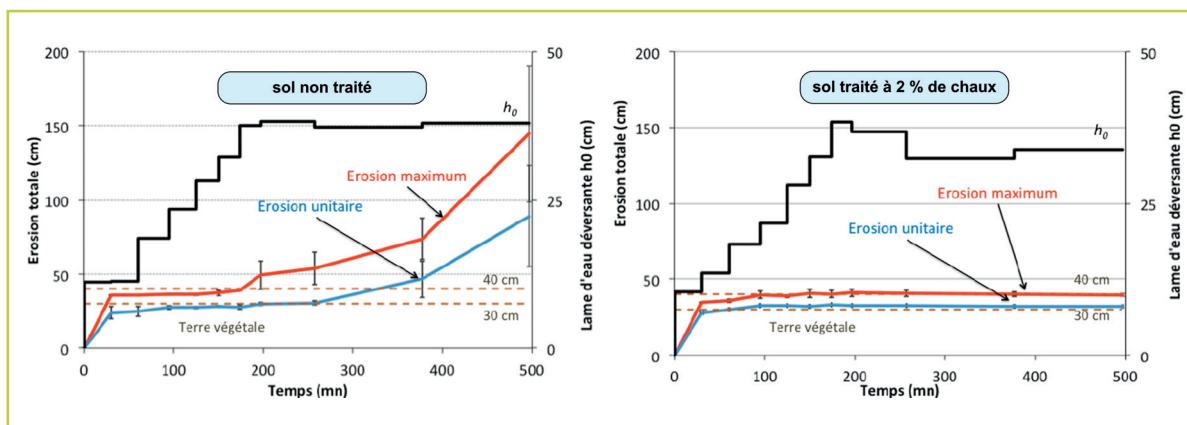


Figure 19 : Érosion unitaire et érosion maximale en fonction du temps à débit d'écoulement croissant obtenu sur les sols non traité et traité à 2 % de chaux (plots expérimentaux de Salin de Giraud, mai 2018)

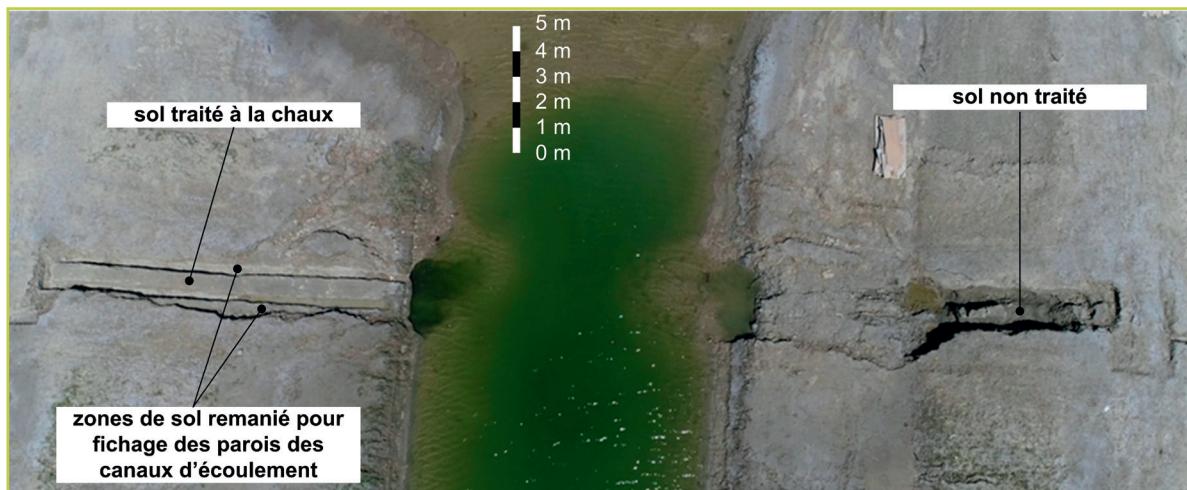


Figure 20 : Plots expérimentaux de Salin de Giraud ; vue aérienne après les essais de surverse et le démontage des canaux de déversement (l'échelle est donnée à titre indicatif)

5.3 Conclusions sur l'évaluation de la résistance à l'érosion de surface par surverse d'un sol traité à la chaux

Les résultats acquis lors des essais réalisés sur le démonstrateur du Vidourle et sur les plots expérimentaux de Salin de Giraud ont permis de comparer la résistance à l'érosion de surface d'un sol traité à la chaux avec celui du même sol mis en œuvre à l'état naturel.

Dans les conditions suivantes des essais :

- pour le démonstrateur du Vidourle :

- débit d'eau maximal :	570 l/s/m
- vitesse maximale :	6 m/s
- hauteur de lame d'eau en crête :	30 cm
- volume d'eau cumulé déversé par plot :	# 6 000 m ³ (avril 2016)

- pour les plots expérimentaux de Salin de Giraud :

- | | |
|--|--|
| - débit d'eau maximal : | 400 l/s/m |
| - vitesse maximale : | 5 m/s (sol traité) et 4 m/s (sol non traité) |
| - hauteur de lame d'eau en crête : | 40 cm |
| - volume d'eau cumulé déversé par plot : | # 10 000 m ³ |

Les différences de comportement constatées sont les suivantes :

- pour le démonstrateur du Vidourle :

- au niveau de la crête de l'ouvrage, l'érosion du sol non traité est 6 à 7 fois plus grande que celle du même sol traité à la chaux
- sur la moitié supérieure du talus, les deux sols s'érodent de façon similaire,
- sur la moitié inférieure du talus l'érosion du sol non traité est 3 fois plus grande que celle du sol traité,
- en pied de talus, la fosse d'érosion du sol non traité est 5 à 10 fois plus grande que celle du sol traité.

- pour les plots expérimentaux de Salin de Giraud :

- après l'érosion rapide de la couche de terre végétale recouvrant le talus, l'érosion constatée sur le sol traité est quasi nulle,
- après 3 heures d'écoulement et suite à l'érosion de la terre végétale, l'érosion du remblai en sol non traité devient importante et rapide (vitesse d'érosion supérieure à 20 cm/h) avec des profondeurs d'érosion constatées pouvant atteindre près de 2m.

L'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de ces campagnes d'essais innovantes avec des moyens en vraie grandeur ont permis d'évaluer la résistance des sols traités à la chaux à l'érosion par surverse et de la quantifier par rapport aux moyens classiques de protection.

Les données acquises par le SMDE permettent de calculer le Clopper Soil Loss Index (CSLI), tel que défini dans la norme ASTM D6460 [27]. Au sens de cette norme, le seuil d'érosion acceptable correspond à $CSLI < 0,5$ inch (1,27 cm). À partir d'expérimentations en canaux, les protections de surface telles que géosynthétiques et matelas pierreux ont été classés dans un abaque proposé par le CIRIA [28] et illustré dans la Figure 21 représentant pour un type de protection le seuil de vitesse d'écoulement en fonction de la durée d'écoulement pour lequel $CSLI > 1,27$ cm. À titre d'exemple, les essais de surverse réalisés sur le Vidourle permettent de classer dans cet abaque les sols des remblais expérimentaux. La vitesse limite d'écoulement correspond à une érosion maximum de 1,27 cm (voir procédures dans [28], page 813). Elle est 3 m/s pour le sol non traité, mis en place avec une procédure permettant d'obtenir la meilleure résistance. Le processus d'érosion appliqué sur le démonstrateur à la vitesse d'écoulement maximum (5 m/s) pendant 4,5 heures n'a pas permis de générer une érosion supérieure à 1,27 cm : sur l'abaque, on peut donc considérer que la vitesse limite du sol traité est au minimum de 5 m/s pendant 4,5 h. Cela signifie qu'un écoulement ayant une vitesse inférieure à 4,5 m/s (ce qui est le cas de la plupart des remblais) pendant 4,5 h ne provoquera pas d'érosion supérieure à 1,27 cm. Pour une durée supérieure, il convient de réaliser un essai de surverse correspondant à la durée visée.

Ces résultats représentés dans la Figure 21 montrent l'accroissement très significatif de la résistance à l'érosion de surface d'un sol traité à la chaux par rapport au même sol non traité, et sa situation par rapport aux moyens classiques de protection.

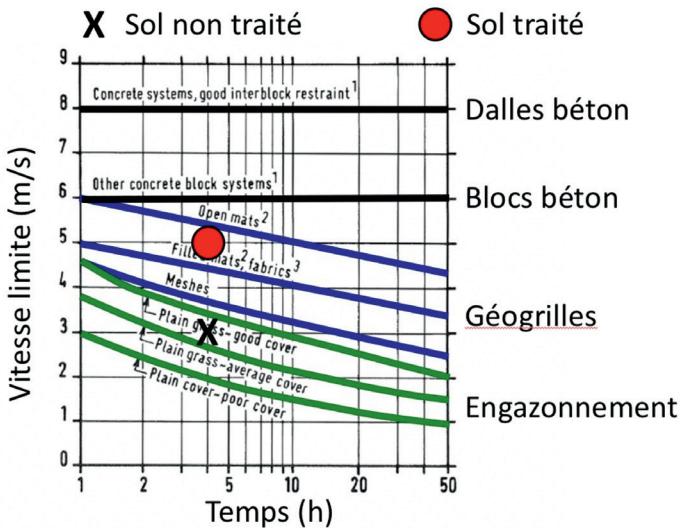


Figure 21 : Positionnement des sols utilisés dans la construction du démonstrateur du Vidourle dans la classification CIRIA ([28] Figure 8.48 page 813)

6. Autres propriétés des sols fins traités à la chaux

6.1 Influence des paramètres de mise en œuvre et de cure sur les effets du traitement

Tous les types de sols ne présentent pas la même aptitude au traitement. Celle-ci dépend, notamment, de leur composition minérale et argileuse. Pour un sol adapté à un traitement à la chaux, le pourcentage de chaux ajouté exerce une influence importante sur les caractéristiques à court et à plus long terme du mélange. L'application de la méthode de référence pour la détermination du point de fixation de la chaux (LFP) des sols, permettant le développement d'effets pouzzolaniques à moyen et long termes et détaillée au § 7.4.2., a conduit à retenir des dosages en chaux de 2 à 3 % pour la majorité des essais présentés ici.

Des essais en laboratoire sur des sols A1, A2 et A3 [11] ont aussi témoigné de l'influence de l'état hydrique ainsi que des conditions de compactage sur la perméabilité des sols traités à la chaux. Le dosage en chaux semble cependant n'affecter que partiellement l'évolution de ce paramètre à long terme.

Le temps est un paramètre majeur dans l'évolution des propriétés mécaniques des sols traités à la chaux, permettant le développement de réactions pouzzolaniques à long terme et ainsi l'amélioration des propriétés mécaniques du mélange. La cohésion et la résistance à la traction (ou à la compression) sont les paramètres les plus sensibles au temps de cure.

Plusieurs essais sur le sol de Rouen [29] et sur d'autres sols de classe A1, A2 et A3 [13] ont permis de caractériser l'influence de la température sur la vitesse de « durcissement » du mélange sol-chaux. Une augmentation de la température de cure induit l'accélération du développement des propriétés mécaniques dans le temps, notamment pour la résistance à la compression et la résistance au cisaillement (Figure 22). À l'inverse, une diminution de la température induit le ralentissement du développement des propriétés mécaniques du composant sol-chaux.

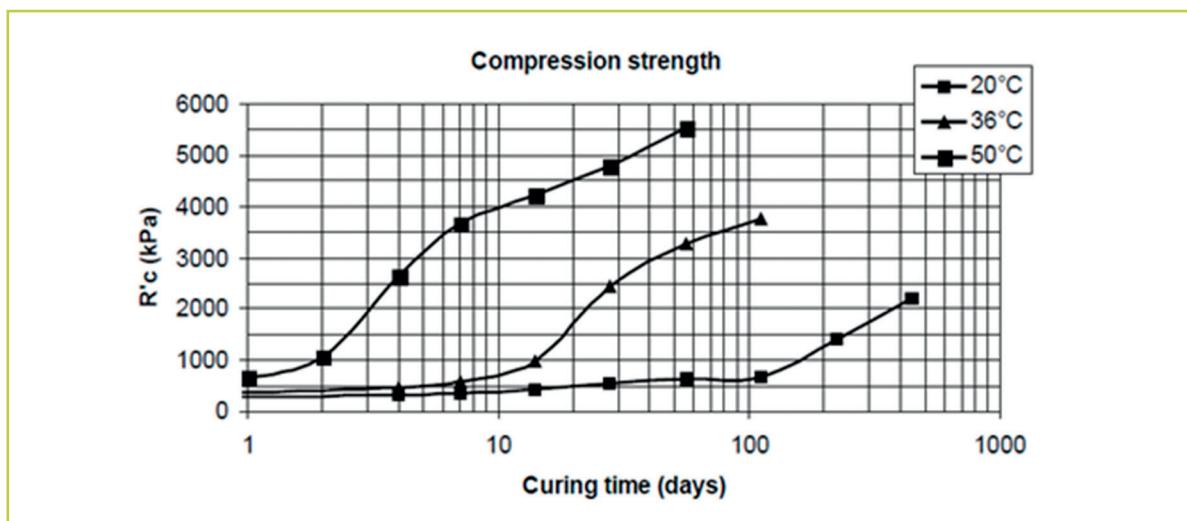


Figure 22 : Influence du temps et de la température sur la résistance à la compression d'un limon traité à 3 % chaux) [26]

6.2 Résistances mécaniques des sols traités à la chaux

La résistance à la traction directe (R_t) n'est pas un paramètre couramment mesuré par des essais mais reste un critère important dans le domaine routier et fréquemment employé pour les matériaux cimentés. Les résultats des essais brésiliens (résistance à la traction indirecte R_{it}) permettent généralement d'estimer la résistance à la traction directe par corrélation à partir de la formule du GTS [3] : $R_t \approx 0,8 \times R_{it}$.

Par ailleurs, des essais sur des matériaux traités à différents pourcentages de chaux [30] ont permis d'évaluer le ratio entre R_{it} et la résistance à la compression R_c après plusieurs temps de cure. En général, $R_c/R_{it} \approx 10$. Des essais ont été réalisés sur un sol français de classe A1 ainsi que sur un sol belge argileux de classe A2 [12], et ont donné la même tendance pour des temps de cure de 14 jours à 1 an, avec des valeurs comprises entre 8 et 14.

La bonne corrélation des résultats permet d'estimer la résistance à la traction directe comme étant :

$$R_t \approx 0,8 \times \alpha \times R_c \text{ (avec } \alpha \text{ compris entre 0,08 et 0,12)}$$

Ce rapport semble par ailleurs relativement constant avec le temps de cure.

6.3 Maîtrise de l'aléa fissuration des sols fins traités et non traités

La fissuration est courante dans les ouvrages en terre, notamment ceux soumis à des conditions météorologiques chaudes et sèches (faible hygrométrie). La fissuration peut être responsable de désordres structurels et est généralement due à deux facteurs majeurs : la dessiccation des sols et les mouvements différentiels [31].

6.3.1 Fissuration de retrait

La dessiccation est liée à un assèchement prononcé des sols, qui peut engendrer un retrait hydrique de la masse du remblai. Celui-ci, contraint par sa géométrie, peut alors fissurer. Le projet DigueELITE a permis d'étudier cette problématique sur le site du Vidourle où les conditions de mise en œuvre particulières étaient propices à l'apparition de ce phénomène pour les deux matériaux :

- ajout d'eau important, pour faire un passer le sol naturel trop sec à la teneur en eau de mise en œuvre requise suite aux études,

- température ambiante en journée atteignant 35°C avec un vent moyen (conditions très asséchantes),
- température de mise en œuvre du sol traité supérieure à 45°C,
- absence de couche de protection contre les conditions extérieures asséchantes : aucune couche de terre végétale n'a été mise en œuvre sur le démonstrateur.

Des fissures ont effectivement été observées sur le démonstrateur du Vidourle, tant sur la zone en sol traité que sur la zone en sol non traité (cf. Annexe 2). Un différentiel de cinétique d'apparition est supposé : les fissures ont été observées peu après la réalisation sur le sol traité, et quelques mois plus tard sur le sol non traité.

Il convient également de noter que les fissures sur le sol non traité, bien qu'apparues plus tardivement, ont évolué défavorablement par rapport à celles du sol traité. Ainsi, les matériaux en bordure des fissures montrent une altération rapide conduisant à leur érosion, et provoquant un élargissement des fissures favorisant la pénétration de l'eau de ruissellement dans le remblai. Une telle évolution n'a pas été constatée sur le sol traité : le matériau reste d'aspect résistant au niveau des lèvres des fissures et il n'a pas été constaté de dégradation pendant la période d'observation.

Devant le constat de fissuration dans les deux sols, il a été décidé d'entamer des analyses et travaux de recherche afin d'essayer de caractériser les conditions d'apparition de cette fissuration. Ces travaux en sont encore au stade des réflexions exposées dans l'encadré ci-après.

Acquis de DigueELITE dans la compréhension du risque de fissuration des remblais en sol traité à la chaux et en sol non traité

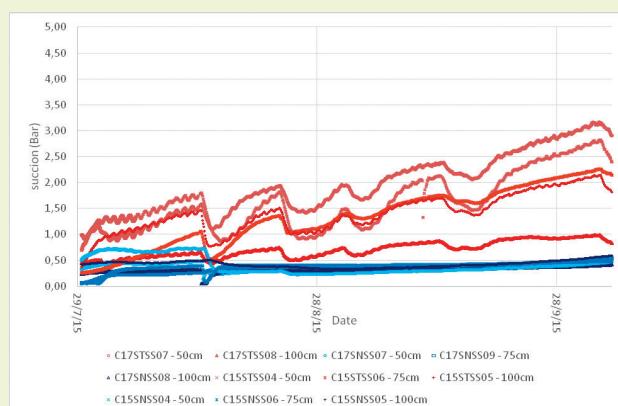
Le démonstrateur du Vidourle a permis de progresser dans la compréhension du risque de fissuration de retrait des remblais en sol traité à la chaux et en sol non traité et sur la compréhension du développement de la succion.

Données factuelles

Mesures sur le chantier : Le sol traité à la chaux a été mis en œuvre immédiatement après la sortie de la centrale, c'est-à-dire à température relativement élevée du fait de la réaction exothermique de la chaux avec l'eau ($T_{sol} > 45^{\circ}\text{C}$), favorisant ainsi l'évaporation.

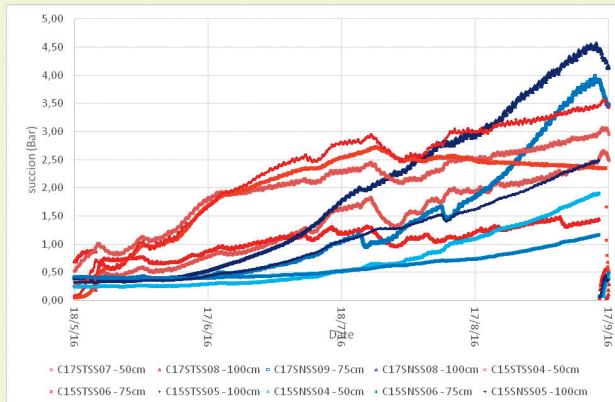
Instrumentation :

Le démonstrateur du Vidourle a été instrumenté de sondes de succion mises en œuvre en carapace aux profondeurs de 50, 75 et 100 cm. Les enregistrements montrent une montée des succions à l'été 2015 au jeune âge du sol traité à la chaux pour atteindre des valeurs de l'ordre de 200 kPa en fin d'été 2015 (Figure 1). La succion importante qui s'est développée au jeune âge dans le sol traité à la chaux témoigne de l'évaporation rapide de l'eau contenue dans le mélange, pour atteindre des teneurs en eau très inférieures aux objectifs de compactage (jusqu'à - 7 points en dix jours).



Évolution des succions dans le sol traité à la chaux (en rouge) et dans le sol non traité (en bleu) juste après construction à l'été 2015.

Dans le même temps, les valeurs de succion dans le sol non traité se sont montrées plutôt stables pour atteindre de l'ordre de 50 kPa à la fin de l'été 2015. Lors de l'été 2016, cette fois les deux sols connaissent une montée de succion. Et à la fin de l'été 2016 la fourchette des succions atteintes dans le sol traité à la chaux et le sol non traité est du même ordre, entre 100 et 350 kPa, les plus fortes succions étant obtenues dans le sol non traité (Figure 2).



Évolution des succions dans le sol traité à la chaux (en rouge) et le sol non traité (en bleu) à l'été 2016.

Acquis de DigueELITE dans la compréhension du risque de fissuration des remblais en sol traité à la chaux et en sol non traité

Essais de laboratoire :

Les premiers résultats des recherches menées à ce jour sur le matériau du Vidourle donnent les résultats suivants.

- La limite de retrait du sol traité à la chaux est significativement déplacée, pour atteindre une teneur en eau de 5 à 7 % supérieure à la limite de retrait du sol non traité ce qui confirme l'effet du traitement à la chaux à court terme. À noter que cette propriété « intrinsèque » au matériau ne permet pas de conclure directement sur la propension du matériau mis en œuvre dans le remblai au retrait ou non. En effet, les conditions de réalisation de l'essai d'évaluation de la limite de retrait sont différentes d'un matériau de remblai : échantillon saturé non compacté, mis en étuve (température et hygrométrie maîtrisées et constantes)
- La masse volumique a une influence importante sur la résistance à la traction du sol traité à la chaux ; plus le matériau est dense, plus la résistance est élevée.
- Des essais de retrait empêché indiquent que la fissuration apparaît dans le sol traité à la chaux pour des contraintes de succion plus importantes que dans le sol non traité.

Discussion :

D'une façon générale et d'après les écarts de teneur en eau relevés sur le démonstrateur, il semble que, le retrait hydrique ait été prépondérant sur le retrait thermique dans l'ouvrage. En effet, bien que le sol ait été mis en place avec une température élevée, les contraintes météorologiques (peu d'écart entre les températures jours/nuit et fortes chaleurs pendant le chantier), ont permis d'éviter un refroidissement brutal de l'ouvrage.

Par ailleurs, les capteurs de température installés dans la digue n'ont pas relevé de phénomène exothermique sur le long terme (contrairement au béton par exemple, dont la prise est exothermique). Ainsi, le retrait thermique en phase de cure a été écarté. Cependant, le coefficient de retrait du composant sol-chaux n'étant pas connu (de l'ordre de 1×10^{-5} pour le béton), la concomitance des retraits thermiques et hydriques au jeune âge est toujours en cours d'étude.

La réaction pouzzolanique dans le sol traité à la chaux engendre deux effets en compétition vis-à-vis de la résistance à la fissuration. L'exotherme de la réaction semble développer la succion mais la prise augmente à la fois la limite de retrait et la résistance à la traction.

L'absence de développement de succion au jeune âge dans le sol non traité ne le protège pas pour autant du développement de succions aussi élevées que dans le sol traité à la chaux lorsqu'il est soumis aux conditions climatiques estivales du sud de la France. En revanche, le sol non traité ne bénéficie pas de l'augmentation de la résistance au retrait du sol traité à la chaux.

Enseignements :

Bien que le sol traité à la chaux bénéficie d'une augmentation de sa résistance vis-à-vis de la fissuration de retrait hydrique, dans des conditions climatiques chaudes et sèches, il convient cependant d'adopter les précautions de mise en œuvre suivantes :

- définir les objectifs de teneur en eau à la mise en œuvre quand on recherche une faible perméabilité microscopique qui demande une mise en œuvre côté humide.
- éviter un surdosage en eau par rapport à l'objectif fixé afin de limiter le risque de retrait prématuré, notamment avant augmentation de la résistance en traction du sol traité.
- éviter l'assèchement en surface de la couche (arrosage périodique systématique, couverture du remblai avant période d'inactivité – week-end, interruption de chantier).
- laisser refroidir le mélange sur stock en cas de traitement en centrale pour éviter une mise en œuvre à température élevée, favorisant l'évaporation.

Le Bulletin 195, « Barrages en sol cimenté » de la CIGB [32], considère que la fissuration est susceptible d'avoir un impact sur certains aspects principaux de la conception, notamment à cause des risques d'infiltration d'eau au travers du corps de remblai. Les performances des mélanges sol-chaux permettent d'assurer une bonne résistance à l'érosion interne, contrairement au sol non traité. En revanche, les potentielles circulations d'eau peuvent ne pas être acceptables dans le cas des ouvrages à charge permanente pour lesquels le Bulletin recommande une étanchéité amont. De cette manière, le corps de l'ouvrage n'est pas en contact avec l'eau et ne remplit pas de fonction d'étanchéité.

6.3.2 Risque lié aux mouvements en fondation d'ouvrage

Les tassements différentiels peuvent apparaître dans le cas où le remblai est mis en œuvre sur une fondation trop compressible, ou si le sol de fondation n'est pas homogène sur l'emprise de l'ouvrage. Des mouvements différentiels peuvent également apparaître sur des remblais insuffisamment compactés.

Pour tout ouvrage construit sur fondation compressible, l'état limite de tassement doit être regardé avec attention, notamment en cas de risque de tassements différentiels. Au jeune âge, le sol traité a autant de capacité à s'accommoder des tassements que le sol non traité, leurs modules d'élasticité étant comparables. À maturation, le sol traité à la chaux est plus rigide que le sol non traité mais a développé une résistance à la traction supérieure à celle du sol non traité.

La première chose à faire, qu'on soit en présence de sol traité ou de sol non traité, est de calculer l'amplitude des tassements différentiels et de les rapporter à la longueur sur laquelle le différentiel va s'absorber afin de vérifier si ce différentiel est acceptable pour l'ouvrage.

Dans le cas du sol traité :

- si des fuites limitées sont acceptables (cas des ouvrages à charge non permanente), et si on a recours à la fonction protection contre l'érosion interne (EI) du composé sol-chaux, on peut démontrer que la résistance à l'érosion interne est suffisante et potentiellement se passer de dispositifs rapportés (filtration, étanchéité, etc.) ;
- si on veut limiter l'aléa d'apparition de fissure, avant d'envisager, comme pour le sol non traité, des solutions de pré-chargement ou de renforcement du sol de fondation, il faut s'intéresser à la cinétique d'acquisition des tassements dans la fondation d'une part et à celle de durcissement et d'augmentation de résistance du composé sol-chaux d'autre part. En effet, dans les contextes de sols fins compressibles, les tassements de consolidation primaire ne sont pas immédiats et s'acquièrent généralement dans des temps plus ou moins longs selon la perméabilité, les capacités de drainage du sol fin présent en fondation et son épaisseur. Or le durcissement et l'acquisition d'une résistance à la traction d'un sol traité se produit dans une échelle de temps souvent comparable. Le travail de l'ingénieur consiste alors à étudier en parallèle les cinétiques d'acquisition des tassements dans la fondation et de durcissement et d'acquisition de résistance à la traction dans le sol traité.

6.4 Résistance au gel

Même si la nature des sollicitations dues au gel est différente sur un ouvrage hydraulique en terre par rapport à un ouvrage d'infrastructure routière ou ferroviaire (remblai, partie supérieure des terrassements ou couche de forme en sol traité), ces derniers exemples peuvent servir de référence pour l'évaluation du comportement des matériaux constitutifs face au gel.

En France, pour les travaux de construction d'infrastructure routière ou ferroviaire, on distingue les matériaux selon leur caractère très gélif (SGt), peu gélif (SGp) ou non gélif (SGn). L'essai de gélification défini dans la Norme NF P 98-234-2 [33] permet de qualifier ce caractère. Lorsqu'il n'est pas envisagé de le réaliser, une approche sécuritaire consiste à considérer que les sols fins traités à la chaux sont non gélifs lorsque leur résistance en compression atteint 2,5 MPa.

A noter que la Norme NF P 98-086 [34] précise, en l'absence d'essai, les conditions d'exécution suivantes pour que des sols traités à la chaux soient considérés comme peu gélifs (SGp) :

- $V_{BS} \geq 0,5 \text{ g}/100\text{g}$,
- dosage en chaux $\geq 1,5 \%$,
- obtention sur chantier d'une mouture $\leq 40 \text{ mm}$,
- niveau de compactage « q4 » minimum,
- rapport CBR_i après 4 jours d'immersion / IPI > 1, avec indice IPI minimal à respecter selon la classification du sol.

Dans la pratique il est important que les opérations de traitement des surfaces exposées au gel soient achevées suffisamment tôt avant l'apparition de celui-ci. Dans le cas de risque de gel, les surfaces récemment traitées peuvent être protégées par la pose d'une couche de matériau non traité, laissé en place durant l'entièreté de la période de gel. Les effets du gel ne se manifestent pas de la même manière à l'échelle de l'ouvrage entièrement construit, comparativement à l'échelle de la mise en œuvre d'une couche unitaire. Les effets du gel se révèlent généralement sur la partie superficielle de l'ouvrage (peau) alors que le corps de l'ouvrage n'est pas concerné. L'application d'une couche de revêtement en terre végétale sur les talus des ouvrages contribue à leur bonne tenue face à ce risque.

6.5 Pressions interstitielles

La stabilité d'un remblai en matériaux fins est tributaire de la surpression interstitielle induite le cas échéant pendant la construction. La génération de pressions interstitielles dans le corps de l'ouvrage dépend du degré de saturation et de la compressibilité du sol compacté d'une part, et du coefficient de consolidation et du rythme de construction d'autre part. Cette règle s'applique également aux ouvrages en sols traités à la chaux en cours de construction du fait de leur cinétique de prise et de durcissement lente. Elle se justifie moins à partir du moment où les réactions

pouzzolaniques se manifestent par une augmentation progressive du module, du coefficient de consolidation et de la contrainte de pré consolidation.

Pour des ouvrages traités de moins de 15 m de hauteur - ayant donc un état de contrainte inférieur à la contrainte de compactage de 200 à 300 kPa - une vérification simple de la stabilité peut être réalisée. La rupture de pente le long d'une surface de glissement circulaire est généralement le cas le plus critique.

Au-delà de 15 m, un développement possible de la pression interstitielle dans le corps du remblai doit être considéré. Des études de compressibilité réalisées en laboratoire sur des sols traités à 2,5 % de chaux ainsi que des calculs ont permis de montrer qu'à condition que le degré de saturation initial après compactage soit en moyenne inférieur à 90 %, sans aucune valeur singulière supérieure ou égale à 95 %, le risque de mise en pression interstitielle à 14 jours était quasiment nul sous une contrainte verticale correspondant à un remblai de 30 m de haut, voire 50 m selon le cas. Des contrôles effectués sur une série d'ouvrages ont montré que les conditions de saturation énoncées précédemment étaient respectées pour un objectif de densité de 95 % p_{dOPN} , y compris à des teneurs en eau de mise en œuvre comprises entre 1,05 et $1,15 \times w_{OPN}$.

Si le doute subsiste, il convient de vérifier la stabilité du remblai à l'aide de modèles permettant au concepteur de prendre en compte la progressivité de la construction par couches en parallèle avec celle de l'augmentation des caractéristiques mécaniques du sol traité et de sa rigidité mesurée par des essais en laboratoire à différents temps de cure.

6.6 Migration des ions Ca²⁺ dans le milieu et valeur du pH vis-à-vis de l'environnement

Le traitement des sols à la chaux implique un malaxage efficace de ces 2 composants, ce qui a pour conséquence une forte augmentation de la basicité du sol, qui peut atteindre des valeurs de pH supérieures à 12. Ce pH élevé, nécessaire au développement des liaisons pouzzolaniques, se maintient durant une longue période de temps, qui peut varier de plusieurs années à plusieurs décennies. Certaines questions peuvent dès lors se poser vis-à-vis de la présence d'ions calcium et hydroxydes dans des massifs de sols traités et à une éventuelle diffusion vers l'environnement direct de ces structures : les aquifères, la nappe phréatique, etc.

Dans le but de répondre à ces questions, plusieurs études, multi-échelles, ont été réalisées. Ainsi, des expériences de lixiviation menées en laboratoire sur des sols traités à 3 % de chaux, une étude en grandeur réelle sur une tranchée comblée en matériaux traités à la chaux et laissée en saturation durant 2 mois, ainsi que des mesures réalisées sur un site de construction impliquant des terrassements à la chaux, aboutissent aux mêmes conclusions : l'impact du traitement à la chaux sur l'environnement direct des matériaux, en termes de migration/diffusion des ions calcium et hydroxydes, est très limité. La présence de ces ions et l'impact d'une augmentation de pH est restreinte à quelques cm hors du matériau traité (5 à 6 cm pour le pH, jusqu'à 20 cm en ce qui concerne les ions calcium, plus mobiles).

Au cours de ces études, les concentrations en calcium dans les eaux de lixiviation, exprimées en teneur en oxyde de calcium (CaO), restent bien inférieures à la valeur PNEC (*Predicted No Effect Concentration*) mentionnée dans les règlements REACH (*Règlement de l'Union européenne pour protéger la santé humaine et l'environnement contre les risques liés aux substances chimiques, en vigueur depuis juin 2007*).

Ces résultats tendent à montrer le caractère "tampon" du sol non traité en contact avec les parties en sol traité ; le premier agit comme une barrière neutralisant la diffusion des ions hors du matériau traité à la chaux. Cette conclusion est à rapprocher de plusieurs éléments bibliographiques indiquant la mobilité très limitée des ions constituant la chaux hors des colonnes de sol traité utilisées en fondation d'ouvrages ou en traitement de sols en profondeur. De plus, le pH et la concentration en ions calcium s'avère très stable avec le temps, ce qui confirme leur disponibilité pour les réactions de « cimentation » à long terme.

Dans l'hypothèse où le sol traité à la chaux est en contact permanent avec l'eau (cas d'un bassin, d'un petit barrage de rétention, etc.), la question d'une migration de chaux et d'un potentiel impact sur l'eau peut se poser. Dans le cadre du projet DigueELITE, un bassin de rétention d'une capacité de 200 m³ a été construit en utilisant le sol du site traité à 2 % de chaux. Ce bassin (Figure 23) se situe en contrebas d'une berme et d'une plate-forme elles aussi réalisées avec le même sol traité. L'eau du bassin est de l'eau de pluie mélangée à de l'eau provenant d'un pompage. 3 mois après la construction du bassin, les valeurs de pH mesurées (7,2 à 7,3) se sont avérées identiques à celles des prélèvements depuis la rivière Vidourle, indiquant l'absence d'impact sur la qualité de l'eau contenue dans le bassin.



Figure 23 : Ouvrage en sol traité à la chaux dans son environnement - Chantier du Vidourle : vue du bassin en sol A1 traité à 2 % de chaux après 6 mois (photo INRAE du 04-02-2016)

6.7 Portance des sols traités à la chaux pour le dimensionnement des assises

Les sols fins traités à la chaux voient leurs performances mécaniques augmenter dès le traitement et se poursuivre avec la durée de cure. Cette propriété est utile et importante pour la réalisation des structures de surface venant recouvrir éventuellement l'ouvrage hydraulique qui, dans le cas le plus général, consiste en une piste réservée à l'exploitation et à l'entretien de l'ouvrage, ou plus rarement une structure d'assise de chaussée ouverte à la circulation.

Dans le premier cas, la dernière couche de l'ouvrage réalisé en sol traité doit satisfaire à un niveau de portance minimal permettant de compacter la couche correspondant à la piste d'exploitation venant la recouvrir réalisée la plupart du temps en matériau granulaire (GNT 0/31,5 mm). Les caractéristiques mécaniques de la dernière couche en sol traité n'entrent pas dans le dimensionnement de la piste mais répondent seulement à la faisabilité de sa mise en œuvre. L'interposition d'un géosynthétique de renforcement à l'interface ouvrage/piste n'est pas nécessaire.

Dans ce cas il est conseillé d'avoir une portance minimale de 35 MPa sur la dernière couche en sol traité. Si la mise en œuvre de la piste d'exploitation est réalisée immédiatement après la mise en œuvre du sol traité, l'obtention de ce critère peut éventuellement être conditionnée à un léger surdosage en chaux de la dernière couche ou à un ajustement de la teneur en eau de mise en œuvre de celle-ci pour se situer dans un état hydrique moyen ($0,9 \times w_{OPN} \leq w_n \leq 1,1 \times w_{OPN}$) afin d'obtenir le niveau de portance visé. Une couche de protection de type enduit de cure en émulsion avec gravillonnage est conseillée avant la mise en œuvre de la piste d'exploitation.

Dans le cas où une structure de chaussée devrait recouvrir l'ouvrage hydraulique et supporter un trafic routier, on se situe dans le cas général de dimensionnement de la couche de forme (cf. GTR § 3.1) [9] puis de chaussée (couches de fondation, de base et de roulement). Pour la couche de forme, les éléments suivants doivent être fixés :

- la classe d'arase du remblai (AR),
- le dimensionnement de la couche de forme (matériau, épaisseur),
- la classe de la portance de la couche de forme (PF).

Dans le cas d'un sol traité à la chaux en remblai sous-jacent à la couche de forme, et à condition d'avoir une épaisseur minimale de la dernière couche compactée de 0,30 m, on est dans le cas-type d'une PST n°4 qui permet de prendre en compte une arase de classe AR2 pour le dimensionnement de la chaussée (cf. GTS § 2.1.1) [3]. Le module au niveau de l'arase terrassement (dernière couche de remblai) doit être de 50 MPa avant la mise en œuvre de la couche de forme. Comme dans le cas précédent, un léger surdosage en chaux de la dernière couche ou un ajustement de la teneur en eau de mise en œuvre de celle-ci peut s'avérer nécessaire pour se situer dans un état hydrique moyen permettant d'obtenir la portance recherchée.

Suivant le type de sol et si la région concernée n'est pas ou peu affectée par le gel, la couche de forme peut être constituée par la dernière couche de l'ouvrage réalisée avec un traitement à la chaux seule comme décrit au § 3.6.1 du GTS [3].

Concernant les performances atteintes en portance à court terme, on peut citer à titre d'exemple les résultats obtenus sur le remblai expérimental de Héricourt dans le cadre du projet TerDOUEST où les portances mesurées à très court terme (environ 8 heures après la mise en œuvre) sont les suivantes :

- 30 MPa(*) sur l'arase en sol A2 traité à 3 % CaO avec $w_n = 1,17 \times w_{OPN}$
- 68 MPa sur l'arase en sol A3 traité à 5 % CaO avec $w_n = 0,9 \times w_{OPN}$

(*) valeur < 35 MPa en raison d'une teneur en eau élevée ($w_n = w_{OPN} + 3,5 \%$)

Les mesures de portance doivent être réalisées au moyen d'essais à la plaque statique E_{V2} ou bien de matériels de type Dynaplaque I ou Dynaplaque II (Figure 24). Ces moyens d'essais répondent respectivement aux normes NF P 98 117-1 [35] et NF P 94 117-2 [36].



Figure 24 : Mesure de portance à la Dynaplaque II sur arase en sol A3 traité à 5 % CaO (chantier expérimental RD438 de Héricourt), (photo projet TerDOUEST)

C. CONCEPTION ET ETUDES

7. Caractérisation des gisements et études de laboratoire

7.1 Introduction

Cette partie du document détaille les points importants à traiter au niveau des reconnaissances et des études dans le cas de la construction d'ouvrages hydrauliques en sols traités à la chaux. Concernant les éléments considérés comme connus, il est fait référence à des documents tels que le GTS [3], des normes ou des publications auxquels le lecteur pourra se reporter.

7.2 Les études préalables

7.2.1 Principe général

En France, le déroulé des études relatives à la conception est structuré dans le livre IV du Code de la commande publique dans lequel on retrouve les dispositions de l'ex loi MOP (loi n° 85-704 du 12 juillet 1985, abrogée le 26/11/2018), relative à la Maîtrise d'Ouvrage Publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée.

De façon générale, l'utilisation d'un sol traité à la chaux dans un ouvrage sera d'autant plus optimisée que cette option technique aura été étudiée dès les phases amont du projet. En préalable à l'enclenchement d'une mission de maîtrise d'œuvre, le maître d'ouvrage qui souhaite accomplir un projet d'ouvrage hydraulique, réalise ou fait réaliser un diagnostic de la problématique et des études de faisabilité visant à déterminer un programme d'aménagement qui sera mis en œuvre par le maître d'œuvre. Il est souhaitable que le maître d'ouvrage s'interroge dès ce stade sur la possibilité et la pertinence du recours au traitement des sols à la chaux, afin de préciser dans le cahier des charges du maître d'œuvre l'intégration de cette technique à chaque étape de la démarche. L'étendue des études préalables à la réalisation d'un projet varie directement avec l'ampleur et la complexité de celui-ci.

7.2.2 Études préliminaires

En phase d'études préliminaires, le maître d'œuvre étudie la faisabilité du traitement des sols à la chaux d'un point de vue technique, économique et environnemental. Pour ce faire, le maître d'œuvre s'appuie sur les données existantes : cartes géotechniques, données géotechniques disponibles (Infoterre), dossiers géotechniques de chantiers comparables situés à proximité, etc. Il identifie des possibilités de gisements de matériaux ainsi que les typologies de matériaux disponibles.

Sur la base des données analysées, le maître d'œuvre se positionne sur la possibilité d'envisager le traitement des sols à la chaux pour optimiser le projet, d'un point de vue technique, économique et/ou environnemental, au regard des quantités de matériaux identifiées et de leur affinité présumée avec la chaux.

7.2.3 Avant-projet

En phase d'avant-projet, et dans la mesure où les études préliminaires relatives au traitement des sols à la chaux sont concluantes, le maître d'œuvre peut confirmer la faisabilité et la pertinence du traitement des sols. Il revient au maître d'œuvre de définir le cahier des charges des études géotechniques relatives au traitement des sols à la chaux qui sont confiées à un bureau d'études géotechniques recruté spécifiquement par le maître d'ouvrage. En s'appuyant sur les éléments recueillis, le maître d'œuvre réalise une étude technico-économique d'avant-projet d'une ou plusieurs solutions ayant recours au traitement des sols à la chaux. Il justifie les fonctionnalités (M, S,

P, EI, ES) attribuées au sol traité. Le maître d'œuvre fournit les éléments de pré-dimensionnement techniques et économiques du projet en prenant en compte le traitement des sols à la chaux.

À l'issue de l'étude d'avant-projet, le maître d'ouvrage décide de poursuivre ou non l'étude de projet d'une conception intégrant le traitement des sols à la chaux.

7.2.4 Projet

Le rôle du maître d'œuvre est de préciser les éléments de dimensionnement de la conception ayant recours au traitement des sols à la chaux, y compris les volumes, dosages en chaux, coûts, etc. A l'issue de l'étude de projet, le maître d'ouvrage dispose de l'ensemble des éléments permettant d'élaborer un dossier de consultation des entreprises avec, en solution de base, une conception ayant recours au sol traité à la chaux.

Le maître d'œuvre définit le cahier des charges des reconnaissances géotechniques complémentaires, prévoyant une étude de traitement complète. Sur la base des éléments recueillis, le maître d'œuvre réalise une étude de projet complète de la solution ayant recours au traitement des sols à la chaux, conformément aux prescriptions ci-dessus. Il justifie les fonctionnalités (M, S, P, EI, ES) attribuées aux sols traités à la chaux.

Le maître d'œuvre confirme la (ou les) méthodologie(s) d'exécution envisageable(s). Il précise si le niveau de connaissance des conditions de mise en œuvre nécessite la réalisation d'une ou plusieurs planche(s) d'essai et/ou épreuve de convenance, voire d'un chantier expérimental. Il indique le phasage de leur réalisation, leur description détaillée et les objectifs correspondants.

Selon les caractéristiques du chantier - dont les fonctions visées, les enjeux du projet et l'ampleur du chantier - le maître d'œuvre définit les besoins en contrôle et les points d'arrêt. Les contrôles à prévoir sont : le contrôle topographique (épaisseurs des couches, cubages), le contrôle de la qualité du compactage (contrôle en continu ou par mesures ponctuelles), le contrôle de la teneur en eau, le contrôle de la consommation de chaux, etc. Le maître d'œuvre définit les points d'arrêt correspondants. Il précise s'il s'agit de contrôle interne, externe ou extérieur. Le recours au contrôle extérieur sera d'autant plus nécessaire, avec une densité spatio-temporelle des essais in situ d'autant plus denses, que les enjeux de qualité sont élevés, et notamment si les fonctionnalités P, EI ou ES sont exigées.

La partie E du présent document expose les principes généraux du contrôle de chantier ayant recours au traitement des sols à la chaux.

7.2.5 Assistance à la passation des contrats de travaux

En cas de recours au traitement des sols à la chaux, il revient au maître d'œuvre d'intégrer dans la rédaction des pièces techniques la solution retenue à l'issue de la phase de projet, et, le cas échéant, toutes les spécifications techniques liées au traitement à la chaux. Dans le cas contraire, le maître d'œuvre précise si le traitement des sols à la chaux peut être proposé en variante d'entreprise.

Le maître d'œuvre intègre dans les documents d'appel d'offres les conclusions de ses études nécessaires et suffisantes à la consultation des entreprises pour leurs études de réalisation des ouvrages en sol traité à la chaux. Notamment, un dosage indicatif en chaux peut être communiqué, sans valeur contractuelle. Il précise les exigences en matière de planche(s) d'essais et épreuve de convenance à réaliser préalablement au chantier. Il précise également les exigences en matière de contrôle interne, externe et extérieur, et les points d'arrêt correspondants. Outre le ou les contrats de travaux, le maître d'œuvre rédige les pièces techniques relatives à la consultation des bureaux de contrôle extérieur pour l'exécution des contrôles définis en phase de projet.

Lors de l'analyse des offres, le maître d'œuvre portera une attention particulière à :

- l'analyse des moyens matériels et leur adéquation avec les exigences de qualité et de rendement du chantier,
- l'analyse de la méthodologie de traitement,
- l'analyse du plan de contrôle proposé par l'entreprise.

7.3 Caractérisation des gisements

7.3.1 Principe général

Pour réaliser un ouvrage en sol traité à la chaux, il faut disposer du volume nécessaire en matériau apte au traitement, et donc délimiter la géométrie et la capacité du ou des gisements, en évaluer les caractéristiques géotechniques ainsi que l'homogénéité. Dans le cas d'ouvrages importants nécessitant de faire appel à plusieurs gisements, chaque gisement devra être étudié séparément.

La méthode de caractérisation des gisements, tout comme celle des études de traitement, peut s'inspirer de celle présentée dans le GTS (Partie C1 : Études) [3]. L'objectif est de fournir un zonage des formations présentes dans le gisement permettant d'effectuer des prélèvements représentatifs sur lesquels seront réalisées les études de laboratoire.

Les études de laboratoire nécessitent le recours à des procédures d'essais spécifiques qui ne peuvent être confiées qu'à des laboratoires de géotechnique disposant des équipements nécessaires et de personnel expérimenté : identification des constituants (les sols, éventuellement la chaux), essai d'aptitude au traitement à la chaux, essai de compactage (Proctor Normal), portance immédiate, perméabilité, résistance mécanique, résistance à l'érosion, etc. Le contenu des études de laboratoire, et donc la quantité de matériau nécessaire et la durée des études, dépend des fonctions visées pour le composant sol-chaux. La quantité minimale à prélever dépend aussi de la granulométrie du matériau. Pour une étude de traitement d'une famille homogène, il faut prévoir de l'ordre de 200 kg d'équivalent 0/20 mm à la teneur en eau naturelle. La durée de l'étude peut varier de 3 semaines à 2 mois, voire plus si l'on veut étudier le comportement du mélange sol-chaux à long terme.

Les opérations s'appuient sur le phasage des études menées par la maîtrise d'œuvre et sont placées sous la responsabilité de celle-ci. La démarche est progressive afin d'éviter de conduire à des improvisations hasardeuses ou pires, à des impasses.

Dans le cas d'une proposition variante de la part de l'entreprise, celle-ci pourra suivre la même démarche.

7.3.2 Études préliminaires

Cette phase comporte une étude géologique préliminaire afin de signaler les zones susceptibles de contenir des sols fins argileux : silts, limons, loess, sables argileux, graves argileuses, argiles, etc. Elle informe a priori sur l'homogénéité de la formation ainsi que sur la présence éventuelle d'éléments perturbateurs tels que gypse, éléments organiques, micas en proportion importante, éléments grossiers susceptibles de gêner le malaxage.

7.3.3 Avant-projet et projet

Lorsque les conclusions de l'étude géologique préliminaire sont favorables, on peut procéder à des sondages avec prélèvements représentatifs pour études de laboratoire.

L'avant-projet permet de renseigner sur la disponibilité ainsi que sur la qualité des sols, et d'évaluer leur aptitude au traitement par des essais simples. La phase projet, plus détaillée, doit caractériser plus précisément le gisement vis-à-vis de son homogénéité au vu des coupes de sondages et de l'identification des matériaux. Elle doit aboutir à la localisation de familles de matériaux homogènes et à la définition des modalités de traitement par famille (dosages en chaux, besoins d'humidification si nécessaire, etc.).

Dans certains cas simples, les phases avant-projet et projet peuvent être confondues.

Le Tableau 10 tiré du GTS [3] donne des indications pour définir le nombre d'essais d'identification à réaliser selon le volume du gisement à exploiter (GTS : Partie C1, tableau C1) [3].

Tableau 10 : Nombre minimal d'essai pour caractérisation d'un gisement (extrait du GTS)

Volume (V) de couche de forme à réaliser (m^3)	Essais d'identification géotechnique	Formation connue et supposée homogène \diamond	Formation connue et supposée moyennement homogène \diamond	Formation inconnue
$V < 10^4$	Nature *	1	3	9
	État hydrique \odot	2	4	16
$10^4 < V < 10^5$	Nature *	$V / 10^4$	$3V / 10^4$	$9V / 10^4$
	État hydrique \odot	$2V / 10^4$	$4V / 10^4$	$16V / 10^4$
$V > 10^5$	Nature *	10	30	90
	État hydrique \odot	20	40	160

* Les essais concernés ici sont ceux permettant de classer le sol suivant sa nature selon la classification de la norme NF P 11-300

◊ Principalement évalué à partir de mesures de la teneur en eau naturelle supposées représentatives de la saison des travaux. Si la période de travaux n'est pas connue et que ce facteur est influent (dans le cas de gisement à faible profondeur ou influencé par les fluctuations annuelles d'une nappe, par exemple), une réflexion appuyée autant que possible sur des mesures ou des constatations est nécessaire pour estimer, sur un cycle annuel, les états hydriques extrêmes possibles

❖ Cette appréciation suppose être donnée par un géotechnicien ayant une bonne connaissance des formations locales

Concernant les types d'essais à réaliser pour qualifier l'homogénéité d'un gisement, on pourra adopter la proposition du document [10]. Celui-ci propose de considérer les paramètres de nature du sol (analyse granulométrique, V_{BS}, I_p) comme critères d'homogénéité. Il s'agit d'une ouverture intéressante par rapport au GTS [3] qui préconise, comme critère d'homogénéité, la masse volumique sèche de l'Optimum Proctor Normal dont la mesure se fait à l'aide d'un essai relativement lourd et consommateur de matériau.

Selon le niveau de l'étude (avant-projet, projet) et la complexité du gisement, le maillage des sondages en phase ultime peut varier typiquement entre 200 m x 200 m et 50 m x 50 m. La taille du maillage dépend de plusieurs paramètres, notamment des conclusions de la reconnaissance préliminaire (par exemple étude géophysique), du type d'essai à réaliser sur les prélèvements, de la ou des fonctions du composant sol-chaux dans l'ouvrage, etc. Il est recommandé de faire les sondages à la tarière de grand diamètre ou à la pelle hydraulique afin de prélever des matériaux en quantité suffisante pour les essais en laboratoire. Il est donc impératif de prendre en compte les besoins exprimés par le laboratoire d'essais, sous peine de devoir renouveler la campagne de prélèvement.

Une représentation graphique des profils géotechniques est hautement recommandée pour faciliter l'exploitation du gisement en phase travaux.

L'encadré ci-après résume les conditions de la campagne de reconnaissance de l'emprunt réalisée dans le cadre du chantier expérimental DigueELITE sur le Vidourle.

Caractérisation du gisement : l'exemple de DigueELITE

Dans le cas du démonstrateur du Vidourle, la zone d'emprunt ayant été imposée dans un ségondal, la caractérisation du gisement s'est limitée à des études cartographiques complétées par des visites du site et par une campagne de 14 sondages au tractopelle descendus jusqu'à 3 m de profondeur en moyenne.

L'observation visuelle pendant les sondages a permis de juger le site comme homogène, à l'exception de 2 sondages révélant la présence de matériaux de remblai d'apport.



Sondages de reconnaissance de l'emprunt au tractopelle



Prélèvements en sacs pour l'étude de laboratoire

39 prélèvements d'échantillons remaniés en sacs de 20 kg ont été réalisés au cours des sondages.

Dans un premier temps, les prélèvements ont permis la réalisation d'essais d'identification afin de confirmer l'homogénéité de l'emprunt. Sur la base de ces résultats, et en tenant compte i) de la géométrie de l'emprunt et ii) de la possibilité d'exclure certains matériaux (visuellement, ils doivent être facilement identifiables lors des terrassements, par exemple par un contraste de couleurs), les matériaux pour la construction du démonstrateur ont été choisis. Les prélèvements correspondants ont été mélangés de façon à constituer une réserve de matériau représentatif du gisement pour l'étude de traitement en laboratoire.

Le tableau ci-après présente les caractéristiques d'identification et l'écart type associé de l'ensemble des sols présents au niveau de l'emprunt, puis des sols sélectionnés pour la réalisation du démonstrateur. Ces valeurs permettent de vérifier l'homogénéité du gisement utilisé dans le cas du Vidourle ; on y voit aussi qu'une fois certaines zones et couches de sol exclues, les paramètres de nature des sols constitutifs du démonstrateur sont très voisins. Le mélange de l'ensemble pour la réalisation de l'étude de traitement en laboratoire préalable à la construction est dès lors techniquement justifié.

Caractéristiques d'identification des sols sur la totalité de l'emprunt et des sols sélectionnés pour la construction du démonstrateur du Vidourle, constituant le mélange pour l'étude de traitement en laboratoire

	Emprunt				Sols choisis pour la construction du démonstrateur			
	moyenne	minimum	maximum	écart-type	moyenne	minimum	maximum	écart-type
< 2 mm (%)	100	99	100	0,2	100	100	100	0
< 80 µm (%)	85,4	65	97	9,7	84,6	67	92	7,7
< 2 µm (%)	24	16	32	4,7	23,3	20	27	2,7
V _{BS} (g/100g)	1,85	1,5	2,5	0,41	1,67	1,50	2	0,29
w _L (%)	31,6	26	39,5	3,8	31,2	28	34	2,7
w _P (%)	25	21	31	2,6	25,2	23	28	1,9
I _P	6,6	4	9	1,8	6	4	9	1,8

Comportement au compactage du sol du Vidourle

Le sol présente une faible plasticité et une distribution granulométrique caractéristique d'un sol A1 (selon NF P11-300 [8]). La composition chimique ne met pas en évidence de composés délétères (sulfates, matières organiques) et les carbonates sont présents en abondance (environ 50 % en masse du matériau).

Les comportements au compactage du sol naturel et du sol traité à 2 % de chaux vive sont illustrés à travers les courbes Proctor et IPI ci-après.

À partir de la courbe Proctor Normal du sol naturel, les paramètres suivants sont identifiés :

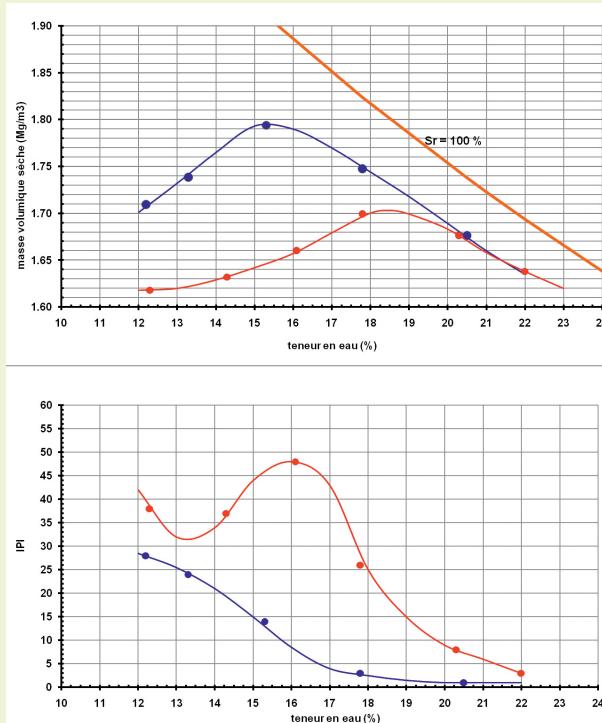
Masse volumique sèche maximale = 1,79 Mg/m³, à une teneur en eau $W_{OPN} = 16\%$.

À cette teneur en eau, l'Indice Portant Immédiat est estimé à 10, mais diminue ensuite fortement (IPI = 3 à $W = 17,8\%$).

Dans le cas du matériau traité à 2 % de chaux vive, la masse volumique sèche maximale est estimée à 1,70 Mg/m³, pour une teneur en eau $W_{OPN} = 17,8\%$. L'Indice Portant Immédiat reste supérieur à 8 pour des teneurs en eau jusqu'à 20,3 %.

On pourra aussi noter le déplacement de la limite de retrait intrinsèque du sol, passant d'une teneur en eau de 15,6 % (sol non traité) à 23,5 % après ajout de 2 % de chaux vive.

Afin d'être le plus représentatif possible du stock de sol constitué entre-temps, ces résultats, mesurés sur des matériaux extraits lors de la campagne de prélèvements initiale, ont été ensuite confirmés lors d'une seconde campagne de prélèvements qui a précédé le chantier de construction. Quelques ajustements légers ont été décidés en vue du traitement et de la mise en œuvre des matériaux sur site, notamment en matière de teneurs en eau.



Courbes Proctor Normal (graphique supérieur) et IPI (graphique inférieur) du sol extrait du site de construction de la digue du Vidourle, non traité et traité à 2 % de chaux vive.

7.4 Etudes de traitement

L'Annexe 3 présente une liste d'essais pertinents pour caractériser les propriétés du composant sol-chaux. En fonction des objectifs visés, les essais à réaliser seront sélectionnés dans cette liste.

Les essais de performance doivent être réalisés sur des éprouvettes dont les caractéristiques sont représentatives des caractéristiques d'état du sol à la mise en place (teneur en eau, masse volumique) : le cahier des charges des études de laboratoire devra préciser les paramètres de teneur en eau et de compactage à adopter pour la confection des éprouvettes. L'Annexe 4 donne des recommandations concernant la préparation d'éprouvettes en matériaux traités à la chaux pour les études en laboratoire.

7.4.1 Études relatives à la fonction maniabilité (M)

Lorsqu'on vise la fonction maniabilité (M), le problème à résoudre concerne exclusivement les difficultés d'extraction et de mise en œuvre. En plus des paramètres habituels (caractérisation des matériaux naturels), les paramètres à étudier sont donc :

- l'état hydrique du gisement, c'est-à-dire la répartition des teneurs en eau naturelles par rapport à la teneur en eau de l'optimum Proctor w_{OPN} ,
- la portance immédiate en fonction de la teneur en eau naturelle, mesurée par l'indice IPI (Indice Portant Immédiat),
- le dosage en chaux à appliquer en fonction de la teneur en eau naturelle pour atteindre la valeur d' IPI ≥ 8 compatible avec une bonne mise en œuvre du matériau traité, ou toute autre valeur définie par le maître d'œuvre.

La méthodologie est clairement décrite dans le GTS, (Partie B : Traitement des sols en remblais) [3].

Le résultat attendu de l'étude de traitement pour la fonction maniabilité (M) est représenté Figure 25. Il est important de noter que l'état hydrique du gisement, constaté lors des reconnaissances, est susceptible d'évoluer en fonction des saisons. Par conséquent, il y a lieu d'envisager un large spectre d'état hydrique pour mieux appréhender les conséquences sur l'organisation des travaux au moment de leur réalisation. Les répercussions sur la consommation en chaux peuvent être favorables (études réalisées en saison humide et travaux en saison sèche : réduction de la consommation en chaux) ou défavorables (études réalisées en saison sèche et travaux en saison humide : augmentation de la consommation en chaux).

Tableau des paramètres mesurés lors de l'étude en laboratoire

Paramètres	Dosages en chaux (%)				
	0	1	2	3	
w_n du sol 18 %	IPI	4	20	30	35
	w sol traité (%)	18	17,1	16,1	15
	ρ_d (Mg/m ³)	1,73	1,73	1,70	1,60
w_n du sol 20 %	IPI	2	10	20	21
	w sol traité (%)	20	19	18,2	17,2
	ρ_d (Mg/m ³)	1,70	1,71	1,71	1,64
w_n du sol 24 %	IPI	0	2	7	12
	w sol traité (%)	24	23,1	22,2	21,5
	ρ_d (Mg/m ³)	1,50	1,55	1,55	1,66

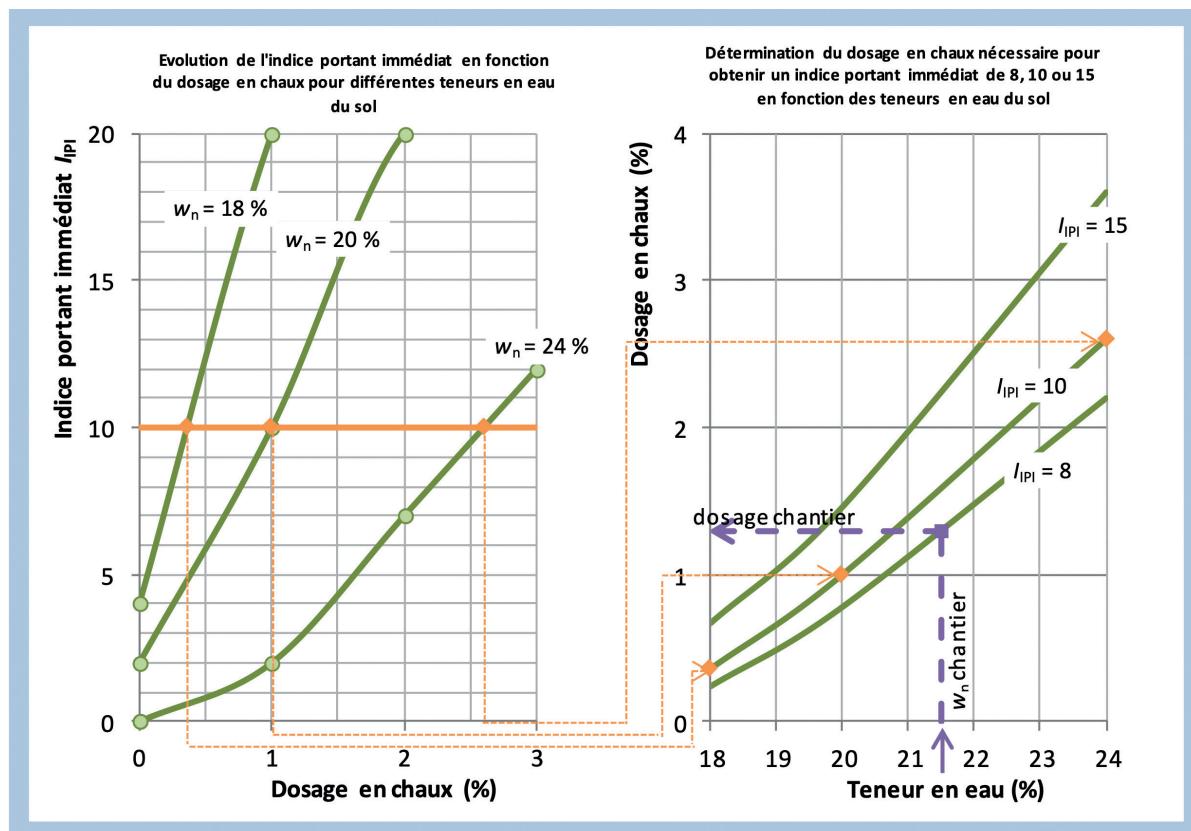


Figure 25 : Présentation des résultats d'une étude de formulation à la chaux d'un sol (limon de classe A2) pour la fonction maniabilité (M) (extrait du GTS)

7.4.2 Études relatives aux fonctions stabilité (S), étanchéité (P), protection contre l'érosion interne (EI)

Par rapport à la fonction maniabilité (M), les matériaux doivent satisfaire à des exigences de performance mécanique ou d'homogénéité, ou de perméabilité, ou de résistance à l'érosion interne. Ils peuvent aussi devoir satisfaire à plusieurs de ces exigences à la fois.

Comme pour la fonction maniabilité (M) on étudie dans un premier temps l'état hydrique du gisement et la portance immédiate en fonction de la teneur en eau du sol.

L'étude de formulation permet de déterminer la teneur en eau et le dosage en chaux à appliquer pour les fonctions visées. Cette étude comprend les points suivants :

- la détermination du point de fixation de la chaux (LFP pour Lime Fixation Point). Il s'agit du dosage en chaux à partir duquel le phénomène d'échange cationique avec le sol en question peut s'amorcer et permettre le déroulement des réactions sol-chaux. La détermination du LFP se fait via un essai de laboratoire selon la Norme XP CEN/TS 17693-1 [37] qui consiste à déterminer la quantité de chaux ajoutée pour éléver le pH d'une dispersion de sol dans l'eau, jusqu'à une valeur de 12,4. (voir encadré ci-après). La quantité de chaux ajoutée au sol et excédant celle correspondant au LFP, constitue une réserve disponible pour assurer l'initiation des réactions pouzzolaniques et permettre le gain de performances mécaniques et hydrauliques du matériau sol-chaux à long terme (les réactions dites de stabilisation). Le LFP sert donc de référence au démarrage des études sur la mesure des performances mécaniques, de la perméabilité et de la contrainte critique d'érosion.
- la vérification de l'aptitude au traitement par l'essai de gonflement accéléré (NF EN 13286-49) [7]. Cet essai vise à détecter la présence d'éléments qui, en excès, peuvent provoquer des désordres ou s'opposer à l'action des liants.

Il s'agit principalement de sulfates qui peuvent générer des gonflements, ou d'éléments chimiques (matières organiques, nitrates, etc.) ou minéralogiques (micas) qui peuvent ralentir ou altérer la prise et le durcissement des mélanges.

- la vérification du maintien des valeurs de l'indice portant après 4 jours d'immersion du sol traité au dosage en chaux retenu ($CBR_i/IPI > 1$).

Détermination du Point de Fixation de la Chaux (LFP)

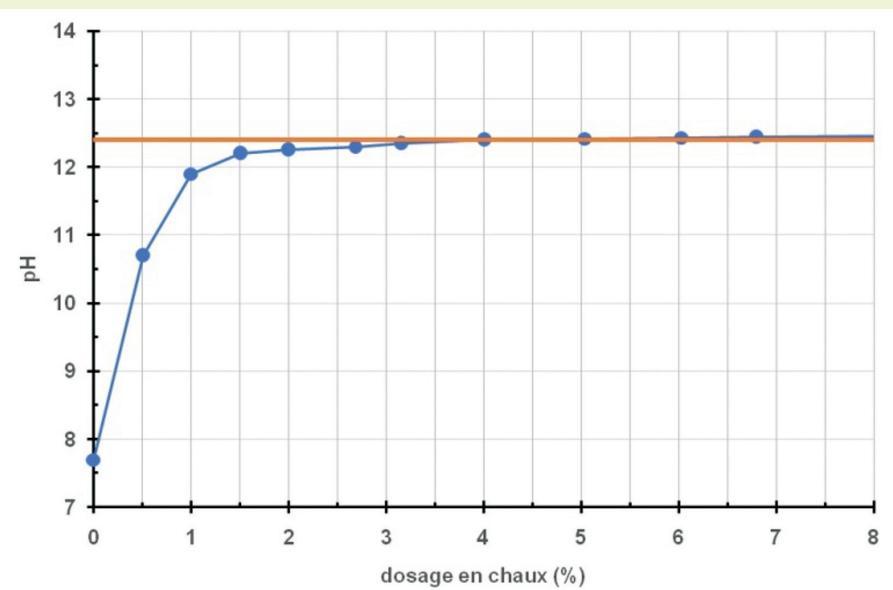
Le LFP est déterminé par la mesure du pH du mélange sol-chaux décrit dans la norme XP CEN/TS 17693-1 [36]. Cette méthode permet de déterminer le dosage minimal en chaux pour que le mélange atteigne un $pH = 12,4$, dosage qui est considéré comme étant la transition entre l'amélioration et la stabilisation du sol. Au-delà de ce dosage, la quantité de chaux ajoutée sera disponible pour les réactions pouzzolaniques qui se développent dans le mélange par la constitution de phases cimentaires.

L'essai consiste à mélanger du sol préalablement séché avec différents dosages de chaux (généralement de 1 % à 6 %) et de le diluer dans de l'eau distillée. Après un délai d'une heure avec une agitation toutes les 10 minutes, le pH de la solution est mesuré au pH-mètre.

Le plus petit dosage permettant d'atteindre un pH de 12,4 est le point de fixation de la chaux (LFP).

Dans la pratique, le dosage retenu est supérieur au LFP déterminé par l'essai de laboratoire afin de prendre en compte la difficulté de mesurer la valeur élevée du pH avec les appareils de laboratoire et de s'assurer d'une réserve de chaux disponible pour les effets pouzzolaniques. Il est convenu par la profession de retenir le dosage à appliquer sur chantier comme étant le $LFP + 1\%$.

La figure ci-après montre un exemple de détermination du LFP.



Détermination du LFP pour un sol de classe A3 (suivant NF P11-300 [8]). Dans cet exemple le LFP est évalué à 4 %, le dosage pour mener l'étude de traitement en laboratoire s'établirait à 5 %.

Pour la réalisation des essais, le cahier des charges des études de laboratoire doit spécifier les conditions de préparation des éprouvettes : teneurs en eau et taux de compactage. En fonction des choix du projeteur, ces caractéristiques peuvent s'inspirer de celles préconisées dans le GTS [3], correspondant à une mise en œuvre en remblai ou en couche de forme.

Une fois le plan d'expérience établi, les performances des mélanges sont étudiées pour les fonctions visées :

- pour la fonction stabilité (S) : performances mécaniques en fonction du temps et du dosage en chaux (résistance à la compression uniaxiale, à la traction si nécessaire, au cisaillement, caractérisation de la compressibilité et du tassement). Les tests sont usuellement menés à 28 et 90 jours de cure, voire plus si on veut analyser l'évolution des caractéristiques mécaniques dans le temps.
- pour la fonction étanchéité (P) : la perméabilité du mélange, mesurée en laboratoire, aux conditions préconisées (teneur en eau, dosage en chaux, taux de compactage et méthode de compactage, âge).
- pour la fonction protection contre l'érosion interne (EI) : la contrainte critique d'érosion de conduit mesurée selon la méthode du « Hole Erosion Test ».

Le dosage final en chaux à retenir est celui permettant de répondre à toutes les fonctions visées.

Chaque fois que possible, les performances mesurées sur les matériaux traités seront comparées aux performances mesurées sur les mêmes matériaux avant traitement.

7.4.3 Études relatives à la fonction protection de surface (ES)

Jusqu'à une époque récente, à défaut d'essais de laboratoire permettant de caractériser de manière fiable la résistance à l'érosion de surface des matériaux utilisés dans la conception des ouvrages hydrauliques des études en vraie grandeur ont été entreprises.

Le démonstrateur DigueELITE et les plots expérimentaux de Salin de Giraud ayant permis de tester *in situ* la résistance à l'érosion par surverse d'un sol fin limoneux de classe A1 non traité et traité à la chaux, il est possible, en raisonnant par analogie, d'en tirer les conclusions suivantes :

- dans les conditions de fabrication et de mise en œuvre pratiquées sur le démonstrateur DigueELITE et les plots expérimentaux de Salin de Giraud (dosage en chaux, teneur en eau, homogénéité du mélange sol-chaux, modalités de compactage), un sol de classe A1, traité à la chaux selon un dosage supérieur ou égal à 2 %, a une résistance à l'érosion de surface, dans le cas d'une surverse, notamment supérieure à celle du même sol non traité.
- par comparaison avec le sol classé A1 dans les cas du démonstrateur DigueELITE et des plots expérimentaux de Salin de Giraud, on peut admettre que les sols de classe A2 ont un comportement identique aux sols de classe A1 du point de vue de la résistance à la surverse.

La description des essais de surverse réalisés sur le démonstrateur du Vidourle et les plots expérimentaux de Salin de Giraud ainsi que les résultats d'érosion quantifiés figurent dans la partie B du document (§ 5).

Il est prématué de tirer des conclusions similaires pour d'autres classes de sols pour lesquels des essais s'imposent. Depuis peu, des essais de mesure de la résistance à l'érosion de surface en laboratoire ont été développés, comme l'essai JET (Jet Erosion Test). Ils peuvent utilement donner des indications sur les propriétés de ces autres classes de sols.

7.4.4 Études relatives à la fonction évacuation (EV)

La fonction évacuation se distingue de la fonction protection de surface par l'ampleur des sollicitations, en particulier des vitesses et des charges hydrauliques. Elle s'applique aux évacuateurs de crue des barrages, mais également aux déversoirs de digues qui seraient conçus pour faire transiter des débits spécifiques significatifs.

L'étude de cette fonction ne figurait pas dans les objectifs de DigueELITE. Néanmoins, des réflexions sont en cours en prévision de programmes de recherche ultérieurs.

Dans l'attente de résultats, et dans le cas où les sollicitations dépassent la gamme de résistance à l'érosion externe du sol traité à la chaux, le concepteur doit recourir aux solutions alternatives usuelles. Toutefois, il peut exploiter d'autres fonctions du sol traité à la chaux (stabilité, tenue à l'érosion interne notamment) dans la conception du dispositif concerné.

7.5 Chantiers expérimentaux

Avant la construction d'un ouvrage et suivant sa fonction d'usage il peut s'avérer nécessaire de réaliser, dans la phase étude et selon un marché particulier, un chantier expérimental que l'on peut aussi qualifier de démonstrateur. Cette décision appartient au maître d'ouvrage qui, sur la base d'une analyse technique, économique et de risque, peut envisager une telle démarche.

Parmi les éléments pouvant amener à prendre la décision de réaliser un chantier expérimental, on peut citer :

- l'emploi de sol(s) non encore utilisé(s) pour la fonction d'usage concernée,
- le besoin de préciser l'état des connaissances ou des résultats d'études antérieures,
- la vérification des performances mécaniques et hydrauliques réellement obtenues,
- la définition précise des objectifs recherchés,
- les modalités du marché de travaux à établir.

L'enjeu essentiel d'un chantier expérimental réside en la démonstration que l'utilisation des sols considérés est possible, après traitement à la chaux, pour les applications envisagées tout en garantissant les performances visées. Les conclusions tirées d'un tel chantier peuvent amener le maître d'ouvrage à définir de nouvelles conditions de construction de l'ouvrage hydraulique. Elles peuvent aussi conduire à optimiser sa conception, ce qui peut avoir des impacts bénéfiques, à la fois économiques, environnementaux ou sur le planning des travaux.

L'exécution d'un chantier expérimental, qui peut présenter une charge financière importante, est envisageable pour des chantiers de grande taille, notamment dans le cadre de fonctions particulières recherchées telles que l'obtention d'un faible niveau de perméabilité ou d'une grande résistance à l'érosion ou à la surverse. Elle doit faire l'objet d'une démarche en amont du marché de travaux et être programmée dans une échelle des temps permettant d'exploiter les conclusions pour les appliquer sur l'ouvrage final. Cette phase peut également permettre d'évaluer le prix de revient d'un ouvrage avec une meilleure précision.

D'une manière générale, le maître d'ouvrage, avec l'appui de la maîtrise d'œuvre, doit spécifier toutes les conditions de réalisation du chantier expérimental dans un CCTP dédié qui doit notamment fixer en détail :

- les objectifs recherchés,
- le site où sera réalisé le chantier,
- la description de l'ouvrage,
- les modalités d'exécution des travaux,
- les modalités de contrôle et de suivi de la mise en œuvre.

Tous les éléments utiles à la bonne exécution ainsi que les moyens matériels nécessaires doivent être prévus dans la phase de conception du chantier expérimental, en particulier les différentes méthodes et moyens de contrôle à déployer pour assurer d'une part le suivi de la mise en œuvre, et d'autre part, l'évaluation des performances obtenues.

Plusieurs plots d'essais peuvent être réalisés dans le cadre d'un chantier expérimental afin d'étudier par comparaison plusieurs modalités qui diffèrent par exemple par la nature des sols employés (nature minéralogique, plasticité, granulométrie), la méthodologie de traitement de sol (dosage en chaux, moyens matériels, phasage des opérations), etc.

Après la construction, les performances obtenues sont évaluées au moyen d'essais in situ. Les caractéristiques obtenues doivent permettre de valider et éventuellement d'optimiser les modalités de réalisation de l'ouvrage.

Pour illustrer cette partie, on peut citer les trois réalisations récentes suivantes :

- la digue expérimentale du CER de Rouen (septembre 2011) – (Figure 26),
- le démonstrateur DigueELITE sur le Vidourle (juillet 2015) - (Figure 27),
- les plots expérimentaux de Salin de Giraud du SYMADREM (novembre 2017) - (Figure 28).

Ces chantiers expérimentaux ont fait l'objet de publications que le lecteur pourra consulter [12, 38 - 43]. Il y trouvera tous les détails utiles relatifs au dimensionnement, à la réalisation et aux types de contrôles réalisés.



Figure 26 : Digue sèche expérimentale de Rouen – vue générale de la digue en construction (photo Lhoist)



Figure 27 : Démonstrateur DigueELITE (photo DigueELITE)

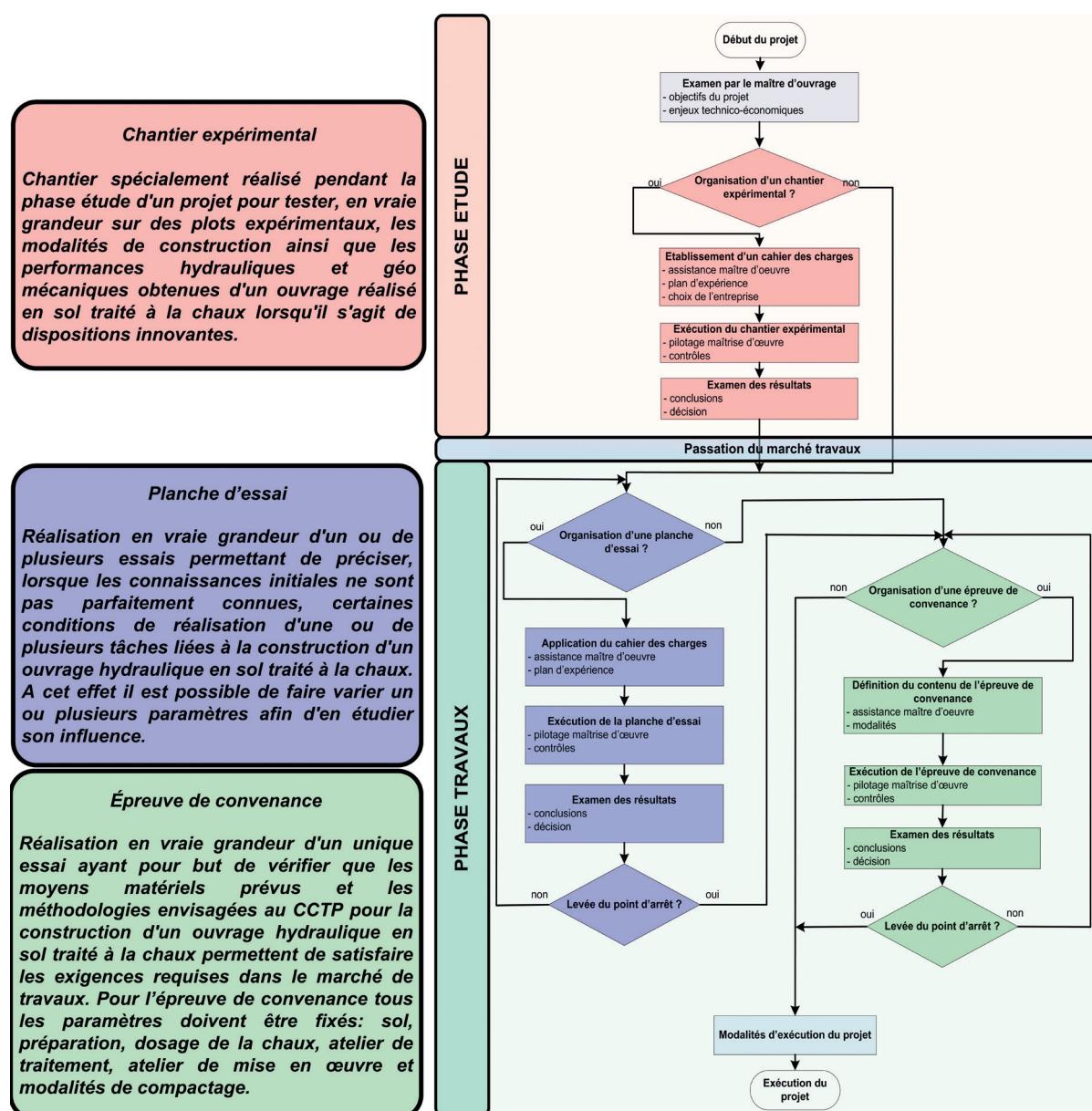


Figure 28 : Plots expérimentaux de Salin de Giraud - vue générale du site (plot en sol traité à gauche et plot en sol naturel en cours d'essais de surverse à droite) (photo SYMADREM)

7.6 Chantier expérimental, planche d'essai, épreuve de convenance

Afin de préciser la distinction à faire entre ces différentes notions, les définitions et un logigramme exposant le cheminement des opérations et des décisions que les maîtrises d'ouvrage et d'œuvre sont amenées à prendre sont précisés dans l'encadré suivant.

Comme dit précédemment, la réalisation d'un chantier expérimental est à conduire dans la phase étude et doit relever d'un marché particulier alors que la planche d'essai ou l'épreuve de convenance sont à réaliser au démarrage du marché de travaux ou chaque fois que nécessaire.



8. Éléments utiles à la conception des ouvrages

Ces éléments concernent les digues et petits barrages dont la hauteur n'excède pas une quinzaine de mètres. Il peut s'agir d'ouvrages neufs ou de confortement d'ouvrages existants. L'objectif n'est pas ici de se substituer aux bonnes pratiques de la profession, mais plutôt d'éclairer sur les particularités des sols traités à la chaux afin d'aider à la conception des ouvrages.

8.1 Éléments utiles à la conception relatifs à la fonction maniabilité (M)

La fonction M (maniabilité) permet l'emploi de sols jugés impropre, essentiellement du fait de leur teneur en eau. Lorsque l'étendue des teneurs en eau ne nécessite pas un traitement systématique de la totalité des matériaux de l'ouvrage, il convient de se poser la question de savoir si l'ouvrage peut accepter des hétérogénéités dans sa structure, du type répartition aléatoire des parties traitées et non traitées. Par ailleurs, si les remblais en sol-chaux sont acceptés en cas de présence de sols compressibles en fondation d'ouvrage routier ou ferroviaire, il convient de vérifier que cette pratique est acceptable pour l'ouvrage hydraulique considéré.

8.2 Éléments utiles à la conception relatifs à la fonction stabilité (S)

La fonction stabilité (S) permet d'exploiter l'amélioration des performances mécaniques du sol traité à la chaux. En règle générale le recours au sol traité à la chaux permet de raidir significativement les pentes des ouvrages. Les caractéristiques mécaniques du sol traité à la chaux permettent également de diminuer les risques de rupture d'un remblai saturé ou partiellement saturé, par exemple en cas de vidange rapide. La fonction stabilité (S) peut également être appelée en cas de confortement d'un ouvrage existant. La mise en œuvre d'une recharge en sol traité à la chaux en complément ou en substitution d'une partie de remblai existant à la stabilité précaire (talus amont ou aval) peut utilement améliorer la stabilité d'un ouvrage. Néanmoins, ce type de travaux ne doit pas nuire à la fonction drainage, en particulier, pour le talus aval pour lequel des dispositions constructives doivent être prises afin de conserver cette fonction de drainage lorsqu'elle existe.

8.3 Éléments utiles à la conception relatifs à la fonction étanchéité (P)

De récentes études, en laboratoire et en vraie grandeur, ont permis de démontrer que le traitement à la chaux d'un sol limono-argileux ne s'opposait pas à l'obtention de faibles perméabilités -et ce dès la mise en œuvre - à condition de compacter le mélange du côté humide du Proctor, par pétrissage à l'aide d'un compacteur à pieds dameurs. La perméabilité est alors comparable à celle obtenue avec le même matériau non traité mis en œuvre dans les règles de l'art. Cependant, la perméabilité globale de l'ouvrage reste gouvernée par les hétérogénéités de la construction qui pourraient être le siège d'écoulements préférentiels. À ce stade il convient donc d'être prudent avec la notion de perméabilité en grand d'un ouvrage en sol traité à la chaux, comme pour les sols non traités.

8.3.1 Cas des ouvrages à charge permanente

Au stade actuel des connaissances, on ne peut considérer que le remblai en sol traité à la chaux est capable d'assurer seul la fonction d'étanchéité d'un ouvrage à charge permanente, retenant l'eau pendant une longue durée (barrage réservoir, canaux, etc.). Des dispositifs rapportés doivent être prévus (complexe d'étanchéité et drainage, recharge amont étanche, coupure étanche, etc.).

8.3.2 Cas des ouvrages à charge non permanente

Dans ce cas, on considère que le niveau d'étanchéité apporté par le sol traité à la chaux est suffisant pour ce type d'ouvrage. En effet, d'une manière générale, des fuites sont techniquement acceptables à condition qu'elles ne créent pas de risque d'érosion interne ou externe. Si la conception intègre des barrières de sécurité par rapport à

ces risques d'érosion (recours aux fonctions EI et ES – voir ci-dessous – du sol traité, et/ou dispositif de filtration drainage), il est donc considéré qu'un ouvrage à charge non permanente ne nécessite pas de recours à des dispositifs d'étanchéité rapportés.

8.4 Éléments utiles à la conception relatifs à la fonction protection contre l'érosion interne (EI)

La résistance à l'érosion interne est avérée par les essais de laboratoire, jugés représentatifs du comportement du matériau sur site. Partant de ce constat, les dispositifs mis en œuvre pour le contrôle de l'érosion interne peuvent être radicalement repensés. Les considérations suivantes peuvent être utiles lors de la conception d'un ouvrage en sol traité à la chaux.

- Les fuites sont significativement décorrélées du risque d'érosion interne.
- Les dispositifs de filtration et drainage dans le corps de l'ouvrage peuvent être simplifiés, compte tenu de l'amélioration de la stabilité (fonction S) et de la résistance à l'érosion interne.
- Le traitement des sols à la chaux ne permet pas de réduire le risque d'érosion à l'interface entre matériau traité et matériau non traité. En particulier, le dispositif de filtration et drainage à l'interface avec la fondation doit être soigneusement conçu. De même, en cas d'ouvrage mixte avec zone en sol traité et zone en sol non traité, l'interface entre ces zones doit être étudiée avec soin.
- Bien que la stabilité soit assurée par la fonction S, le drainage d'une conception en carapace doit être étudié afin de maîtriser les phénomènes liés aux contrastes de perméabilité.
- Le risque d'érosion de contact, à l'interface avec un ouvrage traversant est significativement limité en cas de recours au sol traité à la chaux sur toute la zone de contact ; cependant, le risque de fuite reste avéré.

De plus, des facteurs de risque externes pouvant être à l'origine d'un défaut menant à l'érosion interne sont réduits.

- Dans le cas du démonstrateur du Vidourle, les tentatives de création de conduits par des fousseurs se sont toutes révélées infructueuses dans le sol traité. Au contraire, celles réalisées sur le massif en sol non traité, se sont traduites par la création de terriers jusqu'à 80 cm de profondeur. À partir de ce constat et dans un contexte similaire, les protections anti-fousseurs du sol traité à la chaux peuvent s'avérer superflues.
- Le remblai en sol traité à la chaux n'est pas favorable au développement racinaire profond. Le développement de végétation rase est possible sur une couche de terre végétale, mais le développement d'arbres est considérablement freiné sur un ouvrage en sol traité à la chaux.

8.5 Éléments utiles à la conception relatifs à la fonction protection de surface (ES)

L'érosion de surface peut se manifester lors de plusieurs phénomènes physiques rencontrés sur un ouvrage hydraulique :

- a. érosion suite à un phénomène de surverse,
- b. érosion due au batillage (vent, navigation),
- c. érosion due aux phénomènes météorologiques,
- d. érosion longitudinale due aux courants.

Le projet DigueELITE a contribué à déterminer, pour la première fois en vraie grandeur et de façon quantitative, la résistance à l'érosion de surface par surverse. Cette étude a été complétée par les mêmes essais réalisés sur les plots expérimentaux de Salin de Giraud, qui ont conduit aux mêmes conclusions.

L'ensemble des résultats obtenus a permis de démontrer la supériorité du sol traité à la chaux par rapport au même sol non traité.

Il est donc possible d'envisager, selon les gammes de sollicitations considérées, des conceptions tirant parti de cette résistance. En particulier :

- conception de digues résistantes à la surverse sur un long linéaire, en lieu et place de déversoirs fortement protégés sur linéaires réduits. Le sol traité à la chaux est généralement recouvert de terre végétale enherbée pour assurer la protection du matériau. Dès que les sollicitations sont supérieures à la résistance à l'érosion de l'enherbement, seule la terre végétale s'érode, et ce jusqu'au remblai traité.
- diminution de la revanche, en considérant que la marge de sécurité usuellement prise par rapport au niveau des PHE n'est pas entièrement nécessaire, compte tenu de la résistance à l'érosion externe du talus.
- amélioration de la tenue d'un remblai en sol traité à la chaux face à l'érosion due aux précipitations (ravinement). À noter que cette tenue n'est en principe à mobiliser qu'en phase transitoire avant couverture de l'ouvrage par de la terre végétale, cette couverture étant préconisée afin d'éviter de soumettre le matériau sol traité à la chaux aux aléas climatiques.

La résistance du sol traité à la chaux aux phénomènes de batillage ainsi qu'aux écoulements longitudinaux n'a pas pu être testée dans le cadre du projet DigueELITE. Une certaine prudence s'impose donc sur ce sujet tant que des essais n'auront pas été réalisés. On dispose cependant d'un retour d'expérience sur le canal d'irrigation de Friant-Kern en Californie où le plafond et les berges revêtus d'une protection en sol traité à la chaux résistent à un courant de 1,5 m/s depuis 50 ans.

8.6 Éléments utiles à la conception relatifs à la fonction évacuation (EV)

La fonction EV fait appel à la résistance à l'érosion externe dans le cadre précis des dispositifs d'évacuation des crues.

Cette fonction se distingue donc de la fonction protection de surface (ES) par l'ampleur des sollicitations (lame d'eau sur l'ouvrage, vitesses d'écoulement). Les sollicitations peuvent être significatives, et la résistance du sol traité à la chaux n'a pas pu être testée dans de telles conditions.

De ce fait, pour autant que les sollicitations dépassent la gamme de résistance du sol traité à la chaux à l'érosion externe, le concepteur doit recourir aux dispositions constructives usuelles. Le concepteur peut cependant exploiter d'autres fonctions du sol traité à la chaux (S, EI notamment) dans la conception du dispositif d'évacuation des crues.

D. EXECUTION DES TRAVAUX

9. Introduction

Cette partie du document est consacrée aux points importants relatifs à la méthodologie de construction d'ouvrages hydrauliques en sols traités à la chaux qui s'appuie sur celle connue et utilisée pour les ouvrages classiques d'infrastructures linéaires de transport. La technique de traitement des sols qui est détaillée dans le GTS [3] n'est pas reprise dans ce document. Toutefois, le lecteur trouvera dans ce chapitre des compléments sous forme de propositions qui s'inspirent des enseignements tirés de l'expérience de chantiers récents.

10. Dossier de consultation des entreprises (travaux)

Le DCE (travaux) d'un chantier d'ouvrage hydraulique réalisé en sol traité à la chaux doit clairement faire apparaître les ouvrages ou parties d'ouvrages à réaliser (ou éligibles à la réalisation) en composant sol-chaux avec, pour chaque ouvrage ou partie d'ouvrage, les fonctions respectives que doit remplir le composant sol-chaux. Les fonctions sont décrites selon la terminologie du § 2.2. Il est ainsi opportun de commencer le CCTP du DCE par un tableau synthétisant quelles fonctions sont demandées aux différentes parties d'ouvrages.

Selon le niveau de connaissance acquis en mission G2 (norme NF P94-500 [44]), et en particulier le niveau de caractérisation des solutions de traitement, deux rédactions de DCE sont possibles.

- En cas de mission G2 poussée une première rédaction peut être réalisée en termes d'obligations de moyens avec des spécifications fixées sur le dosage en chaux, les épreuves de convenance, les matériels, les méthodologies de traitement de sols et de mise en œuvre, et le contrôle.
- En cas de mission G2 moins poussée et moins complète, le DCE peut être rédigé non plus en termes d'obligations de moyens mais de résultats avec spécifications quantitatives d'objectifs à atteindre pour chaque fonction demandée au composant sol-chaux. Le DCE peut alors demander à l'entreprise de définir les modalités pour atteindre ces objectifs dans le cadre de sa mission G3 (norme NF P94-500 [44]), soumise à l'approbation du maître d'œuvre. L'approbation portera aussi bien sur la caractérisation des gisements, l'étude de traitement, le programme des planches d'essais, les procédures de traitement, d'homogénéisation, de gestion des stocks, de mise en œuvre, que sur le programme de suivi et de contrôle proposé par l'entreprise.

Quel que soit le niveau de connaissance acquis en mission G2 et donc quelle que soit la rédaction adoptée pour le DCE, ce dernier devra comporter les items suivants dans le CCTP :

- le tableau des ouvrages et parties d'ouvrages envisagés en composant sol-chaux et la ou les fonctions demandées à ce dernier,
- le contenu des études d'exécution dévolues à l'entreprise (mission G3) avec notamment la caractérisation (ou le complément de caractérisation) des gisements et la caractérisation des performances associées à chaque fonction,
- les installations de chantier et le matériel spécifiques au traitement,
- la provenance et la qualité des matériaux,
- les planches d'essais et épreuve de convenance,
- les méthodes d'exécution d'ouvrages ou de parties d'ouvrages,
- les contrôles.

11. Planche d'essais

Lorsque les conditions initiales de réalisation des travaux ne sont pas parfaitement connues ou que l'on voudra vérifier certains points particuliers, le recours à une ou plusieurs planches d'essais peut s'avérer nécessaire.

Cette phase, qui peut être déterminante pour la réussite du chantier, s'applique généralement pour des chantiers de taille importante. L'achèvement de chacune des planches d'essais marque un point d'arrêt dans l'organisation de la qualité. Les résultats font l'objet d'un rapport remis au maître d'œuvre qui doit lui permettre de fixer les conditions pratiques de mise en œuvre en fonction des objectifs recherchés et de lever, ou pas, le point d'arrêt préalablement à l'exécution des travaux.

La décision de recourir à une (ou plusieurs) planche(s) d'essais est fonction de plusieurs critères parmi lesquels on peut citer :

- la taille du chantier,
- le choix entre différentes natures de sols à traiter,
- la mise au point d'une technique de préparation ou de traitement de sol,
- l'étude des modalités pratiques de compactage si elles ne sont pas prédéterminées,
- les propositions de variantes par l'entreprise,
- l'enjeu économique de la démarche.

Les planches d'essais sont réalisées avec tous les moyens qui seront utilisés par l'entreprise sur le chantier. Elles sont effectuées sur la base de spécifications précises détaillées dans un CCTP et font l'objet d'un plan d'expérience établi. Sauf autorisation du maître d'œuvre, elles ne font pas partie intégrante du projet et sont réalisées en dehors de la zone de travaux. Il est recommandé que les planches d'essais fassent l'objet de plans d'exécution à établir par l'entreprise et à valider par la maîtrise d'œuvre. La présence d'un représentant du maître d'œuvre pendant leur réalisation est fortement recommandée.

Dans le cas de chantiers très importants qui nécessiteraient plusieurs planches d'essais (préparation du sol, mise au point de l'atelier de traitement, modalités de compactage, etc.), celles-ci peuvent être réalisées en phases distinctes. Pour la réalisation d'une planche d'essai, il est pris comme hypothèse de disposer d'un stock préalable de sol ou d'un gisement dûment identifié. Avant la réalisation d'une planche d'essai, il convient de régler et/ou de contrôler tous les paramètres de fonctionnement des matériels qui seront utilisés pendant les phases de préparation, de traitement et de mise en œuvre. Toutes les indications utiles au fonctionnement des engins et au respect des valeurs prescrites doivent être consignées et transmises clairement aux conducteurs des engins.

Souvent, la réalisation d'une planche d'essai vise à fixer l'énergie de compactage à mettre en œuvre pour atteindre l'objectif de densification visé. Dans ce cas, et bien que cela s'apparente plutôt à une épreuve de convenance, on parle parfois de « *Planche d'essai de compactage* » décrite dans la Note d'information Sétra n°114 « *Éléments techniques pour la conception et la réalisation de planche d'essais de compactage dans les chantiers de terrassement* » [45]. Dans ce cas, tous les paramètres sont figés à l'exception du nombre de passes de compacteur que l'on fait varier. Pour chacune des phases d'exécution de la planche d'essais (préparation du sol naturel, traitement de sol à la chaux, mise en œuvre, compactage) et pour le contrôle final, la liste des contrôles et mesures à effectuer doit être établie. Le choix dépend des performances attendues de l'ouvrage. Si certains paramètres peuvent être contrôlés visuellement en cours d'exécution, les facteurs quantifiables sont à déterminer suivant des mesures et procédés normalisés par un laboratoire agréé par le maître d'œuvre, qu'il s'agisse du laboratoire de l'entreprise ou d'un intervenant extérieur. Le type et le nombre de mesures à réaliser en fonction des facteurs à quantifier doivent être précisés dans le plan d'expérience afin que des conclusions sûres puissent être établies. La planche d'essai fait l'objet d'un rapport.

Après analyse des conditions pratiques du déroulement de la planche d'essai et des résultats obtenus, le maître d'œuvre pourra lever, ou pas, le point d'arrêt et autoriser le démarrage du chantier ou bien modifier un ou plusieurs paramètres définissant les modalités d'exécution. Dans ce cas, le maître d'œuvre peut exiger, ou pas, la réalisation d'une autre planche d'essai ou d'une épreuve de convenance.

12. Épreuve de convenance

Dans le cas le plus courant, lorsque toutes les conditions de réalisation des travaux sont maîtrisées et connues, une simple épreuve dite de convenance peut être demandée avant le début des travaux. Cette étape, marquée par un point d'arrêt dans l'organisation de la qualité, est nécessaire pour vérifier que les produits sélectionnés, les moyens en matériel mis en place et les méthodes d'exécution retenues permettent d'atteindre les objectifs visés. Elle permet de valider les méthodologies proposées pour l'exécution des travaux et de vérifier le débit de production attendu.

L'épreuve de convenance est spécifiée par le maître d'œuvre qui fixe les conditions détaillées de sa réalisation au CCTP. C'est une action unique dont tous les paramètres sont fixés par avance.

La consistance de l'épreuve de convenance doit être adaptée à la taille du chantier. Sa réalisation est effectuée en présence d'un représentant du maître d'œuvre. Sur autorisation du maître d'œuvre, l'épreuve de convenance peut faire partie intégrante du chantier et peut être réalisée sur les premières couches de remblai mises en œuvre. Le CCTP précise en détail toutes les conditions de réalisation de l'épreuve de convenance (géométrie, nombre de couches, sol support, vérification et étalonnage des matériels, préparation et traitement du sol, mise en œuvre et compactage du sol traité).

Afin de vérifier que les objectifs visés en matière de mouture du composant sol-chaux, de teneur en eau à la mise en œuvre, d'épaisseur de couche compactée et de niveau de densification sont atteints, plusieurs mesures sont à réaliser pendant l'exécution ou à l'issue de l'épreuve de convenance. Il s'agit des opérations suivantes :

- contrôles des opérations de préparation de sol à traiter (homogénéisation, humidification, pré malaxage, teneur en eau),
- contrôles des opérations de traitement de sol (épandage de la chaux, malaxage, mouture, teneur en eau, dosage en chaux, fonctionnement et débit de la centrale de traitement),
- contrôles des opérations de mise en œuvre (approvisionnement, régalage; réglage, épaisseur, teneur en eau, compactage).

Les contrôles et essais sont réalisés suivant les normes existantes, méthodes d'essais ou modes opératoires référencés ou décrits au CCTP. Le laboratoire en charge des essais devra être agréé par le maître d'œuvre.

A l'issue de l'épreuve de convenance et sur la base des résultats obtenus exposés dans un rapport, le maître d'œuvre lève le point d'arrêt. La non-obtention des résultats attendus peut conduire le maître d'œuvre à demander des modifications dans les méthodologies employées ou de recourir à d'autres matériels de traitement ou de mise en œuvre. Dans ce cas, une nouvelle épreuve de convenance après modification d'un ou plusieurs paramètres peut être demandée.

Si le CCTP a imposé une ou plusieurs planche(s) d'essai(s), le maître d'œuvre peut éventuellement ne pas imposer d'épreuve de convenance. Dans ce cas, la vérification de l'obtention des objectifs visés et les conditions pratiques de mise en œuvre sont tirées des conclusions de la ou des planches d'essais.

13. Exécution des travaux

13.1 Vérification des matériels

Le niveau de performances des matériels utilisés doit être adapté à la fonction d'usage recherchée. Les caractéristiques techniques des matériels (atelier de traitement et compactage) sont remises au maître d'œuvre. Avant le démarrage des travaux les différents matériels (atelier de traitement : arroseuse, épandeur, malaxeur, centrale de traitement et compacteur(s)) doivent faire l'objet d'un contrôle et d'un étalonnage afin de vérifier leurs caractéristiques morphologiques, leur état de marche et leurs paramètres de fonctionnement. Cette opération de

réception des matériels est généralement pratiquée dans le cadre de la réalisation de la planche d'essai ou de l'épreuve de convenance. Pour les compacteurs on vérifiera la conformité par rapport à la classification donnée par la norme NF P 98-736 [46]. En cas de nécessité de changement de matériel pendant l'exécution des travaux, le maître d'œuvre doit être informé et donner son accord.

13.2 Construction de l'ouvrage

13.2.1 Extraction des sols

Dans le contexte des ouvrages hydrauliques, généralement réalisés dans une emprise limitée comparée aux chantiers d'infrastructures linéaires, le mode d'extraction frontale à la pelle est préférable dans la plupart des cas. Il permet d'effectuer à l'extraction un premier brassage du sol sur toute la profondeur du gisement. La reconnaissance du gisement revêt un caractère primordial en amont de cette tâche. Dans le cas d'une reconstruction et de la réutilisation des sols d'un ouvrage existant, il peut s'avérer nécessaire de procéder à un tri des sols extraits lors de l'opération de déconstruction. Dans ce cas, la surface de travail nécessaire au tri doit être prévue et de même si un mélange de différentes natures de sols est envisagé.



Terrassement d'un ouvrage existant (photo INRAE)



Terrassement d'un gisement de sol A2 (photo DigueELITE)

Figure 29 : Extraction de sol

13.2.2 Constitution d'un dépôt provisoire de sol naturel

La réalisation d'un dépôt provisoire de sol naturel extrait doit se faire dans des conditions qui limitent au maximum les variations hydriques et surtout l'exposition aux intempéries. Le dépôt est réalisé sur une plate-forme hors d'eau, par couches successives sur toute la surface de la plate-forme, régaliées et légèrement compactées. Les pentes des talus sont taillées et lissées afin de favoriser l'écoulement de l'eau météorique. La crête du dépôt est réglée avec une pente empêchant la stagnation de l'eau en surface et favorisant son écoulement. En pieds de talus l'évacuation de l'eau doit être assurée par l'aménagement de rigoles et d'exutoires. Ces dispositions permettent de conserver au mieux l'homogénéité et la teneur en eau du sol naturel constituant le dépôt provisoire qui peut ainsi rester en place l'état plusieurs semaines, voire plusieurs mois, et subir le moins possible les variations de conditions hydriques.



Réalisation d'un dépôt provisoire (photo DigueELITE)



Reprise de sol à partir d'un dépôt provisoire (photo Lhoist)

Figure 30 : Dépôt provisoire de sol naturel

13.2.3 Identification de l'état hydrique du sol naturel

La maîtrise de la teneur en eau du composant sol-chaux à sa mise en œuvre est un point-clé déterminant la réussite des chantiers. Quelle que soit la technique de traitement utilisée, il est important que la teneur en eau du sol naturel soit la plus homogène possible pendant toute la durée des opérations de construction afin que les réglages des ateliers de préparation et de traitement soient constants. Il est donc nécessaire d'identifier spatialement la teneur en eau du gisement ou du dépôt provisoire. Une campagne d'identification de l'état hydrique du sol naturel doit être entreprise avec des moyens adaptés. Le maillage des prélèvements doit être assez fin pour obtenir une bonne résolution de la distribution de la teneur en eau sur le volume de sol concerné. Il dépend des dimensions du gisement ou du dépôt. À titre indicatif un prélèvement peut être réalisé pour 500 m³ de sol. Dans le cas de la fonction maniabilité (M), le suivi de l'évolution de la teneur en eau du sol naturel est impératif afin d'ajuster le dosage en chaux et de respecter les conditions de mise en œuvre prévues.

13.2.4 Traitement de la fondation de l'ouvrage

Après l'exécution du terrassement de la fouille et de son assainissement, il peut s'avérer nécessaire de réaliser un traitement en place à la chaux du fond de fouille afin de bénéficier de conditions de portance suffisante pour la mise en œuvre et le compactage des premières couches de remblai. Le fond de fouille, qu'il soit traité ou non, doit être compacté avec des conditions de compactage adaptées au cas rencontré. En cas de réalisation d'une tranchée remblayée (clé d'ancre, étanchéité, etc.) ou de nécessité de terrasser sur des profondeurs locales, le remblaiement de ces zones doit être réalisé dans les mêmes conditions que celles retenues pour l'ouvrage. Néanmoins, dans certains cas, la présence d'eau en fond d'ouvrage (nappe affleurante, infiltrations, etc.) peut nécessiter des adaptations sur la méthode du remblaiement de cette partie d'ouvrage (renforcement, cloutage, rabattement de nappe, etc.).



Compactage d'un fond de fouille (photo DigueELITE)



Remblayage d'une clé d'ancrage (photo entreprise Lhotellier)

Figure 31 : Fond de fouille et clé d'ancrage

13.2.5 Homogénéisation du sol avant traitement

Dans le cas des fonctions P, EI, ES et EV, l'homogénéisation du sol avant son traitement est nécessaire. Deux solutions sont envisageables selon le degré d'homogénéité initial du gisement.

- Si l'homogénéité naturelle du gisement l'autorise : extraction sans constitution d'un dépôt provisoire par méthode verticale sur toute la profondeur du gisement. Le sol est alors chargé et transporté jusqu'à la plate-forme réservée au traitement ou vers la centrale de traitement,
- Si l'hétérogénéité du gisement est marquée : extraction par méthode verticale sur toute la hauteur du gisement avec constitution d'un dépôt provisoire par mise en couches superposées (§ 13.2.2). Dans le cas d'un traitement en place celui-ci peut se faire directement sur le dépôt provisoire ou sur une plate-forme dédiée après reprise en butte sur toute la hauteur du dépôt provisoire. Dans le cas d'un traitement en centrale, la reprise doit être réalisée en butte sur toute la hauteur du dépôt provisoire pour approvisionner le stock tampon d'alimentation de la centrale.



Extraction d'un gisement à la pelle avec homogénéisation (chantier Salin de Giraud novembre 2017 - photo INRAE)



Reprise en butte au chargeur sur dépôt provisoire pour alimentation d'une centrale de traitement (photo DigueELITE)



Reprise en butte à la pelle de sol naturel sur dépôt provisoire avec homogénéisation (chantier Salin de Giraud novembre 2017 - photo Lhoist)



Homogénéisation à la pelle de sol naturel sur dépôt provisoire (chantier expérimental de Vlassenbroek - photo Lhoist)

Figure 32 : Homogénéisation du sol naturel avant traitement

13.2.6 Humidification du sol avant traitement

Dans certains cas une augmentation plus ou moins importante de la teneur en eau du sol naturel peut s'avérer nécessaire. En fonction de la quantité d'eau à ajouter, plusieurs passes d'arroseuse peuvent se justifier. Le matériel d'arrosage utilisé pour cette opération doit être à dosage volumétrique asservi à la vitesse d'avancement. Les arroseuses classiques de chantier de type « queue de carpe » ne sont pas toujours adaptées à cette opération et on privilégiera des machines plus précises (arroseuse à jets fins ou arroseuse enfouisseuse).

Chaque passe d'arroseuse doit être réalisée sur un sol préalablement scarifié ou malaxé. Chaque passe d'arroseuse doit impérativement être suivie d'un malaxage sur toute l'épaisseur de la couche, puis d'une reprise de la planéité de la plate-forme. Plusieurs passes d'arroseuse et de malaxage peuvent être nécessaires pour incorporer au sol naturel une quantité d'eau importante. À titre indicatif on considère qu'une séquence d'humidification permet au maximum d'augmenter la teneur en eau d'un sol d'environ 3 %. Ces opérations peuvent représenter une quantité de travail importante et doivent être évaluées en amont par l'entreprise.



Arrosage d'une plate-forme de sol naturel avec une arroseuse de surface de type « queue de carpe » (chantier expérimental de Vlassenbroek - photo Lhoist)



Arroseuse enfouisseuse (photo INRAE)

Figure 33 : Humidification du sol naturel avant traitement (arrosage)



Malaxage du sol naturel après arrosage (chantier expérimental de Vlassenbroek - photo Lhoist)



Reprise de la planéité d'une couche de sol naturel au bulldozer guidé par GPS après une séquence d'arrosage et de malaxage (photo Lhoist)

Figure 34 : Humidification du sol naturel avant traitement (malaxage et reprise de plate-forme)

13.2.7 Traitement de sol en place (arrosage, épandage, malaxage)

Ce mode de traitement peut s'appliquer directement sans extraction préalable sur le gisement pour les fonctions M et S. Pour la fonction M, suivant l'évolution de la teneur en eau du sol naturel en cours d'exécution des travaux, un ajustement du dosage en chaux est possible. Pour les autres fonctions, le dosage en chaux doit être conforme à celui fixé par l'étude. Pour les fonctions P, EI, ES et EV définies au § 2.2, une phase d'homogénéisation est nécessaire avant le traitement. Pour les fonctions S, P, EI, ES et EV définies au § 2.2, si la teneur en eau du sol naturel n'a pas nécessité une humidification avant l'opération de traitement (§ 13.2.6), un ajustement de l'état hydrique au moment du traitement peut être nécessaire.

La méthodologie de traitement doit avoir été définie précisément et validée avant le démarrage des travaux par une planche d'essai ou une épreuve de convenance. Les principales caractéristiques des matériels utilisables sont les suivantes :

- matériel d'arrosage : dosage volumétrique asservi à la vitesse d'avancement,
- silo de stockage : garantie de la conservation à l'abri de l'air et de l'humidité de la chaux, avec présence de dispositifs de limitation des émissions de poussière au dépotage des citernes et au chargement des épandeurs,
- matériel d'épandage de la chaux : dosage volumétrique ou massique asservi à la vitesse d'avancement garantissant un coefficient de variation à l'épandage < 10 % et une exactitude d'épandage < 5 % ; les définitions et les méthodes de vérification de ces deux paramètres sont données dans l'annexe 6 du GTS [3].
- matériel de malaxage : malaxeur à arbre horizontal (matériel automoteur ou porté) avec maîtrise et contrôle de la vitesse d'avancement et de la profondeur de malaxage.

Pour chaque cas de chantier, la quantité de chaux à épandre Q (exprimée en kg/m²) est calculée suivant la formule donnée dans le § A 4.2.1 du GTS [3] et rappelée ci-après où d est le dosage en chaux déterminé par l'étude de laboratoire et exprimé en pourcentage de la masse de chaux rapportée à la masse de produits secs (sol + chaux) contenus dans le mélange :

$$Q = e \times \rho_d \times \frac{d}{100 - d}$$

avec :

- Q : masse de chaux à épandre (kg/m²)
- e : épaisseur de la couche de sol à traiter (m)
- ρ_d (*) : masse volumique sèche du sol en place à traiter (kg/m³)
- d : dosage en chaux recherché déterminé par l'étude de laboratoire (%)

(*) la masse volumique sèche du sol en place à traiter peut-être estimée ou mesurée au moyen d'un gammadensimètre

Pour les sols qui requièrent des dosages en chaux élevés (généralement $d > 3\%$), il est préférable de réaliser l'épandage de la chaux en deux passes séparées par au moins une passe de malaxeur (ou plus suivant l'argilosité et la teneur en eau du sol). Un délai de maturation (favorable à la flocculation de l'argile) entre les différentes phases d'épandage peut être nécessaire pour atteindre la mouture visée. Les sols à forte argilosité (classes A3 et A4) nécessitent une grande énergie de malaxage pour obtenir la mouture la plus fine possible (au total 4 à 6 passages de malaxeur peuvent être nécessaires).



Figure 35 : Vue générale d'un chantier de traitement de sol avec de gauche à droite un épandeur de liant, deux malaxeurs automoteurs et trois compacteurs (photo Entreprise Lhotellier)



Épandage de la chaux sur la plate-forme dédiée au traitement de sol avec épandeur à dosage volumétrique et contrôle pondéral (chantier Salin de Giraud novembre 2017 – photo Lhoist)



Épandage de la chaux sur la plate-forme dédiée au traitement de sol avec épandeur sur chenilles à dosage volumétrique et contrôle pondéral (chantier expérimental de Vlassenbroek - (photo Lhoist)



Épandage de la chaux sur sol A2 humide avec épandeur à dosage volumétrique (photo Lhoist)



Épandage de la chaux sur sol A2 humide avec épandeur sur chenilles à dosage volumétrique et contrôle pondéral (photo Lhoist)

Figure 36 : Épandage de la chaux



Malaxeur automoteur (photo Lhoist)



Malaxeur porté sur tracteur agricole (chantier expérimental de Vlassenbroek - photo Lhoist)

Figure 37 : Malaxage



Figure 38 : Vue d'un atelier de traitement comprenant un épandeur et un malaxeur automoteurs en mode de transfert au gabarit routier (photo Entreprise Lhotellier)

Certains matériels regroupent les fonctions d'épandage et de malaxage ou les fonctions d'arrosage et de malaxage sur la même machine. Dans le premier cas le matériel est destiné aux chantiers de taille intermédiaire et il évite tout envol de poussière de chaux. Dans le deuxième cas le regroupement des deux fonctions assure un dosage précis en apport d'eau, une meilleure diffusion de l'eau au sein du composant sol-chaux et peut représenter un gain significatif dans le débit de l'atelier de traitement (arrosage et malaxage en une seule opération).



Regroupement des fonctions d'épandage et de malaxage : le matériel est tracté par un tracteur agricole (photo Streumaster)



Regroupement des fonctions d'arrosage et de malaxage : l'arroseuse est poussée par le malaxeur automoteur et l'incorporation d'eau se fait directement dans la cloche du malaxeur (chantier Salin de Giraud novembre 2017 – photo Lhoist)

Figure 39 : Vues de machines de traitement de sol regroupant deux fonctions (épandage et malaxage à gauche, arrosage et malaxage à droite

À l'issue du traitement, le sol est soit repris à la pelle ou au chargeur, soit retroussé au bulldozer en bout de plate-forme puis chargé dans les engins de transport. Une attention particulière est à apporter à l'opération de reprise du sol traité afin de ne pas prélever du sol non traité, par exemple en effectuant la reprise sur une épaisseur trop importante ou en reprenant les bords de la plate-forme en sol non traité. Ce point est facilité par des équipements GPS d'aide au guidage pouvant équiper les machines (bulldozer, pelle) qui permettent de réaliser les tâches de dépôt et reprise avec précision. Il est aussi possible d'exercer un contrôle visuel en s'appuyant sur le contraste de couleurs entre sol traité et sol non traité ou mieux, à l'aide de pulvérisation sur le sol de phénolphthaléine, indicateur de basicité incolore qui vire au rouge en milieu basique.



Reprise de sol traité à la pelle sur plate-forme avec guidage GPS ; à noter le cordon au premier plan non repris car non traité (chantier expérimental de Vlassenbroek - photo Lhoist)



Reprise de sol traité à la pelle sur plate-forme (chantier Salin de Giraud novembre 2017 – photo Lhoist)

Figure 40 : Reprise de sol traité

13.2.8 Traitement de sol en centrale

Lorsque la nature et l'état hydrique du sol le permettent, ce mode de traitement est particulièrement adapté aux fonctions P, EI, ES et EV. Il a été utilisé lors de la construction des démonstrateurs DigueELITE du Vidourle et de la digue de Rouen. Le sol est approvisionné depuis le gisement ou le dépôt provisoire après avoir éventuellement subi une homogénéisation, l'élimination d'une fraction grossière ou une préparation visant à ajuster sa teneur en eau avant le traitement. Il est mis en stock à proximité de la centrale sur une hauteur suffisante pour permettre un chargement dans la centrale au moyen d'une pelle positionnée sur la surface du stock. Cette méthode permet au conducteur de la pelle de réaliser l'opération de chargement avec précision et d'éviter tout bourrage intempestif de la trémie d'entrée de la centrale qui est équipée de systèmes d'écrêtage, de criblage et d'émottage.

Afin de limiter le bourrage du système d'écrêtage et de limiter la quantité de refus de sol entrant au niveau du crible d'entrée et de l'émotteur, une préparation préalable du sol naturel au stock peut s'avérer nécessaire pour l'émettre au maximum et séparer les éléments blocailleux pouvant être présents (§ 1.4.3).

Pour l'application concernée, les centrales à utiliser sont spécifiques au recyclage des sols fins, humides et plastiques. Leur capacité réelle actuelle (de 50 à 240 t/h) doit être en adéquation avec le débit de production attendu sur le chantier. Le système de régulation du débit de sol entrant (sol non traité) peut être volumétrique ou pondéral. Le système de stockage de la chaux, de capacité variable suivant les machines, est incorporé à la centrale. Le dosage de la chaux est généralement du type pondéral et permet un dosage précis ($\pm 2\%$ du dosage demandé). Sur certaines machines le dosage est du type volumétrique et est fonction de la masse volumique de la chaux, ce qui implique de la mesurer au préalable. L'implantation de la centrale à elle seule nécessite une plate-forme horizontale d'une surface de l'ordre de 100 m². Son emplacement doit être prévu pour garantir de bonnes conditions d'accèsibilité et de circulation des engins.

L'adaptation de la centrale de traitement au sol naturel entrant (nature et état hydrique) pour obtenir la teneur en eau, la mouture du sol traité et le débit de production souhaités doit être vérifiée avant le démarrage du chantier. En particulier, en cas de besoin d'une humidification importante, le débit de production de la centrale peut être limité en fonction du débit maximal d'ajout d'eau réalisable par la centrale. La qualité de la mouture du sol traité dépend à la fois de l'argilosité du sol naturel et des caractéristiques du malaxeur (longueur de la cuve, type de pales et vitesse de rotation de malaxeur). Généralement le traitement d'un sol faiblement argileux (classe A1) en centrale ne pose pas de problème. Le passage en centrale de sols de classe A2 peut fonctionner dans certaines conditions (teneur en eau faible ou moyenne, faible argilosité, pas de présence de mottes de dimensions importante). Pour le traitement des sols de classe A3 et A4 l'utilisation d'une centrale n'est pas envisageable en l'état actuel de la technologie.



Vue générale : Dépôt provisoire de sol naturel et centrale de traitement mobile (chantier du Vidourle juillet 2015) (photo DigueELITE)

Figure 41 : Vue générale d'une centrale de traitement



Centrale mobile de 100 t/h (photo DigueELITE)



Centrale mobile de traitement 200 t/h (photo Lhoist)

Figure 42 : Détails d'une centrale de traitement

13.2.9 Finesse de mouture

La finesse de mouture du sol traité dépend entre autres de l'argilosité du sol et de sa teneur en eau, du type de malaxeur (traitement en place ou en centrale) et de l'énergie de malaxage (nombre de passages de malaxeur dans le cas du traitement en place). On s'attachera donc à étudier la capacité des matériels de malaxage et la méthodologie utilisée pour obtenir des moutures fines et compatibles avec les objectifs visés.

Par convention, le diamètre de l'agglomérat retenu pour caractériser la mouture correspond à la maille du tamis autorisant un passant > 95 %.

Pour les sols fins A1 et A2, on obtient généralement une mouture s'étalant de 20 mm à 40 mm lors d'un traitement en place après une ou deux passe(s) de malaxeur. L'utilisation de malaxeurs à doubles arbres horizontaux sur les centrales permet d'obtenir généralement une mouture équivalente à celle obtenue avec les matériels de traitement en place mais doit être vérifiée avant le démarrage du chantier. Pour des sols humides moyennement argileux à argileux il convient d'être prudent sur l'utilisation d'une centrale de traitement car économiquement il n'est pas envisageable de réaliser plusieurs passages en centrale, alors qu'avec un atelier de traitement en place plusieurs passages successifs de malaxeur peuvent être réalisés pour atteindre le niveau de mouture fixé. Dans ce cas, après chaque passage de malaxeur, une reprise de la planéité de la plate-forme avec un engin de régâlage doit être effectuée pour garantir la profondeur de malaxage à chaque passe de malaxeur.

Dans le cas des sols fins plus argileux (de type A3 ou A4), il est difficile en pratique d'obtenir une mouture inférieure à 50 mm lorsqu'on traite en place, et ce malgré un nombre élevé de passes de malaxeur.

L'énergie de malaxage devant être déployée pour atteindre l'objectif visé de la mouture du sol traité doit être prise en compte car elle conditionne le débit de production de l'atelier de traitement.



Vue de la mouture d'un sol A1 traité à 2 % CaO après une passe de malaxeur (chantier Salin de Giraud novembre 2017- photo Lhoist)



Vue de la mouture d'un sol A1 traité à 2 % CaO en sortie de centrale (chantier expérimental du Vidourle Projet DigueELITE)



Détail de la mouture d'un sol A1 traité à 2 % CaO après une passe de malaxeur (chantier Salin de Giraud novembre 2017 – photo Lhoist)



Détail de la mouture d'un sol A1 traité à 2 % CaO en sortie de centrale (chantier expérimental du Vidourle Projet DigueELITE)

Figure 43 : Mouture du sol après traitement à la chaux d'un sol A1



Vue de la mouture d'un sol A2 traité à 4 % CaO après une passe de malaxeur (photo Lhoist)



Détail de la mouture d'un sol A2 traité à 4 % CaO après 3 passes de malaxeur (photo Lhoist)

Figure 44 : Mouture du sol après traitement à la chaux d'un sol A2

13.2.10 Mise en œuvre des sols traités à la chaux

En remblai la méthode classique du mètre excédentaire est retenue : une surlargeur d'environ 1 mètre permet au compacteur de travailler en sécurité tout en garantissant la qualité de compactage en bord de remblai. La surlargeur de sol est retaillée à la pelle équipée d'un godet de curage en fin de construction. En fonction de la taille du chantier, le volume de sol correspondant à cette surlargeur peut représenter une quantité importante. Après retaillage, ce sol traité peut être utilisé comme sol de remblai au même titre que celui déjà mis en œuvre à condition qu'il ne soit pas trop âgé et qu'il ait été correctement désagrégé. Un réajustement de sa teneur en eau peut aussi s'avérer nécessaire (arrosoage et malaxage ou repassage en centrale sans ajout de chaux).

Le régâlage est réalisé préférentiellement au bulldozer.

Concernant le réglage, l'utilisation d'un équipement de réglage automatique en altimétrie est fortement recommandée afin de réduire au maximum les temps de réglage d'épaisseur des couches et d'obtenir une bonne maîtrise de l'épaisseur mise en œuvre. L'utilisation de tels dispositifs permet également, grâce aux enregistrements pouvant être réalisés, de fournir des données utiles aux contrôles et aux informations de récolement de l'ouvrage.



Approvisionnement du sol traité au dumper et régâlage d'une couche au bulldozer (chantier Salin de Giraud - photo Lhoist)



Mise en œuvre et compactage en ateliers parallèles (chantier du Vidourle - photo DigueELITE)



Réglage d'une couche de sol traité sur planche d'essais au bulldozer équipé d'un système GPS altimétrique (chantier expérimental de Vlassenbroek - photo Lhoist)

Figure 45 : Opérations de mise en œuvre de sol traité sur ouvrages hydrauliques

Dans le cas d'une reconstruction partielle ou d'un renforcement d'un ouvrage existant (carapace, protection de berge), le nouveau remblai vient s'épauler sur l'ouvrage existant par redans terrassés préalablement. Dans le cas où la technique du redan n'est pas envisageable, l'épaulement de l'ouvrage en construction se fait directement sur le talus de l'ouvrage ancien. Le compactage de ces interfaces est un point délicat nécessitant une réflexion sur la méthodologie et les moyens à mettre en œuvre, afin d'éviter la présence de zones fragiles et mal compactées pouvant être préjudiciables à la résistance de l'ouvrage. Dans le cas de redan celui-ci doit être humidifié si nécessaire, et compacté avec un compacteur vibrant à pieds dameurs (la taille du compacteur est à adapter au redan) afin d'avoir une portance suffisante pour le compactage du sol traité et un bon accrochage de la couche de sol traité grâce aux empreintes laissées par les pieds du compacteur à la surface du redan. Dans le cas d'un épaulement sur un ouvrage existant, celui-ci doit être humidifié si nécessaire, et le compactage des couches de sol traité devra s'appuyer au maximum sur le talus de l'ouvrage existant.

Dans les deux cas, le type et la taille du compacteur seront adaptés à l'espace disponible pour l'évolution des engins, ce qui peut nécessiter d'adapter l'épaisseur élémentaire des couches et donc la méthodologie de mise en œuvre en conséquence.



Ouvrage avec redans (photo Lhoist)



Compactage en épaulement sans redans en appui sur le talus d'un ouvrage existant (photo DigueELITE)

Figure 46 : Reprise d'ouvrages existants

Dans le même cas de réparation ou de renforcement d'ouvrage existant, les différentes couches peuvent éventuellement être mises en œuvre par recouvrement complet du talus de l'ouvrage existant. Si cette technique ne pose a priori pas de problème pour les opérations de régâlage et de réglage au moyen de bulldozer, le compactage doit cependant être réalisé dans le sens de la pente du talus. Cette technique est limitée par la valeur de la pente à franchir et par les possibilités de motricité des engins de compactage. Elle doit être vérifiée en pratique avant le démarrage des travaux en fonction de l'aptitude au travail en pente annoncée par les constructeurs de compacteurs. Cette méthodologie semble toutefois peu adaptée pour des pentes supérieures à 25 % (4H/1V). Dans le cas d'une mise en œuvre suivant cette méthodologie, un compactage du talus existant au compacteur vibrant à pieds dameurs accompagné d'un arrosage éventuel est nécessaire avant la mise en œuvre des couches de sol traité à la chaux.



Figure 47 : Compactage d'une couche suivant la pente de talus de 3H/1V (chantier expérimental de Vlassenbroek - photo Lhoist)

13.2.11 Compactage des couches de remblai

Sauf spécifications particulières, les modalités pratiques de compactage qui sont proposées ci-après correspondent à celles données par le GTR [9] mais sont différencierées suivant la fonction d'usage de l'ouvrage.

- Pour la fonction maniabilité (M), les modalités pratiques de compactage sont habituellement celles données par les tableaux de compactage pour l'utilisation des matériaux en remblai du GTR [9]. L'objectif de densification requis est « q4 » ($\rho_{dm} \geq 95\% \rho_{dmaxOPN}$ en moyenne et $\rho_{dfc} \geq 92\% \rho_{dmaxOPN}$ en fond de couche).
- Pour la fonction stabilité (S) les modalités pratiques de compactage sont celles données par les tableaux de compactage pour l'utilisation des matériaux en couche de forme du GTR [9]. L'objectif de densification requis est « q3 » ($\rho_{dm} \geq 98,5\% \rho_{dmaxOPN}$ en moyenne et $\rho_{dfc} \geq 96,0\% \rho_{dmaxOPN}$ en fond de couche) et l'état hydrique du sol traité doit être « m ».
- Pour les fonctions étanchéité (P) et protection de surface (ES), à défaut de retours d'expériences disponibles, le choix des sols utilisables est limité pour l'instant aux seuls sols fins A1, A2, éventuellement A3, avec un état hydrique du composant sol-chaux au moment du compactage à la limite de la frontière "m/h", soit à environ $1,10 \times w_{OPN}$. L'épaisseur des couches compactées conseillée est au maximum de 0,30 m. Le compactage est réalisé préférentiellement au moyen de compacteurs vibrants à pieds dameurs de classe VP5 (Figure 48) définie dans la norme NF P98-736 [42], pour à la fois déployer l'énergie de compactage nécessaire, s'affranchir du phénomène de feuillettage et avoir une action de pétrissage au moment du compactage bénéfique vis-à-vis du niveau de perméabilité recherché. L'objectif de densification requis est « q3 » ($\rho_{dm} \geq 98,5\% \rho_{dma xOPN}$ en moyenne et $\rho_{dfc} \geq 96,0\% \rho_{dmaxOPN}$ en fond de couche). Le Tableau 11 propose des conditions pratiques de compactage pour chacun des sols. Il est basé sur le tableau du GTR [9], à partir duquel l'épaisseur maximale des couches a été limitée à 0,30 m. Les vitesses et les nombres de passes sont modulés en fonction de la difficulté de compactage.
- Pour la fonction protection contre l'érosion interne (EI), à défaut de retours d'expériences disponibles, le choix des sols utilisables est limité pour l'instant aux sols A1, A2, A3 et A4 dont le compactage devra être réalisé dans les mêmes conditions de teneur en eau que celles relatives aux fonctions P et ES, à savoir à la limite de la frontière « m/h », soit à environ $1,10 \times w_{OPN}$. De même que pour les fonctions P et ES, pour la fonction EI le compactage sera assuré au moyen de compacteurs vibrants à pieds dameurs de classe VP5 (Figure 48). L'utilisation de sols A3 et surtout A4 doit être envisagée avec prudence. En effet l'argilosité et la plasticité de ces sols les rendent difficiles à traiter pour obtenir une finesse de mouture compatible avec la fonction concernée. Les essais menés en laboratoire ont prouvé la bonne résistance de ces sols à l'érosion de conduit et le chantier réalisé dans le cadre du projet TerDOUEST a démontré qu'un sol A3 pouvait être mis en œuvre dans des conditions correctes de teneur en eau et de mouture d'environ 0/50 mm après traitement. Néanmoins, il est conseillé dans le cas où l'utilisation de sol A3 ou A4 se présenterait, de vérifier à minima dans le cadre de planches d'essais les conditions de traitement, de mise en œuvre et de compactage pour ces deux natures de sol. Pour cette fonction, les conditions de compactage sont identiques à celles conseillées pour les fonctions P et ES (Tableau 11).

Pour les sols A4 il n'est pas proposé de conditions pratiques de compactage dans le Tableau 11. Ces conditions sont à établir au cas par cas avec la réalisation de planches d'essais de compactage en fonction du cas de chantier considéré.



Figure 48 : compactage avec un compacteur de classe VP5 d'un ouvrage en sol A2 traité à 3 % de chaux (photo Lhoist)

Tableau 11 : Propositions de modalités de compactage pour les fonctions P, EI, ES, EV et pour les sols A1, A2 et A3 avec un compacteur de classe VP5

	Sol A1	Sol A2	Sol A3
Q/S (m)	0,060	0,050	0,040
e (m)	0,30	0,30	0,30
V (km/h)	3,0	2,5	2,0
N	6 (*)	6	8
Q/L (m ³ /h.m)	150	125	80

avec :

Q/S (m) : rapport entre le volume de sol compacté pendant un temps donné et la surface couverte par le compacteur pendant le même temps

e (m) : épaisseur maximale des couches compactées

V (km/h) : vitesse maximale de compactage

N : nombre de passes du compacteur

Q/L (m³/h.m) : débit théorique horaire par unité de largeur du compacteur

(*) Pour ce cas (sol A1), le nombre de passes est théoriquement de 5 passes mais il a été porté à 6 pour avoir un nombre de passes pair permettant l'aller et le retour du compacteur dans les trois cas de sols.

Les modalités de compactage données dans le GTR [9] et dans le Tableau 11 correspondent aux compacteurs situés à la frontière basse de leur classe d'efficacité définie dans la norme NF P98-736 [42]. Si, de par leurs caractéristiques, les machines utilisées sur chantier peuvent conduire à d'autres modalités de compactage (nombre de passes plus faible ou vitesse plus importante par exemple), ce point devra être obligatoirement démontré dans le cadre d'une planche d'essai de compactage. De même, en fonction des caractéristiques du compacteur utilisé, il est conseillé de démontrer au moyen d'une planche d'essais que le choix d'une épaisseur de couche plus importante (> 0,30 m) est envisageable.

13.2.12 Accrochage des couches

Sur les chantiers de terrassement, les compacteurs les plus fréquemment utilisés sont les compacteurs vibrants à pieds dameurs et les compacteurs à cylindre lisse.

L'utilisation de compacteurs vibrants à pieds dameurs est préférable pour assurer un bon accrochage mécanique entre couches. Les empreintes laissées par les pieds du compacteur sur la couche sous-jacente (couche déjà mise en œuvre et compactée) font office d'ancrage et permettent l'imbrication de la couche sus-jacente (couche en cours d'approvisionnement) dans ces points d'accroche. L'utilisation de compacteurs à cylindre lisse ne permet pas cet arrangement entre les couches.

Par ailleurs, la circulation des engins de transport a un effet sur le compactage et sur l'état de surface d'une couche après son compactage.

Pour ces raisons, les modalités pratiques de mise en œuvre doivent donc être définies entre l'entreprise et le maître d'œuvre dans la phase de préparation du chantier.

Deux cas de figure sont envisageables :

- **sections de l'ouvrage où les engins de transport ne circulent pas sur la couche sous-jacente**

Lorsque la teneur en eau du sol est suffisamment élevée ($w \geq 1,1 \times w_{OPN}$), un compactage réalisé au moyen d'un compacteur vibrant à pieds dameurs crée en surface de la couche des empreintes de pieds d'une profondeur d'environ 0,10 m qui sont bien modelées avec un sol bien compacté. Si la teneur en eau est trop faible, la partie superficielle des couches peut subir un cisaillement important des parties apparentes des empreintes (Figure 49). Dans ce cas l'accrochage des couches n'est pas de bonne qualité (teneur en eau et masse volumique trop faibles). D'autre part, une fois recouverte par la couche sus-jacente, cette frange de sol mal compactée s'ajoute à l'épaisseur de la couche suivante et peut induire une mauvaise qualité du compactage dans cette zone d'inter-couches.



Empreintes de pieds de compacteur VP5 bien formées et compactées sur sol A1 traité à 2 % CaO à $W = W_{OPN} + 4\%$ (photo Lhoist)



Empreintes de pieds de compacteur VP5 friables à cause d'une teneur en eau trop faible sur sol A1 traité à 2 % CaO à $W = W_{OPN}$ (photo Lhoist)

Figure 49 : Empreintes laissées par un compacteur vibrant VP5 sur sol A1 traité à 2 % CaO

Dans le cas de température élevée et de présence de vent, la teneur en eau de cette partie superficielle correspondant à la profondeur des empreintes ($\approx 0,10$ m) peut diminuer rapidement de quelques points (de 2 à 3 %, voire plus). Pour éviter une telle situation, on peut appliquer une scarification de la surface de la couche compactée avec un léger arrosage (2 à 5 l/m²) accompagné d'un compactage supplémentaire avant la mise en œuvre de la couche sus-jacente.

A contrario, si une couche compactée et non recouverte par la couche suivante subit des précipitations pendant le temps d'arrêt de chantier ou lors d'une pluie d'orage, les empreintes des pieds du compacteur vont contenir de l'eau. Dans cette hypothèse, le plus simple est d'éliminer la partie concernée par grattage et de réaliser un nouveau compactage. On peut aussi envisager un nouveau traitement en surface à la chaux sur une épaisseur de l'ordre de 0,10 m suivi d'un compactage complémentaire afin de ramener la teneur en eau du composant sol-chaux et son niveau de densification aux valeurs attendues.

Dans le cas d'un traitement en centrale sans moyens matériels de traitement en place, il est conseillé d'enlever la frange supérieure de la couche et de reformer les empreintes de pieds avec une ou deux passes de compacteur vibrant à pieds dameurs.

Lors d'un arrêt de chantier prévu (nuit ou week-end), il est conseillé de fermer la surface de la couche au compacteur à cylindre lisse. Au redémarrage des travaux, il est recommandé de procéder à la scarification de la partie supérieure de la couche sur une épaisseur de l'ordre de 0,10 m. Cette opération sera éventuellement complétée par un arrosage ou un apport de lait de chaux et par la création d'empreintes avec une ou deux passes de compacteur vibrant à pieds dameurs.

- **sections de l'ouvrage où les engins de transport circulent sur la couche sous-jacente**

Dans ce cas la partie supérieure de la couche sous-jacente, compactée par la circulation des engins de transport, présente un état de surface « fermé ». Les empreintes laissées sur la couche sous-jacente, dont le compactage a été réalisé au compacteur à pieds dameurs, disparaissent sous l'action des engins de transport, ce qui empêche l'imbrication des couches. De plus, en fonction de la teneur en eau du mélange sol-chaux, un orniérage plus ou moins prononcé peut apparaître (Figure 50). L'orniérage est fonction du type d'engin de transport et de la pression de contact exercée sur le sol par les roues. Pour cette raison, on privilégiera l'utilisation d'engins de transport de type tombereau, l'utilisation de camions-bennes conduisant à un orniérage important est déconseillée. Avant la mise en œuvre de la couche sus-jacente, une scarification en surface, précédée le cas échéant d'un reprofilage et accompagnée éventuellement d'un arrosage pour compenser la perte de teneur en eau due à l'aération, est à réaliser sur la partie de la couche sous-jacente ayant subi le trafic des engins de transport.

Dans la mesure du possible il convient de limiter la circulation des engins de transport sur la surface de la couche sous-jacente en la canalisant sur des zones de circulation bien délimitées. L'état de surface de ces zones sera à reprendre avant la mise en œuvre de la couche sus-jacente.

Une solution pour améliorer le collage en cas de circulation d'engins consiste à pulvériser une suspension de lait de chaux en faible quantité à la surface de la couche sous-jacente avant son recouvrement par la couche sus-jacente. Cela suppose une bonne gestion du trafic de chantier sur la surface à recouvrir, de disposer de lait de chaux et d'un pulvérisateur adapté.

Par ailleurs, l'orniérage provoqué par les engins de transport peut favoriser un écoulement préférentiel et une concentration localisée des eaux météoriques sur l'ouvrage. Des dispositions sont à prendre pour éviter ce phénomène pouvant conduire à la formation de ravines sur les talus de l'ouvrage.



Figure 50 : Fermeture et orniérage de la couche sous jacente par le trafic des engins de transport (photo DigueELITE)

13.2.13 Zones d'accès difficile

Ces zones correspondent par exemple au raccordement de rampes entre un ouvrage ancien et celui à construire, à une partie à géométrie complexe de dimensions réduites, à l'environnement des ouvrages maçonnés ou bien au remblayage à proximité de canalisations.

Dans ces zones, le compactage doit faire appel à des engins de plus petite taille tels que les plaques vibrantes, les pilonneuses vibrantes, ou les petits compacteurs (Figure 51). Les règles d'utilisation de ces matériels sont données soit dans le GTR [9] pour les plaques vibrantes lourdes, ou dans le « Guide Technique sur le Remblayage des tranchées » [47]. Les règles de compactage données dans ces documents (épaisseurs des couches, nombre de passes) suivant la nature et l'état hydrique des sols doivent être respectées suivant l'objectif de densification recherché. On privilégiera des matériels de compactage les plus efficaces comme les pilonneuses vibrantes de classe PN3, les plaques vibrantes de classe PQ3 ou PQ4 ou les petits compacteurs vibrants à pieds dameurs dans le cas de sols fins humides. L'utilisation de ces petits matériels de compactage impose des épaisseurs de couches réduites et un nombre de passes significatif.

D'autres matériels de compactage (plaques vibrantes, marteaux hydrauliques, compacteurs à pieds dameurs) montés en extrémité de bras de pelle sont également utilisables. L'efficacité de ces machines est fonction de la force d'appui exercée sur le bras de pelle, et il est donc impossible de définir des modalités de compactage pouvant s'appliquer au cas de chantier considéré. Les conditions d'utilisation de ces matériels doivent être définies sur la base d'expériences acquises par des essais pratiqués en contrôlant la qualité de compactage réellement atteinte.



Compactage à la pilonneuse vibrante PN3 autour d'une chambre (photo DigueELITE)



Petit compacteur vibrant à pieds dameurs (photo Lhoist)

Figure 51 : Compactage de zones d'accès difficile

13.2.14 Traficabilité des engins de chantier

L'approvisionnement du sol traité sur le remblai est préférentiellement réalisé au moyen de tracteurs équipés de remorque ou de tombereaux. Il est déconseillé d'effectuer le transport au moyen de camions-bennes car les pressions de contact au sol sont élevées et risquent de provoquer, en plus de cisaillements superficiels dans les zones en courbe ou de demi-tour, un orniérage important et une montée de la pression interstitielle préjudiciable dans les sols fins humides. Un orniérage de l'ordre de 5 cm est acceptable. Il devient problématique pour des valeurs supérieures avec généralement l'apparition du phénomène de fluage. Afin de limiter ces risques il convient, si la longueur de l'ouvrage le permet, de privilégier un déchargement en bout de plate-forme et de pousser au maximum le sol avec l'engin de régalage à chenille développant des pressions de contact plus faibles.



Circulation d'un tombereau sur sol A1 chantier du Vidourle (photo DigueELITE)



Exemple de fluage créé lors d'un transport par camion benne 6x8 sur sol A1 chantier du Vidourle (photo DigueELITE)

Figure 52 : Orniérage sur sol traité à la chaux

13.2.15 Conditions météorologiques

Les conditions de réalisation d'un chantier de construction d'ouvrage hydraulique en sol traité à la chaux en fonction des conditions météorologiques sont celles d'un chantier courant de terrassement.

Néanmoins, on veillera plus particulièrement à respecter les précautions suivantes :

- température :
 - pas de condition de température pour fonction M,
 - température > 5 °C pour fonctions S, P, EI, ES et EV,
- pluviométrie :
 - s'organiser pour interdire l'exposition à la pluie d'un sol traité et malaxé mais non compacté.

13.2.16 Protections relatives à l'environnement

Le point principal relatif à la protection de l'environnement concerne l'émission de poussières en présence de vent. On se reportera à l'annexe 5 du GTS [3] qui préconise de manière détaillée les règles à respecter. En règle générale, plutôt que de se référer à un seuil de vitesse de vent, il est préférable de préconiser l'interruption du traitement de sol en place (épandage de la chaux et malaxage) si on constate une envolée de chaux hors de l'emprise du chantier ou dans les zones sensibles incluses dans le périmètre du chantier. Il est à noter que les chantiers de construction d'ouvrages hydrauliques peuvent être très souvent qualifiés de « chantiers sensibles » au sens de l'annexe 5 du GTS [3] en raison de la situation même des chantiers (zones Natura 2000, parcs naturels, habitations proches, cultures, etc.).

Pour éviter l'envol de poussières, des solutions techniques peuvent être mises en place comme par exemple l'utilisation de chaux à faible capacité d'envol. Un traitement en centrale permet de s'affranchir quasiment totalement du risque d'émissions de poussières. Certains matériels de traitement en place, assurant les deux fonctions d'épandage de la chaux et de malaxage en une seule opération, permettent aussi d'éviter tout envol de poussières. Ce point doit être appréhendé dans la phase étude, et le CCTP doit indiquer des règles précises quant à la gestion de la protection de l'environnement. Il est à noter que le risque d'envol de poussières ne s'applique pas seulement aux tâches de traitement de sol mais concerne également les phases d'approvisionnement, de stockage et de transvasement de la chaux. À cette fin, l'implantation des silos de stockage de la chaux doit être choisie en fonction du risque encouru et des protections, naturelles ou artificielles, doivent être envisagées. Les matériels doivent être équipés de dispositifs permettant de limiter l'envol de poussières en bon état de fonctionnement. Ce point est à contrôler dans le cadre de la réception des machines.

Les situations géographiques de certains chantiers sont plus sensibles que d'autres, en particulier dans des zones exposées aux vents dominants (bord de mer, vallées, sud de la France) et devront être traitées avec la plus grande attention.

13.3 Instrumentation de l'ouvrage

Dans certains cas une instrumentation de l'ouvrage est prévue et doit être détaillée dans la phase d'étude. Si la pose de capteurs (sondes de mesure de teneur en eau, de température, de tassement, de pression interstitielle, etc.) est à réaliser en cours de construction, ces tâches peuvent nécessiter des temps d'arrêt de la mise en œuvre qu'il convient de prévoir dans le phasage des opérations de mise en œuvre. Des dispositions constructives doivent être prises en compte par le concepteur afin de limiter le risque de détérioration et le repérage des systèmes enterrés (capteurs, câbles) au cours des opérations de mise en œuvre du remblai par la circulation des engins, le compactage ou les travaux de retaillage des talus. Une centralisation des câbles reliant les différents dispositifs (capteurs, enregistreurs, transmetteurs) est généralement mise en place et fait l'objet de pose de chambres enterrées. En fin de chantier, des forages peuvent être réalisés pour la pose de certains capteurs de type piézomètre, inclinomètre, etc. Il est préférable de procéder à l'installation de ces équipements lorsque l'entreprise a complètement terminé les travaux mais sans délai, du fait du durcissement du matériau dès la fin de sa mise en œuvre.



Réalisation d'un forage pour piézomètre (photo DigueELITE)



Mise en place de sondes de teneur en eau (photo DigueELITE)

Figure 53 : Instrumentation d'un démonstrateur (chantier du Vidourle)

Lors de la pose, il est conseillé de procéder à un levé topographique en 3D de chaque dispositif mis en place dans l'ouvrage.

13.4 Travaux de finition

Hormis la pose de dispositifs particuliers (géotextile, géogrille d'accroche, etc.), les travaux de finition concernent :

- le retaillage des talus (préférentiellement depuis le bas de talus, à la pelle équipée d'un godet de curage),
- le terrassement des fossés et bassins,
- la mise en place de terre végétale sur les surfaces exposées (épaisseur de 0,20 à 0,30 m), ou de tout autre dispositif de protection pour éviter une variation importante de teneur en eau pouvant engendrer une fissuration par dessiccation,
- la végétalisation des talus recouverts de terre végétale



Figure 54 : Retaillage des talus d'un ouvrage de retenue collinaire (photo Entreprise Lhotellier)

E. CONTROLE DES TRAVAUX

14. Introduction

L'organisation générale du contrôle de l'exécution des travaux est décrite dans le « Guide technique Organisation de l'assurance qualité dans les travaux de terrassements » [48] et dans le « Guide technique Conception et réalisation des terrassements – Fascicule 2 : organisation des contrôles » [49] auxquels le lecteur se reportera.

Cette partie du document est consacrée aux points inhérents aux contrôles à réaliser dans le cas d'ouvrages construits en sol traité à la chaux. Le contrôle du compactage y est développé car la qualité obtenue conditionne la stabilité et la pérennité des ouvrages.

15. Contrôle de la mise en œuvre

Dans son Plan d'assurance qualité, l'entreprise présente les procédures d'exécution des travaux qu'elle s'engage à mettre en place et les modalités de leur contrôle pour l'obtention de la qualité requise. Ce document permet au maître d'œuvre de dimensionner son contrôle extérieur et d'établir le Plan de contrôle qui fixe les actions de contrôle qui seront à mener ainsi que leur répartition entre le contrôle intérieur (entreprise) et le contrôle extérieur (maître d'œuvre). Pendant le déroulement du chantier, les essais prévus doivent être réalisés suivant les normes en vigueur ou suivant des modes opératoires définis au CCTP par le maître d'œuvre. Les résultats des essais sont vérifiés et validés par le maître d'œuvre.

La qualité d'usage d'un ouvrage suivant sa fonction (M, S, P, ES, EI, EV) est traduite en qualité requise, et nécessite la vérification de son obtention au moyen de paramètres mesurables.

La nature des contrôles à réaliser et leur fréquence sont à définir suivant :

- la fonction d'usage de l'ouvrage,
- la taille du chantier,
- le mode de traitement,
- les enjeux technico-économiques.

Les actions de contrôles doivent être détaillées dans le Plan de contrôle en y indiquant le nombre représentatif de mesures pour chaque type d'essai à réaliser. Certaines actions qui nécessitent la mise à disposition d'installations de laboratoire ou le recours à des laboratoires spécialisés doivent être stipulées dans le Plan de contrôle.

Certains types de contrôles sont réalisés « a posteriori », après réalisation des travaux, en tout ou partie. En cas de non-conformité détectée, une reprise partielle ou totale des travaux peut être demandée, ce qui est peu réaliste ni pertinent. C'est pourquoi, afin de prévenir des dérives potentielles ou l'apparition de défauts constatés trop tard, il est préférable d'appliquer d'autres méthodes de contrôle en cours d'exécution comme :

- le suivi de l'évolution de l'état hydrique du gisement en fonction de l'avancement des travaux,
- le suivi en continu des opérations de traitement de sol à la chaux,
- le contrôle en continu du compactage,
- l'établissement de documents de suivi de l'exécution,
- les contrôles inopinés réalisés à la demande du maître d'œuvre.

Dans le cas d'ouvrages en sol traité à la chaux, les points suivants doivent faire l'objet de contrôles appropriés.

15.1 Teneur en eau

L'eau utilisée sur chantier pour le traitement de sol à la chaux doit faire l'objet d'une analyse physico-chimique afin de vérifier qu'elle ne contient pas d'éléments perturbateurs. En cas de changement d'approvisionnement d'eau cette analyse doit être reproduite. Des prélevements conservatoires peuvent être réalisés dans des contenants étanches chimiquement neutres.

Le contrôle de la teneur en eau du sol avant et après traitement à la chaux revêt un caractère primordial car il permet :

- d'organiser les phases d'humidification ou d'aération du sol naturel dans des conditions maîtrisées,
- de s'assurer du respect de l'objectif de teneur en eau du sol traité fixé par l'étude de laboratoire afin d'obtenir les résultats attendus après compactage.

Plusieurs méthodes de mesure de la teneur en eau pondérale sont normalisées (normes NF P 94-049-1 [50] et NF P 94-049-2 [51]). Il est conseillé d'utiliser ces méthodes par pesage avant et après séchage de prélèvements. Si la méthode par étuvage est utilisée, il faut prévoir un délai de 24 heures entre le moment où le prélèvement est réalisé et la connaissance du résultat. Dans le cas d'un procédé par dessiccation au four à micro-ondes quelques minutes sont nécessaires. Ces éléments doivent être pris en compte au moment de la définition de l'organisation des opérations de contrôle.

Les mesures réalisées avec des appareils équipés de système d'absorption neutronique ne concordent pas toujours avec les mesures réalisées par séchage. Dans le cas d'utilisation de tels appareils, il est conseillé de procéder à un « calage » des valeurs délivrées avec une méthode de mesure normalisée par séchage.



Réalisation de prélèvements pour mesure de la teneur en eau sur planche d'essais (photo Lhoist)



Laboratoire de chantier pour mesure de la teneur en eau avec four à micro-ondes (photo Lhoist)

Figure 55 : Contrôle de la teneur en eau sur chantier

15.2 Caractéristiques de la chaux

La qualité de la chaux utilisée (type, réactivité, granulométrie) a un impact sur les performances finales des sols traités. La norme NF EN 459-1 [6] définit les caractéristiques et exigences concernant l'ensemble des chaux utilisables en génie civil et bâtiment. Il est donc nécessaire, lorsqu'on se réfère à cette norme, de désigner explicitement le produit à utiliser. Pour les applications dans le domaine des ouvrages hydrauliques, les études en laboratoire et les essais sur démonstrateurs conduisent à préconiser une chaux calcique vive de haute pureté conforme à la norme NF EN 459-1 [6], de désignation NF EN 459-1 CL 90-Q (R5, P2) (chaux libre $\geq 88\%$).

- classe de réactivité : R5 (température supérieure à 60°C en moins de 10 min lors de l'essai de réactivité à l'eau),
- classe granulométrique : P2 (100% < 5 mm ; 95% < 2 mm ; 50% < 0,09 mm),
- teneur en chaux libre ($\text{CaO}_{\text{disp}} \geq 88\%$).

Les essais de caractérisation sont décrits dans la norme NF EN 459-2 [52]. Le contrôle de la réactivité de la chaux et de sa granulométrie par tamisage à sec est facilement réalisable sur le chantier. La teneur en chaux libre est mesurée chez le producteur et peut l'être également dans des laboratoires disposant des équipements nécessaires. Des prélèvements conservatoires peuvent être réalisés et stockés dans des contenants étanches et chimiquement neutres.

En tant que produit de construction, la chaux est un matériau certifié faisant l'objet d'un marquage CE qui atteste de la conformité aux exigences de la norme. Le marquage CE doit apparaître sur le bon de livraison ainsi que sur l'emballage lorsqu'il s'agit de sacs ou de big-bags. Les bons de livraison doivent être remis au maître d'œuvre et vérifiés par lui.

15.3 Traitement en place

La première action à conduire est de contrôler l'état et le fonctionnement des matériels constituants l'atelier de traitement :

- silo de stockage de la chaux :
 - vérification visuelle du silo,
 - vérification visuelle du système contre l'émission de poussières au cours du premier remplissage,
- arroseuse :
 - vérification visuelle de la machine,
 - vérification du système d'arrosage (actionneurs, vanne, répartition transversale de l'arrosage),
- épandeur :
 - fourniture de la fiche technique et n° de série de la machine,
 - vérification visuelle de la machine,
 - vérification des équipements (indicateurs, édition des tickets de pesée si disponible),
 - vérification des systèmes équipant l'épandeur contre l'émission des poussières,
- malaxeur :
 - fourniture de la fiche technique et n° de série de la machine,
 - vérification visuelle de la machine,
 - vérification des outils de malaxage (type et état d'usure),
 - vérification des équipements (indicateurs de vitesse et de profondeur de malaxage, fonctionnement de la trappe d'éjection).



Contrôle visuel de l'état du rotor du malaxeur (photo Lhoist)



Contrôle de l'indicateur de la profondeur de malaxage installé sur la cloche du malaxeur (photo Lhoist)



Contrôle visuel du chargement de l'épandeur sans émission de poussières (photo Lhoist)



Contrôle visuel de l'épandage de la chaux sans émission de poussières (photo Lhoist)

Figure 56 : Exemple de contrôles visuels à appliquer pour un atelier de traitement en place

Dans le cas d'utilisation d'une arroseuse de type « queue de carpe », il doit être procédé à un « étalonnage » en déterminant le débit moyen obtenu lors d'une vidange complète de la cuve (volume de la cuve/surface arrosée en l/m²). Cette opération peut être réalisée plusieurs fois pour s'assurer de la répétabilité du débit moyen obtenu. Elle peut aussi être réalisée à plusieurs vitesses d'avancement afin de préciser le point de fonctionnement de l'arroseuse en fonction de la quantité d'eau à ajouter.

Pour un traitement en place le dosage de la chaux est traduit en quantité de chaux à épandre par unité de surface exprimée en kg/m² (§ 13.2.7). La quantité de chaux réellement épandue doit être vérifiée lors du réglage de l'épandeur en procédant à des mesures de pesées à la bâche ou au bac comme décrit dans la fiche n°23 du Guide technique « Conception et réalisation des terrassements – Fascicule 3 : Méthodes d'essais » [53]. Suivant la même méthode, des mesures ponctuelles en cours de chantier ou à chaque changement de réglage de l'épandeur sont conseillées. Pour les épandeurs intégrant un système de pesée embarqué, l'édition d'un ticket de pesage après chaque séquence d'épandage permet de contrôler la quantité moyenne de chaux épandue à partir de la quantité de chaux déversée et la surface couverte par l'épandeur pendant la séquence d'épandage.

Dans le cas d'un traitement sur plate-forme dédiée la phase de reprise du sol traité à la chaux, exécutée à la pelle ou par poussage au bulldozer, doit être contrôlée visuellement, avec l'aide de phénolphtaléine si nécessaire, afin de s'assurer de ne pas mélanger au sol traité du sol naturel provenant de la plate-forme (respect de l'épaisseur de la couche de sol traité à la chaux) ou des cordons latéraux en sol non traité qui subsistent généralement.



Contrôle par pesée de bac de la masse surfacique de chaux épandue (photo Lhoist)



Affichage du système de pesage embarqué d'un épandeur- affichage du poids de chaux restant dans l'épandeur (photo Lhoist)

Figure 57 : Contrôle du dosage en chaux

15.4 Traitement en centrale

La fiche technique descriptive et détaillée de la centrale doit être fournie. L'utilisation d'une centrale de traitement à dosage volumétrique ou pondéral requiert un étalonnage avant la phase de production. Des pesées de contrôle sont à effectuer sur les deux « entrants » : sol naturel et chaux. Pour le sol naturel une double pesée par camion benne permet de contrôler le débit réel en « sol naturel humide ». Pour le contrôle du débit de chaux il convient de prévoir un système adapté (bac, big-bag, ...) pour réceptionner la chaux et la peser. Ces contrôles sont à répéter pour chaque changement de débit nominal de la centrale (sol et chaux). Certains matériels permettent l'enregistrement des paramètres de fonctionnement de la centrale en cours de production comme les débits moyens en sol, chaux et eau, la quantité de sol traité produite, etc. Ces enregistrements qui permettent de tracer l'historique de production sont des éléments utiles pour le contrôle.

Après la phase de réglage de la centrale il est conseillé de procéder à un point de fonctionnement au cours duquel une quantité représentative de sol traité est fabriquée (environ 10 à 25 tonnes suivant le débit de la centrale). Le stock ainsi produit permet de procéder aux contrôles de la teneur en eau et de la mouture du sol traité à la chaux.

15.5 Mouture du sol traité à la chaux

Le contrôle de la mouture du sol traité à la chaux est réalisé au démarrage du chantier au cours de la planche d'essais, de l'épreuve de convenance ou du contrôle du point de fonctionnement de la centrale. La finesse de mouture obtenue peut nécessiter de modifier la méthodologie de traitement afin d'atteindre l'objectif visé.

Ce paramètre est généralement apprécié visuellement, mais peut être contrôlé par tamisage manuel direct sans eau d'un prélèvement au travers des tamis de dimensions de maille de 20, 31.5 et 40 mm. La masse minimale de sol à tamiser doit être de 3 kg pour une mouture de 20 mm et de 12 kg pour une mouture de 40 mm. Le facteur D caractérisant la mouture correspond à la dimension de la maille de tamis autorisant un passant de 95 %. Le contrôle de la mouture peut être répété en cours de chantier si visuellement une dérive est observée.

À titre d'exemple la Figure 58 donne un résultat de mouture obtenue après traitement en centrale d'un sol A1 à 2 % de chaux. La courbe granulométrique montre un passant de 87 % au tamis de 20 mm et de 95 % (Dmax) au tamis de 30 mm. La mouture dans cet exemple est de 30 mm.

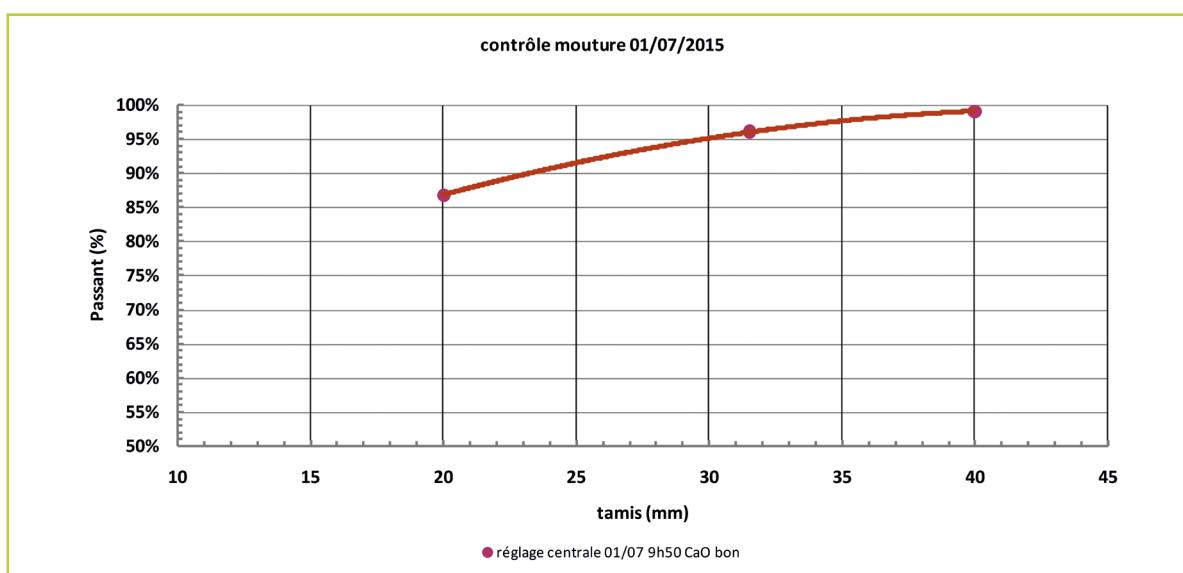


Figure 58 : Mouture sur sol A1 après traitement en centrale à 2 % de chaux

16. Contrôle du compactage

16.1 Réception des compacteurs

Les engins de compactage utilisés sur chantier doivent être contrôlés et vérifiés. Les fiches techniques des machines comportant les caractéristiques permettant de vérifier leur classe d'efficacité suivant la norme NF P 98-736 [46] sont à fournir. Si nécessaire pour les compacteurs à cylindre vibrant un contrôle des paramètres vibratoires peut être réalisé selon la norme NF P 98-761 [54]. L'efficacité du compactage dépend de la vitesse d'évolution du compacteur et la présence sur les machines d'un indicateur de vitesse étalonné est à vérifier. Pour le contrôle en continu du compactage l'équipement d'un dispositif de type chronotachygraphe étalonné et en bon état de fonctionnement est également à vérifier. Depuis peu sont apparus de nouveaux systèmes d'aide à la conduite et de contrôle continu du compactage par GPS. Ces systèmes, qui donnent des résultats complets et fiables, devraient connaître un essor rapide et sont à privilégier.

Remarque : il est important de vérifier lors de la planche d'essai de compactage ou du démarrage des travaux que l'utilisation de compacteurs à cylindre lisse ne génère pas de feuilletage dû à la vibration.

16.2 Contrôle en continu

Le contrôle en continu du compactage s'effectue selon la méthode dite de « e-Q/S » qui consiste à :

→ comparer le rapport Q/S évalué sur chantier et exprimé en m^3/m^2

$$Q/S = \frac{\text{volume (Q) de sol mis en œuvre pendant un temps donné}}{\text{surface (S) couverte par le compacteur pendant le même temps}}$$

à la valeur de référence de ce même paramètre donné dans les tableaux du GTR [9] préconisant les modalités de compactage ou au Tableau 11 (§ 13.2.11),

→ et vérifier l'épaisseur des couches compactées.

Cette méthode est détaillée dans la fiche n°16 du *Guide technique « Conception et réalisation des terrassements - Fascicule 3 : méthodes d'essais »* [53].

Si les conditions données dans le Tableau 12 sont vérifiées, le compactage sera jugé comme conforme.

Tableau 12 : Critères d'acceptabilité du contrôle du compactage en continu

Critère d'acceptabilité	Fonction M état hydrique « h »	Fonction M (avec états hydriques « m » et « s ») et fonctions S, P, ES, EI, EV
Épaisseur de la couche compactée ($e_{réelle}$)	$e_{réelle} = e_{prescrite} \pm 15\%$	$e_{réelle} \leq e_{prescrite}$
Q/S (volume de sol mis en œuvre / surface couverte par le compacteur)	$Q/S_{constaté} = Q/S_{prescrit} \pm 20\%$	$Q/S_{constaté} \leq Q/S_{prescrit}$
Vitesse du compacteur (V)	$V_{moyenne constatée} \equiv V_{prescrite}$	$V_{moyenne constatée} \equiv V_{prescrite}$

L'unité de temps utilisée avec cette méthode est généralement la journée de production ou la demi-journée. Les disques enregistrés par le chronotachygraphe équipant le compacteur doivent être dépouillés et archivés quotidiennement pour prévenir tout risque de dérive de la qualité du compactage. Les résultats sont consignés sur une fiche récapitulative journalière annexée au registre de chantier.

Les systèmes d'aide à la conduite basés sur une cartographie GPS permettent au conducteur de vérifier que le nombre de passes est bien réalisé en tout point. Ils présentent un intérêt car ils permettent en outre de contrôler et d'enregistrer la régularité et l'homogénéité du compactage, la vitesse du compacteur et l'épaisseur des couches. Si certains constructeurs commencent à en équiper leurs matériels, ces dispositifs existent aussi en kits et s'installent très facilement et très rapidement sur des compacteurs non équipés. Il s'agit donc d'une importante avancée dans le contrôle qualité et rien ne s'oppose aujourd'hui à ce qu'on les exige sur un chantier en lieu et place du tachygraphe dont l'exploitation est fastidieuse et peu précise.

16.3 Contrôle ponctuel

Ce type de contrôle est réalisé en procédant à des mesures de masse volumique in situ ou à des mesures de résistance à l'enfoncement d'une pointe de pénétromètre à la fin d'une opération de compactage.

Les mesures de masse volumique doivent être réalisées au moyen de gammadensimètres conformes à la normalisation en vigueur comme avec la norme NF P 94-061-1 [55]. La profondeur d'investigation des matériels de mesure utilisés (Figure 59) doit correspondre à l'épaisseur des couches mises en œuvre. La profondeur d'investigation maximale des matériels de mesure est actuellement de 0,40 m. Pour contrôler le niveau de compactage d'une couche, il convient de procéder à une série d'au minimum 6 mesures afin d'évaluer la valeur moyenne et sa dispersion. Ces mesures s'accompagnent généralement de prélèvements destructifs de sol pour en déterminer la teneur en eau. Les résultats des mesures sont exprimés en taux de compactage en référence à la masse volumique optimale Proctor du sol traité et permettent de constater la qualité du compactage obtenue sur l'épaisseur moyenne d'une couche. Il n'est pas possible avec ces appareils d'accéder à la masse volumique en fond de couche.



Figure 59 : Mesure de la masse volumique en place au moyen d'un gammadensimètre (photo DigueELITE)

Il est aussi possible de mesurer la qualité du compactage par méthode indirecte avec des pénétromètres légers ou lourds, à énergie constante ou variable (Figure 60). Pour leur utilisation en épreuve de réception ces appareils doivent répondre aux normes NF P94-063 [56] et NF P94-105 [57], et disposer de la fonction B décrite dans ces normes. Pour leur utilisation, le sol doit être clairement identifié (nature et état) et l'objectif de densification connu (« q4 » ou « q3 »). Cet outil de contrôle peut être aussi bien utilisé par le contrôle intérieur que par le contrôle extérieur. Pour caractériser la qualité de compactage plusieurs essais sont nécessaires afin d'obtenir un « pénétrogramme moyen » sur une zone considérée. Le nombre d'essais à réaliser est fonction de la nature du sol (présence d'éléments granulaires par exemple) ; au minimum 3 à 6 profils unitaires sont nécessaires pour caractériser une zone. Pour l'interprétation des résultats on se référera aux normes précédemment citées. Dans le cadre d'un contrôle extérieur au pénétromètre, le plan qualité peut par exemple spécifier une réception à mi-remblai et une réception finale une fois l'ouvrage terminé. Un exemple de résultats de mesure est donné Figure 61.



Figure 60 : Mesure de la résistance de pointe en fonction de la profondeur au moyen d'un pénétromètre léger (photo DigueELITE)

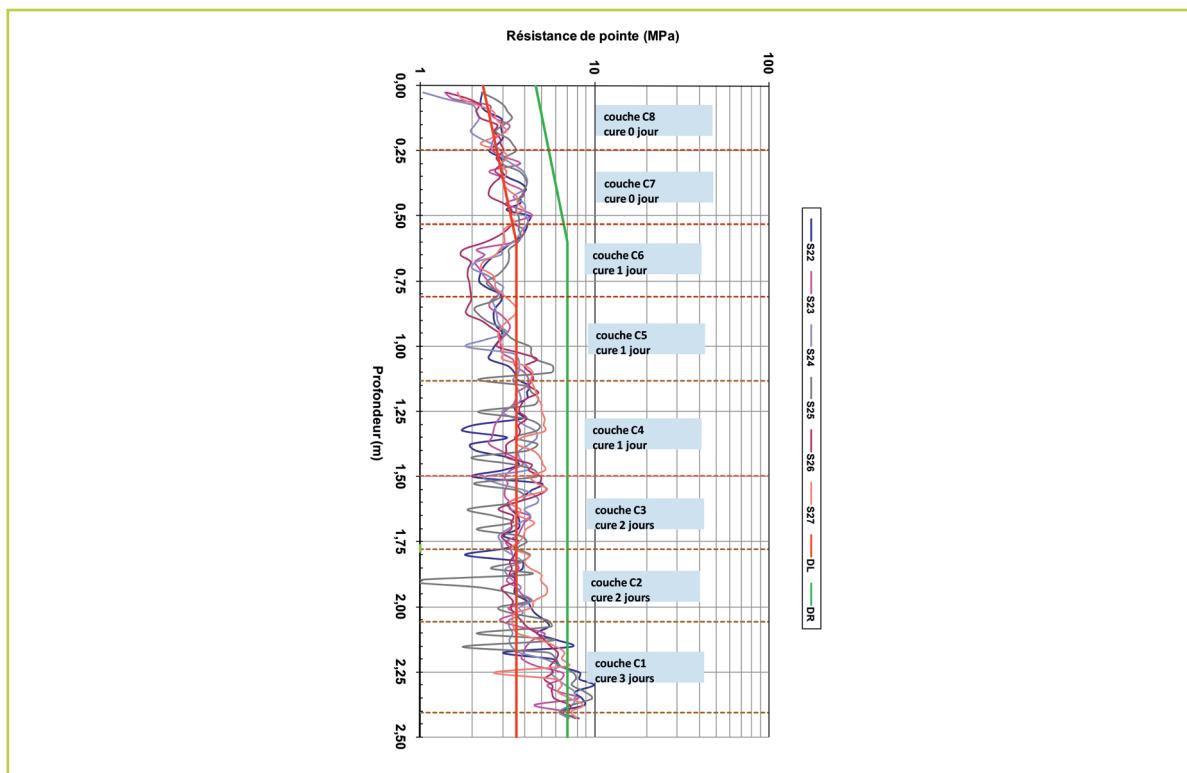


Figure 61 : Exemple de pénétrogrammes obtenus sur la construction d'un ouvrage hydraulique en sol traité à la chaux au moyen du matériel Panda 2 (6 pénétrogrammes sur 8 couches unitaires)

On attire l'attention sur le délai de cure entre la mise en œuvre du sol traité et la réalisation des essais au pénétromètre en raison de l'accroissement des performances mécaniques du sol traité à la chaux qui peut augmenter la résistance à la pénétration de la pointe de l'appareil de mesure. Il est difficile de donner un délai car la cinétique d'augmentation des caractéristiques mécaniques du composant sol-chaux due à la prise pouzzolanique dépend de plusieurs facteurs comme l'argilosité du sol et sa réactivité à la chaux, le dosage en chaux, la teneur en eau et la température. On procédera donc aux essais pénétrométriques le plus rapidement possible après le compactage, en particulier dans le cas de températures élevées ($> 25^{\circ}\text{C}$). Pour chaque essai, le délai de cure doit être identifié et renseigné pour chacune des couches faisant l'objet de contrôle au pénétromètre et les conditions météorologiques rencontrées pendant le délai de cure doivent être rapportées. À titre d'exemple on trouvera Figure 62 l'évolution des résistances de pointe moyennes, toutes choses égales par ailleurs, en fonction du temps de cure obtenues sur un sol A1 traité à 2 % de chaux.

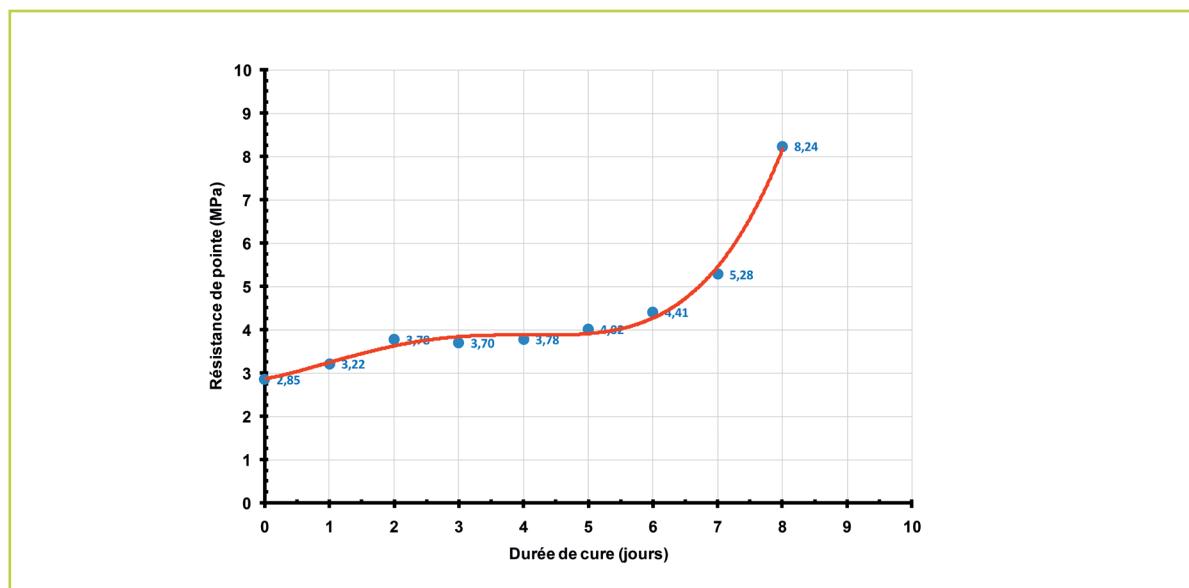


Figure 62 : Évolution de la résistance de pointe en fonction du temps de cure sur un sol A1 traité à 2 % de chaux

Dans certains cas (forte réactivité de la chaux, température élevée) une cinétique rapide de la prise pouzzolanique peut entraîner une augmentation rapide et importante de la résistance de pointe. Par exemple, sur des sols A2 très réactifs et traités à 2 % de chaux, on a pu noter un doublement de la résistance de pointe après 24 heures de cure. Cet élément est important vis-à-vis des opérations de contrôle de compactage réalisées en fin de chantier au moyen d'essais pénétrométriques dont les conclusions peuvent être largement faussées. Pour s'affranchir de ce phénomène il convient donc de s'organiser pour réaliser ce type de contrôle à très court terme (un délai maximal de 24 heures est à privilégier). Pour cette raison, un contrôle final sur toute la hauteur de l'ouvrage réalisé après un délai de cure important n'a pas forcément lieu d'être et risque d'être inapproprié pour évaluer la qualité de compactage obtenue.

17. Levé topographique final

Il est conseillé de faire pratiquer un levé topographique final de l'ouvrage (Figure 63). Les levés topographiques doivent permettre de restituer les dimensions dans l'espace de l'ouvrage « tel que construit ».

Ces données peuvent être délivrées sous la forme d'un modèle numérique de terrain qui permettra de suivre dans le temps l'évolution de l'ouvrage (tassements, stabilité des pentes, etc.). Dans ce modèle il est conseillé d'y faire figurer tous les points singuliers (chambres, capteurs, forages, drains, ...) dont la connaissance est importante dans le cas de nouveaux travaux qui seraient à exécuter (entretien, réparation, etc.).



Figure 63 : Réalisation d'un levé topographique final par GPS (chantier expérimental de Vlassenbroek - photo Lhoist)

18. Documents de suivi de l'exécution

L'établissement d'un registre regroupant tous les éléments relatifs aux opérations de construction et de contrôle de l'ouvrage est vivement conseillé. Ce registre est tenu à jour par l'entreprise qui y consigne quotidiennement toutes les données utiles, comme :

- les conditions météorologiques,
- la restitution des observations et examens visuels réalisés (notes, photographies datées et légendées),
- les éventuelles modifications de méthodologies utilisées (préparation des sols, traitement, compactage),
- l'identification précise des travaux réalisés et leur localisation dans l'ouvrage (fouille, remblai, couche, travaux sur ouvrage existant, ...),
- les volumes journaliers de sol traité et mis en œuvre,
- les éventuels remplacements des matériels de traitement ou de mise en œuvre,
- le résultat du contrôle en continu du compactage,
- les opérations de contrôle réalisées (intervenant, nature des contrôles, ...) accompagnées des résultats,
- la localisation des contrôles in situ réalisés,
- les aléas et incidents rencontrés.

Le registre de chantier complet est visé périodiquement par la maîtrise d'œuvre et lui est remis en fin de chantier. Il présente une source d'informations importantes et est utile à l'établissement du dossier de récolelement à fournir en fin de travaux.

Quelle que soit sa taille, chaque chantier exécuté (chantier neuf, confortement ou réparation d'ouvrage) fait l'objet d'un dossier de récolelement. Ce dossier est un point-clé dans le transfert de responsabilité de l'entreprise ayant réalisé les travaux vers le maître d'ouvrage, puis le gestionnaire.

Toutes les pièces du dossier relatives à la construction de l'ouvrage (plans d'exécution, levés, journal de chantier, instrumentation), son contrôle (implantation, nature des contrôles réalisés et résultats d'essais) et à sa réception finale assurée par le contrôle extérieur sont à verser au dossier d'ouvrage. Elles permettent :

- de mettre à jour et compléter les bases de données des ouvrages existants,
- de préparer et d'organiser les opérations futures de maintenance.

F. SUIVI DES OUVRAGES

19. Méthodes de suivi

19.1 Inspection visuelle

L'inspection visuelle périodique des digues est une part prépondérante de la surveillance des ouvrages à l'heure actuelle. Le « Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires : Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations » [58] présente une méthodologie de réalisation et de restitution de ces visites. Un tableau synoptique rappelle les principaux points à observer et permet d'éveiller l'attention de l'observateur.

L'exemple de DigueELITE a montré que les ouvrages en sols traités doivent être observés de la même manière qu'un ouvrage en sol non traité : les points d'observation (listing servant de mémento) sont identiques. D'après l'expérience de DigueELITE, les différences portent sur les fousseurs et la végétation : les fousseurs n'arrivent pas à creuser dans le sol traité et la végétation a du mal à s'implanter spontanément. Toutefois, l'observateur s'attachera à vérifier la présence de terrier dans les parties en sol non traité (fondation).

19.2 Instrumentation

La auscultation par capteurs et instruments d'une digue en sol traité ne doit pas être différente de celle d'une digue en sols non traités, il n'y a pas de particularité du sol traité qu'il faille spécifiquement ausculter. Le démonstrateur du Vidourle a fait l'objet d'une instrumentation particulière à des fins de recherche avec la mise en place dans l'ouvrage de capteurs pour la caractérisation de la succion. Cette disposition n'est pas à déployer dans les cas courants de digues de protection contre les crues.

On peut simplement souligner ici que, comme pour tout ouvrage de grand linéaire, le développement d'auscultation par fibre optique est pertinent et qu'il n'y a pas de contre-indication à l'implantation de ces fibres dans un sol traité. Il suffira de vérifier auprès du fournisseur que les gaines de protection et/ou les géosynthétiques les abritant sont compatibles avec les conditions de pH élevé d'un sol traité.

19.3 Auscultation et suivi par prélèvements et essais

Comme pour un ouvrage en sol non traité, il n'y a pas de raison de prévoir d'ausculter dans le temps la digue par sondages et essais géotechniques ultérieurs. Les études de laboratoire et in situ menés pour les missions G2 et G3 (et éventuellement la réalisation d'un chantier expérimental) ainsi que les opérations de contrôle et de réception garantissent l'obtention des caractéristiques voulues. Il n'y a guère qu'en cas de désordres que de tels prélèvements et essais seraient à envisager pour déterminer la cause des désordres, comme dans le cas d'un ouvrage en sol non traité.

20. Application à l'ouvrage expérimental du Vidourle

Une synthèse des observations faites lors du suivi du démonstrateur de DigueELITE est présentée en Annexe 2. Dans le cadre de ce projet de recherche, un investissement particulier a été fait sur ce suivi, et de ce fait n'est pas un exemple de suivi tel qu'on le réalisera sur un ouvrage en service. Les visites ont été fréquentes (une visite par mois après les travaux, espacées ensuite) et détaillées – cela étant facilité par la taille réduite de l'ouvrage. D'autre part, une particularité du démonstrateur est de ne pas être revêtu d'une couche de terre végétale comme les ouvrages en service ; l'évolution du remblai soumis directement aux agents extérieurs a donc pu être observée, sans risque d'atténuation ou de masquage par un revêtement, ce qui est exceptionnel.

L'Annexe 2 présente la synthèse du suivi par points particuliers relevés, et pour chacun de ces points l'évolution au cours du temps et des saisons, ainsi que les différences de comportement entre le sol non traité et le sol traité. Il s'agit dans ce document d'information de montrer des exemples d'observations qui peuvent être faites lors du suivi, leur intérêt et les particularités visibles d'un ouvrage en sol traité par rapport à un ouvrage en sol non traité.

Références bibliographiques citées dans le document

- [1] Utilisation des sols traités à la chaux dans les ouvrages hydrauliques – Document d'information, DigueELITE, novembre 2015
- [2] Le traitement des sols à la chaux : une technique éprouvée appliquée à la construction d'ouvrages hydrauliques – Livret1 – Document d'information à usage des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre, DigueELITE, mars 2019
- [3] Guide technique - Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme - Sétra/LCPC, janvier 2000
- [4] NF 16907-4, Terrassements – Partie 4 : traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, décembre 2018
- [5] Petits barrages submersibles, F. Lempérière, M Hotakhanh, N. Nerincx, colloque CFBR-SHF Hydraulique des barrages et des digues, Chambéry, 29-30 novembre 2017
- [6] NF EN 459-1, Chaux de construction - Partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformité, aout 2015
- [7] NF EN 13286-49, Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 49 : essai de gonflement accéléré pour sol traité à la chaux et/ou avec un liant hydraulique, octobre 2004
- [8] NF P11-300, Terrassements - Classification des matériaux de terrassement, janvier 2025
- [9] Guide des terrassements des remblais et des couches de forme – Fascicule 1 - Principes généraux - IDRRIM – 2023
- [10] Enseignements de TerDOUEST – Propositions de compléments au Guide Traitement des Sols - IDRRIM, décembre 2015
- [11] Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel, Thi Thanh Hang Nguyen, Thèse, Paris Est, 2015
- [12] Un ouvrage hydraulique en vraie grandeur traité à la chaux, I. Charles, G. Herrier, D. Puiatti, C. Chevalier, E. Durand - 2ème Colloque National Digues Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions – Aix-en-Provence, juin 2013
- [13] Time dependant evolution of the shear strength of a silty soil treated with lime, Q. Bollens, 2008
- [14] Lime treated soils properties for application in railways infrastructure with hydraulic constraints, G. Herrier, D. Puiatti, S. Bonelli, J.-J Fry, C. Chevalier, M. Froumentin, Symposium International GEORAIL 2014
- [15] Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays, A.A. Basma, E.R. Tuncer, Transportation Research Record, Vol. 1295, 1991
- [16] Evolution of the properties of lime-treated silty soil in a small experimental embankment, L. Makki-Szymkiewicz, A. Hibouche, S. Taibi, G. Herrier, D. Lesueur, J-M Fleureau, Engineering Geology Volume 191, Pages 8-22, 9 May 2015
- [17] Lime stabilization – Reactions, Properties, Design and Construction, Transportation Research Board (USA) – National Research Council, State of the Art Report 5, 1987
- [18] Contribution of loamy soil treatment to improve embankments performance, R. De Bel, A.G. Correia, J.C. Verbrugge. In characterization, modeling, and performance of geomaterials: selected papers from the 2009 GeoHunan International Conference, 2009
- [19] Determination of strength equivalency factors for the design of lime-treated roadways, M.L. Alexander, California Department of Transportation, FHWA-CA-T-78-37, 1978
- [20] Stabilization and treatment of clay soils with lime, F.G. Bell, Ground engineering, Vol. 21(2), pp. 22-30, 1988
- [21] Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees, S. Bonelli, Wiley/ISTE, p. 388, 2013
- [22] NF XP P94-065, Sols : reconnaissance et essais - Hole Erosion Test - Principe et méthode d'essai en laboratoire pour la détermination des caractéristiques de résistance à l'érosion de conduit, novembre 2023
- [23] L'essai d'érosion de conduit HET Hole Erosion Test, N. Benahmed S. Bonelli, Cemagref, décembre 2010

- [24] ASTM D5852-00, Standard test method for erodibility determination of soil in the field or in the laboratory by the Let index method, 2017
- [25] Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams, C.F. Wan, R. Fell, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(4): 373-380, ,2004
- [26] Apparatus, test, procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ, G.J Hanson, K.R. Cook, Applied Eng. In Agric., 20(4): 455-462, 2004
- [27] ASTM D6460-07, Standard test method for determination of Rolled Erosion Control Products (RECP) performance in protecting earthen channel from stormwater-induced erosion, , 2012
- [28] The International Levee Handbook, CIRIA, 2013
- [29] Time and temperature dependency of the geomechanical properties of silty soils treated with lime, R. De Bel, Q. Bollens, A. Gomes Correia, P.H. Duvignaud, J.C. Verbrugge, Paper AP 1142, 2007
- [30] Alteration of soil parameters by stabilization with lime, Brandl, H. In Proceeding of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.3, 1981
- [31] Why embankment cracks and how to fix them – 50 years of NRCS experience, C. Benjamin P.E. Doerge, Geotechnical Engineer, USDA/Natural Resources Conservation Service, 2016
- [32] Bulletin 195, Barrages en Sol Cimenté, CIGB, 2022
- [33] NF P 98-234-2, Essais relatifs aux chaussées - Comportement au gel - Partie 2 : essai de gonflement au gel des sols et matériaux granulaires traités ou non de D inférieur ou égal 20 mm, février 1996
- [34] NF P 98-086, Dimensionnement structurel des chaussées routières - Application aux chaussées neuves, mai 2019
- [35] NF P 94-117-1, Sols : reconnaissance et essais - Portance des plates formes - Partie 1 : Module sous chargement statique à la plaque (EV2), avril 2000
- [36] NF P 94-117-2, Sols : reconnaissance et essais - Portance des plates formes - Partie 2 : Module sous chargement dynamique, octobre 2004
- [37] XP CEN/TS 17693-1, Terrassements - Essais de traitement de sol - Partie 1 : essai pH pour la détermination du besoin en chaux pour la stabilisation des sols (Point de fixation de la chaux LFP, Optimum de modification de la chaux LMO, janvier 2022)
- [38] Impact of lime treated soils performance on design of earthfill dams and dikes, N. Nerincx, S. Bonelli, D. Puiatti, G. Herrier, J.-J. Fry, R. Tourment, S. Nicaise, 84th annual ICOLD meeting, Johannesburg, 15-20 mai 2016
- [39] Tronçons de digue résistant à la surverse : quantification de la résistance à l'érosion interne et à l'érosion de surface dans le cadre du projet DigueELITE, N. Nerincx, S. Bonelli, F. Cornacchioli, J.-J. Fry, G. Herrier, F. Mercier, S. Nicaise, D. Puiatti, J.-M. Richard, P. Tachker, Colloque CFBR-SHF, Chambéry, 29-30 novembre 2017
- [40] " Digues et petits barrages en terre : un appareillage permettant de simuler une surverse in situ, F. Mercier, G. Charrier, S. Bonelli, S. Nicaise, N. Chaouch, Y. Grémeaux, F. Byron, L. Luu, Colloque CFBR-SHF, Chambéry, 29-30 novembre 2017
- [41] Erosion resistant dikes thanks to soil treatment with lime, G. Herrier, S. Bonelli, F. Cornacchioli, Nerincx, S. Nicaise, D. Puiatti, J-M Richard, P. Tachker, 3rd International Conference on Protection against Overlapping, UK, 6-8 June 2018
- [42] Quantifying the erosion resistance of dikes with the overflowing simulator, S. Bonelli, S. Nicaise, G. Charrier, F. Bryon, Y. Grémeaux, 3rd International Conference on Protection against Overlapping, UK, 6-8 June 2018
- [43] Digues résistantes en sol traité à la chaux : les apports du projet DigueELITE et les conséquences sur la conception, N. Nerincx, S. Bonelli, G. Herrier, P. Tachker, D. Puiatti, F. Cornacchioli, S. Nicaise, D. Lesueur, Colloques Digues maritimes et fluviales, Aix-en-Provence, mars 2019
- [44] NF P 94-500, Missions d'ingénierie géotechnique - Classification et spécifications, novembre 2013
- [45] Note d'information Sétra n°114, Éléments techniques pour la conception et la réalisation de planche d'essais de compactage dans les chantiers de terrassement, août 2005
- [46] NF P98-736, Matériel de construction et d'entretien des routes - Compacteurs - Classification, septembre 1992
- [47] Guide technique sur le remblayage des tranchées, Sétra/LCPC, mai 1994

- [48] Guide technique Organisation de l'assurance qualité dans les travaux de terrassements, LCPC/Sétra, janvier 2000
- [49] Guide technique Conception et réalisation des terrassements – Fascicule 2 : organisation des contrôles, Sétra/CFTR, mars 2007
- [50] NP P 94-049-1, Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Partie 1 : méthode de la dessiccation au four à micro-ondes, février 1996
- [51] NF P 94-049-2, Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Partie 2 : méthode à la plaque chauffante ou panneaux rayonnants, février 1996
- [52] NF EN 459-2, Chaux de construction - Partie 2 : Méthodes d'essai, juillet 2021
- [53] Guide technique Conception et réalisation des terrassements - Fascicule 3 : méthodes d'essais, Sétra/CFTR, mars 2007
- [54] NF P 98-761, Matériels de construction et d'entretien des routes - Compacteurs - Évaluation du moment d'excentrique, décembre 1991
- [55] NF P 94-061-1, Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique d'un matériau en place - Partie 1 : méthode au gammadensimètre à pointe (à transmission directe), octobre 1996.
- [56] NFP94-063, Sols : reconnaissance et essais - Contrôle de la qualité du compactage - Méthode au pénétromètre dynamique à énergie constante. Principe et méthode d'étalonnage des pénétrodensitographes. Exploitation des résultats. Interprétation, juin 2011
- [57] NFP94-105, Sols : reconnaissance et essais - Contrôle de la qualité du compactage - Méthode au pénétromètre dynamique à énergie variable - Principe et méthode d'étalonnage du pénétromètre - Exploitation des résultats - Interprétation, avril 2012
- [58] Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires : Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations, P. Mériaux, P. Royet, C. Folton, Cemagref Éditions, 2004

Autres références bibliographiques

Références relatives aux ouvrages hydrauliques

Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai, CFBR, p. 132, octobre 2015

Référentiel technique digues maritimes et fluviales, Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, janvier 2015

Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages, CFBR, p. 166, 2013

Les déversoirs sur digues fluviales, G. Degoutte, p. 198., Editions Quæ, 2012

Petits barrages - Recommandations pour la réalisation et le suivi, G. Degoutte, Comité Français des Barrages et Réservoirs, Cemagref éditions, p. 173, 2002 (1ère édition 1997)

The International Levee Handbook, CIRIA, p. 1400, 2013

Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques, D. Loudière, M. Hoonaler, MEDDTL-DGPR, p. 286, 2013

Références relatives aux traitements de sol à la chaux

Traitements des matériaux, R. Rossi, L. Gavois, G. Raoul, Techniques de l'Ingénieur, C5 362, 2007

Chaux aérienne - Applications en Génie Civil, G. Herrier, D. Lesueur, D. Pujatti, Techniques de l'Ingénieur, C5 445, 2011

Références récentes relatives aux traitements de sol à la chaux pour les ouvrages hydrauliques

Communications au colloque national Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions, Aix-en-Provence, 12-14 juin 2013 :

- Résistance à l'érosion des sols traités à la chaux et application aux digues : une étude paramétrique complète en laboratoire, C. Chevalier, I. Haghghi, G. Herrier

- La digue expérimentale du CER de Rouen : un ouvrage hydraulique en vraie grandeur en sol traité à la chaux, I. Charles, G. Herrier, C. Chevalier, E. Durand

- Le sol traité à la chaux : un matériau résistant à l'érosion pour les ouvrages hydrauliques, G. Herrier, C. Chevalier, M. Froumentin, S. Bonelli, J.-J. Fry

- Restauration des berges et digues de l'Estey d'Eyrans au moyen du traitement à la chaux : une solution performante et respectueuse de l'environnement, E. Norena, T. Dinger, P. Bienvenu, G. Herrier

Un ouvrage hydraulique en vraie grandeur en sol traité à la chaux, I. Charles, E. Durand, G. Herrier, D. Pujatti, C. Chevalier, Colloque Technique CFBR, Chambéry, 4-5 décembre 2013

Le traitement des sols à la chaux : une technique éprouvée pour quelles applications en ouvrages hydrauliques ?, D. Puiatti, Symposium du CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs), 31 janvier 2013

Bulletin 195, Barrages en Sol Cimenté, CIGB, 2022

Annexe 1

Liste des ouvrages hydrauliques réalisés en France ayant fait usage du traitement de sol à la chaux aérienne calcique

Ouvrage	Localisation	Pays	Type d'Ouvrage	Date de construction des zones traitées à la chaux	Commentaires
Barrage de Torcy-Neuf (Canal du Centre)	Torcy-Neuf (71)	Barrage	1883-87	2 % de chaux hydratée (ou lait de chaux) dans le corroi argileux par couche de 10cm (compactées à 7,5cm)	
Bief de Humes (Canal de la Marne à la Saône)	Humes (52)	Digue de canal	1889	0,5 % de chaux hydratée dans le corroi argileux par couche de 10cm (compactées à 6,7cm)	
Michelbach	Michelbach (68)	Barrage	1982	Objectif du traitement : étanchéité et stabilité des berges. Limon plus ou moins argileux, très humide, traité à des dosages variables selon la teneur en eau.	30cm de protection en sol traité chaux, en 2 couches de 15cm (3 % de chaux pour la première, 2% dans la seconde)
Barrage du Gast	Le Gast (14)	Barrage	1985-86		
Barrage de Fond Pignon	Sangatte (62)	Barrage de stockage des boues de marinage du tunnel sous la Manche	1987-1990	Objectif du traitement réemploi des craie humides par traitement en place à 2,5 % de chaux vive	38cm de protection en sol traité chaux, recouvert de 10cm de terre végétale
Ouvrages de Normandie	Normandie	Barrages écrêteurs de crue / retenues collinaires	1990-2014		Protection en sol traité chaux, recouvert de 15cm de terre végétale
Estey d'Eyrans	Montesquieu (33)	Digue	2011	Affluent de la Garonne soumis aux inondations fluviomaritimes. Matériau du site traité en place en zone Natura 2000	
Bassin de débordement (ADP)	Roissy-en-France (95)	Digue	2013	Limons du site traités à la chaux pour constituer les digues du bassin	
Digue de Borre	Borre (59)	Digue	2013	Expansion de crue de la Bourre. Matériaux du site traités à 2-3 % de chaux vive	38cm de protection en sol traité chaux, couvert de 8-15cm de terre végétale
West Memphis	Arkansas	USA	Digue	1974	Traitement des berges avec homogénéisation
US SCS Union City barrage	Tennessee	USA	Barrage	1974	30cm de protection en sol traité chaux, recouvert de 15cm de terre végétale

Liste des ouvrages hydrauliques réalisés à l'étranger ayant fait usage du traitement de sol à la chaux aérienne calcique

Ouvrage	Localisation	Pays	Type d'Ouvrage	Date de construction des zones traitées à la chaux	Commentaires
Lyndon Johnson LBJ ranch	Johnson City, Texas	USA	Bassin	1960	
Barrage de Lavon Lake - Santa Fe Railroad	Dallas, Texas	USA	Barrage	1960	
US SCS barrages de Frogville Creek 1 et 2	Oklahoma	USA	Barrage	1968	30 cm de protection en sol traité chaux, en 2 couches de 15 cm (3 % de chaux pour la première, 2% dans la seconde)
Stabilisation du fond du réservoir - Southern Illinois Univ.	Edwardsville, Illinois	USA	Fond de réservoir	1968	
US SCS barrage de Middle Clear Boggy	Oklahoma	USA	Barrage	1970	38 cm de protection en sol traité chaux, recouvert de 10 cm de terre végétale
US SCS canal de Squaw Creek	Oklahoma	USA	Digue de canal	1972	Protection en sol traité chaux, recouvert de 15 cm de terre végétale
Canal de Friant-Kern	California	USA	Canal d'irrigation (réfection d'une partie du canal)	1972-74	
1975-77	Stabilisation de zones endommagées (glissement, retrait) à 4 % de chaux vive du sol local ($I_p \sim 23-50$) sur 1,2 m de profondeur sur les berges et 0,6 m en fond de canal				
US SCS Mississippi barrages (18 sites)	Mississippi	USA	Barrage	1973	38 cm de protection en sol traité chaux, couvert de 8-15 cm de terre végétale
West Memphis	Arkansas	USA	Digue	1974	Traitement des berges avec homogénéisation
US SCS Union City barrage	Tennessee	USA	Barrage	1974	30 cm de protection en sol traité chaux, recouvert de 15 cm de terre végétale

Liste des ouvrages hydrauliques réalisés à l'étranger ayant fait usage du traitement de sol à la chaux aérienne calcique (suite)

Ouvrage	Localisation	Pays	Type d'Ouvrage	Date de construction des zones traitées à la chaux	Commentaires
US SCS Upper Lake Fork 1 - McKinney	Texas	USA	Barrage	1974	30 cm de protection en sol traité chaux, recouvert de 10 cm de terre végétale
Réseau de digues entre Alton et Gale (sur le Mississippi)	Illinois, Missouri	USA	Digue	1975-1992	Traitement à 4-5 % de chaux hydratée avec homogénéisation des digues en sol argileux local (IP~50) par carapace, dans les zones endommagées (glissements, fissures de retrait)
Bog Hole Waterfall	Arizona	USA	Barrage	1976	75 cm de protection en sol traité chaux
Barrage	New South Wales	Australie	Barrage	< 1977	
Canada		Canada	Barrage	< 1977	
US SCS barrage d'Upper Lake Fork 2 et 3	Texas	USA	Barrage	1977	30 cm de protection en sol traité chaux, recouvert de 10 cm de terre végétale
Barrage 1 (Lamchieng ?)		Thaïlande	Barrage	< 1978	Protection des pentes amont
Barrage 2Huay Saneng ?)		Thaïlande	Barrage	< 1978	Support d'étanchéité en enrobé bitumineux
Barrage de Kilmore	South Australia	Australie	Barrage	< 1978	Protection des drains et des pentes
Barrage de Bungal		Australie	Noyau de Barrage	< 1978	Couche verticale d'argile traitée à la chaux sur la face aval du noyau
US SCS barrages 1 et 2	Tennessee	USA	Barrage et Noyau	1978	30 cm de protection en sol traité chaux et noyau en sol traité

Liste des ouvrages hydrauliques réalisés à l'étranger ayant fait usage du traitement de sol à la chaux aérienne calcique (suite)

Ouvrage	Localisation	Pays	Type d'Ouvrage	Date de construction des zones traitées à la chaux	Commentaires
US SCS Upper Lake Fork 4 - Paris	Texas	USA	Barrage	1978	
USACE barrage de Los Esteros	Santa Rosa, New Mexico	USA	Noyau de Barrage	1979	1,5 m de noyau en sol traité à la chaux
Barrage de McGee Creek	Colorado	USA	Barrage	1982-87	Barrage zoné de 50 m de haut et 600m de long (crête). Matériaux plus ou moins plastiques (I_p entre 1 et 35), dont 30 % $I_p > 20$, traités à 1,5-3 % de chaux hydratée
Barrage de Mnjoli		Swaziland	Noyau de Barrage	1987	Partie aval du noyau traitée à la chaux
Barrage de Mun Bon		Thailande	Barrage	1994	
Digue sur lac Chobot	Milevsko	République Tchèque	Digue	2003	
Digue sur lac Hvezda		République Tchèque	Digue	2003	
Réservoir de Javor		République Tchèque	Réservoir d'eau en altitude pour production de neige artificielle	2009	Traitement à 2 % de chaux vive du corps de digue avec raidissement des talus par renforcement avec des géotextiles

Liste des ouvrages hydrauliques réalisés à l'étranger ayant fait usage du traitement de sol à la chaux aérienne calcique (suite)

Ouvrage	Localisation	Pays	Type d'Ouvrage	Date de construction des zones traitées à la chaux	Commentaires
USACE barrage de Los Esteros	Santa Rosa, New Mexico	USA	Noyau de Barrage	1979	1,5 m de noyau en sol traité à la chaux
Barrage de McGee Creek	Colorado	USA	Barrage	1982-87	Barrage zoné de 50 m de haut et 600m de long (crête). Matériaux plus ou moins plastiques (I_p entre 1 et 35), dont 30 % $I_p > 20$, traités à 1,5-3 % de chaux hydratée
Barrage de Mnjoli		Swaziland	Noyau de Barrage	1987	Partie aval du noyau traitée à la chaux
Barrage de Mun Bon		Thaïlande	Barrage	1994	
Digue sur lac Chobot	Milevsko	République Tchèque	Digue	2003	
Digue sur lac Hvezda		République Tchèque	Digue	2003	
Réservoir de Javor		République Tchèque	Réservoir d'eau en altitude pour production de neige artificielle	2009	Traitement à 2 % de chaux vive du corps de digue avec raidissement des talus par renforcement avec des géotextiles

Annexe 2

Suivi du démonstrateur DigueELITE

L'ouvrage expérimental a fait l'objet de plusieurs visites après sa construction. La méthode employée obéit aux préconisations du « *Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires : Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations* » [54] : un seul observateur permettant de limiter la subjectivité, parfois accompagné pour une confrontation d'avis, nombreuses photographies repérées afin de comparer les points relevés, memento servant de fil de visite, observation éloignée puis rapprochée à partir de tous les accès possibles : crête, pieds de talus.

Il faut noter des particularités concernant ce suivi et les observations faites :

- le démonstrateur comprend deux parties : l'une en sol traité, l'autre en sol non traité. Dans le cadre du projet de recherche, le suivi s'est attaché à comparer le comportement entre le remblai traité et le remblai non traité,
- la densité et le détail des visites ne sont pas reproductibles sur un ouvrage en service,
- l'ouvrage n'étant pas revêtu d'une couche de terre végétale, l'observateur a accès directement au remblai, sans risque de masquage ou d'atténuation.

Les principaux points particuliers relevés lors de ces visites sont présentés ci-après, en mettant l'accent sur leur évolution au cours du temps et la comparaison entre le sol traité et le sol non traité.

Fissures

Des fissures sont observées sur le démonstrateur. Elles sont visibles en crête et sur les talus. Elles sont longitudinales (parallèles à la crête de l'ouvrage) et transversales. Sur la partie en sol traité, ces fissures sont apparues juste après la construction. Leur cartographie précise permet d'affirmer qu'au cours du temps (1,5 an de suivi), il n'y a pas d'évolution du nombre et de la position des fissures. Au gré des saisons, elles sont plus ou moins visibles : masquées en hiver par les fines et le remaniement superficiel du fait de la pluie, bien visibles en été. Le matériau au niveau des lèvres des fissures conserve un aspect sain et résistant, il n'y a pas de dégradation visible telle qu'ouverture des fissures ou altération du matériau.

Sur la partie en sol non traité, les fissures sont observées plusieurs mois après la construction du démonstrateur, et en particulier juste après que celui-ci ait été sollicité lors d'essais hydrauliques reproduisant le phénomène de surverse.

Elles sont également longitudinales et transversales à l'ouvrage. La fissure longitudinale la plus visible est dans la continuité de celle repérée sur la partie en sol traité. Comme sur la partie en sol traité, elles sont davantage visibles en été, lorsque les sols superficiels sont secs.

Si leur apparition est plus tardive que sur le sol traité, une évolution négative a rapidement été constatée. Les lèvres des fissures présentent un sol altéré, érodé par le ruissellement. Il s'ensuit une ouverture des fissures qui favorise la pénétration de l'eau et de l'atmosphère accélérant le processus de dégradation.



Fissures transversales sur le sol traité (à gauche) et sur le sol non traité (à droite) - Prise de vue 16/09/2016, construction + 422 jours (photos DigueELITE)

Aux abords immédiats des fissures, le matériau se comporte différemment : sur la partie en sol traité, il reste sain et compact ; sur la partie en sol non traité, le matériau est altéré et friable, il se délite sous l'ongle de l'observateur.



Altération du matériau aux abords des fissures sur le sol non traité - Prise de vue 24/02/2017, construction + 583 jours (photo DigueELITE)

Au moment de la rédaction du document, des efforts expérimentaux et de modélisation sont menés pour comprendre l'origine des fissures dans le contexte particulier du démonstrateur, la mise en œuvre ayant eu lieu lors d'une période particulièrement chaude. Des préconisations sur la méthode de mise en œuvre pourront être proposées à partir des conclusions de ces études.

Terriers de lapin

Aucun dispositif anti-fouisseur n'a été mis en place sur le démonstrateur. Le suivi observationnel comprend le comptage et le repérage précis des terriers de lapins. Sur l'ouvrage, les fouisseurs creusent leur terrier sur le talus côté Vidourle (le plus à l'abri) et uniquement dans le sol non traité. Cinq mois après la construction de l'ouvrage, 17 terriers ont été recensés sur le talus en sol non traité, alors qu'aucun n'a été repéré sur le sol traité. Les fouisseurs ont pourtant tenté de creuser le sol traité, ainsi qu'en attestent les traces de griffes et nombreuses fèces, mais sans aboutir.



Tentative de terrier sur le sol traité à gauche : traces de griffes et nombreuses fèces. Terrier sur le sol non traité à droite (photos DigueELITE)

À partir de ces observations, il apparaît qu'il est inutile de prévoir de dispositif anti-fouisseur sur les remblais en sol traité.

Résistance à l'érosion externe par les agents météoriques

L'observation du démonstrateur immédiatement après la construction permet d'apporter des informations sur la résistance des sols face aux intempéries.

Le démonstrateur a subi de forts orages dans les mois qui ont suivi la réalisation. Dès les premières pluies, des figures d'érosion (ravines) sont apparues sur le sol non traité, certaines constituant un chemin préférentiel pour l'eau de ruissellement. Des phénomènes d'érosion régressive apparaissent alors, avec pour certaines ravines des profondeurs de pénétration en crête de 1 m. De tels phénomènes n'ont absolument pas été observés sur les talus en sol traité, qui ont conservé un aspect lisse malgré les pluies. Le contraste de comportement superficiel face aux intempéries est particulièrement visible sur un point particulier du démonstrateur, où des couches en sol traité sont surmontées de couches en sol non traité. Dans le talus, des phénomènes de ravinement sont visibles dans la partie haute (sol non traité), et disparaissent au contact des sols traités.



Ravine d'érosion sur le sol non traité à gauche et contraste de comportement entre le sol traité (talus lisse) et le sol non traité (talus avec ravines) à droite (construction + 3 mois) (photos DigueELITE)

Le remblai traité résiste mieux aux agents météoriques, ce qui est intéressant pour le comportement à long terme, et présente également un intérêt non négligeable à court terme. En effet, au cours des terrassements des ouvrages de grand linéaire, il peut se passer un certain temps avant que le remblai ne soit revêtu de terre végétale. Les talus de remblai, fragiles juste après la période de terrassement, présentent alors souvent des désordres superficiels qu'il faut reprendre. La résistance aux précipitations conférée au remblai par le traitement permet d'éviter ce type de travaux de reprise toujours coûteux.

Bassin

Au pied du démonstrateur, un bassin de rétention d'eau a été construit afin de permettre la réalisation d'essais hydrauliques compris dans le projet de recherche. Le bassin est réalisé en sol traité, la formulation et la méthode de mise en œuvre sont identiques à celles de la digue en sol traité.

Dès les premières pluies, le bassin s'est rempli ; au travers des visites comprenant des périodes de sécheresse, la baisse du niveau d'eau reste faible et peut être attribuée à l'évaporation, ce qui confirme l'efficacité des couches de sol traité, compactées dans les conditions requises, comme étanchéité.



Bassin de rétention d'eau étanché par 2 couches compactées de sol traité (photo DigueELITE)

Annexe 3

Essais de laboratoire : normes, modes opératoires et publications

Caractérisation du gisement

Enseignements de TerDOUEST - Propositions de compléments au Guide Traitement des Sols, IDDRIM, décembre 2015, <https://www.idrrim.com/publications/4055.htm>

Analyse granulométrique

NF P94-056, Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique –Méthode par tamisage à sec après lavage, mars 1996

NF P94-057, Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique des sols – Méthode par sédimentation, mai 1992

NF EN 933-1, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, mai 2012

NF EN ISO 17892-4, Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 4 : détermination de la distribution granulométrique des particules, janvier 2018

Détermination des limites d'Atterberg

NF EN ISO 17892-12, Reconnaissance et essais géotechniques – Essais de laboratoire sur les sols – Partie 12 : détermination des limites de liquidité et de plasticité, juillet 2018

NF EN ISO 17892-12, Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12 : détermination des limites d'Atterberg , juillet 2018

Valeur de bleu de méthylène

NF EN 933-9, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9 : qualification des fines - Essai au bleu de méthylène, février 2022

Teneur en matière organique

NF P94-055, Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un sol - Méthode chimique, décembre 1993

XP P94-047, Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un matériau - Méthode par calcination, décembre 1998

Teneur en sulfates et sulfures

NF ISO 11048, Qualité du sol - Dosage du sulfate soluble dans l'eau et dans l'acide, juillet 1995
État hydrique

NF EN ISO 17892-1, Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 1 : détermination de la teneur en eau, décembre 2014

NF P94-049-1, Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Partie 1 : méthode de la dessiccation au four à micro-ondes, février 1996

Comportement au compactage

NF P94-093, Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau -

Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié - Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié, octobre 2014

NF EN 13286-2, Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 2 : méthodes d'essai de détermination en laboratoire de la masse volumique de référence et de la teneur en eau - Compactage Proctor, décembre 2010

Essais de laboratoire pour la fonction Maniabilité (M)

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

NF EN 13286-47, Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 47 : méthode d'essai pour la détermination de l'indice portant Californien (CBR), de l'indice portant immédiate (IPI) et du gonflement linéaire , novembre 2021

Essais de laboratoire pour la formulation

Vérification de l'aptitude au traitement

NF P94-100, Sols : reconnaissance et essais - Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essais d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement, octobre 2022

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

Étude de formulation

Guide Technique - Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme - Sétra/LCPC, 1.3.1. Étude géotechnique p.65-67, janvier 2000

Norme XP CEN/TS 17693-1, Terrassements - Essais de traitement de sol - Partie 1 : essai pH pour la détermination du besoin en chaux pour la stabilisation des sols, janvier 2022

Mode opératoire de préparation des sols et traitement en laboratoire, Annexe 4

Essais de laboratoire pour la fonction Stabilité (S)

Confection des éprouvettes

NF EN 13286-50, Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques – Partie 50 : méthode de

confection par compactage avec un appareillage Proctor ou une table vibrante des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques, mai 2005

NF EN 13286-51, Graves traitées aux liants hydrauliques et graves non traitées. Partie 51 : méthode de confection par compactage avec un marteau vibrant des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques, mai 2005

NF EN 13286-52, Mélanges traités aux liants hydrauliques ou non traités - Partie 52 : Méthode de confection par vibro-compression des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques, mai 2005

NF EN 13286-53, Mélanges traités aux liants hydrauliques ou non traités - Partie 53 : Méthode de confection par compression axiale des éprouvettes des matériaux traités aux liants hydrauliques, mai 2005

Résistance à compression uniaxiale

NF EN ISO 17892-7, Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols – Partie 7 : essai de compression uniaxiale, février 2018

NF EN 13286-41, Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des graves traités aux liants hydrauliques, novembre 2021

NF EN ISO 17892-7, Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 7 : essai de compression uniaxiale, février 2018

Résistance à la traction

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

NF EN 13286-43, Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques – Partie 43 : méthode d'essai pour la détermination du module d'élasticité des mélanges traités aux liants hydrauliques, septembre 2003

Résistance au cisaillement

NF EN ISO 17892-9, Reconnaissance et essais géotechniques – Essais de laboratoire sur les sols – Partie 9 : essais en compression à l'appareil triaxial consolidé sur sols saturés, avril 2018

NF EN 13286-7, Mélanges avec ou sans liant hydraulique - Partie 7 : essai triaxial sous charge cyclique pour mélanges sans liant hydraulique, juillet 2004

NF EN ISO 17892-8, Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 8 : essai triaxial non consolidé non drainé, mars 2018

NF EN ISO 17892-9, Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 9 : essai en compression à l'appareil triaxial sur sols saturés consolidés, avril 2018

NF EN ISO 17892-10, Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 10 : essai de cisaillement direct, décembre 2018

Compressibilité et tassement

NF EN ISO 17892-5, Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 5 : essai de chargement par paliers à l'œdomètre, mars 2017

Essais de laboratoire pour la fonction Étanchéité (P)

Détermination de la perméabilité (conductivité hydraulique)

NF EN ISO 17892-11, Reconnaissance et essais géotechniques -- Essais de laboratoire sur les sols -- Partie 11 : essais de perméabilité, février 2019

NF X30-441, Déchets - Détermination en laboratoire du coefficient de perméabilité à saturation d'un matériau - Essais de perméabilité au perméamètre à paroi rigide à gradient hydraulique constant/variable, novembre 2008

NF X30-442, Déchets - Détermination au laboratoire du coefficient de perméabilité à saturation d'un matériau - Essais de perméabilité à l'œdomètre à charge hydraulique constante/variable, novembre 2008

NF X30-443, Déchets - Détermination en laboratoire du coefficient de perméabilité à saturation d'un matériau - Perméamètre à paroi flexible à gradient hydraulique constant, octobre 2014

Essais de laboratoire pour la fonction Résistance à l'érosion interne (EI)

Essai HET (Hole erosion test)

Norme XP P94-065, Sols : reconnaissance et essais - Hole Erosion Test - Principe et méthode d'essai en laboratoire pour la détermination des caractéristiques de résistance à l'érosion de conduit, novembre 2023

Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams, C.F. Wan, R. Fell, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 4, pp. 373-380, 2004

Investigating concentrated leak erosion behaviour of cohesive soils by performing hole erosion tests, N. Benahmed, S. Bonelli, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 16(1), pp. 43-58, 2012

L'essai d'érosion de conduit HET, Hole Erosion Test , N. Benahmed, S. Bonelli, Cemagref - Unité de Recherche Ouvrages Hydrauliques, Aix-en-Provence, 2010. <http://cemadoc.irstea.fr/oa/PUB00034181-essai-erosion-conduit-het-hole-erosion-test.html>.

Essais de laboratoire pour la fonction protection (ES) de surface et évacuation (EV)*

* Les tests ici recommandés évaluent localement la résistance à l'érosion de la surface, et ne remplacent pas des essais à l'échelle réelle pour la détermination de la résistance à la surverse.

Essai JET (Jet erosion test)

Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ, G.J. Hanson, K.R. Cook, Applied engineering in agriculture, p455, 2004

Essai MoJet (Mobile erosion test)

L'érodimètre à jets mobiles, P. Henensal, F.Duchatel, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, 167, pp. 47-52, 1990

Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide, T.L. Pham - Doctoral dissertation, École des Ponts ParisTech, 2008

Erodibility diagnostic of existing hydraulic earthworks by Mobile Jets Erosion Test, P. Reiffsteck, I. Haghghi, C. Chevalier, 6th International Conference on Scour and Erosion, Paris, France, 2012

Essai EFA (Erosion Function Apparatus)

SRICOS-EFA method for complex piers in fine-grained soils, J.L. Briaud, H.C. Li, P. Nurtjahyo, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 130(11), pp. 1180-1191, 2004

SRICOS : Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers, J.L. Briaud, F.C. Ting, H.C. Chen, R. Gudavalli, S. Perugu, G. Wei, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125(4), pp. 237-246, 1999

Annexe 4

Mode opératoire pour la préparation d'éprouvettes en matériau traité

Introduction

Cette annexe donne des recommandations concernant la préparation d'éprouvettes en matériaux traités à la chaux pour les études en laboratoire. Cela concerne l'échantillonnage, l'homogénéisation, l'addition de liant, le mélange, le compactage et les conditions de cure.

Échantillonnage

Les échantillons de sol recueillis doivent être représentatifs du gisement à caractériser.

Les critères de sélection et l'emplacement des points d'échantillonnage seront enregistrés dans un rapport d'essais, ainsi que la méthode de préparation avant essai. Ces données dépendent :

- des objectifs de l'étude et de la phase du projet,
- des informations préliminaires disponibles,
- des conditions du site.

Des précautions adéquates seront prises pour s'assurer, dans la mesure du possible, que les échantillons ne subissent aucun changement dans l'intervalle entre le prélèvement et les essais. Les matériaux seront conservés dans des sacs hermétiques étiquetés ou des récipients permettant d'empêcher des modifications de teneur en eau.

Les échantillons seront caractérisés selon des essais d'identification appropriés, et regroupés en familles de matériaux ayant des propriétés similaires sur lesquelles sera réalisée l'étude de traitement.

Teneur en eau

La teneur en eau naturelle du matériau avant traitement sera mesurée et consignée dans le rapport d'essai.

Taille maximale des particules

Les matériaux choisis pour la réalisation des éprouvettes seront conformes aux dimensions indiquées dans le tableau suivant.

Taille maximale des particules des matériaux en fonction de la taille du moule et de la méthode de compactage fixée pour l'essai à effectuer

Paramètre	Méthode de compactage	Diamètre (d) et hauteur (h) du moule (mm)	Taille maximale des particules des matériaux (mm)
CBR _i /IPI (NF EN 13286-47)	Proctor (NF P94-093)	d 150 ± 1 h 120 ± 1	22,4
R _c (NF EN 13286-41)	Équipement Proctor ou table de compactage par vibrations NF EN 13286-50	d 100 ± 1 h 120 ± 1	16 (ou 22,4)
R _{it} (NF EN 13286-42)	Marteau vibrant EN 13286-51	d 150 ± 1 h 120 ± 1	31,5
E _c et E _{it} (NF EN 13286-43)	Vibrocompression NF EN 13286-52	d 100 h 100 ou 200	22,4
		d 160 h 160 ou 320	31,5
	Compression statique NF EN 13286-53	d 50 h 50 ou 100	11,2
		d 100 h 100 ou 200	22,4

NOTE : - Pour la mesure de R_c un élancement de 2 est préférable,
- Pour la mesure de R_{it} un élancement de 1 est préférable.

Traitement

Généralités

Les quantités de matériau et de liant sont déterminées par pesée. Le dosage en liant est calculé par rapport au poids sec des composants (matériau + liant) par la formule :

$$d \% = 100 \times Q / (Q+M_{dr})$$

où :

d : dosage,

Q : masse du liant,

M_{dr} : masse du matériau sec.

Préparation des mélanges

Une quantité de matériau, suffisante pour préparer le nombre requis d'éprouvettes, est placée dans le malaxeur. Le processus de malaxage doit aboutir à un mélange uniforme et homogène. L'équipement de malaxage doit être capable d'aboutir à la même qualité de mélange entre les différents lots de matériaux. Le temps passé à la réalisation du mélange doit être consigné dans le rapport d'essai.

Les détails de la méthode de préparation, tels que le type de malaxeur et d'outil de malaxage, la puissance et la vitesse de rotation de la machine de malaxage, la durée du mélange, etc. ne sont pas spécifiés, mais seront choisis sur la base de l'expérience locale avec le matériau et l'équipement disponible.

NOTE : La diversité des types de matériaux, de liants et de malaxeurs ne permet pas de spécifier une durée de malaxage fixe. La méthodologie la plus fiable pour contrôler l'homogénéité du mélange est le contrôle visuel. Cela nécessite un personnel qualifié de laboratoire.

Avant l'addition du liant, prélever deux échantillons pour déterminer la teneur en eau initiale du matériau. Une fois traité, le matériau doit être protégé de la dessiccation avant son utilisation pour confectionner les éprouvettes.

Maturation et compactage du matériau traité

Dans le cas du traitement à la chaux, le mélange sera conservé pendant au moins 1 heure dans des sacs scellés ou dans un récipient hermétique avant le compactage. Selon l'application, une période de maturation plus longue du matériau traité à la chaux avant le compactage peut être appropriée. Le compactage doit être terminé 30 minutes après la fin du temps de maturation. La période de maturation appliquée sera consignée dans le compte-rendu d'essais en laboratoire.

Les procédures de compactage (EN 13286 50 à 53) dépendent des dimensions des éprouvettes, des objectifs à atteindre (densité ou énergie) et des caractéristiques à mesurer selon les normes correspondantes (voir tableau).

La méthode de compactage utilisée sera consignée dans le rapport d'essais en laboratoire.

Cure et conservation

Généralités

Selon le matériau et les essais à effectuer, les éprouvettes sont conservées en cure dans un moule ou retirées de leur moule après compactage.

NOTE : Généralement, aucune charge n'est appliquée pendant la période de cure. La résistance du matériau traité augmente généralement si une charge est appliquée pendant la cure.

Une période de cure, qui peut être nécessaire entre la fabrication de l'éprouvette et les essais, consiste à conserver les éprouvettes pendant une période de temps spécifiée dans l'un des états suivants :

- a) dans des conditions empêchant l'évaporation avec une perte de masse significative,
- b) dans des conditions permettant l'immersion complète des éprouvettes dans l'eau,
- c) dans des conditions empêchant l'évaporation (comme en a), suivie d'une immersion complète des éprouvettes dans l'eau.

Dans chaque cas, le type de cure, la température moyenne et la durée du stockage seront enregistrées et consignées dans le rapport d'essai.

Cure par prévention de perte d'eau

La cure par prévention de la perte d'eau par évaporation s'effectue selon l'une des méthodes suivantes :

- a) conservation dans une armoire climatique ou une pièce avec une humidité relative d'au moins 90 %, à moins que des valeurs spécifiques ne soient prescrites dans la norme d'essai concernée,
- b) revêtement des extrémités de l'éprouvette avec de la cire lorsque les éprouvettes sont stockés dans des moules,
- c) enrobage de l'éprouvette dans un film plastique,
- d) toute autre méthode appropriée.

Les éprouvettes seront conservées à une température de ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) ou à toute autre température spécifiée.

NOTE : la température choisie a des répercussions sur la cinétique de durcissement.

Cure avec immersion complète

Lorsqu'une procédure d'immersion spécifique existe dans la norme d'essai concernée (par exemple l'essai CBR), cette procédure sera suivie.

Dans les autres cas, l'éprouvette, conservée dans ou hors du moule, sera soigneusement immergée dans de l'eau à ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) ou à une autre température spécifiée.

Cure consistant en la protection contre l'évaporation suivie d'une immersion

La cure consistant en la protection contre l'évaporation suivie d'une immersion sera effectuée comme décrit dans les deux méthodes de cure précédentes, excepté que, après conservation avec cire ou bouchons d'extrémité ou toute autre protection, celle-ci soit retirée avant mise en immersion.

Retrait des échantillons du moule

Après la cure, noter la hauteur de l'échantillon par rapport aux extrémités du moule, et noter la rugosité de la surface aux extrémités de l'échantillon. Le retrait des échantillons du moule doit être effectué avec un minimum de perturbation. Par exemple dans le cas où des moules fendus à ruban ont été utilisés, enlever la bande de la fente et ouvrir la fente pour permettre à l'échantillon d'être enlevé. Dans le cas de moules en carton, décoller le carton.

Rapport

Un rapport complet sera fourni sur les conditions de préparation des échantillons. Il comprendra :

- la classification des matériaux,
- l'origine et la quantité des matériaux,
- la mention éventuelle d'une opération d'écrêtage, - les caractéristiques du malaxeur et de l'outil de malaxage utilisé, puissance, vitesse de rotation, temps de malaxage, conditions et temps de maturation et conservation,
- la teneur en eau du matériau homogénéisé,
- le diamètre du moule choisi,
- la norme, le type, la classe, les spécifications, etc. de chaque liant tel que fourni par son producteur ou fournisseur,
- le dosage en liant,
- les conditions et temps de conservation,
- le type de moules utilisés,
- la description de la presse de compactage, le cas échéant : diamètre et géométrie du plateau, pression appliquée, etc.,
- la teneur en eau du matériau traité après malaxage,
- les conditions de stockage (température, taux d'humidité, durée) et les variations pendant la cure,
- etc.

Pour chaque éprouvette d'essai, les éléments suivants seront consignés :

- la densité après compactage et condition de coupe dans le moule,
- la hauteur de l'échantillon par rapport au moule après cure,
- la rugosité des extrémités de l'échantillon après cure,
- la difficulté éventuelle à retirer l'éprouvette du moule après la cure,
- toute irrégularité de l'échantillon, par exemple, trous, vides, extrémités non planes,
- le traitement éventuel de la surface des extrémités avant d'effectuer d'autres essais,
- la densité après retrait du moule,
- etc.

Le cas échéant, des photographies de l'éprouvette avant et après la cure et/ou avant et après l'essai peuvent être ajoutées au rapport d'essai.

