

Barrages en Sol Cimenté : présentation du nouveau Bulletin 195 de la CIGB

Cemented Soil Dams: presentation of the new ICOLD Bulletin 195

D. Puiatti¹, M. Lino², P. Cochet³, S. Bonelli⁴

¹ DPST Consulting, Villemomble, France, daniel.puiatti@dpst-consulting.eu

² ISL, Lyon, France, lino@isl.fr

³ PC Consulting, Claix, France, pierre.a.cochet@orange.fr

⁴ INRAE, Aix-en-Provence, France, stephane.bonelli@inrae.fr

Résumé

Dans le Bulletin 195 Barrages en Sol Cimenté, récemment publié par la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB), le terme « Sol Cimenté » désigne tout sol lié, que ce soit suite à un traitement à la chaux, au ciment, ou à la chaux en association avec le ciment, le cas échéant avec addition de composants pouzzolaniques. Le bulletin fait aussi mention des liants hydrauliques routiers. En Europe, où ces produits sont normalisés et contrôlés, ils peuvent avantageusement remplacer les ciments. Le traitement des sols est une technique ancienne et éprouvée qui a connu au cours des soixante dernières années un développement spectaculaire, en particulier dans le domaine des infrastructures de transport. Des exemples d'applications existent également dans le domaine des ouvrages hydrauliques, ce qui a conduit la CIGB à publier le Bulletin 54, Sol-ciment pour barrages en remblai (1986), consacré à l'utilisation de matériaux granulaires traités au ciment pour la protection des talus amont des barrages en terre.

Depuis les années 1980, la technique a considérablement évolué grâce aux progrès de la technologie d'une part, et à une utilisation plus rationnelle de la chaux aérienne calcique d'autre part. En outre, d'importants programmes de recherche et des retours d'expériences positifs ont permis de mieux explorer et caractériser les performances des sols traités et d'en tirer un meilleur profit.

Le nouveau Bulletin 195 couvre l'utilisation des sols cimentés dans la réalisation d'ouvrages hydrauliques. S'il s'appuie sur le Bulletin 54 exclusivement consacré au ciment, il le complète avec l'utilisation de la chaux aérienne calcique, permettant ainsi d'élargir le champ d'application de la technique au traitement des sols limono-argileux. S'agissant de la valorisation de matériaux naturels, donc non élaborés, il insiste particulièrement sur l'importance des études préalables : reconnaissance des gisements et études en laboratoire. Profitant de l'expérience acquise dans les infrastructures de transport, il étend largement l'utilisation des sols traités à d'autres applications que les protections de talus amont, notamment aux barrages homogènes de hauteur moyenne (jusqu'à 30 m de haut), aux barrages zonés et aux digues. Il fournit des recommandations utiles pour la conception, la construction et la réparation des barrages et des digues faisant usage de sols cimentés

Mots-clés

barrage, digue, sol cimenté, chaux, ciment

Abstract

In Bulletin 195 Cemented Soil Dams, recently published by the International Commission of Large Dams (ICOLD), the term "Cemented Soil" is used to designate any soil bonded, whether by treatment with lime, cement or lime in combination with cement, with addition of pozzolanic components if appropriate. Bulletin also mentions hydraulic road binders. In Europe, where these products are standardized and controlled, they can advantageously replace cements. Soil treatment is an old and proven technique that has undergone spectacular development over the last sixty years, particularly in the field of transport infrastructure. Examples of applications also exist in the field of hydraulic structures, leading ICOLD to publish Bulletin 54, Soil-cement for embankment dams (1986), on the use of cement-treated granular materials to protect the upstream slope of earth dams.

Since the 1980s, the technique has evolved considerably, thanks to advances in technology on the one hand, and more rational use of calcium air lime on the other. In addition, major research programs and positive feedback have made it possible to better explore and characterize the performance of treated soils, and to derive greater benefit from them.

The new Bulletin 195 covers the use of cemented soils in the construction of hydraulic structures. While it builds on Bulletin 54, which was devoted exclusively to cement, it complements it with the use of calcium air lime, thus extending the scope of the technique to the treatment of silty-clay soils. With regard to the use of natural materials, *i.e.* unprocessed, it places particular emphasis on the importance of preliminary studies: investigations of deposits and laboratory studies. Drawing on experience gained in the field of transport infrastructure, it broadly extends the use of treated soils to applications other than upstream slope protection, notably to homogeneous medium-height dams (up to 30 m high), zoned dams and levees. It provides useful recommendations for the design, construction and repair of dams and levees using cemented soils.

Key Words

dam, levee, cemented soil, lime, cement

Avant-Propos

A la demande de plusieurs représentants de pays membres, notamment la Chine et la France, la CIGB a officialisé en 2013, en assemblée générale, la création d'un nouveau comité technique, le Comité P consacré aux Barrages en Matériau Cimenté (Cemented Material Dams ou CMD). La présidence en a été confiée au Dr. J. Jia (Chine) et la vice-présidence à M. Lino (France).

Les raisons de cette décision résultent d'une réflexion sur la nature des matériaux constitutifs des barrages : dans les barrages en remblai, on utilise principalement des sols naturels non traités (sables, limons, argiles, éléments rocheux) alors que les bétons des barrages en béton, conventionnels ou compactés au rouleau, font appel à des sables, des graviers ou des gros éléments, sélectionnés ou élaborés. Ces matériaux, leurs performances et leur comportement, sont donc très différents. Pourquoi ne pas utiliser un matériau se situant entre ces deux extrêmes en exploitant les ressources naturelles disponibles localement (sables, graviers, roches et même sols) et en les traitant au ciment, à la chaux ou à une combinaison de ces liants ?

Les réponses étant multiples, le Comité a décidé de se consacrer dans un premier temps à la rédaction de 3 bulletins :

- Bulletin 190 : Rock Filled Concrete Dams (Barrages en blocs rocheux percolés par du béton autoplaçant)
- Bulletin 195 : Cemented Soil Dams (Barrages en Sol Cimenté)
- Bulletin (N° à fixer) : Hardfill/Cemented Sand and Gravel (CSG)/Cemented Sand, Gravel and Rock (CSGR) Dams (désignation française : Barrages en Remblai Dur)

Les 2 premiers bulletins ont été approuvés par la GIGB en 2021 et 2022, et sont accessibles en versions anglaise et française sur le site de la CIGB. La rédaction du 3^e est en cours.

Le présent document est consacré exclusivement à la présentation du Bulletin 195 : Cemented Soil Dams (Barrages en Sol Cimenté) ou CSD.

Introduction

Le terme "Sol Cimenté" fait référence à tout type de sol dont les éléments sont liés par traitement avec de la chaux et/ou du ciment, ou avec d'autres combinaisons ayant des propriétés liantes telles que la chaux et/ou le ciment, le cas échéant avec addition de composants pouzzolaniques tels que les cendres volantes. Dans le bulletin, par souci de simplification et bien qu'étant un réactif chimique, la chaux a été associée à la famille des liants. Il est aussi fait mention des liants hydrauliques routiers. En Europe, où ces produits sont normalisés et contrôlés, ils peuvent avantageusement remplacer les ciments. Par souci de simplification, ils ont été associés à la famille des ciments.

Le traitement des sols à la chaux et/ou au ciment est une technique éprouvée dont l'utilisation s'est fortement développée au cours des 60 dernières années dans le domaine des infrastructures de transport. Les raisons de ce développement s'expliquent par les nombreux avantages que procure la technique, notamment :

- L'utilisation optimisée des matériaux naturels disponibles sur le site,

- La réduction du recours à des matériaux extérieurs et à des mises en décharge,
- La réduction du trafic routier induit par les travaux,
- La réduction des coûts et de la durée des travaux de terrassement.

Des applications existent également dans les ouvrages hydrauliques, aux États-Unis, en Australie, en Asie, en Afrique du Sud et dans les pays européens dont la France. Le bulletin en donne des exemples de manière détaillée dans une série de fiches techniques.

La France étant à l'origine de la proposition du Bulletin CSD, le pilotage des travaux lui a été confié. Un groupe français, miroir CFBR du Comité P de la CIGB, présidé par M. Lino, a été créé à cet effet. Ce groupe, constitué d'experts de toutes origines (ingénierie, organismes de recherche, entreprises, producteurs de liants, experts indépendants) a reçu le soutien actif et des contributions de la part de plusieurs pays étrangers, notamment de la Belgique, de la Chine, de l'Iran et de la Thaïlande.

Structure du document

La singularité du Bulletin CSD est qu'il couvre à la fois le domaine des barrages et celui des digues. Il s'appuie, non seulement sur des résultats et retours d'expériences français, mais aussi sur des applications documentées dans de nombreux autres pays sur tous les continents. Il prend comme référence initiale le Bulletin 54 de la CIGB sur les sols-ciments pour barrages en remblai publié en 1986. La Figure 1 présente la page de couverture et les éléments essentiels de la table des matières.

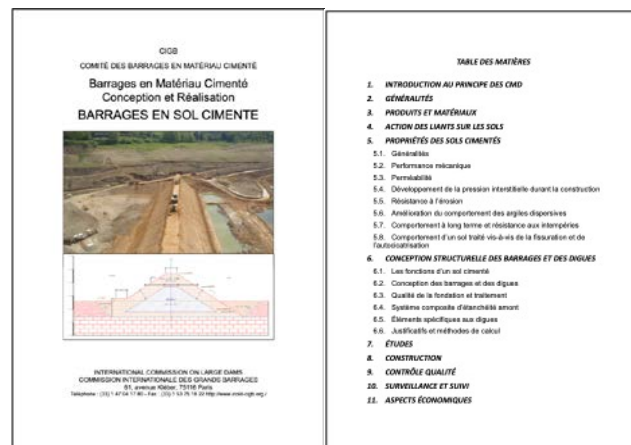


FIGURE 1. Couverture (Photo V. Mouy) et extrait de la table des matières du Bulletin CSD.

Le document couvre l'utilisation de sols naturels, y compris les sols limono-argileux, ne subissant aucun traitement mécanique à part une préparation éventuelle par homogénéisation, ou par mélange, ou par criblage pour limiter la taille maximale des granulats, avant incorporation d'une quantité appropriée de liant et si nécessaire d'eau. Cette pratique n'étant pas coutumière au sein de la communauté des ouvrages hydrauliques, une part importante du document est

consacrée à la description des liants et de leurs propriétés, des matériaux naturels concernés et de leurs caractéristiques, ainsi que des propriétés des mélanges. La partie consacrée aux propriétés des mélanges est particulièrement développée. Elle reprend entre autres les résultats des études en laboratoire et des essais sur démonstrateurs réalisés récemment, en France, en Belgique ainsi qu'en Chine, pour caractériser la perméabilité, la résistance à l'érosion et la durabilité des sols traités. Concernant la perméabilité par exemple, il est prouvé qu'à condition que la mise en place soit réalisée en suivant des prescriptions particulières (teneur en eau côté humide du Proctor et compactage par rouleau à pieds dameurs), la perméabilité d'un sol traité à la chaux est du même ordre de grandeur que celle du même sol non traité. Des essais très complets réalisés sur modèles physiques en Chine ont montré la très bonne tenue des sols traités au ciment soumis à des sollicitations de type météorologique sévères. Les conclusions relatives à la résistance à l'érosion sont présentées un peu plus loin, dans le document.

Une analyse fonctionnelle du composant cimenté dans les ouvrages figure en introduction au chapitre sur la conception structurelle des barrages et des digues. Plusieurs types de conception sont présentés, du remblai simple pour des hauteurs inférieures à 15 à 20 m, aux ouvrages de plus grande hauteur, de l'ouvrage homogène à l'ouvrage zoné (par exemple : carapace en protection amont). Un paragraphe est consacré à l'étanchéité amont par système composite, un autre aux éléments spécifiques aux digues, un troisième est consacré aux justificatifs et aux méthodes de calcul.

Une autre des singularités du Bulletin CSD est qu'il traite de la valorisation de sols naturels. Ceux-ci s'imposent en l'état à l'ingénieur qui doit prendre en considération leurs caractéristiques et leurs propriétés pour en tirer le meilleur parti. C'est pourquoi le chapitre des études propose une démarche progressive démarrant dès le niveau des études préliminaires pour aboutir à la détermination du choix du liant (chaux et/ou ciment) et du dosage à appliquer selon la fonction visée. Il insiste sur la qualité des études de gisements et sur le regroupement des matériaux en familles de sols homogènes, chacune étant traitée de manière spécifique.

Le chapitre consacré à la construction des ouvrages insiste sur le soin qui doit être apporté à l'extraction/préparation des matériaux ainsi qu'à la fabrication des mélanges et à la mise en œuvre. Deux modes de fabrication sont présentés : le traitement en place et le traitement en centrale. Des indications sont données sur la mise en place d'une membrane étanche. Des éléments de comparaison économique sont également donnés à titre indicatif. En prenant exemple sur 2 projets de digues (en France et en Chine), ils montrent que des économies importantes peuvent être réalisées, principalement grâce à la réduction de l'usage de produits et matériaux élaborés d'apport (France) ou à la suppression de matériaux de substitution (Chine).

Le contrôle qualité ainsi que la surveillance et le suivi font l'objet de deux chapitres dédiés.

Trois annexes complètent le bulletin. Les deux premières sont des propositions pour la bonne réalisation des études et la confection des éprouvettes en laboratoire. La troisième fait le point sur l'impact environnemental des sols cimentés.

Enfin, une série de fiches techniques relatives à des applications ou ouvrages existants vient étayer le document.

À titre d'illustration, la suite du présent article présente certaines parties du Bulletin CSD sous forme de courtes synthèses accompagnées de données additionnelles récentes destinées à apporter un éclairage particulier sur certains aspects de la technique. Il s'agit des parties suivantes :

- les liants ;
- les sols ;
- la résistance à l'érosion ;
- le cas des barrages ;
- le cas des digues.

Les Liants

Le ciment est un liant qui, en présence d'eau, est capable de créer des liens entre les particules d'un matériau granulaire avec lequel il est mélangé. La chaux, sous forme vive (CaO) ou hydratée (Ca(OH)_2), est un réactif chimique qui, en présence d'eau, agit sur les minéraux argileux du sol et se combine progressivement avec eux au plus profond des agglomérats pour générer un composé aux propriétés liantes qui durcit lentement. Le ciment agit donc comme une colle qui se fixe à la surface des granulats. De ce fait, il est mieux adapté au traitement des matériaux granulaires propres ou très faiblement argileux (sables, graves) alors que la chaux est mieux adaptée au traitement des sols limono-argileux. Dans les deux cas, les dosages et les performances finales dépendent de la nature et de l'état des sols. La Figure 2 illustre de manière comparative les modes d'action de la chaux et du ciment.

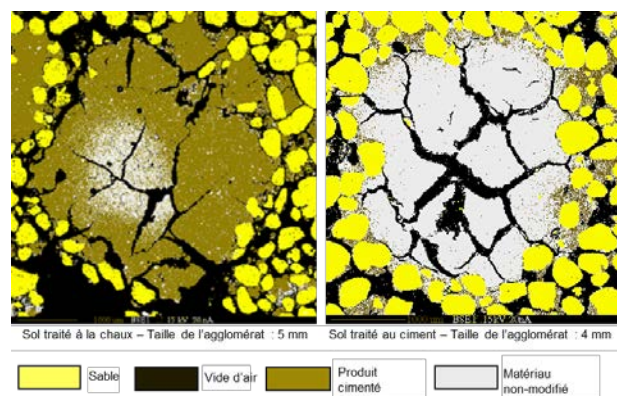


FIGURE 2. Action comparée de la chaux et du ciment sur des sols argileux après 365 jours de cure (d'après Harris et Scullion – 2009 [1]). « Matériau non-modifié » désigne l'argile non cimentée.

Lorsqu'on recherche une cinétique de prise et de durcissement rapide, un traitement mixte, à la chaux d'abord puis au ciment ensuite, peut être appliqué aux sols limono-argileux. La chaux, en réduisant la plasticité des sols et en provoquant la floculation des minéraux argileux, facilite la répartition du ciment dans le sol, renforce son action et contribue à l'obtention de performances supérieures à celles qu'on obtiendrait avec de la chaux ou du ciment seul.

Les sols

Le Bulletin 54 cible explicitement les matériaux granulaires sableux et graveleux avec peu de

fines (< 10 à 20 %) et un faible indice de plasticité ($I_p < 8$). Les raisons qui justifient ces limites sont fondées, en grande partie, sur la faisabilité des mélanges par rapport à la technologie de malaxage disponible à l'époque (1962-1982). Le bulletin CSD diffère du Bulletin 54 par le fait qu'il est ouvert à un plus large éventail de matériaux. Comme dans le Bulletin 54, les critères de sélection sont toujours fondés sur la compatibilité sol-liant et la faisabilité des mélanges. Mais les améliorations technologiques apparues depuis 1986 associées à une utilisation plus rationnelle de la chaux ont contribué à repousser les limites imposées initialement par la présence d'argile plastique ou d'éléments grossiers. La Figure 3 donne une représentation schématique du positionnement des sols fins utilisables selon chacun des bulletins.

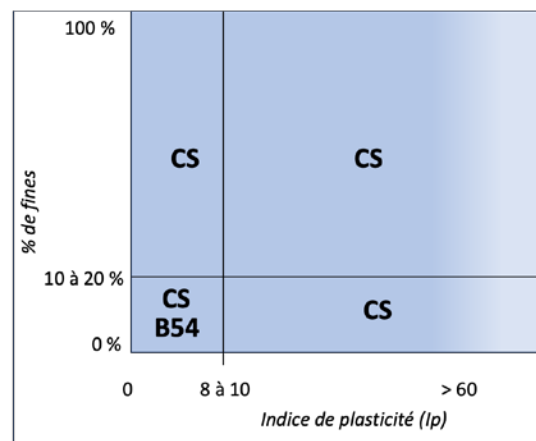


FIGURE 3. Principales caractéristiques et positionnement des sols fins utilisables selon le Bulletin 54 (B54) par rapport aux sols utilisables selon le Bulletin CSD (CS). La limite supérieure en indice de plasticité est fonction du dosage en chaux, de la technologie utilisée et de la méthodologie appliquée pour le traitement.

La résistance à l'érosion

Érosion interne

Les travaux de Fell et Fry (2007) [2] ainsi que ceux de Bonelli (2013) [3] ont montré qu'un sol traité n'est concerné que par l'érosion par fuite concentrée ou érosion de conduit. Elle est étudiée en laboratoire à l'aide de l'essai d'érosion de trou HET (Hole Erosion Test). La Figure 4 présente les résultats d'essais HET effectués sur un sol fin traité à 2 % de chaux vive et sur le même sol non traité. Elle montre que la contrainte critique tangentielle (le seuil d'érosion) est multipliée par un facteur allant de 6 à 10 comparativement au même sol non traité, et ce en moins de 30 jours de cure. L'indice d'érosion, qui caractérise la vitesse d'érosion, augmente aussi vers des valeurs caractéristiques de vitesses d'érosion plus lentes.

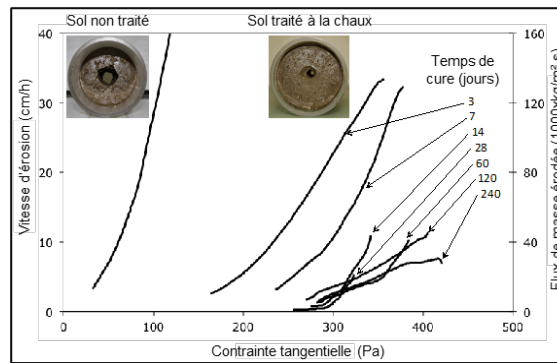


FIGURE 4. Résultats d'essais HET sur un sol limono-argileux non traité de Camargue ($I_p = 11$) et sur le même sol traité à 2 % de chaux (Bonelli, 2013) [3].

Érosion de surface

Deux essais sur démonstrateurs ont été réalisés en France à l'aide d'un dispositif développé pour simuler une surverse in situ et quantifier la résistance à l'érosion de surface. Le premier dans le cadre du projet DigueELITE (Bonelli et al., 2018) [4] et le second sur un sol de Camargue dans le cadre d'un projet géré par le SYMADREM. Les essais ont été effectués avec des débits spécifiques allant jusqu'à $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$ par mètre de déversement, une hauteur d'eau de 40 à 50 cm en crête et une vitesse d'eau de 5 à 6 m/s en pied de talus. Il a été constaté une nette amélioration de la résistance à l'érosion de surface du même sol après traitement à 2 % de chaux vive.

Une analyse détaillée des résultats obtenus sur 7 essais de surverse réalisés entre 2016 et 2018 a été présentée lors de la réunion des groupes de travail internationaux sur l'érosion qui s'est tenue à Lyon en 2023 (Bonelli et al.) [5]. A titre d'exemple, le Tableau 1 présente les valeurs des contraintes relatives à l'érosion du talus aval (pente $H/V=2$ à 5) soumis à une surverse.

TABLEAU 1. Essais de surverse et essais HET/JET : comparaison des contraintes hydrauliques.

Sols traités	Erosion le long du talus aval			Affouillement en pied de talus aval		
	Bornes supérieures des contraintes hydrauliques		Borne inférieure des contraintes critiques	Bornes supérieures des contraintes hydrauliques		Borne inférieure des contraintes critiques
	HETs (intact)	Essais de surverse		JETs in situ	Essais de surverse	
Sol-chaux (2016)	$\tau_H < 418 \text{ Pa}$	$\tau_H < 93 \text{ Pa}$	$\tau_c > 418 \text{ Pa}$	$\tau_H < 250 \text{ Pa}$	$\tau_H < 31 \text{ Pa}$	$\tau_c > 250 \text{ Pa}$
Sol-chaux (2017)	$\tau_H < 418 \text{ Pa}$	$\tau_H < 75 \text{ Pa}$	$\tau_c > 418 \text{ Pa}$	$\tau_H < 250 \text{ Pa}$	$\tau_H < 28 \text{ Pa}$	$\tau_c > 250 \text{ Pa}$
Sol-chaux (2018)	$\tau_H < 477 \text{ Pa}$	$\tau_H < 90 \text{ Pa}$	$\tau_c > 477 \text{ Pa}$	$\tau_H < 349 \text{ Pa}$	$\tau_H < 10 \text{ Pa}$	$\tau_c > 349 \text{ Pa}$
Sol traité au LB50 (2018)	$\tau_H < 730 \text{ Pa}$	$\tau_H < 80 \text{ Pa}$	$\tau_c > 730 \text{ Pa}$	$\tau_H < 239 \text{ Pa}$	$\tau_H < 13 \text{ Pa}$	$\tau_c > 239 \text{ Pa}$

- Pour l'érosion le long du talus aval :

- avec une lame d'eau en crête de 40 à 50 cm, les ordres de grandeur des vitesses maximums sont de 5 à 6 m/s, les contraintes hydrauliques in situ (τ_H Essais de

- surverse) sont de 50 à 100 Pa ;
- les ordres de grandeurs des bornes inférieures des contraintes critiques des essais HET (τ_c) sur sols traités sont de 418 à 730 Pa ;
 - la comparaison des deux ordres de grandeur montre qu'il ne peut y avoir érosion le long du talus aval avec une lame d'eau en crête de 40 à 50 cm pour les sols traités et les talus considérés.
- Pour l'affouillement en pied de talus aval :
 - avec une lame d'eau en crête de 40 à 50 cm, les ordres de grandeur des contraintes hydrauliques in situ (τ_H Essais de surverse) sont de 10 à 50 Pa ;
 - les ordres de grandeurs des bornes inférieures des contraintes critiques des essais JET (τ_c) sur sols traités sont de 239 à 349 Pa ;
 - la comparaison des deux ordres de grandeur montre qu'il ne peut y avoir érosion en pied de talus aval avec une lame d'eau en crête de 40 à 50 cm pour les sols traités et les talus considérés.

Cas des barrages

Sol-ciment

Selon le Bulletin 54, l'US Bureau of Reclamation a commencé à s'intéresser aux sols traités au ciment en protection de talus à partir de 1951. L'application s'est ensuite rapidement développée à tel point que le Bulletin 54, publié en 1986, fait état de 136 barrages et remblais construits depuis 1962 ayant fait appel, avec succès, à des sols ciment. Des applications sont aussi signalées au Canada et en Tchécoslovaquie. Le Bulletin 195 cite 2 ouvrages plus récents : un ouvrage déversant de 300 m de long, protégé par une carapace en latérite-ciment, construit en 2004 sur le barrage de Loumbila au Burkina Faso, et le batardeau de Pannecière en France. La fonction de ce dernier, haut de 17 m, était de protéger les travaux sur le barrage principal en 2012-2013. Ce batardeau, avec sa structure zonée constituée d'un noyau central non traité encapsulé dans une couche traitée, illustre la page de couverture du Bulletin (Figure 1).

Sol-chaux

L'utilisation rationnelle de la chaux dans les barrages remonte aussi au milieu du siècle dernier. De nombreux cas d'application sont recensés dans le Bulletin 195, aux Etats-Unis, en Afrique du Sud, au Swaziland, en Australie, en Thaïlande et en France. Le traitement à la chaux est souvent appliqué pour corriger des comportements spécifiques de sols fins (sols dispersifs, sols érodables, sols instables ou humides). Dans les ouvrages zonés, le composant sol-chaux remplit des fonctions particulières telles que protection de talus contre l'érosion, filtre de protection de sols dispersifs ou érodables. Il existe aussi des petits barrages en sol-chaux comme en Normandie où ils ont pour fonction le ralentissement des crues et la lutte contre l'érosion dans les vallées sèches. La chaux vive y est utilisée pour abaisser la teneur en eau des limons trop humides. Enfin, le Bulletin 195 rapporte le travail entrepris par le groupe miroir du CFBR pour analyser la stabilité d'un barrage de 30 m de hauteur réalisé avec un remblai traité à la chaux vive en utilisant des techniques numériques les plus élaborées (Flac 2D et Plaxis) et en prenant en compte l'accroissement progressif de la résistance au cisaillement imputable à l'action de la

chaux. Les conclusions indiquent que, si la stabilité à court terme est dimensionnante et dépend de la pente et de la vitesse de construction, il n'y a pas de développement potentiel de pressions interstitielles pour un degré de saturation initial inférieur à 95 %, des vitesses de montée du remblai de 2 à 5 m/jour, et des pentes allant jusqu'à $H=1,25/V=1$. Ces conclusions confirment l'intérêt du traitement pour des ouvrages de cette taille [6].

Cas des digues

L'exemple le plus ancien et le plus largement documenté est celui des digues du canal de Friant-Kern aux États-Unis. Construit dans les années 1940, il traverse sur plus de 8 km une formation d'argiles plastiques gonflantes qui rendent les berges instables. La reprise de ces berges a été faite dans les années 1970 en adoucissant les pentes et en les protégeant, ainsi que le plafond du canal, par une couverture de 30 à 60 cm d'argile traitée à 3 à 4% de chaux vive. Cinquante ans plus tard, les berges sont toujours aussi stables. La Figure 5 donne un aperçu du profil en travers et de l'état du canal en 2012.

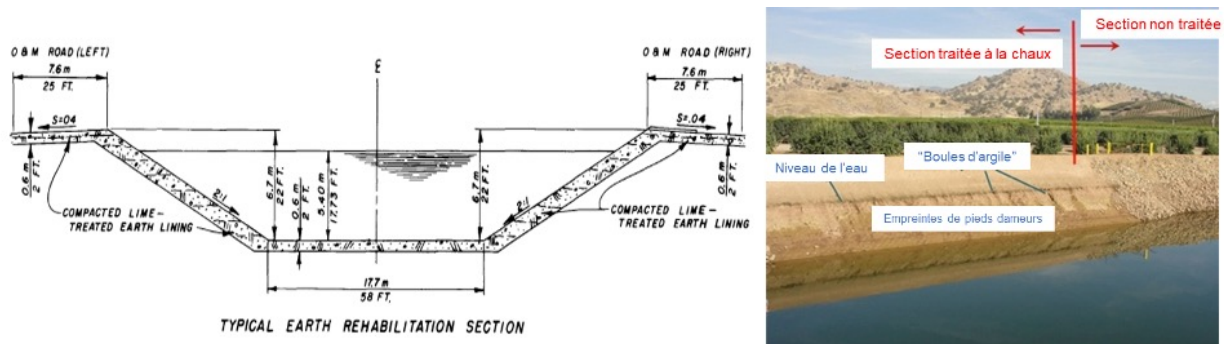


FIGURE 5. Profil en travers et vue des berges du canal de Friant-Kern (Photo D. Puiatti - 2012) [7].

En France, des avancées décisives ont été obtenues grâce au projet de recherche DigueELITE qui a permis de tester sur démonstrateur le mode de construction, le comportement et la tenue à l'érosion d'une digue en limon traité à 2 % de chaux vive. Ce projet a reçu le Prix de l'Innovation de la CIGB au Congrès de Vienne en 2018. Il a permis de tirer un certain nombre d'enseignements utiles sur les apports du traitement pour ce type d'ouvrage :

- Optimisation de l'exploitation des ressources naturelles.
- Réduction du trafic de transport des matériaux extérieurs sur le réseau routier.
- Simplification de la section transversale de l'ouvrage.
- Renforcement de l'efficacité des filtres granulaires et, en conséquence, limitation du recours à des systèmes plus onéreux de filtration/drainage.
- Possibilité d'éviter le recours à des protections complémentaires des talus amont et aval et capacité à admettre des surverses.
- Possibilité de réduction des emprises au sol par raidissement des pentes de talus.

- Amélioration de la portance de la plate-forme du chemin de crête de la digue.
- Possibilité de recouvrir les talus de terre végétale.
- Frein à la pénétration des racines de végétaux et aux dégradations provoquées par les fousseurs comme le montre la Figure 6.



FIGURE 6. À gauche, tentative avortée de creusement d'un terrier dans le sol-chaux. À droite tentative réussie dans le même sol non traité (Photos S. Nicaise - 2021) [8].

Conclusion

La technique du traitement des sols à la chaux et/ou au liant hydraulique est mûre et d'application courante dans le domaine des infrastructures de transport. Son utilisation en ouvrages hydrauliques nécessitait l'analyse, entre autres, de trois caractéristiques essentielles : la perméabilité, la résistance à l'érosion interne et la résistance à la surverse des matériaux traités. Les résultats obtenus depuis plus de 10 ans sur essais de laboratoire et essais en vraie grandeur sur démonstrateurs sont largement documentés dans le bulletin. Ainsi, à condition de respecter certaines prescriptions particulières de mise en œuvre (teneur en eau, compactage), la perméabilité du sol traité est semblable à celle du sol non traité. Il s'avère aussi que les résistances à l'érosion interne et à la surverse sont 5 à 10 fois supérieures à celle du sol non traité, que les sollicitations hydrauliques in situ sont significativement inférieures à la résistance du sol traité et qu'elles n'initient pas d'érosion (érosion interne et surverse). De plus, les premières estimations de coûts rapportées dans le bulletin à propos de cas particuliers font de cette solution une option pertinente à explorer. L'utilisation de cette technique pour les digues fluviales de protection nécessite maintenant une conception et un dimensionnement spécifiques que doivent s'approprier gestionnaires et bureaux d'études. S'appuyant sur de nombreux exemples réussis de réalisations, des retours d'expérience positifs et des résultats d'essais récents et convaincants, le Bulletin CIGB n°195 Barrages en Sol Cimenté rassemble une somme importante d'informations utiles aux ingénieurs pour leur permettre de choisir les paramètres de conception et les procédés de construction appropriés à la réalisation des ouvrages en sol cimenté.

Remerciements

Nous remercions l'EPTB Vidourle pour nous avoir permis de réaliser le projet de R&D DigueElite, et le SYMADREM pour avoir proposé, financé et piloté l'ensemble des travaux sur les plots d'essai de Salin de Giraud.

Références

- [1] Harris P., Scullion T. (2009). Stabilizer Diffusion in Swelling Soils. International Foundation Congress and Equipment Expo, Copyright ASCE.
- [2] Fell R., Fry J.-J. (2007). *Internal Erosion of Dams and Their Foundations*. Taylor & Francis, London.
- [3] Bonelli S. (ed) (2013). *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*, Wiley/ISTE , 388 p.
- [4] Nerinx N., Bonelli S., Herrier G., Tachker P., Puiatti D., Cornacchioli F., Nicaise S., Lesueur D. (2018). The DigueELITE project: lessons learned and impact on the design of levees with lime treated soils, *Hydropower and Dams*, vol. 25, issue 6.
- [5] Bonelli S. *et al.* (2023). INRAE field overflow test and estimation of Manning's roughness coefficient and erosion critical stress, EWG-OOE 4th Meeting European Working Group on Overflow and Overtopping Erosion Lyon - July 2-5, 2023.
- [6] Agresti P., Nerinx N., Lherbier J.-R., Alleon C., Bonelli S., Fry J.-J., Cochet P. (2019). Justification de la stabilité des digues et barrages en sols traité, Colloque CFBR, Justification des Barrages : Etat de l'art et perspectives, Colloque CFBR - Justification des barrages : état de l'art et perspectives - Chambéry 27 et 28 novembre 2019.
- [7] Herrier G., Bonelli S., Berger E., (2012). The Friant-Kern canal: a forgotten example of lime-treated structure in hydraulic conditions, ICSE6 Paris - August 27-31, 2012.
- [8] Nicaise S., Chaouch N., Bonelli S. (2021). Synthèse de 6 ans de suivi visuel du démonstrateur, DigueElite – INRAE.