



HAL
open science

Guide Technique CFBR - Méthodes et techniques de confortement des digues

D. Poulain, M. Sutter, R. Tourment, J. Maurin, Nicolas Auger, C. Chevalier,
Y. Deniaud, Patricia Ledoux, T. Mallet, J.C. Palacios, et al.

► **To cite this version:**

D. Poulain, M. Sutter, R. Tourment, J. Maurin, Nicolas Auger, et al.. Guide Technique CFBR - Méthodes et techniques de confortement des digues. Digue maritimes et fluviales de protection contre les inondations - 3e colloque - Digues 2019, Mar 2019, Aix-en-Provence, France. 10.5281/zenodo.2535489 . hal-02609497

HAL Id: hal-02609497

<https://hal.inrae.fr/hal-02609497v1>

Submitted on 16 May 2020

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.

Guide Technique CFBR – Méthodes et techniques de confortement des digues

CFBR Technical guidance – Methods and technical solutions for levees reinforcement

**D.POULAIN¹, M.SUTTER¹, R.TOURMENT¹, J.MAURIN, N.AUGER², C.CHEVALIER³,
Y.DENIAUD², P.LEDOUX², T.MALLET⁴, JC.PALACIOS⁵, M.PINHAS⁶,**

¹IRSTEA, Aix-en-Provence et Bordeaux, daniel.poulain@irstea.fr

²CEREMA, Blois, Brest et Aix-en-Provence, yann.deniaud@cerema.fr

³IFSTTAR, Marne-la-Vallée, christophe.chevalier@ifsttar.fr

⁴SYMADREM, Arles, Thibaut.MALLET@symadrem.fr

⁵SAFEGE, Nanterre, jeancharles.palacios@safege.fr

⁶AD Isère, Grenoble, m.pinhas@adisere.fr

Résumé

Le CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs) a mis en place un groupe de travail chargé de faire un état des méthodes utilisées en réparation (suite à désordres ou brèches) et confortement (suite à potentialité de désordre, constatées lors d'un diagnostic) des digues. L'objectif fixé est de proposer des recommandations techniques pour chaque type de réparation et renforcement.

Ces travaux ont été menés sur la base de nombreux retours d'expérience. Plus de 150 chantiers de confortement ont été analysés, dont une trentaine ont été retenues comme fiches d'étude de cas pour lesquels une ou plusieurs des techniques ont été mises en œuvre. Ces fiches d'étude de cas viennent compléter les près de 40 fiches techniques rédigées, décrivant l'état de l'art des solutions potentielles aux domaines fonctionnels du confortement:

- Etanchéité, interne ou sur talus coté eau ;
- Drainage et filtration ;
- Stabilité ;
- Protection externe ;
- Ouvrages inclus et traversants, transitions ;
- Gestion de la végétation.

Ces fiches techniques traitent des aspects de conception et de mise en œuvre ; pour chacun des domaines fonctionnels, les caractéristiques communes ainsi que des critères d'aide à la décision entre les différentes techniques sont présentées.

Mots Clés

Guide technique ; Confortement ; Réparation ; Digues ; Conception

Abstract

There are only a few years that French State takes in charge flood defense management issues. This was done through new regulation, control, and new funding framework like PAPI or PSR. In parallel, professional organizations are also working on flood defences: a working group of CFBR has the goal to describe methods that can be used to repair (after disorder or breach), reinforce or consolidate (after disorder suspicion, assessed during a diagnosis) a levee. The final document from this working group aims to include technical recommendations for each listed method.

Thanks to numerous case studies (150), almost 40 techniques were listed and organized in regard with their main functionality: inside or outside sealing, drainage, filtration, mechanical stability, enhancement, protection, crossing, included or transition work, vegetation management. Each of these techniques is described in detail in a specific form.

This communication's goal is to present the different ways to use these guidances: for different actors in the betterment of a levee like the decision-maker, the designer, the builder and for their different goal.

Key Words

Technical guidance; Levee; Betterment; Design; Construction

Introduction

De nombreux travaux ont été engagés par les professionnels en lien avec la problématique des ouvrages de protection contre les inondations au cours des dernières années. Ils font suite aux besoins techniques issus de la prise en charge par l'Etat dans ses politiques publiques de cette problématique (circulaire du 6 août 2003, décret n° 2007-1735, Plan d'Action de Prévention des Inondations et Plan de Submersion Rapide, Décret n° 2015-526...). Cette prise en charge faisant suite à de nombreux événements hydrologiques et hydrauliques importants en France au cours des dernières décennies entraînant de nombreux dégâts matériels et humains (tempête Xynthia, inondations dans le Var en 2010 parmi les plus récentes).

Pour ce qui est des ouvrages de protection (digues / systèmes d'endiguement), en France, le CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs) a mis en place un groupe de travail composé des différents acteurs du domaine : maîtres d'ouvrage, bureaux d'étude, administrations, entreprises de travaux, chercheurs. Ce groupe de travail étant chargé de faire un état de l'art des méthodes utilisées en réparation et en confortement des digues.

La présente communication présente une synthèse des travaux menés dans le cadre de ce groupe de travail et le rendu qui en sera fait au travers d'un guide technique regroupant des recommandations techniques pour chaque type de réparation et confortement recensés. Outre ces fiches techniques de conception et réalisation, on trouvera dans le document des études de cas et un glossaire détaillé.

Un premier chapitre de cet article présente les éléments relatifs à la conception du guide (organisation des confortements, contenu,...). Les second et troisième chapitres s'intéressent respectivement à la stabilité et la rehausse et à l'étanchéité interne, en présentant le contenu technique des fiches et les critères de choix entre les techniques proposées.

Format et objectif du guide technique

Approches

Les travaux du groupe de travail ont débuté il y a plusieurs années par la réalisation de retours d'expériences portant sur différentes mises en œuvre de réparation ou confortement de digues.

L'analyse de ces différentes expériences a permis de dégager pour chacune d'elle :

- Les fonctions recherchées (fonction principale et les éventuelles fonctions secondaires et/ou induites) ;
- Les méthodologies de conception et de réalisation mises en œuvre ;

- Les critères de choix de la technique parmi l'ensemble des techniques permettant de répondre à la fonction principale recherchée.

Sur cette base une quarantaine de techniques ont été retenues comme « courantes » (c'est-à-dire présentant un retour d'expérience suffisant). Chacune de ces techniques a alors été détaillée sous de nombreux aspects ; de sa définition à sa réalisation au travers de fiches qui forment le cœur du travail réalisé par le groupe de travail.

Le guide en lui-même se veut utilisable par l'ensemble des intervenants d'un projet de confortement : du maître d'ouvrage pour la définition du projet et des cahiers des charges, aux entreprises et aux bureaux d'ingénierie agréés chargés de la maîtrise d'œuvre pour le dimensionnement notamment en faisant une large part à la bibliographie afin de permettre d'approfondir les principes généraux et spécifiques énoncés.

Organisation du guide

Pour réaliser un confortement ou une réparation de digue qui soit efficace, il est nécessaire d'adapter la solution à la problématique, ce qui nécessite un diagnostic [2] reposant sur la collecte de données sur l'ouvrage existant (constitution, géométrie, topographie, géotechnique, hydrologie et hydraulique, histoire et comportement notamment en crue,...) et leur interprétation (cause et nature d'un désordre identifié, de mesures d'auscultation particulières,...) ainsi que l'évaluation de sa performance au cours de crues envisageables (analyse de risques). Lors de ce diagnostic [5] sont identifiés les mécanismes de détérioration ou de rupture et les fonctions associées des ouvrages qui permettent de contrer ces mécanismes.

Les fiches techniques sont regroupées dans le guide technique selon la fonction principale dont l'amélioration est recherchée par les travaux. A ces fonctions principales sont généralement associées d'autres fonctions qualifiées de « secondaires » qui entrent pleinement dans le choix de la technique mais consistent en un apport supplémentaire non systématiquement pris en compte dans les critères de dimensionnement. Parmi l'ensemble des techniques, certaines (palplanches, murs,...) présentent plusieurs fonctions principales ce qui a amené à les distinguer dans des fiches différentes, les principes de conception et de dimensionnement étant eux-mêmes différents. Au-delà de ces fonctions, des fonctions induites correspondant à des apports indirects fournis par les fonctions principales et secondaires, sont mises en avant.

En résumant l'organisation du guide, sont retenues les fonctions suivantes :

- L'étanchéité interne, regroupant des techniques de type écran mis en place dans le corps d'ouvrage (voire jusqu'en fondation) afin de limiter les écoulements internes à

l'ouvrage. Ces techniques ne présentent que rarement d'autres fonctions. Les fiches porteront sur les palplanches, le jet grouting, les parois minces ou moulées, les mélanges en place.

- L'étanchéité externe (ou sur parement coté eau), assurée par un parement en matériaux très peu perméable limitant les entrées d'eau dans le corps de l'ouvrage. Ces techniques peuvent présenter des fonctions secondaires de stabilité ou de protection externe. On trouvera des fiches sur les revêtements en sol peu perméable et les masques béton ou maçonnerie
- Le drainage assuré par des composants à la perméabilité significativement supérieure à celle du corps de l'ouvrage, dont le but est le contrôle de la piézométrie et des écoulements internes à la digue en collectant puis dirigeant ceux-ci vers des exutoires prévus à cet effet. Les fiches porteront sur les ouvrages de drainage sous recharge peu perméable, les ouvrages de drainage sans recharge.
- La filtration, obtenue par des composants permettant de retenir et/ou contenir les matériaux de granulométries diverses constituant l'ouvrage. Elle permet de limiter les risques d'érosion interne. Cette fonction est rarement recherchée seule et vient accompagner d'autres fonctions telle que le drainage. Les fiches porteront sur la filtration sous recharge drainante, les géotextiles filtrants.
- La stabilité, assurée à partir de techniques de terrassement et soutènement classiques, appliquées dans le contexte des ouvrages hydrauliques ou elles présentent systématiquement des fonctions supplémentaires (étanchéité, protection externe,...). Cette fonction sera représentée par des fiches portant sur les remblais composés de géoconteneurs, les remblais renforcés, les murs poids béton ou gabion, les rideaux de palplanches
- La rehausse, regroupant des techniques visant à adapter des linéaires de digue à des objectifs de protection supérieurs à ceux de l'ouvrage existant. On trouvera deux fiches portant sur les murettes anti—crue et les rehausses anti-crue amovibles.
- La protection externe, regroupant un large panel de techniques permettant à la digue de résister (directement ou non) à des actions extérieures (eau, chocs,...). On trouvera notamment des fiches portant sur les techniques mixtes et les techniques végétales, les enrochements liés ou non, les perrés, l'usage des blocs artificiels, la création d'épis de protection [4].
- Le traitement des problèmes associés aux transitions (c'est-à-dire le traitement des interfaces avec des composants de natures différentes) ou le traitement d'ouvrages traversants. C'est une fonction ponctuelle pouvant regrouper plusieurs des fonctions précédemment citées.
- Le traitement des problèmes associés à la végétation arborée et aux animaux fouisseurs.

Dans le guide, pour chacune de ces fonctions un chapitre développe les éléments communs à l'ensemble des fiches

associées et les critères de choix de la technique (ces éléments sont développés par la suite).

Afin de cadrer au mieux l'utilisation du vocabulaire dans l'ensemble des fiches, le guide est accompagné d'un glossaire présentant des termes qui souvent présentent des définitions différentes suivant les corps de métier et les contextes d'utilisation.

Le guide ne porte pas sur la thématique des réparations d'urgence qui présentent des contraintes spécifiques.

Organisation des fiches techniques

Chaque fiche présentant une des techniques est structurée autour de 6 chapitres principaux:

- Introduction : la technique et les termes principaux la décrivant sont définis, le contenu de la fiche est circonscrit, et les fonctions principales, et secondaires de la technique sont détaillées. Pour la plupart des techniques, des fonctions induites sont également données.
- Description : les performances recherchées pour la technique sont détaillées afin de répondre à ses fonctions, les cadres d'utilisation ainsi que les variantes envisageables pour la technique (même conception globale mais matériaux ou configurations différents).
- Alternatives : ce chapitre présente des techniques ayant des fonctions principales (voire secondaires) similaires à celles traitées. Ces alternatives peuvent faire l'objet de fiches techniques spécifiques du guide.
- Dimensionnement : les principes du dimensionnement du confortement sont présentés puis détaillés au travers des paramètres d'entrée, des modèles de calcul utilisables et de tous les éléments à étudier lors de la conception (choix entre les variantes, mise en œuvre,...)
- Aspects pratiques (CCTP, chantier) : ce chapitre se veut pleinement opérationnel en présentant des éléments particuliers à insérer dans un cahier des charges, en décrivant le déroulé d'un chantier type, les contraintes, les contrôles et les points singuliers qui nécessiteront une attention particulière lors de la réalisation.
- Bibliographie : celle présentée dans les fiches est spécifique à la technique présentée et se voit complétée par des références plus générales qu'on retrouvera dans les chapitres du guide regroupant les techniques utilisables pour chaque fonction ou dans l'introduction générale du guide.

Choix du type de confortement

Que ce soit en tant que décideur, concepteur, ou réalisateur, le choix du type de confortement est une étape importante du projet. La multiplicité des options peut le rendre difficile.

Dans ce paragraphe, par exemple il sera question

spécifiquement de critères relatifs aux fonctions, de stabilité et de rehausse.

Faire un choix suivant les besoins fonctionnels : cas des techniques de stabilité

Les techniques considérées à des fins de confortement de la stabilité de l'ouvrage dans le présent guide reposent sur l'amélioration des caractéristiques mécaniques du remblai et/ou la modification de sa géométrie :

- Recharge, reprofilage;
- Remblai technique
 - Remblais avec géoconteneurs ;
 - Remblais renforcés ;
- Mur poids (béton ou maçonnerie) ;
- Rideau de palplanches de soutènement ;
- Soutènement en gabion.

Il existe bien entendu d'autres techniques au stade de la recherche et/ou en cours de développement pour un usage sur les digues de protection (inclusions rigides ou semi rigides, sols traités à la chaux ou au ciment), ainsi que des solutions alternatives consistant en des reconfigurations de l'environnement coté eau (recul des digues, exhaussement du fond du lit mineur, réalisation d'épis ou de seuils...).

TABLEAU 1: CHOIX D'UNE TECHNIQUE DE STABILITE PAR FONCTION SOUHAITEE

(- non adapté ; + moyennement adapté ; ++ bien adapté ; ≈ dépendant des situations)

Choix de la technique de renforcement par fonction associée	Recharge, reprofilage	Remblais techniques	Mur poids (soutènement)	Palplanches (soutènement)	Soutènement gabion
Amélioration stabilité géomécanique (fonction principale)	++	++	++	++	++
Protection contre l'érosion externe	+	+	++	++	++
Protection contre l'affouillement	-	≈	++	++	++
Etanchéité de la digue	++	+	++	++	-
Rallongement des chemins hydrauliques	++	+	++	++	-
Drainage	≈	≈	-	-	++
Rehausse de la digue	++	+	++	+	+

Une première façon de faire un choix parmi les techniques est de partir des fonctions recherchées ; chaque technique est plus ou moins adaptée à remplir une ou plusieurs fonctions. Dans le cas des techniques d'amélioration de la stabilité, c'est ce que présente le [TABLEAU 1].

Faire un choix de technique suivant les contraintes techniques et liées à l'environnement de l'ouvrage

Afin de réaliser une rehausse, le guide considère les techniques suivantes :

- La réalisation d'un mur / muret / murette en crête de digue ;
- L'augmentation de la cote de crête par l'apport de remblais ;
- La mise en œuvre de dispositifs de protection amovibles contre les crues.

Une seconde façon de faire le choix parmi différents confortements (qu'on retrouve également pour la stabilité) consiste à s'attacher aux différentes contraintes pouvant être rattachées à la conception, la réalisation et l'état fini de l'ouvrage de confortement. Le [TABLEAU 2] présente ainsi différents contraintes pouvant être prises en compte dans le choix d'un confortement par rehausse d'une digue.

TABLEAU 2: CHOIX D'UNE TECHNIQUE DE REHAUSSE EN FONCTION DE CONTRAINTES

(- non adapté ; + moyennement adapté ; ++ bien adapté ; ≈ dépendant des situations)

Choix de la technique de rehausse en fonctions des contraintes	Rehausse par murette béton	Rehausse en remblai	Rehausse amovible
Protection contre le battillage	++	++	++
Tassement du corps de digue	=	++	=
Emprise foncière limitée	+	=	++
coût d'investissement	+	++	-
coût d'entretien	+	+	-
Rapidité de première mise en œuvre	-	-	++
Intégration paysagère	-	++	=

Certaines de ces contraintes sont purement techniques et donc peuvent être rattachées à des fonctions et des problématiques soulevées lors du diagnostic de l'ouvrage. D'autres sont plutôt de nature organisationnelle (emprise nécessaire, vitesse de mise en œuvre, disponibilité des matériaux,...), voire politique (coût, intégration dans l'environnement), auxquels cas les critères sont fixés par le décideur. Remarquons que ces choix de critères aboutissent souvent à des compromis et complexités de réalisation lorsque des linéaires importants sont traités.

Parmi ces contraintes, on notera aussi les défaillances potentiellement induites par la technique choisie soulevée par une analyse de risque de l'ouvrage conforté. Ces défaillances peuvent aller de l'inefficacité du confortement en cas de mise en œuvre inappropriée ou mal exécutée (généralement au niveau des interfaces entre l'ouvrage existant et la rehausse ou lors du traitement des ouvrages traversant) jusqu'à une accentuation voire la création de désordres tels que des tassements ou poinçonnements des sols d'assise, des phénomènes d'érosion interne selon divers mécanismes,...).

En associant l'ensemble des critères développés ici, selon les besoins, et les objectifs de l'utilisateur (concepteur, maître d'ouvrage,...) il est alors possible de retenir une technique plutôt qu'une autre pour réaliser un confortement de digue.

Généralement les critères techniques prépondérants sont la/les fonction/s recherchées et l'emprise disponible pour le confortement fini. S'y ajoute aussi souvent les contraintes budgétaires du maître d'ouvrage.

Concevoir et réaliser un confortement : étanchéifier en place un sol (sol mixé et injection)

Dans ce chapitre nous détaillerons des éléments issus de plusieurs fiches techniques relatives à la réalisation d'une étanchéité interne à la digue.

Concevoir une étanchéité interne

Selon des critères similaires à ceux présentés dans le chapitre précédent, un choix sera fait entre différentes techniques pour réaliser une étanchéité interne à la digue. Pour ces techniques, deux familles de conception sont distinguées :

- Les techniques avec apport de composants ou matériaux : rideaux de palplanche, paroi mince, paroi moulée
- Les techniques consistant au traitement des matériaux existant par incorporation de liant : les sols mixés ou mélange en place et les injections sous pression (jet grouting).

Nous ne parlerons ici que de cette deuxième famille.

Afin de mener à bien la conception de tels confortements, on se basera en premier lieu sur les éléments issus du diagnostic de l'ouvrage, au besoin complétés par des données issues d'une campagne spécifique de reconnaissances. Il sera notamment indispensable de disposer des données suivantes :

- Géométrie des ouvrages existants dont ceux inclus dans la digue (topographie, bathymétrie).
- Emprises de chantier envisageable.
- Informations sur l'hydrologie et l'hydraulique au niveau de l'ouvrage (particulièrement la présence de nappes).
- La composition géotechnique de la digue existante, et de la fondation et en particulier la compatibilité des matériaux avec les techniques.

Sur ces bases, le dimensionnement de l'étanchéité consistera à déterminer :

- Une épaisseur d'écran pour atteindre la perméabilité souhaitée ;
- Une profondeur d'écran et son extension latérale, y compris liaison avec les parties non traitées ;
- les valeurs de résistance mécanique et de déformabilité.

Afin de parvenir à définir ces grandeurs, des calculs itératifs seront réalisés afin de vérifier les éléments suivants :

- Le dimensionnement hydraulique interne de l'ouvrage avec son confortement et les gains par rapport à l'ouvrage initial en termes d'étanchéité.
- Les risques potentiels d'érosion interne.
- Le dimensionnement en termes de stabilité d'ensemble de l'ouvrage après travaux.

Ces différents aspects du dimensionnement vont généralement reposer sur des calculs d'hydraulique interne et de stabilité. Le raffinement des modèles utilisés (2D, 3D, couplage hydro-mécanique,...) nécessitera des méthodologies de résolution plus ou moins complexes (analytique, éléments finis,...) en fonction de la complexité du confortement. Ces calculs permettront ensuite de vérifier des critères d'état limite ou des valeurs seuil (coefficient de sécurité, gradient critique).

En termes de dimensionnement, une attention particulière sera à porter aux raccordements du rideau à l'existant (ouvrage aux extrémités et fondation). En effet, au niveau de ces raccords, les gradients de perméabilité formera des concentrations d'écoulement qui rendra généralement indispensable d'étudier cette partie en prenant en compte des effets 3D.

Bien entendu la conception ne repose pas uniquement sur des critères de dimensionnement macroscopiques ; mais également sur des considérations de mise en œuvre et de gestion du chantier qui conditionneront la méthodologie et les équipements utilisés (qui sont présentés dans le chapitre suivant). Parmi ces critères notons notamment :

- Les possibilités d'apport et d'évacuation de matériaux (distance avec la source, emprise disponible,...)
- Les quantités et la nature du liant à insérer (dosage du ciment).
- Les modalités d'incorporation du liant.

Mettre en œuvre une étanchéité interne en traitant le sol en place

Dans ce paragraphe nous distinguerons deux méthodologies :

- Celle liée à la mise en œuvre d'un rideau de sol mixé comme cela a été le cas sur plusieurs linéaires des digues de Loire à partir de 2012 [1].
- Celle liée à la mise en œuvre d'un rideau de colonnes en jet-grouting comme ça a été le cas sur les digues du canal de Jonage sur le Rhône en des endroits où le tirant d'air était faible [FIGURE 1].

Les chantiers de sol mixé (soil mixing) réalisés sur les digues de Loire ont été fait avec un outil similaire de type trancheuse-malaxeuse ; outil rotatif à axe vertical de largeur comprise entre 30 et 50 cm. Deux méthodologies d'incorporation du liant ont été mises en œuvre à la remontée de l'outil dont la rotation permet la déstructuration du sol permettant son mélange avec un liant :

- Par voie sèche, le liant est introduit en pied de l'outil sous forme pulvérulente et l'eau ajoutée au cours du malaxage.
- Par voie humide, le liant est introduit sous forme de coulis.

De manière générale, le mélange peut être réalisé selon différentes modalités et peut-être envisagé par hydrofraise, tarière,...

Les chantiers d'injection sous pression (jet-grouting ou assimilé) reposent également sur une déstructuration du sol suivi de son mélange avec un liant d'apport. Il suit les étapes suivantes :

- Forage en petit diamètre (100 - 140 mm) jusqu'à la profondeur à traiter
- Déstructuration du terrain en place à l'eau ou l'air (ou les deux) injectés sous haute pression (300 - 500 bars) et fort débits (200 - 350 l/s), défini par la géométrie à traiter et les caractéristiques du terrain en place.
- Injection faisant suite à la déstructuration tout au long de la remontée de la tige permettant l'injection.

Les vitesses de réalisation sont très variables suivant les dimensions de l'écran et les caractéristiques du sol en place, allant de quelques dizaines de mètre par jour pour les parois en jet-grouting à plusieurs centaines de mètres par jour pour les parois en sol mixé.

Afin de vérifier que la technique réponde bien aux exigences ayant abouti à son choix, différents contrôles sont réalisés :

- Avant de lancer la réalisation sur l'ensemble d'un linéaire,

un plot d'essai est systématiquement réalisé afin de permettre de valider le dimensionnement, les éléments de conception, les modalités de mises en œuvre retenues

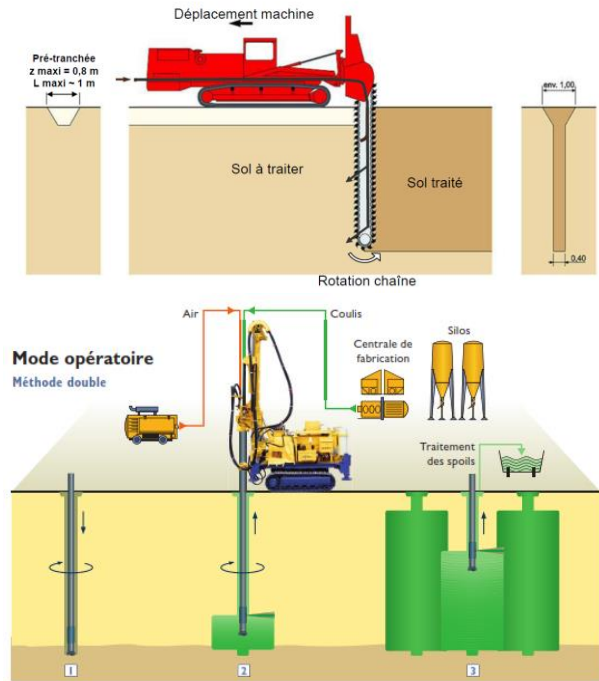


FIGURE 1 : PRINCIPE DE REALISATION D'UNE ETANCHEITE PAR TRAITEMENT DU SOL EN PLACE – SOL MIXE (1^{ère} illustration) ET INJECTION SOUS PRESSION (2^{nde} illustration) (Soletanche Bachy)

- En cours de chantier sont suivi différents paramètres permettant d'apprécier (au regard du plot d'essais notamment) la bonne réalisation : suivi du liant consommé, enregistrement des paramètres (vitesses de forage, injection, pression,...).
- A intervalle régulier des prélèvements de liant sont réalisés pour en étudier les caractéristiques à moyen et long terme (résistance à la compression). D'autres contrôles plus généraux peuvent être associés, par exemple un suivi du niveau d'eau dans le corps de digue en cours de chantier au travers de piézomètres dans le cas de digues en eau.
- En fin de chantier une vérification de la réalisation de l'écran est envisageable notamment pour les colonnes de jet grouting (dégarnissage, méthodes acoustiques,...).
- A long terme il est nécessaire de prévoir une surveillance/auscultation spécifique afin de s'assurer de la pérennité du confortement (mesures géophysiques, piézomètres, mesures de drains,...).

Lors de la réalisation de tels chantiers, les grandes problématiques qu'on cherchera à minimiser sont :

- Les vibrations pouvant créer des désordres à proximité sur le sol ou les ouvrages et bâtiments avoisinants. On

cherchera à les empêcher en associant surveillance et auscultation à des seuils ou critères limites qui engageront un arrêt du chantier.

- Des libérations de matériaux extraits de forages, liant,... dans des milieux sensibles, nécessitant des procédures pour les récupérer et les traiter (confinement en surface de la zone injectée, murettes de guidage, système de décantation,...).

Lors de la conception nous avons vu que certains points nécessitent un dimensionnement particulier ; en termes de mise en œuvre, ces points peuvent être traités dans le cas de la méthode du jet grouting en modulant les pressions d'injection ou/et éloignant suffisamment le départ du jet (notamment dans le cas de réseaux qui risqueraient d'être endommagés par les matériaux mobilisés par le jet)

Conclusion

Le guide ainsi formé permettra plusieurs approches de lecture permettant de répondre aux besoins d'une grande variété d'utilisateurs en allant des décideurs, aux réalisateurs, des étudiants aux ingénieurs les plus expérimentés. On notera notamment la possibilité de chercher des informations par une entrée soit par la fonction recherchée, soit par la technique utilisée ;

Le guide permettra d'avoir accès aux éléments suivants :

- Information qualitative afin de comprendre les enjeux/objectifs des techniques ;
- Éléments nécessaires pour rédiger un cahier des charges ou prendre une décision sur le choix d'une technique ;
- Méthodologie et modèle pour dimensionner un confortement (notamment en référence avec la bibliographie) ;
- Indications sur la mise en œuvre de la technique retenue.

Outre cette multiplicité d'entrée, le guide se veut un tout et non un ensemble de fiches techniques, dans la mesure où une digue est rarement confortée afin de traiter un unique désordre et/ou que plusieurs fonctions sont généralement recherchées. Cela passe notamment par la structuration du guide et des fiches permettant des renvois et complémentarités, comme cela a pu être présenté dans la troisième partie de cette communication.

Ce guide sera diffusé par le CFBR suite à sa validation par la Commission Exécutive. Une première version du guide est envisagée par le groupe de travail pour le début d'année 2019.

Remerciements

Les auteurs de cet article, en charge de l'animation des travaux du groupe de travail et de chacun des sous-groupes le

constituant, tiennent à remercier l'ensemble des différents contributeurs aux travaux, membres des sous groupes ou contributeurs d'études de cas.

Références

- [1] Poulain D., Tourment R., Chalus B., Chapuis H., LeKouby A., Monier T., Pestel A., Patouillard S., Saudey L., Techniques de réparation des digues (2018); 26^{em} congrès des grands barrages, Vienne, Autriche, juin 2018.
- [2] CIRIA, International Levee Handbook –Chapter 5 Levee inspection, assessment and risk attribution, 2013.
- [3] MEDDTL, Référentiel technique digues maritimes et fluviales, 2015
- [4] Ledoux P., Vuillermet E., Artières O., Boussafir Y., Chalus B., Cortier B., Monier T., Brune A., Protections externes de digues : un Groupe de travail du CFBR présente des méthodes de réparation et confortement, Digue 2019, France.
- [5] Mériaux P., Royet P., Folton C., Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires – surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations, Cemagref Editions 2004.