

# Un ouvrage hydraulique en vraie grandeur en sol traité à la chaux

Isabelle Charles<sup>1</sup>, Gontran Herrier<sup>2</sup>, Daniel Puiatti<sup>3</sup>,  
Christophe Chevalier<sup>4</sup>, Edouard Durand<sup>5</sup>  
<sup>1</sup>CETE Normandie Centre / CER, Le Grand Quevilly (France),

isabelle.charles@developpement-durable.gouv.fr

<sup>2</sup>Lhoist Recherche et Développement, Nivelles (Belgique), gontran.herrier@lhoist.com

<sup>3</sup>DPST Consulting; Villemomble (France), daniel.puiatti@dpst-consulting.com

<sup>4</sup>Université Paris-Est, IFSTTAR, Marne-la-Vallée (France), christophe.chevalier@ifsttar.fr

<sup>5</sup>CETE Normandie Centre / LRB, Blois (France),

edouard.durand@developpement-durable.gouv.fr



## 1. INTRODUCTION

L'application de la technique du traitement des sols à la chaux dans la réalisation des ouvrages hydrauliques (digues, canaux, levées, barrages,...) est assez méconnue à travers le monde, et particulièrement en Europe. Néanmoins, une série d'avantages inhérents aux matériaux limono-argileux traités à la chaux méritent d'être mis en lumière et exploités :

- amélioration de la maniabilité et de la mise en place des matériaux ;
- augmentation de la cohésion et de la stabilité des ouvrages, à la fois sous poids propre et face aux sollicitations mécaniques ;
- conservation des faibles niveaux de perméabilité des matériaux originels ;
- accroissement de la résistance à l'érosion.

Cependant, l'obtention de ces deux dernières spécificités nécessite une procédure adaptée pour le traitement des matériaux, combinant :

- une teneur en eau des matériaux traités au-delà de l'humidité OPN (teneur en eau à l'Optimum Proctor)
- un compactage par pétrissage (compacteur à pieds de mouton).

Dans le but de valider la faisabilité de la procédure à l'échelle industrielle et les propriétés finales du matériau et des ouvrages ainsi réalisés, et de quantifier l'apport du traitement sur les propriétés d'un matériau limono-argileux en contexte hydraulique, une phase d'expérimentation en vraie grandeur a été initiée en septembre 2011 sur le site du CER (Centre d'Expérimentation et de Recherche) à Rouen (France). Cet institut, appartenant au réseau scientifique et technique du Ministère français du développement durable, est en effet spécialisé dans la réalisation et l'instrumentation d'ouvrages expérimentaux à l'échelle 1.

## 2. APPLICATION DE LA SOLUTION SOL-CHAUX

Environ 1000 tonnes de sol limoneux provenant de Marche-les-Dames (Belgique) ont été utilisées pour la construction de 2 digues sèches expérimentales. Les caractéristiques géotechniques de ce sol sont présentées ci-après. Le « Crumb-test » (norme ASTM D 6572-06) a mis en évidence son caractère a priori inadapté pour une utilisation en ouvrage hydraulique.

Fraction argileuse (<2 µm) (%)	Fraction silteuse (2 à 50 µm) (%)	Passant à 80 µm (%)	Valeur de bleu de méthylène (g/100 g)	Indice de plasticité (%)	Teneur en eau à l'échantillonnage (%)
12	82	99,5	2,50	7 à 8	17,9

A l'issue de l'étude en laboratoire, les conditions de traitement ont été définies comme suit : un traitement à 2,5 % de chaux vive Proviacal® DD et une humidité finale des matériaux traités visée à 19,4 %, soit 1,6 % au-delà de l'humidité à l'OPN (Optimum Proctor Normal). La densité sèche ciblée après compactage est établie à 95 % de la densité OPN, c'est-à-dire 1,64 kg/dm<sup>3</sup>. La production du matériau traité de manière homogène et régulière a été réalisée grâce à un traitement dans une centrale de malaxage mobile à grande homogénéité. Le sol ainsi traité a été mis en place et compacté en 6 passes de compacteur à pieds dameurs. Les dimensions de la digue 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. La hauteur finale de la structure est de 1,8 m avec des talus de pentes différentes, 3/2 et 2/1 (horizontal/vertical), obtenus par taillage après le compactage de l'ensemble des couches. La digue est virtuellement divisée en 3 sections de 5 m de long, correspondant à trois campagnes d'essais successives à 28 jours, 180 jours et 1 an après la construction.

Une seconde digue sèche plus petite a été érigée en employant le limon non-traité. Sa hauteur totale est de 0,9 m (3 couches), sur une longueur de 10 m et une largeur de 2 m. Le profil en travers est également asymétrique et présente les mêmes coefficients de pente que l'ouvrage en sol traité.

## 3. IMPORTANCE DE LA PROCEDURE ET DES EQUIPEMENTS

La question de l'homogénéité d'un sol traité est toujours soulevée lors d'une application pour les ouvrages hydrauliques. En effet, ce paramètre est étroitement lié au gradient de perméabilité. La question est cruciale, car un gradient de perméabilité imprévu peut entraîner des flux localisés anormaux, potentiellement menaçants pour l'intégrité de l'ouvrage.

L'utilisation d'une centrale de malaxage spécialement sélectionnée pour sa maîtrise du dosage en chaux et son addition contrôlée en eau, permet de respecter cette exigence ; elle permet en outre la production d'un matériau possédant une mouture très fine (de l'ordre de 0/20 à la sortie). Un total de 118 mesures de teneur en eau sur le matériau mis en œuvre confirme une valeur moyenne de 19,4 %, avec un écart-type très faible de 0,7 % (en valeur absolue). Des vérifications par gammadensimètre à profondeur variable ont montré que la densité sèche atteint en moyenne 96,7 % de la densité OPN (1,73 kg/dm<sup>3</sup>), avec un écart-type de 1,1 % en valeur absolue (sur un total de 42 mesures). La densité minimale enregistrée est de 94,0 %. L'homogénéité a été confirmée à partir des valeurs de densité recueillies sur l'intégralité de la hauteur de la digue en limon traité, dont la moyenne atteint 97,0 % (méthode GDS 200). La plus petite digue en limon non traité a été mise en œuvre à une teneur en eau moyenne de 17,0 %, correspondant à un niveau d'humidité OPN + 2,5 %. La densité moyenne après compactage a été évaluée à 96,7 % de la valeur à l'OPN (1,82 kg/dm<sup>3</sup>).



*Production du matériau traité en centrale mobile et compactage par pétrissage (pieds dameurs)*

#### 4. EFFET DU TRAITEMENT A LA CHAUX SUR LES PROPRIETES MECANIQUES

Dès la construction, un relevé des propriétés mécaniques des structures a été effectué. Ainsi, l'évolution de la capacité portante, de la résistance de pointe, des modules pressiométriques et dilatométriques a pu mettre en évidence l'apport de la chaux en termes de propriétés mécaniques du matériau. Des essais triaxiaux en laboratoire ont également été effectués sur échantillons carottés pour mettre en évidence l'évolution des paramètres de cohésion et résistance au cisaillement.

				Digue en limon non traité	Digue en limon traité à la chaux			
Type d'essai		Unité		A la construction	28 jours	180 jours	1 an	
Essais sur site	Aiguille IPI	%	11	20				
	Minidynaplaque	MPa	9 à 26	35	250		280	
	Pressiomètre	Pf*	MPa	0,15		2,53	2,51	
		Pt*	MPa	0,25 à 0,36		3,77	4,23	±6
		$E_M$	MPa	1,6 à 2		38,6	52,7	±80
		$E_M/Pt^*$		5,5 à 6,5		10,2	12,5	±13
	Dilatomètre	Module de Young cyclique E	MPa				400 à 480	
Module dilatométrique G		MPa				50 à 90		
Essais en laboratoire	Triaxial (CD)	Cohésion (palier)	kPa	0 (par convention)	41 (à 75 jours)	61 (à 195 jours)	75	
		Angle de frottement (palier)	Deg.	35	39	39	39	
		Module sécant en petites déformations	GPa			0,7 à 1		1,16 à 1,43

#### 5. MESURES DE PERMEABILITE

Les études de laboratoire antérieures ont montré l'importance de la procédure spécifique de mise en œuvre du matériau traité. Le compactage par pieds dameurs du matériau à la teneur en eau élevée (état h selon le GTR) permet d'atteindre des niveaux de perméabilité du même ordre de grandeur que celui des sols naturels compactés. Afin de vérifier les niveaux de perméabilité des ouvrages réalisés à l'échelle 1, ceux-ci ont été évalués à la fois par des mesures sur site (à charge constante et variable) et au moyen d'essais triaxiaux sur carottes prélevées depuis la crête des ouvrages.

Type d'essai		Unité	Digue en limon non traité	Digue en limon traité à la chaux		
				28 jours	180 jours	1 an
Sur site	Lefranc (charge constante)	m/s	-	$0,8 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$8,5 \cdot 10^{-9}$
	Nasberg (charge variable)	m/s	$3 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	-	-
En laboratoire	Triaxial CD	m/s	$1 \cdot 10^{-9}$	$10^{-9}$ à $10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$

## 6. EFFETS DU TRAITEMENT SUR LA RESISTANCE A L'EROSION (INTERNE ET EXTERNE)

L'amélioration de la résistance à l'érosion du matériau a été quantifiée par les essais in situ d'érodimètre à jets mobiles (MoJET), et d'érosion de conduit (HET, érosion de trou) effectués en laboratoire sur échantillons carottés. Pour ce dernier essai, et ce, dès 28 jours d'âge, l'érosion n'a pu être initiée sur le matériau traité sous une pression de 120 kPa maintenue durant 15 minutes. Les photographies permettent d'avoir un aperçu significatif du gain apporté par le traitement en termes d'érosion externe.



*Aspect des talus après les essais d'érosion externe : talus non traité (à gauche) et traité à la chaux (à droite, conditions d'essai plus sévères).*

## 7. CONCLUSIONS

Ces deux digues expérimentales, réalisées en limon naturel et traitées à la chaux vive, ont mis en lumière les avantages de ce procédé pour la construction et l'entretien des ouvrages hydrauliques en terre :

- les étapes de construction sont facilitées par l'amélioration de la maniabilité et de la mise en place des matériaux
- l'utilisation d'une centrale de traitement mobile spécialement sélectionnée permet de garantir la production d'un matériau homogène, tant en teneur en chaux qu'en humidité ;
- si la procédure de mise en œuvre spécifique est suivie, c'est-à-dire le compactage par pétrissage des matériaux traités à la chaux portés à leur niveau d'humidité  $h$ , des perméabilités équivalentes à celles des matériaux naturels compactés peuvent être atteintes ;
- un gain important apporté par le traitement, en termes de stabilité et de performance, démontré par les mesures des propriétés mécaniques ;
- un accroissement extrêmement important de la résistance à l'érosion.

Cette réalisation permet d'apprécier le traitement à base de chaux dans un contexte hydraulique, et en fait une technique prometteuse pour la construction et l'entretien d'ouvrages hydrauliques en terre (digues, levées, canaux, barrages,...).