



HAL
open science

LE TRAITEMENT DES SOLS À LA CHAUX : UNE TECHNIQUE INNOVANTE POUR LA CONSTRUCTION DES OUVRAGES HYDRAULIQUES EN TERRE

G. Herrier, D. Puiatti, Stéphane Bonelli, J.J. Fry, N. Nerincx, M. Froumentin

► **To cite this version:**

G. Herrier, D. Puiatti, Stéphane Bonelli, J.J. Fry, N. Nerincx, et al.. LE TRAITEMENT DES SOLS À LA CHAUX : UNE TECHNIQUE INNOVANTE POUR LA CONSTRUCTION DES OUVRAGES HYDRAULIQUES EN TERRE. Vingt-cinquième congrès des Grands Barrages, Jun 2015, Stavanger, Norvège. pp.554-576. hal-01305743

HAL Id: hal-01305743

<https://hal.science/hal-01305743>

Submitted on 21 Apr 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

COMMISSION INTERNATIONALE
DES GRANDS BARRAGES

VINGT-CINQUIÈME CONGRÈS
DES GRANDS BARRAGES
Stavanger, Juin 2015

**LE TRAITEMENT DES SOLS À LA CHAUX : UNE TECHNIQUE INNOVANTE
POUR LA CONSTRUCTION DES OUVRAGES HYDRAULIQUES EN TERRE (*)**

Gontran HERRIER
Lhoist Recherche et Développement, Nivelles (Belgique)

Daniel PUIATTI
DPST Consulting, Villemomble (France)

Stéphane BONELLI
Irstea, Aix-en-Provence (France)

Jean-Jacques FRY
EDF-CIH, Le Bourget du Lac (France)

Nicolas NERINCX
ISL, Lyon (France)

Michel FROUMENTIN
Cerema/CER, Le Grand Quevilly (France)

FRANCE

1. INTRODUCTION

Le traitement des sols à la chaux est un procédé qui améliore la maniabilité des matériaux limono-argileux et leur confère des propriétés mécaniques après compactage. Les avantages de cette technique sont surtout connus dans les terrassements et sont mis à profit pour la construction des remblais routiers, autoroutiers, ferroviaires, plates-formes industrielles, etc. Les applications dans le domaine des ouvrages hydrauliques sont moins répandues, la raison pouvant résider dans le peu d'éléments disponibles jusqu'à présent sur le comportement des sols traités à la chaux dans un tel contexte.

(*) *Soil treatment with lime : an innovative technique for the construction of hydraulic earthen structures.*

Il faut remonter à la première moitié du XIX^e siècle pour se rappeler qu'en France, des corrois argileux pour ouvrages hydrauliques ont été confectionnés par mélange de chaux et d'argiles, l'objectif étant alors de s'affranchir des problèmes de fissuration par retrait inhérents à la dessiccation des argiles lors de la mise hors d'eau [1]. Cette pratique d'addition de chaux a été appliquée dans la seconde moitié du XX^e siècle aux États-Unis et en Australie notamment, comme solution curative à des problèmes de retrait-gonflement d'argiles, mais aussi pour contrer le phénomène de dispersivité des sols et assurer une résistance à l'érosion interne [2-10].

À cet égard, les travaux de confortement des berges et du fond du canal d'irrigation de Friant-Kern en Californie dans les années 1970, constituent un exemple remarquable mettant en lumière le gain de résistance à l'érosion apporté par le traitement à la chaux, suffisant pour être soumis à un débit d'eau significatif [4-7,11-12].

Plus récemment, la pratique du traitement des sols en ouvrage hydraulique est réapparue en Europe (digues et petits barrages en République tchèque et en France notamment), grâce aux initiatives de géotechniciens locaux, au fait des connaissances du traitement de sol à la chaux en technique routière, qui ont eu l'opportunité de les transposer vers les ouvrages hydrauliques.

Cependant, les échanges entre la communauté routière et celle des ouvrages hydrauliques ont manifestement été insuffisants pour que cette technique se développe naturellement. Cela peut s'expliquer à la fois par un manque d'information rigoureuse sur les caractéristiques des sols traités à la chaux en termes mécaniques et géo-hydrauliques, mais aussi par l'existence de certains préjugés négatifs, notamment par rapport à l'effet de la chaux sur la perméabilité des sols [13]. L'usage de la chaux serait resté attaché aux techniques classiques d'amélioration des matériaux pour remblais, et dès lors aurait été négligé dans les démarches liées à l'innovation et aux recherches sur les matériaux nouveaux.

Sur la base de ce constat, le Groupe Lhoist, producteur de chaux, a lancé plusieurs projets de recherche ayant pour but de mettre en lumière les propriétés des sols traités à la chaux pour la réalisation ou la réhabilitation des ouvrages hydrauliques en terre. En outre, ces études, menées en partenariat avec plusieurs instituts de recherche et universités, ont permis de proposer une méthodologie de traitement à la chaux et de mise en place des sols, permettant de maintenir des niveaux de perméabilité équivalents à ceux mesurés sur les sols non-traités. À la suite de ces résultats, plusieurs étapes ont été franchies, qui permettent d'asseoir la technique et sa promotion.

La présente contribution vise à relater ces différentes étapes et s'articule autour des éléments suivants :

- Un résumé des principales caractéristiques et propriétés des sols traités à la chaux, déterminées à l'échelle du laboratoire. Celles-ci permettent de considérer ces matériaux comme adaptés pour une mise en œuvre dans un contexte d'ouvrage hydraulique ;
- Le passage à une expérimentation en vraie grandeur, via la réalisation, l'instrumentation et les mesures sur une digue sèche expérimentale construite au Centre d'Expérimentation et de Recherche (CER) de Rouen ;
- La présentation d'un document d'information français intitulé « Utilisation des sols traités à la chaux dans les ouvrages hydrauliques » dont la vocation est de présenter les principales règles à respecter concernant la fabrication et la mise en œuvre d'un mélange sol-chaux pour la réalisation de petits ouvrages hydrauliques en terre.
- Les travaux du nouveau Comité sur les « Matériaux Cimentés pour Barrages (CMD) » à qui le CIGB a confié la tâche de rédiger un bulletin sur le sujet.

2. ÉTUDES EXPÉRIMENTALES : ENSEIGNEMENTS PRINCIPAUX

2.1. MATÉRIAUX

Les chaux utilisées pour les études de traitement sont issues de la gamme Proviacal® DD produite par Lhoist et conformes à la norme européenne EN 459-1 :

- Une chaux vive calcique EN 459-1 CL 90-Q (R5, P3) contenant 90,9 % de CaO disponible et de réactivité $t_{60} = 3,3$ minutes,
- Une chaux hydratée EN 459-1 CL 90-S.

Pour ces études de laboratoire, six sols fins différents ont été utilisés, possédant des indices de plasticité variables. Ainsi, une gamme de matériaux depuis un sol limoneux ($I_p=8$) jusqu'à un sol très argileux ($I_p=37$) est balayée. Les essais et matériaux sont décrits dans le Tableau 1.

2.2. ÉVALUATION DES PROPRIÉTÉS PERTINENTES DES SOLS TRAITÉS À LA CHAUX POUR LES OUVRAGES HYDRAULIQUES

2.2.1. Conductivité hydraulique

La construction d'un ouvrage hydraulique en terre implique la maîtrise de sa perméabilité à l'eau. Dans la littérature, peu d'études ayant pour sujet la

conductivité hydraulique des sols traités à la chaux sont référencées. De surcroît, elles proposent des résultats ou conclusions contradictoires. De plus, une idée préconçue, mais néanmoins répandue est la suivante : « *la perméabilité d'un sol augmente après un traitement à la chaux, à cause de l'abaissement de la densité sèche qui y est associé* » [13].

L'Ifsttar (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux), a réalisé une étude expérimentale de l'influence du traitement à la chaux et de la méthode de compactage d'un sol limoneux sur sa perméabilité (sol du Moulin de Laffaux, voir Tableau 1). Deux teneurs en eau de compactage différentes ont été choisies : la première est proche de l'humidité à la densité OPN (w_{OPN}), tandis que la seconde correspond à un niveau humide, de 1,1 à 1,2 fois cette valeur (w_h). Les matériaux non-traités, traités à 2 et 3 % de chaux vive, ainsi qu'à 2,65 % de chaux hydratée, ont été compactés selon deux méthodes :

- le compactage dynamique Proctor « classique »
- le compactage par pétrissage, appliqué via un outil spécifique qui simule l'action d'un compacteur à pieds dameurs [14] (Fig. 1a).

Tableau 1
Liste des essais et matériaux.
List of tests and materials

Essai	Provenance du sol	Granulométrie	I_p (%)	Classification selon la norme NF P 11-300
Perméabilité, compressibilité	Moulin de Laffaux (F)	Fraction argileuse (<2 μm) : 23 % Fraction limoneuse (2 à 50 μm) : 59 % Fines (<80 μm) : 88 %	12,7	A2
Oedomètre	Héricourt (F)	Fraction argileuse (<2 μm) : 75 % Fines (<80 μm) : 94 %	37	A3
Cisaillement	Soumagne (B) Marche-les-Dames (B)	Fines (<80 μm) : 98 %	16 11	A2 A1
HET	Camargue (F) Picardie (F)	Fraction argileuse (<2 μm) : 30 % Fines (<80 μm) : 95 % Fines (<80 μm) : 96 %	11 9	A1
MoJET	Héricourt (F)	Fines (<80 μm) : 67 %	11	A1



Fig. 1

Outil de compactage par pétrissage et moule pour essai de perméabilité.
Kneading compaction tool and mold used for permeability tests.

Les mesures de perméabilité à l'état saturé ont été réalisées à différentes échéances : 28 jours, 3 mois et 6 mois après confection et cure à l'air. Les valeurs de perméabilité restent constantes avec le temps, quelle que soit l'application de la charge hydraulique (constante ou variable). Ceci indique que la perméabilité finale des matériaux est déjà atteinte après 1 mois de cure à l'air. Les conditions préférentielles pour atteindre des niveaux de perméabilité très faibles d'un matériau traité à la chaux (dosage : 2 à 3 %) peuvent dès lors être énoncées comme suit :

- (i) teneur en eau élevée, correspondant à l'état $w_h = 1,1$ à $1,2 \times w_{OPN}$,
- (ii) compactage par pétrissage (pieds dameurs).

En respectant ce protocole, des valeurs de k inférieures à $5 \cdot 10^{-9}$ m/s, même inférieures à 10^{-10} m/s dans certains cas, ont été mesurées sur sols traités à la chaux. Ces résultats peuvent être expliqués par une redistribution porale des matériaux après traitement à la chaux et mise en œuvre des matériaux dans ces conditions spécifiques, la tendance étant à la réduction du nombre de vides de taille supérieure à $3 \mu\text{m}$, en faveur des pores de tailles plus petites, qui n'affectent pas la perméabilité. Contrairement au présumé répandu dans les esprits, la méthode de mise en place du sol traité à la chaux s'avère plus importante que la densité finale de celui-ci [15].

2.2.2. Comportement mécanique

Des essais de compression isotrope ont été effectués sur le même sol que celui ayant subi les essais de perméabilité, tandis que d'autres matériaux limoneux ou argileux ont fait l'objet de campagnes d'essais oedométriques et triaxiaux. Le détail des résultats de ces différents essais peut être consulté dans [15].

Les enseignements que l'on peut tirer de ces études montrent que l'on peut considérer le sol traité à la chaux comme un matériau « cimenté », dans le sens

où l'assemblage de particules est réalisé par les liaisons cohésives développées par l'action de la chaux. Ce nouvel assemblage possède également un nouveau seuil de résistance à la contrainte, valeur au-delà de laquelle l'assemblage est détruit et le comportement du matériau redevient similaire à celui d'un sol non-traité. Dans le cas des essais oedométriques et de compression isotrope, ce seuil n'est pas la contrainte de préconsolidation d'un sol fin naturel, mais la limite élastique intrinsèque d'un matériau devenu très peu ductile, qui reflète la résistance des forces adhésives, des « cimentations » induites par le traitement. Cette augmentation de cohésion est également due aux réactions pouzzolaniques qui sont développées entre la chaux, les espèces siliceuses et alumineuses provenant des argiles, et l'eau, rendant le matériau peu compressible, et non sujet à des déformations lorsque soumis à des contraintes allant jusque plusieurs centaines de kPa.

2.2.3. Dispersivité, gonflement et retrait

La sensibilité à l'eau de plusieurs sols avant et après traitement, a fait l'objet de plusieurs tests. À la fois la norme américaine ASTM D 6572-06 (« crumb-test »), ainsi que le crumb-test amélioré (Enhanced Crumb-Test, ECT), développé par l'Ifsttar [16], permettent d'apprécier l'amélioration spectaculaire du comportement des matériaux traités à la chaux en immersion (Fig. 2).

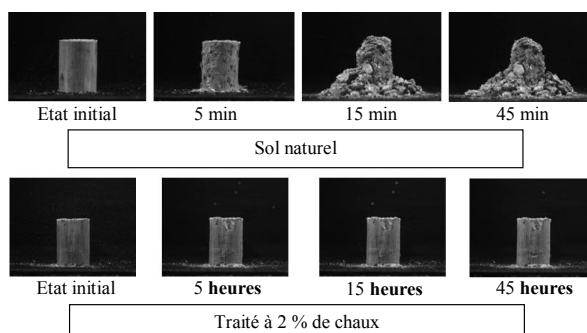


Fig. 2

Crumb-test amélioré, réalisé sur un sol limoneux d'Héricourt (IP=11) non-traité (au-dessus, échelle en minutes) et traité à 2 % de chaux (en-dessous, échelle en heures).

Enhanced Crumb-test, performed on a silty soil from Héricourt (PI=11), untreated (above, scale in minutes) and 2% lime-treated (below, scale in

Le retrait libre a également fait l'objet de mesures sur des sols argileux, selon la norme allemande DIN 18122-2. Le sol argileux d'Héricourt non-traité montre une limite de retrait évaluée à 16,5 %, couplée à une forte variation volumique (plus de 50 % de retrait). Traité à 5 % de chaux, ce sol voit sa limite

de retrait déplacée vers des teneurs en eau élevées ($w_s=55\%$), bien au-delà des conditions de mise en œuvre (proche de l'optimum Proctor), assurant la stabilité volumique du matériau [15].

2.2.4. Résistance à l'érosion

Dans le but d'évaluer l'impact d'un traitement à la chaux sur sa résistance à l'érosion, à la fois des essais d'érosion interne (érosion de conduit, HET) et externe (via l'érodimètre à jets mobiles, MoJET) ont été effectués. L'essai HET a été appliqué à l'Irstea (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) sur un limon argileux d'une digue de Camargue, ainsi qu'un limon de Picardie (Tableau 1).

Si le seuil d'érodabilité du limon du Rhône non traité est évalué à 2 m/s en termes de vitesse d'écoulement, il évolue de manière spectaculaire à 10 m/s pour le même matériau traité à la chaux, après seulement 14 jours de cure à l'air. Les essais sur différents matériaux permettent d'observer les évolutions favorables tant au point de vue de l'augmentation du niveau de contrainte critique, qu'au niveau de l'indice d'érosion (diminution de la vitesse d'érosion) [17].

Le graphique de la Fig. 3 permet d'apprécier les changements induits par le traitement à la chaux qui conduit à des caractéristiques de résistance à l'érosion importantes, permettant la classification des matériaux en dehors des zones classiquement rencontrées pour les sols français dans le diagramme de Fell [18] (Fig. 4).

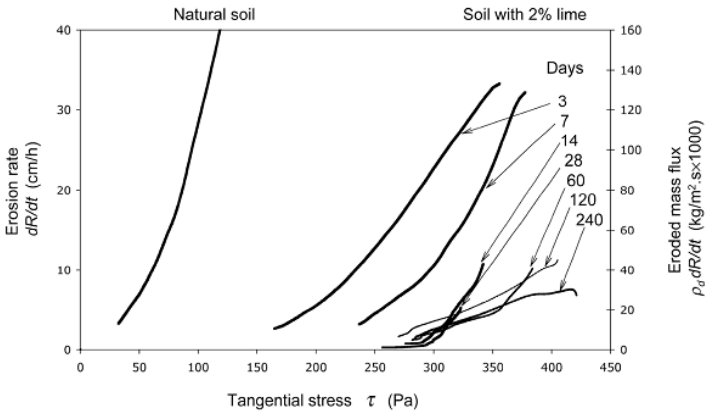


Fig. 3

Courbes d'érosion de conduit (HET) du limon argileux du Rhône, non traité et traité à 2 % de chaux, après différents temps de cure.

Hole Erosion Test (HET) curves of a clayey silt from Rhône River, untreated and 2% lime treated, after several curing times.

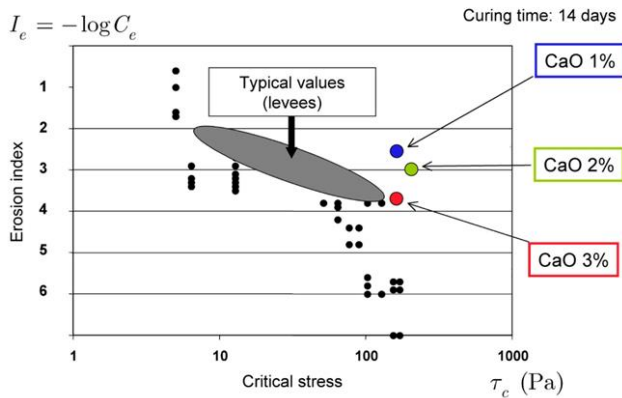


Fig. 4.

Paramètres HET (contrainte critique et indice d'érosion) d'un limon de Picardie traité à la chaux ; comparaison avec les paramètres relatifs aux sols de digues courants.

HET parameters (critical stress and erosion index) of a Picardy silty soil treated with lime; comparison with common soils for levees.

L'érosion de surface a également été évaluée au moyen de l'essai MoJET (développé par l'Ifsttar) [19-20]. Cet essai, dont le protocole classique a été sévèrement modifié pour l'occasion, n'a pas mis en évidence d'arrachement de particules de sol traité depuis la surface de l'échantillon ; tandis que les conditions identiques provoquent le détachement d'une masse conséquente de sol non-traité. Des conclusions similaires à l'essai HET peuvent être déduites de cet essai d'érosion externe.

3. RÉALISATION ET MESURES SUR UN OUVRAGE EN SOL TRAITÉ À LA CHAUX EN VRAIE GRANDEUR

Suite à cette série de données prometteuses, il a été décidé de transposer la technique pour la construction d'une structure expérimentale à l'échelle 1. Les trois objectifs principaux de ce chantier ont été les suivants :

1. démontrer la faisabilité des procédures spécifiques de traitement à la chaux et de mise en œuvre à l'échelle industrielle, en utilisant une centrale de traitement mobile dédiée et un équipement conventionnel de terrassement
2. corrélérer les observations de laboratoire avec les propriétés des sols traités à la chaux à l'échelle réelle

3. évaluer les bénéfices du traitement à la chaux en termes d'amélioration mécanique et de comportement hydraulique au fil du temps par rapport au sol non traité.

3.1. MATÉRIAUX, ÉQUIPEMENTS ET MÉTHODES

3.1.1. Caractéristiques du sol

Un sol limoneux de faible indice de plasticité a été utilisé pour la construction des digues expérimentales sèches. Ce sol a été importé de Marche-les-Dames (Belgique). Ses principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2
Caractéristiques d'identification du limon de Marche-les-Dames (Belgique)
*Identification characteristics of the silty soil from
Marches-les-Dames (Belgium)*

Fraction argileuse (<2 µm) (%)	Fraction limoneuse (2-50 µm) (%)	Passant au tamis de 80 µm (%)	Valeur de bleu de méthylène (g/100g)	Indice de plasticité (%)	Teneur en eau (%)
12	82	99.5	2.50	7 à 8	17.9

Un crumb-test, réalisé selon la norme ASTM D 6572-06 sur un échantillon de ce sol compacté, a montré qualitativement son caractère dispersif, a priori inadapté à une utilisation dans un contexte hydraulique. Un sol dispersif est défini comme facilement et rapidement dispersé dans l'eau (défloculation), sans aucune intervention mécanique. Ces matériaux ont généralement tendance avoir une faible résistance à l'érosion s'ils restent en l'état.

Outre l'amélioration de la maniabilité facilitant la mise en œuvre et l'amélioration des propriétés mécaniques à moyen terme, le traitement à la chaux est connu pour contrôler la dispersion des particules du sol grâce à l'échange cationique et aux effets de floculation et d'agglomération.

3.1.2. Études préliminaires de traitement du sol limoneux

La chaux utilisée pour les essais sur sol traité est une chaux vive Proviacal® DD, classée CL 90-Q (R5, P3) selon la norme EN 459-1, fournie par Lhoist et contenant 90,9 % de CaO disponible et une réactivité (t_{60}) de 3,3 minutes. Le point de fixation de la chaux du sol, déterminé selon le test de Eades et Grim (ASTM D6276-99a), est compris entre 1,5 et 2 %. Un dosage légèrement supérieur, équivalent à 2,5 % de chaux vive, a été choisi pour assurer l'amplification de la résistance mécanique à long terme. La teneur en eau du sol

non traité compacté à l'Optimum Proctor ($\rho_{dOPN} = 1,82 \text{ t/m}^3$) est $W_{OPN} = 14,5 \%$. Il est établi que le traitement à la chaux conduit à une augmentation de la teneur en eau Optimum Proctor, W_{OPN} , et à une réduction de la masse volumique maximale sèche, ρ_{dOPN} . Ainsi, les caractéristiques de compactage du sol limoneux de Marche-les-Dames traité avec 2,5 % de chaux vive sont $\rho_{dOPN} = 1,73 \text{ t/m}^3$ à $W_{OPN} = 17,8 \%$.

3.1.3. Opérations de mélange et de compactage

Pour la construction du remblai expérimental à grande échelle, les conditions de mise en œuvre favorables à l'obtention de la perméabilité la plus faible pour les matériaux compactés traités à la chaux ont été déterminées comme suit :

- le mélange final limon-chaux doit être humide. Dans le cas du limon de Marche-les-Dames cela signifie que de l'eau doit être ajoutée pour obtenir une teneur en eau finale du sol traité supérieure à 18 %.
- le compactage doit être effectué avec des opérations de pétrissage (compacteur à pieds dameurs). L'objectif de densification est d'atteindre une valeur moyenne minimale de 95 % de la masse volumique maximale sèche de l'essai Proctor ($1,73 \text{ t/m}^3$).

Le matériel utilisé pour le traitement à la chaux est une centrale mobile de traitement de sol qui permet de contrôler précisément le dosage en chaux par une pesée en continu du sol entrant, ainsi que la régularité de la teneur en eau du mélange, par ajout d'eau directement dans le malaxeur. La mouture du sol traité est très fine et correspond à un 0/20 mm.

Le matériel de compactage est un compacteur vibrant à pieds dameurs de type VP5 selon la norme française NF P 98-736 (Fig. 6 B).

3.2. CONCEPTION DES STRUCTURES EXPÉRIMENTALES

3.2.1. Digue en limon traité

Cette plus grande des deux digues expérimentales a été construite avec le sol limoneux de Marche-les-Dames (Belgique) traité à 2,5 % de chaux. Ses dimensions sont de 28,2 m de long et 10,3 m de large à la base, 21 m de long et 4 m de large au sommet (Fig. 5A et 5B, vue du dessus et coupe longitudinale). Sa hauteur finale est de 1,8 m. La digue est virtuellement divisée en 3 sections, réservées à trois campagnes d'essais successives, à 28 jours, 180 jours et 1 an de maturation du matériau mis en place (Fig. 5A).

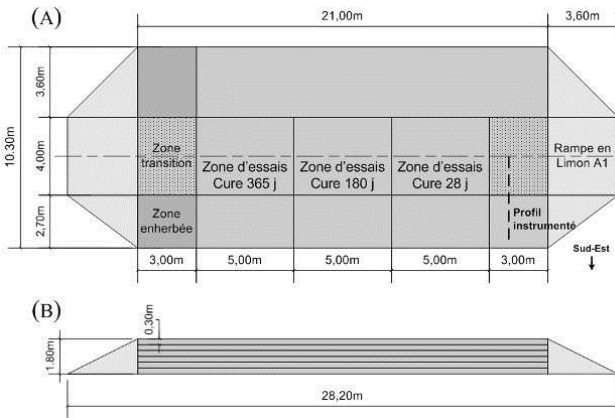


Fig. 5.

Digue en limon traité - vue du dessus (A), coupe longitudinale (B)

Le traitement à 2,5 % de chaux avec une addition contrôlée d'eau dans le malaxeur mobile, a produit un matériau de mouture fine, dont la teneur en eau est au-dessus de l'Optimum Proctor. Ce matériau traité a été transporté directement sur le chantier, puis repris par une pelle pour la mise en œuvre de couches de 45 cm d'épaisseur avant compactage. Le compactage est effectué par le compacteur à pieds dameurs en 6 passes à une vitesse de 3 km/h, produisant une épaisseur compactée finale de 30 cm pour chaque couche. Ces étapes de la construction peuvent être visualisées à la Fig. 6.

Le sommet de la digue est divisé longitudinalement en 2 parties, un côté est réservé aux mesures de propriétés géomécaniques telles que la densité, la teneur en eau, la capacité portante, les modules d'élasticité, la collecte d'échantillons pour des essais triaxiaux et des essais d'érosion interne (HET). L'autre côté est réservé aux mesures de perméabilité. Les mesures *in situ* d'érosion de surface sont effectuées sur les pentes de talus.

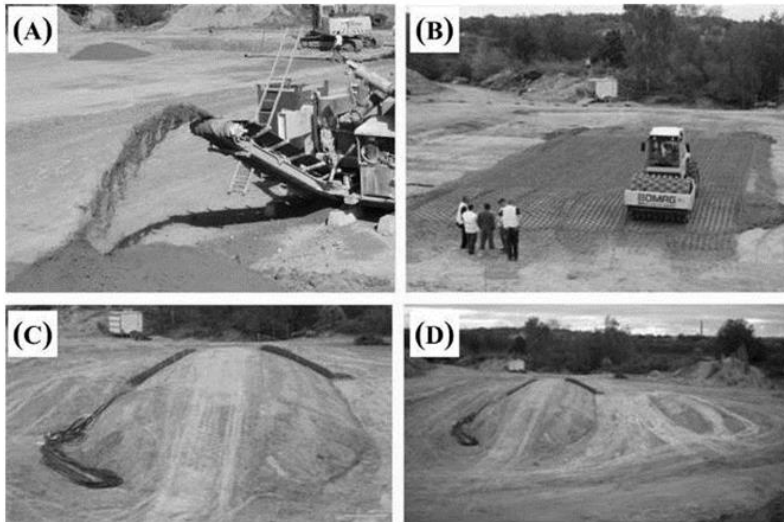


Fig. 6.

Production du matériau traité (A), compactage (B), digue en limon traité (C), vue globale des deux digues (D).

Lime-treated material production (A), compaction (B), lime-treated dike (C), global view of the two dikes (D).

3.2.2. Digue construite avec le limon naturel (non traité)

Le deuxième remblai, plus petit, a été construit en utilisant le même limon sans traitement à la chaux, mis en oeuvre à l'état humide et compacté en utilisant le même équipement à pieds dameurs. Le niveau de compactage visé correspond à 95 % de la masse volumique moyenne sèche à l'Optimum Proctor du matériau naturel ($\rho_{dOPN} = 1,82 \text{ t/m}^3$). Une section de mesure unique est prévue, car les propriétés du matériau peuvent être considérées comme inchangées au fil du temps. Les mêmes mesures que sur la digue traitée à la chaux ont été prévues.

3.3. RÉSULTATS

3.3.1. Efficacité des procédures de mélange et de construction

Digue construite en sol traité à la chaux

Les teneurs mesurées en chaux et en eau et les écarts-types calculés montrent le niveau élevé d'homogénéité du sol traité et donc la qualité de la

production à l'aide de l'atelier (Tableau 3). Les objectifs en termes de teneur en eau, de traficabilité et de densité sont atteints. Cette dernière valeur est supérieure à 95 % de la densité sèche maximale mesurée selon l'essai Proctor Standard dans toutes les couches.

Tableau 3
Mesures effectuées sur la digue traitée à la chaux après la mise en œuvre
Measurements performed on the lime-treated dike just after placement

	Teneur en eau (%)	Dosage en chaux (%)	Taux de compactage (% _{PROCTOR})
Objectif	>17,8 % (W _{OPN})	2,5	95 %
Moyenne	19,4 (W-W _{OPN} =1,6 %)	2,5	96.7 (couches 2-4-6) 98.5 (couche finale arasée)
Nb. de mesures	118	6	18 (couches 2-4-6) 24 (couche finale arasée)
Ecart-type	0,72	0,19	1,1 (couches 2-4-6) 1,1 (couche finale arasée)

La question de l'homogénéité du sol traité est étroitement liée au gradient de perméabilité, car un gradient de perméabilité imprévu peut entraîner des flux localisés anormaux. Ce test grandeur nature a montré la faisabilité de l'utilisation du procédé à l'échelle industrielle et les avantages du traitement de sol dans une centrale, ce qui garantit un excellent niveau d'homogénéité.

3.3.2. Performances mécaniques

Les propriétés mécaniques des matériaux des remblais ont été mesurées *in situ* par des mesures pressiométriques et à l'aide d'essais triaxiaux sur des échantillons carottés. L'essai pressiométrique (Ménard) [21] est un essai de chargement statique effectué par expansion d'une sonde cylindrique souple introduite dans un forage vertical. Les valeurs indiquées dans le Tableau 4 ont été obtenues lors des trois campagnes d'essais, soit 28 jours, 6 mois et un an après la construction des digues expérimentales.

Tableau 4
Paramètres mesurés au pressiomètre.
Pressuremeter results.

Structure	Période de mesure	Pf* (MPa)	PI* (MPa)	E _M (MPa)	E _M /PI*
Non traitée	28 jours	0,15	0,25	1,6	6,5
	6 mois	0,15	0,36	2,0	5,5
Traitée	28 jours	2,53	3,77	38,6	10,2
	6 mois	2,51	4,23	52,7	12,5
	1 an	3,65	6,02	81,6	13,6

Le Tableau 5 répertorie les résultats d'essais triaxiaux sur des échantillons carottés aux 3 échéances. L'augmentation de la résistance et de la cohésion est mise en évidence à travers ces dernières mesures.

Tableau 5.
Résultats des essais triaxiaux (CD). Les valeurs reflètent les propriétés résiduelles (post-pic).
Triaxial tests results (CD). Values are related to residual properties (post-peak)

Structure	Période de prélèvement	c' (kPa)	φ» (°)
Digue non traitée	28 jours	<10	35
Digue traitée	28 jours	41 (essai apr. 75 j)	39
	6 mois	61 (essai apr. 195 j)	39
	1 an	75	39

Les valeurs pressiométriques indiquent, comparativement au sol naturel sous-consolidé ($5 < E_M/P_i^* < 8$), que le traitement à la chaux après la construction produit une augmentation de la résistance ce qui rend le sol normalement consolidé ($E_M/P_i^* = 10$) à légèrement surconsolidé ($E_M/P_i^* = 12$ à 13). Parallèlement, les essais triaxiaux permettent de classer le sol naturel non traité comme peu cohésif, alors que la cohésion du limon traité augmente jusqu'à une valeur de 75 kPa, un an après la construction.

3.3.3. Niveau de perméabilité et de résistance à l'érosion

Les mesures de perméabilité *in situ* et en laboratoire ont été enregistrées en utilisant plusieurs méthodes. Trois méthodes ont été utilisées pour les mesures *in situ*. Tout d'abord, en utilisant un double packer muni d'une crépine de 60 cm (Fig. 7A) afin de réaliser un essai de type Nasberg à charge variable à des profondeurs de -0,6 m et -1,5 m, et avec un tuyau crépiné installé dans un forage de 60 mm de diamètre, d'une profondeur de 0,90 m. (Fig. 7 B). La troisième méthode est une mesure depuis la surface (à 5 cm de profondeur), au moyen d'un infiltromètre simple anneau. Enfin, la perméabilité verticale a

également été mesurée lors d'essais triaxiaux dans des conditions saturées. Les mesures de perméabilité sont rassemblées dans le Tableau 6.

Des perméabilités très faibles ont été obtenues pour les deux structures. Les ordres de grandeur similaires permettent de considérer que le traitement à la chaux produit des niveaux de perméabilité équivalents à ceux du sol naturel à condition d'appliquer des méthodes de traitement et de mise en œuvre spécifiques. Enfin, les valeurs de perméabilité horizontales *in situ* montrent que le compactage à l'aide d'un rouleau à pieds dameurs peut garantir une bonne interpénétration des couches successives, en évitant les mouvements d'eau aux interfaces.

Tableau 6.
Valeurs de perméabilité mesurées in situ et en laboratoire.
Permeability values, measured in situ and in laboratory.

	Limons non traités	Limon traité		
	28 jours	28 jours	6 mois	1 an
Essais <i>in situ</i>				
Sonde-2 packers		7,7.10 ⁻¹⁰ m/s	2,0.10 ⁻⁹ m/s	8,5.10 ⁻¹⁰ m/s
Tube crépiné	1,5.10 ⁻⁹ m/s	2,8.10 ⁻⁹ m/s	9,4. 10 ⁻⁹ m/s	1,2.10 ⁻⁹ m/s
Infiltromètre	1,0. 10 ⁻⁹ m/s		1,2. 10 ⁻⁹ m/s	
Sur carottes :				
Triaxial (CD)	1,1.10 ⁻⁹ m/s	2,8.10 ⁻⁹ m/s	1,0.10 ⁻⁹ m/s	1,0.10 ⁻⁹ m/s

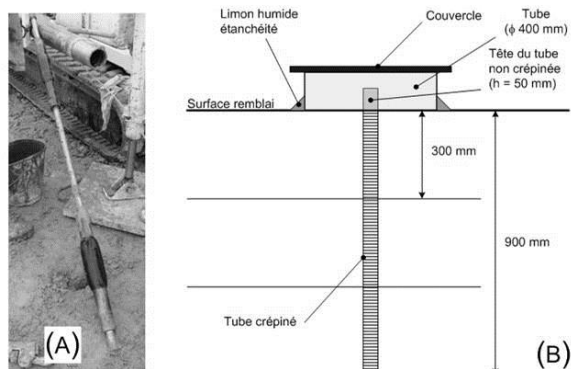


Fig. 7.

Essais Nasberg - Sonde double-packer (A), un tube crépiné (B).
Nasberg tests – Double packed probe (A), perforated pipe (B).

Les études sur l'érosion ont été menées par l'Ifsttar et l'Irstea. L'interprétation des résultats des essais d'érosion de trou (HET) met en évidence une augmentation significative de la contrainte critique avec le traitement à la chaux. Trente jours après la construction, la valeur a été multipliée par 7, passant de 180 Pa environ à plus de 1200 Pa.

La même tendance est observée pour les essais *in situ* au MoJet (Jets mobiles) sur les pentes des digues. La quantité de sol récupéré après le test effectué sur la partie traitée avec un débit de 600 ml/min pendant 15 min est 25 fois plus faible que sur la partie non traitée. La Fig. 8 montre des exemples de l'état des surfaces testées avant et après essai avec le MoJet.

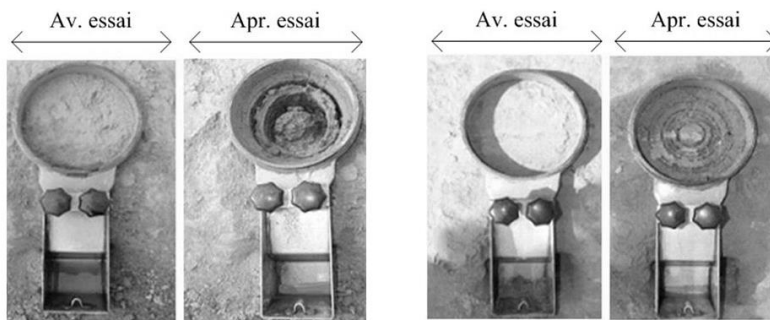


Fig. 8.

À gauche : essais MoJet sur le sol non traité, (débit 0.6 l/min) ; à droite : essai sur le limon traité, protocole modifié (débit 2 l/min)

Left : MoJet test on untreated silty soil (0.6 l/min water flow) ; right : test on lime-treated soil, water flow increased (2 l/min)

3.4. CONCLUSIONS APPORTÉES PAR LES STRUCTURES EXPÉRIMENTALES

Deux digues sèches expérimentales ont été construites en septembre 2011, la première en limon traité à 2,5 % de chaux vive et la seconde en limon naturel non traité selon des procédures spécifiques concernant le malaxage du matériau traité et le compactage.

Cette expérience montre que le traitement à la chaux est une technique qui non seulement améliore les propriétés immédiates pour réutiliser les matériaux limono-argileux humides ou de faibles caractéristiques, mais contribue également à produire des matériaux cohésifs et résistant à l'érosion tout en maintenant des niveaux de perméabilité faibles, offrant des propriétés intéressantes pour une utilisation dans le domaine des structures en terre hydrauliques.

4. LE DOCUMENT D'INFORMATION

Le document d'information intitulé « Utilisation des sols traités à la chaux dans les ouvrages hydrauliques » a pour vocation de présenter de manière synthétique aux professionnels français les principales règles à respecter concernant la fabrication et la mise en œuvre d'un mélange sol-chaux, lorsqu'on envisage son utilisation dans la réalisation d'un ouvrage hydraulique. Ce document traite des petits ouvrages hydrauliques en terre - c'est à dire les digues, petits barrages ou canaux hydrauliques - comportant un mélange sol-chaux compacté et dont la hauteur n'excède pas une dizaine de mètres. Il vient en complément des règles habituelles de conception et de réalisation des ouvrages hydrauliques préconisées par les organismes spécialisés. Sa parution est prévue fin 2014.

Son contenu découle de l'expérience acquise ces dernières années sur les matériaux testés en laboratoire, la démonstration des ouvrages expérimentaux, mais aussi des enseignements des travaux menés dans le cadre du projet DigueElite. Ce projet, mené à l'échelle française, a notamment pour but de proposer un concept de digues résistantes en utilisant la technique du traitement à la chaux.

Il contient des rappels des principes généraux et de l'intérêt du traitement à la chaux dans les chantiers de terrassements routiers, qui sont ses applications « classiques », ses avantages connus se traduisant par une gestion optimisée des matériaux du site et des emprunts, ainsi que la diminution des immobilisations de chantier pour cause d'intempéries, et des coûts des projets.

De manière plus spécifique vis-à-vis des ouvrages hydrauliques, une classification du niveau d'exigence des matériaux traités à la chaux selon la

fonction assurée dans l'ouvrage est proposée. Elle se décline en 3 niveaux, de sévérité accrue selon la fonction à pourvoir ou la sollicitation. Le niveau 1 correspond au cas le plus simple pour lequel le composant doit au minimum avoir une stabilité mécanique sous poids propre. Le niveau 2 est relatif aux ouvrages de stockage ou de rétention d'eau, pour lesquels l'étanchéité et la résistance à l'érosion interne sont des critères essentiels, et le niveau 3 vise les ouvrages qui doivent faire obstacle à la venue d'eau (barrage écrêteur de crue ou digue de protection). La résistance à l'érosion est alors primordiale : résistance à l'érosion interne, mais également résistance à l'érosion par affouillement, et résistance à l'érosion de surface, à la surverse (digue fluviale) ou au déferlement de vagues (digue maritime). Ce cas intègre les ouvrages d'évacuation.

Dans le cas des exigences de niveaux 2 et 3, la mise en œuvre du composant sol-chaux demande l'application d'une technique de terrassement plus contraignante que pour le niveau 1, car l'homogénéité des matériaux compactés devient une exigence supplémentaire, visant à assurer la réduction du risque d'écoulements localisés, à la fois dans la masse (érosion interne) ou en surface (érosion de surface, surverse et déferlement). Le comportement des matériaux traités à la chaux face à ces derniers aléas fait à présent l'objet de recherches en France et dans d'autres pays, et des solutions opérationnelles sont attendues à court terme.

Le document d'information présente également de manière synthétique, les principales règles à suivre pour la reconnaissance des emprunts, les études de traitement à la chaux en laboratoire et la réalisation des travaux, et ce en faisant référence à la codification française déjà existante dans le domaine des infrastructures routières ou ferroviaires et en développant le contenu, la progressivité et la nature des essais, le détail des équipements, en regard des exigences décrites dans les niveaux 1 à 3.

Enfin, un retour d'expérience est illustré via l'établissement d'une liste d'ouvrages hydrauliques existants à travers le monde, pour lesquels il a été fait appel dans le passé à la mise en œuvre de sols traités à la chaux.

DigueELITE

UTILISATION DES SOLS TRAITÉS À LA CHAUX
DANS LES OUVRAGES HYDRAULIQUES

Document d'information



Version du 30 juin 2014

5. LE BULLETIN « STD» DU CIGB

Le CFBR a pris l'initiative de soumettre, lors de la 82^e réunion annuelle de la CIGB qui s'est tenue à Bali (juin 2014), le document d'information français au nouveau Comité « CMD» (Cemented Materials for Dams) mis en place lors de la précédente réunion du CIGB à Seattle en août 2013.

Le Comité a reconnu l'intérêt d'un bulletin spécifique sur le traitement des sols. Il a en effet été considéré qu'à l'instar d'autres techniques maintenant établies telles que le « RCC» (Rolled Compacted Concrete - Béton Compacté au Rouleau) et le « CSG» (Cemented Sand Gravel - Sable et Grave Cimentés), qui ont découlé de l'application du ciment dans le domaine routier, la connaissance des techniques de traitement des sols dans les terrassements justifiait que les sols traités (à la chaux, ou à la chaux et au ciment) puissent occuper une place représentative dans la gamme des matériaux de construction pour ouvrages hydrauliques.

Partant de ce constat, le Comité a pris la décision de préparer 3 bulletins différents : un sur le « CSG », un sur le « STD » (Soil Treated Dam – Barrage en Sol Traité), et un sur le « Rock Filled Concrete », le « Colcrete » et les barrages en maçonnerie. Ces 3 bulletins s'inspireront de documents et expériences antérieures décrivant l'usage des matériaux, notamment des sols traités à la chaux dans le contexte des ouvrages hydrauliques pour le STD, et auront la même structure générale :

- Concepts généraux et résumé
- Matériaux
- Conception des barrages
- Construction des barrages
- Contrôle de la qualité et supervision des travaux

Au cours de sa réunion, le CMD a entériné les actions suivantes :

La préparation du bulletin STD sera pilotée par la France, sur la base rédactionnelle du document d'information français, qui sera étendu de la manière la plus exhaustive possible :

- Une veille de la littérature et des informations sur les ouvrages existants sera menée en France et dans les autres pays ; à cet effet, il sera fait usage du questionnaire d'enquête établi par le Comité,
- La base de données devra être enrichie avec les résultats des programmes de recherche en cours et les performances mesurées sur les sols traités.

L'objectif est que le Groupe Miroir Français puisse proposer une première version suffisamment aboutie lors du Congrès CIGB de Stavanger, en juin 2015.

RÉFÉRENCES

- [1] SOCIETE DE SAVANTS. Définition of « Corroi argileux » in *Encyclopédie des Gens du Monde, Paris, Librairie de Treuttel et Würtz, 1836, Tome 7.*
- [2] PERRY J.P. Lime treatment of dams constructed with dispersive clay soil. *Transactions of the ASAE.* 1997, 20:1093-1099.
- [3] ANCOLD *Bulletin of the Australian National Committee On Large Dams,* 1978, 51.
- [4] GUTSCHICK K.A. Lime stabilization under hydraulic conditions. *4th lime congress* Hershey (PA), 1978, pp 1-20.
- [5] GUTSCHICK K.A. Canal lining stabilization proves successful. *Pit & Quarry, 1985, pp.58-60.*
- [6] KNODEL P.C. Lime in canal and dam stabilization. *US Bureau of Reclamation, Report No GR-87-10, 1987, 21 p.*
- [7] FLEMING R.L., SILLS G.L., STEWART E.S. Lime stabilization of levee

- slopes. *2nd interagency symposium on stabilisation of soils and other materials*. 1992, Metairie, Louisiana pp. 79-87.
- [8] USBR, U.S. Bureau of Reclamation. *Earth Manual*. 1998, Denver CO : 349p.
- [9] STAPLEDON D., MACGREGOR P., BELL G., FELL R. *Geotechnical Engineering of Dams*, 2005, Taylor & Francis Eds.
- [10] US ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Alton to Gale Organized Levee Districts, Illinois and Missouri (Continuing, Deficiency Corrections)*, 2010
- [11] GARVER L.L. Canal repair techniques using lime-stabilized soil, *Lime for Environmental Uses, ASTM STP 391, 1987*, K.A. Gutschick ED., Philadelphia : pp 115-120.
- [12] Howard A.K., Bara J. P. Lime Stabilization on Friant-Kern Canal, *U.S. Bureau of Reclamation, Report No. REC-ERC-76-20*, 1976, Denver CO : 53 p.
- [13] Degoutte G., Royet P. Construction des petits barrages en terres, CCTG (Cahier des Clauses Techniques Générales), 1993, Cemagref Eds.
- [14] Kouassi P., Comportement des sols fins compactés : application aux remblais et aux ouvrages en terre, *Thèse de Doctorat*, 1998, Université de Bordeaux.
- [15] HERRIER G., CHEVALIER C., FROUMENTIN M., CUISINIER O., BONELLI S., FRY J.-J. Lime treated soils as an erosion-resistant material for hydraulic earthen structures. *6th International Conference on Scour and Erosion*, 2012, Paris, pp.161-168.
- [16] Haghighi I., Chevalier C., Reiffsteck P. An Enhanced Crumb Test for a better characterization of water effects on soils. *6th International Conference on Scour and Erosion*, 2012, Paris, pp.1049-1056.
- [17] HERRIER G., BONELLI, S. Internal erosion resistance of soils treated with lime : an evolutive benefit. *7th International Conference on Scour and Erosion*, 2014, Perth. To be published
- [18] BONELLI, S. (Ed). *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*. 2013 London & Hoboken: ISTE-Wiley
- [19] HENENSAL P., DUCHATEL F. L'érodimètre à jets mobiles, *Bull. Lab. Ponts et Chaussées*, 1990, 167 : pp.47-53.
- [20] CHEVALIER C., HAGHIGHI I., HERRIER G. Resistance to erosion of lime treated soils: a complete parametric study in laboratory. *6th International Conference on Scour and Erosion*, 2012, Paris 1065-1072.
- [21] EN ISO 22476-4 Standard. Geotechnical investigation and testing — Field testing Part 4: Ménard pressuremeter test. 2012

RÉSUMÉ

La technique du traitement des sols à la chaux pour la réalisation des infrastructures a fait des progrès considérables ces cinquante dernières années et s'est largement répandue dans de nombreux pays sur tous les continents. Ce succès s'explique par les nombreux avantages qu'elle présente : valorisation des matériaux (avec tous les avantages environnementaux qui en découlent), réduction des délais et des coûts de construction, etc. Toutefois, le milieu des

ouvrages hydrauliques s'est montré prudent vis-à-vis de la technique au début de son développement. La rusticité de la technologie de mise en œuvre de l'époque, la maîtrise approximative de la qualité, une certaine méconnaissance des performances à long terme ne répondaient pas aux exigences qui caractérisent ce domaine. Cinquante ans après, les progrès réalisés, sur le plan de la technologie, de la méthodologie de mise en œuvre, de la connaissance des interactions sol-chaux et du comportement à long terme, justifient que l'on s'intéresse au traitement des sols à la chaux. En outre, des études récentes, aussi bien en laboratoire qu'en vraie grandeur, ont mis en évidence des propriétés tout à fait intéressantes concernant notamment la perméabilité, la résistance à l'érosion et la stabilité. Il existe aussi des références d'ouvrages hydrauliques en service qui témoignent de la fiabilité de la technique.

C'est pourquoi il semble utile et opportun de faire évoluer les positions relatives à la technique du traitement des sols à la chaux appliquée aux ouvrages hydrauliques en s'inspirant des acquis dans les autres domaines d'application (routes, voies ferrées, aéroports, etc.), sans perdre de vue les exigences propres au domaine de l'hydraulique.

Les perspectives d'application sont multiples dans le domaine des ouvrages de hauteur faible à moyenne situés dans des sites dépourvus de matériaux de bonne qualité où la valorisation de sols naturels locaux prend tout son sens, à la fois technique et économique. Sur le plan économique, à titre indicatif, le prix d'un m³ de sol traité à 2 % de chaux vive dans le contexte européen comprenant extraction, traitement, transport et mise en œuvre varie entre 15 et 25 € hors taxe selon le volume concerné. Cette évaluation n'intègre pas l'économie réalisée grâce à la réduction des délais d'exécution. En outre, la chaux, comme le ciment, produite sur place ou importée, est présente dans la quasi-totalité des pays, car le produit est indispensable à l'activité économique (construction, industrie, environnement, agriculture, etc.).

Sur le plan technique, il y aura lieu d'évoquer l'amélioration de la tenue des ouvrages aux sollicitations diverses (stabilité mécanique, dispersion, érosion interne et externe, etc.). On peut citer pêle-mêle :

- le réutilisation des argiles très plastiques en fondation de digue ou de barrage, grâce à l'absence de tassements différentiels, de fluage et à l'amélioration de leur stabilité ;
- les remblais homogènes en zones arides, grâce à la réduction du retrait-gonflement, l'amélioration de la maniabilité et le contrôle de la mise en œuvre ;
- la construction de digues futures ou le renforcement de digues existantes, de façon à les rendre résistantes au déversement.

SUMMARY

The technique of soil treatment with lime for the construction of infrastructure has made considerable advances over the past fifty years, and has become widespread in many countries on all continents. This success is due to the many advantages it offers: materials valorization (with all the attendant environmental benefits), time and cost of construction reduction, etc. However, the hydraulic works community was cautious regarding a technique early in its development. The rustic character of past treatment technologies, the approximate quality control, a ignorance for long-term performance does not meet the requirements that characterize this application field. Fifty years later, advances in terms of technology, methodology, implementation, knowledge of soil-lime interactions and long-term behavior, justify the interest in soil treatment with lime. In addition, recent studies in both laboratory and full-scale, showed properties quite interesting about the permeability, resistance to erosion and stability. There are also references to hydraulic structures service that demonstrate the reliability of the technique.

Therefore it seems useful and advisable to develop positions on soil treatment with lime technique, applied to hydraulic structures, and inspired by the achievements in other application areas (roads, railways, airports, etc.), keeping in mind the specific requirements of earthen hydraulic structures.

Prospects for applications are multiple, in the field of low to medium height structures, located in sites without availability of quality materials, and where the valorization of local natural soils makes sense, both on technical and economic point of view. Economically, for information, the price of a m³ of soil treated with 2% lime in the European context, including extraction, processing, transportation and implementation varies between 15 and 25 € excluding tax based on volume concerned. This assessment does not include the savings from reduced operating times. In addition, lime, like cement, produced locally or imported, is present in almost all countries, because the product is essential to economic activity (construction, industry, environment, agriculture, etc.).

Technically, the perspectives for use are the improvement of the behavior of the structures versus stresses (mechanical stability, dispersivity, internal and external erosion, etc.). One can foresee:

- reuse of heavy clays for levee or dam foundation, thanks to the absence of differential settlement, creep and the stability;
- homogeneous embankments in lime-treated soils for warm and dry countries, thanks to the reduction of shrinkage cracks, the improved workability and control of materials preparation and placement ;
- construction of future or current levees, in order to make them overflow-resistant.