

DIGUES EXPERIMENTALES DU CER DE ROUEN EN SOL LIMONEUX TRAITÉ À LA CHAUX ET NON TRAITÉ : EVALUATION APRES 7 ANS

EXPERIMENTAL DIKES IN SILTY SOIL TREATED WITH QUICKLIME AND UNTREATED: EVALUATION AFTER 7 YEARS

Lucile SAUSSAYE¹, Geetandjali DAS^{2,3}, Andry RAZAKAMANANTSOA², Erwann RAYSSAC², Dimitri DENELE², Christophe CHEVALIER², Louis BATTIST², Gontran HERRIER³, Didier LESUEUR³, Nicolas PONCELET⁴, Delphine JACQUELINE¹, Michel Froumentin¹, Cindy MAISONNAVE¹, Edouard DURAND¹, Harifidy RANAIVOMANANA⁵

¹ Cerema, Blois, Le Grand-Quevilly, Aix-en-Provence, France

² Université Gustave Eiffel/GERS, Nantes, Marne-la-Vallée, France

³ LHOIST Recherche et Développement, Nivelles, Belgique

⁴ Université Libre de Bruxelles/Building, Architecture and Town Planning Dept (BATir)/Laboratoire de GéoMécanique, Bruxelles, Belgique

⁵ IUT de St-Nazaire/Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), St-Nazaire, France

RÉSUMÉ – En septembre 2011, deux digues expérimentales ont été construites sur le site du CER de Rouen. L'une a été construite en utilisant un sol limoneux de classe GTR A1, la seconde est constituée du même limon traité à 2,5% de chaux vive. Le présent article fait état de la méthodologie déployée pour l'évaluation des caractéristiques des matériaux 7 ans après la construction, en environnement réel, y compris les difficultés rencontrées pour procéder à cette évaluation.

ABSTRACT—In September 2011, two experimental dikes were built on the CER platform in Rouen. The first one was built with a silty soil, the second was made of the same silt treated with 2.5% of quicklime. This paper describes the methodology used to evaluate the characteristics of the constitutive materials 7 years after the construction jobsite, in the real environment, including the difficulties encountered in this evaluation.

1. Introduction

Du 26 septembre au 4 octobre 2011, sur le site du Centre d'Expérimentation et de Recherche (CER) de Rouen, deux digues expérimentales ont été construites dans le cadre du projet "Digues et Ouvrages Fluviaux : Erosion, Affouillements et Séismes", DOFEAS, en partenariat avec Lhoist. L'une est construite en sol limoneux (de classe GTR A1), la seconde est constituée du même sol traité à 2,5% de chaux vive, compacté du côté humide de l'optimum Proctor normal (OPN). L'objectif pour Lhoist est de développer le traitement des sols à la chaux aux ouvrages hydrauliques (digues, canaux...) et de vérifier, en vraie grandeur, les résultats de laboratoire acquis au cours de programmes de recherche antérieurs. Il s'agit notamment de travailler sur l'homogénéité du traitement à la chaux d'un sol fin et sur la perméabilité du matériau ainsi traité et compacté. Les deux digues sont sèches et ne sont pas sollicitées hydrauliquement. L'évolution des caractéristiques mécaniques, hydrauliques et de tenue à l'érosion des ouvrages en fonction du temps est suivie pendant 2 ans dans le cadre du projet DOFEAS.

Le présent article fait état de la méthodologie déployée en 2018 pour l'évaluation des caractéristiques des matériaux laissés dans leur environnement réel durant 7 ans, à l'occasion de la déconstruction des 2 ouvrages. Il permet de faire état des difficultés rencontrées lors de la réalisation des prélèvements in situ puis du façonnage des

éprouvettes en laboratoire. Cette déconstruction entre dans le cadre du projet "Enhanced Geotechnical Investigation and DEsign for sustainable development", EGIDE.

2. Description des digues construites en 2011

Le sol limoneux utilisé provient de la carrière Lhoist de Marche-les-Dames (Belgique). Il est de classe A1 selon la norme NF P11-300 (CETE Normandie-Centre, 2012 ; Charles *et al.*, 2013a). La chaux vive est de type Proviacal®DD. 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 (mouture 0/20 mm). Le sol traité a été compacté avec un compacteur à pieds dameurs VP5. La mise en œuvre des deux ouvrages a fait l'objet d'un contrôle régulier de teneur en eau, densité, épaisseur des couches, etc.

La digue en limon non traité (Figure 1) a un profil en travers asymétrique (pentes de 3H/2V et 2H/1V). Sa longueur est égale à 10,00 m en crête et 13,60 m à la base, sa largeur à 2,00 m en crête et 5,60 m à la base, sa hauteur à 0,90 m. Les mesures réalisées au cours du montage de la digue montrent une teneur en eau moyenne de 17,0% (+2,4% par rapport à la teneur en eau optimale w_{OPN}) et une masse volumique apparente sèche moyenne de 1,76 t/m³ (taux de compactage moyen supérieur à 96,8% ρ_{dOPN}).

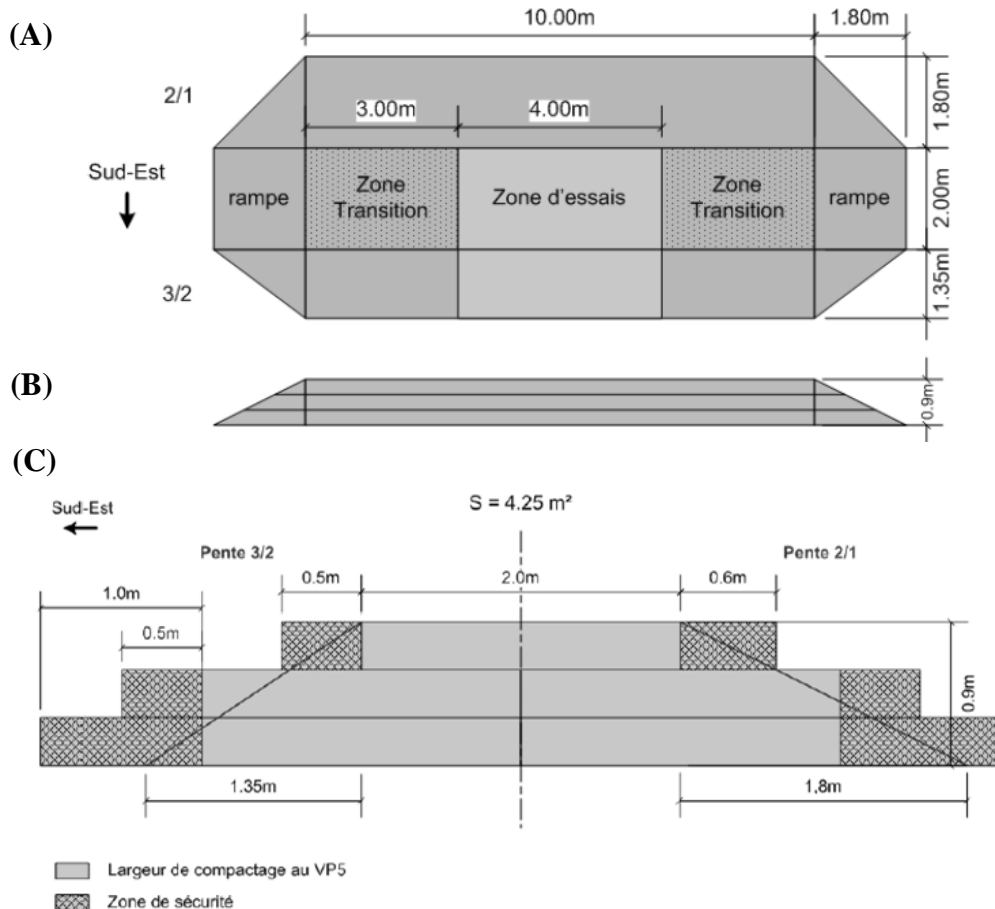


Figure 1. Schéma de la digue en limon non traité : (A) vue du dessus, (B) coupe longitudinale et (C) coupe transversale.

La digue en sol limoneux traité à la chaux (Figure 2) a également un profil en travers asymétrique (pentes de 3H/2V et 2H/1V). Sa longueur est égale à 21,00 m en crête et 28,20 m à la base, sa largeur à 4,00 m en crête et 10,30 m à la base, sa hauteur à 1,80 m. Les mesures réalisées au cours du montage de la digue montrent une teneur en

eau moyenne de 19,4% ($w_{OPN}+1,9\%$) et une masse volumique apparente sèche moyenne de $1,67 \text{ t/m}^3$ (taux de compactage moyen supérieur à 96,7% ρ_{dOPN}).

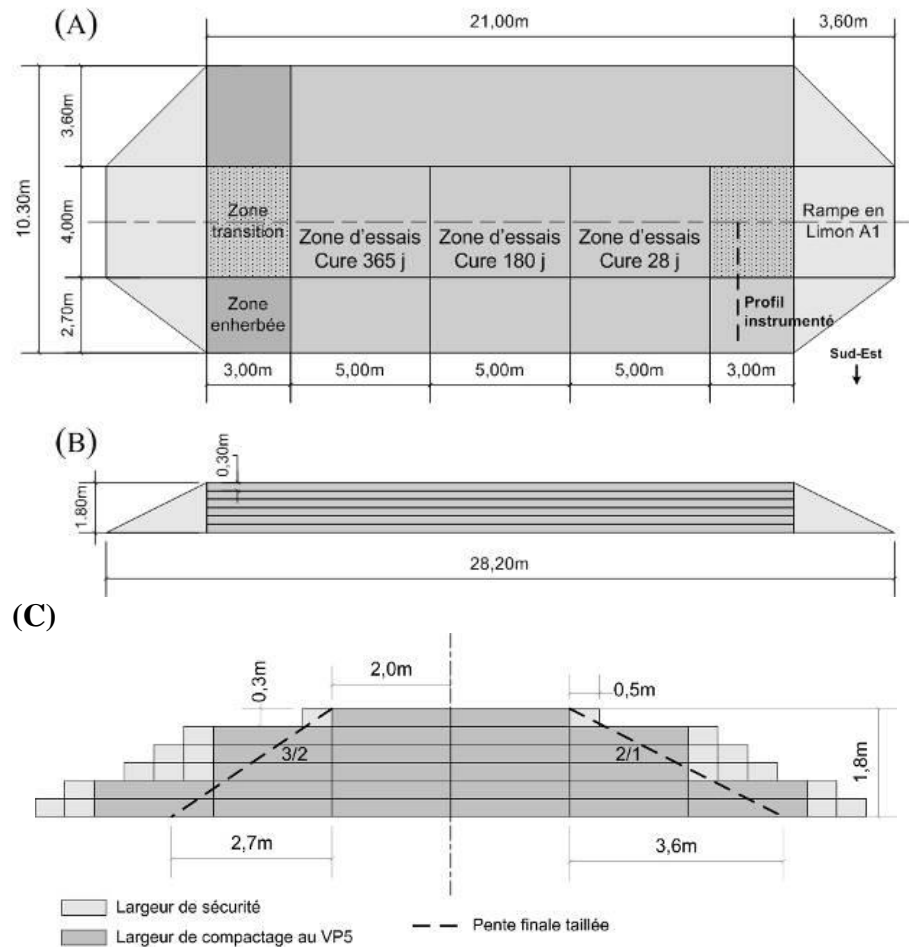


Figure 2. Schéma de la digue en limon traité : (A) vue du dessus, (B) coupe longitudinale et (C) coupe transversale.

Lors de la préparation du matériau traité à la chaux, le stock de sol limoneux A1 s'est malheureusement trouvé mélangé avec des silex présents sur le site du CER (sol support du stock), par inadvertance, conduisant à des difficultés de prélèvement ultérieures.

3. Suivi initial des digues

Le suivi opéré dans le cadre du projet DOFEAS a permis de mettre en lumière les avantages du traitement à la chaux en centrale et du compactage par pétrissage, à l'état hydrique humide, pour la construction et l'entretien des ouvrages hydrauliques en terre (Charles *et al.*, 2013b ; Charles *et al.*, 2015) :

- les étapes de construction sont facilitées par l'amélioration de la maniabilité des matériaux ;
- l'homogénéité du matériau traité à la chaux à travers les mesures de densité et de teneur en eau pendant la mise en œuvre ;
- si la procédure de mise en œuvre spécifique est suivie, des perméabilités équivalentes à celles des matériaux naturels compactés peuvent être atteintes (environ 1.10^{-9} m/s) ;
- un gain important de cohésion et de stabilité, démontré par les mesures des propriétés mécaniques ;

- un fort accroissement de la résistance à l'érosion interne et de surface (essais Hole Erosion Test HET et Mobile Jets Erosion Test MoJET).

4. Première phase de déconstruction des digues en 2018 : méthodologie de prélèvement

Les 3 et 4 octobre 2018, la déconstruction des deux digues expérimentales a été l'occasion d'effectuer des prélèvements de matériaux au niveau des talus des deux digues, afin d'évaluer leurs caractéristiques physiques, mécaniques, hydrauliques et microstructurales. Les objectifs sont d'évaluer l'homogénéité des matériaux, de comparer le comportement global des ouvrages, de mesurer les propriétés des matériaux à long terme, y compris la perméabilité. La Figure 3 permet de visualiser les deux ouvrages en terre juste avant leur déconstruction.



Figure 3. (a) Digue en sol limoneux non traité avant déconstruction et (b) talus 2/1 de la digue en sol limoneux traité à la chaux avant déconstruction (après décapage de la terre végétale sur partie centrale du talus).

4.1. Digue en sol limoneux non traité

4.1.1. Prélèvement de blocs de matériau

Les étapes de déconstruction de la digue en sol limoneux non traité sont les suivantes :

- décapage de la terre végétale ;
- tentatives de récupération d'échantillons intacts (matériau mécaniquement peu résistant, peu cohésif) :
 - ✓ à la pelle mécanique : non concluant ;
 - ✓ par fonçage de trousse coupante métallique : non concluant ;
 - ✓ par fonçage de tube PVC (Figure 4a) : non concluant ;
- récupération d'échantillons intacts par découpe manuelle (truelle, pelle) ;
- emballage de blocs sous film plastique.

Les objectifs d'un prélèvement d'échantillons intacts sont de caractériser les performances mécaniques et hydrauliques du limon non traité après 7 ans en place. Toutefois, les blocs sont extrêmement fragiles, par manque de cohésion, donc inadaptés à la réalisation d'essais de caractérisations mécaniques et hydrauliques.

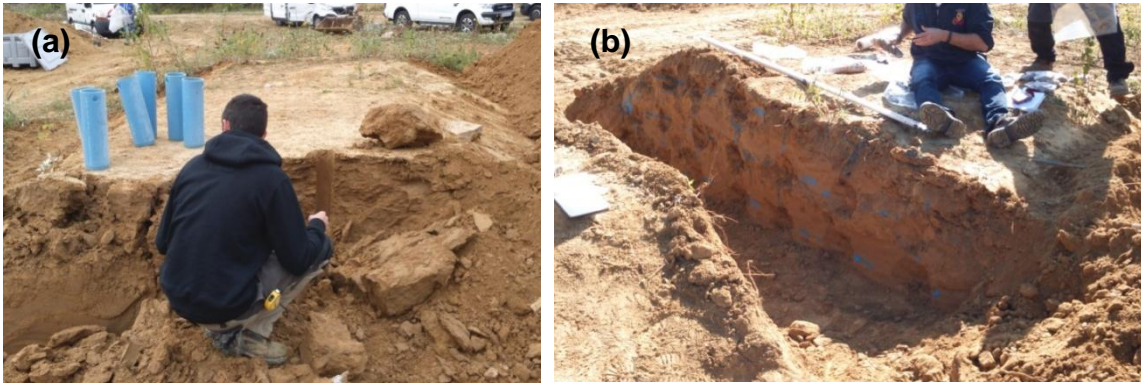


Figure 4. (a) Tentative de récupération d'échantillon intact par fonçage de tube PVC et (b) échantillonnage sur un profil en travers de la digue en sol limoneux non traité.

4.1.2. Prélèvement d'échantillons remaniés

En complément du prélèvement d'échantillons intacts, un profil en travers de la digue a fait l'objet d'un plan de récupération d'échantillons remaniés pour la caractérisation physico-chimique du sol limoneux (Figure 4b). L'espacement des prélèvements est de 30 cm sur la hauteur et de 50 cm sur la largeur complète de la digue, talus et remblai. L'objectif est de vérifier l'homogénéité du limon au sein de l'ouvrage et de comparer les valeurs des paramètres mesurés par rapport aux valeurs enregistrées lors de la construction.

4.2. Digue en sol limoneux traité à la chaux

4.2.1. Prélèvement de blocs de matériau

Les étapes de déconstruction de la digue en sol limoneux traité à la chaux sont les suivantes :

- décapage de la terre végétale sur les talus ouest puis est de la digue ;
- tentatives de récupération de blocs (matériau résistant mais fragile) :
 - ✓ découpage à la tronçonneuse : non concluant (Figure 5a) ;
 - ✓ tranchée au godet à dents de 30 cm, depuis la crête du remblai : non concluant ; pas de possibilité d'ouvrir au-delà du talus vers le cœur du remblai en raison de la puissance et de la longueur de bras de la pelle mécanique utilisée, qui intervient depuis la crête de digue ;
 - ✓ élargissement de la tranchée pour pouvoir travailler transversalement à la pente du talus avec la tronçonneuse ou la disqueuse (Figure 5b) : découpe possible mais fissuration interne probable du bloc découpé ;
 - ✓ 2 tranchées de 30 cm de large espacées de 50 cm (Figure 5c) : concluant pour récupérer des blocs au niveau de la pente du talus ; plus compliqué pour récupérer des blocs au niveau du talus en approchant le cœur du remblai ; les couches du remblai ne sont pas ou peu distinctes ;
 - ✓ perforateur perpendiculairement à la pente du talus (perforations verticales de 35 cm environ depuis la surface) entre deux tranchées de 30 cm de large, depuis le haut de la couche, et intervention du Manitou à la base de la couche pour le soulèvement du bloc (Figure 5d) : dégagement possible mais fissuration interne probable du bloc ; ne fonctionne que pour les blocs en base de remblai ;
 - ✓ 2 tranchées de 30 cm de large espacées de 50 cm, puis éperon de sol traité tronçonné verticalement du haut de la première couche de 30 cm vers la base,

puis intervention de la pelle à la base : dégagement possible ; ensuite dégagement des blocs couches par couche à la pelle y compris en approchant le cœur du remblai ;

- récupération et emballage de blocs sur les talus est et ouest ;
- récupération de sol traité remanié (friable).

Les objectifs d'un prélèvement d'échantillons intacts sont de caractériser les performances mécaniques et hydrauliques du limon traité à la chaux après 7 ans en place et de déterminer leur évolution depuis les premières années de suivi. Toutefois, la résistance mécanique élevée du limon traité et son comportement fragile (caractère « cassant » tel que le verre), ainsi que la présence de silex, introduits par inadvertance, au sein de la matrice limoneuse empêchent le prélèvement d'échantillons intacts.



Figure 5. Tentative de récupération d'échantillon intact (a) à la tronçonneuse, (b) à la disqueuse, (c) à partir de deux tranchées de 30 cm de large espacées de 50 cm, (d) au perforateur perpendiculairement à la pente du talus.

4.2.2. Prélèvement d'échantillons remaniés

En complément du prélèvement d'échantillons intacts, 4 profils en travers de talus de la digue (2 sur le talus est et 2 sur le talus ouest) ont fait l'objet d'un plan de récupération d'échantillons remaniés pour la caractérisation physico-chimique et microstructurale du limon traité, après 7 ans en environnement réel. L'espacement des prélèvements est de 30 cm sur la hauteur et de 30 cm sur la largeur des talus de la digue. L'objectif est de vérifier l'homogénéité des caractéristiques physico-chimiques et microstructurales du limon traité à la chaux au sein de l'ouvrage et de comparer les valeurs mesurées par rapport aux valeurs obtenues lors de la construction.

De plus, sur les talus est et ouest, un pas de prélèvement plus fin, de 2 cm environ, sur la profondeur depuis la surface du talus, est adopté, afin d'évaluer l'influence de l'environnement sur l'ouvrage. Les prélèvements sont effectués depuis la surface jusqu'à 25 cm de profondeur environ.

5. Reprise en laboratoire des blocs de sol limoneux traité à la chaux

Un large programme d'essais en laboratoire sur des éprouvettes taillées dans les blocs prélevés était initialement prévu : mesures de résistance à la compression simple, à la traction indirecte, au cisaillement triaxial, à la compression isotrope, du module d'élasticité, etc. Toutefois, lors de la découpe des blocs puis des éprouvettes, en complément de la résistance mécanique élevée et du comportement fragile du limon traité à la chaux, la présence de silex s'avère problématique. Une scie pour la découpe des matériaux cimentaires (mortier, béton...) a été utilisée à l'IFSTTAR. Une fraiseuse programmée par ordinateur a été utilisée à l'ULB (Figure 6). Face à la difficulté de réalisation des éprouvettes à partir des blocs, notamment en raison de la présence de silex, leurs dimensions ont été revues à la baisse (par exemple $\varnothing = 20$ mm ; $h = 40$ mm au lieu de $\varnothing = 36$ mm ; $h = 72$ mm pour les essais de résistance à la compression simple) ou leur géométrie réévaluée (éprouvettes cubiques de 5 cm d'arête pour les essais de résistance à la compression simple). Il est probable que l'ensemble du programme expérimental prévu ne puisse pas être réalisé.

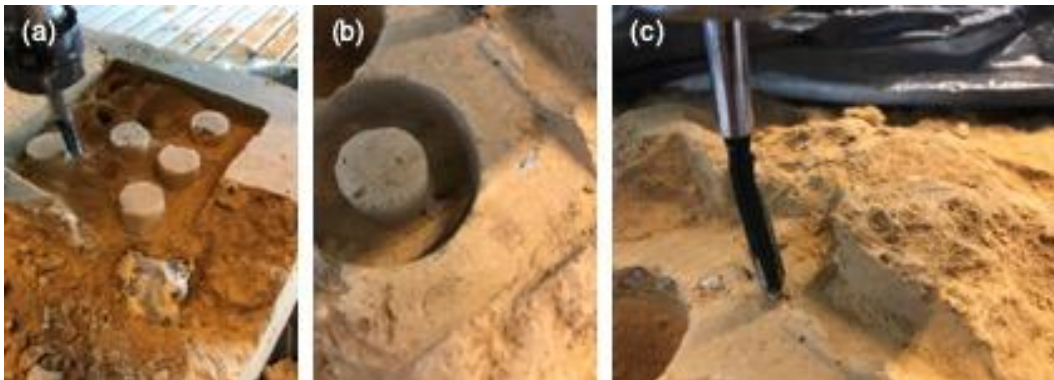


Figure 6. Taille de éprouvettes à la fraiseuse avec (a), (b) présence de silex de tailles parfois importante (pluricentimétrique), (c) usure et endommagement de l'outil de découpe lors de la rencontre de silex.

6. Etude des échantillons remaniés

6.1. Digue en sol limoneux non traité

Les échantillons remaniés font l'objet de mesures de :

- teneur en eau w selon NF P94-050 ;
- teneur en matières organiques (MO) selon la norme XP P97-047 ;
- pH selon la norme NF ISO 10390 ;
- analyse minéralogique par perte au feu ;
- analyse minéralogique par diffraction des rayons X ;
- analyse géochimique par fluorescence X.

Il est ainsi possible de vérifier l'homogénéité du sol limoneux et d'envisager une comparaison des teneurs en eau par rapport à la valeur moyenne de teneur en eau mesurée à la construction.

6.2. Digue en sol limoneux traité à la chaux

Les échantillons remaniés font l'objet des mêmes mesures que les échantillons de sol limoneux non traité ainsi que :

- test préalable à la mesure de pH à la phénophtaléine (incolore pour un pH inférieur à 8,2 et rose soutenu pour un pH supérieur à 9,9) ;
- mesure de CaO disponible (taux de carbonatation) ;
- mesure de surface spécifique par BET ;
- mesure de porosité par porosimétrie par intrusion de mercure ;
- mesure de porosité par méthode Barret-Joyner-Halenda BJH (injection d'azote) ;
- mesure de succion à l'aide d'un psychomètre (WP4 C) ;
- observations au microscope électronique à balayage.

Il est ainsi possible de vérifier l'homogénéité du sol limoneux traité à la chaux et d'envisager une comparaison des teneurs en eau par rapport à la valeur moyenne de la teneur en eau à la construction. Il est également possible d'obtenir les caractéristiques physico-chimiques et microstructurales du limon traité à la chaux après 7 ans en environnement réel.

A l'issue de l'ensemble des mesures en laboratoire, une modélisation du comportement des deux matériaux constitutifs des digues, en environnement réel, dans une structure déterminée est envisagée.

7. Conclusions

Le présent article fait état de la méthodologie déployée pour l'évaluation des caractéristiques physico-chimiques, mécaniques et hydrauliques des matériaux 7 ans après la réalisation des 2 ouvrages maintenus dans leur environnement réel. Les difficultés rencontrées lors de la réalisation des prélèvements in situ et des éprouvettes en laboratoire sont présentées.

De prochains articles scientifiques détailleront les résultats des essais de caractérisation des matériaux. Ceux-ci confirment une pérennité des propriétés mécaniques et hydrauliques du sol limoneux traité à la chaux lors de son évolution depuis la construction. Le bénéfice du traitement et sa durabilité seront également quantifiés.

8. Références bibliographiques

- CETE Normandie-Centre (2012). Opération de recherche DOFEAS - 11R103 - Digue sèche en limon traité à la chaux - Réalisation de l'ouvrage. CER10GIE0001/01, version v1.1.
- Charles I., Herrier G., Chevalier Ch., Durand E. (2013a). La digue expérimentale du CER de Rouen : un ouvrage hydraulique en vraie grandeur en sol traité à la chaux. 2^{ème} colloque national Digues 2013, 12-14 juin 2013, Aix-en-Provence, France.
- Charles I., Herrier G., Puiatti D., Chevalier Ch., Durand E. (2013b). Un ouvrage hydraulique en vraie grandeur en sol traité à la chaux. Colloque CFBR Modernisation des barrages, 4-5 décembre 2013, Chambéry, France, pp. 273-276.
- Charles I., Herrier G., Chevalier Ch., Durand E. (2015). A real scale experimental dike in lime-treated soil. XVI ECSMGE, 13-17 septembre 2015, Edimbourg, Ecosse.