

# Protections externes de digues : un Groupe de travail du CFBR présente des méthodes de réparation et confortement

## *Surface protections on levees: several types of remedial works*

P. Ledoux<sup>1</sup>, E. Vuillermet<sup>2</sup>, O. Artières<sup>3</sup>, Y. Boussafir<sup>4</sup>, B. Chalus<sup>5</sup>, B. Cortier<sup>6</sup>, T. Monier<sup>7</sup>, A. Brune<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Cerema, Aix-en-Provence, patrick.ledoux@cerema.fr

<sup>2</sup> BRLi, Nîmes, Eric.Vuillermet@brli.fr

<sup>3</sup> TENCATE, Bezons, o.artieres@TENCATE.com

<sup>4</sup> Ifsttar, Marne-La-Vallée, yasmina.boussafir@ifsttar.fr

<sup>5</sup> CNR, Lyon, B.Chalus@cnr.tm.fr

<sup>6</sup> Setec Hydratec, Lyon, Cortier@hydra.setec.fr

<sup>7</sup> Artelia, Grenoble, Thierry.MONIER@arteliagroup.com

### Résumé

Cette communication s'attache à décrire quelques techniques de protection externe des digues de protection contre les inondations fluviales et les submersions marines, leurs principes de dimensionnement et les aspects essentiels des travaux sur ces ouvrages.

La « protection externe » regroupe les composants structurels de la digue dont la fonction géotechnique principale est la résistance à l'érosion externe, celle-ci provenant de l'action de l'eau ou d'autres agents.

Elle est également employée pour résister aux agressions externes dues aux animaux fouisseurs, aux racines, aux actions anthropiques...

La protection externe peut, selon les techniques utilisées et les conditions dans lesquelles elle est employée, contribuer à d'autres fonctions comme la stabilité mécanique d'ensemble, l'étanchéité ou le drainage.

Cet article aborde aussi les intérêts de certaines techniques pour l'intégration paysagère et environnementale, ainsi que pour la gestion de situation d'urgence

Les techniques présentées dans cette communication sont :

- les blocs artificiels (ouvrage maritime) ;
- les techniques mixtes ;
- les palplanches en pieds de talus ;
- les perrés maçonnés ;
- les tubes et sacs géotextile remplis de sable ;
- les parements de digue en béton.

### Mots-Clés

Digue, protection, érosion, dimensionnement, travaux.

### Abstract

This publication aims at introducing several types of surface

protections on coastal and fluvial levees. It describes their design principles and key points of their construction process.

« Surface protection » refers to structural components of levees, which have a geotechnical function to contain external erosion, under water action or other external aggression.

Surface protection is also necessary to resist damages due to burrowing animals, roots or human activities...

Depending on the technic used and external conditions, surface protection may also improve other functions of the levees such as mechanical stability, impermeability or drainage.

This article also describes the advantages of some of these technics of surface protection in landscaping incorporation, or their convenience in crisis management.

Technics described in this paper are :

- armourstones,
- joint technics,
- steel sheet pilings at the toe of embankments,
- masonry protection,
- tubes and geotextiles filled with sand;
- continuous concrete protection.

### Key Words

Surface protection, flood defence, erosion, levee design, surface protection, construction process

### Introduction

Dans le cadre du CFBR, un groupe de réflexion composé de maîtres d'ouvrage, de bureaux d'étude, d'administrations, d'entreprises de travaux et de chercheurs a été constitué afin, d'une part, de faire un état des méthodes utilisées en

réparation (suite à désordres ou brèches) et en renforcement ou confortement de digue, et, d'autre part, de faire les recommandations techniques pour chaque type de réparation et renforcement. Ces travaux font l'objet d'un guide diffusé par le CFBR dont la première version est envisagée pour début 2019. Des fiches par techniques de réparation ont été produites, la présente communication concerne **les techniques de protection externes**.

La « protection externe » regroupe les composants structurels de la digue dont la fonction principale est la **résistance à l'érosion externe**, celle-ci provenant de l'action de l'eau ou d'autres agents.

Elle est également employée pour résister aux agressions externes : animaux fouisseurs, racines, actions anthropiques...

Cependant, la protection externe peut, selon les techniques utilisées et les conditions dans lesquelles elle est employée, contribuer à d'autres fonctions :

- la stabilité mécanique d'ensemble ;
- l'étanchéité de la digue ;
- le drainage ;
- l'auto-filtration.

### Problèmes traités par la protection externe

L'érosion externe regroupe tous les mécanismes qui provoquent un départ de matériaux sous l'effet de sollicitations s'appliquant sur la surface extérieure de la digue. Ces départs de matériaux induisent une diminution de la section de la digue et/ou un raidissement local du talus ce qui conduit à diminuer sa résistance.

L'érosion externe par l'eau "contenue" par une digue touche régulièrement le parement côté cours d'eau ou mer et, pour des situations hydrologiques généralement moins fréquentes, la crête et le talus côté zone protégée qui peuvent être soumis à la surverse ou aux franchissements. L'érosion externe est aussi dans une moindre mesure la conséquence d'agressions météorologiques (pluie, vent, gel) ou autres (humains, animaux, accidents...).

La protection externe permet d'éviter le contact entre le corps de digue et l'agent érosif :

- les écoulements fluviaux ou marins (houle, marée...) ;
- les écoulements en surface par surverse, par ravinement lié à la pluie ;
- les effets du batillage par action des vagues générées par le vent (clapot, vagues), ou par la navigation (batillage) ;
- les passages répétés d'engins divers.

Elle peut constituer aussi une barrière dissuasive pour les animaux fouisseurs.

Elle peut donc concerner différentes parties de l'ouvrage :

- le talus côté cours d'eau ou côté mer ;
- la crête ou la risberme ;
- le talus côté zone protégée ;
- le pied des talus.

### Les techniques alternatives à la protection externe

D'autres solutions sont également possibles pour limiter l'érosion de l'ouvrage en diminuant les sollicitations hydrauliques sur celui-ci, telles que :

- le recul des digues du lit mineur ou de la mer ;
- l'adoucissement de la pente des talus ;
- la végétalisation de l'espace entre le lit mineur et la digue ;
- l'engraissement du lit mineur à proximité des berges ou de l'estran ;
- la réalisation d'épis de protection par enrochements ;
- la réalisation de seuil en rivière.

### Défaillances des protections externes

Différentes dégradations du dispositif de protection externe peuvent se produire, telles que :

- pour les bitumes : fissures, affaissement, effondrement ;
- pour les enrochements, descente dans le talus, baisse de blocométrie (effet du gel, érosion chimique) ;
- le vieillissement des maçonneries, soit de leurs moellons soit plus fréquemment du liant, mais aussi parfois une dégradation des matériaux support.

Sans intervention, différents stades de dégradations peuvent être successivement observés, auxquels correspond un degré de risque associé :

- risques modérés :
  - dégradation progressive des états de surface,
  - perte d'étanchéité (si cette fonction n'est pas essentielle) ;
- risques forts :
  - mise en charge hydraulique du talus aval (si la protection dégradée jouait également le rôle d'étanchéité),
  - affaissement du talus côté eau ou de la crête de digue,
  - affaissement, éboulement du talus coté zone protégée ;
- risques graves :
  - rupture localisée du talus amont,
  - rupture localisée du talus aval,
  - brèche.

### Blocs artificiels

Les blocs artificiels constituent une variante souvent intéressante lors de la reconstruction d'un ouvrage maritime totalement ou partiellement endommagé par les tempêtes.

Destinés à protéger le corps de digue des effets de la houle et des courants, ces ouvrages se composent classiquement de trois parties couvrant un noyau en remblai :

- La sous-couche (figures 1 et 5) ;
- La butée de pied (figure 2) ;
- La carapace monocouche (figure 3).

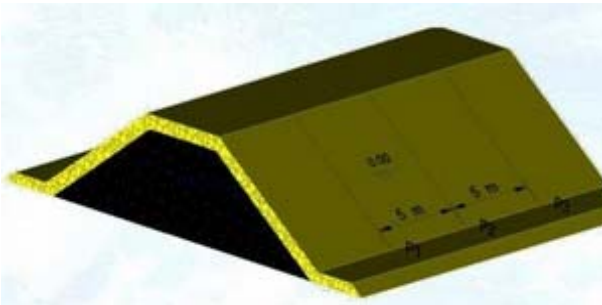


FIGURE 1: SOUS-COUCHE

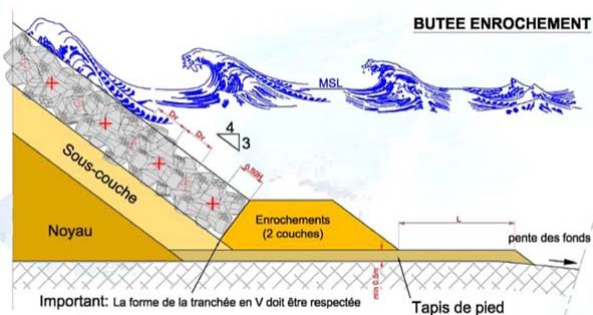


FIGURE 2: BUTEE DE PIED

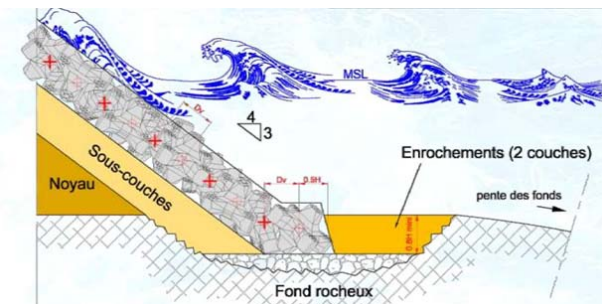


FIGURE 3: CARAPACE POSEE SUR FOND ROCHEUX

Les blocs artificiels disposés en une couche exigent le respect d'un plan de pose très strict destiné à garantir par une imbrication maximale la densité de pose théorique (figure 4). La pose s'effectue à la grue par élingage des blocs en utilisant un système de positionnement (GPS), voire un logiciel d'assistance à la pose. Le contrôle sous-marin s'effectue par plongeur ou par imagerie numérique de type Echoscope.

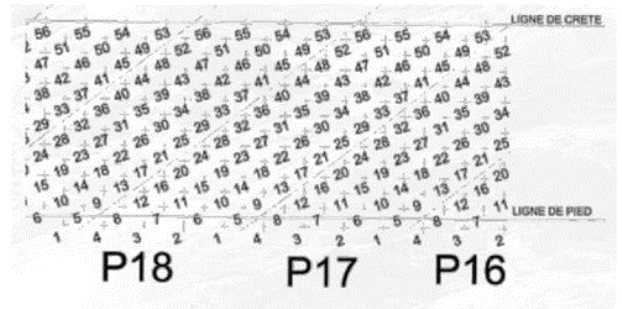


FIGURE 4: PLAN DE POSE

L'objectif de la pose des blocs artificiels est d'obtenir une carapace stable en accord avec les principes suivants :

- densité de pose comprise dans les limites de +/- 5 % de la densité théorique ;
- les blocs sont répartis sur une couche et aucun bloc ne doit figurer hors profil (moins de 1/3 du bloc en dehors de la carapace). Chaque bloc est en contact avec la sous-couche ;
- les blocs sont imbriqués entre eux et n'ont pas de liberté de mouvement ;
- le maillage losange est globalement présent, les particularités locales sont tolérées ;
- les enrochements de sous-couche ne peuvent pas être extraits si des aérations existent entre les blocs ;
- les blocs sont dans des altitudes globalement variées.

Il est généralement conseillé de suivre la méthode suivante pour la progression de la pose (figure 5) :

- mise en place des 4 premières lignes de blocs sur une zone de pose ;
- mise en place du renforcement de butée de pied avec les enrochements ;
- pose des lignes au-dessus de la quatrième ligne de blocs jusqu'au-moins 3 ou 4 lignes au-dessus du niveau d'eau.

Ces principes évitent notamment d'endommager la sous-couche en cas de houle en phase chantier.



FIGURE 5: CARAPACE EN COURS DE POSE

## Les techniques mixtes

En matière de protection de digues, les techniques d'aménagement dites « mixtes » consistent à associer les solutions minérales du génie civil aux techniques issues du génie biologique.

Les digues, constituant des ouvrages de sécurité publique, la plus grande attention doit être apportée en phase de conception et le choix des techniques doit se faire avec discernement. Notamment, on privilégiera les techniques mixtes en pied de digue, point sensible à l'érosion externe. Dans ce cas-là, le matériel végétal est complémentaire de la protection minérale, qui assure la fonction principale de protection contre l'érosion externe.

La plus-value apportée par ces techniques va au-delà de la simple intégration paysagère visible en figure 6. Elles permettent en effet de gagner en biodiversité des milieux, elles sont complémentaires des solutions végétales qui peuvent être développées dans le lit mineur du cours d'eau.



FIGURE 6: RESULTAT AVANT ET APRES PLANTATION DE PIED

### Fonction principale

Les techniques mixtes répondent à un objectif de lutte contre l'érosion externe. La protection externe des parements a pour fonction d'avoir un ensemble présentant un pouvoir de résistance aux forces tractrices.

Dans le cadre d'une réparation de digue en place, un diagnostic visuel sera donc important pour localiser et déterminer l'ampleur des phénomènes d'érosion, et les éventuels facteurs d'accélération (présence de souche, ouvrage béton, « rustine » ...).

### Principes de dimensionnement

Au-delà des calculs classiques de stabilité mécanique de digue, il convient de vérifier :

- la stabilité de la protection à l'érosion (blocs, gabions, matelas...);
- suivant les cas, calcul d'écoulement interne (défaillance du corps de digue) ;

- l'impact de la végétation sur les écoulements en crue. Pour les deux derniers items, il est donc primordial de bien choisir les espèces végétales, locales de préférence, en fonction à la fois de leur système racinaire mais également en fonction de leur développement hors terre après quelques saisons.

### Éléments de conception et de mise en œuvre

Le calage altimétrique de la protection à mettre en œuvre est un élément important à prendre en compte lors de la conception, que ce soit vis-à-vis de la fréquence des crues ou par rapport au niveau d'eau en débit d'étiage.

Les caractéristiques de la couche support de la protection doivent être connues afin de déterminer la nécessité d'une couche filtre (matériaux ou géotextile).

Pour favoriser le développement des végétaux au cœur de la protection minérale, un mélange de matériaux limono-graveleux est mis en œuvre par bourrage hydraulique dans les interstices de la protection.

Ensuite, la mise en œuvre des végétaux (herbacées, arbustes, héliophytes...) suit la méthodologie suivante (figure 7) :

- préparation des trous à la barre à mine ;
- immersion des végétaux pour meilleure humidification des racines ;
- 1 plant par interstice et comblement des vides par complément de matériaux.

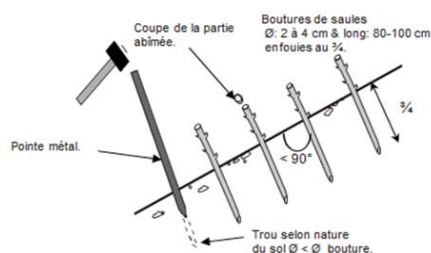


FIGURE 7: PRINCIPE DE MISE EN ŒUVRE DES BOUTURES DANS UNE PROTECTION MINÉRALE

La période de travaux est évidemment cruciale que ce soit pour les conditions hydrologiques ou hydriques.

Pour l'entretien, une à deux opérations de fauchage/broyage par an seront nécessaires pour contenir la colonisation ligneuse. Afin de limiter la reprise de la végétation, les fauches et broyages seront réalisés en période de végétation (durant l'été).

### Les palplanches en pied de talus

Dans les zones très exposées aux affouillements, il peut être nécessaire d'apporter des protections sous la forme d'un rideau de palplanches jointives. Ces protections permettent d'éviter le phénomène d'affouillement en pied d'ouvrage tout en assurant la stabilité de la digue. Elles sont souvent mises en œuvre dans les méandres de fleuve ou rivière plus

rarement sur les côtes maritimes. Nécessitant un dimensionnement précis, la technique est rarement mise en œuvre en urgence.

### Fonctions principales et secondaires

Enfoncées profondément dans le sol, profondeur pouvant atteindre 20 m, les palplanches forment un ensemble jointif, appelé rideau de palplanches, retenant la terre et assurant l'étanchéité. Les formes les plus courantes sont en métal, mais on peut faire appel à d'autres matériaux tels que les profilés en bois, en béton armé ou en PVC.

Le rideau de palplanche peut assurer seul la protection contre l'affouillement. Il est dans ce cas bien visible en pied de talus et assorti de dispositifs d'accompagnement permettant de faire la jonction avec l'ouvrage en terre (figure 8).



FIGURE 8: PROTECTION DE PIED DE DIGUE PAR PALPLANCHES LIAISONNEES EN TETE PAR UNE LONGRINE EN BETON (ST BENOIT-SUR-LOIRE, 45) (CREDIT DREAL CENTRE VAL DE LOIRE)

Le rideau de palplanches peut jouer le rôle d'écran de soutènement pour le corps de digue et il est d'ailleurs dimensionné comme tel, en supposant l'absence de butée côté rivière. Comme il s'agit d'un voile étanche enfoncé profondément dans le sol, le rideau limitant le risque d'érosion interne dans la fondation en allongeant le chemin hydraulique.

Ce type d'ouvrage est en général difficile à entretenir [5] et il conduit à une augmentation des vitesses de courant parallèlement à l'ouvrage ce qui peut déplacer le potentiel érosif vers l'aval. Les zones de transitions de part et d'autre du rideau doivent être particulièrement soignées. Pour toutes ces raisons, cette technique est souvent retenue en dernier recours. À cela il faut ajouter que la technique est souvent relativement chère et parfois difficile à réaliser.

### Dimensionnement

Le rideau de palplanches est dimensionné comme un ouvrage

de soutènement [1], [2] et [3]. La stabilité de la digue est calculée sans prendre en compte la butée de pied devant les palplanches sur toute la hauteur potentiellement soumise à l'affouillement.

Les éléments de sortie du dimensionnement sont, selon les Recommandations du CFBR [4], pour les états limites ultimes :

- la stabilité de l'écran vis-à-vis d'une rupture par défaut de butée (stabilité externe) ;
- la résistance de la structure de l'écran (vérification de la résistance aux efforts tranchants, moments fléchissants, efforts normaux...) ;
- le cas échéant, la stabilité des tirants d'ancrage (résistance des tirants et résistance à l'arrachement) ;
- l'absence d'interaction entre l'écran et un ancrage ;
- la stabilité du fond du lit vis-à-vis d'une rupture par soulèvement hydraulique global du terrain ;
- la stabilité d'ensemble de l'écran (stabilité globale) ;
- et pour mémoire, la portance de l'écran si l'écran supporte des charges verticales (ce qui n'est pas le cas en théorie) ;
- pour les états limites de service, il faut vérifier que :
  - les efforts supportés par l'écran restent admissibles pour la structure de l'écran (en cas de fissuration inacceptable, de corrosion),
  - l'effort supporté par un tirant reste admissible pour sa structure et pour éviter un fluage important de l'ancrage.

### Éléments de conception

L'étude de conception doit établir :

- le modèle de sol (nature, granulo et blocométrie, résistivité, densité...) et les modules pressiométriques associés ;
- le modèle hydrogéologique (niveaux d'eau, vitesses, agressivité...) et les éléments de conceptions associés (sensibilité aux vibrations, accessibilité au site, présence de réseaux ou d'ouvrages...) ;
- les éléments de sortie de l'étude préciseront entre autres :
- les types de palplanches prévus (matériau, longueur, profilé, épaisseur, serrures...),
- les ancrages nécessaires,
- les compléments (liaisonnement, protection anticorrosion, injections...) et autres matériaux (béton, boulons, barres, coulis, remblai...) ;
- le procédé de pose (battage, fonçage, vibro-fonçage...) depuis la terre ou sur barge,
- le traitement des difficultés (passages indurés ; passage de réseaux, gestion des nuisances des déchets...) ;
- les contrôles : bruit, vibrations, des longueurs, protection anticorrosion, tests d'arrachement des ancrages... ;
- les périodes de pose (intempéries, vent, étiage...) et les éléments pour la gestion ultérieure (accès, témoin de corrosion...)

Cette liste n'est évidemment pas exhaustive.

## Les perrés maçonnés

De nombreux ouvrages anciens intègrent dans leur conception des protections en perré maçonné (figure 9). Le vieillissement de leurs constituants (dégradation des mortiers de scellement, érosion des moellons parfois associé à un manque d'entretien) conduit à engager des réparations pour permettre de conserver l'intégrité de ces ouvrages de protection.

### Fonctions principales et secondaires

Le terme « perré maçonné » s'applique aux protections de talus de digue constitués de moellons agencés et jointoyés. Côté cours d'eau, s'il peut assurer une fonction de stabilité de peau, il est surtout retenu pour sa fonction de protection contre l'érosion externe en protégeant le talus des écoulements longitudinaux. Associé à un parafeuille amont, le perré assure aussi une fonction d'étanchéité. Côté val, sa fonction s'apparente en général à la stabilisation de talus raidis. On cherchera à maintenir son drainage.



FIGURE 9: PAREMENT AMONT EN PERRE MAÇONNE – DIGUE DE LA MONTAGNETTE – TARASCON (13) (CREDIT BRLI)

### Diagnostic – Éléments de conception

La conception d'ouvrage neuf en perré maçonné reste rare. Les réparations s'apparentent à une remise en état « à l'identique », si l'on veut ou doit conserver l'aspect visuel de l'ouvrage, ou à une réparation par substitution. La base de toute réparation réside dans la recherche de l'origine des désordres au travers de l'engagement d'un diagnostic. Ce dernier doit s'intéresser à l'état :

- des moellons : dégradation des blocs par altération liée à la nature même de la roche mère, aux actions de cycle de gel dégel, aux actions chimiques...
- des joints, notamment à leur nature : joint au mortier de chaux, au mortier bâtard, au mortier de ciment...
- du support : présence d'une cavité sous-jacente, départ

de fines au travers des joints dégradés, dégradation liée à la présence d'un ouvrage hydraulique défaillant...

- de l'environnement : action racinaire de la végétation...

### Éléments de conception des réparations

Les réflexions quant aux techniques de réparations porte sur :

- la ressource locale en moellons (disponibilité, qualité, éloignement) si on recherche une reconstitution à l'identique et que les pierres sont manquantes et, dans le cas contraire, le réemploi après extraction soignée des pierres originelles,
- les travaux préparatoires de nettoyage des joints, reconstitution de la couche support ;
- l'accessibilité au site lors de la mise en œuvre ;
- les conditions environnementales, notamment lors des travaux préalables de nettoyage : poussières, gestion des eaux de lavage...
- l'intégration architecturale avec contraintes pour les sites classés « Monument historique ».
- Les travaux de réparation doivent bien préciser :
  - la zone d'extension et la nature de la réparation : rejointoiement seul, reprise de maçonnerie incluant ou non la reprise du support ;
  - la nature des matériaux : moellons, mortier et matériaux support.

Pour les rejointoiements (figure 10), on s'attachera à la qualité des travaux de préparation de dégagement des joints : laveuse Haute-Pression, disqueuse à air, burineurs pneumatiques... La panoplie d'outil est large ; on veillera que la technique déployée permette l'enlèvement des mortiers dégradés sans impacter les matériaux sous-jacents. On ne saurait trop conseiller une planche d'essai pour valider la procédure.

Pour la reprise de support, on s'attachera à obtenir un matériau peu compressible : du matériau bien compacté à la grave-ciment ou béton poreux. Le choix doit intégrer la fonction secondaire de ce matériau, telle que simple support ou support drainant.



FIGURE 10: REJOINTOIEMENT AU PISTOLET – DIGUE DE LA MONTAGNETTE – TARASCON (CREDIT BRLI)

### Tubes et sacs géotextile remplis de sable

#### Fonctions principales et secondaires

Pour protéger et stabiliser les digues contre l'érosion externe, les sacs et les tubes géotextiles sont des alternatives économiques à faible impact environnemental par rapport aux enrochements ou aux éléments préfabriqués en béton.

De plus, ils permettent d'assurer d'autres fonctions, tant sous l'eau qu'en surface :

- stabilisation mécanique du talus (recharge poids en pied),
- rehausse d'ouvrage,
- réparation (en urgence ou non) d'un ouvrage hydraulique grâce à une mise en œuvre rapide, facile et à coûts maîtrisés avec des matériaux du site,
- création de batardeaux,
- dessiccation et confinement de boues et de vases draguées.

#### Les différents types

Les éléments de conteneurisation sont constitués d'une enveloppe géotextile perméable et très résistante formant soit des tubes allongés soit des sacs massifs. On les classe selon leur volume de confinement :

- Les sacs géotextile, éléments de forme quasi-parallélépipédiques de quelques centaines de kg à 2 tonnes (Figure 11). Ils sont en général remplis sur place par un dispositif à trémie ;
- Les tubes géotextiles, éléments très allongés de plusieurs dizaines de mètres de long et de 2 à 15 m<sup>2</sup> de section, soit de 4 à 30 tonnes par mètre linéaire de tube. Ils sont en général remplis sur site par pompage hydraulique d'un mélange eau/sable, installés au sec ou dans l'eau à faible profondeur (< 3 m) (Figures 12 et 13) ;
- Les conteneurs géotextiles, très gros sacs de 20 à 30 ml de long, de 100 à 600 m<sup>3</sup>, remplis dans une barge et

clapés à grande profondeur (> 3 m). Ils sont utilisés au large de digues maritimes pour réaliser des brises lames ou des récifs artificiels.



FIGURE 11: PROTECTION PAR DES SACS GEOTEXTILES.

Ce sont tous des éléments poids qui sont stables vis-à-vis des forces hydrodynamiques par leur faible rugosité de surface réduisant les forces de frottement, leur élancement conduisant à un ancrage au sol uniformément réparti, leur flexibilité relative autorisant de petits déplacements. Ils protègent la surface des talus ou leurs pieds contre l'érosion externe. Ces éléments doivent être complétés par une couche de filtration et d'anti-affouillement géotextile.



FIGURE 12: REMPLISSAGE D'UN TUBE GEOTEXTILE



FIGURE 13: CORPS DE DIGUE PORTUAIRE EN CONSTRUCTION PROTEGE DE LA MAREE PAR DES TUBES GEOTEXTILE

En variante au sable, les géomatelas type INCOMAT remplis de béton ont été utilisés avec succès en 1993 sur le canal de Jonage pour les fonctions d'étanchéité et de protection contre l'érosion externe du parement en amont de la digue.

#### Dimensionnement

Le dimensionnement d'une protection externe en sacs géotextiles est assez proche de celui des enrochements ronds et peu rugueux dont la stabilité est comparable.

Le dimensionnement des tubes géotextile est essentiellement empirique et basé sur des essais en canal ou sur des retours d'expérience d'ouvrages. L'enveloppe géotextile doit :

- séparer les particules sableuses de la mixture de remplissage ;
- conserver une perméabilité de paroi pour l'essorage de l'eau ;
- résister en traction au gonflement lors du remplissage (coutures incluses) ;
- limiter sa déformation pour monter en hauteur et réduire le volume de remplissage ;
- résister au poinçonnement d'éléments agressifs en cours ou post remplissage ;
- résister à l'exposition aux UV le cas échéant.

### Les parements de digue en béton

Certaines digues construites au cours du XXe siècle ont été réalisées avec des parements amont (aussi appelés masques amont) en béton de ciment ou béton bitumineux. Le vieillissement de ses structures, les défauts de drainage derrière les dalles et le manque d'entretien conduisent à devoir engager des réparations pour permettre de conserver l'intégrité de ces ouvrages de protection, comme pour les digues du Reyran à Fréjus, figure 14.

#### Fonctions principales et secondaires

Les dalles en béton constituant le parement amont de ces digues de protection assurent plusieurs fonctions : étanchéité amont de la digue, protection contre l'érosion externe et diminution de la rugosité des berges limitant les pertes de charge linéaire et contribuant à l'abaissement des lignes d'eau.

#### Diagnostic – Éléments de conception

On ne construit plus de digues de protection fluviales munies de parement amont en béton pour des raisons environnementales et de coût, hormis pour les canaux d'irrigation de navigation fluviale ou hydroélectriques, comme en 2011 pour le canal de Curbans avec une réfection complète du parement amont en béton bitumineux. Ces ouvrages nécessitent une surveillance continue et un entretien régulier pour veiller à préserver l'intégrité de la structure et éviter la formation de désordres cachés (en particulier la formation de cavités sous les dalles).



FIGURE 14: DIGUES AVEC PAREMENT ET RADIER EN DALLES BETON SUR LE REYRAN A FREJUS (83)

Les réparations des ouvrages existants nécessitent au préalable un diagnostic détaillé pour s'assurer de l'absence de vide sous les dalles et vérifier le fonctionnement du dispositif de drainage. Ce dernier s'avère en effet indispensable pour éviter la formation de sous-pression derrière le perré bétonné.

Les données nécessaires à la conception des réparations sont :

- le diagnostic géotechnique du remblai (nature et caractéristiques mécaniques des matériaux, nature de la couche support, identification de zones décomprimées...)
- le diagnostic des ancrages : existence ou non d'une longrine de pied, profondeur d'ancrage...
- la radiographie pour repérage des cavités sous l'ancien perré béton ;



- le calcul de stabilité de la digue sans prise en compte des dalles ;
- La connaissance de la structure du perré existant (ferraillé ou non ferraillé) et de la résistance du béton (résistance à la compression, module de déformation, résistance à la traction) ;
- les données hydrauliques pour la crue de projet ; hauteur d'eau, vitesse, contraintes d'affouillement, écoulement interne.

### Éléments de conception des réparations

Les réparations s'attacheront à reconstituer le sol support, le dispositif de drainage indispensable sous les dalles et en pied de dalle, la butée de pied qui pourra faire office également de para fouille.

Le dimensionnement portera sur :

- la résistance des dalles béton aux efforts de traction (prise en compte d'un défaut de portance) ;
- la butée de pied jouant le rôle de para fouille et de drain ;
- le drainage derrière le parement. Ce point s'avère d'une importance primordiale pour éviter les risques de sous pressions derrière les digues. Il doit être associé à un filtre mis en place entre le corps du remblai et le matériau drainant. Les eaux drainées derrière le perré peuvent être éjectées par des barbicanes, visibles sur la figure 15, ou collectées dans la longrine en pied de talus ;
- le dispositif anti migration des fines (filtre) pour éviter la formation de cavités sous les dalles devra satisfaire les règles usuelles de filtre ;
- le traitement des joints entre dalles (mortier de réparation, mastic élastomère).

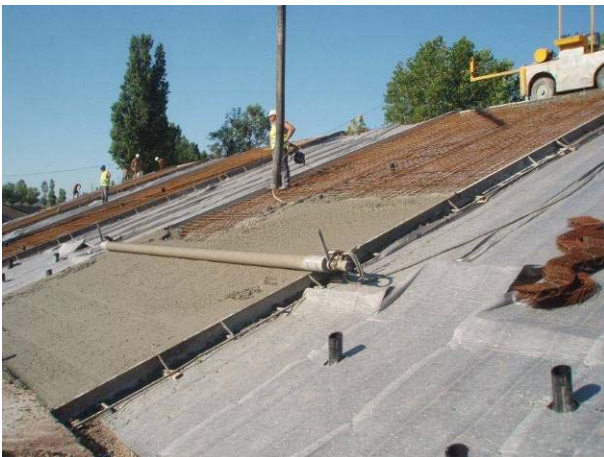


FIGURE 15: REPARATION DES DALLES DU REYRAN - PHASE DE BETONNAGE APRES FERRAILLAGE

### Conclusion

La fonction principale de la protection externe est de permettre à la digue de résister aux sollicitations hydrauliques qui peuvent conduire à une érosion de sa surface externe, côté cours d'eau ou mer en premier lieu, mais aussi de sa crête et du talus opposé. Pour cette même fin, on peut aussi agir en utilisant des techniques qui réduisent les sollicitations au droit de l'ouvrage.

Cet article développe notamment les points suivants :

- la structure et la pose des blocs artificiels ;
- les principes de dimensionnement et la méthodologie de mise en œuvre des techniques mixtes ;
- les principes de dimensionnement et conception pour les palplanches posées en butée de pied ;
- le diagnostic et la conception des réparations des perrés maçonnés et bétonnés ;
- les différents types et les principes de dimensionnement.

Selon les techniques utilisées pour la protection externe, d'autres fonctions utiles à l'intégrité de la digue et à la conservation de ses performances peuvent également être assurées par le dispositif, telles que :

- l'intégration paysagère et le gain en biodiversité pour les techniques mixtes ;
- le soutènement et la limitation du risque d'érosion interne pour les palplanches posées en butée de pied ;
- la stabilité de talus et l'étanchéité pour les perrés ;
- les réparations d'urgence et la rehausse d'ouvrage pour les sacs et les tubes géotextile remplis de sable.

### Références

- [1] AFNOR (2009). *NF P 94-282 : Calcul géotechnique – Ouvrages de soutènement – Ecrans*.
- [2] AFNOR (1999). *NF EN 12063 Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Rideaux de palplanches*.
- [3] CETMEF. *ROSA 2000. Recommandations pour le calcul des états limites des ouvrages en site aquatique*. Ed. Cetmef. Fascicules « rideaux de soutènement » et « exemples commentés de notes de calcul, rideau de soutènement ancré ».
- [4] CFBR (2015). *Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai*. Version approuvée en commission exécutive du CFBR le 9 octobre 2015. 132 pages.
- [5] LCPC (2003). *Ouvrages de soutènements. Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des rideaux de palplanches métalliques*. Guide technique. Coll. Techniques et Méthodes des LPC.
- [6] POULAIN, SUTTER, TOURMENT, MAURIN, AUGER, CHEVALIER, DENIAUD, LEDOUX, MALLET, PALACIOS, PINHAS (2018) : « *Guide Technique CFBR – Méthodes et techniques de confortement des digues* »