Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai

mai 2021

Partie II - Fiches

Cfbr
comité français des barrages et réservoirs

Edition CFBR – 2021
www.barrages-cfbr.eu

Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai – Fiches

Ce document est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions 3.0 France. Pour accéder à une copie de cette licence, merci de vous rendre à l'adresse suivante https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr.

Crédit photo page de couverture : Vue du chantier de confortement de la Grande Levée de l'Authion en mars 2021 à Varennes-sur-Loire (49) (Crédit photo : Cédric Helsly).

FICHES TECHNIQUES

Partie II

1. Fiches techniques

FT G1. Généralités sur les palplanches

FT 3.1. Rideau de palplanches à fonction d'étanchéité
FT 3.2. Paroi mince
FT 3.3. Paroi moulée à fonction d'étanchéité
FT 3.4. Sol mixé/mélangé en place
FT 3.5. Écran d'étanchéité réalisé au moyen de la technique du jet grouting
FT 3.6. Masque en matériaux naturels faiblement perméables

FT 4.1. Dimensionnement d'un géotextile de filtration
FT 4.2. Dimensionnement d'un sol de filtration
FT 4.3. Ouvrage de drainage en talus sous recharge peu perméable
FT 4.4. Ouvrage de drainage sans recharge

FT 5.1. Remblai stabilisateur avec géoconteneur
FT 5.2. Remblai renforcé
FT 5.3. Stabilité au glissement apporté par un mur poids, un mur cantilever ou une paroi béton
FT 5.4. Rideau de palplanches de soutènement
FT 5.5. Soutènement en gabions pour conforter la stabilité au glissement de la digue

FT 6.1. Rehausse de digue par mur, muret et murette
FT 6.2. Rehausse temporaire à fondation permanente sur un linéaire de digue
FT 6.3. Recharge/épaississement et/ou rehausse en remblai

FT 7.1. Protection externe par enrochements libres
FT 7.2. Protection externe par enrochements liés au béton
FT 7.3. Protection en gabions contre l'érosion externe
FT 7.4. Protections minces contre l'érosion externe
FT 7.5. Réparation de perré maçonné
FT 7.6. Perrés bétonnés
FT 7.7. Protection externe par blocs artificiels
FT 7.8. Protection externe de la digue par mise en place d'épis de protection
FT 7.9. Protection externe par la reprise d'un mur par béton projeté
FT 7.10. Recharge ou réserve de pied en enrochements
FT 7.11. Palplanches de protection contre l'érosion externe en pied de talus côté eau
FT 7.12. Protection externe de talus par technique d'enherbement
FT 7.13. Protection externe de talus par technique par association Génie Civil – Génie Écologique

	Fiche Technique **Généralités sur les palplanches** General information on sheet pile	**Fiche FT G1**

Auteurs principaux : N. AUGER (DREAL) ; Y. BOUSSAFIR (univ. Eiffel) ; J.-C. PALACIOS (SAFEGE) ; M. SUTTER (INRAE)
Contributeurs : L. BOUTONNIER (EGIS) ; J.-M. FLOHR (EGIS) ; D. POULAIN (INRAE) ; R. TOURMENT (INRAE) ; D. RAULIN (FUGRO)
Relecteurs : L. SAUSSAYE (Cerema) ; S. PATOUILLARD (DREAL); L. GERVAIS (DREAL)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

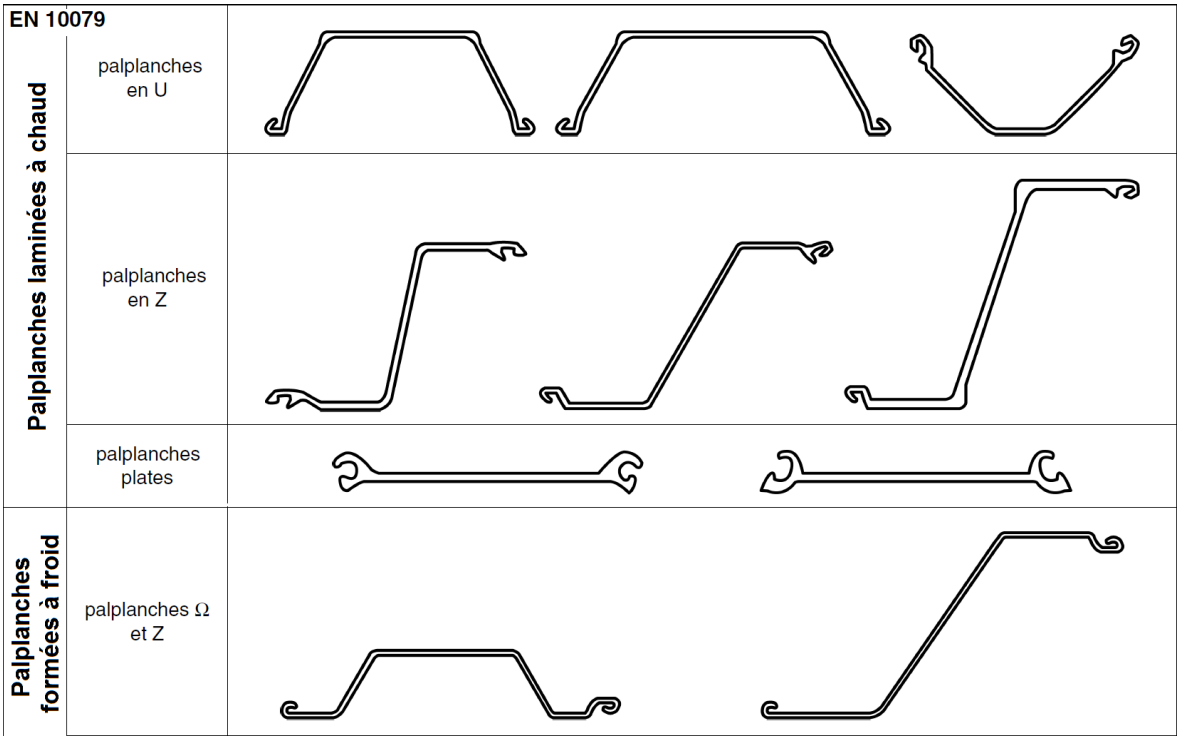
Abstract / Résumé en anglais :
A sheet pile is a thin profile (usually metal). The juxtaposition of several of these profiles makes it possible to form a sheet pile curtain capable of performing sealing, stability/retaining or external protection functions.
The sheet piles are provided with locks allowing them to interlock in one another to form the sheet pile curtain. Sheet piles are implemented preferentially on sites consisting of soft grounds that do not present any difficulties related to the penetration of the profile (presence of blocks in the materials, presence of overhead or buried networks) or in sites that are not very sensitive to nuisances due to implementation.

Indications

Définition :

Une palplanche est un profilé mince (à l'origine en bois, aujourd'hui le plus souvent en métal et plus occasionnellement en PVC, en fibres de verre ou en béton - Figure 1) de forme étudiée (Figure 2) et disposant d'un système d'accroche latérale dénommé serrure permettant l'assemblage avec la palplanche suivante (Figures 1 et 3). La juxtaposition de plusieurs de ces profilés permet de former un rideau de palplanches à même de remplir les fonctions présentées dans la suite de la fiche.

Figure 1 : Exemples de palplanches en différents matériaux : acier, bois, PVC ou béton



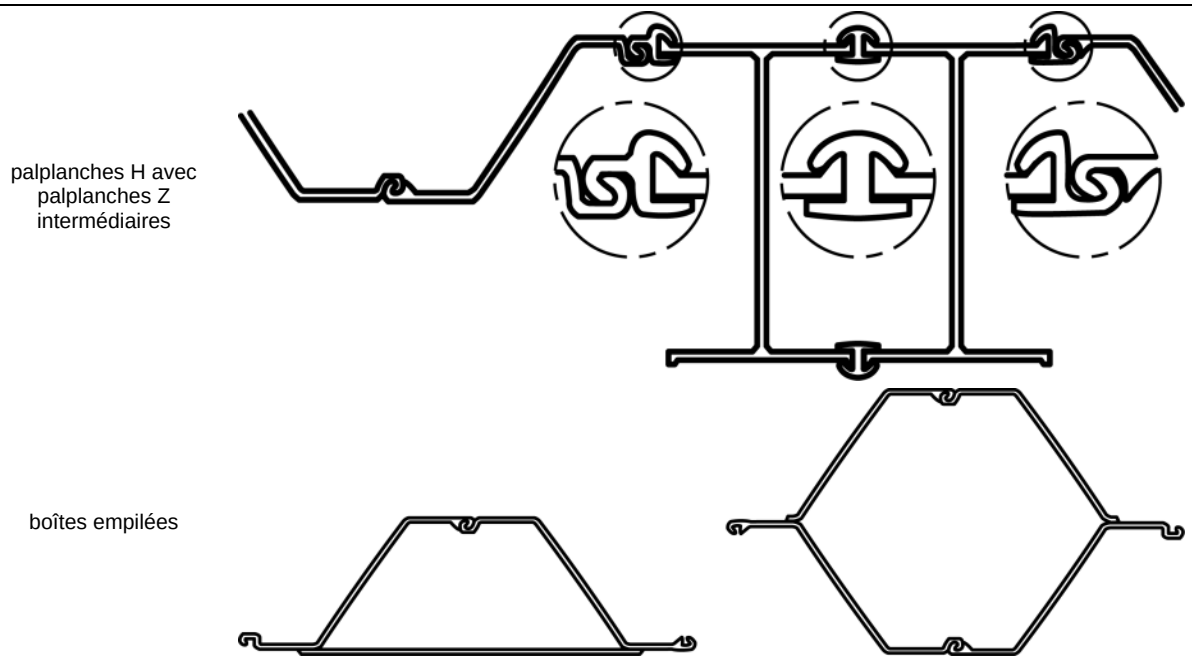


Figure 2 : Exemple de profilés types de palplanches métalliques (source : NF EN 10079)

Généralement, le terme « palplanches » est utilisé de manière abusive pour désigner le rideau de palplanches dans sa globalité (et c'est ce qui pourra se produire dans les fiches associées à ce type de confortement).

Sujet de la fiche :

Cette fiche a pour objectif de donner des informations générales concernant les palplanches. Les éléments de cette fiche sont communs aux trois fiches techniques correspondant aux fonctions principales définies ci-après. Les éléments communs ne seront pas repris dans ces fiches, qui ne comprendront que les éléments spécifiques au type d'emploi de chacune d'entre elles.

Fonctions principales :

Un rideau de palplanches peut remplir plusieurs fonctions principales suivant la façon dont celui-ci est incorporé dans la digue :

- étanchéité (cf. fiche technique 3.1) ;
- stabilité/soutènement (cf. fiche technique 5.4) ;
- protection externe (cf. fiche technique 7.12).

Fonction secondaire :

Généralement, les palplanches sont conçues/utilisées pour remplir plusieurs de ces fonctions et ne présentent donc pas de fonction secondaire.

Description

Une palplanche est de forme rectangulaire, très allongée, de section mince et munie de serrures permettant leur emboîtement les unes dans les autres afin de former le rideau de palplanches.

Figure 3 : Serrure de palplanches métallique (crédit photo : Wikipédia)

Utilisation :

À utiliser préférentiellement sur des sites constitués de terrains meubles, ne présentant pas de difficultés liées à l'enfoncement du profilé (présence de blocs dans les matériaux, de réseaux aériens ou enterrés) et dans des sites peu sensibles aux nuisances qui seraient liées à leur mise en œuvre (battage, vribrofonçage, vérinage…).

Variantes :

À noter que les palplanches peuvent être faites de différents matériaux (liste non exhaustive) :

- bois : c'est le matériau « historique » d'une palplanche, nécessitant un entretien important si la palplanche n'est pas immergée en permanence, sans quoi la durée de vie de la palplanche est très limitée (30 ans) ;
- béton armé : fortement utilisées par le passé, les palplanches en béton armé servent aujourd'hui plutôt en tant que mur de soutènement et sont mises en place en tant que tel (murs préfabriqués ou coulés en place, voir fiche technique 5.3) ;
- acier : les palplanches en acier, formées à froid ou laminées à chaud, sont les plus couramment utilisées. Ces palplanches sont cependant très sensibles à la corrosion et nécessitent des traitements adaptés au milieu ;
- PVC (Figure 4) : matériau plus léger et plus résistant aux conditions environnementales, dont le prix est cependant fluctuant (le PVC est synthétisé à partir de dérivés du pétrole) ;
- fibres de verre : une palplanche en fibre de verre est très résistante, y compris aux conditions environnementales et d'une durabilité équivalente aux profilés métalliques. Le coût d'une telle palplanche est cependant nettement plus élevé que les autres matériaux.

Figure 4 : Mise en œuvre de palplanches en PVC (crédit photo : www.franceenvironnement.com*)*

Un rideau de palplanches peut aussi être composé de palplanches de formes différentes comme le montre la Figure 5.

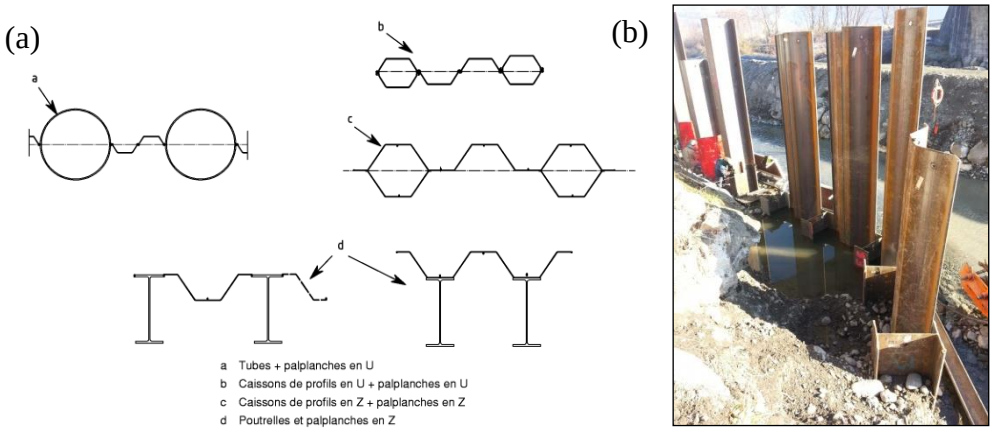


Figure 5 : (a) Exemple de rideau mixte en coupe (NF EN 12063), (b) mise en œuvre d'un rideau mixte HZM en protection externe de pied d'ouvrage (crédit photo : Artelia)

Alternatives

Les alternatives doivent être recherchées pour un même niveau de performances et sont souvent motivées par des conditions environnementales sur site contraignantes (problème de corrosion, de vibrations, de mise en œuvre…) ou éventuellement par le coût. Il peut s'agir d'autres techniques d'étanchéité verticales ou d'autres techniques de protection externe (voir les techniques présentées dans les chapitres 3 et 7 de la partie I du document).

Cependant, les palplanches sont généralement plutôt une alternative à d'autres techniques, du fait des multiples fonctions qu'elles peuvent remplir (étanchéité, stabilité/soutènement, protection externe…).

Dimensionnement

Principe :

Le dimensionnement dépend souvent du choix :

- du mode de mise en œuvre ;
- du type de protection ;
- de la fonction assurée (étanchéité, stabilité/soutènement, protection externe).

Paramètres nécessaires :

- Conditions géotechniques :
  - nature des sols et caractéristiques physiques (granulométrie, dimension des blocs, poids volumique, cohésion, angle de frottement…), modules pressiométriques, densité relative du substratum (sols lâches, denses, roche) et état de consolidation, résistivité (corrosivité), agressivité…
  - les difficultés éventuelles de fonçage ou de battage (présence de blocs, d'horizons indurés, de zones sensibles aux vibrations) ;

- Conditions hydrauliques :
  - les données hydrodynamiques et hydrogéologiques : niveaux d'eau, fonctionnement de la nappe, marnage, vitesse des courants, agressivité des eaux souterraines (pH, teneur en sels, alcalins…) ;

- Contraintes environnementales :
  - projet se situant à proximité de sites ne pouvant admettre des vibrations mécaniques ou des nuisances sonores (écoles, hôpitaux, voies ferrées, réseaux de gaz, usines de haute précision, périodes de nidification/hibernation de certaines espèces, ouvrages patrimoniaux sensibles…) ;
  - en cas d'aménagement de piste d'accès empiétant dans le lit mineur ou dans la zone inondable : vérification des dispositions liées à la loi sur l'eau (réduction du cours d'eau…) ou à la protection des espèces animales (risque de pollution par les fines ou par les fluides du chantier…) ;
  - Impact sur les écoulements des eaux souterraines ou le fonctionnement d'une nappe alluviale (notamment pour des projets de grande ampleur).

Modèle(s) disponible(s) :

- Choix du matériel de mise en œuvre :

Tableau 1 : Comparatif des différents ateliers de mise en œuvre

Ateliers de fonçage	Battage	Vibrofonçage	Vérinage
Types d'engins utilisés	Mouton sec/simple effet Mouton hydraulique Mouton diesel Marteau trépideur (Figure 6)	Vibreur à fréquence standard Vibreur à haute fréquence Vibreur à moment variable	Vérineur à pinces Système vérineur + grue à pinces Vérineur au sol Push Pull system
Valeurs caractéristiques du rendement	Cadence de frappe Energies de choc	Force centrifuge Moment excentrique Amplitude Vitesse de rotation	Force d'enfoncement Force d'extraction
Conditions favorables du site	Zone dégagée	Zone urbaine Proximité ouvrages sensibles Zone dégagée (Vibreur à fréquence standard)	Zone urbaine Idéal à proximité de bâtiments anciens ou fragiles Sites à proximité de voies ferrées
Domaines géotechniques	Sols pulvérulents Faible porosité Fort angle de frottement Idéal dans terrains durs	Sols sableux Sols sablo-argileux à faible porosité Sols argileux pour vibreur de forte amplitude	Sols sableux Sols sablo-argileux à faible porosité Sols argileux pour vérineur performant (vérineur au sol)

Figure 6 : Marteau trépideur PAJOT1400 – AirIM (crédit photo : Artélia)

- Choix de la protection (cas des palplanches métalliques) :

Tableau 2 : Comparatif des différents types de protection des palplanches métalliques

Type de protection	Prescriptions	Commentaires
Peinture	Système IM2 selon CCTG/ fascicule 56	Peu pratiquée pour les écrans d'étanchéité interne (risques d'endommagement lors de la mise en place des palplanches, impossibilité de réaliser une inspection visuelle du revêtement). Peut s'envisager en partie supérieure à l'air libre avant remblaiement de la prétranchée et remise en place de la terre végétale.
Protection cathodique par anodes galvaniques	NF EN 12954	Peut s'envisager au niveau de la prétranchée uniquement, leur remplacement est généralement exclu.
Protection cathodique par courant induit	NF EN 12954	Nécessite un apport permanent en courant.
Galvanisation	EN ISO 1461	Peu pratiquée pour les écrans d'étanchéité interne (risques d'endommagement lors de la mise en place des palplanches, impossibilité de réaliser une inspection visuelle du revêtement).
Autres solutions ou association de différents systèmes	à étudier spécifiquement	

Le choix des autres types de protection se fait selon la fonction recherchée :

- renforcement mécanique de la digue / résistance mécanique du rideau ;
- l'étanchéité.

<u>Autres éléments à prendre en compte lors de la conception :</u>

Il convient d'intégrer les éléments suivants à la réflexion :

- dans le cas d'une mise en œuvre du rideau de palplanches depuis la digue (réalisation d'une plateforme), il faut un minimum d'espace sur la digue ou à ses abords (franc-bord, ségonal, berme, risberme, chemin d'entretien ou piste…) pour la manœuvre des engins mais aussi prendre en compte la stabilité provisoire de la digue sous le poids de l'atelier et éventuellement les tassements générés au cours du fonçage. En l'absence de plateforme au sol, la plateforme de travail sera aménagée sur une barge (Figure 7) ;
- l'environnement immédiat du lieu de pose (notamment la présence de réseaux enterrés et/ou aériens) : la mise en œuvre par levage nécessite une zone de neutralisation en hauteur aussi importante que la longueur des palplanches (Figure 8). De plus, les réseaux enterrés sont à prendre en compte par des dispositions constructives spécifiques ;
- l'évacuation des déchets de chantier pour le maintien de la propreté du site (recépage des palplanches, nettoyage des toupies bétons et de coulis de scellement).

Figure 7 : Mise en œuvre par barge (crédit photo : Wikipedia)

La plupart des aspects de dimensionnement sont synthétisés dans le Tableau 5 en annexe de cette fiche technique.

Aspects pratiques

Cahier des charges :

Il est recommandé de se reporter plus spécifiquement à la lecture de la norme NF EN 12063.

- Les propriétés et caractéristiques des matériaux doivent être clairement spécifiées dans le marché :
  - concernant les matériaux du rideau : type de palplanche, profilé, épaisseur, longueur, protection de surface, les systèmes de protection et de préservation, ainsi que la nécessité, si besoin, d'un blocage des serrures pour garantir la transmission des forces de cisaillement longitudinales, l'étanchéification des serrures…
  - en cas d'ancrage de la tête du rideau : spécification sur les barres (diamètre, nature du métal, longueur, protection de surface…), les boulons, plaques de protection, protections anticorrosion éventuelles, produits de scellement…
  - concernant les procédés complémentaires (lierne de liaisonnement par exemple) : nature des matériaux et procédés (béton, coulis de scellement, remblais complémentaires en cas de tassement).
- Les procédés de pose du rideau sont définis et justifiés :
  - battage, vibrofonçage, vérinage/fonçage, depuis la terre ou sur barge ;
  - les difficultés prévisibles à envisager en cours de chantier sont également précisées ainsi que les solutions prévues pour y remédier dans le cadre du chantier : passage d'un niveau induré en profondeur par trépanage, passage de réseaux enterrés avec réduction des cadences et compléments par technique de type injection, suivi des nuisances de chantier, suivi du contrôle de la verticalité de la pose…
  - la gestion des serrures (blocage) si nécessaire ;
  - si le rideau est ancré, les procédés de réalisation des ancrages et les tests éventuels d'arrachement.
- Les généralités telles que :
  - les modalités et localisation de stockage des matériaux ;

- les modalités d'accès au chantier y compris le niveau d'eau prévisionnel au moment des travaux et les conditions d'intervention en cas de crue, les spécificités de réalisation des travaux en conditions météorologiques défavorable (vent pour les grues, gel pour les palplanches) ;
- si nécessaire, la construction de pistes de chantier, la remise en état du site…

- La gestion des déchets et de l'environnement du chantier :
  - en cas de présence de bâtiments ou de zones industrielles à proximité du chantier, réalisation d'un constat d'huissier préalable aux travaux (fissurations ou désordres sur ouvrages) ;
  - l'évacuation des déchets de recépages des palplanches, chutes de béton et lavage de toupie…
- L'assurance de la qualité liée au contrôle en cours de chantier tels que :
  - l'agrément des matériaux, la conformité des protections, les procédures de pose, la géométrie de l'ouvrage, son implantation, la définition des procédures d'arrêt de l'enfoncement des fiches…
  - le suivi des tassements/déplacements éventuels et des niveaux d'eau en cours de pose (si nécessaire) jusqu'à la réception (impédance sonique…) ;
  - l'un des points souvent litigieux porte sur la longueur des palplanches posées en cas de refus dans le sol (définition du refus, critère d'arrêt du battage…).

Chantier :

Contraintes de gestion du chantier à prendre en compte en phase de conception :

- accessibilité physique au site du matériel de mise en œuvre ;
- présence d'une aire de stockage ;
- largeur de la crête de digue ou du pied de digue selon le cas de figure ;
- cadence attendue (délai global), évaluation des nombres de jours neutralisés (intempéries liées à la météorologie ou au niveau du cours d'eau) ;
- servitudes en termes de tirant d'air (câbles aériens, ouvrage enjambant la digue, servitudes aériennes…) (Figure 8) ;
- nécessité de rétablissement d'ouvrages enterrés (voir ci-dessous) ;
- nécessité de rétablissement de voirie ;
- contraintes de circulation ;
- enjeux de protection de l'environnement ;
- modalités de raccordement aux ouvrages existants éventuels ;
- le cas échéant, présence de courants vagabonds.

Figure 8 : Exemple de chantier en présence de câbles aériens – levée de Saint-Père-sur-Loire (crédit photo : DREAL CVL / DETL)

Phasage représentatif des chantiers de mise en œuvre d'un rideau de palplanches :

- période de préparation : elle doit être suffisante pour prévoir le délai d'approvisionnement après visa des matériaux proposés. Elle est généralement de 2 mois pour les chantiers standards et comprend la maîtrise foncière y compris des accès (ou servitude de passage) ;
- installation de chantier incluant la/les piste(s) d'accès au site ;
- installation de la base vie ;
- constat d'huissier des avoisinants avant démarrage des travaux, mise en place des dispositifs de contrôles le cas échéant (capteurs de vibrations, sonomètres, témoins sur fissures…) ;
- amenée et repli du matériel de chantier : grue, vibrofonceur… ;
- approvisionnement des palplanches ;
- essais de convenance ;
- le cas échéant, réalisation d'une prétranchée et mise en place du guide de battage ;
- les palplanches sont enfoncées verticalement dans le sol selon divers procédés (battage, vérinage (Figure 9), vibrofonçage (Figure 10) ;
- recépage consistant à enlever la partie des palplanches dépassant du terrain ;
- si refus, nécessité de s'assurer de la continuité de l'écran en pied ;
- remise en état du site : remblaiement de la prétranchée, réfection des chaussées, végétalisation…
- nettoyage du site y compris des zones de stockage temporaire, bornage de l'implantation du rideau ;
- constats après travaux ;
- réception.

Figure 9 : Atelier de vérinage (crédit photo : Giken LTD)

Figure 10 : Atelier de vibrofonçage sur une levée de Loire – Saint-Père-sur-Loire (crédit photo : DREAL CVL / DETL)

Nuisances/environnement :

Vibrations et bruit qui pourront être limités en fonction des ateliers de fonçage utilisés (Tableau 1). Il est essentiel de les surveiller car ils peuvent générer des vibrations pénalisantes pour les riverains proches (gêne), les structures (risque de fissuration, de mouvements d'objets…), les animaux (période de nidification) et les machineries de précision sensibles aux vibrations.
Généralement, leur gestion consiste à réaliser un diagnostic préalable précis des sites, faire des constats en période de préparation du chantier et organiser un suivi en cours de chantier.

Contrôle d'exécution :

Le Tableau 3 reprend de manière non exhaustive les contrôles qui paraissent les plus importants lors d'un chantier de mise en œuvre d'un rideau de palplanches. Ils nécessitent d'être adaptés en fonction notamment de la technique et du site choisis. Les contrôles prévus, leur fréquence ainsi que la

répartition des rôles (contrôle interne, externe et extérieur) sont autant de points à formaliser dans le plan d'assurance qualité des travaux.

Tableau 3 : Exemple de contrôles pour un chantier de rideau de palplanches

Type de contrôle	Avant chantier	Planche d'essai	Début de chantier	En cours de chantier	Fin de chantier
Approvisionnement des palplanches	X			X	
Contrôle des matériels	X	X	X	X	
Contrôle des dispositifs de guidages, liernes…		X	X	X	
Revêtement des palplanches	X	X	X	X	X
Fonctionnement des protections (anodes galvaniques (comparaison de mesure de potentiel avant et après mise en place des anodes), peinture,...)					X
Mesure de vibrations sur les bâtiments et structures avoisinantes		X	X	X	
Constat des dégâts subis du fait des vibrations	X				X
Mesures de bruit	X	X	X	X	
Essais d'étanchéité des réseaux avoisinants					X
Contrôle des tolérances en profil en travers, en nivellement, en déversement		X	X	X	X
Suivi des paramètres de mise en fiche, des critères d'arrêt d'enfoncement des palplanches (souvent le plus déterminant)		X	X	X	
Recépage					X
Impédance acoustique (profondeur des palplanches)		X		X	X
Suivi piézométrique	X				X
Vérifier les agréments (matériaux, procédures de pause,...		X	X		

Par ailleurs, l'entrepreneur doit tenir à jour le carnet de fonçage prévu à l'article 40.6 du fascicule 68 du CCTG.

Plus de détails sur la teneur des contrôles peuvent être obtenus dans le Fascicule 68 du CCTG ou la fiche palplanches du mémento pour la mise en œuvre sur ouvrage d'art (Memoar – II3).

Vitesse d'avancement :

Entre 10 et 25 mètres linéaires par jour, dépendant de la profondeur de pose, de la nature des terrains et du type de mise en œuvre (le plus efficace étant le vibrofonçage).

Traitement des points singuliers :

- Roche compacte ou forte hétérogénéité du sol (ex. : grosses pierres, racines, pieux bois…) : ces conditions peuvent bloquer l'avancement mais généralement il est possible d'y remédier en utilisant des ateliers de fonçage plus puissants ou un pré-forage de l'élément à franchir. De telles dispositions entraînent de fait des nuisances et des coûts supplémentaires ;
- Recoupement d'ouvrage traversant (canalisations, réseaux…) : pose des palplanches au plus proche de la structure puis utilisation de techniques alternatives telles que listées dans le Tableau 4 ;
- Zone fortement décomprimée : remblayage de la zone après analyse de l'anomalie ;
- Jonction avec la digue existante : traitement des points durs, aménagement d'une zone de transition.

Les principales situations singulières pouvant être rencontrées, leur cause et des méthodes pour les résoudre sont synthétisées dans le Tableau 6 à la fin de cette fiche technique.

Tableau 4 : Solutions de traitement d'un ouvrage traversant au droit d'un rideau de palplanches

Solution envisageable pour traiter un ouvrage traversant	Commentaire
Supprimer le réseau	Si le réseau est abandonné ou n'est plus utilisé.
Choisir un autre itinéraire	S'il est possible que le réseau ne traverse pas la digue.
Faire passer le réseau au-dessus du rideau de palplanches	Dans le cas d'un réseau gravitaire (EU/EP notamment), peut nécessiter la mise en œuvre de pompes de relevage.
Faire passer le réseau en dessous du rideau de palplanches et en dehors de la zone influençant la fondation de l'ouvrage	La zone d'influence du sol de fondation peut être déterminée à partir d'une approche géotechnique et, le cas échéant, l'aide de modèles hydrauliques. Le réseau sera mis en œuvre par forage dirigé.
Traverser le rideau	Couper le réseau, enfoncer une palplanche réaliser une lumière dans le rideau de palplanches, réinstaller le réseau avec canalisation rigide, puis réaliser un bouchon (par exemple bouchon béton).
Compléter le rideau autour du réseau	Utilisation de techniques alternatives de type : injections, jet grouting.

Références

- (2013) The International Levee Handbook (ILH), chapitre 9. CIRIA.
- GT "Référentiel technique digues maritimes et fluviales" (2015) Référentiel technique digues maritimes et fluviales. MEDDE, version 1.
- GT CFBR (2015) Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai. CFBR.
- (2001) ROSA 2000, Recommandations pour le calcul aux états limites des ouvrages en site aquatique. Fascicules « rideaux de soutènement » et « exemples commentés de notes de calcul, rideau de soutènement ancré ». Edition Cerema (ex-Cetmef)
- (2010) Digues et berges de voies navigables – Retour d'expérience sur les désordres et les réparations. Edition Cerema (ex-Cetmef).
- (2011) Maîtrise du bruit des chantiers de construction des infrastructures de transports terrestres. Edition Cerema (ex-Sétra).
- (2005) Mémento pour la mise en œuvre sur ouvrages d'art – MEMOAR – Collection de fiches techniques, Fiche n° II-3 "Les palplanches". Edition Cerema (ex-Sétra).
- (à paraître) Protection anticorrosion des ouvrages maritimes, manuel des bonnes pratiques. Edition Cerema.
- (2016 - 2018) Guide d'application de la réglementation aux travaux à proximité des réseaux, Fascicules 1, 2 et 3. MEDDE, Fascicules 1 et 3, version 1, décembre 2016, Fascicule 2, version 3, décembre 2018
- (2003) Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des rideaux de palplanches métalliques - Guide technique. Collectifs LCPC-Sétra, coll. Techniques et méthodes des LPC
- FloodProBe Consortium (2013) FloodProBE: Reliability of Urban Flood Defences, WP03-04-13-02
- Dutta P. K., Vaidya U. (2003). A study of the long-term applications of the vinyl sheet pile. US Army Corps of Engineers (USACE), Cold Regions Research and Engineering Laboratory, ERDC/CRREL LR-03-19
- Dutta P. K., Vaidya U. (2003). An assessement of vinyl sheet piles for long term applications. Proceedings of The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, May 25-30, 2003
- Chantiers routiers et préservation du milieu aquatique - Management environnemental et solutions techniques. Guide technique. Edition Cerema (ex-Sétra), juillet 2007
- NF EN 1993-5 (2007). Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 5 : pieux et palplanches
- NF EN 1993-5/NA (2008). Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 5 : pieux et palplanches - Annexe nationale à la NF EN 1993-5:2007 - Pieux et palplanches
- NF P94-282 (2009). Calcul géotechnique – Ouvrages de soutènement – Ecrans
- NF P94-282/A1 (2015). Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènement - Écrans - Amendement 1
- NF EN 12063 (1999). Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Rideaux de palplanches

- NF EN 12501-1 (2003). Protection des matériaux métalliques contre la corrosion. Risque des corrosions dans les sols – Partie 1 : généralités
- NF EN 12501-2 (2003). Protection des matériaux métalliques contre la corrosion. Risque des corrosions dans les sols – Partie 2 : matériaux ferreux faiblement alliés ou non alliés
- A05-252 (1990). Corrosion dans les sols – Aciers galvanisés ou non mis au contact de matériaux naturels de remblai (sols)
- FD A45-035 (1999). Produits en acier - Palplanches profilées à froid en aciers non alliés - Dimensions et caractéristiques des sections
- NF EN 10248-1 (1995). Palplanches laminées à chaud en aciers non alliés - Partie 1 : conditions techniques de livraison
- NF EN 10248-2 (1995). Palplanches laminées à chaud en aciers non alliés - Partie 2 : tolérances sur forme et dimensions
- NF EN 10249-1 (1995). Palplanches profilées à froid en aciers non alliés - Partie 1 : conditions techniques de livraison
- NF EN 10249-2 (1995). Palplanches profilées à froid en aciers non alliés - Partie 2 : tolérances sur forme et dimensions
- NF EN 12954 (2001). Protection cathodique des structures métalliques enterrées ou immergées – Principes généraux et application pour les canalisations
- NF EN 1997-1 (2005). Eurocode 7 : calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales
- NF EN 1997-1/A1 (2014). Eurocode 7 : calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales - Amendement 1
- NF EN 10020 (2000). Définition et classification des nuances d'acier
- NF EN 10079 (2007) Définition des produits en acier
- NF EN ISO 1461(2009). Revêtements par galvanisation à chaud sur produits finis ferreux. Spécifications et méthodes d'essai
- Protection des ouvrages métalliques contre la corrosion. Fascicule 56 du Cahier des Clauses Techniques Générales (CCTG). METLTM/MEFI, 2004
- Exécution des travaux de fondation des ouvrages de génie civil. Fascicule 68 du CCTG, Chapitre VI : Palplanches et rideaux de palplanches. METT, 2012
- Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil. Fascicule 62 Titre V du CCTG, Article A.3.2. Aciers. MELT, 1993
- Arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières, Chapitre III, Article 22.2 Vibrations
- Circulaire du 23 juillet 1986 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement

Sources des figures :

- Figure 3 – https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spundwandschloss.jpg – 29 juin 2020
- Figure 7 – https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pose_de_palplanches_De%C3%BBle_canalis%C3%A9eLille2012_03.JPG – 29 juin 2020
- Figure 9 – http://www.pajot.com/materiel/verineur-hydraulique/auto-mobile-giken/ – 29 juin 2020

Annexes

Tableau 5 : Critères de dimensionnement des palplanches

Performance/ caractéristique	Paramètre	Données à recueillir	Détermination	Commentaire
Etanchéité	Profondeur du rideau	Perméabilité des matériaux et couches en place	NF P94-282 §13.4 et 13.5 EN 1997-1 §10.4 (5) et 10.5 International levee handbook §8.5	La détermination du gradient critique est généralement réalisée à l'aide de modèles hydrauliques type SEEP, Plaxis… L'impact du rideau sur les écoulements internes permanents doit être pris en considération
	Longueur du rideau	Profils en travers et en long de l'ensemble de la portion considérée avec les perméabilités	NF P94-282 §13.4 et 13.5 EN 1997-1 §10.4 (5) et 10.5 International levee handbook §8.5 Flood ProBE, WP 3Reliability of Urban Flood Defences §3	Faire en sorte que le gradient critique ne puisse être atteint par contournement latéral de l'écran. Disposer d'une zone de transition dont la longueur dépasse la hauteur entre la crête de digue et l'horizon étanche. Prévoir un recouvrement suffisant (éviter les concentrations d'écoulement dans les zones de transition)
	Serrures	Perméabilité des sols en contact avec les palplanches	NF EN 12063, annexe E	Etanchéité à prévoir si le gradient critique est dépassé
Aptitude à être mises en œuvre	Emprise disponible pour les engins	Largeur de la plateforme, Gabarit des engins	NF EN 12063 §4.1	Le cas échéant prévoir des accès provisoire, des accès nautiques ou des engins avec un bras plus important
	Aptitude au fonçage/ battage	caractéristiques des modules de palplanches, caractéristiques des sols en place, (dont présence de blocs ou obstacles dont réseaux) au pénétromètre ou au pressiomètre informations sur l'historique de construction de la digue pour anticiper les éventuels obstacles au battage	NF EN 12063 §5.2	En l'absence d'expérience comparable, prévoir un essai de fonçage/battage préalable. En cas de vérinage, vérifier la résistance à l'arrachage des palplanches en place

Performance/ caractéristique	Paramètre	Données à recueillir	Détermination	Commentaire
Nuisances et désordres susceptibles d'apparaître en phase chantier	Vibrations	Configuration des lieux, Identification des structures sensibles et de leurs fondations Nature des sols	NF EN 12063 §4.1 Possibilité de reprendre les limites carrières (arrêté du 22/09/94 art. 22.2) ou ICPE (circulaire du 23/07/86)	Le cas échéant, prévoir un diagnostic, voir un essai préalable Prévoir un constat avant/ après + le cas échéant une vérification du respect des valeurs limites
	Bruit	Configuration des lieux, Identification des enjeux exposés	NF EN 12063 §4.1 Guide « maîtrise du bruit des chantiers de construction des infrastructures de transports terrestres »	Prévoir un diagnostic initial et des seuils à ne pas dépasser durant le chantier en fonction de la configuration Le cas échéant, prévoir des écrans phoniques
	Stabilité en phase chantier	Caractéristiques mécaniques des matériaux de la digue Circulation des engins de chantier, surcharges éventuelles…	NF EN 1997-1	Utilisation de modèles géotechniques de type Talren
Renforcement mécanique de la digue/ résistance mécanique du rideau	Stabilité au grand glissement	Configuration des lieux (sollicitations hydrauliques, embacles…), Caractéristiques mécaniques des matériaux de la digue et du sol d'assise Circulation sur la crête de digue…	NF EN 1997-1 NF EN 12063	Utilisation de modèles géotechniques de type Talren

Tableau 6 : Situations singulières pouvant être rencontrées lors de la mise en place de palplanches

Difficulté rencontrée	Causes probables	Détection	Résolution
Refus de battage	Sol localement plus compact ou présence de graves Présence de blocs ou d'obstacles (réseaux, racines…) Remontée du substratum	La palplanche ne s'enfonce plus malgré le battage/vibrofonçage/vérinage	• augmenter l'énergie de l'outil dans le respect des seuils définis en étude d'exécution ou étudier les possibilités de dépassement de seuil. • changer de mode de mise en œuvre • envisager la réalisation complémentaire de lançages, d'injections, de jet grouting, de préforages ou de décompressions à la tarière
Dégrafage des palplanches	Efforts latéraux trop important lors de la mise en œuvre des palplanches	Détection visuelle lors du battage	• arracher les palplanches concernées et reprendre leur mise en œuvre • renforcer le guidage des palplanches
Endommagement de l'extrémité inférieure des palplanches	Sol localement plus compact ou présence de graves Présence de blocs ou d'obstacles (réseaux, racines…) Remontée du substratum	Anomalie à la mise en œuvre (énergie proche de la limite de résistance des palplanches)	• utiliser un sabot en partie inférieure des palplanches (cas des sols compact) • utiliser une technique alternative (injection/jet) en présence d'obstacle
Endommagement de l'extrémité supérieure des palplanches	Outil inadapté/ énergie trop importante pour les palplanches choisies	Détection visuelle lors du battage	• diminuer l'énergie de mise en œuvre • modifier le casque de battage
Coupure de réseau non prévu	Présence de réseau non répertorié	Fuites d'eau/de gaz/coupure électrique	• arrêter immédiatement la mise en œuvre, appliquer le cas échéant une procédure de sécurité prévue préalablement • voir plus haut des solutions pour traversées de réseaux
Densification du matériau en place lors du fonçage	La compacité du sol est faible au droit du rideau, la mise en œuvre de celui-ci provoque un tassement localisé des matériaux	Détection visuelle (tassement du sol de part et d'autre de la palplanche)	Mettre en œuvre une technique alternative ou complémentaire (injections, jet grouting)
Dévers transversal/ longitudinal du rideau	Le guidage de la mise en œuvre du rideau est insuffisant	Contrôles géométriques	Si nécessaire, retirer les palplanches concernées. Renforcer le guidage des palplanches et le contrôle de la verticalité.
Enfoncement des palplanches adjacentes (ou arrachage de celles-ci lors du vérinage)	Le frottement exercé par le sol sur les palplanches est insuffisant	Détection visuelle lors du battage	Utiliser de tampons de blocage ou de liernes boulonnés pour solidariser les palplanches déjà mise en place

	Fiche Technique **Rideau de palplanches à fonction d'étanchéité** Sealing sheet pile curtain	**Fiche FT 3.1**

Auteur principal : J.-C. PALACIOS (SAFEGE)
Contributeurs : N. AUGER (DREAL) ; D. POULAIN (INRAE) ; M. SUTTER (INRAE) ; R. TOURMENT (INRAE)
Relecteurs : L. SAUSSAYE (Cerema) ; S. PATOUILLARD (DREAL) ; L. GERVAIS (DREAL)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais :
A sheet pile is a thin profile (usually metal). The juxtaposition of several of these profiles makes it possible to form a sheet pile curtain capable of performing sealing, stability/retaining or external protection functions.
The sealing sheet pile curtain creates a vertical waterproof screen inside the dike and/or its foundation. This screen impedes the flow of internal water and aims to prevent or treat internal erosion phenomena

Étude(s) de cas correspondante(s) :
C1.06 Digue de St-Père-sur-Loire (45)
C1.05 Digue d'Orléans à Jargeau (45)
C1.19 Digue de la rue de l'Eau à Toulouse (31)

NB : Cette fiche complète la fiche générique FG 1 sur les palplanches pour ce qui concerne les aspects spécifiques de la mise en œuvre de rideau de palplanches pour assurer l'étanchéité de la digue.

Indications :

Définition :

Cette technique consiste à enfoncer dans le sol des profilés métalliques (palfeuilles ou palplanches) liés entre eux par des serrures afin de former une barrière étanche. Pour plus de détails concernant la définition et la typologie des palplanches, le lecteur est invité à consulter la fiche FT G1.

Sujet de la fiche :

Les rideaux de palplanches d'étanchéité dont il est question dans cette fiche sont des rideaux internes aux digues.

Sont donc exclues toutes fonctions d'étanchéité qui pourraient être rattachées à une fonction principale de soutènement (cf. FT 5.4) ou de protection externe (cf. FT 7.12).

Fonctions principales :

Le rideau de palplanches permet de créer un écran étanche vertical dans le corps de la digue et/ou sa fondation. Cet écran fait obstacle à l'écoulement des eaux internes et a pour objectif de prévenir ou traiter les phénomènes d'érosion interne.

Fonctions secondaires :

Amélioration de la stabilité géomécanique du corps de digue.

Description

Performances à atteindre en termes d'étanchéité, profondeur, durée de vie :

Le critère d'étanchéité qui constitue la fonction principale du rideau de palplanches impose ses dimensions géométriques, notamment sa profondeur (en relation avec l'ancrage nécessaire en fondation).
Le niveau d'étanchéité à atteindre peut-être défini par le débit résiduel admissible soit par contournement du dispositif (écoulements en fondation) soit par fuite au niveau des serrures.

Une autre performance à fixer par le concepteur est la durée de vie du dispositif. Cela permet de définir l'épaisseur nécessaire des palplanches en fonction des protections anticorrosion prévues (cas général des palplanches métalliques).

Les caractéristiques du rideau de palplanches assurant l'étanchéité sont rappelées en annexe dans un extrait du tableau général sur le dimensionnement des palplanches (voir également la fiche FT G1).

Utilisation :

Les écrans d'étanchéité internes sous forme de palplanches sont généralement implantés en crête de digue (Figure 1), plus rarement en risberme ou en pied de digue côté eau. Dans ces deux derniers cas, l'écran joue un rôle d'étanchéité vis-à-vis des fondations uniquement et l'interface digue-écran est à étudier avec attention.

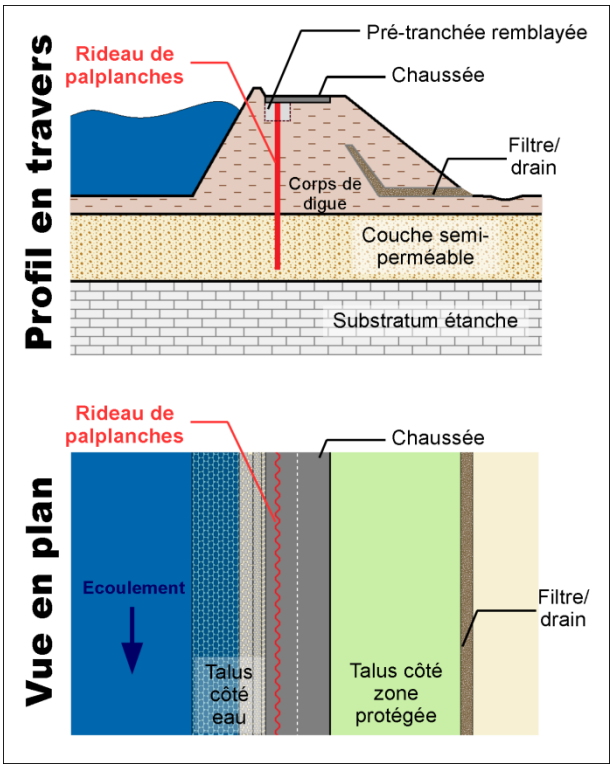


Figure 1 : Schéma d'implantation d'un rideau de palplanches en crête de digue (source : DREAL CVL / DETL)

Variantes :

Les variantes consistent en des changements de nature de la palplanche et combinaison de formes (tels que décrits dans la fiche FT G1).

Alternatives

Mise en place d'un rideau de palplanche au niveau du talus et/ou en pied de digue côté eau :

- au niveau du talus côté eau de la digue, où il participe alors à l'étanchéité de la digue mais aussi à la défense de berge et à la stabilité de la digue en assurant le soutènement des matériaux la composant sur tout ou partie de sa hauteur (cf. FT 5.4)
- en pied de digue côté eau, où il joue alors un rôle d'étanchéité vis-à-vis de la fondation (cf. FT 7.12)

Dimensionnement

Principe :

En termes d'étanchéité, le dimensionnement consiste à déterminer la nature et les dimensions adéquates (profondeur, position, présence de protection étanche) des palplanches et des serrures (joints…) de manière à fournir un rideau performant tel que défini ci-dessus dans les performances à atteindre.

Paramètres d'entrée nécessaires :

En particulier :

- la nature et les caractéristiques mécaniques des sols constitutifs du corps de digue et des sols de fondation déterminées à partir de reconnaissances adaptées (essais de perméabilité in situ, essais en laboratoire, identification de sols, teneurs en eau, essais de perméabilité…) ;
- les conditions hydrauliques dans le remblai et en fondation (nature et quantification des écoulements dans et sous la digue) ;
- si possible, des informations sur l'historique de construction de la digue pour anticiper les éventuels obstacles au battage dans la fondation (rochers, blocs…). Le cas échéant, prévoir un essai de battage ;
- la durée de vie souhaitée du rideau.

Eléments de conception :

Les contraintes de gestion de chantier sont celles définies dans la fiche FT G1 auxquelles il convient de rajouter celles concernant les actions spécifiques sur la crête, en particulier pour les crêtes circulables :

- gestion de la signalisation vis-à-vis de l'accessibilité à l'ouvrage pendant les travaux (y compris déviation de la circulation si nécessaire, accès des riverains…) ;
- ouverture et remise en état de la chaussée.

Modèles disponibles :

Les modélisations seront faites selon des modalités classiques de dimensionnement des ouvrages hydrauliques présentées en introduction.

Aspects pratiques

Cahier des charges :

Les prescriptions de cahier des charges sont décrites dans la fiche FT G1. Il est également recommandé de se reporter à la norme NF EN 12063.

Un point particulier de vigilance des confortements par écrans internes d'étanchéité concerne le raccordement à l'ouvrage existant : une longueur de recouvrement de 5 à 10 ml est généralement prévue sur le linéaire de confortement afin de garantir l'étanchéité à l'interface (certains retour d'expérience sont allés jusqu'à 25 ml – cela reste donc à adapter au cas par cas). Cela permet que le gradient critique ne soit pas atteint par contournement latéral de l'écran.

Chantier :

En termes de contraintes de chantier, il convient de se rapporter aux éléments figurant dans la fiche FT G1.

Pour remplir au mieux sa fonction, un rideau de palplanches est battu à la verticale. La mise à l'aplomb permettra une meilleure pénétration dans le sol. De plus, la palplanche sera plus facile à arracher.
Afin d'obtenir un aplomb et une implantation correcte du rideau, il est nécessaire d'utiliser un guide à un ou deux niveaux (Figure 2, Figure 3). De manière générale, la hauteur du guide est d'environ un tiers de la hauteur de la palplanche.

Figure 2 : Guide de battage à 1 niveau – digue de Vigueirat à Arles (crédit photo : SYMADREM)

Figure 3 : Mise en place d'un rideau de palplanche en corps de digue avec guide de battage à deux niveaux – digue d'Orléans à Jargeau (crédit photo : DREAL CVL / DETL)

Lorsque le rideau ne joue pas de rôle structurel (uniquement étanchéité), il n'est pas nécessairement recherché des nuances d'aciers très résistants, des épaisseurs importantes (toutefois la durée de vie souhaitée de l'ouvrage ou les conditions de sol peuvent conduire à ne pas trop diminuer ces critères) ou des profils d'inertie élevée. Suivant le type de sol, cela peut en effet compliquer la mise en œuvre.

Si nécessaire, les serrures peuvent être étanchées par des joints réalisés à l'aide de produits d'étanchéité ou de soudures (dans le cas des digues, les soudures sont réalisées uniquement lors de la mise en place simultanée de plusieurs palplanches préalablement solidarisées). Par ailleurs, il est courant d'ajouter un revêtement sur les palplanches afin de les protéger et ainsi accroître leur durabilité et les rendre moins perméables.

Les palplanches implantées en corps de digue ne font généralement pas l'objet de protection particulière vis-à-vis de la corrosion. Celle-ci est souvent prise en compte par le calcul de l'épaisseur sacrificielle. Pour mémoire, les principaux types de protection contre la corrosion sont récapitulés dans la fiche FT G1.

Matériaux et matériels nécessaires :

Voir fiche générique sur les palplanches FT G1.

Nuisances/environnement :

Voir fiche générique sur les palplanches FT G1 : contrôle des vibrations sur bâtiments et structures avoisinantes.

Contrôles structurels d'exécution :

- Contrôle qualité des palplanches livrées (conformité avec le cahier des charges) ;
- contrôle de la technique d'enfoncement (conformité avec le cahier des charges) ;
- contrôle de la profondeur d'enfoncement et d'une manière générale des caractéristiques dimensionnelles : méthodes non destructives par réflexion, impédance, sismique parallèle…
- contrôle de la mise en œuvre des palplanches : rectitude du rideau (mesure des tolérances en profil en travers, en nivellement, en déversement), contrôle visuel d'enclenchement des serrures.

Contrôles de performance :

Contrôle du fonctionnement de la paroi selon les exigences du cahier des charges (en termes de réduction des écoulements internes) : essais de perméabilité (type Lefranc ou Nasberg), suivi piézométrique, reconnaissances géophysiques et/ou mesures par fibre optique.

Les modalités de contrôles d'exécution sont explicitées dans la fiche FT G1. Plus de détails sur la teneur des contrôles peuvent être obtenus dans le Fascicule 68 du CCTG ou la fiche palplanches du mémento pour la mise en œuvre sur ouvrage d'art (Memoar – II3).

Vitesse d'avancement :

Entre 10 et 25 mètres linéaires par jour, dépendant de la profondeur de pose, de la nature des terrains et du type de mise en œuvre.

La technologie des palplanches présente le grand avantage d'être un type de paroi d'étanchéité qui peut être mis en place relativement rapidement selon le type de sol rencontré. Par ailleurs, dans de nombreux cas, la mise en place peut se réaliser sans besoin de terrassements importants ni nécessiter que l'ouvrage soit hors d'eau (cas des digues toujours en eau).

Traitement des points singuliers :

- Réseaux/obstacles :
  - en informer les concessionnaires selon les modalités réglementaires en vigueur (Déclaration de projet de Travaux et Déclaration d'Intention de Commencer les Travaux notamment) et définir les modalités de traitement ;
  - dans tous les cas, il faut que la solution permette d'assurer l'étanchéité de la digue que ce soit à la traversée du rideau ou le long de la canalisation ;
  - il faut prêter attention également aux risques de corrosion galvanique et de courants vagabonds.

La fiche générale sur les palplanches FT G1 donne quelques propositions de traitement des réseaux à la traversée d'un rideau de palplanches.

Les travaux peuvent être l'occasion de vérifier l'état des réseaux (inspections caméra, tests d'étanchéité) et leur méthode de remblayage qui doit garantir l'étanchéité de l'ensemble, mais également de mettre à jour les responsabilités et les prescriptions vis-à-vis des gestionnaires de réseaux.

Remise en état du site :

Voir fiche générale sur les palplanches FT G1.

Références

- The International Levee Handbook (ILH), chapitre 9. Edition Ciria, 2013
- Référentiel technique digues maritimes et fluviales. Groupe de travail "Référentiel technique digues maritimes et fluviales", MEDDE, version 1, janvier 2015
- Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai. CFBR, 2015
- ROSA 2000. Recommandations pour le calcul aux états limites des ouvrages en site aquatique. Fascicules « rideaux de soutènement » et « exemples commentés de notes de calcul, rideau de soutènement ancré ». Edition Cerema (ex-Cetmef), 2001
- Digues et berges de voies navigables – Retour d'expérience sur les désordres et les réparations. Edition Cerema (ex-Cetmef), 2010
- Mémento pour la mise en œuvre sur ouvrages d'art – MEMOAR – Collection de fiches techniques, Fiche n° II-3 "Les palplanches". Edition Cerema (ex-Sétra), 2005

Annexes

Tableau 1 : Extrait du tableau général sur le dimensionnement des palplanches (voir également la fiche FT G1)

Performance/ caractéristique	Paramètre	Données à recueillir	Détermination	Commentaire
Etanchéité	Profondeur du rideau	Perméabilité des matériaux et couches en place	NF P94-282 §13.4 et 13.5 EN 1997-1 §10.4 (5) et 10.5 International leveehandbook §8.5	La détermination du gradient critique est généralement réalisée à l'aide de modèles hydrauliques type SEEP, Plaxis… L'impact du rideau sur les écoulements internes permanents doit être pris en considération
	Longueur du rideau	Profils en travers et en long de l'ensemble de la portion considérée avec les perméabilités	NF P94-282 §13.4 et 13.5 EN 1997-1 §10.4 (5) et 10.5 International leveehandbook §8.5 Flood ProBE, WP 3Reliability of Urban Flood Defences §3	Faire en sorte que le gradient critique ne puisse être atteint par contournement latéral de l'écran. Disposer d'une zone de transition dont la longueur dépasse la hauteur entre la crête de digue et l'horizon étanche. Prévoir un recouvrement suffisant (éviter les concentrations d'écoulement dans les zones de transition)
	Serrures	Perméabilité des sols en contact avec les palplanches	NF EN 12063, annexe E	Etanchéité à prévoir si le gradient critique est dépassé

	Fiche Technique **Paroi mince** Thin wall	**Fiche FT 3.2**

Auteurs principaux : Y. BOUSSAFIR (univ. Eiffel) ; O. HESSE (BOTTE FONDATION)
Contributeurs : D. POULAIN (INRAE) ; M. SUTTER (INRAE) ; R. TOURMENT (INRAE)
Relecteurs : N. GRASSET (FUGRO Geoconsulting) ; G. HIBON (ANTEA) ; S. LAMBERT (KELLER fondations spéciales) ; J. POUDEVIGNE (FUGRO Geoconsulting) ; L. SAUSSAYE (Cerema) ; B. CHALUS (CNR) ; J-M. FLOHR (EGIS) ; S. PATOUILLARD (DREAL)
Finalisation : A. RULLIERE

Abstract / Résumé en anglais:
Thin wall are vertical waterproof screen made by injection of a grout in the footprint of a thin metal profile (width of 10 to 20 cm).
The metal profile is first pressed into the dike by threshing, sinking or vibrating. Then the grout is injected in the footprint during the recovery of the profile.
The wall is created by successive sections of injection.

Études de cas correspondantes :
C1.15 Digue d'Avaray (41)
C1.24 Digues du canal de Lens (VNF) à Noyelles-sous-Lens (62)
C1.26 Digue de la Polka à Jouy-aux-Arches (57)

Indications :

Définition :

La paroi mince est un écran vertical étanche que l'on réalise dans le corps de la digue par injection d'un coulis dans l'empreinte d'un profilé métallique de faible épaisseur (de l'ordre de 10 à 20 cm, d'où le nom du procédé).
Le coulis est un mélange d'eau, ciment, sable, bentonite et adjuvants dans des proportions variables à définir dans le cadre du projet de confortement.
Le profilé métallique est au préalable enfoncé dans la digue par battage, fonçage ou vibrofonçage et le coulis est injecté lors de la remontée du profilé dans l'empreinte ainsi laissée.
La machine procède ainsi à l'avancement avec successivement : enfoncement, injection en remontée puis déplacement de l'ensemble en général à reculons en crête de digue (Figures 1, 2 et 2).

Figure 1 : Réalisation d'une paroi mince au coulis sur le canal de Lens à Noyelles-sous-Lens (62) (crédit photo : S. Lambert, Ets Keller France)

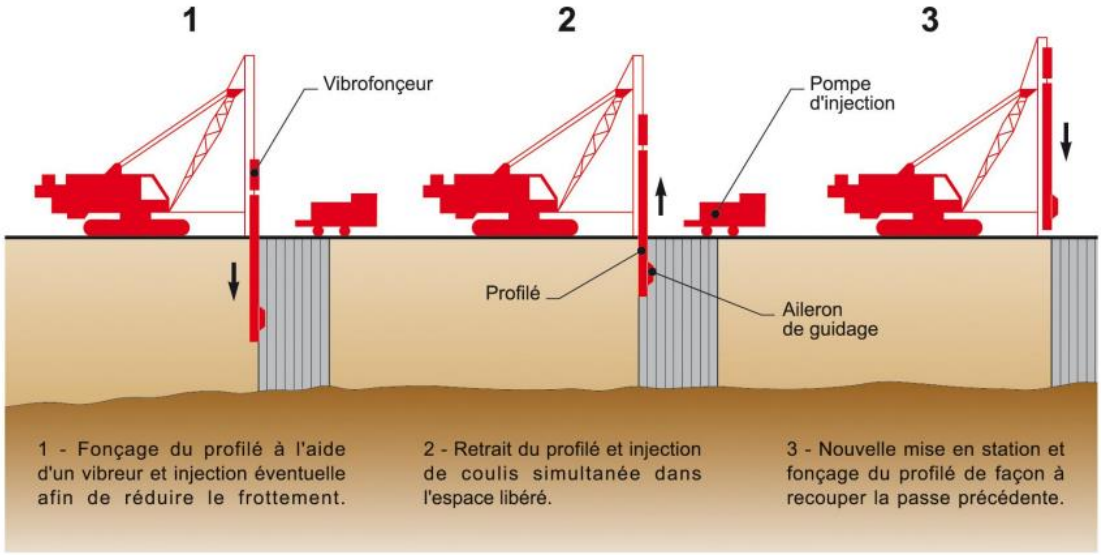


Figure 2 : Principe de réalisation d'une paroi mince par injection successive de coulis au travers d'un profilé (source : Solétanche Bachy)

Sujet de la fiche :

Cette fiche traite de l'ensemble des barrières formées d'un coulis et répondant aux conditions d'épaisseur et de mise en œuvre énoncées dans la définition.

Fonction(s) principale(s) :

Cette barrière verticale est conçue pour faire obstacle à l'écoulement des eaux dans le corps de digue et jusqu'à une certaine profondeur dans le sol de fondation de la digue (jusqu'au substratum ou non) afin de prévenir ou traiter les phénomènes d'érosion interne ou de saturation du remblai (initiateur de glissement).

Fonction(s) secondaire(s) :

Sans objet.

Description :

Performances à atteindre :

- la géométrie de la paroi : implantation, profondeur et largeur de la paroi ;
- la perméabilité du matériau traité (k en m/s) ;
- la résistance mécanique du matériau après traitement (souvent caractérisée par la mesure de la résistance à la compression simple R_c en MPa, après un certain temps de cure).

Utilisation :

La réalisation de parois minces comme tous les écrans verticaux étanches permet de traiter les problèmes d'érosion interne et de saturation du remblai des digues à la fois dans le corps de digue et dans sa fondation.

Figure 3 : Réalisation d'une paroi mince sur une digue de Loire à Avaray (45). Un profilé métallique de type HEB800 en position haute est mis en place par vibrofonçage à l'aide d'un vibreur type ICE815C (en vert à son sommet) (crédit photo : Cerema de Blois)

La technique peut être limitée par les conditions suivantes :

- la présence de gros blocs dans le sol ou de sol de forte compacité constituant la digue, qui peut empêcher la progression du profilé métallique en profondeur ;
- la présence de cavités qui peut entraîner des pertes de coulis importantes ;
- la forte perméabilité du sol constituant le remblai qui peut mener à un lessivage du coulis ;
- la taille maximale de l'outil qui limite la profondeur de la paroi à 20 mètres en règle générale, exceptionnellement 25 mètres.

La technique est intéressante parce qu'elle génère peu de déchets, les profilés étant foncés dans les sols en place. Cette méthode est par ailleurs couramment utilisée afin de réaliser les travaux d'étanchéification au niveau de points singuliers (ouvrages traversant notamment) lors de la mise en œuvre d'autres techniques d'étanchéité.

Variantes :

La paroi mince peut être remplacée par d'autres techniques d'écrans étanches verticaux (voir Alternatives ci-dessous) et la nature du coulis peut faire l'objet d'une adaptation.

Alternatives :

- Rideau de palplanches interne (FT 3.1) ;
- Paroi moulée (FT3.3) ;
- Sol mixé (T3.4) ;
- Jet grouting (FT 3.5) ;
- Étanchéification externe de la digue (FT 3.6).

Dimensionnement :

Principe :

Le dimensionnement des écrans « étanches » est guidé par l'étude hydraulique de la digue et les objectifs de réduction de la vulnérabilité de l'ouvrage sous l'effet des écoulements dans le remblai ou dans le sol support, susceptibles de conduire à une érosion interne.

Paramètres nécessaires :

Les éléments à prendre en compte lors du choix de la technique sont :

- la granulométrie et la blocométrie maximale des matériaux constitutifs de la digue (compatibilité avec le matériel de fonçage, battage ou vibrofonçage du profilé) ;
- l'état de densification du matériau en place avec évaluation du risque de tassement lors des opérations de lançage dans le sol par fonçage, battage ou vibrofonçage ;
- l'abrasivité des sols en place ;
- l'absorption moyenne du coulis par les terrains en place ;
- la présence éventuelle de cavités ;
- la qualité des eaux au contact du coulis (nappe) ;
- la largeur de la plateforme/de la crête de digue ;
- le niveau de nappe éventuel ou le niveau d'eau du plan d'eau ;

- la stabilité de la digue (au glissement ou poinçonnement) du fait de la présence d'un atelier en crête de digue ;
- l'évaluation du risque de claquage des sols sous l'effet de la pression d'injection.

Éléments de conception :

Les éléments à prendre en compte en plus de ceux listés dans la phase « données à recueillir » sont essentiellement liés aux contraintes de gestion du chantier, et déjà détaillés dans l'introduction générale du guide. À noter, en particulier :

- l'accessibilité au site pour le matériel de fonçage et pour le matériel générant l'alimentation en ciment/coulis ;
- les modalités de raccordement aux ouvrages existants éventuels…

Lors de la phase de conception il est également nécessaire de définir la formulation du coulis mis en œuvre au regard des sols rencontrés.

Un exemple de plan de localisation et de coupe transversale d'une paroi mince est donné sur la Figure 4.

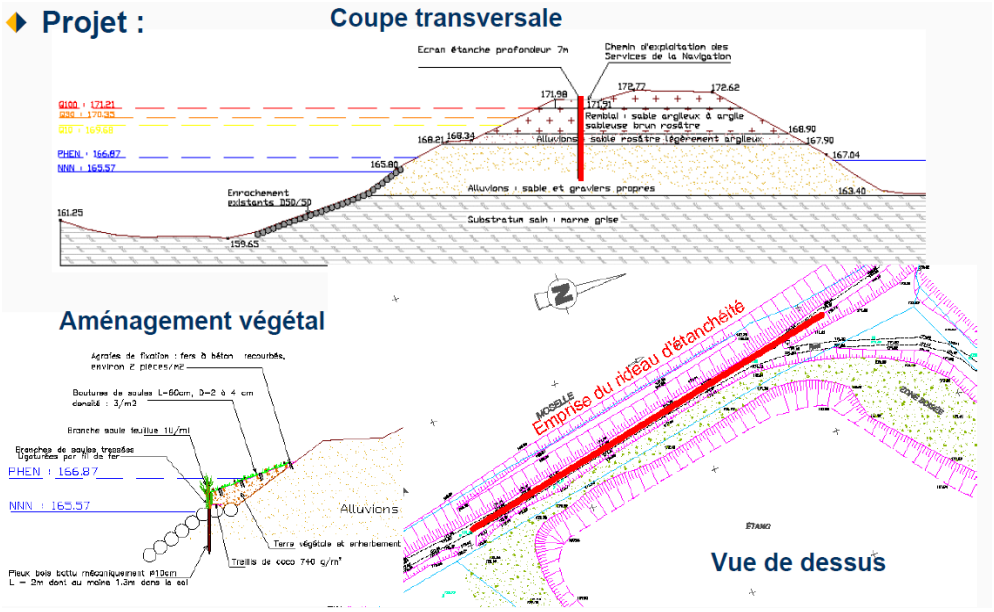


Figure 4 : Coupe transversale type, plan de localisation d'une paroi mince telle que projetée pour la digue de la Polka à Jouy-aux-Arches (en photo) (57) (source et crédit photo : S. Lambert, Ets Keller France)

Modèles disponibles :

Les modélisations seront faites selon des modalités classiques de dimensionnement d'ouvrages hydrauliques présentés en introduction.

Aspects pratiques (CCTP, chantier,) :

Cahier des charges :

Le cahier des charges portera en particulier sur les points suivants :

- la consistance du laboratoire de chantier (contrôle intérieur) précisant la liste des essais à réaliser tels que :
    - les essais de convenance et planche d'essai ;
    - les contrôles qualité du coulis (caractéristiques du coulis, viscosité, densité…) ;
    - le suivi des paramètres d'injection et de consommation du coulis ;
    - le suivi des paramètres d'enfoncement du profilé ;
    - le suivi éventuel des nuisances (bruit, vibration, poussières…) ;
    - le suivi des tassements ;
    - le suivi des niveaux d'eau de la nappe (piézomètres) ;
    - les mesures spécifiques à la réception des travaux (mesures de perméabilité, de résistance mécanique…) ;
- la description des fournitures et leurs caractéristiques attendues (ciment, bentonite, adjuvants, sables, nature de l'eau d'apport si nécessaire...) ;
- la réalisation des travaux proprement dits, gestion des points sensibles (ouvrages traversant) et des anomalies (zones de refus), les critères de refus admissibles (ou de profondeur minimale à atteindre), le principe de recouvrement entre les passes, contrôle du volume de remplissage des empreintes, contrôle de déviation de la paroi/verticalité…).

Chantier :

La réalisation d'une paroi mince s'effectue par l'enfoncement d'un profilé métallique en forme de H équipé de buses d'injection à sa base au niveau du sabot de pied (Figure 5). Le plus souvent l'enfoncement est réalisé par vibrofonçage, mais d'autres techniques peuvent convenir selon la nature des sols en place et des contraintes environnantes (battage, fonçage dont les conditions de mis en œuvre sont identiques à la mise en place d'une palplanche, voir fiche FT G1). Le profilé est guidé pendant la descente afin d'assurer la verticalité de l'enfoncement (guide, inclinomètre…).

Figure 5 : Détail d'un profilé et des buses d'injection à sa base, chantier canal de Lens à Noyelles-sous-Lens, 2006 (crédit photo : S. Lambert, Ets Keller France)

L'enfoncement du profilé peut être facilité par injection simultanée du coulis servant de lubrifiant et éventuellement de stabilisant pour les parois du forage.
Lors de la remontée du profilé, l'injection du coulis comble l'empreinte en forme de H et crée ainsi l'un des panneaux de la paroi mince.

La répétition de ce processus de proche en proche, avec recouvrement partiel, aboutit à la mise en place d'un écran étanche continu. La machine progresse en général à reculons. Il est nécessaire d'anticiper le recouvrement entre chaque empreinte (environ 5 cm) pour garantir la continuité de l'écran (Figure 6).

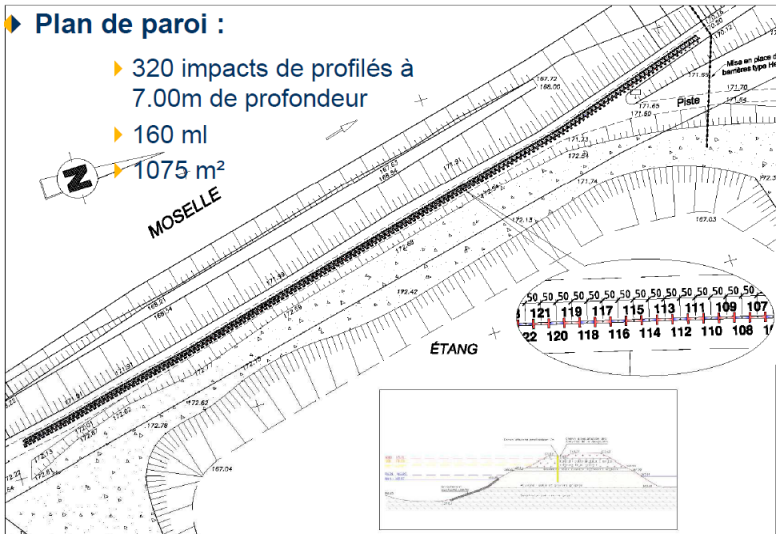


Figure 6 : Plan de récolement de la paroi mince réalisée sur le chantier de la digue de la Polka à Jouy-aux-Arches (57) avec la numérotation et le recouvrement de chaque empreinte (ou impact) (source : Ets Keller France)

Le coulis est fabriqué au niveau d'une centrale qui peut comprendre :

- une unité de fabrication de boue mère ;
- une unité de fabrication de coulis ;
- un bac de reprise du coulis ;
- un stockage de boue mère ;
- des silos à pulvérulent (ciment, bentonite, adjuvants…) ;
- une pompe ;
- une centrale de pompage.

Des paramètres de fabrication peuvent permettre d'enregistrer notamment la pression et le débit d'injection.

Une prétranchée (Figure 7) peut être réalisée en avance au tractopelle en crête de digue. En phase travaux, cette prétranchée est maintenue en permanence avec du coulis pour compenser en temps réel d'éventuelles surconsommations de coulis dans la paroi mince, aussi bien en phase travaux que pendant les arrêts de chantier.

Enfin, la Figure 8 montre l'allure d'une paroi mince après recépage de celle-ci.

Figure 7 : Détail d'une prétranchée sur la digue de la Polka à Jouy-aux-Arches en Moselle (57) (crédit photo : S. Lambert, Ets Keller France)

Matériaux et matériels nécessaires :

- Matériels spécifiques : grue, vibrofonceur (ou autre dispositif de mise en œuvre du profilé métallique), profilé métallique, centrale de malaxage et d'injection de coulis ;
- Matériaux spécifiques : coulis d'injection (ciment, sable, bentonite, adjuvants, eau), matériaux de remblai pour remise en état du site, terre végétale le cas échéant, matériaux spécifique à la remise en état de voiries.

Nuisances et environnement :

Cette technique peut engendrer les nuisances suivantes :

- salissures aux abords immédiats du chantier (circulation d'engins, coulure de coulis…) ;
- bruits de chantier ;
- vibrations liées à la mise en œuvre du profilé métallique ;
- émission de poussières (ciment, pistes de chantier...) ;
- pollution des eaux en cas de rencontre de chemin préférentiel d'écoulement dans le corps de digue.

Contrôles d'exécution :

Les principaux contrôles à mettre en place lors des travaux sont les suivants :

- contrôles de la qualité du coulis (caractéristiques du coulis, viscosité, densité, calorimétrie…) ;
- suivi des paramètres d'injection et de consommation du coulis ;
- suivi des paramètres d'enfoncement du profilé : les paramètres du « forage » peuvent être mesurés en continu à l'aide d'un enregistreur de paramètres (vitesse d'avancement instantanée, profondeur, verticalité…) ;
- contrôle de recouvrement.

Autres dispositifs de contrôle et de suivi des travaux :

- suivi des nuisances (bruit, vibration, poussières…) ;
- suivi des tassements ;
- suivi des niveaux d'eau de la nappe (piézomètres) ;
- prélèvement d'échantillons pour confection d'éprouvette et vérification de la résistance à la compression simple et de la perméabilité en laboratoire ;
- vérification de la perméabilité in situ ;
- suivi de l'implantation de l'ouvrage et du recouvrement (Figure 6).

À titre d'exemple, le plan de contrôle mis en œuvre sur le chantier de Noyelles-sous-Lens (62) était le suivant :

- 3 prélèvements par jour d'échantillon de coulis, avec stockage en milieu humide ;
- contrôle des propriétés mécaniques du coulis sur 5 éprouvettes/semaine avec 2 essais de résistance à la compression simple à 7 jours, 2 essais résistance à la compression simple à 28 jours et un essai de perméabilité ;
- contrôle du niveau du canal par un capteur de hauteur d'eau avec système d'enregistrement ; en cas de variation brutale du niveau, la paroi était à reprendre
- contrôle du pH de l'eau de rejet avant rejet dans le canal.

Figure 8 : Paroi mince après recépage – canal de fuite CNR de Donzère-Mondragon (crédit photo : B. CHALUS, CNR)

Vitesse d'avancement :

300 à 400 m^2/jour

Traitement de points singuliers (extrémités, ouvrages inclus notamment) :

Le raccordement aux ouvrages existants ainsi que le traitement des ouvrages traversant peut-être réalisé en adaptant les modalités de réalisation de la paroi mince elle-même (en jouant sur les paramètres d'injection et le choix des buses d'injection). Sinon, le traitement des ouvrages traversant doit être effectué par des méthodes complémentaires dont la faisabilité doit être réaliste avec les contraintes du site (injection, sol mixé…).

Remise en état du site :

Inclus :

- la remise en forme de la digue après travaux ;
- la reprise des voiries ;
- la végétalisation des talus le cas échéant ;
- l'enlèvement des aires de stockage et des pistes de chantier.

Références :

- Bonnet P., Riesterer J.-M. (2005). Retour d'expérience d'un grand chantier d'écran mince au canal de dérivation EDF de Strasbourg. Ingénieries, n° spécial, pp.139-150
- Site internet Soletanche Bachy, consultation décembre 2018 : http://www.soletanche-bachy.com/sbf/referencesb.nsf/TechnicsSortedFR/22534C5F8EC7856EC1256A45006D563C?OpenDocument
- Garandet A., Vincent S., Guilhem O., Rousselet R., Fry J.-J. (2015). Retour d'expérience de parois d'étanchéité de barrages en remblai et de leurs fondations. Symposium de CFBR, 29 janvier 2015, Grenoble, France https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/09_-_fry_-_retour_d_experience_de_parois_d_etancheite_de_barrages.pdf
- NF P94-282 (2009). Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènement - Écrans
- NF P94-282/A1 (2015). Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènement - Écrans - Amendement 1

Source des Figures :

- Figure 2 : Solétanche Bachy – Renforcement de l'étanchéité des digues – Inventaire des méthodes – Les procédés GEOMIX et TRENCHMIX, http://www.strres.org/fichier-utilisateur/fichiers/matinee_technique/06_12_2012_m_monleau-trenchmix_et_geomix.pdf , 09 juillet 2020

	Fiche Technique **Paroi moulée à fonction d'étanchéité** « cut-off » walls	**Fiche FT 3.3**

Auteurs principaux : B. CHALUS (CNR)
Contributeurs : D. POULAIN (INRAE) ; M. SUTTER (INRAE) ; R. TOURMENT (INRAE)
Relecteurs : L. SAUSSAYE (Cerema) ; J-F. FREZET (EGIS) ; P-L. REGAZZONI (EGIS) ; S. PATOUILLARD (DREAL) ; J-C. PALACIOS (Safege)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais:
"Cut-off" walls are vertical screens made continuously which prevents water flows. During the drilling, a water-cement-bentonite-grout replaces the excavated soil in the trench. With time, the grout is hardening. This is a particular application of flexible wall which also includes bentonic walls and plastic concrete walls.

Etude(s) de cas correspondante(s) :
C1.08 Canal de Donzère-Mondragon à St-Paul-Trois-Châteaux (26)
C1.20 Digue de Langlade à Toulouse (31)

Indications :

Définition :

Les parois moulées au coulis sont des écrans verticaux réalisés en continu par comblement d'une tranchée généralement par un mélange eau-ciment-bentonite auto-durcissant, appelé « coulis » (Figure 1). C'est un cas particulier de paroi souple qui comprend également les parois bentonitiques et les parois béton plastiques.

Figure 1 : Vue d'ensemble d'un chantier de paroi moulée, digue sur le Rhône à Beauchastel (07) (crédit photo : CNR)

Sujet de la fiche :

Cette fiche traite de l'usage de parois moulées dans le cadre du renforcement de l'étanchéité des digues, cas où elles sont particulièrement appréciées du fait de leur caractère imperméable et de leur déformabilité.

Cette fiche ne s'intéresse ni aux parois moulées armées utilisées en soutènement, ni aux parois minces (Fiche FT 3.2).

Fonction principale :

Cette paroi a pour vocation de diminuer la perméabilité de l'ouvrage et par conséquent de limiter les débits et les gradients dans la digue et sa fondation en allongeant les chemins hydrauliques. Ainsi, elle permet de limiter l'occurrence d'érosion interne.

Fonction(s) secondaire(s) :

Les parois moulées peuvent avoir un rôle structurel (cas fréquent pour les infrastructures de transport souterraines au droit des stations ou échangeurs) qui peut être valorisé en phase définitive pour des ouvrages de traversée profond, des écluses ou des stations d'exhaures et en phase chantier. Cette fonction secondaire n'est pas examinée dans cette fiche.

Notons par ailleurs que ce type de paroi a pu être utilisé pour remplir des cavités difficiles d'accès à l'intérieur de la digue (vides et galeries) – en acceptant une surconsommation de coulis.

Description :

Performance à atteindre :

- Géométrie de l'écran : implantation, profondeur et largeur ;
- Perméabilité faible et géométrie prévue afin d'assurer la fonction principale ;
- Résistance mécanique* du matériau (caractérisée par la résistance à la compression simple) et déformabilité pour éviter la fissuration, notamment lors des premiers mois de mise en service ;
- Stabilité physique et chimique de l'écran vis-à-vis des terrains et des eaux en présence ;
- Résistance à l'érosion interne (également caractérisée par la résistance à la compression simple) ;
- Maniabilité du coulis pour la mise en œuvre.

* La résistance mécanique est un paramètre d'intérêt à plusieurs titres :

- En phase provisoire et définitive, ce paramètre est un indicateur pour la capacité de l'écran à supporter la circulation (piétons ou engins) ;
- En phase définitive si l'ouvrage n'a pas de rôle porteur, il supporte toutefois son propre poids.

Utilisation :

Les techniques d'étanchéité par paroi moulée ont été développées dans le cadre de confortement de barrages puis adaptées aux digues en cas de défaut d'étanchéité. Les principaux défauts correspondent à la présence d'une nappe haute, voire de fuites (traduisant une surcharge hydraulique dans le corps de l'ouvrage) au niveau du talus aval, et/ou un phénomène d'érosion interne dans le pire cas possible. Elles sont à distinguer des parois moulées réalisées dans d'autres types de construction où elles ont également un rôle de soutènement (parking souterrain, écluses...).

La technique de paroi moulée au coulis permet de traverser des terrains variés (limons, graviers, galets, voire blocs, roche altérée) et d'atteindre des profondeurs importantes (supérieures à 20 m).
Trois types d'outils sont utilisables selon le type de terrain :

- des bennes preneuses pour les sols meubles ;
- des cutters ou hydrofraises pour les sols compacts et les roches non abrasives ;
- le trépan dans le cas de roches compactes et abrasives (Figure 2)

La technique de paroi moulée au coulis permet l'usage de dispositifs spécifiques, autorisant le passage dans des sols durs (indurés, abrasifs ou avec présence de blocs notamment), voire un ancrage dans le substratum rocheux suivant sa compacité.

Figure 2 : Vue d'un trépan (crédit photo : CESM)

De plus, les parois constituées étant épaisses et déformables, elles présentent une bonne fiabilité vis-à-vis du risque de fissuration.
Ces techniques peuvent être appliquées pour les digues sèches comme pour les digues en charge.

Cette technique présente cependant plusieurs limitations en termes d'utilisation :

- La taille de l'atelier et de la machine utilisée est conséquente. Les digues doivent donc être relativement larges. L'emprise doit par ailleurs disposer d'un tirant d'air suffisant pour accueillir la hauteur de l'atelier (Figure 3). Typiquement sous les ponts cette technique est difficile à mettre en œuvre et pourra être complétée par du jet grouting (cf. FT 3.5). À noter que de nouvelles technologies concernant la mise en œuvre des parois moulées et répondant à la problématique de la taille de l'atelier/machine sont en train de voir le jour ;
- La technique génère de grands volumes de déblais (sols mélangés à la bentonite) et nécessite une emprise complémentaire pour aménager des bassins d'essorage provisoires ou définitifs et les installations de recyclage des boues (Figure 4) ;
- Des terrains trop ouverts (perméabilité de l'ordre de 10^{-2} m/s) pouvant générer des pertes importantes de coulis (Figure 5) et des éboulements de parois de la tranchée ;
- La présence de gypses, qui présentent un risque de dissolution lors de la réalisation de la paroi ;
- Des vitesses d'écoulement de nappe trop importantes pouvant entraîner le lessivage du coulis ;
- Des terrains trop compacts ou abrasifs, y compris avec l'emploi du trépan (rocher sain ou présence de quartz rendant difficile l'excavation).

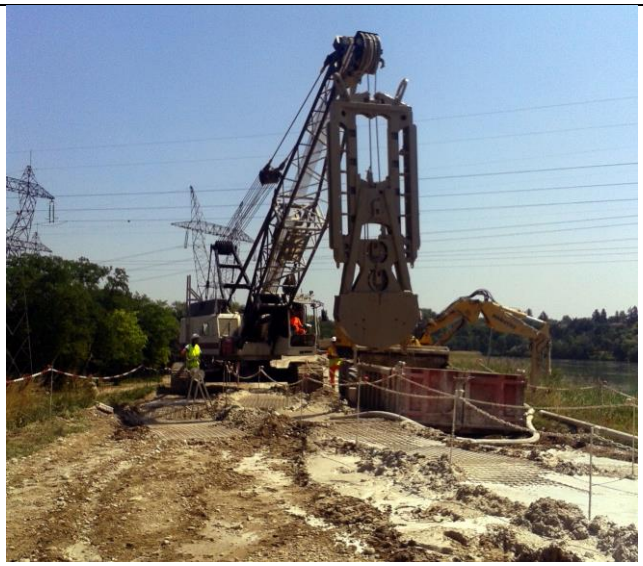


Figure 3 : Atelier de paroi moulée en crête de digue sur le chantier du canal de Jonage (69) (crédit photo : Egis)

Figure 4 : Installation de traitement des déblais et de recyclage des boues sur le chantier du canal de Jonage (69) (crédit photo : Egis)

Figure 5 : Constat d'affaissement en surface de paroi – retenue de Beauchastel sur le Rhône (07) (RG PK118.500) (crédit photo : CNR)

Cependant, il est possible de s'affranchir de ces contraintes moyennant des dispositions spécifiques :

- En cas de pertes lentes ou modérées de coulis, un surplus de coulis peut être déversé dans la tranchée et des compléments peuvent être réalisés à intervalles réguliers jusqu'à un temps déterminé après la première mise en œuvre (attention aux horaires de travail). Un épaississement du coulis peut être aussi décidé ;
- En cas de pertes soudaines (horizon très perméable), des sacs de ciments ou de sable peuvent être déversés dans la passe de paroi en cours de réalisation, de manière à colmater la fuite (Figure 6). Cela n'est possible que dans les jours qui suivent la mise en œuvre ; avant sa reprise. D'autres solutions peuvent être étudiées par anticipation ou si le phénomène persiste (prétraitement en tête de paroi, pré-injections…), le dernier recours étant un remblaiement de la passe.

Figure 6 : Matériaux pour traitement d'un affaissement en surface de paroi – retenue de Beauchastel sur le Rhône (07) (RG PK118.500) (crédit photo : CNR)

Alternatives :

- Rideau de palplanches (cf. FT 3.1), paroi mince (cf. FT 3.2), paroi en sol mixé (cf. FT 3.4), jet grouting (cf. FT 3.5) ;
- Étanchéité externe côté eau (cf. FT 3.6) ;
- Drainage côté zone protégée (cf. travaux SG3).

Dimensionnement :

Principe :

Le dimensionnement porte essentiellement sur :

- Le niveau de perméabilité à atteindre dont dépendent le choix du coulis et sa formulation ;
- La profondeur à atteindre en lien avec la présence éventuelle d'une nappe ;
- L'épaisseur de la paroi prenant en compte le gradient maximum, les déformations attendues et la nature du terrain (présence de blocs erratiques par exemple).

Paramètres nécessaires :

Les éléments à prendre en compte lors du choix de la technique sont sensiblement similaires à ceux de la technique de paroi mince (cf. fiche FT 3.2). En particulier, les données d'entrée nécessaires à la conception du confortement sont :

- Le diagnostic visuel, géotechnique et géophysique de la digue et de sa fondation ;
- La perméabilité et granulométrie des matériaux en contact avec la paroi (estimations importantes pour prévoir la consommation de coulis) y compris comportement à l'interface ;
- Les données hydrauliques pour la crue de projet et leur évolution temporelle : hauteur d'eau, écoulements internes…
- Les données piézométriques ;
- Le fond géochimique des sols en place (pollution, présence de minéraux particuliers dans le sol…).

Éléments de conception :

Pour préciser ou en complément des éléments déjà donnés dans les paragraphes précédents, il est important d'intégrer à la réflexion :

- La recherche d'une zone d'installation de chantier pour la centrale et les silos de stockage ;
- La recherche de surfaces disponibles pour la réalisation des bassins d'essorage ;
- La continuité de l'exploitation des ouvrages (digue en charge notamment) ;
- Les surfaces à traiter et les délais prévus pour l'opération, qui détermineront l'ordonnancement des travaux (nombre d'ateliers, nombre de postes…) ;
- Le linéaire de digue à traiter qui permettra de dimensionner les moyens d'acheminement du coulis à pied d'œuvre (pompes de reprises...) ;
- La profondeur à atteindre qui déterminera également les moyens matériels à mettre en œuvre ;
- Le traitement des ouvrages singuliers (ouvrages traversants, lignes aériennes et enterrées, passages à gabarit réduit...).

3 principaux composants présents en quantités variables constituent le coulis : l'eau, le ciment et la bentonite. Il est également possible d'ajouter des adjuvants, afin d'augmenter le temps de prise, permettre de réaliser le chantier dans des conditions particulières…

Une composition courante pour 1 m^3 de coulis fabriqué est :

- 130 à 300 kg de ciment ;
- 25 à 50 kg de bentonite ;
- Un retardateur de prise.

La qualité du ciment utilisé devra être adaptée aux conditions du site.

Modèles disponibles :

- Calcul d'écoulement par logiciel spécifique (Figure 7) ;

- Vérification de la résistance à l'érosion interne de la fondation à la base de l'écran et dans le remblai dans la partie zone protégée et de l'écran lui-même côté eau (variations de niveau d'eau) ;
- Calcul de stabilité par logiciel spécifique afin de vérifier que l'ouvrage est stable dans sa configuration finale et provisoire.

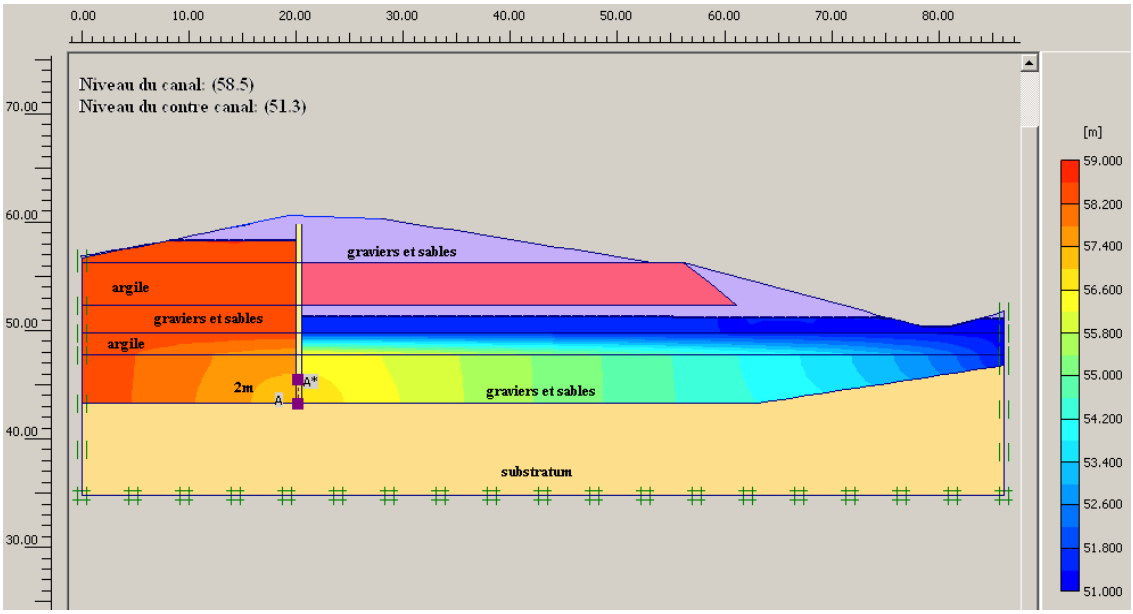


Figure 7 : Exemple de distribution de charges dans une digue avec paroi moulée – cas du canal de Donzère-Mondragon (26) (crédit photo : Egis)

Les calculs d'écoulement et de stabilité peuvent être réalisés sur des logiciels courants tels que Plaxis, Geostudio pour les écoulements, Talren et Geostudio pour la stabilité....
Pour l'érosion interne, il est possible de se référer aux documents issus du programme ERINOH, entre autres.
En phase de conception, les missions relevant du domaine de la géotechnique sont définies dans la norme NF P94-500 (phase G1, G2) et doivent être réalisées.

Aspects pratiques :

Cahier des charges :

Seuls les éléments principaux sont décrits dans ce paragraphe, qui sera complété par les autres indications de cette section (chantier, matériaux…).

Le cahier des charges doit préciser les éléments de contexte (réglementaire, technique…) et l'objectif des travaux.
Les données de site doivent être précisées, en particulier :

- Les caractéristiques (dimensions) de la digue à traiter ;
- La présence et la description des réseaux en place, traversants ou non ;
- La nature et les caractéristiques géomécaniques des sols ;
- Le contexte hydrogéologique ;
- Le contexte et les exigences environnementales ;

- Les emprises provisoires et définitives et les circulations en phase chantier.

Après définition des travaux préparatoires (gestion de la végétation, accès, installations de chantier…), l'ouvrage principal à réaliser doit être décrit pour sa section courante (linéaire, largeur, profondeur, épaisseur, surface), ses points singuliers et ses extrémités.

Les ouvrages, essais et points de contrôle permettant le suivi de la qualité de l'ouvrage en cours de chantier doivent être également décrits (murettes guide, essais de convenance, essais en cours de chantier, niveau de coulis, profondeur, continuité de paroi).

Les ouvrages, actions et points de contrôle permettant le suivi de l'efficacité de l'ouvrage en cours de chantier et après les travaux doivent être également décrits (caractéristiques des piézomètres, bac de jaugeage de fuites, suivi visuel du talus aval, tubes thermométriques, tubes inclinométriques...).

Le cahier des charges doit également préciser le phasage envisagé et le mode de réalisation des travaux (horaires, postes, ateliers…) afin de tenir le délai de l'opération qui sera également précisé.
Le cahier des charges précisera, à cet effet, les procédures principales prévisionnelles nécessaires et applicables pour la réalisation et le suivi du chantier.

Le devenir des matériaux doit être décrit (bassins d'essorage, lieu de stockage…).

Les éléments liés à la sécurité du chantier sont à décrire ou rappeler s'ils sont contenus dans un document spécifique (PGCSPS ou plan de prévention) suivant le volume du chantier.
Les mesures liées à la protection de l'environnement à mettre en œuvre dans le cadre du chantier sont à décrire ou rappeler si elles sont définies précisément dans un document spécifique (SOGED, PAQ, PAE, arrêté préfectoral…).

Les critères de réception de l'ouvrage doivent être donnés à partir des éléments décrits ci-dessus.
Le marché doit également faire figurer une analyse des risques et :

- Les mesures préventives à inclure dans le contrat ;
- Les mesures correctives à mette en place en cas d'aléas de chantier.

Le cahier des charges intégrera une mission géotechnique de type G3 au sens de la norme NF P94-500 à réaliser par l'entreprise en charge des travaux.

Chantier :

Méthodologie générale :

- Réalisation des accès pour les engins de terrassement et l'approvisionnement ;
- Travaux préparatoires du chantier :
    - Réalisation des installations fixes spécifiques au chantier de paroi moulée ;
    - Construction des pistes pour la circulation des engins et la continuité d'exploitation des ouvrages (pistes provisoires) ;
    - Déviations des éventuels réseaux ;
- Mise en œuvre éventuelle de dispositifs d'auscultation pour la surveillance en cours de travaux ou ultérieurement (piézomètres, tubes thermométriques…) ;
- Réalisation de tranchée préalable ;

- Implantation du tracé de l'écran et réalisation de murettes guides en béton armé pour le guidage de l'outil ;
- Creusement/excavation de la paroi et remplissage simultané au coulis auto durcissant ;
- Remise en état après travaux (travaux de VRD).

Dans le détail :

L'implantation de la paroi et le guidage de l'outil d'exécution sont généralement assurés par la réalisation préalable de murettes-guide en béton armé. L'excavation se fait ensuite sous coulis, par passes primaires et secondaires successives repérées préalablement au sol (Figure 8). Ce coulis, fabriqué dans une centrale installée sur le site, est acheminé vers la tranchée par des conduites.

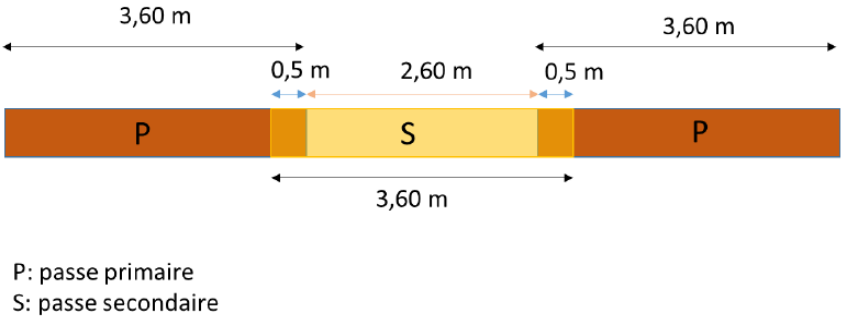


Figure 8 : Principe de forage par passes successives (source : Soletanche Bachy)

C'est le coulis qui assure la stabilité de la tranchée en formant une couche fine très peu perméable sur les parois de la tranchée et en exerçant une poussée qui s'oppose à la pression de la nappe (Figure 9).

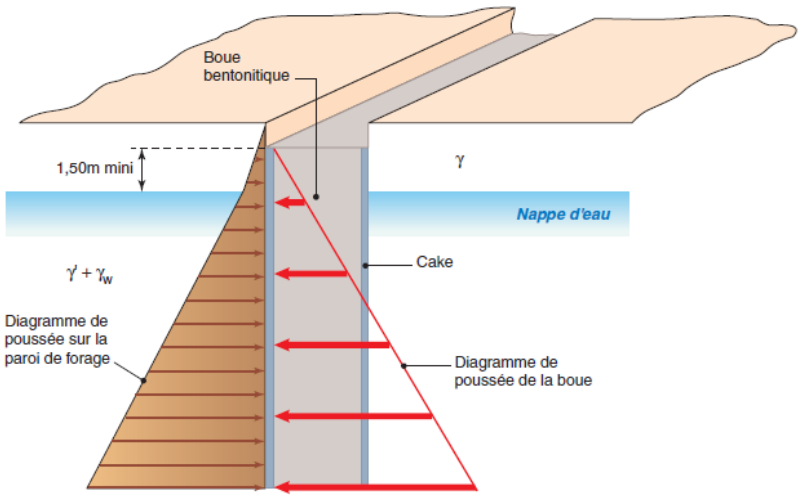


Figure 9 : Principe de soutènement (source : guide technique LCPC)

Pour chaque panneau, une fois la profondeur atteinte, le coulis reste en place et au bout de quelques jours, fait prise, constituant ainsi l'écran étanche (Figure 10).

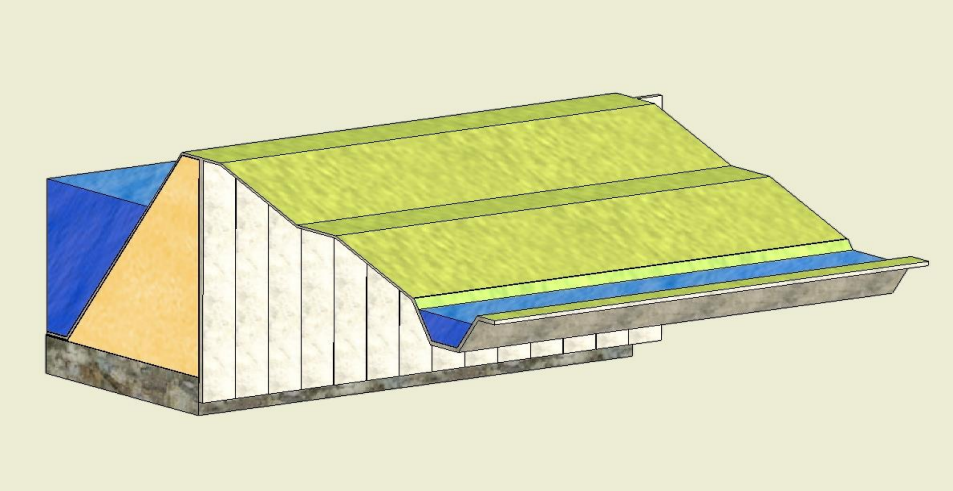
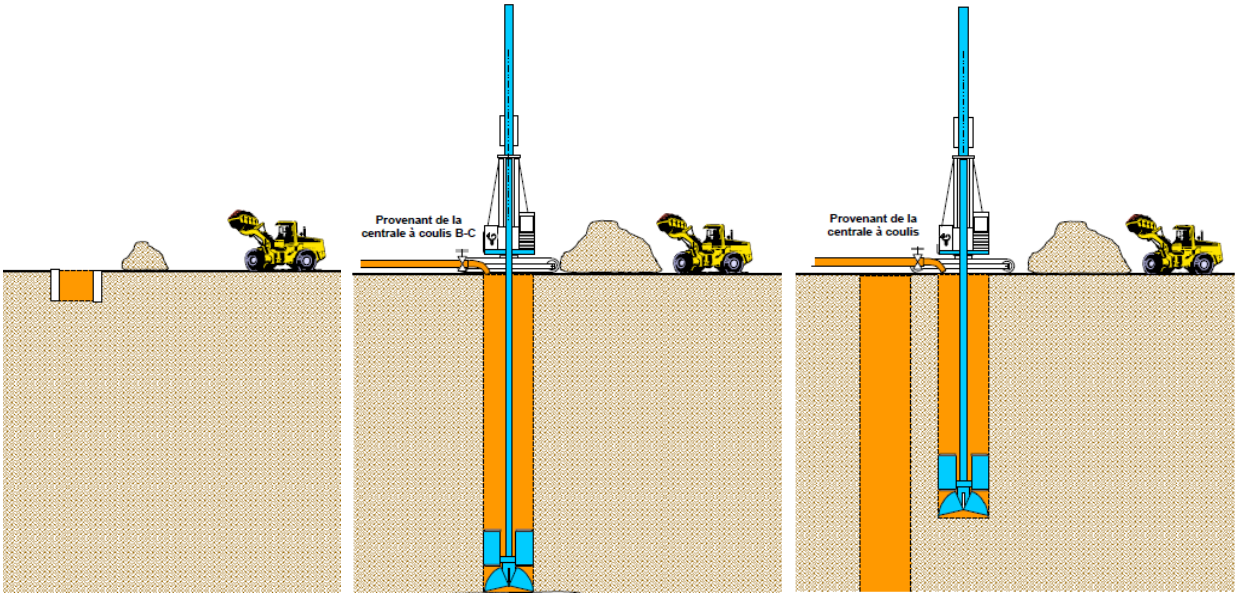
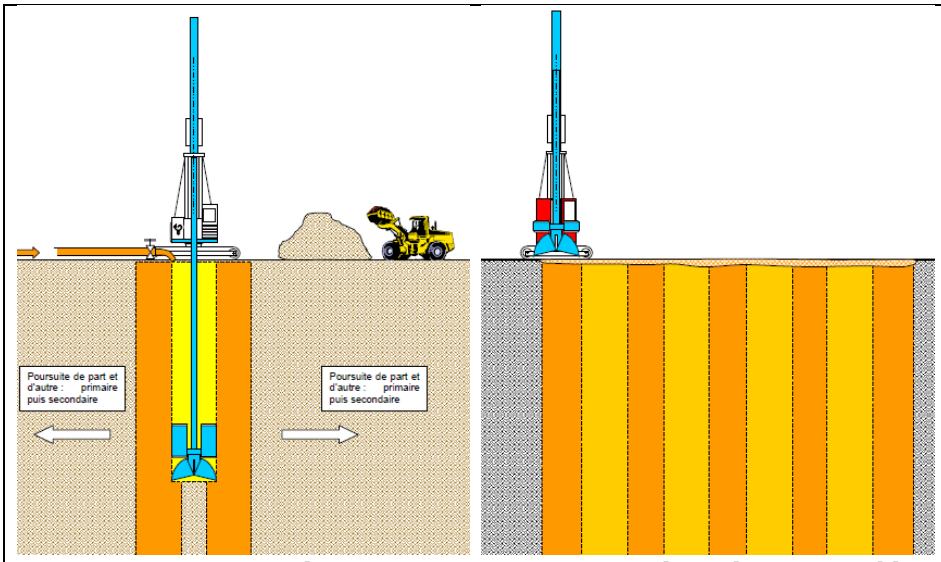


Figure 10 : Représentation schématique de l'écran obtenu (source : CNR)

Afin de garantir la continuité de l'écran, le plan de calepinage des passes impose que chaque passe secondaire remorde les passes primaires qui l'encadrent (Figure 11).



1 – murettes-guide 2 – passe primaire 3 – seconde passe primaire



4 – passe secondaire 5 – poursuite du cycle avant remblai

Figure 11 : Phasage de réalisation d'une paroi moulée au coulis à la benne (source : Presspali/ICOP)

Suivant la profondeur à atteindre, différents modes d'excavation sont utilisés : pelle à godet rétro pour les faibles profondeurs (< 10 m) (Figure 12), benne hydraulique lourde ou benne à câbles montée sur grue à treillis pour les ouvrages profonds (> 10 m). L'outil est aussi à adapter en fonction de la nature des terrains.

Figure 12 : Paroi réalisée à la pelle à godet rétro – retenue de Beauchastel sur le Rhône (07) (RG PK118.500) (crédit photo : CNR)

Les déblais sont ensuite chargés, en jet direct, dans des semi-remorques ou des dumpers (Figure 13) avant d'être transportés et déversés dans des bassins d'essorage (Figure 14).

Figure 13 : Chargement d'un dumper en déblais par la benne (crédit photo : CNR)

Figure 14 : Exemple de bassin d'essorage (crédit photo : CNR)

Les parois moulées sont en règle générale épaisses de 40 cm à 150 cm. Une épaisseur de 60 cm est l'épaisseur classiquement utilisée.

Matériaux et matériels spécifiques :

- Matériaux de construction de la paroi : coulis de paroi (gravitaire), coulis d'injection (sous pression) pour les points singuliers ;
- Matériels pour creuser la tranchée, pour injecter le coulis : benne à câble ou hydraulique ou hydrofraise, foreuse type kelly monobloc ou télescopique, pompe…
- Matériel de production du coulis : centrale généralement sur site, composée de silos de stockage (eau, bentonite, ciment, coulis entre chaque phases de préparation…) et d'un dispositif permettant de mélanger les matériaux composant le coulis (Figure 15) ;
- Géomembrane éventuelle pour l'étanchement des bassins.

Figure 15 : Exemple d'installation de chantier avec silos et centrale d'injection (crédit photo : CNR)

Nuisances / environnement :

Les points de vigilance en termes d'environnement portent en général sur :

- Le bruit ;
- La poussière liée à la circulation de chantier ;
- La pollution accidentelle ;
- Les pertes de coulis dans le cours d'eau ou les dispositifs de drainage (coulis inerte mais matières en suspension (MES) nuisibles à la faune piscicole).

Dans le choix des techniques et méthodes utilisées, il est recherché une limitation de ces nuisances, notamment en termes de vibration qui risqueraient de déstabiliser la digue.

Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance) :

- Validation/visa du PAQ, des procédures liées à la réalisation des prestations, des plans...
- Agrément des fournitures sur la base de fiches techniques produit ;
- Essais de convenance des coulis (en centrale et en laboratoire) lors de la formulation du coulis : densité, viscosité, rigidité, ségrégation, ressuage et essorage ;
- Essais sur des échantillons prélevés sur site :
  - Essais de résistance à la compression simple ou uniaxiale (R_c à 7, 14, 28 et 90 jours) (NF EN 12390-3) ;
  - Essais de densité (balance à boue) (NF T97-001) ;
  - Essais de viscosité (cône de Marsh) (NF P 18-507) ;
  - Essai de consistance (slump test) (NF EN 12350) ;
  - Essais de perméabilité (à 28 jours en perméamètre à membrane) (NF EN 16416) ;
  - Mesure de la rigidité (scissomètre) (NF P94-072) ;
  - Essai de lixiviation ;
- Contrôle de la verticalité de la paroi (déviation, inclinométrie) ;

- Contrôle en continu du niveau de coulis dans la paroi, notamment en cas de digue en charge (risque d'effondrement de la tranchée) ;
- Relevés et contrôles piézométriques ;
- Contrôle des volumes de coulis injectés.

Idéalement, la mission du maitre d'œuvre intégrera l'élément de mission G4 Supervision géotechnique d'exécution au sens de la norme NF P 94-500 pour vérifier l'application et la conformité des résultats issus du plan de contrôle. Selon la taille du chantier, le maître d'ouvrage aura avantage à missionner un bureau de contrôle extérieur pour réaliser des essais contradictoires et évaluer la fiabilité des essais réalisés par l'entreprise et au besoin mener des actions correctrices.

Au-delà de ces aspects de contrôle, la réalisation d'une paroi moulée nécessitera de mettre en place une astreinte en dehors des horaires de travail (nuits et week-ends) pour surveiller le niveau de coulis dans la tranchée.
De plus, une surveillance d'éventuelles fuites de coulis vers le plan d'eau (canal ou cours d'eau) et dans les contre-canaux est à mettre en place.

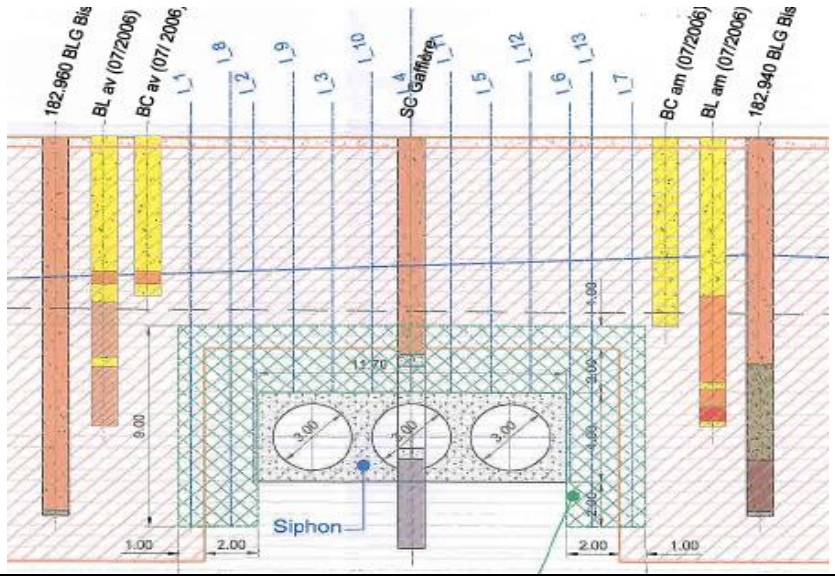
Vitesse d'avancement :

La vitesse d'avancement dépend notamment de la nature de matériaux en place et du nombre de postes et d'ateliers.
Elle peut atteindre de l'ordre de 100 à 200 m²/jour pour un poste de 8 h à 18 h.

Traitement de points singuliers :

- Réseaux traversant (travail en biais, injections en forages inclinés…) ;
- Zones encombrées et/ou difficilement accessibles du fait des lignes aériennes, passage sous ouvrage… (solution envisageables : changement du mât de la machine, changement de technique, matériaux spécifiques...).

Le traitement de ces points particuliers peut nécessiter de déployer des ateliers mettant en œuvre d'autres méthodes : injections, jet-grouting (cf. FT 3.5) (Figure 16).



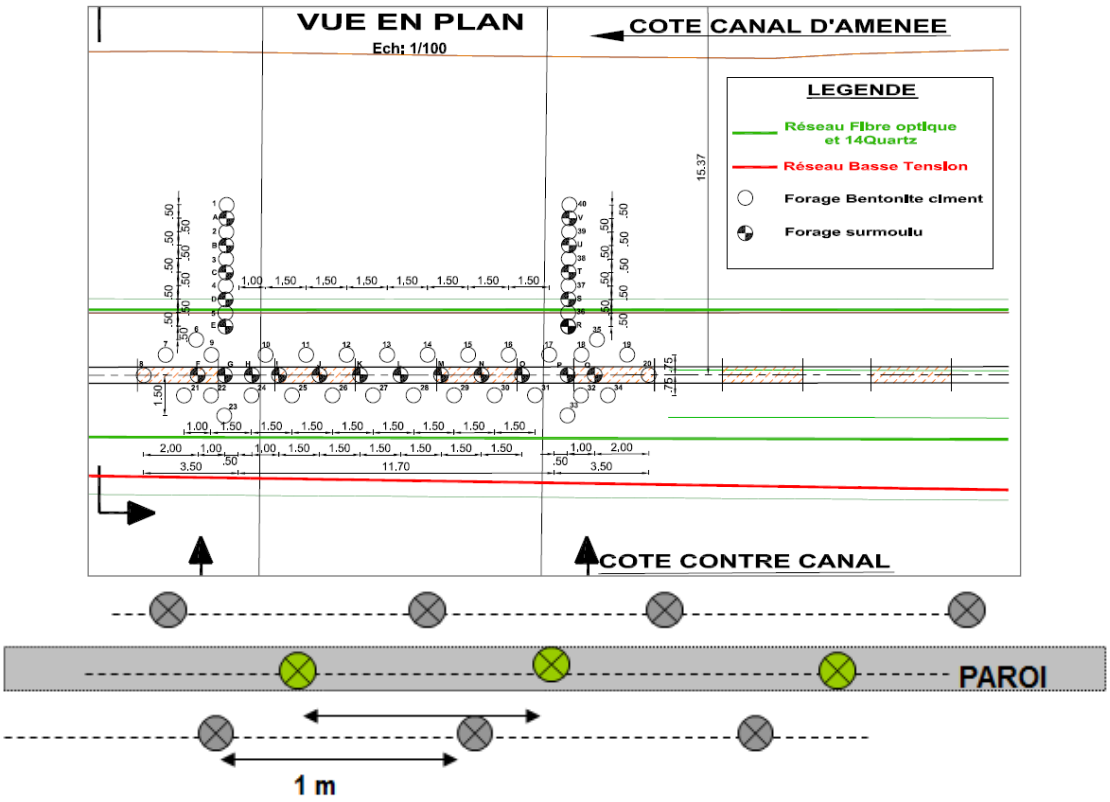


Figure 16 : Exemple de traitement d'ouvrage en béton enterré profond (siphon) sur le canal de Donzère-Mondragon (26). Injections préalables (I_ en bleu) et recoupement avec la paroi – élévation, vue en plan et détail (source : Egis)

Remise en état du site :

En particulier, il sera nécessaire d'évacuer et nettoyer les zones en crête de digue et le site de la centrale de production, afin de leur rendre leur état d'origine.

Références :

- Feynoux G. Y. (1985). Matériaux de remplissage pour coupure étanche. CIGB/ICOLD, Bulletin n°51, 1985
- NF EN 1538/IN1(2015). Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Parois moulées
- NF EN 1538+A1 (2015). Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Parois moulées
- Ouvrages de soutènement – Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des parois moulées et préfabriquées – Guide technique. LCPC, coll. Techniques et méthodes des LPC, 2003
- NF P94-500 (2013). Missions d'ingénierie géotechnique – Classification et spécifications
- NF EN 206/CN (2014). Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206
- NF EN 206/IN1 (2016). Béton - Spécification, performances, production et conformité

- NF EN 206+A1 (2016). Béton - Spécification, performances, production et conformité - Amendement 1
- NF EN 12350 (2009-2012). Essai pour béton frais
- Garandet A., Vincent S., Guilhem O., Rousselet R., Fry J.-J. (2015). Retour d'expérience de parois d'étanchéité de barrages en remblai et de leurs fondations. Symposium de CFBR, 29 janvier 2015, Grenoble, France
- Garandet A. (2009). Contrôle de l'efficacité d'un écran étanche et retour d'expérience sur les modifications des écoulements dans une digue en charge. CFBR, p. 317-326
- Le T. N. (2018). Les travaux de maintenance des digues CNR. CFBR, Journée Jeunes Ingénieurs

	Fiche Technique **Sol mixé/mélange en place** Deep mixing techniques	**Fiche FT 3.4**

Auteurs principaux : A. LE KOUBY (Univ. Gustave Eiffel) ; L. GERVAIS (DREAL)
Contributeurs : D. POULAIN (INRAE) ; M. SUTTER (INRAE)
Relecteurs : N. AUGER (DREAL) ; L. GERVAIS (DREAL) ; S. LAMBERT (KELLER Fondations Spéciales) ; L. SAUSSAYE (Cerema) ; SOLETANCHE-BACHY ; S. PATOUILLARD (DREAL) ; J.-C. PALACIOS (SAFEGE) ; B. CHALUS (CNR)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais :
Deep mixing techniques gather a large number of techniques that involve mixing the soil in place with a filler material in order to modify hydraulic characteristics (generally, it is desired to reduce the permeability) or mechanical ones (generally, it is sought an increase in mechanical performance).

Études de cas correspondantes :
C1.01 Digue d'Orléans à Sigloy et Guilly (45)
C1.02 Digue du val de Cisse à Veuves (41)
C1.35 Digue de Chavanay (42)

Indications :

Définition :

Les techniques de sol mélangés en place, sols mixés (soil mixing) mises en œuvre sur les digues englobent un grand nombre de techniques qui consistent à mélanger le sol en place à un matériau d'apport dans le but d'en modifier les caractéristiques hydrauliques (généralement, il est recherché une diminution de la perméabilité) voire mécaniques (généralement, il est recherché une augmentation des performances mécaniques).

Sujet de la fiche :

Cette fiche présente plusieurs techniques et matériaux utilisés pour réaliser ces mélanges en place.

Fonctions principales :

Création d'un écran étanche vertical dans le corps de la digue ancré suffisamment en profondeur pour limiter les écoulements internes qui pourraient initier/alimenter de l'érosion interne au sein de l'ouvrage.

Fonctions secondaires :

Soutènement, renforcement du sol.

Description :

Performances recherchées :

- Mélanger les sols de manière homogène afin d'éviter la création de zones de faiblesse, voire de vides ;
- créer un écran atteignant les critères de perméabilité et/ou de résistance mécanique recherchés.

Utilisation :

L'objectif de ces écrans étanches n'est pas de modifier la résistance structurelle de l'ouvrage mais d'assurer l'étanchéité de la levée et ainsi de la protéger vis-à-vis des phénomènes d'érosion interne. Afin qu'elles puissent assurer leur rôle en limitant les écoulements internes en cas de crue, les écrans étanches sont réalisés de la crête de la levée jusqu'à une profondeur suffisante pour éviter les risques d'érosion interne lors des crues.

Ces techniques peuvent être utilisées pour quasiment toutes les sortes de géométrie de digues, quel que soit le milieu (fluvial ou maritime). Cependant le matériel et les matériaux utilisés limitent parfois cette utilisation, notamment en raison :

- du fort encombrement des engins (trancheuse, foreuse, matériel d'injection...) ;
- de la réactivité du matériau d'apport avec le milieu.

La réalisation du mélange se fait à l'aide de divers outils. En général ce sont des outils de type hydrofraise, trancheuse ou des dispositifs dérivés de la tarière (Figure 1) qui sont utilisés.

Le principe de la technique utilisant une trancheuse consiste en la réalisation d'un écran étanche par mélange du sol en place avec un liant hydraulique et de l'eau. Le traitement du terrain s'effectue à l'aide d'un outillage rotatif à axe vertical permettant le malaxage des terrains en place.

L'outil de malaxage rotatif est constitué de tiges de forage, de couteaux transversaux et de mèches de tarière en pointe. La descente et la montée de l'outil sont facilitées par l'injection simultanée de coulis de ciment par des buses placées spécialement à l'extrémité de la tarière dans le cas de colonnes de grands diamètres et également sur les pales de malaxage. L'outil de malaxage varie de 0,60 à 2,40 m.

(1) (2) (3)

Figure 1 : Outils utilisables pour les différentes techniques de mélange en place : (1) Cutter Soil Mixing : panneaux sécants (Crédit photo : Bauer) (2) Trancheuse : tranchée en sol mixé (Crédit photo : Alain Le Kouby) (3) Tarière à colonnes sécantes ; (Crédit photo : vidéo BAUER : https://www.youtube.com/watch?v=SLs_UkhU1nY)

La profondeur maximum est étroitement liée à l'outil de malaxage utilisé. Elle peut atteindre 10 m pour la trancheuse, jusqu'à 18 m pour un outil rotatif et même plus pour le Cutter Soil Mixing (CSM).

Ces procédés utilisent la voie sèche ou la voie humide. Par voie humide, un coulis de ciment est injecté sous faible pression (moins de 1 MPa) à proximité des couteaux de malaxage. La voie humide est adaptée à tout type de sol quel que soit son état hydrique. La voie sèche convient par contre aux sols à forte teneur en eau qui sont aptes à apporter l'hydratation des liants injectés dans le sol sous forme sèche. Le principal avantage de ce procédé est de permettre la stabilisation à grande profondeur de sols très mous, y compris des sols organiques, avec des rendements élevés, un prix compétitif et très peu de déblais. Si l'état hydrique n'est pas suffisamment élevé la prise du liant avec le sol ne se fera pas de manière homogène (formation de grumeaux). Un apport d'eau par injection est alors à envisager au niveau de l'outil de malaxage. L'outil de mise en œuvre est alors adapté à l'un ou l'autre de ces procédés.

À titre d'exemple, la méthode la plus utilisée sur les chantiers des digues de la Loire est la méthode sèche.

À noter que le travail à basse température extérieure (< 0°C) est également possible.

Variantes :

Elles reposent exclusivement sur la nature du liant hydraulique : du ciment est généralement utilisé afin de créer un béton de sol, mais, pour des besoins spécifiques (fonctions associées...), il est envisageable d'utiliser d'autres liants tels que la chaux vive, des cendres volantes... Le choix est bien entendu dépendant de la composition du terrain rencontré.

Alternatives :

En termes d'alternatives, et afin de répondre à la fonction principale de contrôle des écoulements dans le corps de l'ouvrage, il y a plusieurs stratégies :

- étanchéifier le corps d'ouvrage par la réalisation de rideau de palplanches (FT 3.1), de paroi mince (FT 3..2), de paroi moulée au coulis (FT 3.3), de paroi en jet grouting (FT 3.5) ;
- étanchéifier le parement côté eau de l'ouvrage avec des parements peu ou pas perméables (FT 3.6) ;
- améliorer le drainage de l'ouvrage côté zone protégée par des massifs drainants, des écrans, des géotextiles... (travaux du SG3).

Dimensionnement :

Principe :

Le principal élément dimensionnant de tels ouvrages est la perméabilité de l'écran. Elle est principalement dépendante de la nature du sol, du liant et de son dosage, mais également de l'épaisseur de l'écran. La profondeur de l'écran est également un paramètre de dimensionnement important pour limiter les processus d'érosion interne. Le dimensionnement est effectué sur la base de la géométrie de la digue et des caractéristiques de sa fondation et il est vérifié au travers d'une modélisation des écoulements.

Plusieurs itérations peuvent être nécessaires pour optimiser ce dimensionnement en termes :

- d'épaisseur de l'écran ;
- de profondeur de l'écran (ou cote du pied de l'écran ou critère d'arrêt type substratum) ;
- de perméabilité après prise du mélange sol-liant.

La formulation du mélange de sol mixé est à adapter selon l'objectif recherché et se base sur des études de formulation.

Paramètres nécessaires :

Les paramètres nécessaires au dimensionnement sont notamment :

- la nature des sols en place (granulométrie, D_{max}, VBS, w_L) ;
- la présence de cavités souterraines ou de zones décomprimées ;
- les performances attendues du mélange sol-liant dont le temps de prise ;
- l'expérience des équipes sur la technique retenue.

Éléments de conception :

Contraintes de gestion du chantier :

- accessibilité au site du matériel et de l'alimentation en liant anhydre/coulis ;
- aire de stockage et largeur de la crête de digue ;
- cadence attendue (délai global) ;

- servitudes en termes :
  - de tirant d'air ;
  - de rétablissement d'ouvrage enterré ;
  - de rétablissement de voirie ;
  - de contrainte de circulation ;
  - de protection de l'environnement ;
  - de stockage et d'élimination des déchets ;
- modalités de raccordement aux ouvrages existants éventuels.

Contraintes liées au site :

- état de densification du matériau en place (évaluation du risque de tassement lors des opérations de production des écrans) ;
- adsorption moyenne du coulis/du mélange sol-liant par les terrains en place
- largeur de la plateforme ;
- niveau de nappe éventuel ou niveau d'eau du plan d'eau ;
- stabilité de la digue (au glissement et au poinçonnement) du fait de la présence d'un atelier en crête de digue.

Modèle(s) disponible(s) :

Les modélisations seront faites selon des modalités classiques de dimensionnement d'ouvrages hydrauliques présentés en introduction.

Aspects pratiques :

Cahier des charges :

Pour cette technique en particulier, un plot d'essai est nécessaire. Il peut également être pertinent de demander la mise en place d'un laboratoire de chantier qui réalisera des prélèvements de contrôles à une fréquence définie.

Dans la pratique, il est important que l'entreprise ait réalisé une étude de formulation avant le début du chantier. Pour chaque couche traitée ou pour la couche la plus sensible, il faut obtenir les résultats des essais de perméabilité (pour vérifier l'étanchéité du mélange sol-liant) et de résistance à la compression simple R_c (pour vérifier la prise du mélange) en laboratoire à 7, 28 puis 56 et/ou 90 jours pour la formulation choisie (natures et dosages de sols, liant(s) hydraulique(s) et eau).
Ces critères doivent être ensuite vérifiés sur le matériau prélevé au cours du chantier.

Chantier :

- réalisation d'une piste d'accès ;
- aménagement de la zone travaux ;
- création ou aménagement d'une zone de stockage.

Deux méthodes peuvent être proposées (exemple de la trancheuse) :

- méthode humide :
    - réalisation d'une prétranchée de profondeur définie par l'entreprise en phase de préparation (généralement autour de 1,5 m) ;
    - mise en place de l'outillage dans le terrain jusqu'à la profondeur requise ;
    - introduction du liant sous forme de coulis (avec un C/E défini) pendant la phase de malaxage ;
- méthode sèche :
    - réalisation d'une prétranchée de profondeur définie par l'entreprise en phase de préparation (généralement autour de 1,5 m) ;
    - épandage du liant sous forme pulvérulente dans la prétranchée en fonction du dosage choisi ;
    - mise en place de la machine au-dessus de la prétranchée ; la lame passe d'une position initiale quasi-horizontale à une position verticale avec la chaîne en rotation (Figure 2 2) ;
    - injection de l'eau (par exemple cela peut se faire via la lame de la machine lors du malaxage).
- nettoyage de fin de chantier, remise en forme de la digue, de la chaussée si besoin

Figure 2 : Machine utilisée pour réaliser les tranchées de sol mixé avec la méthode sèche (crédit photo : DREAL CVL / DETL)

<u>Matériels et matériaux nécessaires :</u>

Suivant la technique, le matériel et les matériaux utilisés seront différents, avec néanmoins des constantes :

- un matériau d'apport permettant de lier le sol en place ;
- un engin permettant de mélanger le sol en place (trancheuse, hydrofraise, tarière…) ;
- un dispositif d'injection du matériau d'apport (liant, eau, coulis...).

Ces techniques de mélange sont bien adaptées aux sols meubles mais les sols grossiers peuvent rendre difficile le mélange.
À noter que la méthode par voie humide nécessite une centrale à coulis.

Nuisances et environnement :

Les différentes techniques de sol mixé créent des vibrations qui sont systématiquement mesurées s'il y a des avoisinants afin de pouvoir stopper le chantier si certains seuils définis par avance sont atteints (formation de désordres, atteinte de seuils non réglementaires…). Le retour d'expérience tend à montrer que la réalisation de tranchées en sol mixé produit des vibrations faibles.

L'un des avantages de ces techniques est de mélanger le sol en place avec un liant hydraulique et de limiter au maximum la production de déblais (limité à l'excavation de la prétranchée). Une certaine quantité d'eau et de liant est ajoutée au milieu existant, foisonné, mais la plus grande partie va occuper l'espace fourni par la zone malaxée. Le surplus (spoil) est mis dans une benne pour être ensuite mis en décharge.

Contrôle d'exécution :

Réalisation d'une zone de convenance à l'amont et à l'aval de l'écran (exemple de la trancheuse) :

- elle permet le suivi de l'ouvrage pendant le chantier à partir de prélèvements à l'état frais (Figure 3), pour des essais de contrôle à 7, 28 puis 56 et / ou 90 jours, ou par carottage pour les suivis à moyen et long termes ;
- elle permet également de contrôler les paramètres machine pour entrer en phase de production.

La zone de convenance devrait, dans la mesure du possible, être isolée des zones de mise en place et de retrait de la trancheuse.

Contrôles en phase d'exécution :

- quantité de liant hydraulique épandue (méthode sèche) ;
- enregistrement de paramètres machine en temps réel : vitesse d'avancement, profondeur de la lame, quantité d'eau injectée (méthode sèche) ou de coulis injecté (méthode humide), vitesse de rotation de la chaîne, indice de malaxage...
- essais de perméabilité et de résistance à la compression simple en laboratoire à 28 jours sur des prélèvements effectués à l'état frais suivant les recommandations faites dans le CCTP. Pour la technique de tranchée en sol mixé, un critère de perméabilité de 10^{-8} m/s peut être proposé ainsi qu'un critère de résistance à la compression simple compris entre 0,3 et 1,5 MPa à 28 ou 90 jours.

Figure 3 : Outil utilisé pour effectuer les prélèvements à différentes profondeurs (crédit photo : DREAL CVL / DETL)

Vitesse d'avancement :

Avec une trancheuse il est possible de réaliser un linéaire de l'ordre de 100 m par jour, pour des profondeurs de l'ordre de 6 à 8 m (soit 600 à 800 m²/jour). C'est la technique présentant les meilleures vitesses.

Pour les autres techniques on est plutôt sur un maximum de 25 m^3/h (soit environ 300 m²/jour).

Traitement de points singuliers (extrémités, ouvrages inclus et traversant…) :

Le lendemain d'une journée de production, l'ouvrage devra être repris sur quelques mètres (longueur à définir selon l'outil) pour éviter les discontinuités de l'ouvrage. La procédure est à formaliser en phase préparatoire.

Différentes méthodes de franchissement des ouvrages traversants (canalisation et réseaux enterrés notamment) ont été développés ces dernières années sur les digues de Loire avec une trancheuse. On trouvera des informations à ce sujet dans les articles mentionnés en références.

Remise en état du site :

Inclus :

- la remise en forme de la digue après travaux ;
- la reprise des voiries ;
- la végétalisation des talus le cas échéant ;
- l'enlèvement des aires de stockage et des pistes de chantier.

Références :

Réalisation des mélanges en place :

- NF EN 14679 (2005). Exécution de travaux géotechniques spéciaux - Colonne de sol traité

Contrôle pour les caractéristiques hydrauliques :

- XP CEN ISO/TS 17892-11 (2005). Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 11 : détermination de perméabilité à charge constante et à charge variable décroissante
- NF X 30-423 (2011). Déchets - Détermination du coefficient de perméabilité d'un terrain par essai à charge variable en forage ouvert

Contrôle pour les caractéristiques mécaniques :

- NF EN 13286-41 (2003). Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques

Choix du liant hydraulique :

- NF EN 197-1 (2012). Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants
- NF EN 450-1 (2005). Cendres volantes pour béton - Partie 1 : définition, spécifications et critères de conformité
- NF EN 450-2 (2005). Cendres volantes pour béton - Partie 2 : évaluation de la conformité
- NF EN 14227-4 (2013). Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 4 : cendre volante pour mélanges traités aux liants hydrauliques
- NF EN 15167-1 (2006). Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité
- NF EN 15167-21 (2006). Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 2 : évaluation de la conformité
- NF P15-108 (2000). Liants hydrauliques - Liants hydrauliques routiers - Composition, spécifications et critères de conformité
- NF EN 459-1 (2015). Chaux de construction - Partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformité
- NF EN 459-2 (2012). Chaux de construction - Partie 2 : méthodes d'essai
- NF EN 459-3 (2015). Chaux de construction - Partie 3 : évaluation de la conformité

Retour d'expérience :

- DREAL Centre-Val de Loire (2015). Renforcement de corps de digue par mélange en place, version provisoire. GT DREAL Centre-Val de Loire / DETL
- Fargier et al. (2016). Renforcement des digues de Loire par la méthode du deep soil mixing : contrôle par techniques géophysiques. JNGG 2016, Nancy, France
- Fry, Beguin, Picault, Mathieu, Esnault, Mosser (2015). Analyse et traitement de l'érosion interne. Procédés classiques et Nouveaux. 25th ICOLD World Congress, Stavanger, Norway

- Kaouane et al. (2018). La polarisation provoquée pour le suivi des écrans étanches : une première approche. JNGG 2018, Champs-sur-Marne, France
- Le Kouby, Saussaye, Szymkiewicz, Fargier, Chevalier, Fanelli (2015, 2017). Renforcement des digues par la technique du deep soil mixing. Synthèse des résultats d'essais des chantiers innovants du Val d'Orléans
- Mathieu et al. (2012). Dyke rehabilitation with a trencher: Recent applications in Europe. 4th International Conference on Grouting, Deep Foundation Institute, New Orleans, USA
- Patouillard, Auger, Maurin (2013). Les renforcements de digues en Loire moyenne, mise en perspective des techniques et expérimentation. Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions, 2ème colloque national, Aix-en-Provence, France
- Patouillard, Mathieu, Saussaye (2018). Efficacité et durabilité des écrans étanches « soil mixing » dans les digues. Colloque CFBR - Méthodes et techniques innovantes dans la maintenance et la réhabilitation des barrages et des digues, Chambéry, France
- Patouillard, Saussaye, Mathieu, Le Kouby, Tourment (2019). REX sur les mélanges chaux/ciment dans les écrans "deep soil mixing" des levées de Loire. ICOLD 2019 Symposium, Ottawa, Canada
- Patouillard S., Saussaye L., Durand E., Manceau N., Le Kouby A., Coulet A. (2019). Retour d'expérience sur les renforcements des levées de Loire en « deep soil mixing ». Colloque Digues2019 Aix-en-Provence
- Poulain, Tourment, Patouillard, Saussaye, Le Kouby (2018). Techniques de renforcement des digues. 26th ICOLD World Congress,Vienne, Autriche

	Fiche technique **Ecran d'étanchéité réalisé au moyen de la technique du jet grouting**	**Fiche FT 3.5**

Auteurs principaux : S. LAMBERT (KELLER fondations spéciales)
Contributeurs : M. SUTTER (INRAE) ; D. POULAIN (INRAE)
Relecteurs : J.-M. FLOHR (EGIS) ; JF. FREZET (EGIS) ; PL. REGAZZONI (EGIS) N. GRASSET (FUGRO Geoconsulting) ; O. HESSE (BOTTE Fondation) ; G. HIBON (FUGRO Geoconsulting) ; A.LE KOUBY (IFSTTAR) ; F. LOUVEL (SPIE Fondation) ; J. POUDEVIGNE (FUGRO Geoconsulting) ; L. SAUSSAYE (Cerema) ; S. PATOUILLARD (DREAL) ; L. GERVAIS (DREAL) ; J.-C. PALACIOS (SAFEGE)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais:
Jet grouting is a process consisting in destructing the soil in place and mixing it with a grout. Soil destruction made with the help of a jet of grout or water under high pressure (20 to 40 MPa). The presence of grout in the jet creates a new soil skeleton which sealing characteristics are improved in comparison with the initial state.

Étude(s) de cas correspondante(s) :
C1.16 Digue du canal de Jonage rive droite (69)
C1.27 Digues de la Sente des rivières à Montivilliers (76)

Indications :

Définitions :

Le jet grouting est un procédé permettant de déstructurer le sol en place par un jet de coulis ou d'eau, à haute énergie cinétique, sous haute pression (20 à 40 MPa). Il autorise l'incorporation au terrain du liant apporté par le coulis (composé d'eau, ciment, adjuvants dont les proportions sont définies dans le cadre du dimensionnement). Cette incorporation permet de redonner une unité et de modifier les caractéristiques du terrain par rapport à l'état initial.

Sujet de la fiche :

Cette fiche s'intéresse à l'utilisation d'un tel procédé dans un corps de digue afin d'augmenter les caractéristiques hydrauliques de la digue et les caractéristiques mécaniques du sol.

Fonction(s) principale(s) :

Le procédé de jet grouting permet de réaliser un écran étanche dans le corps et/ou l'assise de digue par la juxtaposition de manière sécante de colonnes ou de lamelles de sol traité par le procédé.

Fonction(s) secondaire(s) :

Le jet grouting peut être envisagé pour des reprises en sous-œuvre d'ouvrages en béton existants. Il peut également être envisagé pour améliorer également la stabilité interne de la digue et de son sol d'assise en lui conférant un gain de cohésion.

Description :

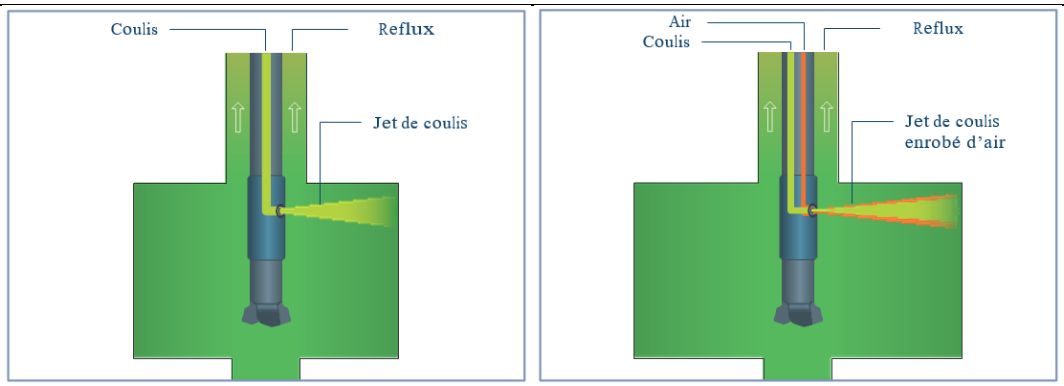
Performance à atteindre :

Le procédé de jet grouting vise plusieurs catégories de performances :

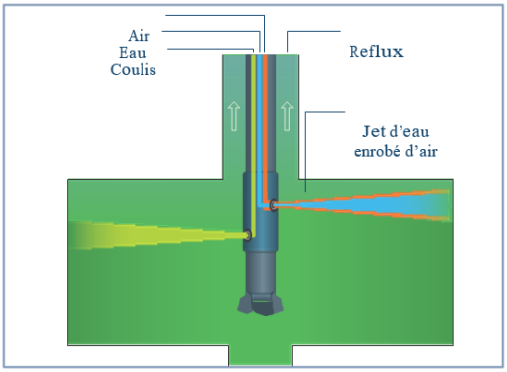
- des performances lors du chantier : une déstructuration contrôlée du sol (profondeur et extension définie) ;
- des performances après mise en œuvre : des valeurs de perméabilité, de cohésion, de résistance au cisaillement et de compression à atteindre pour la colonne ou lamelle de sol traité par jet grouting.

Les performances d'amélioration des sols (diamètre, composition, résistance des colonnes) dépendent des paramètres du procédé de traitement que sont :

- la vitesse de remontée et de rotation des tiges ;
- la pression et le débit des fluides utilisés ;
- le dosage en liant et en eau du coulis ;
- les caractéristiques du terrain en place telles que la nature des sols, leur granulométrie, leur compacité...
- le type de jet employé (simple, double ou triple, Figure 1) et des équipements utilisés (performances différentes avec des méthodes identiques).



Mono jet Double jet



Triple jet

Figure 1 : Type de jet (source : Keller)

Les valeurs de résistance à la compression simple R_c obtenues dans les sols sableux sont plus élevées que celles obtenues dans les limons et les argiles.

Utilisation :

Ce procédé d'amélioration des sols possède plusieurs avantages et inconvénients. Parmi les avantages :

- le procédé est adapté à tous les types de sol. Toutefois dans les sols très plastiques ou dans les sols très organiques des précautions particulières sont à prendre ;
- la possibilité de traverser en petite perforation des horizons très durs ou toutes sortes d'obstacles (blocs, béton…) ;
- la possibilité de fabrication d'éléments de grande taille et de géométrie quelconque (colonnes, barrettes, murs, caissons…) ;
- le contact entre l'existant (paroi mince, paroi moulée, rideau de palplanches…) et les colonnes de jet peut être d'excellente qualité ;
- l'absence de vibrations lui permettant d'être utilisé sous les ouvrages existants et à proximité d'avoisinants ;
- la réalisation de travaux sur des sites difficilement accessibles (Figure 2) ;
- la possibilité d'intervenir sous des hauteurs limitées (ligne aérienne, tablier d'ouvrages d'art…) ;
- précision de l'action. Le jet peut être appliqué uniquement pour la couche nécessitant le traitement, à n'importe quelle profondeur (dans la limite de la profondeur d'un forage).

Figure 2 : Atelier de Jet Grouting en zone de faible hauteur libre sous le pont de la Rocade Est (N346) du canal de Jonage (69) - (Crédit Photo : Egis)

Parmi les inconvénients :

- La nécessité d'une installation pour l'élaboration du coulis (une emprise doit être identifiée et dédiée) ;
- La production de rejets ou de spoils qui sont évacués pendant les travaux ou traités sur place (prévoir l'emprise nécessaire pour le traitement) ;
- Dans les sols argileux, le blocage de la remontée des rejets est fréquent si un pré-découpage à l'eau ou au coulis de ciment n'est pas envisagé au préalable ;
- Procédé souvent coûteux car il nécessite des charges importantes de personnel et des équipements avec des coûts élevés d'amenée et de repli.

Le jet grouting est souvent utilisé dans les situations suivantes :

- lorsque les contraintes de site obligent à prévoir des foreuses de petit gabarit (faible largeur de crête de digue, problème d'accès, présence d'une ligne aérienne…) ;
- présence d'obstacles dans le sol (blocs, réseaux…) ;
- pour assurer la continuité entre des ouvrages étanches de différentes natures (rideau de palplanches, paroi moulée, paroi mince…).

Variantes :

Les variantes possibles dans le cas de la mise en œuvre du jet grouting reposent essentiellement sur les outils utilisés, qui déterminent la forme théorique que prendra le sol amélioré. Ainsi le jet grouting pourra être réalisé en colonne pleines, quart de colonnes, demi-colonnes ou lamelles (Figure 3). Les différents types de paroi sont représentés en Figure 4.

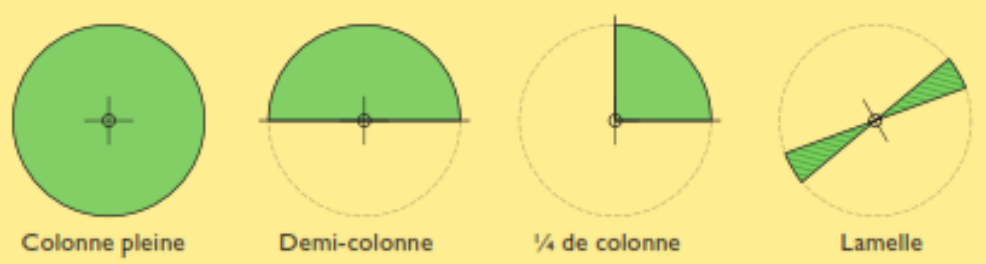


Figure 3 : Variantes de forme du sol amélioré par jet grouting (source : Keller)

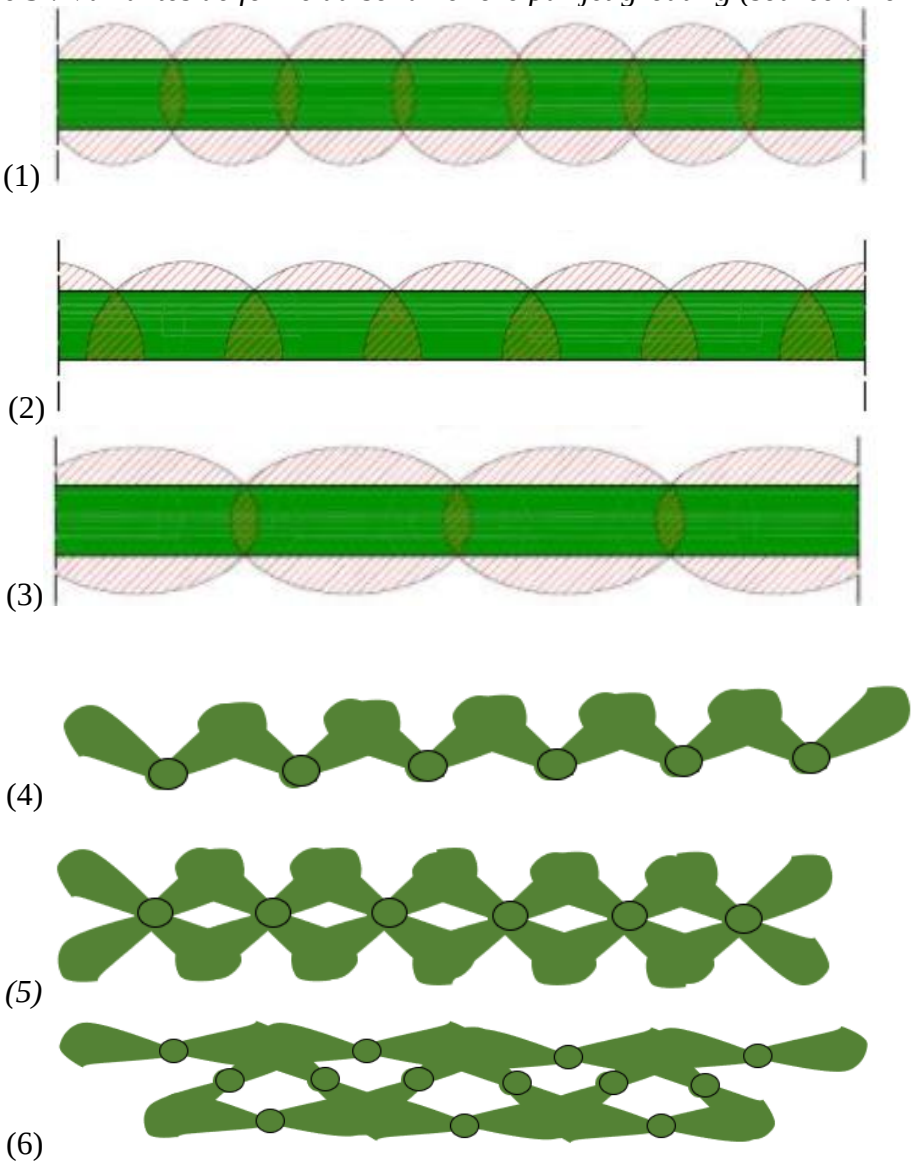


Figure 4 : Différents types de paroi étanche en jet-grouting : (1) colonnes pleines (2) demi colonnes (3) colonnes elliptiques (4) voile simple en lamelles (5) voile double en lamelles (6) voile triple en lamelles (source : Keller)

Par ailleurs, la technique du jet grouting peut être dite simple, double voir triple, c'est-à-dire respectivement à coulis seul, coulis entouré d'air ou avec une double buse : eau + air pour la destructuration du terrain et le mélange avec le coulis (Figure 1).

Le diamètre des colonnes varie de 0,60 m à plus de 3 m selon le type de jet grouting utilisé (simple, double ou triple). Le recouvrement des colonnes et lamelles est en général de 0,20 à 0,40 m.

Alternatives :

S'il n'y a pas de contraintes d'emprise, toute autre technique de confortement peut être utilisée en fonction des performances recherchées (soutènement et/ou imperméabilité) : rideau de palplanches (cf. FT 3.1), paroi mince (cf. FT 3.2), paroi moulée (cf. FT 3.3), paroi en DeepSoilMixing (cf. FT 3.4) …

Dimensionnement :

Principe :

Suivant les caractéristiques géométriques et mécaniques attendues des colonnes, plusieurs aspects doivent être étudiés avec attention :

- le processus de réalisation : notamment la vitesse de rotation et de remontée de l'outil de jetgrouting ;
- les pressions et débits des fluides utilisés ;
- le dosage du coulis ;
- le type de jet utilisé (simple, double ou triple) ;
- les caractéristiques du terrain en place.

Paramètres nécessaires :

La mise au point du projet de renforcement de sol par jet grouting nécessite la connaissance de la nature des sols et de leurs résistances afin d'opter pour le type de matériel, les pressions et débits des jets à utiliser pour des travaux.

Des reconnaissances géotechniques sont nécessaires pour préciser ce dimensionnement et définir les caractéristiques mécaniques prévisionnelles des colonnes telles que les modules de cisaillement et la résistance à la compression simple.
Les reconnaissances géotechniques permettront aussi de vérifier l'absence de « vide » (phénomènes karstiques, poches de gypse, érosion interne…) dans le remblai ce qui consommerait bien plus de coulis et pourrait remettre en cause la pertinence d'une telle méthode de confortement.

Ces reconnaissances devront comporter au minimum des résultats d'essais ou d'investigations afin d'obtenir les informations suivantes :

- la compacité du sol en place (réalisation d'essais au pressiomètre, au pénétromètre statique CPT ou au SPT) ;
- La nature des sols (sable, argile, etc.) d'après l'aspect visuel de carottes et d'échantillons ;
- La granulométrie avec en particulier la mention de la présence ou non de blocs et de leurs dimensions éventuelles ;
- les limites d'Atterberg ;
- la teneur en eau ;
- la masse volumique apparente ;

- la présence de polluants, l'acidité, la teneur en matières organiques ;
- la présence de nappe artésienne.

Éléments de conception :

Pour éviter une discontinuité dans la paroi, il faut prendre en compte les déviations de forage en fonction de la profondeur et les variations de diamètre possible selon les différentes natures et compacités des sols traversés.
D'une manière générale, plus l'ouvrage sera profond, plus les déviations seront grandes et plus les colonnes devront être grandes. L'espacement entre les colonnes devra donc tenir compte du diamètre des colonnes et des déviations prévisibles.

Modèle(s) disponible(s) :

Les modélisations seront faites selon des modalités classiques de dimensionnement d'ouvrages hydrauliques présentés en introduction.

Le tableau suivant permet de se faire une idée sur les ordres de grandeur des différents paramètres envisageables pour la mise en place du jet grouting.

Paramètres	Jet simple	Jet double (air+coulis)	Jet triple
Pression des jets de coulis (MPa)	30 à 50	30 à 50	> 2
Débit des jets de coulis (L/min)	150 à 250	350 à 450	50 à 150
Pression d'eau (MPa)	X	X	30 à 50
Débit d'eau (L/min)	X	X	200 à 350
Pression d'air (MPa)	X	0,2 à 1,7	0,2 à 1,7
Débit d'air (m^3/min)	X	3 à 20	3 à 20

Aspects pratiques :

Cahier des charges :

Le cahier des charges portera sur :

- les modalités d'installation de chantier et d'amenée/repli du matériel incluant piste d'accès au site, installation de la centrale, installation des bases vie, aires de stockages, aires de lavage…
- le suivi qualité comprenant le plan de contrôle attendu (essais, fréquence), la liste des points d'arrêts et points critiques, la consistance d'un éventuel contrôle extérieur. Le suivi qualité sera décrit en mentionnant ou non les sujétions suivantes :
    - La réalisation d'un plot d'essai pour valider les paramètres d'injection et la continuité entre colonnes ;
    - la liste des essais à réaliser tels que : les contrôles qualité du coulis (caractéristiques du coulis, viscosité, densité…), le suivi des paramètres et de consommation du coulis,

le suivi des paramètres de forage, le suivi éventuel des nuisances (bruit, poussières…), le suivi des tassements, le suivi des niveaux d'eau de la nappe (piézomètres), les essais et les mesures spécifiques à la réception des travaux (mesures de perméabilité, de résistance mécanique…) ;

- la description des fournitures et leurs caractéristiques attendues (ciment, bentonite, adjuvants, nature de l'eau d'apport si nécessaire...) ;

- la réalisation des travaux proprement dits, la gestion des points sensibles et des anomalies, les critères de refus admissibles (ou de profondeur minimale à atteindre) ;
- les éléments relatifs à l'exécution du plan de respect de l'environnement (évacuation des déchets, lavage des engins, autres points sensibles liées au maintien en état de la qualité des eaux et au respect de la faune et de la flore le cas échéant).

Chantier :

La mise en œuvre du jet grouting suit les trois opérations suivantes :

1) **Forage en petit diamètre (100 à 140 mm) :** le forage, à l'eau ou au coulis, est exécuté par un taillant spécifique en bout de moniteur (Figure 5). Un carottage ou un préforage peuvent être nécessaires pour traverser les blocs, maçonneries ou bétons qui parfois forment le parement de crête des digues ;
2) **Déstructuration du terrain en place** par un jet liquide à haute énergie cinétique : découpage hydraulique d'un volume de sol selon un diamètre, une forme et une longueur choisis. Cette action se fait par une remontée régulière et oscillation du train de tiges, associée à des pompes haute pression (300 à 500 bars) et à un débit très important des fluides (150 à 450 l/mn). L'érosion du sol, plus ou moins importante, entraîne une remontée de matériaux en surface qu'il est nécessaire d'évacuer et de contrôler (spoils). Un prédécoupage peut être réalisé si nécessaire dans les terrains raides ou cohésifs, pour assurer les diamètres et résistances recherchés pour les colonnes. Ce pré découpage consiste à réaliser la colonne en deux fois : une première injection de coulis faiblement dosé puis une seconde avec un dosage plus important ; cela permet une déstructuration plus importante ;
3) **Phasage et réalisation de la forme géométrique recherchée :** les colonnes sont réalisées suivant un phasage adapté au chantier et suivant les formes recherchées. Le phasage général est présenté à la Figure 5 ;

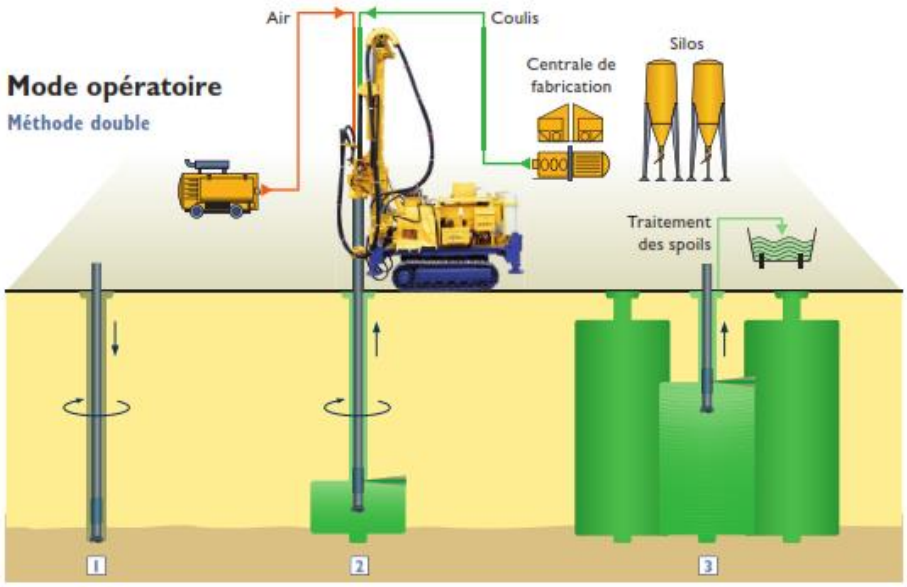
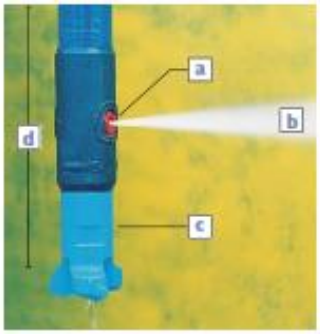


Figure 5 : Phasage général de travaux de réalisation de paroi en jet grouting (source : Keller)

Matériaux et matériels nécessaires

Matériels spécifiques :

- des foreuses :la taille des foreuses est adaptée aux différentes contraintes du site. Leur largeur peut aller de 0,80 m à 4 m et leur poids de quelques tonnes à plusieurs dizaines de tonnes ;
- une station de malaxage automatique de coulis ;
- une station de pompage haute pression ;
- des pompes à vide pour l'évacuation des spoils ;
- des silos de ciment ;
- un groupe électrogène ;
- un compresseur ;
- un outil de jet grouting ou moniteur (Figure 6).



a – Buse
b – Jet haute pression
c – Taillant
d – Moniteur

Figure 6 : Outil de jet grouting (source : Keller)

Matériaux spécifiques :

- coulis de jet grouting (ciment, bentonite, liants hydrauliques…).

Nuisance/ environnement :

- salissures aux abords du chantier liés aux remontées de spoils ;
- réalisation de bacs de décantation de spoils (containers ou fouille excavée) ;
- la zone d'installation sera étanchée par exemple par la mise en place d'un film polyéthylène (type Polyane ou équivalent) ;
- nuisance liée à la circulation de camions d'approvisionnent et d'évacuation de déblais ;
- tranchée pour canaliser les remontées de spoils.

Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance) :

- plot d'essais préalablement au démarrage du chantier recommandé pour valider les paramètres de travail, vérifier la géométrie et en particulier la continuité de l'écran, la profondeur, l'ancrage dans un sol défini si nécessaire, les caractéristiques mécaniques du jet grouting et vérifier l'impact sur les ouvrages existants ;
- enregistrements de paramètres pour le forage et le découpage (profondeur, vitesses de forages, volume de coulis, pressions coulis, eau, air) ;
- contrôle de l'inclinaison des forages par un inclinomètre ;
- prélèvements de coulis et de spoils pour test de résistance à la compression à 7, 14, 28 et 56 jours ;
- vérification des diamètres de colonnes de manière visuelle par dégarnissage et par mesures (mise en place de tubes peints, méthode Acoustic Column Inspector ACI, procédé du cylindre électrique EDG…) ;
- dégarnissage en tête.

Vitesse d'avancement :

30 à 40 m²/jour pour une paroi.

Traitement de points singuliers :

Le procédé de jet grouting est une technique permettant de traiter les points singuliers et d'assurer leur étanchéité :

- au niveau du raccordement avec d'autres types d'écrans (rideau de palplanches, paroi moulée…) ;
- au niveau des réseaux traversant (le forage doit se situer à 50 cm minimum du nu extérieur du réseau sachant que la distance dépend directement de la nature du réseau pour éviter tout endommagement. Les canalisations béton ou fonte en bon état ne demandent pas de précautions particulières à la différence de celles en PVC).

Remise en état du site :

Cette remise en état porte notamment sur :

- la remise en forme de la digue après travaux ;
- la reprise des voiries ;
- la végétalisation des talus le cas échéant ;
- l'enlèvement des aires de stockage et des pistes de chantier.

Les spoils sont pompés dans des bacs de décantation avant évacuation à l'état solide. Dans certains cas une évacuation à l'état liquide est également possible mais plus onéreuse.

Références :

- NF EN 12716– Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Colonnes, panneaux et structures de sol-ciment réalisés par jet.
- Amélioration et renforcement des sols TOME 2 Laurent Briançon, Philippe Liausu, Claude Plumelle, Bruno Simon, Edition Le Moniteur.
- Ground Improvement 2eme édition, M.P. Moseley § K. Kirch Edition Spon Press.
- Guide technique - Construire sur du solide, Soletanche Bachy

Annexes :

Figure 74 : Pression du jet – jet en action (hors sol) (Crédit photo : Keller)

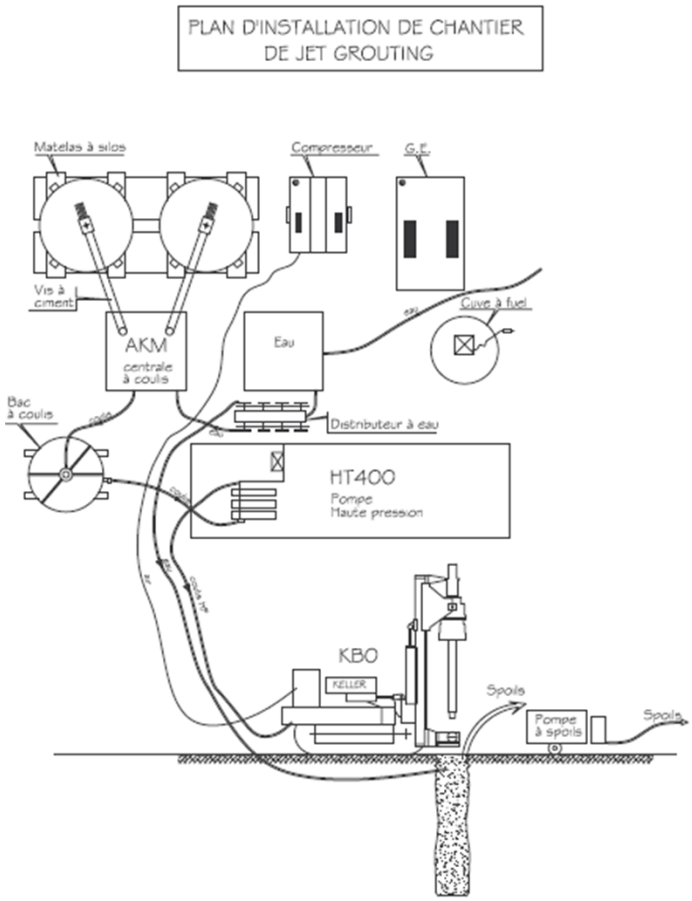


Figure 8 : Schéma type d'une installation de chantier de jet grouting (source : Keller)

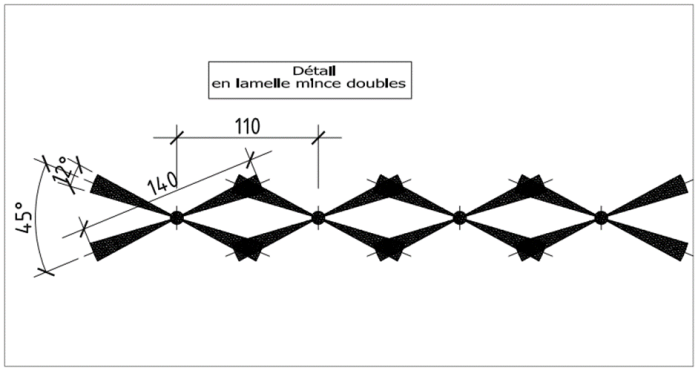


Figure 9 : réalisation de parois d'étanchéité en lamelles de jet-grouting (Crédit photo : Keller)

Figure 10 : Dégarnissage d'une rangée de colonnes sécante de jet grouting (Crédit photo : Keller)

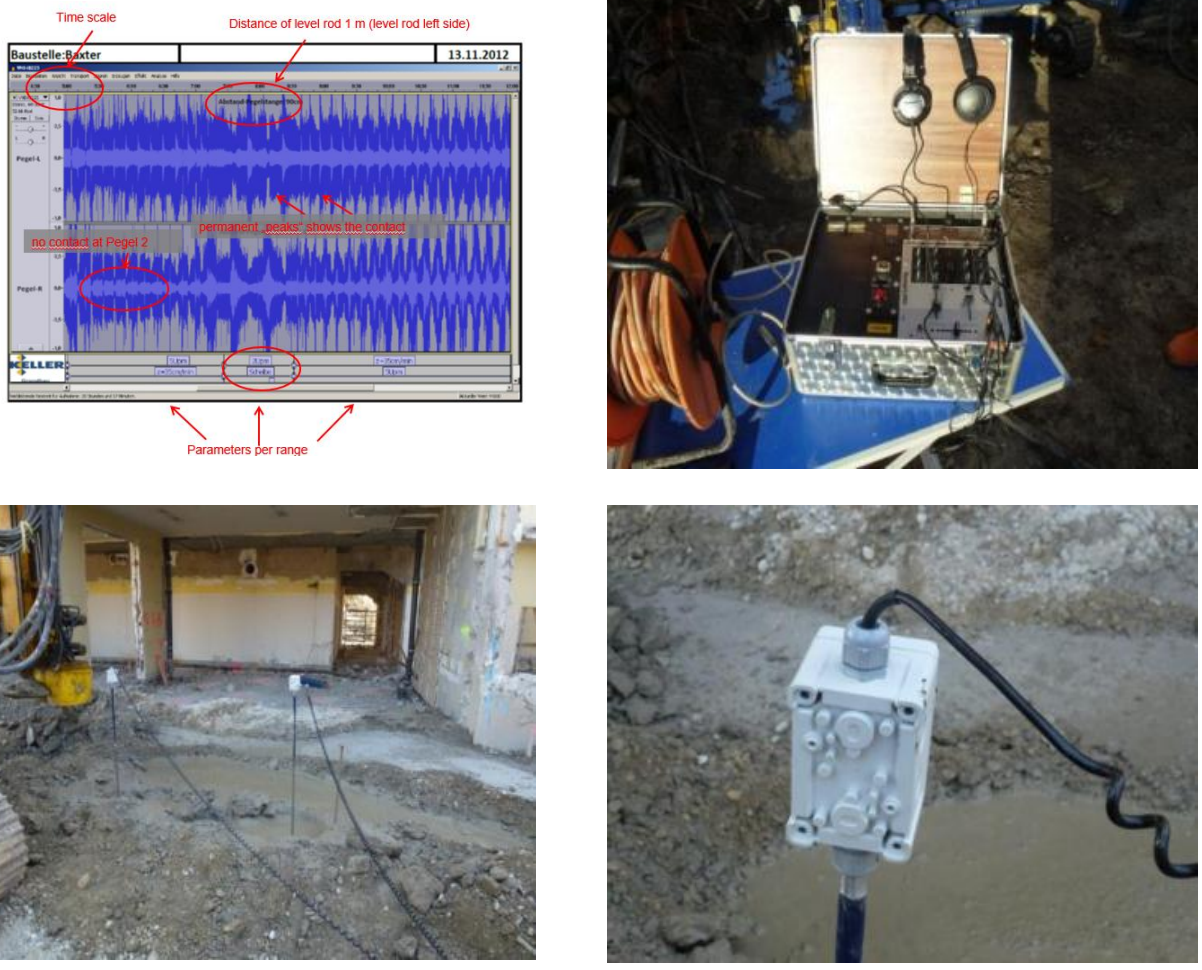


Figure 5 : Contrôle acoustique du diamètre Procédé ACI® (Crédit photo : Keller)

Cfbr	**Fiche Technique** **Masque en matériaux naturels faiblement perméables**	**Fiche FT 3.6**

Auteurs principaux : Y. BOUSSAFIR (univ. Eiffel)
Contributeurs : Y. DENIAUD (Cerema) ; D. POULAIN (INRAE) ; M. SUTTER (INRAE)
Relecteurs : P. BERTHELOT (VERITAS), Ch. CHEVALIER (univ. Eiffel) ; L. FOURQUET (DDT 31) ; A. LE KOUBY (univ. Eiffel) ; D. MORELLATO (DDT 31) ; L. SAUSSAYE (Cerema) ; S. PATOUILLARD (DREAL)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract/Résumé en anglais : An earthfill core with poor hydraulic characteristics can be protected with an impermeable mask or revetment made of clay (or other low permeability material) so as to prevent water penetration, reduce through-seepage and increase internal erosion protection.

Etude(s) de cas correspondante(s) :
C2.1 Masque argileux pour étanchéité côté Loire
C2.6 Digue rive Gauche Petit Rhône (Albaron – 13)
C2.7 Digue de ceinture de Beyhalde (Bardos – 64)
C2.9 Confortement des travaux d'urgence au Mas de Petit Argence (Fourques – 30)
C2.10 Travaux d'urgence- Reconstruction de la digue de protection contre les inondations de Comps (Comps – 30)
C2.13 Confortement de la digue de la courbe de Grangeage (Meylan – 38)
C2.14 Confortement du secteur du défluent – Digues du Rhône (Arles – 13)
C2.15 Confortement de la digue de protection contre les inondations de Port-Saint-Louis-du-Rhône - Rive gauche (Port-Saint-Louis-du-Rhône – 13)
C2.16 Digue de l'Eberbach (Soufflenheim – 67)
C2.17 Confortement des secteurs de Triquette et Grande Montlong / Petite Montlong ((Arles – 13)
C2.20 Masque argileux en matériaux A2 sur la digue Grand Cabane/Ecluse (Saint-Gilles – 30)

Indications :

Définitions :

Les digues sont des ouvrages pouvant être constitués de matériaux hétérogènes et parfois grossiers, pouvant présenter des perméabilités trop élevées. Cela peut mettre en défaut le bon fonctionnement de l'ouvrage et aggraver des risques d'érosion interne. Afin de résoudre ce problème, des matériaux et/ou des composants supplémentaires peuvent être plaqués sur l'ouvrage afin d'imperméabiliser le talus côté rivière.

Parmi les techniques d'imperméabilisation, on peut faire appel à des matériaux dont la perméabilité est naturellement très faible. Les matériaux utilisés sont des sols fins dont la granulométrie est souvent inférieure à celle d'un limon. Ce sont en général des argiles ou des marnes très plastiques contenant peu de sable et de gravier.

La perméabilité naturelle des sols fins est de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-9} m/s mais cette propriété est fortement altérée par les phases d'extraction et stockage. Pour garantir une perméabilité faible sur le talus, il faut faire appel à des techniques de terrassement qui permettront d'obtenir *in situ* des perméabilités faibles à très faibles (FD P11-302).

Une perméabilité faible est obtenue par un compactage soigné à des teneurs en eau élevées, avec, selon les cas, amélioration par ajout d'eau ou de pulvérulents, voire par du compactage à des énergies très élevées. Le sol compacté peut être ajouté à la digue existante ou se substituer à une partie de la digue en place.

Sujet de la fiche :

Cette fiche traitera des confortements d'ouvrage, en termes d'étanchéité externe, au moyen d'une carapace (Figure 1) ou d'un reprofilage de talus en matériaux peu perméables (Figure 2). Ces matériaux sont sensibles aux contraintes extérieures lors de la mise en œuvre et aux sollicitations hydrauliques et mécaniques s'appliquant sur l'ouvrage.

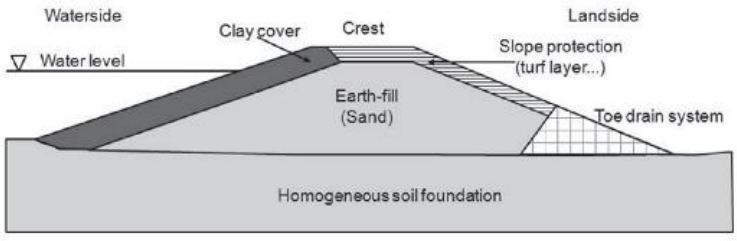


Figure 1 : Schéma de principe d'une protection externe de type carapace en matériau naturel faiblement perméable (source : ILH, CIRIA 2013)

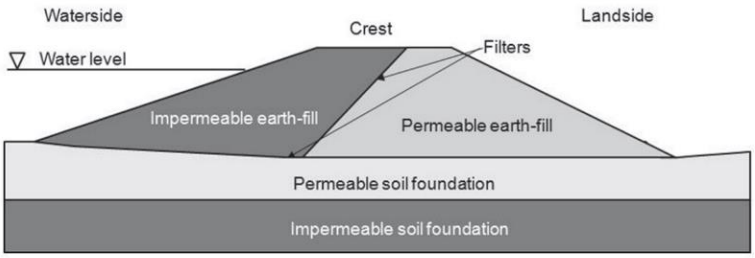


Figure 2 : Schéma de principe d'une protection externe par substitution d'une partie de la digue par des matériaux naturels faiblement perméables (source : ILH, CIRIA 2013)

Fonction(s) principale(s) :

Le revêtement d'un talus ou la mise en place d'un masque imperméable en matériau naturel a pour objectif principal de diminuer la perméabilité de l'ouvrage lors d'un événement de crue dans un contexte fluvial.
Cette diminution de la perméabilité répond à plusieurs objectifs :

- Éviter les fuites d'eau au travers de l'ouvrage par un principe de colmatage ;
- Améliorer la stabilité d'ensemble de l'ouvrage en réduisant la pénétration de l'eau et les écoulements hydrauliques dans le corps de digue.

Cette technique est peu efficace pour protéger des digues maritimes contre les effets de la marée ou de la houle, car la résistance des matériaux aux énergies marines est beaucoup trop faible.

Fonction (s) secondaire(s) :

En association avec des filtres et drains correctement conçus, côté terre, la limitation des écoulements hydrauliques au sein du corps de digue tend à diminuer le risque d'érosion interne résultant de gradients hydrauliques critiques.

Description :

Performance à atteindre :

La performance visée porte essentiellement sur une valeur de perméabilité inférieure à 10^{-7} m/s sur une épaisseur associée suffisante. Cette performance sera atteinte en considérant avec attention les propriétés du matériau sélectionné, les conditions de sa mise en œuvre, ainsi que la qualité des interfaces avec les autres matériaux présents.

Utilisation :

La réalisation d'un revêtement ou d'un masque en matériau argileux peu perméable est une solution traditionnelle pour étancher une digue en terre constituée de matériau de perméabilité élevée. Elle n'est pas adaptée au milieu maritime et convient aux digues fluviales.

C'est une solution généralement réalisable à moindre coût lorsque des matériaux peu perméables sont disponibles dans l'environnement proche du chantier. Elle peut cependant nécessiter une plus grande emprise au sol en raison de l'adoucissement des pentes de talus rendu nécessaire pour assurer la stabilité des matériaux fins.

Cette technique est particulièrement adaptée dans le cas des cours d'eau à crue et vidange lentes et pour des sols de fondation très peu perméables. Dans les cas contraires, elle doit s'accompagner de dispositifs complémentaires pour s'adapter aux cas de vidange rapide ou de fortes sollicitations extérieures : ajout d'une protection externe, d'un dispositif de drainage spécifique, de bêche… ou dans le cas de sol de fondation perméable : imperméabilisation par d'autres méthodes de confortement. Ces compléments rendent souvent la solution bien moins attractive.

Bien que cette technique puisse paraître simple, elle nécessite une phase de conception et sa mise en œuvre peut imposer des contraintes et des précautions indispensables pour obtenir un certain niveau de qualité et de durabilité. Elle nécessite par exemple des conditions climatiques favorables ainsi que des engins de chantier adaptés.

Variantes :

Les différentes variantes pour la réalisation d'un revêtement ou masque faiblement perméable portent essentiellement sur le choix du matériau : origine et nature du matériau naturel (argile, marne, argiles sableuses, limons…), matériau alternatif (cendres volantes inertes, terres excavées inertes…), matériau amélioré par traitement (bentonite, chaux…).

Le réemploi de matériaux du site peut s'envisager avec une technique d'amélioration à préciser par l'entreprise.

Ces différentes variantes n'impactent normalement ni la géométrie de la digue (dépend des caractéristiques mécaniques du matériau visé) ni la performance recherchée. Le choix de l'une ou l'autre va essentiellement impacter les techniques de terrassement et de contrôle/réception.

Alternatives :

Les techniques alternatives à l'étanchéification externe des talus par un revêtement ou un masque en matériau naturel faiblement perméable peuvent reposer sur la réalisation :

- d'un écran étanche vertical en cœur de digue (cf. fiche technique 3.2 et 3.3)
- d'une étanchéité extérieure avec un parement en perré maçonné ou en dalles en béton (cf. fiches techniques 7.6 et 7.7)
- d'un mur (ouvrage d'art) en substitution d'une partie de la levée.

Les conditions de site et d'écoulements dans les sols de fondation lors des crues doivent guider la recherche d'une solution d'imperméabilisation partielle ou totale adaptée au contexte (y compris en présence d'une clé d'étanchéité).

Dimensionnement :

Principe :

La forme et l'épaisseur d'un confortement par revêtement en matériau imperméable fait l'objet d'une conception qui précise :

- la nature et les caractéristiques du matériau retenu pour constituer la barrière étanche ;
- la géométrie retenue : épaisseur de la couche imperméable et la pente de stabilité ;
- les modalités de mise en œuvre ;
- les conditions de protection des matériaux mis en œuvre ;
- les conditions de stabilité générale de l'ouvrage.

Le choix de cette technique peut nécessiter de recourir à :

- une protection contre l'érosion externe par la mise en place d'un perré par-dessus le parement peu perméable ;
- un recouvrement spécifique pour éviter la fissuration par dessiccation, le ravinement ou l'affouillement (type terre végétale et enherbement, masque granulaire, géogrille ou natte végétalisée…) ;
- un dispositif de drainage/filtration à l'interface avec la digue existante, côté terre ;

- une faible pente de talus pour assurer la stabilité à la rupture du matériau sauf si la stabilité est assurée par recouvrement ou par un autre dispositif (par exemple stabilisation en pied de talus ou protection externe pouvant jouer un rôle stabilisateur).

Une surveillance ultérieure de la fissuration par dessiccation en été, peut s'imposer lors des visites d'inspection, et peut nécessiter de prendre des mesures compensatoires comme par exemple, l'arrosage des talus.

Paramètres nécessaires :

Les données à recueillir au préalable sont peu nombreuses et communes à tout type de confortement. Une attention particulière devra être portée sur :

- la connaissance de la perméabilité du sol de fondation de la digue ;
- la dynamique du cours d'eau (méandre, risque d'affouillement) ;
- le contexte climatique (zone sensible à la sécheresse) ;
- l'environnement faunistique (présence d'animaux fouisseurs) ;
- les ressources locales en matériaux de faible perméabilité ;
- la connaissance des caractéristiques des matériaux d'apport du masque faiblement perméable :
    - paramètres de nature (granulométrie, argilosité, caractérisation du retrait volumique),
    - paramètres d'état (teneur en eau, poids volumique apparent humide, optimum Proctor normal, indice portant immédiat, état hydrique)
    - paramètres mécaniques (angle de frottement interne, cohésion en conditions drainées et non drainées).

Modèle(s) disponible(s) :

Les paramètres de dimensionnement porteront sur :

- la géométrie du masque étanche et les volumes nécessaires : pente de talus, épaisseur, conditions d'ancrage dans le sol de fondation et sur le talus existant (redans) ;
- les caractéristiques de mise en œuvre du matériau dont les spécifications relatives au compactage font l'objet d'une étude de sol selon FD P11-302 (Afnor, 2018) :
    - classification selon la norme NF P11-300 (ou au minimum critères granulométriques dont dimension maximale des grains Dmax et proportion de fines 0/80 µm)
    - états hydriques attendus lors de la mise en œuvre (ajout d'eau à définir si besoin)
    - ajouts de pulvérulents spécifiques si nécessaire
    - énergie de compactage spécifique si nécessaire
    - perméabilité visée à la réception ;
- les conditions de réalisation des travaux : la période de terrassement (conditions météorologiques), les zones de circulation, localisation des ressources en eau pour arrosage ou humidification des matériaux, le phasage des travaux de terrassement par plots, les particularités de terrassement (redans, gestion des ouvrages traversants, compactage approprié…) ;
- les caractéristiques des dispositifs associés : protection du revêtement (végétalisation, grillage anti-fouisseur…), autres dispositifs d'imperméabilisation (par exemple, sol de fondation de la digue), dispositifs de filtration…

L'essentiel de ces aspects est étudié en termes de stabilité au glissement de l'ouvrage en tenant compte des écoulements hydrauliques dans le corps de digue. Ces calculs reposent pour l'essentiel sur des modélisations numériques et/ou des vérifications d'équilibres limite selon différentes configurations (CFBR, 2015).

Éléments de conception (détails autres que dimensionnement) :

Il convient d'intégrer les éléments suivants à la réflexion :

- les disponibilités locales en matériau de faible perméabilité et les retours d'expériences connus localement ;
- l'impact sur l'environnement en termes de pollution chimique, si certains matériaux alternatifs sont mis en œuvre ou certains environnements particuliers sont rencontrés, de nuisances de chantier (vibrations liées au compactage, bruit, poussières, salissures) ;
- les conditions de circulation pour le chantier et le maintien de la propreté du site de stockage et des voiries ;
- les conditions de réalisation du masque (compactage en couche ou parallèle au rampant du talus), en lien avec la pente et les conditions météorologiques prévisionnelles ;
- les volumes de déchets terrassés et les conditions d'évacuation des déchets de chantier ;
- la nature du revêtement final de la digue (présence d'une protection externe) ;
- le dimensionnement et le phasage des travaux pour la mise en œuvre des autres dispositifs éventuellement associés (protection, dispositif de drainage/filtration côté terre, écrans verticaux d'imperméabilisation ou dispositif parafouille en pied...).

Aspects pratiques (CCTP, chantier) :

Cahier des charges :

1-Les propriétés et caractéristiques des matériaux doivent être clairement spécifiées dans le marché : Dans le cas de matériaux naturels : préciser la classification selon la norme NF P11-300, le Dmax admissible et l'état hydrique attendu au moment du compactage :

- faire référence au fascicule documentaire de l'Afnor FD P11-302 (2018) ;
- compactage avec un objectif de densification q4 en appliquant les règles du GTR (LCPC-SETRA, 2000) et du guide de remblayage des tranchées (SETRA, 1994) ; demander un contrôle du compactage journalier par la méthode Q/S ou éventuellement par mesure de masse volumique in situ, pénétromètre dynamique léger ;
- rappeler l'objectif de perméabilité k à obtenir et sur quelles surfaces de contrôle (en talus, dans la masse, en surface de la digue, toutes les couches…).
- Une planche d'essai peut être imposée au marché pour vérifier l'obtention des performances avec les moyens de l'entreprise.

2- Les conditions de mise en œuvre adaptées : le choix du matériel de terrassement revient à l'entreprise mais le CCTP peut être contraignant par rapport au choix des compacteurs à utiliser (compactage par pétrissage plutôt que par vibration) en rappelant l'objectif visé (perméabilité, compacité). La présence d'un engin permettant l'ajustement et le maintien des teneurs en eau peut également être imposé (type arroseuse, enfouisseuse d'eau, malaxeur etc.).

3- Les généralités telles que les modalités et localisation de stockage des matériaux (voire d'homogénéisation des stocks), les modalités de terrassement (plan de circulation de chantier, phasage, précaution lors du creusement en talus – stabilité provisoire…), localisation des ressources en eau (autorisation de pompage si nécessaire) en cas d'arrosage ou humidification…

4- Gestion des interfaces notamment avec d'autres ouvrages (par exemple, des ouvrages traversants).

5- Le plan d'assurance qualité (PAQ) liée au contrôle de mise en œuvre en cours de chantier (agrément des matériaux, procédures d'exécution, géométrie de l'ouvrage, implantation, contrôle du matériau et de la qualité de compactage…) jusqu'à la réception (mesures de perméabilité in situ, contrôle de la compacité et de l'épaisseur de couche compactée...).

Chantier :

Le chantier se déroule comme tout chantier de terrassement, avec, dans ce cas, l'application obligatoire du compactage par la méthode excédentaire (plus x mètres de terrassement en talus, repris sur environ la moitié de sa hauteur. Le matériau repris est éliminé ou remis en œuvre en remblai si les états hydriques conviennent).

La question de la méthode de compactage doit être envisagée avant d'attribuer le marché : le compactage peut être réalisé parallèlement au talus ou par couches horizontales.

La pente de talus retenue est une condition pour un compactage parallèle au talus (Figure 3) : elle doit être suffisamment faible pour que le matériel puisse avancer, rester stable et être efficace.
Une pente supérieure à 1∟2, éventuellement 2∟5, posera problème. Certaines entreprises privilégient le compactage en bout de pelle ou avec des matériels spécifiques pour éviter ce problème. En contrepartie, l'énergie de compactage est plus faible et doit être pris en compte dans l'épaisseur de matériau à compacter.

Figure 3 : Compactage en talus, canal de Friant-Kern, images d'archives (États-Unis) (crédit photo : Herrier et al., 2012)

Le Fascicule FD P11-302 recommande le compactage en couche horizontale et l'enlèvement d'une partie excédentaire (d'environ 1 mètre).

Matériaux et matériels nécessaires :

- Le revêtement peu perméable est constitué dans la plupart des cas en matériaux fins à dominante argileuse (type (C1)A2 éventuellement (C1)A3, A2, (C1)B5, (C1)B6, certains R1, certains R3 selon la classification GTR), saturés (état hydrique moyen "m" à humide "h") compactés à 95% de la masse volumique apparente sèche à l'optimum Proctor normal (95% ρ_{dOPN}) ;
- la mise en œuvre est assurée par des moyens classiques de terrassement ; il convient de privilégier le compactage par pétrissage : compacteur à pieds dameurs, à pieds de mouton, vibrant ou non, compacteur à pneu si autorisé ;

- la présence d'un laboratoire de chantier sommaire est recommandée pour la vérification des états hydriques journaliers au minimum et pour le contrôle du compactage ; il est possible d'ajouter des contrôles d'identification des matériaux d'apports au plan de contrôle.

Une attention particulière doit être portée aux conditions d'ancrage des matériaux perméables dans le sol de fondation. La recherche d'une clef d'ancrage imperméable n'est pas systématiquement recommandée pour les digues. Elle dépendra des conditions de saturation et d'écoulements hydrauliques sous et dans l'ouvrage sur la durée de l'événement hydraulique de référence (crue, marée, tempête...), au regard de la fonction de protection souhaitée.

Nuisance/ environnement :

- Le terrassement est susceptible de générer des nuisances de chantier type : circulations d'engin sur les voiries existantes riveraines, vibration, bruit de chantier, poussière…
- Les travaux préparatoires préalable à la réalisation du masque génèrent des petits travaux de déblais dont les volumes sont souvent évacués en centre de stockage : inerte s'il s'agit de terres inertes ou non-inerte s'il s'agit de terre végétale. Les volumes doivent être évalués au préalable pour vérifier les capacités des centres de stockages les plus proches du chantier. Le réemploi des matériaux extraits sur le lieu du projet est à privilégier lorsque cela est possible (cas notamment de la terre végétale). L'évacuation des déchets de chantier et des déblais excavés nécessite un plan de gestion des déchets (inclus le plus souvent dans un Plan Assurance Environnement).

Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance) :

- Agrément des matériaux : conformité des matériaux au cahier des charges (classe GTR ou critères granulométriques, indice de plasticité ou valeur au bleu des sols, perméabilité, OPN…) ;
- Agrément des procédures d'exécution et du PAQ d'une façon générale ;
- Contrôle de la géométrie de l'ouvrage (géomètre), vérification de la mise en œuvre de la méthode excédentaire ;
- Réalisation d'une planche de convenance si elle a été prévue permettant de valider les procédures de mise en œuvre du matériau (ajustement des états hydrique, régalage, gestion des intercouches, compactage…) et vérification des performances (perméabilité, compacité) ;
- Contrôle en cours de réalisation (identifications des sols, vérification des épaisseurs, du taux de compactage, de l'état des surfaces etc.) ;
- Essais de réception : mesure de la perméabilité in situ, vérification des compacités et des épaisseurs de couches.

Vitesse d'avancement :

Quelques mètres à quelques centaines de mètre linéaire par jour, dépendant de la géométrie de l'ouvrage (et donc du volume de matériau à mettre en œuvre) de la météorologie, du matériel et de la complexité du site (accessibilité, exiguïté…).

Traitement de points singuliers (extrémités, ouvrages inclus notamment) :

La transition avec les ouvrages traversants est habituellement facilitée par la mise en œuvre d'une technique de terrassement. Il convient cependant de veiller au phasage des travaux et à l'adaptation des consignes de compactage au voisinage de ces ouvrages pour éviter soit la création de vides ou de

zones sous-compactées (zones d'écoulement préférentiel de l'eau), soit l'endommagement des structures traversantes existantes.

- la gestion des points singuliers est généralement simple avec cette technique. Elle peut nécessite une adaptation dans la taille des matériels de chantier (petits engins de compactage notamment) et un suivi dans l'exécution des travaux pour adapter les consignes de compactage ;
- les intercouches peuvent former des discontinuités favorables à la circulation de l'eau : ceci peut s'éviter grâce au compactage par pétrissage ou en scarifiant (sans décompacter) la surface de la couche (rippage, dents de pelle…) avant le régalage de la couche suivante.

Remise en état du site

Végétalisation des talus par enherbement pour éviter tout développement racinaire important et profond qui risquerait de dégrader l'imperméabilisation assurée par le masque peu perméable.
Nettoyage des voiries et des terrains occupés par le chantier.

Références :

- The International Levee Handbook, Ciria, 2013.
- Référentiel technique digues maritimes et fluviales version du 1 janvier, MEDDE-DGPR, 2015.
- NF P11-300 (AFNOR, 1992). Exécution des terrassements : Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.
- FD P11-302 (AFNOR, 2018). Exécution des terrassements : Réalisation des ouvrages d'étanchéité en sol compacté.
- Guide pour la réalisation des remblais et des couches de formes (GTR). LCPC-Sétra, 2000.
- Guide remblayage des tranchées et réfection des chaussées. LCPC-Sétra, 1994.
- Guide Organisation de l'assurance qualité dans les travaux de terrassements. LCPC-Sétra, 2000.
- Petits Barrages. Recommandations pour la conception la réalisation et le suivi. Comité Français des Grands Barrages - Coordination Gérard Degoutte - Coédition Cemagref Éditions, Engref. Sur support numérique, 2000.
- Herrier G., Berger R., Bonelli S. 2012. The Friant-Kerne canal : a forgotten example of lime-treated structure in hydraulic conditions. 6th International Conference on Scour and Erosion, Aug. 2012, Paris, France, SHF, 8 pages <hal-00756122>

	Fiche Technique **Dimensionnement d'un géotextile de filtration** Design of a filtration geotextile	**Fiche FT 4.1**

Auteurs principaux : O. ARTIERES (TENCATE GEOSYNTHETICS)
Contributeurs : D. POULAIN (INRAE); M. SUTTER (INRAE)
Relecteurs : C. CHEVALIER (Univ. Eiffel) ; REGAZZONI PL (Egis) ; L. SAUSSAYE (Cerema), T. MALLET (SYMADREM)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE) ; R. TOURMENT (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais :
Geotextile filters are usually an alternative to granular filters. Since the first application in a dam in 1970, numerous theoretical studies, experimental laboratory studies, in-situ studies and field observations complete our knowledge and understanding.
The design rules for geotextile filters have thus been improved. With a proper design based on the most recent rules, which specify all the characteristics to fulfill both the filtration function on long term and the damage prevention during installation, this technique aims to last decades.

Études de cas correspondantes:

Introduction

Définition :

Un géotextile de filtration est généralement un matériau synthétique, perméable à l'eau, constitué de fibres tissées ou non-tissées ayant pour fonction la filtration des sols (c'est-à-dire la stabilisation des sols soumis à un écoulement).

Sujet de la fiche :

Description du dimensionnement et des spécificités de mise en œuvre de géotextile à des fins de filtration, à l'interface entre deux sols de granulométrie foncièrement différente.

La fiche reprend les principaux éléments des recommandations du CFG (Comité Français des Géosynthétiques) pour l'emploi des géosynthétiques dans les systèmes de drainage et de filtration (2012)

Fonction principale :

Filtration : pour éviter l'érosion interne, des filtres géotextiles peuvent être mis en œuvre à l'interface entre deux matériaux de fonctions et de granulométries différentes (par exemple : corps de digue/drain).

Description :

Performance à atteindre :

Pour le géotextile, cela se traduit par des :

Pour le géotextile, cela se traduit par des :

- performances en termes de rétention du sol :
    - ouverture de filtration suffisamment faible pour stabiliser les particules constitutives du squelette du sol pour créer un auto-filtre granulaire en amont et éviter l'érosion interne ;
    - ouverture de filtration suffisamment grande pour limiter le colmatage (perte de perméabilité) par rétention trop importante des fines (<63 µm) mobiles, afin d'être efficace sur le long terme ;
    - nombre de constrictions optimal pour assurer un phénomène de stabilisation du sol à l'interface, sans déstructuration et mouvement important de particules
- performance hydraulique : il doit être suffisamment perméable pour laisser passer l'eau perpendiculairement à son plan ;
- performances mécaniques:
    - résistance en traction et au cisaillement afin d'assurer la stabilité du talus ;
    - déformabilité et résistance au poinçonnement par les matériaux en contact.

Il doit conserver ses caractéristiques fonctionnelles lors de sa mise en œuvre et sur le long terme.

Selon la nature des sols en contact et les sollicitations auxquelles il sera soumis, le géotextile présentera des caractéristiques spécifiques. La structure et la composition du géotextile, le type de fabrication, son épaisseur sont des propriétés qui permettent d'obtenir un large éventail de performances.

Variantes :

Des variantes à une solution de base peuvent être proposées, en jouant sur les multiples caractéristiques des géotextiles, dans la mesure où es caractéristiques essentielles définies au projet sont respectées.
Par ailleurs, si un drain est nécessaire en complément du filtre, on peut envisager en variante aux deux éléments séparés un géocomposite assurant les deux fonctions.

Alternatives :

Filtration par un filtre granulaire constitué d'une ou plusieurs couches de granulats homogènes avec respect des règles de filtre aux différentes interfaces entre les matériaux (cf. fiche FT 4.2).

Dimensionnement :

Principe :

Le dimensionnement d'un géotextile de filtration repose sur les aspects suivants :

- choix des caractéristiques du géotextile, à court terme et à long terme, en fonction des caractéristiques granulométriques des sols environnants, des conditions hydrauliques, des matériaux en contact et de leur mise en œuvre ;
- vérification de l'adéquation avec la surface de pose si besoin (cisaillement à l'interface, stabilité de l'ouvrage fini, éventuelle fonction de stabilisation du massif existant…).

Rappelons que les caractéristiques des géotextiles répondent à des normes d'essai (voir la liste des normes en bibliographie de la présente fiche). Un filtre géotextile sera donc choisi en fonction des matériaux qui l'entoureront selon des règles de dimensionnement fonctionnel.

Diagnostic préalable / Paramètres (données à recueillir) :

Pour que la fonction de filtration soit assurée, il est nécessaire de considérer certaines caractéristiques des sols entre lesquels le filtre sera intercalé.

- concernant le sol côté eau, à filtrer :
  - granularité du sol:
    - si la granulométrie est continue, on cherchera à connaitre les paramètres caractéristiques de la granulométrie : d_{10}, d_{60}, d_{85}, le coefficient d'uniformité C_U ($=d_{60}/d_{10}$) et le cas échéant le d_{50}. (d_x signifie que x% en masse du sol a une taille inférieure à d, en mm, déterminé à partir d'une courbe granulométrique) ;
    - si la granulométrie est discontinue avec courbe granulométrique présentant un plateau dans la zone des passants cumulés supérieur à 20 %, les paramètres caractéristiques ci-dessus sont déterminés à partir de la fraction granulométrique inférieure à ce plateau ;
  - perméabilité du sol à filtrer : k_s. Lorsque celle-ci n'est pas mesurée, les références citées en fin de fiche donnent des formules empiriques pour son estimation;
  - gradient hydraulique moyen de l'écoulement dans l'ouvrage : i_s.
    - dans le cas des écoulements gravitaires (tranchées drainante, masques drainants, drainage derrière un mur de soutènement…), $i_s \leq 1$.

- en cas d'écoulement alterné comme pour la protection de berges/côtes ou les talus amont de barrages (cas non abordés par cette fiche), le gradient peut être sensiblement supérieur à 1. Dans ce cas, une valeur de calcul de i_s égale à 5 est conseillée.

Le cas échéant, trois caractéristiques supplémentaires du sol à filtrer, sont utilisées dans les règles de calcul pour prendre en compte son état « cohésif », « dense » ou « lâche », à l'aide d'un coefficient correcteur C_2 pour le calcul de l'ouverture de filtration maximale du géotextile :

- équivalent de sable « ES » déterminé suivant la norme NF EN 933-8 (AFNOR 2012) ;
- cohésion *:* caractérisée par des paramètres de plasticité, comme l'indice de plasticité IP, ou la valeur de bleu (de méthylène) « VBS » ;
- densité et état hydrique du sol lors de sa mise en place : un sol, compacté à une masse volumique apparente sèche voisine de celle obtenue à l'essai Proctor Normal, est moins sensible à l'érosion interne. En dessous de 95 % de la densité sèche à l'Optimum Proctor Normal, ρ_{dOPN}, le sol devient plus sensible. La densité est caractérisée par l'indice de densité : $I_D = [(\rho_{d\ max} / \rho_d) . (\rho_d - \rho_{d\ min}) / (\rho_{d\ max} / \rho_{d\ min})]$, en utilisant les masses volumiques du sol sec dans ses états actuel (ρ_d), le plus dense ($\rho_{d\ max}$), le plus lâche ($\rho_{d\ min}$) et à l'optimum Proctor normal ($\rho_{d\ OPN}$).

- <u>concernant le sol côté protégé :</u>

  Les caractéristiques du sol côté protégé (granulométrie, forme) et la méthode de mise en place sont par ailleurs nécessaires pour déterminer les caractéristiques mécaniques du géotextile lui permettant de résister à la mise en œuvre.

Lorsque les caractéristiques du géotextile sont dimensionnées, on se réfère aux fiches descriptives et d'emploi des produits fournies par les producteurs ou aux certificats qualités ASQUAL.

En présence de contextes et d'environnements singuliers (présence d'un fond particulier du remblai de type gypse ou pyrite par exemple, ancien site industriel, usage de matériaux recyclés en remblai, eaux peu minéralisées, matière organique importante,…), des caractérisations et des analyses additionnelles concernant la chimie du contact sol/géotextile peuvent être requises afin de sélectionner au mieux le matériau constitutif du géotextile.

Il est par ailleurs nécessaire de disposer des caractéristiques de l'ouvrage sur lequel le géotextile sera mis en place. Ce sont des dispositions courantes présentées dans au chapitre 4 de la partie I du document.

<u>Modèle(s) disponible(s) :</u>

Les règles de calcul des <u>caractéristiques fonctionnelles</u> du géotextile sont décrites dans les documents de référence listés en fin de fiche et sont résumées ci-dessous. Elles permettent de calculer les valeurs minimum ou maximum des caractéristiques fonctionnelles des géotextiles :

- <u>l'ouverture de filtration</u> « O_{90} » en µm (selon NF EN ISO 12956 - 2011) : taille de la plus grosse particule pouvant traverser le géotextile. Principe : le filtre aura une ouverture de filtration inférieure à la taille du squelette du sol à maintenir ;
- <u>l'indice de vitesse</u> « V_{H50} » en m/s (selon NF EN ISO 11058) : vitesse d'écoulement généré par une perte de charge de 50 mm sur la traversée du géotextile. Le géotextile sera d'autant plus perméable que le paramètre V_{H50} sera élevé. Principe : le géotextile doit être plus perméable que le sol à filtrer afin de ne pas retenir l'eau ;

- la résistance à la pénétration de l'eau « h » en mm (selon NF EN 13562 -2008) : charge minimale provoquant la percolation de l'eau au travers du géotextile. Principe : la charge hydraulique initiant l'écoulement sera la plus faible possible ;
- le nombre de constrictions « m » adimensionnel (selon XPG38061 - 2009) : : nombre théorique de passages successifs (rétrécissements) reliant deux pores, qu'une particule doit franchir pour traverser un filtre. Il correspond à une épaisseur adimensionnelle du filtre. S'applique aux filtres granulaires et géotextiles non-tissés. Principe : le filtre aura un nombre de constrictions à la fois minimal pour assurer l'homogénéité de l'ouverture de filtration, et maximal pour favoriser une filtration d'interface.

A. D'un point de vu fonctionnel, les filtres géotextiles doivent satisfaire 2 conditions s'exprimant en 6 critères :

- Condition 1. Rester perméable à l'eau :
    1. critère de perméabilité :
        - soit : $V_{H50} > 10^3.k_s.i_s$ (ouvrages de haute sécurité, cas des barrages et digues) ;
        - soit : $V_{H50} > 10^2.k_s.i_s$ (dans le cas du drainage de talus et versants) ;
        - soit : $V_{H50} > 10.k_s.i_s$ (cas de sables propres) ;

      Avec k_s : perméabilité du sol (m/s) et i_s : gradient hydraulique dans le sol (-)
    2. critère de résistance à la pénétration de l'eau : l'eau passe pour une charge $h \leq 5$ mm ;
- Condition 2. Stabiliser le squelette du sol à l'interface tout en laissant passer les particules fines instables :
    1. critère de non rétention des fines: $63\ \mu m \leq O_{90}$;
    2. critère de rétention du squelette :
        - soit : $O_{90} \leq 0{,}8\ .\ C_2\ .\ C_3\ .\ \underline{d_{85}}$, si le coefficient d'uniformité du sol est : $C_U < 6$;
        - soit : $O_{90} \leq C_2\ .\ C_3\ .\ \underline{d_{50}}$, si le coefficient d'uniformité du sol est : $C_U \geq 6$;

      avec :
        - O_{90} : ouverture de filtration du géotextile ;
        - C_2 : paramètre tenant en compte de la compacité du sol à filtrer. Ainsi,

          $C_2 = 1{,}25$ si $I_D \geq 50$ ou si $\rho_d \geq \rho_{d\ OPN}$ (sol dense)

          $C_2 = 0{,}8$ si $I_D < 50$ ou si $\rho_d < \rho_{d\ OPN}$ (sol lâche) ou si l'épaisseur de drainant est inférieure à 50 cm (faible confinement) ;
        - C_3 : paramètre qui tient compte de l'influence du gradient hydraulique i_s. Ainsi,

          $C_3 = 1$ si $i_s < 5$

          $C_3 = 0{,}8$ si $i_s \geq 5$

          $C_3 = 0{,}6$ si écoulement alterné (protection de berge, non abordé dans cette fiche) ;

      Pour les sols cohérents, si cette règle conduit à une valeur de O_{90} inférieure à 80 µm, on retient : $63\ \mu m \leq O_{90} \leq 80\ \mu m$.

      Pour les sols fins non cohérents si cette règle conduit à une valeur de O_{90} inférieure à 63 µm, on sort de son domaine d'application, on peut avoir recours à un essai de comportement spécifique dans les conditions de l'ouvrage, comme par exemple l'essai de « Gradient Ratio » (ASTM D 5101-90) pour valider une solution technique ;

- critère d'homogénéité de l'ouverture de filtration : $25 \leq m$;
- critère de stabilisation du squelette à l'interface : $m \leq 40$.

B. Du point de vue résistance à la mise en œuvre, il convient de s'assurer que les caractéristiques mécaniques du géotextile sont compatibles avec les conditions de mise en œuvre :
   1. la résistance à la traction « T_{max} » en kN/m (selon NF EN ISO 10319 - 2008). À réaliser en sens production et en sens travers ;
   2. l'allongement à l'effort de traction maximal « ε_{max} » en % (selon NF EN ISO 10319 - 2008). A réaliser en sens production et en sens travers ;
   3. la résistance au poinçonnement « P_s » en kN (selon NFG38019 - 1988). Principe : effort maximal d'un poinçon pyramidal.

Le calcul des caractéristiques mécaniques minimales du géotextile lui permettant de maintenir ses caractéristiques fonctionnelles lors de la mise œuvre ne fait pas l'objet de recommandations générales. Les fabricants de géotextile ont en général établi leurs propres minimaux mécaniques et il sera parfois utile de prévoir des essais de convenance (planches d'essai).

La stabilité de l'ouvrage n'est pas considérée dans cette fiche générique, elle est étudiée dans le cadre plus global du confortement. Entre autres, dans le cas d'un géotextile filtrant mis en œuvre de manière verticale ou inclinée le massif aval devra être drainant ou drainé pour assurer cette stabilité de l'ouvrage.

Pour les principes généraux et les caractéristiques de mise en œuvre des géotextiles, on se réfèrera à la Norme Française G 38 060.

Aspects pratiques (CCTP, chantier,) :

Cahier des charges :

Dans le cas d'un sol courant de surface plane avec des conditions d'environnement chimique non agressives :

- Le dispositif de filtration par géotextile mis en place sur le sol à filtrer sera certifié par l'ASQUAL ;
- Le dispositif de filtration par géotextile devra présenter l'ensemble des caractéristiques suivantes :
  - ouverture de filtration (NF EN ISO 12956) : $63\ \mu m \leq O_{90}\ (\mu m) \leq$ OF calculée;
  - nombre de constrictions de la couche de filtration (XPG38061) : $25 \leq m \leq 40$;
  - indice de vitesse (NF EN ISO 11058) : V_{H50} (m/s) ≤ Indice de vitesse calculé;
  - résistance à la pénétration de l'eau (NF EN 13562) : $h \leq 5$ mm ;
  - résistance à la traction SP et ST* (NF EN ISO 10319) : T_{max} (kN/m) ≥ Valeur ;
  - allongement à l'effort maximal SP et ST* (NF EN ISO 10319) : ε_{max} (%) ≥ Valeur;
  - résistance au poinçonnement statique (selon NF G 38019) : P_s (kN) ≥ Valeur.

SP et ST* : en sens production et en sens travers

- l'épaisseur de matériau de couverture sera suffisante pour le lester et pour éviter

l'exposition directe du dispositif de filtration par géotextile aux U.V. solaires ;

- le sol support du dispositif de filtration géotextile sera préparé de sorte à éliminer tout élément agressif (rocailles, racines) à sa surface ;
- la couche de couverture sera mise en place avec une hauteur de chute spécifique, à définir selon le type de granulat, le type de sol, les caractéristiques du géotextile . Voir § « B. Calcul des caractéristiques à la mise en œuvre »;
- les lés de géotextile feront l'objet d'un recouvrement minimal, à définir selon les conditions du sol et de mise en œuvre, voir § « Traitement des points singuliers » ou seront assemblés par couture. Une longueur suffisante en tête permettra de compenser les éventuels déplacements sans laisser de surface non couverte.

Des modalités supplémentaires peuvent être intégrées si la géométrie ou la nature du milieu environnant l'exigent (cf. chapitre 4 de la partie I du document).

Chantier :

- Stockage des matériaux :

Les matériaux approvisionnés sur site doivent être stockés sur un espace propre, sec et dédié. Le conditionnement des matériaux (film de protection, résistance aux UV, local spécifique...) doit permettre un stockage compatible et adapté avec les cadences de chantier.

- Mise en œuvre :

Le déroulage du géotextile se fait dans le sens de la pente. Exceptionnellement, le géotextile peut être déroulé dans le sens de la digue si sa largeur couvre la totalité du développé à filtrer, en incluant les bêches de pied et les ancrages éventuels.
Il est préférable de mettre en place les lés de géotextile en déroulant le rouleau placé sur un palonnier dérouleur positionné en tête de digue (Figure 1). Avec un accès à partir de la crête de digue, des lés de géotextile peuvent également être prédécoupés et déroulés de la tête de digue.

Figure 1 : Déroulage par palonnier à partir de la crête de digue (Crédit photo :Tencate Geosynthetics)

Le géotextile sera déroulé d'un seul tenant sur la totalité du rampant et du dispositif de lestage provisoire en tête de manière à éviter toute discontinuité.
Aucune coupe ni recouvrement ne peut se faire dans le rampant.
Le géotextile doit être parfaitement plaqué contre le sol au cours du remblaiement (c'est à cette condition que l'on évitera des écoulements d'eau chargée à l'interface et dans le géotextile).

Pour éviter les effets des aléas climatiques, il est recommandé de recouvrir le géotextile à l'avancement des travaux.
Une attention particulière doit être apportée sur le risque d'endommagement du géotextile au droit de la crête de talus lorsqu'il y a circulation d'engins de chantier. Aucun trafic d'engins ne se fera directement sur le géotextile.

Le sol mis en place sur le géotextile doit être naturel sans présence de matière organique qui pourrait se décomposer et créer des précipités pouvant colmater les pores du géotextile.

La surface de sol à filtrer doit être reprofilée afin d'obtenir une surface de pose plane. Tout élément agressif (rocailles, racines) devra être supprimé préalablement à la pose.

Il convient de s'assurer que les caractéristiques mécaniques du géotextile de filtration sont compatibles avec les conditions de mise en œuvre. La diversité des solutions géotextiles envisageables, en termes de produit et de mise en œuvre, doit amener la maîtrise d'œuvre à suivre les préconisations des fabricants pour une conception adaptée (cf. partie dimensionnement de la présente fiche). Une ou plusieurs planches d'essais peuvent être préconisées pour choisir le géotextile le plus apte au service.

Nuisance/ environnement :

Les déchets et leur gestion doivent être identifiés en amont et prévus dans le Plan d'Assurance Environnement (PAE) de l'entreprise (restes de géotextile, emballages, bobines…).

Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance)

Les recommandations générales applicables aux géotextiles (éléments qu'il s'agira de contrôler sur le chantier) peuvent être résumées comme suit :

- le marquage CE doit être clairement visible sur les produits ou sur les bordereaux de livraison pour contrôle ;
- le géotextile doit être entreposé dans un endroit propre et plan, et protégé des UV ;
- le géotextile ne doit pas être perforé ou déchiré ;
- le géotextile ne doit pas être traîné dans la boue afin d'éviter de créer une fine pellicule imperméable à sa surface. Le fond et les abords immédiats de la zone de pose doivent être exempts de boue et de fines en suspension dans l'eau. Un nettoyage préalable peut être nécessaire ;
- dans le cas d'ouvrages où de grandes quantités de géotextiles sont mis en place, la méthode et le plan de pose doivent être connus à l'avance avec une précision suffisante concernant différents détails (par exemple : présence de zone à coudre, traitement singulier du fait de la présence d'ouvrage…).

Dans le cas d'utilisation de matériaux granulaires en cours de chantier:

- un contrôle régulier de la granulométrie et de l'épaisseur des couches est indispensable ;
- il est nécessaire de s'assurer de la non-pollution des matériaux utilisés par d'autres matériaux du site, notamment au niveau de l'aire de stockage avant mise en place. Un géotextile de séparation permet de maintenir le granulat propre ;
- le matériau granulaire doit être recouvert à l'avancement des travaux pour éviter les effets d'aléas climatiques (érosion en cas de pluie forte notamment).

Pour plus de détails on pourra se référer au chapitre 4 de la partie I du document ou à la fiche

FT 6.6.

Traitement de points singuliers :

La jonction de deux lés de géotextile se fera par recouvrement ou par couture. Pour assurer la continuité des géotextiles, il est indispensable que les bandes soient posées en tuile dans le sens du remblaiement avec un recouvrement de 0,30 m à 1 m selon la régularité, la déformabilité du support et la facilité de mise en œuvre (la pose sous eau requiert un recouvrement important).

Sur une digue le système de filtration est souvent mis en place en association avec les dispositifs de drainage (qui ont des granulométries spécifiques). Il est nécessaire de ne pas oublier toutes les interfaces entre l'ouvrage existant et le confortement en sol y compris au niveau de l'interface fondation-remblai.

Références :

- Comité Français des Géosynthétiques (2012). Recommandations pour l'emploi des géosynthétiques dans les systèmes de drainage et de filtration
- NF G 38 060 (2013). Textiles - Articles à usages industriels - Recommandations pour l'emploi des géotextiles et produits apparentés : Mise en œuvre - Spécifications - Contrôle des géotextiles et produits apparentés.
- NF G 38061 (2017). Utilisation des géotextiles et produits apparentés – Systèmes de drainage et de filtration – Dimensionnement et éléments de conception.
- XP G 38067 (juillet 2010). Géosynthétiques - Géotextiles et produits apparentés - Stabilisation d'une couche de sol mince sur pente - Justification du dimensionnement et éléments de conception.
- NF EN ISO 10318-1 (mai 2015). Géosynthétiques - Partie 1: Termes et définitions
- NF EN ISO 10320 (mars 2000). Géotextiles et produits apparentés - Identification sur site.
- NF EN ISO 11058 (juin 2010). Géotextiles et produits apparentés - Détermination des caractéristiques de perméabilité à l'eau normalement au plan, sans contrainte mécanique.
- XP G 38030 (octobre 2008). Géotextiles - Détermination du nombre de constrictions
- NF EN ISO 12956 (juin 2010). Géotextiles et produits apparentés - Détermination de l'ouverture de filtration caractéristique.
- NF EN 13562 (octobre 2000). Géotextiles et produits apparentés - Détermination de la résistance à la pénétration d'eau (essai sous pression hydrostatique)
- NF EN ISO 10319 (juillet 2015). Géosynthétiques - Essai de traction des bandes larges
- NF G 38019 (décembre 1988). Textiles - Articles à usages industriels - Essais des géotextiles - Détermination de la résistance au poinçonnement
- NF EN ISO 12236 (décembre 2006).Géosynthétiques - Essai de poinçonnement statique (essai CBR)
- NF EN ISO 12957-2 (septembre 2005). Géosynthétiques - Détermination des caractéristiques de frottement - Partie 2 : essais sur plan incliné
- JK Mitchell & K.Soga (2005). Fundamentals of soil behavior, 3rd edition, Wiley
- S Lambert (2000), Les géotextiles : fonctions, caractéristiques et dimensionnement, Ingénieries eau-agriculture-territoires n°22, Lavoisier, IRSTEA
- CIGB (1986), Geotextile filters in dams, bulletin n°55
- O.ARTIERES & J.G.TCHERNIAVSKY (2002) - Geotextile filtration systems for dams – 30 years of improvement – 7th Internal Conference on Geosynthetics – pp. 969-974

Annexe :

Figure 2 : Géotextile de filtration sous recharge drainante en galets, travaux de confortement de la digue du Rhône à Donzère (26) (Crédit photo :Tencate Geosynthetics)

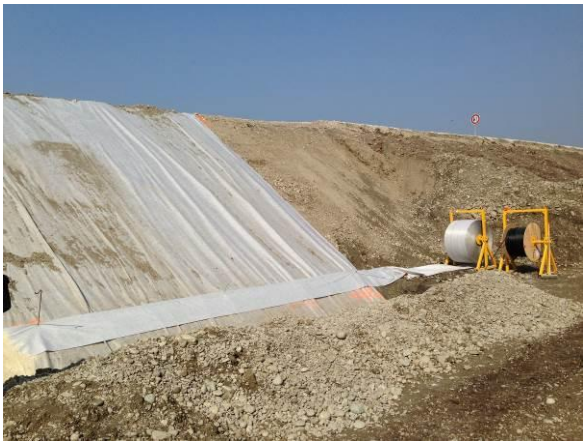


Figure 3 : Pose d'une bande capteur géotextile à fibre optique pour la détection de fuite et de mouvements en pied, travaux de confortement de la digue du Rhône à Donzère (26) (Crédit photo :Tencate Geosynthetics)

	Fiche Technique **Dimensionnement d'un sol de filtration** Design of a soil material for filtration purpose	**Fiche FT 4.2**

Auteurs principaux : M. SUTTER (INRAE) ; C. CHEVALIER (Univ. Eiffel)

Contributeurs : D. POULAIN (INRAE) ; R. TOURMENT (INRAE) ; T. MALLET (SYMADREM) ; O. ARTIERES (TENCATE) ;
Relecteurs : Y. BOUSSAFIR (Univ. Eiffel) ; P.-L. REGAZZONI (Egis) ; L. SAUSSAYE (Cerema) ; T. MALLET (SYMADREM), P. ROYET (INRAE)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / résumé en anglais :
A filter soil is a component of the structure that limits the transport of grain from fine soil to an adjacent coarser soil. It must also not obstruct the flow of water. This sheet deals with granular filters (made of soil, natural or quarry material). The main function of a granular filter is the filtration/retention in order to limit the displacement and transport of the fine elements of a soil composing the structure and/or its foundation by hydraulic flows. In specific cases, the functions of filtration and drainage can be provided by the same component: a drain-filter (see variants).

Étude(s) de cas correspondante(s) :
C3.2 Digue CNR-EDF sur le Rhône
C3.7 Digue de la Montagnette

Introduction :

Définition :

Un filtre est un composant de l'ouvrage permettant limiter la migration des grains d'un sol fin vers un sol plus grossier contigu. Il doit également ne pas faire obstacle aux écoulements.

Sujet de la fiche :

Cette fiche s'intéresse aux filtres dits granulaires (en matériau de type sol, naturel ou de carrière).

Fonction principale :

Filtration/rétention afin de limiter le déplacement et le transport des éléments fins d'un sol composant l'ouvrage et/ou sa fondation par les écoulements hydrauliques.

Fonction secondaire :

Dans certains cas, les fonctions de filtration et de drainage peuvent être assurées par un même composant : un filtre-drain (voir variantes).

Description :

Performances à atteindre :

- Performances en termes de rétention du sol pour une ou plusieurs couches de matériaux granulaires constituant le filtre :
    - granulométrie adaptée répondant à des critères de rétention définis dans la suite de la fiche.
- Performances mécaniques :
    - résistance au cisaillement des interfaces suffisante pour assurer la stabilité générale du talus ;
    - résistance mécanique suffisante pour assurer, au besoin, la stabilité au poinçonnement de la fondation,
    - absence de cohésion pour ne pas soutenir le toit d'un éventuel conduit (auto-réparation du filtre),
    - … (autres éventuels suivant caractéristiques du projet)
- Performances en termes de perméabilité
    - le filtre a une perméabilité suffisante pour laisser passer l'eau s'écoulant au travers (perméabilité croissante dans le sens de l'écoulement) ou bien pour drainer le milieu (dans le cas où il joue également le rôle de drain) ?

Utilisation :

Entre deux couches de sol de granulométries sensiblement différentes, une couche de matériau granulaire de transition, ou une succession de couches granulaires de transition et de granulométrie graduée, conçue pour assurer la filtration de l'écoulement est intercalée entre ces deux couches.

Variantes :

En fonction des besoins de filtration et des caractéristiques des matériaux disponibles, on pourra faire varier l'épaisseur ou la répartition granulométrique du filtre afin d'assurer l'obtention d'un filtre efficace. Une épaisseur minimale sera à définir au CCTP pour la mise en œuvre des couches afin d'éviter la création de couches non fonctionnelles.

Au lieu d'un filtre simple couche, il est par ailleurs envisageable de constituer un filtre granulaire avec plusieurs couches de granulats différents. Cela permet d'assurer une progression dans la filtration et ainsi traiter des écarts trop importants en termes de granulométrie.

Les fonctions de filtration et de drainage peuvent également être assurées par un même composant, appelé « filtre-drain » granulaire. Ce composant permet à la fois : i) de limiter l'entraînement et le transport des fines d'un sol tout en ii) laissant percoler les eaux d'infiltration grâce à une perméabilité suffisante, répondant aux performances à atteindre évoquées ci-dessus (performances en termes de rétention, performances mécaniques et performances de perméabilité).

Alternatives :

L'usage de filtres granulaires peut être limité par une mise en œuvre parfois complexe (géométrie et compactage, incertitude sur la durabilité en cas de mauvaise mise en œuvre) ou des caractéristiques contraignantes sur le choix du matériau.

Les filtres granulaires peuvent alors être remplacés par des filtres en géotextile (cf. fiche FT 4.1) à la condition nécessaire que ces derniers puissent être remplacés en cas de colmatage.

Le filtre géotextile est fortement déconseillé dans un contexte de risque sismique fort.

Dimensionnement :

Principe :

Lorsqu'un filtre est réalisé, c'est avant tout ses capacités à long terme de filtration et souvent de perméabilité qui sont recherchées avec d'une part un critère de rétention du sol à filtrer et d'autre part un critère de perméabilité qui peut être transverse au filtre (pour ne pas créer d'étanchéité à l'interface entre couches) ou dans le plan du filtre (dans le cas où le filtre granulaire a également des fonctions de drainage). Pour les matériaux granulaires, ces critères se vérifient au travers des règles de filtre définies en premier lieu par Terzaghi puis par Sherard et Dunnigan, dont les travaux de recherche ont ensuite été repris dans divers guides et recommandations professionnelles (USBR, USACE et CIGB 95 et 164).

Sur une digue, ces règles de filtre doivent en particulier être vérifiées sur les interfaces suivants :

- corps de digue/filtre ;
- organe d'étanchéité/filtre ;
- filtre/filtre (dans le cas de filtres formés de plusieurs couches de matériaux granulaires) ;
- filtre/matériau d'apport ;
- filtre/ouvrage traversant
- filtre/drain.

mais aussi pour l'ensemble des interfaces au sein de la digue, comme par exemple entre le corps de digue et les protections externe contre l'érosion (perrés, enrochements, gabions, …).

Ces critères fonctionnels sont complétés par un dimensionnement des caractéristiques pour faciliter la mise en œuvre et éviter d'éventuels endommagements lors de la mise en œuvre. Par ailleurs, ces couches participent à la stabilité au glissement de l'ouvrage (stabilité générale).

Concernant la mise en œuvre, une épaisseur maximale sera aussi donnée pour assurer un bon compactage. La largeur ou l'épaisseur du filtre sera définie en fonction de l'aléa sismique (2 à 3 fois la valeur du déplacement calculé) et des engins à disposition pour compacter (dans le cas des filtres inclinés, largeur minimale = largeur du compacteur). On pourra aussi envisager un compactage hydraulique des sables filtrants par arrosage à l'eau. Prévoir dans ce cas de ménager un exutoire fonctionnel dès le début du compactage.

Paramètres nécessaires :

- Géométrie de l'ouvrage : pentes, longueurs de rampant, hauteur et définition des zones fonctionnelles de l'ouvrage ;
- caractéristiques des sols avec lesquels le filtre sera en contact ; (granulométrie, perméabilité, poids volumiques apparents humide et sec, cohésion, propreté via l'équivalent de sable, forme des grains, angle de frottement interne et aux interfaces ;
- caractéristiques des sols à disposition pouvant jouer le rôle de filtre. Les gisements de matériaux à considérer peuvent être le site ou les carrières à proximité. Les caractéristiques à observer sont les mêmes que celles du corps de digue ;
- caractéristiques des écoulements hydrauliques dans le corps de digue ;
- contraintes de mise en œuvre et méthodes associées.

Modèle(s) disponible(s) :

Lorsqu'un filtre granulaire est intercalé entre deux couches, il faut vérifier que les conditions de filtre soient respectées vis-à-vis de chacune des 2 couches. L'épaisseur minimale des couches doit être au moins égale à : 50 fois le D_{15} ou à 20-30 cm.

En plus des aspects de dimensionnement du filtre en lui-même, il est nécessaire de s'assurer de sa stabilité, notamment vis-à-vis du risque de cisaillement, de l'ouvrage aux interfaces entre les matériaux (résistance au cisaillement des interfaces). Le filtre peut constituer une surface de glissement préférentielle qui devra être prise en compte dans l'étude de stabilité (cf. généralités sur les calculs de stabilité des pentes).

Selon le bulletin CIGB 164 « L'érosion interne dans les digues, barrages existants et leurs fondations », les cinq fonctions, qui régissent la capacité du filtre à arrêter l'érosion interne, sont :

1. Rétention : le filtre stoppe le transport (l'érosion) des particules du sol de base protégé.
2. Auto filtration ou stabilité : le filtre possède une stabilité interne et ses particules fines ne sont pas sujettes à l'érosion à l'intérieur du filtre, il ne devra pas maintenir une fissure ouverte par le processus de cimentation ou par la présence de fines plastiques.
3. Non cohésion : le filtre est pulvérulent et comble toute fissure.
4. Perméabilité : le filtre est suffisamment perméable pour transporter l'eau s'écoulant à travers le sol de base vers les couches drainantes ou le pied du barrage.
5. Résistance : le filtre transfère les contraintes à l'intérieur de l'ouvrage sans être écrasé et

donc sans devenir plus fin.

À ces fonctions s'ajoutent la résistance au soulèvement du filtre en cas d'insuffisance de drainage ou en cas de colmatage, assurée par le poids sur le filtre (Fry et al. 2015 ; Fry et al. 2016).

Aspects pratiques (CCTP, chantier) :

Cahier des charges :

Dans le cas d'utilisation de matériaux granulaire :

- Un contrôle régulier de la granulométrie est indispensable ;
- Il est nécessaire de s'assurer de la non pollution des matériaux utilisés par d'autres matériaux du site, notamment au niveau de l'aire de stockage avant mise en place ;
- Le filtre granulaire doit être recouvert à l'avancement des travaux pour éviter les effets d'aléas climatiques (érosion en cas de pluie forte notamment).
- La validation par essais de laboratoire du/des couples filtre(s)/sol(s) envisagés pour le chantier. Ces essais serviront de référence aux essais réalisés en cours de chantier.

Chantier :

Le talus de la digue doit être décapé de sa terre végétale et reprofilé afin d'obtenir un sol support exempt de matière organique, avec une surface plane.

Une épaisseur minimale de sol a fonction de filtre doit être mis en place. Cette épaisseur minimale est à définir essentiellement en fonction des contraintes de mise en œuvre (le compactage doit être efficace).

Nuisance/ environnement :

Voir points généraux dans chapitre 2 de la partie I.

Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance) :

Les principaux contrôles, sont des contrôles de conformité de la mise en œuvre au regard de ce qui était prévu dans les études (teneur en eau, densité…). Dans cette perspective il faudra en particulier veiller à la continuité du filtre, non ségrégation des matériaux, la qualité et l'homogénéité du matériau, le respect des épaisseurs de chaque couche…

Vitesse d'avancement :

Traitement de points singuliers :

Dans le cas de la mise en place de filtre granulaire, des surépaisseurs seront parfois nécessaires au niveau des points singuliers afin de s'assurer de la bonne continuité de la couche filtrante et de son non-colmatage.

Remise en état du site :

Voir points généraux dans chapitre 2 de la partie I.

Références :

- Bulletin CIGB 95 « Barrages en remblai - Filtres et drains granulaires – Synthèse et recommandations » ,1994
- Bulletin CIGB 164 « L'érosion interne dans les digues, barrages existants et leurs fondations », 2016/2017
- Comité Français des Grands Barrages. Petits barrages : Recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi (2002)
- Techniques de barrages en aménagement rural. (1977).
- Sherard JL., Dunnigan LP. Critical Filters for Impervious Soils. Journal of Geotechnical Engineering, Volume 115, Issue 7. (1989).
- Bureau of Reclamation - United States Department of The Interior Design of Small dams (1987). Water resources technical publication, 860 p.
- Design standards n°13 (2011) - Embankment dams / Chapter 5 – Protective filter, Bureau of Reclamation - United States Department of The Interior, DS--13(5)-9 : Phase 4, 253 p.
- USACE - United States Army Corps of Engineers (2004). General Design and Construction Considerations for Earth and Rock
- Fry J.J. et al. (2015). Analyse et traitement de l'érosion interne – procédés classiques et nouveaux – ICOLD 2015 Congress on Fill Dams, EM 1110-2-2300, 130 p.
- FRY J.J. Degoutte G. et Poulain D. (2016). Lessons from Geotextile Use in Embankment Dams – ICOLD International Symposium on "Appropriate technology to ensure proper Development, Operation and Maintenance of Dams in Developing Countries", Johannesburg

	Fiche Technique **Ouvrage de drainage en talus sous une recharge peu perméable** Slope drainage structure under a low permeability recharge	**Fiche FT 4.3**

Auteurs principaux : Y. BOUSSAFIR (Univ. Eiffel)
Contributeurs ; D. POULAIN (INRAE) ; M. SUTTER (INRAE)
Relecteurs : C. CHEVALIER (Univ. Eiffel) ; A. LE KOUBY (Univ. Eiffel) ; O. ARTIERES (Tencate) ; S. PATOUILLARD (DREAL)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract/Résumé en anglais :

This sheet focuses on drainage components installed at the interface of an existing embankment and a recharge with little or no drainage. Rarely used in emergency situations, this solution is particularly suitable for reinforcing a structure after a diagnosis showing the possibility of a failure mechanism due to mechanical instability linked to an increase in water content, or a failure mechanism due to internal erosion.

Étude(s) de cas correspondante(s) :
C3.3 Digue d'Authion
C3.8 Maison encastrée à Bou lieu-dit la Binette

Introduction :

Définition :

On considère dans cette fiche les ouvrages de drainage réalisés au cours d'un chantier de rechargement/épaississement (cf. travaux du SG4) entre l'ouvrage existant et sa recharge coté zone protégée.

Sujet de la fiche :

Cette fiche s'intéresse en particulier aux composants de drainage mis en place à l'interface d'une digue existante et d'une recharge peu ou pas drainante. Rarement mise en œuvre en situation d'urgence cette solution est particulièrement adaptée pour renforcer un ouvrage après un diagnostic mettant en évidence la possibilité de mécanisme de rupture par instabilité mécanique en lien avec une augmentation des teneurs en eau, ou un mécanisme de rupture par érosion interne.

Fonction(s) principale(s) :

- Drainage et stabilisation mécanique

Un ouvrage de drainage sous recharge imperméable ou semi-perméable est prévu pour rabattre un niveau d'eau dans la digue en période de crue, ou d'une manière plus générale intercepter les circulations d'eau parasites au sein de l'ouvrage. La forme générale de la digue est reprise dans le même temps grâce à la recharge pour garantir, en association avec le drainage, une stabilité mécanique des pentes de talus côté zone protégée. Le drainage assure la stabilité en réduisant les pressions interstitielles et en maîtrisant les écoulements hydrauliques. La recharge imperméable ou semi-perméable coté zone protégée est là pour reconstituer un volume de digue et participer à sa stabilité mécanique.

Fonction(s) secondaire(s) :

- Filtration

La mise en œuvre d'une âme drainante doit se faire en respectant les règles de filtre en particulier pour prévenir le risque d'érosion interne. Si les matériaux du drain ne remplisssent pas eux-mêmes les conditions de filtration, un filtre devra être mis en place permettant de maintenir les propriétés hydrauliques de l'ouvrage et de bloquer la migration des particules de sol.

Description :

Performances à atteindre :

Trois fonctions sont à remplir pour atteindre les performances de l'ouvrage :

- une fonction de drainage : **fonction principale** ;
- une fonction de stabilisation mécanique pour la recharge imperméable ou semi-imperméable ;
- une fonction de filtration. Les règles de filtre doivent être respectées aux interfaces ainsi que l'autofiltration du matériau. Dans le cas contraire un filtre en tant que tel sera mis en place.

L'ouvrage de drainage doit être dimensionné pour intercepter les niveaux d'eau dans la digue

et pour évacuer les surpressions interstitielles. Il doit donc être performant en termes de transit d'eau, même si les débits sont en général plutôt faibles. Il est conçu dans le sens transversal (localisation dans le profil en travers) et longitudinal, dans le sens de la digue, pour capter les arrivées d'eau sur une partie ou la totalité de la surface du talus et les évacuer vers des exutoires.

La recharge en matériau imperméable ou semi-imperméable permet d'économiser sur les quantités de matériaux drainants à mettre en œuvre tout en assurant la stabilisation mécanique grâce au volume et au poids mis en œuvre sur l'ouvrage de drainage. Le choix du matériau de recharge, le type de mise en œuvre par compactage soigné et la géométrie à obtenir doivent garantir la stabilité mécanique de la digue côté zone protégé en période de crue (pour tout niveau de crue) et hors crue. Ses propriétés hydrauliques sont en général faibles ce qui permet de privilégier des matériaux d'usages courants, peu élaborés et locaux, pouvant faire une barrière de perméabilité côté zone protégée, grâce au contraste de perméabilité entre la structure drainante et la recharge.

Si les règles de filtration ne sont pas respectées, un filtre, associé à la partie drainante de l'ouvrage devra être mis en place afin de maintenir les propriétés de drainage de l'ouvrage en évitant sa contamination par les particules fines qui composent la digue tout en assurant un passage à l'eau. Au niveau de la mise en place de l'organe de drainage, on peut distinguer le filtre principal, dont la fonction première est d'assurer le transit de l'eau vers l'âme drainante de l'ouvrage et de stopper le mécanisme d'érosion interne, du filtre secondaire dont la fonction est de protéger l'ouvrage de drainage du colmatage par les particules fines de la recharge (Figure 1).

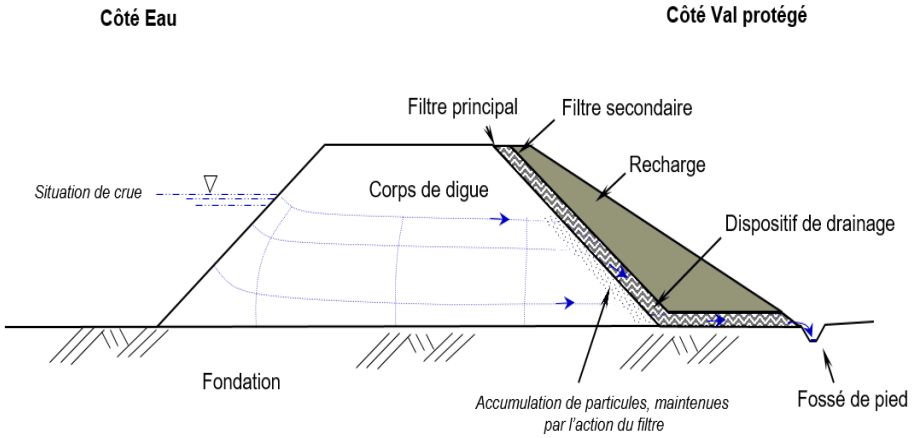


Figure 1 : Schéma de principe d'un ouvrage de drainage sous recharge imperméable ou semi-imperméable (Source : Université Gustave Eiffel)

L'ouvrage de drainage intercepte les niveaux d'eau au sein de la digue et les collecte vers un exutoire côté zone protégée via un drain ou des canalisations en pied de recharge. La recharge est dimensionnée afin de stabiliser mécaniquement la digue grâce à son poids propre. Ses faibles propriétés hydrauliques permettent de maintenir les flux d'eau interne dans l'ouvrage de drainage. Si les règles de filtre ne sont pas respectées entre le corps de digue et l'âme drainante, la mise en place d'un filtre spécifique empêchera alors la migration des particules fines qui pourraient être entraînées par le gradient hydraulique vers l'âme drainante. Il évite ainsi le colmatage de l'ouvrage de drainage et le risque d'érosion interne. Le filtre secondaire à l'interface avec la recharge maintient les propriétés de drainage côté recharge.

Pour être efficaces, les eaux drainées doivent être évacuées vers un exutoire. Dans le cas

contraire, leur accumulation entraîne la ruine de l'ouvrage. Il faut donc veiller à la continuité hydraulique du dispositif jusqu'à cet exutoire. En général, la continuité est assurée par le biais d'un drain en pied de dispositif ou d'un fossé de pied de talus, en contact direct avec le corps drainant par une couche continue (Figure 2) ou discontinue (cas des épis drainants) positionnée sous la recharge. La mise en place d'un collecteur s'impose si les volumes d'eau sont très importants.

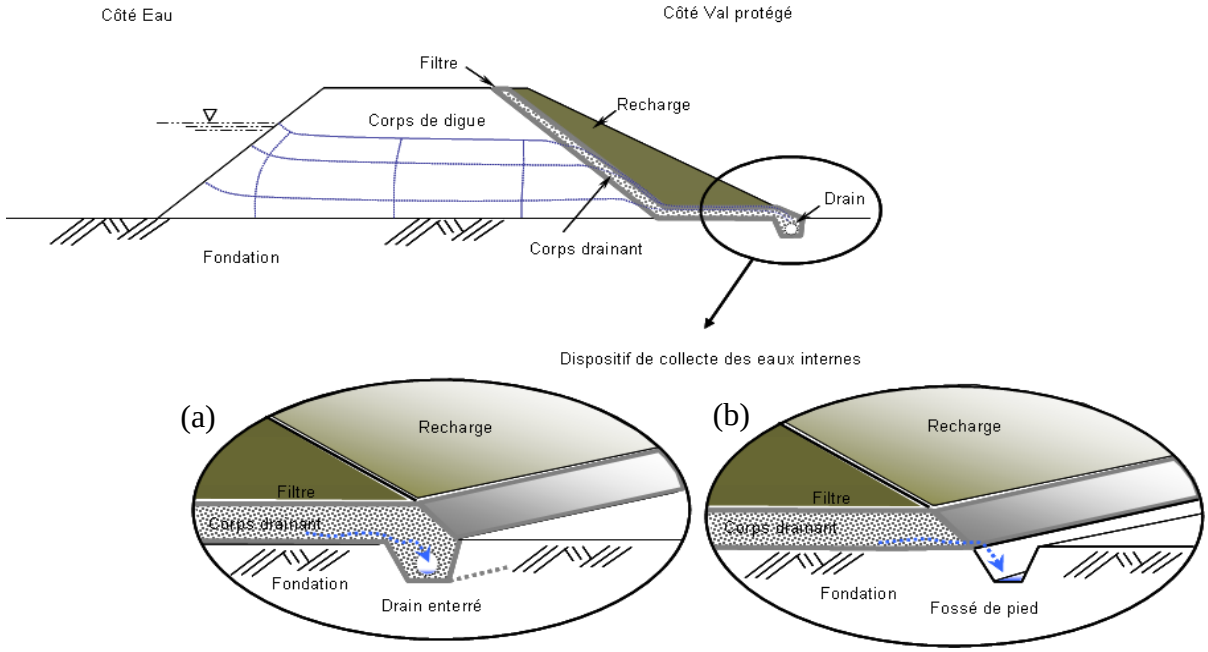


***Figure 2** : Détail de la collecte d'eau en pied de talus côté zone protégée : la continuité hydraulique du rempant est assurée sous la recharge. Les eaux collectées transitent dans le corps drainant et sont dirigées vers l'exutoire (a) via un drain enterré ou (b) via un fossé de pied de talus. (Source : Université Gustave Eiffel)*

Le massif qui reconstitue la digue côté val doit être réalisé avec des matériaux pouvant être compactés jusqu'à atteindre une masse volumique définie dans la phase de conception.

Utilisation :

Cette solution est particulièrement intéressante en milieu fluvial : dans le cas d'ouvrages anciens dont le zonage interne n'est pas parfaitement connu, pour une reprise d'un tronçon de digue (élargissement, stabilisation, modification du profil transversal), ou pour le traitement d'un point singulier (ouvrage traversant, maison encastrée, etc.). Ce type d'ouvrage permet de capter les eaux internes qui circulent préférentiellement aux interfaces entre couches et dans les parties de matériaux présentant des contrastes de perméabilité, ce qui est très fréquent entre l'ouvrage ancien et la partie rénovée de la digue.

On trouve peu d'application de cette solution en milieu maritime.

Variantes :

Les variantes reposent essentiellement sur le choix des matériaux qui constituent l'ouvrage de drainage, et sur le choix des matériaux de reconstitution de la digue

Dans le cas de l'organe drainant proprement dit, les variantes peuvent consister à proposer un matériau naturel autre que celui prévu pendant la conception ou au marché (sable, grave concassée, grave roulée), un matériau géosynthétique ou géocomposite (Figure 3, Figure 4),

voire une combinaison matériaux naturels / géosynthétiques / géocomposites notamment lorsque les fonctions filtration et drainage sont séparées. La possibilité d'accepter des matériaux alternatifs en ouvrage de drainage (Sétra, 2011) est en général peu recommandée voire interdite car le contact avec l'eau, en continu, rend le dispositif et son environnement très vulnérable à tout risque de pollution.

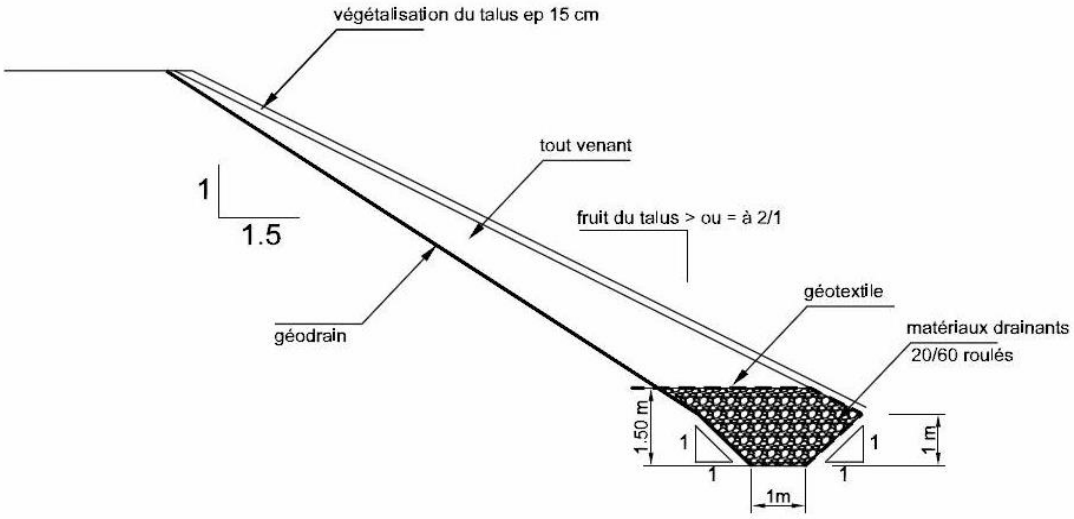


Figure 3 : Exemple de variante de drainage sous recharge imperméable en coupe côté zone protégée, proposée dans une reprise de digue de Loire : l'ouvrage de drainage est composé d'un géocomposite de drainage en talus filtre/drain, la collecte en pied de talus est réalisée par un fossé drainant trapézoïdal, la recharge est réalisée par un matériau qualifié de tout-venant, la fonction de filtre secondaire est assurée par un géotextile seul. (Source : Université Gustave Eiffel)

Il faut noter qu'il est de plus en plus rare de choisir une technique utilisant des matériaux filtres en sables naturels car les ressources sont souvent localement limitées et que cela génère également des contraintes en terme de pose qui ne se justifient économiquement que pour des ouvrages à forts enjeux ou s'il existe des matériaux adéquates sur le site.

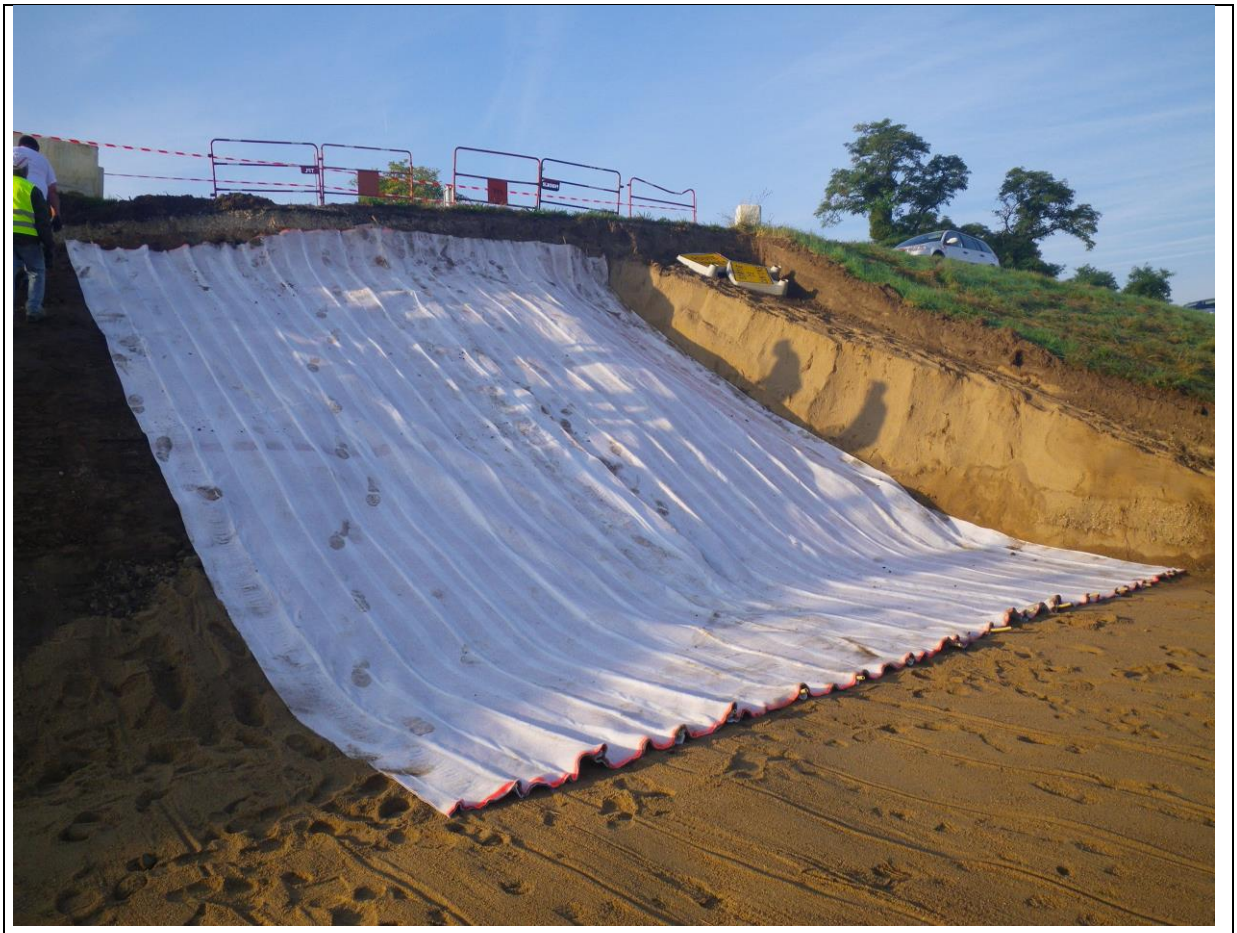


Figure 4 : Chantier de Bou-la-Binette, 2014, Détail du géocomposite de drainage - la partie visible (en blanc) correspond au filtre en contact avec la recharge. Les mini-drains améliorent la capacité de drainage dans le plan du géocomposite en association avec une âme drainante en géosynthétique. (Crédit photo DREAL Centre Val de Loire / DETL).

En ce qui concerne le matériau de recharge de la digue, des variantes plus larges peuvent être proposées quant au choix du matériau : matériau issu de carrière (produit de scalpage, primaire, brut d'abattage …), matériau naturel (déblais du site valorisés in situ, excédents de chantier), matériaux améliorés par traitement (chaux, liant), matériaux alternatifs inertes (matériau élaboré issu d'installation de stockage de déchet inerte –ISDI voire éventuellement non dangereux (ISDND). Il conviendra de préciser les conditions qui permettront de cadrer l'acceptation de ces variantes sur le plan environnemental et géotechnique.

Alternatives

La mise en œuvre d'un rechargement en matériaux perméables (assurant de fait son drainage) (voir fiche technique FT 6.6) est la principale alternative à la conception d'un drainage sous recharge.

Une autre alternative au drainage consiste à renforcer l'étanchéité de la digue en limitant les circulations d'eau par des ouvrages verticaux (cf. fiches FT 3.1, FT 3.2, FT 3.3, FT 3.4 et FT 3.5), des parements ou des remblais côté eau, de faible perméabilité (cf. fiche FT 3.6).

Dimensionnement :

Principe :

Le dimensionnement doit être robuste car ces ouvrages ne peuvent pas faire l'objet d'entretien ni de maintenance, sauf au niveau du dispositif de collecte en pied d'ouvrage et de l'exutoire.

Le matériau drainant doit être dimensionné pour évacuer des débits d'eau libre sans surpression interstitielle et sans se déformer. Il est principalement dimensionné en fonction des sols (ou des matériaux) attenant, et ses propriétés hydrauliques sont compatibles avec le libre passage de l'eau (voir plus particulièrement la fiche FT 4.1 en cas de filtre géosynthétique).

Le dimensionnement est aussi déterminé sur les caractéristiques géométriques du drain : il faut s'assurer que les pentes et la géométrie du drain en général permettent le transit de l'eau vers l'extérieur de l'ouvrage en contournant ou traversant la zone peu ou pas perméable.

Le dimensionnement est également validé par des calculs de stabilité générale du talus côté val intégrant des propriétés de sols drainés (voir fiche FT 6.6)

Les paramètres de sortie porteront sur :

- la localisation des exutoires, des ouvrages de raccordement ;
- les dimensions de l'ouvrage de drainage : localisation dans le profil en travers et le profil en long et géométrie (épaisseur) ;
- des paramètres hydrauliques (débit à évacuer, linéaire à drainer) ;
- les spécifications concernant les matériaux de l'ouvrage de drainage (géosynthétiques, matériaux naturels), leurs spécifications particulières (critère de filtre, masse volumique …) et les conditions de pose ;
- les spécifications concernant le matériau de recharge et les conditions de pose.

Diagnostic préalable / Paramètres (données à recueillir) :
Éléments de conception :
Modèle(s) disponible(s) :

Voir Chapitre 4.

Aspects pratiques (CCTP, chantier,) :

Cahier des charges :
Gestion du Chantier :
Nuisance/ environnement :
Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance) :
Remise en état du site

Pour ces sujets, voir le chapitre 4 et certains points des fiches FT 4.1 ou FT 4.2.

Matériaux et matériels nécessaires :

Les ouvrages de drainage sont tous constitués :

- d'un matériau drainant (naturel -granulaire- ou géocomposite) ;
- d'un filtre si les règles de filtre ne sont pas respectées (naturel ou géotextile) ;
- selon le cas d'un tuyau collecteur ;
- d'ouvrages de raccordements, d'ouvrages de collecte des eaux, d'exutoires, de regards de visite éventuels.

Les remblais de recharges sont constitués de matériaux pouvant être compactés dans des conditions optimales (par rapport à leur teneur en eau notamment).

Un cas particulier de mise en place d'un drainage sous une recharge peu perméable est présenté sur la Figure 5.

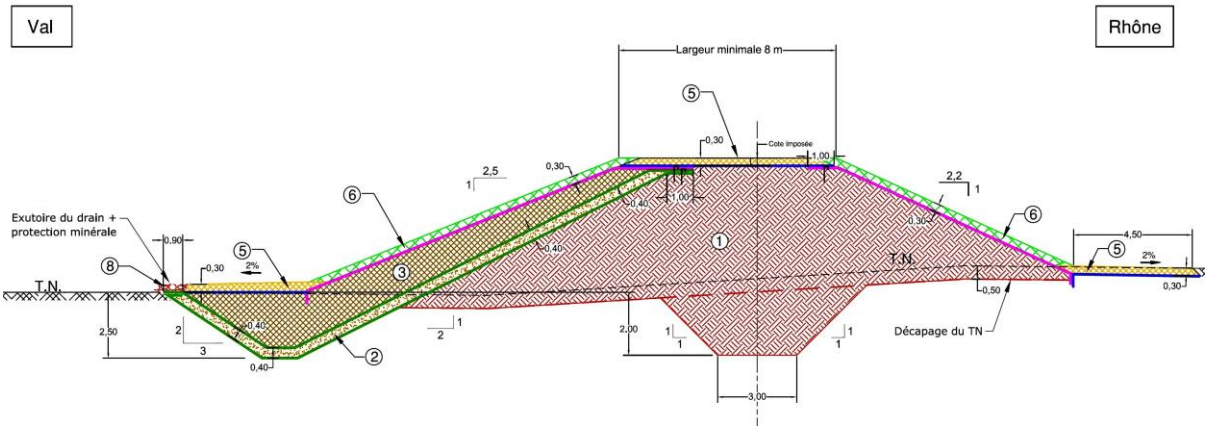


Figure 5 : Exemple d'un cas particulier d'un ouvrage de drainage sous une recharge peu perméable (Source : SYMADREM)

Vitesse d'avancement :

Entre plusieurs dizaines et quelques centaines de mètre linéaire par jour, dépendant de la hauteur de pose et de la complexité du site.

Traitement de points singuliers (extrémités, ouvrages inclus notamment) :

Si il y a nécessité de mettre en place un filtre spécifique il faudra :

- veiller à ne pas créer de vides lors de la pose des composés. Pour cela il est nécessaire par exemple de maintenir les géotextiles par placage le long des bords de la fouille en cas de pose verticale.
- veiller à la continuité du filtre tout au long de l'ouvrage (recouvrement de bandes ou couture) et à la jonction des éléments singuliers (exutoire, regards, ouvrages traversants).

Le traitement des ouvrages traversant appelle une attention particulière (voir fiches SG 6).

Références :

- CIRIA (2013). The International Levee Handbook. CIRIA.voir §4.10 seepage (pp.238-242), § 8.3 internal hydraulic processes (pp.791-804) pour le dimensionnement hydraulique, § 10 pour le contrôle et la gestion des travaux
- Schneebeli G. (1966). Hydraulique souterraine. Collection du centre de recherches et d'eaais de Chatou. Ed. Eyrolles.362 pages.
- Bulletin de liaison des Laboratoires Routier (1970). Hydraulique des sols. Numéro spécial. CR des journées d'Hydraulique des Sols du 27, 28 et 29 novembre 1968, Paris. Lire plus particulièrement les articles de M. Rat et H. Josseaume page 21, M. Rat page 113, H. Josseaume page 199.
- MEDDE-DGPR (2015) Référentiel technique digues maritimes et fluviales.
- NF EN ISO 10 318 (2006). Géosynthétiques, Termes et Définitions. AFNOR.
- NF G38-060 (2013). Textiles - Articles à usages industriels - Recommandations pour l'emploi des géotextiles et produits apparentés - Mise en œuvre - Spécifications - Contrôle des géotextiles et produits apparentés. AFNOR.
- NF G38-061 (2013). Textiles - Articles à usages industriels - Recommandations pour l'emploi des géotextiles et produits apparentés - Détermination des caractéristiques hydrauliques et mise en œuvre des géotextiles et produits apparentés utilisés dans les systèmes de drainage et de filtration. AFNOR.
- Recommandation pour l'emploi des géosynthétiques dans les systèmes de drainage et de filtration. CFG, 2013.

  (*http://www.cfg.asso.fr/sites/default/files/files/publications/CFG-Fascicule%20Fitration-Drainage.pdf*)
- Guide pour la réalisation des remblais et des couches de formes (GTR). LCPC-Sétra, 2000. Ce document permet la validation des matériels de compactage adaptés à de grandes surfaces et de gros volumes, pour des objectifs de compactage de remblai (densification q4 et q3). Ce document précise les éléments de vocabulaire concernant la classification des sols et des roches pour un emploi en remblai et couche de forme.
- Guide remblayage des tranchées et réfection des chaussées de 1994. LCPC-Sétra : ce document permet la validation des matériels de compactage adaptés à de faibles surfaces et de petits volumes, pour des objectifs de compactage de remblai (densification q4 et q3)
- Guide drainage routier de 2006. Sétra : on trouvera dans ce document des références concernant les prescriptions en matière de matériaux drainants, les formes et structures drainantes les plus couramment mises en œuvre et les éléments de contrôle qualité à exiger.
- Sétra – Chantiers routiers et préservation du milieu aquatique. Management environnemental et solutions techniques. Guide Technique, Juillet 2007. 120 pages. Réf.0713.
- Sétra – Guide acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière – Evaluation environnementale. Guide technique, mars 2011. 28 pages. Réf.1101.
- DREAL CVL / DETL. Confortement de la digue au lieu-dit la Binette (Bou) – Projet et DOE – 2014-2015.
- USBR – Filters Embankments Dams. (2011).
- CIGB – Embankment dams, Granular filters and drains – Review and recomandations. (1994).

Annexes

Figure 6 : Pose d'un géotextile de protection sur le matériau drainant, confortement des digues de Sandillon (45) (Crédit photo : DREAL Centre Val de Loire)

Figure 7 : Déversement du matériau de recharge, confortement des digues de Sandillon (45) (Crédit photo : DREAL Centre Val de Loire)

Figure 8 : Mise en œuvre partielle du matériau constituant la recharge, on distingue la forme du fossé en pied de talus faisant office de dispositif de collecte des eaux drainées par le d dispositif, confortement des digues de Sandillon (45) (Crédit photo : DREAL Centre Val de Loire)

Figure 9 : Exemple de recharge peu perméable pour un confortement de talus côté val et de drainage sous recharge par géocomposite de drainage. Le géocomposite n'est pas ancré en tête afin de ne pas le mettre en tension. Chantier de Bou la Binette (45) (Crédit photo : DREAL Centre Val de Loire)

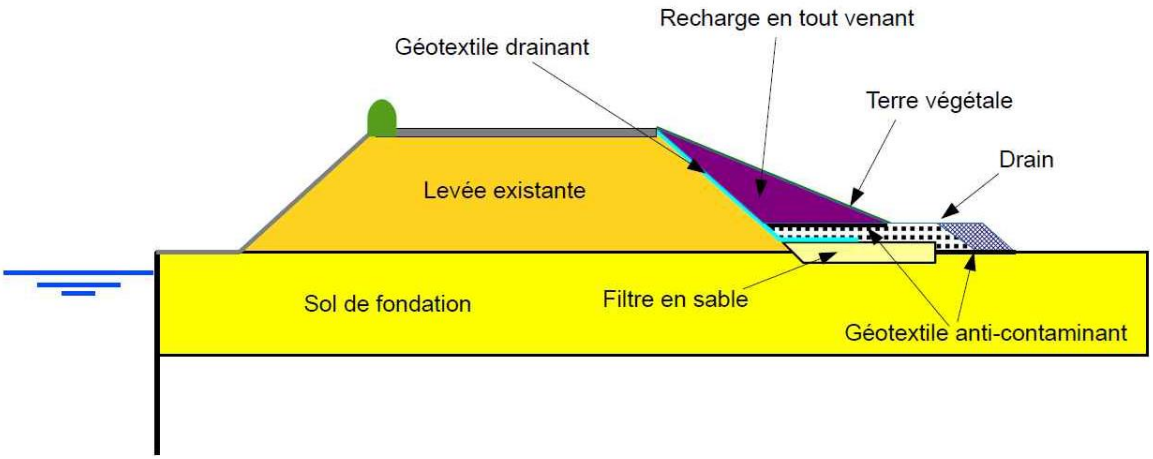


Figure 10 : Schéma de la solution technique du renforcement de la digue de Bou la Binette (45) (Source : DREAL Centre Val de Loire)

	Fiche Technique **Tranchées et recharges drainantes** Trench and toe drain system	**Fiche FT 4.4**

Auteurs principaux : Y. BOUSSAFIR (Univ. Eiffel);
Contributeurs : M. SUTTER (INRAE) ; D. POULAIN (INRAE)
Relecteurs : C. CHEVALIER (Univ. Eiffel) ; O. ARTIERES (Tencate) ; A. LE KOUBY (Univ. Eiffel) ; S. PATOUILLARD (DREAL)

Abstract / Résumé en anglais :
Drainage trenches and drainage beds are often used to manage the flow of internal water inside the levee. Inside the embankment, the main interest of the device is to stop internal erosion mechanisms. When they are on the protected area side, they reduced the hydraulic path and drop the water level, avoiding interstitial overpressures and mechanical instabilities linked to the saturation of the slope. Depending on the diagnosed needs, the location and depth of the drainage system can intercept water circulation up to the level of the foundation

Étude(s) de cas correspondante(s) :
C3.2 Barrage de Montaubry
C3.6 Digue de Samira au Niger
C3.9 Digue d'Amboise

Introduction :

Définition :

Les tranchées drainantes et les massifs drainants sont très fréquemment mis en œuvre pour gérer l'écoulement des eaux internes au sein de la digue. Lorsqu'ils sont positionnés au coeur de la digue, ils ont pour principal intérêt de stopper les mécanismes d'érosion interne. Lorsqu'ils sont positionnés du côté zone protégé, ils permettent le rabattement du niveau d'eau et évitent les surpressions interstitielles et les instabilités mécaniques liées à la saturation du talus. Selon les besoins diagnostiqués, l'implantation et la profondeur de l'organe de drainage pourra intercepter les circulations d'eau jusqu'au niveau de la fondation

Sujet de la fiche :

Cette fiche décrit des dispositifs destinés à améliorer le drainage de la digue mis en place sans recharge complémentaire et sans modification fondamentale de la géométrie de la digue, comme :

- Les massifs drainants (Figures 1 et 2)
- Les tranchées drainantes (Figures 3 et 4)

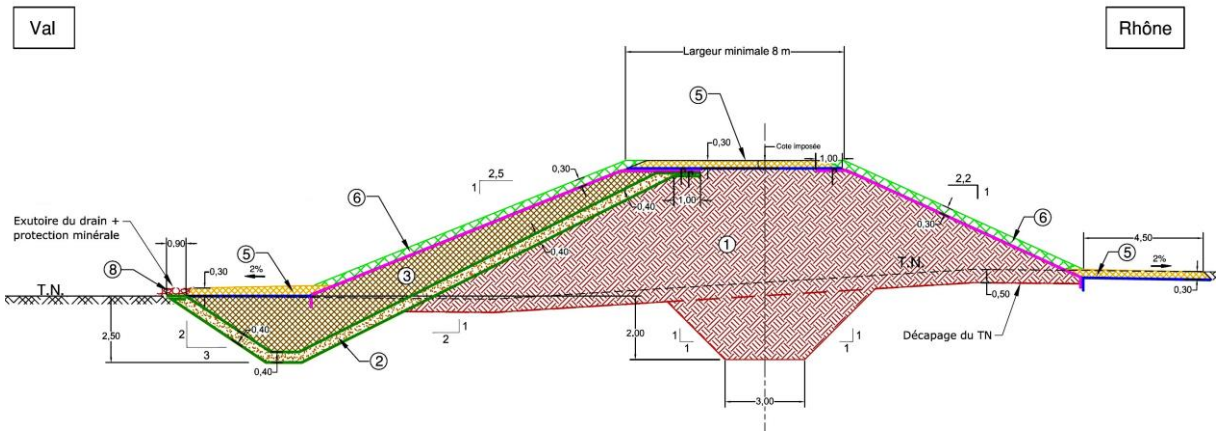


Figure 1 : exemple de massif drainant sans recharge côté zone protégée (à gauche de la figure). Sur cet exemple, le massif draine également la fondation de la digue (Source : Symadrem)

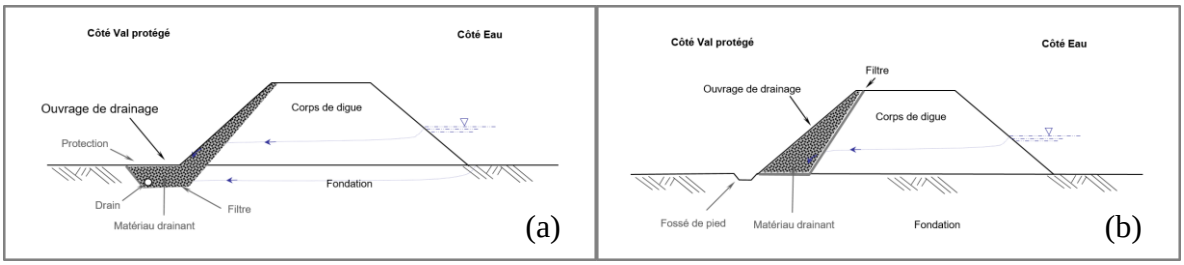


Figure 2 : schéma de principe de massif drainant sans recharge côté zone protégée (à gauche de la figure) (a) avec ancrage et (b) sans ancrage (Source : Université Gustave Eiffel).

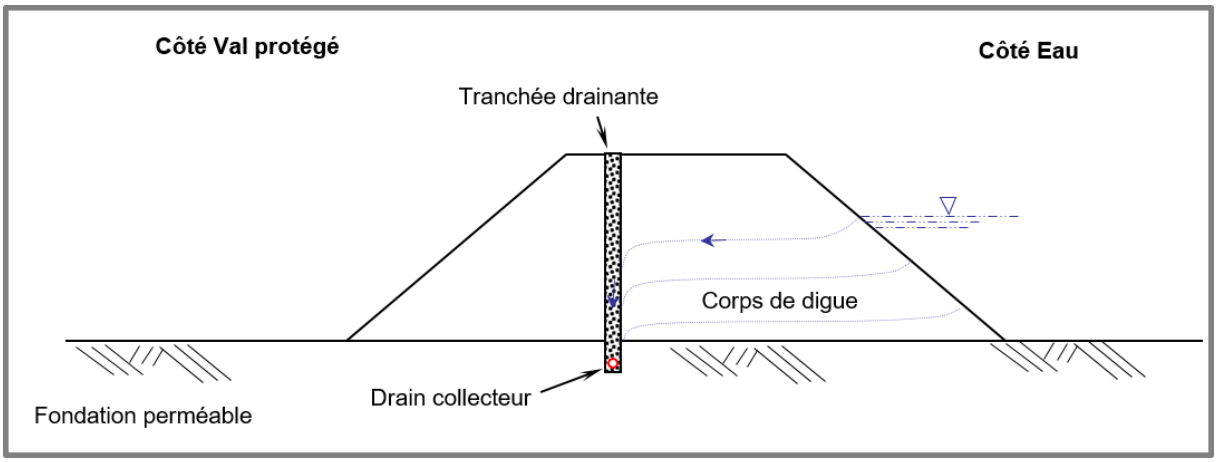


Figure 3 : Dispositif de drainage dans le corps de digue. La tranchée drainante intercepte les circulations d'eau au sein de l'ouvrage jusqu'à la fondation, et améliore ainsi l'état hydrique du talus côté val protégé. (Source : Université Gustave Eiffel)

Les dispositifs drainants sont généralement composés par des assemblages de différents matériaux, principalement granulaire et géosynthétiques, aux caractéristiques bien définies.

Ne seront pas traités ici les dispositifs drainants de type tapis drainant ou drain vertical qui sont plus souvent mis en œuvre dans des travaux neufs, et moins souvent en renforcement.

<u>Fonction(s) principale(s)</u> :

Les dispositifs de drainage ont comme fonction principale de maîtriser les écoulements

hydrauliques dans et/ou sous la digue, ce qui inclut : intercepter un niveau d'eau dans la digue, des circulations d'eau existantes ou suspectées au travers ou sous la digue. Les circulations d'eau peuvent être diffuses ou localisées. L'ouvrage peut également être prévu pour capter des venues d'eau liées à des terriers d'animaux, de la fissuration de retrait, des conduits racinaires …

L'amélioration des états hydriques grâce au drainage permet également d'assurer :

- la stabilité mécanique de l'ouvrage en réduisant les pressions interstitielles sur le talus côté zone protégée et améliorant la cohésion et l'angle de frottement des matériaux ;
- la stabilité vis-à-vis du risque de soulèvement hydraulique en interceptant les circulations d'eau souterraines (figure 2a et 3).

Fonction(s) secondaire(s) :

Le dispositif de drainage intervient de manière secondaire au travers d'une fonction de filtration en bloquant la migration des particules de sols grâce au filtre qui y est systématiquement associé lorsque les conditions de filtre ne sont pas assurées entre le matériau drainant et le remblai existant. Il est donc à ce titre intéressant pour prévenir le risque d'érosion interne.
Le dispositif de drainage intervient également dans la stabilité globale lorsqu'il remplace une partie non négligeable de la digue par des matériaux drainants qui ont de meilleures caractéristiques mécaniques que le remblai (voir Figure 1).

Description :

Performance à atteindre :

Le dispositif de drainage est dimensionné pour intercepter les niveaux d'eau dans la digue jusqu'à sa fondation lorsque c'est nécessaire, et pour évacuer les surpressions interstitielles. Il doit donc être drainant, peu déformable et correctement localisé (i.e. au contact des arrivées d'eau qu'il doit collecter). On le dimensionne sur profil en travers mais également en profil en long pour localiser les chemins vers les exutoires.

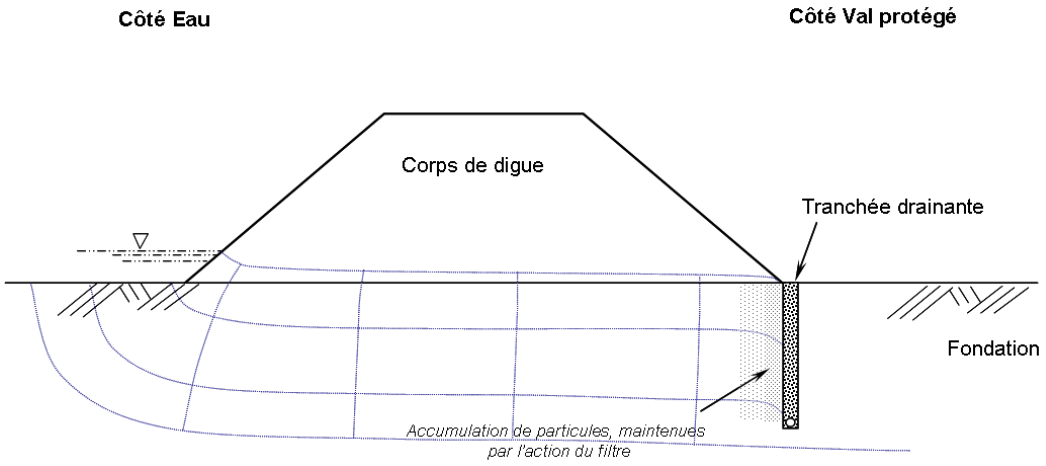


Figure 4 : Tranchée drainante en pied de talus : le dispositif intercepte les mouvements d'eau dans la fondation. Il prévient du risque de soulèvement hydraulique et dans certains cas du risque de suffusion (Source : Université Gustave Eiffel)

Il comprend généralement deux parties pour être efficace : un corps drainant et unfiltre .

- Le corps drainant doit permettre la collecte et l'évacuation gravitaire de l'eau libre. Il doit être suffisamment perméable pour que l'eau circule gravitairement et doit être dimensionné pour résister aux pressions hydrauliques.
- Le filtre doit bloquer les particules du sol à sa surface tout en laissant passer l'eau en. Cette fonction est essentielle pour maintenir les propriétés de perméabilité du matériau qui constitue le corps drainant. Le filtre ne doit pas se colmater et doit être dimensionné pour laisser passer l'eau sur toute la durée de vie de l'ouvrage.

Utilisations :

Les dispositifs de drainage côté val protégé sont essentiellement mis en œuvre en milieu fluvial. Ils sont mis en place lorsque l'on cherche à stabiliser une digue et qu'un engraissement par recharge n'est pas nécessaire et/ou souhaité et/ou envisageable. (voir dans ce cas, la fiche T3.3). La stabilisation est souvent recherchée en cas de suspicion de mouvements d'eau internes dans la digue.

Variantes :

Les variantes possibles concernant les dispositifs de drainage sans recharge complémentaire, sont basées sur le choix du dispositif (géocomposites par exemple, solutions mixtes), son implantation et sa géométrie.

Cela peut conduire à retenir un drainage en pied de digue de type massif drainant ou tranchée drainante. Dans certains cas, le drainage en pied de digue peut être cumulé avec un drainage de la fondation (pour éviter des sous-pressions éventuelles).
L'ouvrage de drainage peut être réduit à une simple interface - cas pour une tranchée drainante - lorsque les gradients hydrauliques ne sont pas trop élevés, ou au contraire surdimensionnés jusqu'à devenir une partie du zonage du remblai (cf. fiche FT 4.2 et FT 4.3), assurant également une partie de la stabilité de la digue par son poids propre. Ce type de variante peut conduire à revoir globalement la position des différentes parties d'ouvrage au sein de la digue, la vérification des fils d'eau, la vérification de la stabilité interne, la technique de pose voire le phasage des terrassements généraux...

Peu courants en France (mais plus présents sur le Mississippi, par exemple), les puits de décompression peuvent constituer une variante de la tranchée drainante en pied de talus. Le drainage se fait de manière discontinue par un ensemble de puits circulaires localisés en pied de talus côté zone protégée. Le principe est basé sur un rabattement gravitaire des niveaux d'eau entre les puits.

D'autres variantes peuvent reposer sur le choix des matériaux qui constituent l'ouvrage de drainage. Les solutions variantes peuvent proposer des matériaux naturels d'une autre granulométrie ou d'une autre propriété (angularité par exemple) que celui du marché ce qui peut conduire à proposer des sables, graves concassées, graves roulées, petits enrochements…. Des solutions clés en main sont souvent proposées avec des matériaux géosynthétiques ou géocomposites, voire de combinaisons de matériaux naturels et géosynthétiques ou géocomposites qui conduisent souvent *in fine* à une proposition de drainage sous recharge. La possibilité d'accepter des matériaux alternatifs[1] en ouvrage de

[1] Les matériaux alternatifs sont des matériaux élaborés à partir d'un déchet et destiné à être utilisé, seul ou en

drainage (laitier, pneu déchiqueté, matériau de démolition…) est peu recommandée car le contact continu avec de l'eau rend le milieu très vulnérable à un risque de pollution par le fait du matériau.

On peut constater de façon générale, que le choix d'utiliser des filtres en sables naturels est souvent limité à des ouvrages à forts enjeux comme les barrages. Les contraintes de pose et d'approvisionnement sur de longs linéaires orientent aussi les choix définitifs. A cela s'ajoute le fait que les ressources locales en matériaux naturels filtrants ne sont pas souvent conformes aux exigences des règles de filtre.

Alternatives

Si la stabilité de l'ouvrage côté zone protégée est un enjeu, il est envisageable de réaliser un drainage sous une recharge nouvellement mise en place (cf FT 4.3) ce qui peut impacter les emprises.

L'alternative au drainage consiste à renforcer l'étanchéité de la digue en bloquant les circulations d'eau par des dispositifs verticaux, des parements ou des remblais côté eau qui soient imperméables.

Signalons que de nouvelles techniques innovent en matière d'étanchéification et peuvent constituer des alternatives dans certaines situations : les injections de résine, la biocalcification, etc.

Dimensionnement :

Principe :

Le dispositif de drainage doit être dimensionné pour évacuer des débits d'eau libre sans générer de surpression interstitielle, sans former de barrière à l'eau et sans se déformer. Il est principalement dimensionné en fonction des types de sols (ou des matériaux) avec lesquels il sera en contact et des débits à évacuer. Les propriétés hydrauliques du dispositif drainant sont compatibles avec le libre passage de l'eau au travers du filtre et dans le corps drainant (cf. fiche FT 4.1 pour les filtres géotextiles) et permettent de justifier la stabilité globale de l'ouvrage notamment si l'on souhaite que l'écoulement soit gravitaire et donc que la charge hydraulique soit nulle (absence de pression hydrostatique). La norme NF G38-061 précise les règles à appliquer dans ces domaines.

Si le matériau drainant intervient dans la stabilité interne du talus côté val, la masse volumique humide est importante à spécifier. Celle-ci dépend notamment de la nature pétrographique du granulat, certaines roches étant plus lourdes que d'autres.

On cherchera à avoir en sortie les paramètres suivants :

- La localisation des exutoires lorsqu'ils existent, et des dispositifs de raccordement ; si le dispositif ne dispose pas d'exutoires naturels, il doit être dimensionné pour stocker l'eau ;
- Les dimensions du dispositif de drainage : localisation dans le profil en travers et le profil en long, géométrie (épaisseur) ;

mélange avec d'autres matériaux, alternatifs ou non, au sein d'un matériau routier (définition Sétra, 2011)

- Des paramètres hydrauliques (débit à évacuer, linéaire à drainer) ;
- Les spécifications concernant les matériaux du dispositif de drainage (géosynthétiques, matériaux naturels) et leurs spécifications particulières (critère de filtre, masse volumique …) et les conditions de pose.

Paramètres nécessaires :
Modèle(s) disponible(s) :

Voir Chapitre 4.

Éléments de conception (détails autres que dimensionnement) :

En plus des généralités rappelées dans le chapitre 4, les points suivants sont à regarder plus particulièrement :

- L'appréciation de la difficulté de la pose et des conditions de stabilité en phase chantier : possibilité d'excaver avec ou sans blindage pour les tranchées drainantes (la limite des profondeurs d'excavation sans blindage est fixée à 1m30 réglementairement), pente de talus des fouilles, etc. Les conditions de stabilité des terrains à court terme doit être connue.
- Le choix de la technique d'excavation : avec des matériels classiques (pelle, pose manuelle) ou non (trancheuse, pose mécanisée) selon la profondeur recherchée. Les profondeurs des tranchées les plus courantes (et donc réalisables au godet de pelle) sont comprises entre 0,50 et 2,00 mètres de profondeur. Au-delà des engins spéciaux sont requis : des trancheuses peuvent permettre d'atteindre des profondeurs de l'ordre de 12 mètres de profondeur. Dans ces situations, la tranchée n'est en général remblayée qu'avec du matériau granulaire sans géosynthétique.
- L'appréciation de la difficulté de la pose notamment au regard du choix et de la pose du géotextile (cf fiche FT 4.1) : préciser les caractéristiques minimales attendues pour la mise en œuvre et de son mode de pose si des mises en tension sont prévisibles (résistance à la traction à évaluer, poinçonnement par des blocs anguleux). Selon les cas, des redans permettent d'insérer le dispositif de drainage dans l'ouvrage existant : il convient alors de préciser si les géosynthétiques doivent être ancrés ou non. En général, il est préférable de ne pas ancrer les géosynthétiques pour éviter de les déchirer quand les matériaux sont déversés dessus.
- Des spécifications en termes de recouvrement des lés doivent être précisées pour quantifier les approvisionnements, par exemple, en précisant la largeur de recouvrement entre lés (souvent de l'ordre de 0,30 m).
- Le mode de pose du matériau drainant (par plot, nécessitant du compactage ou non, sens de circulation des engins et des amenées de matériaux …) et les hauteurs de déversements tolérées seront à préciser dans le CCTP.
- La nécessité ou non d'ajouter un tuyau drainant (collecteur) en plus du matériau drainant, qui peut être une situation intéressante en cas d'absence d'exutoire.
- La nécessité de prévoir (ou non) une protection de surface sur l'ouvrage et l'exutoire.

Aspects pratiques (CCTP, chantier,) :

Cahier des charges :
Gestion du Chantier :
Nuisance/ environnement :
Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance)

Remise en état du site

Pour ces sujets, voir le chapitre 4 et certains points des fiches FT 4.1 ou FT 4.2.

Matériaux et matériels nécessaires :

Les dispositifs de drainage sont tous constitués :

- D'un matériau drainant (naturel ou géocomposite) ;
- D'un filtre (naturel ou géotextile) ;
- Selon le cas d'un drain perforé (tuyau,collecteur) ;
- De dispositifs de raccordements, de collecte des eaux, d'exutoires, de regards de visite éventuels.

Selon le projet, les précisions attendues au CCTP porteront sur le choix du matériel (pelle, trancheuse), la profondeur de pose, la stabilité des parois (nécessité de blindage), les fils d'eau. La figure 5 donne une illustration d'un chantier de réalisation d'un massif drainant.

Figure 5 : Réalisation d'un massif drainant en pied de talus côté val protégé : la forme a été réalisée au godet de pelle. Au premier plan la pose d'un géosynthétique filtre et en arrière-plan, la grave drainante posée sur le géosynthétique, en attente du recouvrement par le filtre et une épaisseur de terre végétale – Amboise (37). La profondeur de la fouille ne nécessite pas de blindage et les talus sont stables à court terme (Crédit photo : DREAL Centre Val de Loire)

Vitesse d'avancement :

Entre plusieurs dizaines et quelques centaines de mètre linéaire par jour, dépendant de la profondeur de pose, du type de confortement et de la complexité du site.

Traitement de points singuliers (extrémités, ouvrages inclus notamment) :

- Il convient d'être vigilant aux difficultés spécifiques liées à la gestion des interfaces en veillant à la continuité hydraulique du dispositif de drainage et du filtre, et à l'adaptation de la technique autour de l'ouvrage traversant (il est nécessaire d'adapter la technique ponctuellement – voir chapitre 8 de la partie I du document).
- Veiller à ne pas créer de vides par surcreusement lors de la pose des composés (filtre

principalement), maintenir les géotextiles par placage le long des bords de la tranchée en cas de pose verticale.

- Veiller à la continuité du filtre tout au long de l'ouvrage (recouvrement de bandes ou couture) et à la jonction des éléments singuliers (exutoire, regards, ouvrages traversant).
- Le traitement des ouvrages traversant appelle une attention particulière (voir chapitre 8 de la partie I du document).
- La recherche d'un exutoire naturel, c'est-à-dire un point bas dans la topographie pouvant accepter le rejet des eaux de drainage, peut constituer une difficulté : l'évacuation gravitaire de l'eau drainée par un fil d'eau vers un exutoire naturel peut être impossible à réaliser. Cela peut être le cas lorsque la profondeur du dispositif se situe bien en dessous du terrain naturel. Le dispositif de drainage doit alors assurer le stockage temporaire. A titre informatif, les débits à évacuer sont en général faibles, de l'ordre de 10 à 1000 litres/heure/100 mètres linéaires (selon la perméabilité de l'encaissant), et discontinus dans le temps, les besoins se concentrant au moment où le dispositif est en charge.

Références :

- CIRIA (2013). The International Levee Handbook. CIRIA.Voir particulièrement §4.10 seepage (pp.238-242), §8.3 internal hydraulic processes (pp.791-804), §9.7 control of seepage and uplift (pp.1050-1061) et pour partie §9.8 control of internal erosion et 9.9 mass stability throughout levee life
- Schneebeli G. 1966. Hydraulique souterraine. Collection du centre de recherches et d'essais de Chatou. Ed. Eyrolles.362 pages.
- MEDDE-DGPR (2015) Référentiel technique digues maritimes et fluviales.
- NF EN ISO 10 318 (2006). Géosynthétiques, Termes et Définitions. AFNOR.
- NF G38-060 (2013). Textiles - Articles à usages industriels - Recommandations pour l'emploi des géotextiles et produits apparentés - Mise en œuvre - Spécifications - Contrôle des géotextiles et produits apparentés. AFNOR.
- NF G38-061 (2013). Textiles - Articles à usages industriels - Recommandations pour l'emploi des géotextiles et produits apparentés - Détermination des caractéristiques hydrauliques et mise en œuvre des géotextiles et produits apparentés utilisés dans les systèmes de drainage et de filtration. AFNOR.
- Recommandation pour l'emploi des géosynthétiques dans les systèmes de drainage et de filtration. CFG, 2013.

(*http://www.cfg.asso.fr/sites/default/files/files/publications/CFG-Fascicule%20Fitration-Drainage.pdf*

- Guide remblayage des tranchées et réfection des chaussées de 1994. LCPC-Sétra : ce document permet la validation des matériels de compactage adaptés à de faibles surfaces et de petits volumes, pour des objectifs de compactage de remblai (densification q4 et q3)
- Guide drainage routier de 2006. Sétra : on trouvera dans ce document des références concernant les prescriptions en matière de matériaux drainants, les formes et structures drainantes les plus couramment mises en œuvre et les éléments de contrôle qualité à exiger.

Annexes :

Figure 6 : cordon drainant sur une digue de Loire : la partie granulaire se distingue du corps de digue. Le fossé entre le pied de talus et la piste sert de dispositif de collecte des eaux de drainage. Il n'y a pas de protection particulière de surface sur ce dispositif pour lequel le gestionnaire souhaite garder une visibilité en période de fonctionnement (Crédit photo DREAL Centre Val de Loire)

Figure 7 : Réalisation d'une tranchée drainante en pied de digue côté val protégé. NB : Les consignes de sécurité pour le personnel intervenant sur chantier sont spécifiques au pays, ici, la Digue Samira au Niger (fiche C3-6).(Crédit photo : Olivier Artières)

	Fiche Technique **Remblai stabilisateur avec géoconteneurs** Stabilizer embankment with geocontainers	**Fiche FT 5.1**

Auteurs principaux : O. ARTIERES (Tencate)
Contributeurs : M. SUTTER (IINRAE) ; D. POULAIN (IINRAE) ; R. TOURMENT (IINRAE)
Relecteurs : JC. PALACIOS (Safege) ; S. PATOUILLARD (DREAL Centre-Val de Loire), L. SAUSSAYE (Cerema) ; P. LEDOUX (Cerema)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais :
Geotextiles bags and geotextile tubes are an alternative to rocks, concrete or stones to protect dikes against external erosion and to stabilize them. They are built with a geotextile envelope to get a shape of massive bags or long tubes, and are hydraulically filled in by pumping a mixture made with local fine soil with water. They work as weight elements ranging from 500 kg to 30 tons per linear meter of dike and are therefore very stable against external hydraulic forces.

Étude(s) de cas correspondante(s) :
C4.1.1 Kampen (Pays-Bas) ;

Indications :

Définition :

On considère comme remblai avec géoconteneur ou « remblai technique », dans le cadre de la réparation ou du confortement de digue, un remblai dont le volume est essentiellement constitué par des contenants remplis d'un sol.

Généralement ces contenants sont des tubes ou sacs géotextiles remplis de sable ou de matériaux disponibles à proximité et choisis selon le type de conteneur et les contraintes de mise en œuvre.

Sujet de la fiche :

Cette fiche s'intéresse particulièrement à l'utilisation de tels sacs ou tubes géotextiles pour des confortements ou réparations d'ouvrage, dont les plus largement utilisés se classent en 3 catégories selon leur volume de confinement :

- Les sacs géotextiles, éléments de forme quasi-parallélépipédique de quelques centaines de kg à 2 tonnes et qui sont en général remplis in-situ de sol par un dispositif à trémie ;
- Les tubes géotextiles (Figure 2), éléments très allongés de plusieurs dizaines de mètres de long et de 2 à 15 m² de section, soit de 4 à 30 tonnes par mètre linéaire de tube, en général remplis sur site par pompage hydraulique d'un mélange eau/sable, installés au sec ou dans l'eau à faible profondeur (< 3m);
- Les conteneurs géotextiles, très gros sacs de 20 à 30 ml de long, de 100 à 600 m^3, remplis dans une barge et mis en place grande profondeur (> 3 m). Ils sont utilisés au large de digues maritimes pour réaliser des brises lames ou récifs artificiels. Ils ne sont pas détaillés dans cette fiche technique ;

Fonctions principales :

Du fait de leur composition, les remblais techniques présentent l'avantage de pouvoir répondre à plusieurs fonctions :

- Stabilité dont soutènement d'ouvrage (Figure 1, Figure 2) ;
- Diminution des sollicitations, par exemple dans un contexte d'urgence (Figure 3) ;
- Résistance à l'érosion externe vis-à-vis de l'écoulement de l'eau (tangentiel à la berge), ou l'attaque frontale par le batillage et les vagues (la surface de la berge est progressivement érodée par l'arrachage du sol).

Fonction(s) secondaire(s) :

Les sacs et tubes géotextiles permettent d'assurer d'autres fonctions :

- rehausse d'ouvrage ;
- création de batardeaux ;
- dessication et confinement de boues/vases de dragage du cours d'eau endigué (les boues/vases de dragage peuvent être directement utilisées en tant que matériel de remblaiement)

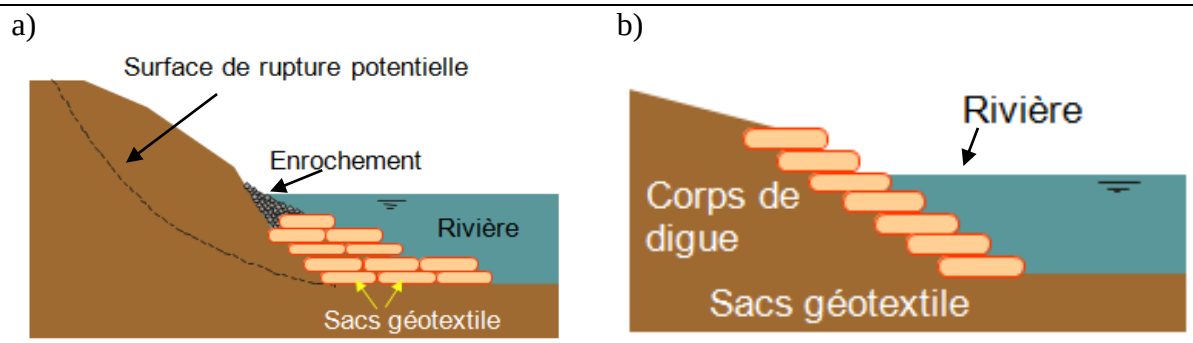


Figure 1 : Exemples d'utilisation de sacs géotextile – a) en stabilisation de pied de talus et b) en protection de berge (Source : Tencate)

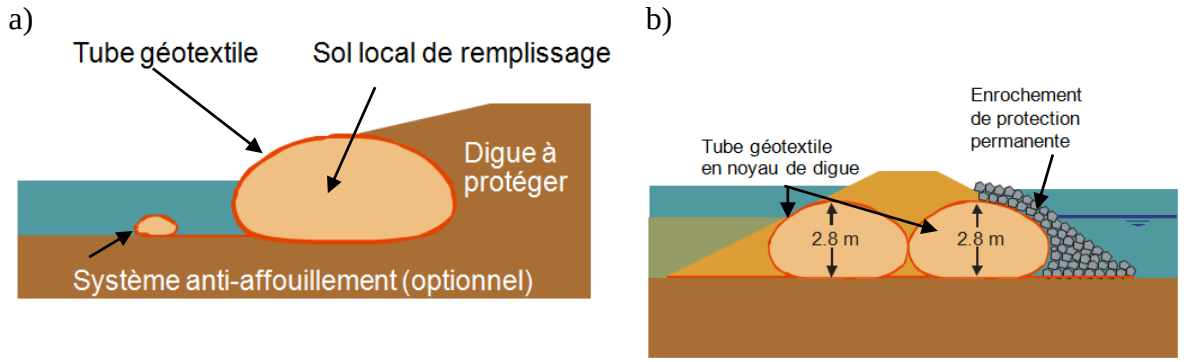


Figure 2 : Exemples d'utilisation de tubes géotextile – a) protection de pied de talus par confortement direct et b) construction de digues ou épis (Source : Tencate)

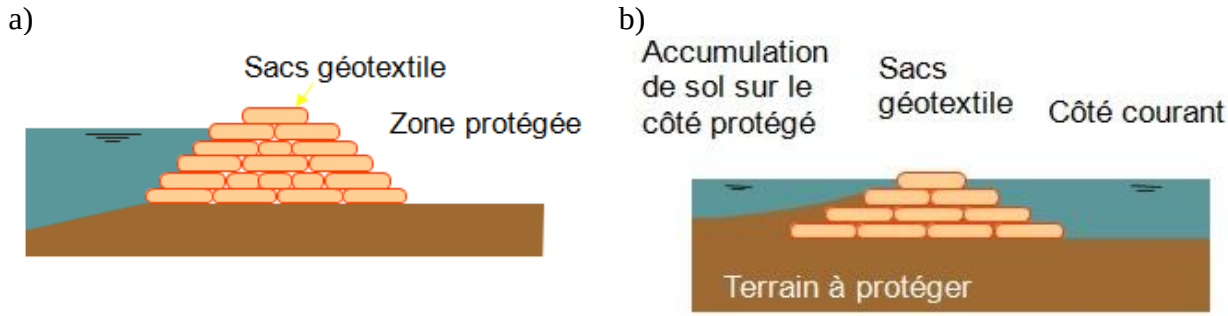


Figure 3 : Exemples d'ouvrage annexes construits en sacs de géotextile et permettant une diminution des sollicitations – construction en a) digue et b) épis (Source : Tencate)

Description :

Performance à atteindre :

On demande essentiellement aux sacs et tubes géotextiles une grande stabilité, obtenue par :

- l'importance du poids de sol qu'ils contiennent ;
- leur faible macro-rugosité de surface qui réduit les forces hydrauliques déstabilisatrices (attention cependant les vitesses d'écoulement peuvent s'en trouver augmentées) ;
- leur forme oblongue ou très allongée qui conduit à un contact au sol important par frottement et uniformément réparti sur toute leur longueur ;
- une flexibilité relative autorisant de petits déplacements ;
- une résistance aux agressions mécaniques ou climatiques, assurée notamment par l'enveloppe géotextile et, le cas échéant, par un matériau de couverture.

Utilisation :

Les tubes et sacs géotextile peuvent convenir dans toutes les situations :

- milieu marin ou milieu fluvial ;
- ouvrages hydrauliques neufs ;
- confortement ou renforcement d'ouvrages existants ;
- ouvrage immergé ou hors d'eau.

Ce type de protection peut également être utilisé dans les situations d'urgence comme mentionné plus haut (ces situations ne sont pas abordées dans cette fiche).

Variantes :

Certains milieux particulièrement agressifs, nécessitent d'adapter ou protéger les géosynthétiques par l'ajout d'une enveloppe supplémentaire ou par l'enfouissement partiel des sacs.

De par son principe de mise en œuvre, il existe par ailleurs une infinité de variantes concernant les sols utilisés dans les sacs/tubes (sable, graviers, tout-venant, éventuellement galets…).

Alternatives

Les remblais techniques offrent une solution polyvalente à court terme permettant d'accomplir différentes fonctions (soutènement, protection contre l'érosion externe, rehausse, batardeaux).

En revanche, à plus long terme le maintien des performances est à évaluer en fonction de la compatibilité de l'enveloppe par rapport aux risques de dégradations mécaniques (impacts, frottements) ou climatiques (UV) auxquels sera soumis l'ouvrage. Pourront être envisagées l'ajout d'une protection externe (enduction, enrochements) ou d'autres techniques de confortement telles que :

- mur en gabions ;
- protection technique mixte ;
- perrés ;
- rideau de palplanches.

Dimensionnement :

Principe :

Ce sont des éléments poids qui doivent à la fois être stables vis-à-vis des forces hydrodynamiques et protéger la surface couverte en talus ou en pied contre l'érosion externe.

Pour cela, il est nécessaire de vérifier la stabilité globale de l'ouvrage et de dimensionner l'enveloppe géotextile, aussi bien vis-à-vis des contraintes exercées par le sol contenu que par celles exercées par le milieu extérieur.

La stabilité globale sera ainsi vérifiée de la même façon que pour tout ouvrage poids : avec une partie répondant à la portance de la fondation et une autre à la stabilité intrinsèque de l'ouvrage.

Le type d'enveloppe géosynthétique utilisé (sac, tube ou conteneur) sera étudié au regard de ses dimensions : taille, volume, hauteur, agencement, caractéristiques de l'enveloppe géotextile et de l'assemblage (couture). Ce dimensionnement dépendra du besoin recherché : apport d'une surcharge, réalisation d'un ouvrage avec des cotes précises, résistance spécifique…

Paramètres nécessaires :

- Ressource locale en matériaux de remplissage (disponibilité, qualité, éloignement) ;
- Ressource locale en eau pour le remplissage des tubes géotextile par pompage de la mixture sol/eau.

Éléments de conception :

En complément des éléments de conception généraux présentés dans l'introduction générale, la réalisation des remblais en géoconteneurs nécessite :

- un tapis géotextile anti-affouillement, positionné sur le sol support pour éviter son érosion par les turbulences générées à l'amont de la structure. Ce tapis est en général constitué d'un géotextile lesté posé à plat sur le sol à partir du pied de la structure sur une longueur à calculer en fonction des vitesses d'écoulement, de la forme et de la hauteur de la structure ;
- un éventuel dispositif de protection externe permettant d'assurer une durabilité au matériau formant le conteneur ;
- des conditions d'entretien et/ou de maintenance ;
- une couleur spécifique pour l'enveloppe des sacs/tubes s'ils sont visibles (il existe exemple des tons « sable »).

Modèles :

Il existe de nombreux modèles de calcul des sacs/tubes géotextiles. Certains sont présentés en détail dans les références citées en fin de fiche, mais la plupart des producteurs/fabricants proposent leur propre modèle de dimensionnement.

- **Calcul de la stabilité des sacs géotextiles :**

La vérification de la stabilité des sacs géotextiles en talus est assez proche de celle d'un enrochement. Ces structures ont un comportement comparable à celui des enrochements de forme plutôt compacte et peu rugueux, tout au moins pour des sacs suffisamment remplis et soumis à des sollicitations hydrauliques d'amplitude suffisamment faible pour ne pas entamer la compacité du sol dans les sacs (houle inférieure à 1 mètre).

Pour évaluer la stabilité des talus de digues en blocs d'enrochements naturels ou artificiels, il existe de nombreuses formules empiriques fondées sur l'analyse dimensionnelle. La plus utilisée d'entre elles est la formule de Hudson (Équation 1) :

$$M = \frac{\rho_s H^3}{K_d \left(\frac{\rho_s}{\rho_e} - 1 \right)^3 \operatorname{cotg} \alpha} \qquad \text{(Équation 1)}$$

Avec :

- M, la masse minimale des enrochements de la carapace. Ici ce sera donc la masse minimale d'un sac de sable ;
- H, la hauteur crête à creux de la houle incidente ;
- ρ_s, la masse volumique du matériau des blocs. Ici cela correspondra au sol de remplissage du sac ;
- $\rho_e \approx 1025$ kg/m^3, la masse volumique de l'eau en milieu maritime – cette valeur peut être adaptée suivant le milieu où est mis en place l'ouvrage ;
- α, angle entre l'horizontale et le talus ;
- cotg α, inverse de la pente du talus (horizontale / verticale) ;
- K_d, un coefficient adimensionnel issu de l'expérience.

Dans le cas d'un empilement horizontal de sacs avec un recouvrement de 50% entre deux couches successives, on a $K_d = 1$ pour des supports perméables et $K_d = 4$ pour des supports imperméables (Voir « Rock Manual » cité en référence).

- **Calcul de la stabilité des tubes géotextiles :**

Le dimensionnement des tubes géotextiles comme élément de structure est essentiellement empirique et basé sur des essais en canal ou sur des retours d'expérience d'ouvrages qui montrent leur très grande stabilité aux sollicitations hydrauliques (CUR, 2004).

- **Calcul des caractéristiques de l'enveloppe des tubes et sacs géotextiles :**

L'enveloppe géotextile confine le sol injecté et évacue l'eau.

L'enveloppe doit donc :

- retenir les particules du matériau de remplissage ;
- conserver une perméabilité de paroi pour l'essorage de l'eau (cas notamment des tubes remplis par pompage d'une mixture sol/eau) ;
- résister en traction au gonflement lors du remplissage ;
- limiter sa déformation pour monter le remblai en hauteur et limiter le volume de remplissage ;
- résister au poinçonnement d'éléments agressifs en cours de remplissage (pierres, débris grossiers, coquillages), ou post-remplissage (sol support, couverture en enrochements). Le dimensionnement au poinçonnement sera à nouveau évoqué plus loin dans la fiche ;
- résister à la dégradation liée aux rayons UV (durée, intensité et température d'exposition).

Les caractéristiques qui traduisent ces critères sont :

- l'ouverture de filtration « O_{90} » (selon NF EN ISO 12956 - 2011) : taille de la plus grosse particule pouvant traverser le géotextile. Principe : l'ouverture de filtration sera inférieure au sable à retenir. Il est également possible de choisir le sable afin qu'il soit compatible avec les caractéristiques de l'enveloppe. L'ouverture de filtration sera aussi suffisamment grande pour laisser facilement passer l'eau et les fines en suspension (en général supérieure à 300 µm) ;
- l'indice de vitesse « V_{H50} » (selon NF EN ISO 11058) : vitesse d'écoulement créant une perte de charge de 50 mm à la traversée du géotextile. Principe : Plus la vitesse de traversée de l'eau sera élevée, plus rapide sera l'évacuation de l'eau pompée. Cette caractéristique est utile dans le cas de tubes (remplis par pompage) et de sacs remplis avec un matériau très humide. Exprimée en m/s ;
- la résistance à la traction « T_{max} » (selon NF EN ISO 10319 - 2008). À réaliser en sens

production et en sens travers. Principe : l'enveloppe doit résister à la tension lors du remplissage. Exprimée en kN/m.

Dans le cas des sacs, un calcul vérifiera la résistance de l'enveloppe et des coutures par rapport au poids des matériaux contenus, en prenant en compte la méthode de remplissage et de manutention. Des essais préalables sont utiles.

Dans le cas des tubes géotextiles remplis par voie hydraulique, la résistance à la traction minimale de l'enveloppe géotextile dépend des hauteurs et sections finales du tube. Le calcul utilise comme données d'entrée notamment :

- la circonférence du tube ;
- la masse volumique du matériau de remplissage ;
- la position hors d'eau ou dans l'eau.

Ce dimensionnement est réalisé à partir de modèles et de logiciels disponibles sur le marché. À titre d'exemple, une résistance en sens production et en sens travers de l'ordre de 200 kN/m permet de couvrir la plupart des applications.

- l'allongement à l'effort de traction maximal « ε_{max} » (selon NF EN ISO 10319 - 2008). À réaliser en sens production et en sens travers. Exprimé en %. Un dimensionnement basé sur la hauteur devrait privilégier des allongements en sens production et en sens travers inférieurs à 20%.
- la résistance au poinçonnement CBR « P_{CBR} » (selon NF EN ISO 12236). Principe : effort maximal d'un poinçon cylindrique. Exprimée en kN.

  Cette résistance au poinçonnement est notamment nécessaire en cas de contact avec des pierres ou des enrochements de couverture. L'enveloppe devra être dans ce cas dimensionnée en prenant en compte le type d'enrochement et la méthode d'installation en considérant un support sableux très dense (voir dimensionnement du géotextile de filtration fiche FT 4.1). Il peut être nécessaire d'interposer un géotextile supplémentaire de protection entre l'enveloppe du conteneur et l'enrochement.
- la résistance aux UV : lorsque les éléments conteneurs sont exposés aux UV, l'enveloppe géotextile devra être compatible avec la durée, l'intensité et la température d'exposition.

- **Caractéristiques minimales du filtre géotextile (sous la structure et tapis amont anti-affouillement).**

Afin d'assurer la stabilité du sac ou du tube, il est généralement nécessaire de mettre en place un filtre géotextile aux interfaces avec le sol naturel, ce filtre est dimensionné en tant que tel et est présenté dans la fiche technique FT 4.1.
En pied, ce filtre jouera le rôle de tapis anti-affouillement et sera dimensionné en fonction des sollicitations hydrauliques (par exemple la houle ou le batillage). Il est généralement fixé d'un côté sous l'élément conteneur et lesté de l'autre côté par un petit tube géotextile attenant rempli de sable.

Aspects pratiques (CCTP, chantier,) :

Cahier des charges :

La fourniture est spécifiée dans le CCTP en listant les caractéristiques attendues :

- enveloppe géotextile des sacs et tubes :
  - résistance à la traction SP et ST* (NF EN ISO 10319) : $T_{max} \geq$ …… kN/m ;
  - allongement à l'effort maximal SP et ST* (NF EN ISO 10319) : $\varepsilon_{max} \leq$ …. % ;

SP et ST* : en sens production et en sens travers

- résistance à la traction des coutures transversales (NF EN ISO 10321) : $T_{max\ Cout} \geq$ ……. kN/m ;
- résistance au poinçonnement CBR (selon NF EN ISO 12236) : $P_{CBR} \geq$ ……. kN ;
- ouverture de filtration (NF EN ISO 12956): 300.µm ≤ O_{90} ≤ … µm ;
- indice de vitesse (NF EN ISO 11058) : $V_{H50} \geq$ ……..m/s ;
- résistance aux UV (résistance résiduelle après une exposition de 1400 MJ (NF EN 12224/NF EN 12226) : $T_{Rés\ UV} \geq$ …… kN/m ;

- expérience de l'entreprise qui devrait justifier d'au-moins 5 à 10 projets dans les 5 dernières années en travaux similaires, selon le délai de réalisation maximal du projet et le niveau de risque de l'ouvrage ;
- détail des contraintes : gestion du stock approvisionné, pose des matériaux, respect de l'environnement…
- liste des servitudes applicables sur le site : contraintes de circulation, gestion des déchets, planning / période d'intervention…
- dossier de plan (localisation du site, des profils, des zones de stockage, des pistes d'accès…) et profils en travers types ;
- plan de contrôle attendu : hauteur ou volume atteint, nature des essais (sur les différents composants de l'ouvrage à savoir conteneurs, matériaux de remplissage…), fréquence des contrôles, liste des points d'arrêts et points critiques.

<u>Chantier :</u>

Lors du chantier il est nécessaire de porter une attention particulière à plusieurs aspects qui imposent dans chaque situation de définir précisément les contraintes pour dimensionner le matériau en fonction du contexte dans lequel il sera mis en œuvre et des sollicitations attendues :

- les conditions d'emploi qui peuvent limiter l'usage de ces matériaux peuvent être liées : à la ressource locale en sable, en eau dans le cas des tubes pour le pompage, aux conditions de mise en œuvre, aux contraintes mécaniques extérieures (chocs de flottants, projection de pierre en milieu marin…) et aux conditions environnementales (exposition permanente aux UV) ;
- le pied et le talus de la digue doivent être décapés et reprofilés afin d'obtenir une surface de pose plane. Une attention particulière sera portée au retrait de pierres, racines, etc. pouvant venir détériorer le sac/tube ;
- dans le cas des tubes géotextiles, ces exigences seront complétées par une surface de pose quasi-horizontale en sens travers pour éviter le roulage du tube lors du remplissage ;
- la stabilité sur le talus devra être vérifiée. Les éléments de conteneurisation seront butés en pied, les éléments inférieurs pouvant être calés dans une bêche. Une zone de transition horizontale de quelques mètres à partir du pied de talus sera également protégée des turbulences par un filtre anti-affouillement lesté ;
- lorsque les sacs/tubes interviennent dans une stabilisation de pied de digue sous eau, ils sont complétés par un dispositif anti-affouillement au-devant de la structure pour éviter l'érosion de pied due aux turbulences ;
- un filtre géotextile est nécessaire en sous face pour stabiliser le sol contre l'érosion interne et externe ;
- lorsqu'il est recherché une fonction de protection externe, un géotextile spécifique ou des compléments structurels permettant de protéger le sac/tube doivent être proposés.

Matériaux et matériels nécessaires :

- matériaux et/ou techniques associés : sable, géotextile de filtration, tapis anti-affouillement géotextile, terre végétale, matériau de remblai, drainage, béton …
- matériel spécifique au remplissage trémie (sac), pompe ou drague (tube), éventuellement cuve de mélange sable/eau si dragage impossible. La capacité de pompage pour le tube géotextile devrait se situer entre 400 and 800 m^3 de mélange sable-eau par heure ;
- matériel de pose classique : pelles, camions, chargeurs ;
- matériel spécifique pour chantiers en eau : barge, barge à fond fendable, moyens de treuillage, bande transporteuse ;
- besoins spécifiques pour appareillage : main d'œuvre qualifiée (prévoir une assistance par plongeurs pour une mise en œuvre sous l'eau).

Nuisance/ environnement :

Les points de vigilance en termes d'environnement portent sur : le bruit, la poussière liée à la circulation de chantier, la pollution particulaire par les fines (dans l'eau), l'impact des zones d'emprunt en sable, la pollution accidentelle, la gestion des déchets de chantier, la protection de la faune et de la flore.

Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance) :

- agrément de la carrière et du processus de production dans le cas de matériaux naturels (cas du sable importé) ;
- agrément du produit sur la base d'une fiche technique produit (FTP) ;
- validation du PAQ et des procédures liées à la mise en œuvre ;
- contrôle d'approvisionnement (vérification du marquage CE sur les bordereaux de livraison) ;
- contrôle des fournitures (facultatif) sur la base des spécifications demandées au marché ;
- contrôle de la constitution du stock et de la reprise des matériaux (éviter la ségrégation) ;
- contrôle d'exécution de la mise en œuvre ;
- les recommandations générales applicables aux géotextiles de filtration s'appliquent aux enveloppes géotextiles des sacs/tubes :
    - le géotextile doit être entreposé dans un endroit propre et plan, et protégé des UV ;
    - dans le cas d'ouvrages suffisamment importants, la méthode et le plan de pose doivent être connus avec précision à l'avance ;
    - le géotextile ne doit pas être perforé ou déchiré ;
    - En cas de mise en œuvre en partie sous le niveau d'eau en pied de talus, un système de repérage doit assurer la largeur de recouvrement minimale prescrite.
- un contrôle par plongeurs peut s'avérer utile.

Vitesse d'avancement :

La vitesse d'installation dépend du contexte local, du matériel et de la main d'œuvre spécialisée affectés par l'entreprise au projet.

Traitement de points singuliers (extrémités, ouvrages inclus notamment) :

Pour une meilleure stabilité, les sacs géotextile doivent être placés horizontalement avec un recouvrement de 50% du niveau inférieur. L'ensemble est stable sur une fondation plane et horizontale en pied de talus.
Un positionnement parallèlement au talus est possible lorsque les contraintes hydrauliques extérieures sont faibles (absence de houle par exemple). Il faudra dans ce cas vérifier la stabilité au glissement des sacs sur la pente.

Les tubes géotextiles seront remplis sur une surface plane et horizontale recouverte d'un géotextile de filtration. Les eaux de ressuyage seront évacuées par des fossés périphériques conçus pour ne pas éroder la plateforme.
La liaison entre deux tubes géotextiles successifs est réalisée par un recouvrement en biseau des extrémités des deux tubes consécutifs sur quelques mètres.
Si les tubes géotextiles sont empilés, le vide inter-tube sera rempli partiellement de sable pour créer une petite cuvette empêchant le tube supérieur de rouler. Une attention particulière sera portée à l'évacuation des eaux.

La jonction de deux lés de géotextile de filtration se fera par recouvrement de 0,30 m à 1 m selon la régularité et la déformabilité du support.

Références

- CUR (Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving) (2004). - publicatie n°214, "Geotextiele zandelementen", 138 p. Gouda (NL)
- CUR-publicatie n°217 (2006). Ontwerpen met geotextiele zandelementen. 117 p. Gouda (NL)- Disponible en anglais aux CRC press, ISBN 978-0-415-62148-9.
- CIRIA, CUR, CETMEF (2009). Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques. Version française du « Rock Manual ». P09-01, Edition Cetmef Compiègne. 1302 pages.

Annexes

Figure 4 : Épi en tube géotextile – Communauté de Communes de Costa Verde (2B)
(crédit photo : TenCate Geosynthetics)

Figure 5 : Sacs disposés en protection d'une berge : Kapp Amsterdam – Svalbard – Spitzbergen (Norvège)
(crédit photo : TenCate Geosynthetics)

Figure 6 : Sacs disposés en protection d'une berge – Canal de la rivière Taguibo – Philippines (crédit photo : TenCate Geosynthetics)

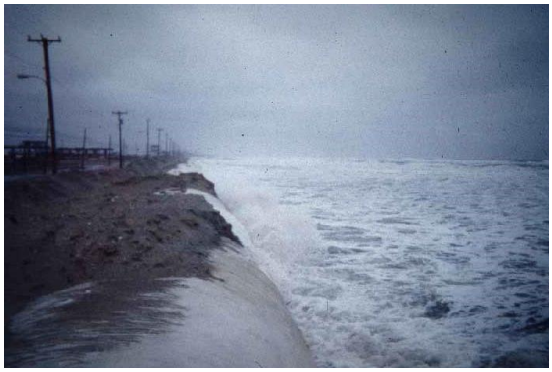


Figure 7 : Tubes disposés en protection de talus – Péninsule de Bolivar, Texas, États-Unis (crédit photo : TenCate Geosynthetics)

Figure 8 : Stabilisation d'un pied de digue immergé – Kampen canal – Pays-Bas (crédit photo : TenCate Geosynthetics)

Figure 9 : Réalisation d'un noyau de digue de protection – Port Médoc – Soulac (33)
(crédit photo : TenCate Geosynthetics)

Figure 10 : Stabilisation d'un pied de digue de canal (sur la gauche de la photo, contre canal sur la droite digue) – « Dubbele Wiericke» : Canal de décharge vieux Rhin sur la rivière IJssel-Nieuwerbrug – Pays-Bas
(crédit photo : TenCate Geosynthetics)

Figure 11 : Protection de digue côtière par tube géotextile – Plage de l'Amelie (33)
(crédit photo : TenCate Geosynthetics)

Figure 12 : Déstabilisation du talus côté val le 03/01/2018 sur la levée de Tours à Fondettes (37) (crédit photo : DREAL Centre)

Figure 13 : Travaux d'urgence de stabilisation de la digue réalisés le 05/01/2018 sur la levée de Tours à Fondettes (37)

(crédit photo : DREAL Centre)

	Fiche Technique **Remblai renforcé** Reinforced soil	**Fiche FT 5.2**

Auteurs principaux : C. PELISSARD (Maccaferri) ; A. PLASTRE (Maccaferri)
Contributeurs : JC. PALACIOS (Safege) ; M. SUTTER ; D. POULAIN ; R. TOURMENT (INRAE)
Relecteurs : M. SUTTER (INRAE)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais :
A reinforced backfill is a backfill structure in which is added during construction, a structural component to improve the mechanical strength, especially for steep slope slopes.
The reinforcements (or reinforcing elements) may be metallic or synthetic, in the form of sheets or strips.

The basic principle of this technology is to increase the shear strength of the backfill by adding a component resulting from the friction between the backfill material and the reinforcement. This allows the backfill to behave like a block capable of withstanding very large loads and allows to mount backfills higher and/or steeper, than with a conventional backfill soil or with lower quality materials.

Étude(s) de cas correspondante(s) :
C4.1.2 Bassin de stockage d'eau potable-Digue en remblai renforcé-Pont Aven-29

Introduction :

Définitions :

La notion de remblai renforcé renvoie à des ouvrages en remblai au sein desquels on ajoute lors de la construction un composant structurel permettant d'améliorer la tenue mécanique, notamment pour de fortes pentes de talus (Figure 1). Il est courant qu'un parement soit également ajouté sur les talus, aussi bien pour des fonctions structurelles qu'esthétiques.
Les renforts (ou éléments de renforcement) peuvent être métalliques ou synthétiques et se présenter sous forme de nappes continues ou de bandes.

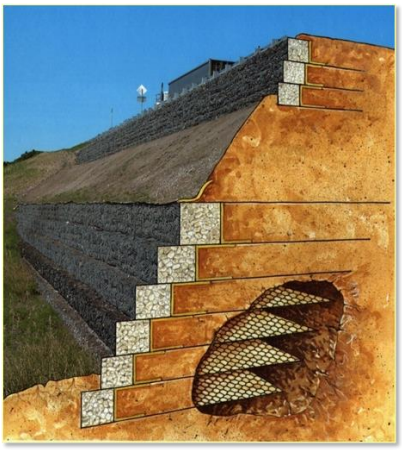


Figure 1 : Schéma de principe d'un remblai renforcé (Source : Maccaferri)

En fonction de l'application et de l'esthétique souhaitée, différents types de parement peuvent être prévus : talus naturel, structure minérale, structure béton, végétalisable ou non (Figures 2, 3 et 4)

Le principe de base de cette technologie est d'augmenter la résistance au cisaillement du remblai par l'ajout d'une composante résultant des frottements entre le matériau de remblai et le renfort. Cela permet au remblai de se comporter comme un bloc capable de reprendre de très importantes sollicitations et ainsi de monter des remblais plus hauts et/ou plus raides, qu'avec un sol remblai classique ou des matériaux de moindre qualité.

Figure 2 : Remblai renforcé à parement minéral, Digues de Kayes, fleuve Sénégal (Mali) (crédit photo : Maccaferri)

Figure 3 : Remblai renforcé à parement béton, Le Puy en Velay (43) (crédit photo : Maccaferri)

Figure 4 : Remblai renforcé à parement végétalisable, Bordeaux (33) (crédit photo : Maccaferri)

Sujet de la fiche :

Cette fiche traite de l'usage de ce type de structure pour la réalisation de recharges d'ouvrage. La conception reste néanmoins similaire à ce qui pourrait être fait pour des ouvrages neufs.

Fonctions principales :

Les ouvrages en remblai renforcé ont pour principale fonction l'amélioration des caractéristiques mécaniques du sol. De telles améliorations sont généralement requises dans des composants d'ouvrages à fonction de soutènement.
La plupart des ouvrages en remblai renforcés présentent un parement ayant une fonction de protection du talus contre l'érosion externe.

Fonctions secondaires :

Parfois les parements peuvent également améliorer la fonction de soutènement en favorisant le confinement du sol ou bien jouer des rôles de filtration, de drainage voire même d'étanchéité (notamment grâce à la présence récurrente de géocomposite pour ce type de structures).

Description du confortement:

Performances recherchées :

Afin de répondre à leurs fonctions, les ouvrages en remblai renforcé et leurs composants doivent atteindre certaines caractéristiques mécaniques et de durabilité.

Pour des fonctions de soutènement il sera avant tout recherché une résistance des renforts et une interaction sol/renfort à même de résister aux sollicitations : poussée des terres et de l'eau.

Pour la fonction de protection externe il sera cherché une résistance à des sollicitations liées aux écoulements externes telles que des efforts de traction, de l'abrasion provenant de l'action de vagues ou de chocs de flottants.

Pour les fonctions secondaires de drainage, filtration ou étanchéité, les performances recherchées sont très variables suivant les cas.

La Figure 5 montre une coupe de remblai renforcé.

Utilisation :

Les remblais renforcés sont utilisés, avant tout dans des objectifs de soutènement de talus raides ou de grande hauteur. On les retrouve ainsi dans tout type d'ouvrage en remblai : aménagements routiers, culées de pont et bien entendu les ouvrages en milieu fluvial ou maritime comme les digues de protection contre les inondations.

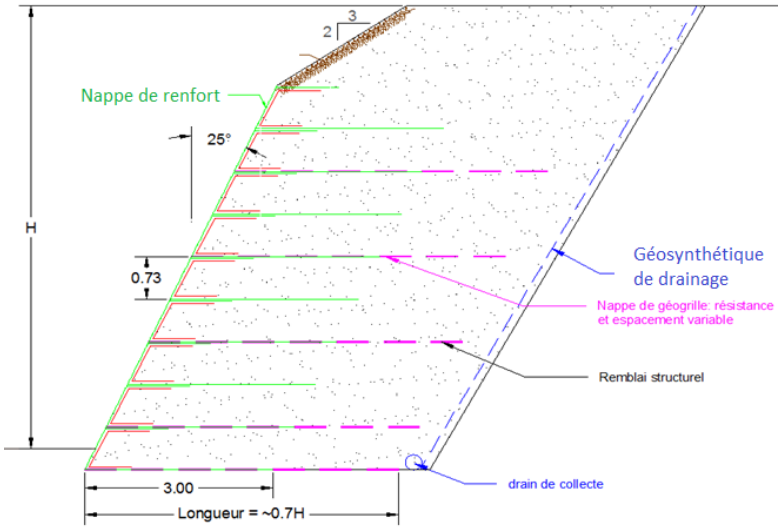


*Figure 5 : Coupe type de remblai renforcé à parement végétalisable (*Source : Maccaferri*)*

Ce type de structure est principalement utilisé en ouvrage neuf. Dans le cadre de confortements d'ouvrages, elle est mise en œuvre en recharge, notamment avec un objectif d'amélioration de la stabilité du talus.

Du fait de sa conception souple (de type remblai), il peut être utilisé en zone sismique.

Variantes :

Les remblais renforcés permettent une multitude de variantes sur les différents matériaux utilisés que ce soit en renfort ou en parement.

Concernant les renforts on pourra ainsi utiliser des éléments métalliques (grilles, lames…) ou synthétiques (géotextiles, géogrilles…)

Pour ce qui est du parement, il pourra être absent, préfabriqué en béton (armé), en matériaux granulaires (gabions), végétalisé…

Dans des conditions particulières ou les matériaux d'apports sont difficiles à acheminer ou couteux, il peut être étudié l'utilisation de matériaux de qualité moindre que celles requises pour un remblai renforcé classique. Ces caractéristiques étant compensées par l'ajout de composants. Par exemple : ajout de systèmes en mesure de dissiper les pressions interstitielles si le parement est trop étanche, d'un filtre si une filtration naturelle n'est pas possible entre les matériaux du remblai et ceux du parement ou de parements capables d'admettre de fortes déformations si le remblai se trouve sur un site à risques de forts déplacements....

Alternatives

Pour le raidissement de talus, les alternatives à des ouvrages en remblais renforcés sont des ouvrages de soutènement rigides : mur béton, mur gabion, mur maçonné, palplanches… (voir les fiches FT 5.3 ; FT 5.4 ; FT 5.5)

Il est aussi envisageable de constituer des remblais en sol traités. Cette alternative fait actuellement l'objet de nombreux travaux de recherche et développement pour son application dans le cadre des digues.

Dimensionnement :

Principes :

Le dimensionnement des remblais renforcés comprend différents aspects puisque chaque composant nécessite un dimensionnement propre, associé à un dimensionnement global de l'ouvrage. Il est recherché une stabilité générale de l'ouvrage aux glissements ainsi qu'une stabilité interne de celui-ci reposant sur la reprise d'efforts par les renforts. Ces renforts doivent dès lors résister à des contraintes de traction. Pour ce qui est du parement (si existant) le point sensible est la connexion avec le renfort, qui reprend l'essentiel des contraintes.

Le choix et le dimensionnement des trois composants du remblai renforcé (renforts, remblai et parement) sont réalisés selon les fonctions recherchées, les caractéristiques des matériaux et les milieux rencontrés. Il n'existe pas de conception unique et chaque cas nécessite un dimensionnement spécifique dépendant d'une multitude de paramètres (physiques, chimiques, de mise en œuvre…).

Paramètres d'entrée nécessaires :

Pour le sol du remblai à renforcer :

- éléments de granulométrie des sols ;
- caractéristiques de compactage (IPI, PROCTOR…) ;
- caractéristiques de résistance au cisaillement.

Pour le parement :

- contraintes d'érosion externe ;
- contraintes d'intégration au site ;
- contraintes liées aux éventuelles fonctions secondaires.

Plus généralement pour l'ensemble du projet :

- géométrie initiale du projet ;
- caractéristiques géomécaniques (angle de frottement, cohésion et poids volumique) des terrains en place et du remblai structurel ;
- contrainte admissible du sol de fondation déterminée à partir d'essais géotechniques en place de type pressiomètre ou pénétromètre ;
- sollicitations sismiques dans la zone du projet ;
- les surcharges en tête d'ouvrage ;
- les niveaux d'eau et leurs éventuelles variations ;
- sollicitations hydrauliques ;
- profondeur d'affouillement attendue en pied d'ouvrage.

Modèles :

Choix du remblai structurel :

Le remblai forme l'essentiel de l'ouvrage. On rappelle que la mise en œuvre du remblai suivra classiquement en France les recommandations GTR (ou toute autre publication les mettant à jour ou les complétant) qui permet notamment de définir quels sont les matériaux à mettre en œuvre, avec quels moyens et dans quelles conditions.

Le choix du remblai dépend de plusieurs critères (disponibilité des matériaux, caractéristiques mécaniques, adéquation avec les milieux environnant et les autres composants de l'ouvrage…). L'annexe A de la NF EN 14475 « Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Remblais » permet également de faciliter le choix du remblai structurel en détaillant notamment plusieurs exemples d'utilisation de différents remblais en fonction de l'application, le type de renfort et le type de parement.

De façon générale, on exclura les classes de sol :

- sensibles à l'eau ;
- présentant majoritairement des éléments inférieurs à 63µm ;
- composés d'éléments supérieurs à 250 mm ;
- évolutifs ou organiques.

L'agressivité électrochimique, chimique et biologique du sol (notamment le pH, la résistivité et les concentrations en ions SO_4^{2-} et Cl^-) doit être examinée pour s'assurer que ces propriétés n'ont pas d'effets dommageables sur la performance des autres composants de l'ouvrage : notamment les renforts ou le parement. Pour cela on se référera généralement aux normes portants sur les matériaux de ces composants ainsi qu'aux études et préconisations

fournies par les fabricants (voir ci-dessous).

Les critères de choix portent aussi sur les caractéristiques mécaniques des sols utilisés, nous verrons cet aspect par la suite dans le cadre de la vérification de stabilité de l'ouvrage.

Choix des renforts

Les renforts peuvent être formés de différents matériaux (acier ou polymères) avec différentes conceptions, chacun reposant sur des normes propres :

- **Renfort en acier :**

Les renforts en acier peuvent se présenter sous forme de bandes, de tiges, de treillis soudés ou de grillage. Les attentes concernant ces renforts sont définis dans l'annexe E de la NF EN 14475. Cette annexe définie par exemple que les bandes en aciers doivent être conforme à la norme EN 10025-2 (Produits laminés à chaud en aciers de construction - Partie 2 : conditions techniques de livraison pour les aciers de construction non alliés), les treillis conformes à la NF EN 10080 (Aciers pour l'armature en béton – aciers soudables pour béton armé - généralités) et les grillage conformes aux normes européennes EN 10218 (Fils et produits tréfilés en acier – généralités) et EN 10223 (Fils et produits tréfilés en acier pour clôtures et grillages).

Les bandes, tiges, armatures et treillis acier doivent être galvanisées conformément aux normes EN ISO 1461 et EN 10326. Une épaisseur sacrifiée, adaptée à la durée de service de l'ouvrage et à l'environnement dans lequel il est construit, doit également être considérée à l'épaisseur de base du renfort. Cela signifie que les remblais agressifs chimiquement sont incompatibles avec ce type de renforts (remblais traités à la chaux notamment).

Les fils des grillages à mailles hexagonales double torsion sont quant à eux revêtus d'un alliage zinc/aluminium conforme à la norme EN 10244-2 (Fils et produits tréfilés en acier – Revêtements métalliques non ferreux sur fils d'acier) apportant une résistance supplémentaire contre la corrosion que la galvanisation simple et protégés par une gaine polymère conforme à la norme EN 10245. Cette double protection contre la corrosion assure une durabilité de 120 ans même dans le cas d'utilisation de remblais traités ou fortement agressifs chimiquement. Le dimensionnement des renforts s'opère en appliquant des coefficients de réduction similaires à ceux des géosynthétiques (revêtement polymère) sur la résistance nominale conformément à la norme NF P 94-270.
L'annexe E de la norme de mise en œuvre des ouvrages en remblai renforcé NF 14475 fournit des exemples de renforcements courants en acier.

- **Renforcement Polymère :**

Les renforts en polymère peuvent se présenter sous forme de bandes, grilles ou nappes et ne sont pas forcément raccordés au parement (Figures 6, 7 et 8).

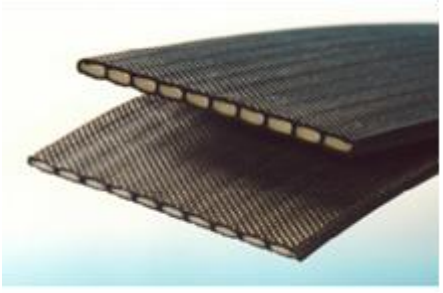


Figure 6 : Bande de renfort en polyester gainé de polyéthylène (crédit photo : Maccaferri)

Figure 7 : Géogrille de renfort en polyester gainé de polyéthylène (crédit photo : Maccaferri)

Figure 8 : Géotextile de renfort (crédit photo : Maccaferri)

Les renforts en polyéthylène et polypropylène sont très peu utilisés pour les digues car ils présentent un fluage très important.
Le polymère le plus couramment utilisé pour les digues est le polyester en raison de son faible coefficient de réduction au fluage. Le polyvinyle d'alcool (PVA), qui lui aussi présente un coefficient faible au fluage, est moins fréquemment utilisé à cause de son impact économique important.

Ces renforts doivent être fournis avec leur résistance de calcul adaptée à la durée de service de l'ouvrage et aux conditions de mise en œuvre.

Les renforcements en polymère sont caractérisés par leur comportement au fluage en traction, leurs courbes contrainte-déformation et l'interaction (frottement) remblai/renfort.
Leur résistance à l'endommagement mécanique et aux agressions chimiques dépend de la qualité et du type de polymère utilisé et de leur mode de fabrication. De façon générale, les renforcements en géotextiles tissés seront plus sensibles à l'endommagement mécanique que les géogrilles et la résistance à la dégradation chimique sera plus importante pour les géogrilles gainées que simplement enduites.

Le choix du type de renforcement se fera alors sur la base des données fournies par le producteur concernant les comportements du produit en fonction de la température, la durée de service, le pH et l'agressivité du remblai.

Les conditions d'utilisation des géosynthétiques en renforcement de remblai sont définies dans le guide n°9 du Comité Français des Géosynthétiques « Recommandations pour l'emploi des géotextiles dans le renforcement des ouvrages en terre ».

Choix d'un parement

Cet élément du confortement est indispensable pour les ouvrages à forte pente ou quasi verticaux.

- **Minéral :**

Le parement, constitué de matériaux granulaires roulés ou concassés, confinés par des cages métalliques, aussi appelés gabions (Figure 9), peut être vertical (jusqu'à des hauteurs limites d'environ 6m), sub-vertical, en gradins ou incliné. On doit s'assurer des critères de filtration entre le remblai et les gabions.

L'utilisation de pierres non sensibles à l'eau et de revêtement adapté aux structures de confinement (galvanisation et épaisseur des éléments métallique sacrifiée pour les treillis, et galvanisation revêtement polymère pour le grillage double torsion) permettent à ces parements d'avoir une bonne résistance aux écoulements.

Le choix de la structure acier doit être réalisé en fonction des déformations attendues dans l'ouvrage. Les structures souples en grillage double torsion admettront des déformations importantes sans compromettre la résistance de l'ouvrage. Les structures composées de treillis rigide nécessitent une mise en œuvre parfaite (pas de tassement de pierres au parement) et une absence de tassements du sol de fondation pour éviter des ruptures fragiles aux nœuds des treillis. La Figure 10 illustre une coupe type de remblai renforcé à parement minéral.

Figure 9 : Exemple de parement minéral (crédit photo : Maccaferri)

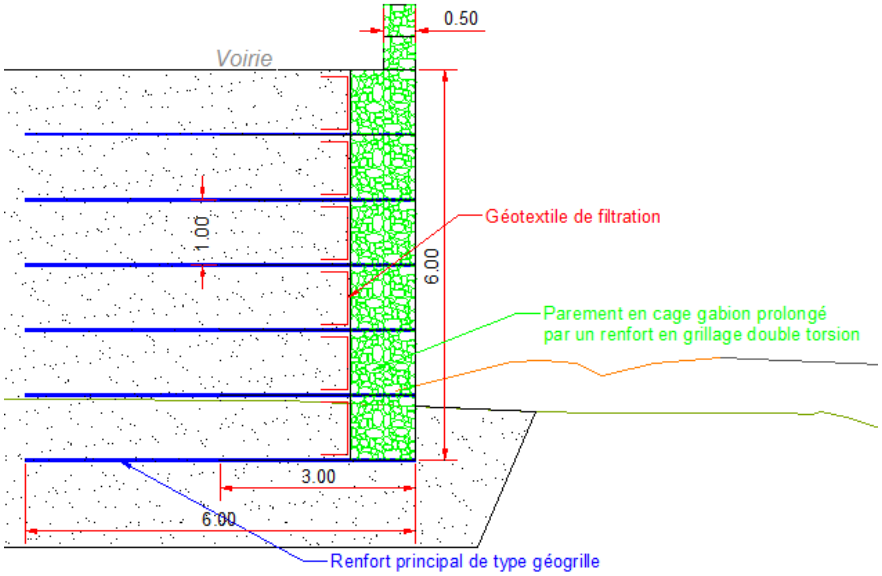


*Figure 10 : Coupe type remblai renforcé par nappes à parement minéral (*Source : Maccaferri)

- **Béton :**

Ces parements sont généralement verticaux et sont constitués de panneaux préfabriqués de béton de formes et matrices variables (Figure 11). Ces panneaux, de faibles épaisseurs (10 à 20 cm), sont en général non armés mais peuvent l'être par des barres d'acier.

La classe de résistance de béton généralement utilisé est le C35/45, le type de béton quant à lui dépend de l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage et de la technique propre à chaque fournisseur.
Ces parements sont résistants aux sollicitations hydrauliques externes et internes dans la mesure où le type de béton est adapté à ce milieu et que la conception prend en compte les écoulements susceptibles de se produire dans le corps de l'ouvrage.
À noter que le parement pose une difficulté du dimensionnement des ouvrages en remblai renforcés : l'avantage d'avoir un ouvrage flexible mais dont on doit limiter les tassements différentiels au niveau du parement. C'est pourquoi une attention particulière doit être apportée à la fondation pour limiter les tassements différentiels ou alors prévoir des systèmes de coulissement vertical des éléments de parement entre eux.

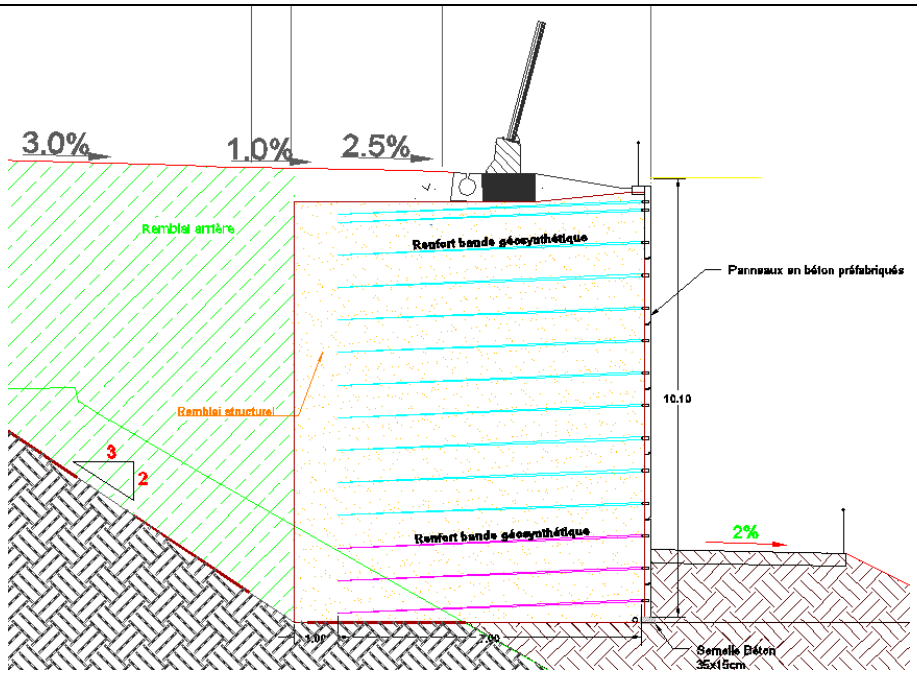


*Figure 11 : Coupe type remblai renforcé par bande à parement béton (*Source : Maccaferri*)*

- **Végétal :**

Les systèmes de remblais renforcés à parements végétalisables présentent des pentes variables ne dépassant généralement pas les 70° afin d'assurer une bonne prise de la végétation (Figure 5). Ils sont généralement composés d'un élément de coffrage en treillis soudé associé à un géotextile tissé permettant de contenir la terre végétale tout en laissant pousser la végétation à travers. (Figure 12). Suivant les techniques existantes, l'élément de renforcement (géogrille, grillage…) effectue un retour à l'avant ou à l'arrière du coffrage de façon à assurer l'auto stabilité de chaque rang de renforcement.

Ces techniques sont très économiques, rapides d'installation et permettent une bonne intégration de l'ouvrage dans l'environnement

*Figure 12 : Exemple de parement végétalisable (*Source : Maccaferri*)*

En milieu hydraulique ces structures n'offrent qu'une résistance restreinte, ne sont pas adaptées pour des vitesses d'écoulement supérieures à 4.0m/s et des durées de crues ne dépassant pas les 48h.

Interaction entre les composants

Les extrémités de renforts sont généralement reliées au parement à des intervalles réguliers déterminés par le dimensionnement de l'ouvrage, conformément à la norme NF P 94-270. Cette liaison doit être justifiée par le calcul. Les systèmes offrant une continuité parfaite entre le parement et le renforcement assurent une connexion parfaite et sécurisent l'ouvrage, aucune justification par le calcul n'est alors nécessaire.

Vérification de la stabilité

L'ensemble des calculs est mené conformément à la norme française AFNOR NF-P-94-270 de juillet 2009 « Calcul géotechnique – Ouvrages de soutènement Remblais renforcés et massifs en sol cloué ».

Celle-ci prévoit notamment l'application de facteurs partiels sur les actions, les matériaux et les résistances selon différentes combinaisons dépendant du type de stabilité vérifiée.

Les stabilités interne, externe, générale et la stabilité mixte doivent être vérifiées pour les ouvrages en sols renforcés.

Le calcul de stabilité externe comprend la vérification de la portance du sol de fondation et celle du glissement sur la base de l'ouvrage (Figure 13). Ces vérifications sont explicitées dans l'annexe D de la NF-P-94-270.

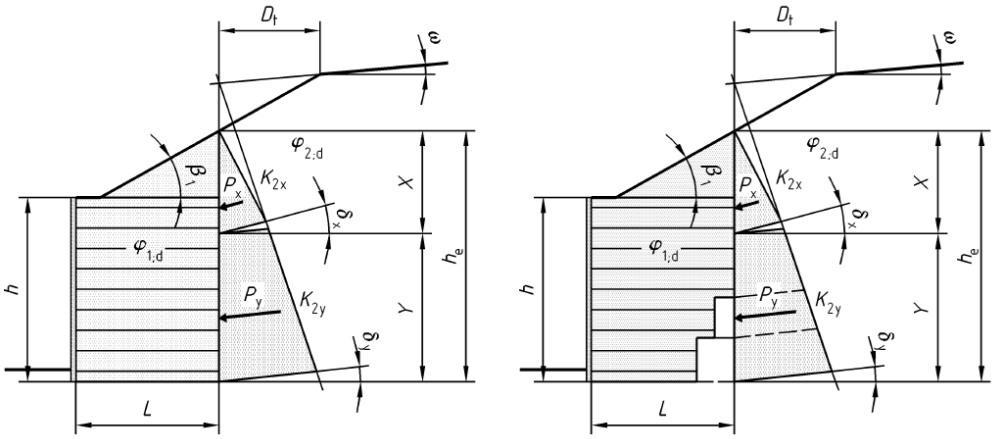


Figure 13 : Calcul de la poussée s'exerçant sur des écrans amont verticaux (Source : norme NF-P-94-270)

La vérification de stabilité interne est détaillée dans l'annexe E de la norme citée ci-dessus. Elle consiste à vérifier localement que chaque renfort est capable de reprendre la poussée locale (Figure 14). Il convient de déterminer pour chaque lit de renforcement la valeur de calcul de l'effort de traction sur la surface de glissement interne la plus défavorable ou sur la ligne des tractions maximales (méthode simplifiée).

Cet effort doit rester inférieur à la résistance de calcul de traction et à la résistance d'interaction du renfort. Elle consiste également à vérifier la résistance de la connexion entre le renfort et le parement.

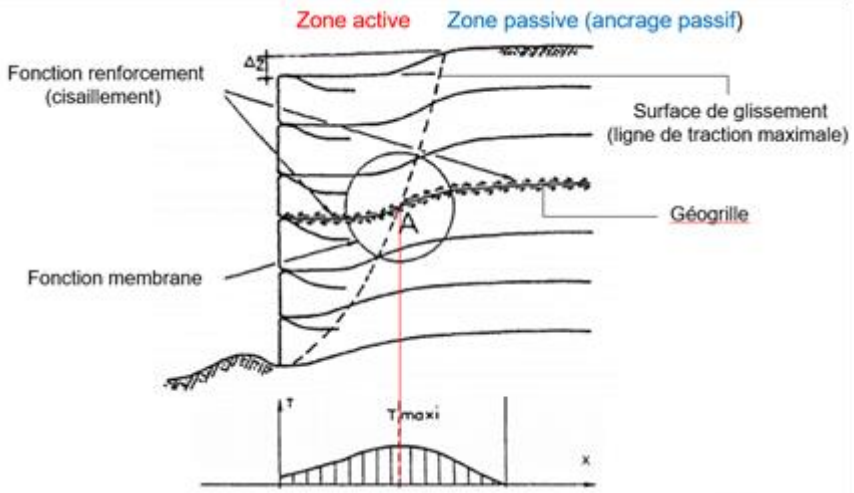


*Figure 14 : Principe de fonctionnement en stabilité interne des remblais renforcés (*Source :

Maccaferri*)*

Pour la stabilité générale, il convient d'étudier l'ensemble des surfaces de rupture potentielles pouvant se générer sur le massif renforcé (Figure 15). La vérification consiste à s'assurer que l'ensemble des actions provoquant le glissement du massif le long de cette surface soit équilibré par la résistance au cisaillement du sol présent le long de celle-ci. Les modèles de calcul généralement utilisés sont la méthode des tranches de Bishop ou la méthode des perturbations.

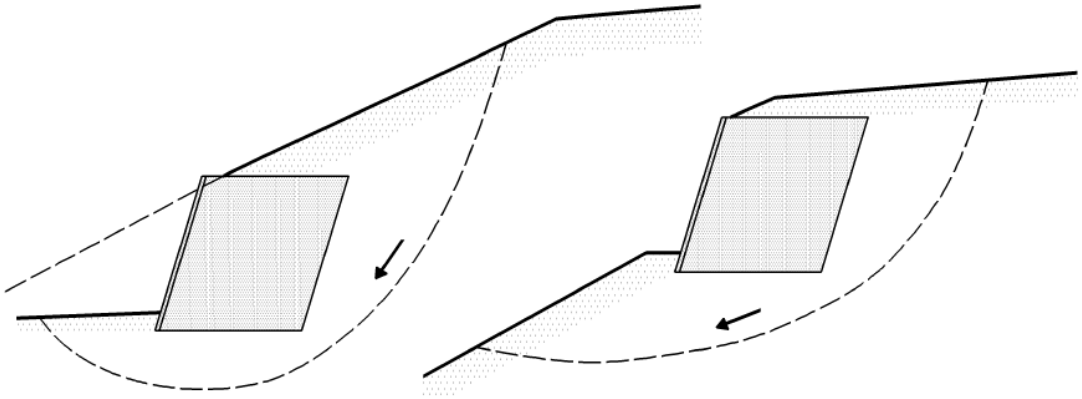


Figure 15 : Surfaces limites pour la stabilité générale des ouvrages en sol renforcé (Source : NF-P-94270)

La stabilité mixte consiste à vérifier qu'il n'y a pas de risque de rupture le long d'une surface de glissement partant à l'amont de l'ouvrage et débouchant au parement (Figure 16).

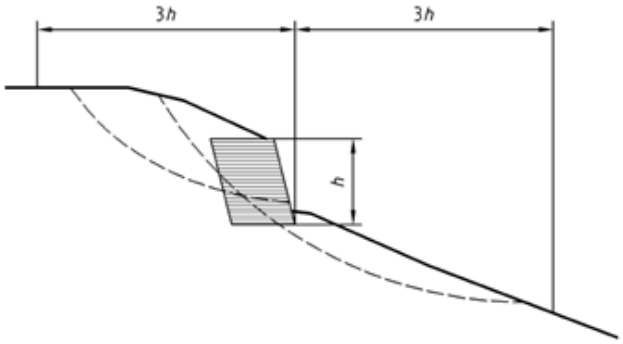


Figure 16 : Limites éventuelles de la vérification en stabilité mixte (Source : NF-P-94 270)

Aspects pratiques

Cahier des charges :

La fourniture est spécifiée dans le CCTP en listant les caractéristiques attendues comme présentées ci-dessus pour :

- les renforts ;
- le remblai ;
- le parement.

Dans la mesure où les fabricants de dispositifs de renforcement de remblais vérifient la stabilité intrinsèque de leur produit, il est courant qu'aucun calcul de stabilité générale de l'ouvrage en remblai renforcé ne soit effectué. C'est une erreur et il est indispensable qu'un tel calcul soit réalisé (par le fabricant ou un bureau d'étude).

Chantier :

Ce type de confortement est mis en œuvre à l'avancement du chantier. C'est-à-dire que les renforts sont mis en place lors de la montée du remblai. Un soin particulier doit être apporté afin de s'assurer que les renforts soient installés sans plis. Des piquets en bois ou des fers à béton pourront être utilisés pour maintenir les renforts à plat durant l'installation (Figures 17 et 18).

Exemple de mise en tension des bandes de renfort géosynthétiques (Crédit photo : Maccaferri)

Figure 18 : Exemple de mise en tension des géogrilles avant remblaiement (Crédit photo : Maccaferri)

Pour les renforts de type géogrille un recouvrement entre les adjacents de 15 à 20 cm devra être assuré.
Le parement est généralement mis en place à l'avancement. Notons que la pose des parements peut présenter certaines particularités en fonction de leur nature :

- la jonction entre le parement et le renfort peut se faire par pincement (si existence d'un autre système de connexion entre le parement et le remblai) ou disposés en effectuant un retour à l'arrière du parement, assurant ainsi la tenue du composant formant le parement.
- concernant le parement végétal, une fois la mise en œuvre de l'ouvrage terminée, le parement est hydro-ensemencé et un bouturage d'essences locales peut-être effectué.

Matériaux :

Idéalement, on pourra utiliser un remblai insensible à l'eau et présentant un angle de

frottement interne supérieur ou égal à 35°. Sa granulométrie alors comprise entre 0 et 250mm, comporte un passant à 80µm inférieur à 12%. Le coefficient d'uniformité du remblai C_u= D60/D10 doit être supérieur à 2.

Concernant le choix des matériaux utilisables en remblai renforcé, il convient également de se référer à l'annexe A de la norme de mise en œuvre NF-EN-14 475 dédiée à l'exécution des remblais renforcés. Celle-ci décrit le type de remblai utilisable en fonction du type d'ouvrage, du type de renfort et du type de parement (voir Tableau 1).

Annexe A

(informative)

Exemples d'utilisation de différents types de remblais, suivant les applications, les renforcements et les parements

Tableau A.1 — Combinaisons types de remblais, renforcements et parements

CLASSES DE MATÉRIAU DE REMBLAI			Classe 1	Classe 2		Classe 3		Classe 4
			Matériau drainant	Matériau granulaire		Matériau intermédiaire		Sol fin
	Caractéristiques géomécaniques	% pondéral inférieur à 80 µm	< 5 %	< 12 %	12 à 35 %	12 à 35 %	> 35 %	Autres
		% pondéral inférieur à 20 µm	n.a.	n.a.	< 10 %	> 10 %	< 40 %	
		Indice de plasticité IP	n.a.	n.a.	n.a.	< 25	< 25	
APPLICATIONS								
	Parties d'ouvrage exposées à des inondations et/ou à des décrues rapides		A	B	B	D	D	D
	Structures supportant des culées de pont, des voies ferrées ou des bâtiments		A	A	B	C (a)	D	D
	Murs en remblai renforcé de grande hauteur		A	A	B	B	D	D
	Talus renforcés de grande hauteur		A	A	B	B	C (b)	C (b)
	Murs et talus renforcés courants		A	A	A	B	C (c)	C (c)
RENFORCEMENT								
	Bandes ou barres rondes lisses (métalliques ou de polymère)		A	A		C (d)		D
	Bandes ou barres rondes à haute adhérence, armatures-échelles (métalliques ou de polymère)		A	A		B	C (d)	D
	Treillis, grillages, grilles, nappes (métalliques ou de polymère)		A	A		B	C (d)	D
	Géotextiles drainants (à perméabilité horizontale)		B	A		A		C (b)
SYSTÈME DE PAREMENT								
	Rigide		A	A		D (a)		D
	Semi-flexible		A	A		C (e)		D
	Flexible		A	A		A	B	C (e)

Légende : A : souvent utilisé
B : parfois utilisé
C : sujet à une étude particulière
D : non recommandé

Tableau 1 : Extrait du tableau A.1de l'annexe A de la norme NF-EN-14 475

La mise en oeuvre du remblai et le compactage doivent également satisfaire aux recommandations du GTR. Généralement, le remblai est mis en œuvre par passes de 25 à 35cm de hauteur. Il convient de le déverser au milieu des nappes de renforts puis de l'étaler vers l'arrière.

Pour le compactage, des rouleaux vibrants de type V2 ou V3 sont fréquemment utilisés (Figure 19). Dans la zone contigüe au parement, sur une bande de 1 à 2 m de largeur, il convient d'avoir recours à des engins plus légers développant une plus faible énergie de compactage afin d'éviter tout risque de déformation du parement.

Figure 19 : Compacteur V3 et utilisation d'un engin léger à proximité du parement (Crédit photo : Maccaferri)

Nuisances/Environnement :

L'impact de la réalisation d'un remblai renforcé est défini par l'impact lié aux travaux de terrassements généraux ainsi qu'aux apports de matériaux nobles nécessaires à sa réalisation.
Dans certains cas il est tout à fait possible de réutiliser les matériaux du site pour le montage de l'ouvrage en sol renforcé ce qui diminue grandement les transports de matériaux et réduit de façon significative l'empreinte carbone du chantier.

Contrôle d'exécution :

Le contrôle de la qualité du remblai doit être assuré périodiquement au fur et à mesure de l'élévation du massif. La valeur de la teneur en eau devra notamment être optimale par rapport à l'essai Proctor de référence. De même, à chaque niveau de compactage la portance sera vérifiée et devra être conforme aux exigences de la conception.

On s'assurera enfin que les matériaux mis en œuvre dans les règles de l'art ont des caractéristiques conformes aux hypothèses retenues dans les calculs de stabilité des ouvrages.

Vitesse d'avancement :

Les rendements de mise en œuvre des solutions remblais renforcés dépendent essentiellement de la typologie des ouvrages (parement minéral, végétalisable, béton…), des longueurs de renforts attendus et des contraintes de sites.
Les vitesses d'avancement peuvent alors variés entre 25m² et 100m² de parement par jour.

Traitement des points singuliers (extrémités, ouvrages inclus notamment, liaison entre composants et avec le remblai ancien) :

Dans le cas de formes géométriques complexes ou de raccordement à des ouvrages d'art existants, il convient généralement d'adapter les éléments de parement aux particularités du

site et de s'assurer de la continuité et du recouvrement entre les renforts (Figure 20).

Les extrémités des ouvrages doivent être protégées de l'érosion. Au niveau des interceptions avec les talus adjacents à l'ouvrage, il convient d'ancrer celui-ci dans les terrains en place et de prévoir un système de drainage adapté afin d'éloigner les eaux des extrémités.

Il peut arriver que des interférences soient à prévoir dans les ouvrages, qu'elles soient verticales ou horizontales.
Les interférences verticales sont des structures qui sont enterrées ou étendues verticalement à travers la structure en sol renforcé (traversées de réseaux, fondations d'ouvrage…). De telles applications peuvent nécessiter la mise en place de renforts additionnels ainsi qu'un renforcement du parement pour résister à l'augmentation des contraintes latérales (Figure 21).

Figure 20 : Exemples de raccordement à des ouvrages d'art (Crédit photo : Maccaferri)

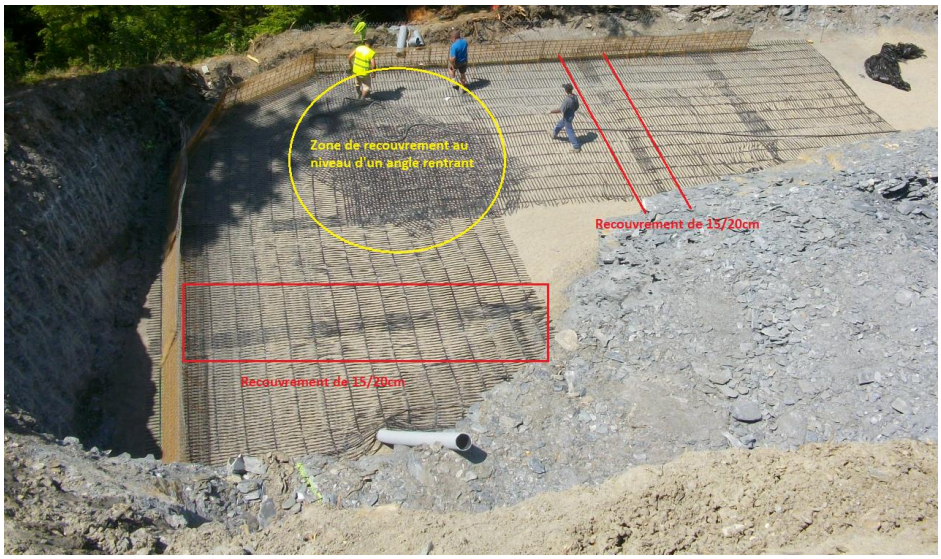


Figure 21 : Exemple de mise en œuvre dans le cas d'un angle rentrant (Crédit photo : Maccaferri)

Dans le cas des culées mixtes, il est fréquent que les piles soutenant le sommier passent au travers du sol renforcé. Les renforts doivent être découpés et adaptés autour de la pile ou de la réservation laissée en attente du coulage des piles. En aucun cas il ne sera possible de battre des pieux ou de forer à travers les renforts (Figure 22).

Figure 22 : Exemple de remblai renforcé en présence d'une pile à proximité du parement (Crédit photo : Maccaferri)

Les interférences horizontales sont des structures enterrées ou étendues horizontalement à travers le remblai renforcé sur une longueur substantielle le long du mur. Les exemples d'interférences horizontales sont généralement des drains de collecte de taille variable. Dans certains cas, les drains passent à travers le parement, ce dernier doit alors s'adapter à la structure de drainage (Figures 23 et 24).

Figure 23 : Exemple de drains de petite dimension au sein d'un remblai renforcé à parement végétalisable (Crédit photo : Maccaferri)

Figure 24 : Exemple de traversée hydraulique (Crédit photo : Maccaferri)

Références :

Normes et guide de dimensionnement :

- NF P 94-270-0 (2009). calcul géotechnique – Ouvrages de soutènement Remblais renforcés et massifs en sol cloué, AFNOR
- NF G 38-064 (2016). utilisation des géotextiles et produits apparentés - Murs inclinés et talus raidis en sols renforcés par nappes géosynthétiques - Justification du dimensionnement et éléments de conception
- SETRA (1979). Les ouvrages en terre armée - Recommandations et règles de l'art, SETRA
- SETRA (2006) Note du SETRA de décembre 2006
- (2000). Guide des terrassements routiers, SETRA-LCPC
- (1990). Recommandations pour l'emploi des géotextiles dans le renforcement des ouvrages en terre, CFG
- (2002). Petits barrages – Recommandations pour la conception et le suivi, CFBR

Normes industrielles portant sur les matériaux utilisés :

- NF EN 10080 (2005). Aciers pour l'armature du béton - Aciers soudables pour béton armé – Généralités
- NF EN 10223 (2014). Fils et produits tréfilés en acier pour clôtures et grillages
- NF EN 10218 (2012). Fils et produits tréfilés en acier - Généralités
- NF EN 10244 (2009). Fils et produits tréfilés en acier - Revêtements métalliques non ferreux sur fils d'acier
- NF EN 10245 (2011). Fils et produits tréfilés en acier - Revêtements organiques sur fils d'acier

Normes de mise en œuvre :

- NF EN 14475 (2007). Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Remblais

	Fiche Technique **Stabilité au glissement apportée par mur poids, mur cantilever ou paroi béton** Stability provided by weight wall, cantilever wall or concrete wall	**Fiche FT 5.3**

Auteurs principaux : C. VARAGNAT (SAFEGE) ;
Contributeurs : JC. PALACIOS (SAFEGE) ; M. SUTTER (INRAE) ; D. POULAIN (INRAE) ; R. TOURMENT (INRAE)
Relecteurs : C. CHARTON (Maia-Sonnier) ; M. SUTTER (INRAE)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais :
The retaining structures make it possible to retain the water at high heights and a reduced footprint. These works can be classified into several families according to their operation, their materials and their implementation.
Gravity walls and concrete walls, are among the most used techniques, both simple in their operation, adaptable to many situations and made of materials whose characteristics are relatively easy to know.
The implementation of a retaining structure has, above all, a goal of maintaining the land, making it possible to ensure the stability of steep dike embankments when the footprint is limited, for example when it is desired to increase the height of the embankment.
When the wall is installed on the protected area, it must take into account the drainage of the embankment if necessary.

Étude(s) de cas correspondante(s) :
T.4.2.1 Reconstruction définitive des digues de protection contre les inondations de Comps (30) suite à la crue du Rhône des 3 et 4 décembre 2003.

Indications

Cette fiche traite de trois types de conception d'ouvrages de soutènement, couramment utilisés pour confortement ou la construction des digues :

- les murs poids en béton ;
- les murs en béton armé, dénommés également murs cantilevers ;
- les parois en béton simplement encastrés.

Définitions :

En termes de soutènement, les murs poids, les murs en béton armé (mur cantilevers) et les parois béton sont parmi les techniques les plus utilisées car celles-ci sont à la fois simples dans leur fonctionnement, adaptables à de nombreuses situations et basées sur des matériaux dont les caractéristiques sont bien connues. Les définitions de ces trois types d'ouvrage de soutènement sont détaillées ci-dessous :

- murs poids (Figure 1) : technique de mur parmi les plus anciennes qui consiste en la réalisation d'un mur massif dont la stabilité est assurée par son poids propre. Cet ouvrage peut être réalisé avec différents matériaux (maçonnerie, béton, béton cyclopéen, gabions, éléments préfabriqués en béton empilés, etc.) ;

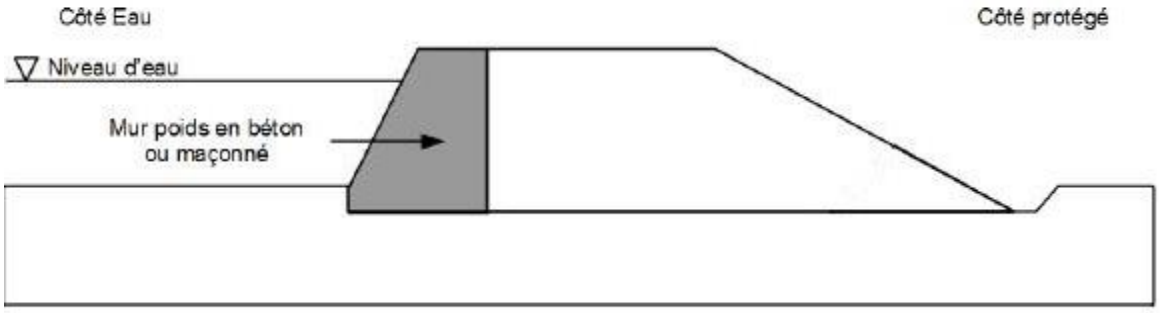


Figure 1: Schéma de principe d'un mur poids (Source : Cerema)

- murs béton armé ou murs cantilevers (Figure 2) : très couramment utilisés, ces murs sont constitués d'un voile en béton armé encastré dans une semelle. Ces murs ont une forme en T renversés ou en L et peuvent être coulés en place, partiellement (voile ou parement du voile) ou totalement préfabriqués ;

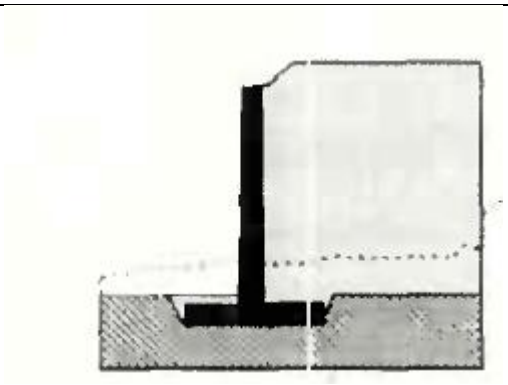


Figure 2 : Schéma de principe d'un mur cantilever (Source : guide technique du SETRA « Ouvrages de soutènement : guide de conception générale »)

- parois en béton simplement encastrés (Figure 3) : ces ouvrages béton sont soit coulés en place (parois moulées – cf. leur usage en fonction d'étanchéité seule fiche FT 3.3) soit préfabriqués. En phase définitive, les parois sont fichées dans le sol sur une hauteur permettant de créer un encastrement. Lorsque la hauteur soutenue est importante des tirants peuvent être ajoutés pour augmenter la stabilité et on parlera alors de parois ancrées ou butonnées (non traitées dans cette fiche). Les parois en béton sont réalisées en déblai : i) par la réalisation d'une tranchée dans un sol maintenu par une boue (bentonitique généralement) et ii) suivi de la réalisation du béton ou la mise en place des éléments préfabriqués ensuite.

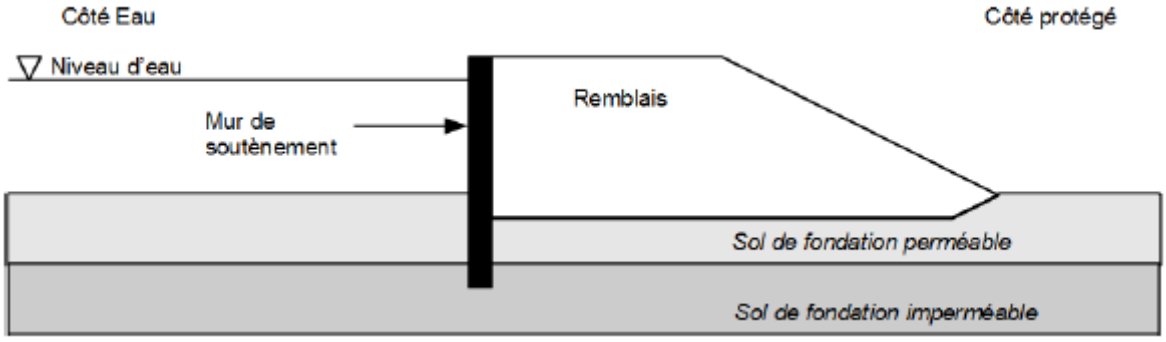


Figure 3 : Schéma de principe d'une paroi en béton (Source : Cerema)

Fonction(s) principale(s) :

La mise en œuvre d'un ouvrage de soutènement a pour objectif le maintien des terres afin d'assurer la stabilité de talus de digues raides lorsque l'emprise au sol est limitée (par exemple lorsqu'on souhaite augmenter à posteriori la hauteur du remblai).

Fonctions secondaires :

Les murs poids, murs cantilevers et les parois béton permettent également, lorsqu'ils sont situés coté eau de :

- maîtriser les écoulements dans le corps de digue par étanchement du parement coté eau ;
- améliorer la protection du talus coté eau vis-à-vis de l'érosion externe.

Lorsque le mur est installé coté Zone Protégée (ZP) il doit prendre en compte le drainage du remblai si nécessaire.

Description

Performances recherchées :

Que ce soit pour les murs poids, les murs cantilevers ou bien pour les parois béton, la principale performance recherchée est une stabilité et une capacité à résister aux charges permanentes : la poussée des terres, poussée de l'eau mais aussi les éventuelles surcharges.

Pour les murs poids la stabilité est assurée par la masse de l'ouvrage qui permet de mobiliser les efforts résistants qui s'opposent à la poussée des terres.

Pour les murs en béton armé, ce sont les caractéristiques géométries (longueur de semelle) et globales (rigidité) du mur qui confèrent au mur sa stabilité.

Pour les parois béton, cette performance est obtenue par les caractéristiques géométriques (profondeur d'ancrage) et par les caractéristiques globales (rigidité).

Les performances associées aux fonctions secondaires sont quant à elles :

- limiter le transit d'eau entre le coté eau et le coté ZP de la digue (cas du renforcement coté eau) ;
- empêcher l'érosion en cas de surverse (cas d'un mur coté ZP prolongé par une semelle) ;
- résister à des sollicitations externes telles que des forces de traction, de l'abrasion…

Utilisation :

Utilisées aussi bien, en ouvrage neuf qu'en confortement d'ouvrages existants, ces techniques (bien que de conception relativement différentes) présentent de nombreux avantages :

- utilisation dans n'importe quel milieu (fluvial, maritime…) en adaptant les matériaux aux conditions de site ;
- le béton peut être matricé, ce qui permet une intégration architecturale dans le paysage ;
- connaissance précise des caractéristiques mécaniques du matériau (possibilité d'utilisation d'éléments préfabriqués).

Cependant il est nécessaire d'être attentif à :

- les éventuelles coupures des corridors de faune ;
- la gestion des eaux en phase travaux : nécessité de mise en place de batardeaux pour une mise en œuvre à sec ;
- l'emprise en sous-sol de l'ouvrage.

Variantes :

La conception peut varier au regard des matériaux utilisés (présence ou non d'armature, composition du béton, présence d'ancrages …).

Alternatives :

À la place de tels ouvrages et afin d'atteindre des performances similaires, on peut envisager la mise en place de remblais renforcés (cf fiche FT 5.2) ou de mur gabions (cf.FT 5.5).

L'utilisation de palplanches (cf fiche FT 5.4) peut être une alternative intéressante puisqu'elles assureraient le rôle de batardeau d'enceinte en phase chantier et le rôle de para-fouille en phase définitive.

Dimensionnement :

Principes :

Il est nécessaire de distinguer les dimensionnements des différents ouvrages traités dans cette fiche :

- les murs poids (en béton, en maçonnerie, en béton cyclopéen…) dont la stabilité repose essentiellement sur la masse de l'ouvrage et qui sont dimensionnés comme tout ouvrage poids en considérant l'atteinte d'un équilibre limite de stabilité ;
- les murs en béton armé (type Cantilever) dont la stabilité repose essentiellement sur la longueur de la semelle et les caractéristiques mécanique de l'ouvrage ;
- les parois béton dont la stabilité repose essentiellement sur la profondeur d'ancrage et les caractéristiques mécanique de l'ouvrage.

En plus de la stabilité du confortement lui-même et pour l'ensemble de ces conceptions d'ouvrage, il faut considérer :

- la stabilité globale de la digue ;
- la nature, la résistance et les propriétés des matériaux composant le confortement (béton et armatures) pour s'assurer de la résistance interne de l'élément de soutènement.

Paramètres nécessaires :

Avant de mener à bien une étude de dimensionnement et outre les éléments communs à l'ensemble des confortements présentés dans la partie I du document il est particulièrement nécessaire de connaitre les éléments suivants pour dimensionner un mur poids ou une paroi béton :

- la nature et les caractéristiques du sol fondation ;
- les caractéristiques des écoulements parcourant le corps de la digue et sa fondation.

Eléments de conception :

- accessibilité au site du matériel de conception ;
- contrainte de circulation ;
- protection de l'environnement, nuisances sonores ;
- présence de réseaux, modalités de raccordement aux ouvrages existants éventuels ;
- gestion des eaux durant les travaux ;
- l'implantation du mur (proximité d'un talus…).

Modèles :

Les mécanismes de ruine des murs à prendre en considération sont les suivants :

- la ruine par défaut de la capacité portante du sol de fondation se traduisant par un poinçonnement ou une inclinaison excessive du mur avec risque de renversement ;
- la ruine par glissement du mur ;
- la ruine par renversement ;
- la ruine liée à une instabilité générale du site : stabilité au grand glissement ;
- la ruine par défaut de butée (si fonctionnement en écran de soutènement)
- la ruine par défaut de la structure interne de l'ouvrage de soutènement.

Pour vérifier ces différents points, il faut considérer que la structure de renforcement a un comportement monolithique.
Les calculs de dimensionnement (détaillés en fin de fiche dans le cas du mur poids – exemple 1 ; et pour les murs en béton armé hors ferraillage – exemple 2) doivent intégrer les phases transitoires de chantier (surcharges des engins pendant les travaux) et les risques sismiques.

Un calcul (pour un mur poids) est détaillé à la suite de cette fiche afin d'avoir un aperçu de la méthodologie utilisée. La conception devra prendre en compte les écoulements (étanchéité coté eau et drainage coté ZP).

Aspects pratiques (CCTP, chantier) :

Cahier des charges :

Le CCTP contiendra de nombreux éléments que l'on retrouve pour la réalisation d'autres confortement (voir chapitre 2 de la partie I du document)
Il s'attachera tout particulièrement à définir :

- les hypothèses de calculs : caractéristiques particulières pour la construction (fiabilité, durée d'utilisation, classe d'exposition…), les actions et les charges ainsi que les situations de projet. Ces hypothèses permettront de laisser à l'entreprise la possibilité de proposer des variantes à la conception initiale ;
- les éléments concernant l'agressivité du site.

Chantier :

- **Mode opératoire :**
  - réalisation d'une piste d'accès si nécessaire ;
  - aménagement de la zone de travaux, création ou aménagement d'une zone de stockage.

  Pour la réalisation d'un mur poids ou d'un mur béton armé :
  - mise en place d'un batardeau si nécessaire pour réaliser le ferraillage et le coulage du béton (si coulage en place) ;
  - création d'une semelle de fondation ou réalisation de fondations profondes en fonction de la nature et des caractéristiques du sol ;
  - pose du matériel de coffrage (si coulé en place) ou mise en place de la grue au droit de la plateforme pour pose des éléments préfabriqués ;
  - mise en place de joints hydrogonflants ou joints waterstop : privilégier la mise en place de joints waterstop si le milieu est soumis à des marnages importants ;
  - ferraillage et bétonnage (si coulé en place) ;
  - création du système d'évacuation : barbacanes ;
  - mise en place d'enrochements, de palplanches ou de bêches para-fouille pour limiter les affouillements ;

Les ouvrages de soutènement sont réalisés par plots avec réalisation de joints de dilatation, équipé d'un joint Waterstop si nécessaire permettant de réduire sa perméabilité.

Pour la réalisation d'une paroi (de type paroi moulée):
C'est un écran en béton armé moulé dans le sol. L'excavation est réalisée à la benne hydraulique. La stabilité de la tranchée pendant les opérations de forage, de ferraillage et de bétonnage est obtenue avec un fluide de perforation appelé boue, généralement composée de bentonite. Elle forme sur les parois de l'excavation un dépôt étanche appelé cake qui lui

permet de ne pas percoler dans le terrain et d'assurer la pression hydrostatique qui s'oppose à l'éboulement des parois.

A noter que d'autres modes de réalisation sont envisageables tels que la paroi de pieux sécants.

Quelle que soit la méthode utilisée, la profondeur de la paroi dépendra de la cote d'ancrage.

Les premiers ouvrages exécutés sont les murettes-guide : ils sont constitués de deux murets en béton armé permettant de matérialiser l'ouvrage à exécuter et d'en définir avec précision le tracé. Ils guident l'outil de forage, assurent une réserve de boue de forage et permettent de caler les cages d'armatures.

Les parois sont réalisées par passes avec réalisation de joints de dilatation, équipé d'un joint Waterstop si nécessaire permettant de réduire sa perméabilité.

Ces joints peuvent être tenus par un coffrage métallique provisoire qui porte le joint. Ces coffrages sont placés aux extrémités des panneaux primaires décoffrés.

- **Matériaux et matériels nécessaires :**
  - <u>Si mur coulé en place :</u>
    batardeau ;
    coffrage ;
    béton ;
    ferraillage ;
    camion toupie pompe ou centrale à béton (si volume important) pour approvisionnement du béton ;
    moyens de manutention (grue mobile, manuscopique…) ;
    aiguille vibrante ;
  - <u>Si mur préfabriqué :</u>
    camion pour acheminement des murs ;
    grue pour la manutention (à dimensionner en fonction du poids de chaque élément) ;
    étais tirants-poussants ;
    pince pour manutention ;
    prévoir une zone de stockage importante et s'assurer de la capacité portante de la digue (grue) ;
  - <u>Si paroi :</u>
    benne hydraulique ;
    bentonite ;
    béton ;
    ferraillage.

<u>Contrôles d'exécution :</u>

- agrément de la formule béton, des granulats utilisés et des armatures ;
- validation du PAQ et de la mise en œuvre ;

- contrôles à effectuer :
  - contrôle du béton : épreuve de convenance, épreuve de contrôle (mesure de consistance, détermination de la compression à 7 et 28 j) ;
  - contrôles des fonds de fouilles ;
  - contrôle des étanchéités ;
  - contrôle des armatures ;
  - contrôle de déviation pour les parois ;
  - dans le cas des parois moulées, des essais par mesures soniques seront réalisés afin de contrôler la continuité de la qualité du béton.

Références

- NF EN 1992 (2006). Eurocode 2 – Calcul des structures en beton armé.
- NF EN1997-1 (2005) Eurocode 7 – partie 9 : Ouvrages de soutènement
- NF P 94-281 (2014). Justification des ouvrages géotechniques – Normes d'application national de l'Eurocode 7 – Ouvrage de soutènement – Murs (Annexe E)
- NF EN1998-1 (2008). Eurocode 8 – Partie 5 : Sismique
- NF 94-282,
- (1998). Ouvrages de soutènement : guide de conception général, SETRA
- GT CFBR (2012). Recommandation pour le dimensionnement des barrages Poids. CFBR.

Annexes

Figure 4 : Photo des travaux de confortement de la digue du Gardon, digues de Comps (30) (Crédit photo : Safege)

Figure 5 : Mur de soutènement de remblai sur la digue de Sangatte (62) (Crédit photo : Safege)

Fiche Technique

Rideau de palplanches de soutènement

Sheet pile retaining wall

Fiche FT 5.4

Auteurs principaux : J.-C. PALACIOS (SAFEGE)
Contributeurs : L. BOUTONNIER (EGIS) ; J.-M. FLOHR (EGIS) ; D. POULAIN (INRAE) ; D. RAULIN (FUGRO) ; M. SUTTER (INRAE) ; R. TOURMENT (INRAE)
Relecteurs : L. SAUSSAYE (Cerema) ; PL REGAZZONI (EGIS) ; S. PATOUILLARD (DREAL Centre-Val de Loire) ; J.-M. FLOHR (EGIS)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais:
A sheet pile is a thin structural profile (which may be made of metal, wood or concrete). The juxtaposition of several profiles makes possible the building of a screen called curtain. The sheet pile curtain presents performance for sealing a deep excavation or limiting the flow through a water retaining structure, stabilizing mechanically an earthwork/ retaining the earth or protect a levee (against erosion).
The retaining sheet pile curtain can retain the earth of the levee. When a high support height and/or overall stabilization is required considering an available limited footprint, this type of structure may be one solution.

Étude(s) de cas correspondante(s) :
C.4.3.1 Jargeau (45)

NB : Cette fiche complète la fiche FT G1 pour ce qui concerne les aspects spécifiques de l'utilisation de palplanches pour un soutènement.

Indications :

Définition :

Un rideau de palplanches est un ouvrage linéaire continu formé par la juxtaposition de profilés homogènes ou non, de type palplanches. Pour plus de détails concernant la définition et la typologie des palplanches, le lecteur est invité à consulter la fiche générique FT G1.

Sujet de la fiche :

Cette fiche s'intéresse à la mise en place d'un tel composant en tout point d'un ouvrage, à des fins de soutènement.

Fonction principale :

Le rideau de palplanches permet d'assurer le soutènement vertical du talus de la digue (Figure 1).

Ce type de dispositif peut notamment être utilisé dans les configurations où une hauteur importante de soutènement et/ou une stabilisation globale doivent être assurées dans une emprise disponible limitée.

Fonctions secondaires :

- maîtrise des écoulements internes dans le corps de digue et/ou le sol de fondation par étanchement si le rideau est placé côté eau (cf. fiche FT 3.1) ;
- amélioration de la protection vis-à-vis de l'érosion externe si le rideau est placé côté eau – dispositif anti affouillement (cf. fiche FT 7.12) ;
- rôle anti-fouisseurs ;
- rehausse des digues.

Figure 1 : Mise en œuvre de palplanches à des fins de soutènement dans une zone karstique – Levée d'Orléans Jargeau (Crédit photo : DREAL CVL/DETL)

Description :

Performances à atteindre en terme de soutènement :

- stabilité du rideau sous les cas de chargements envisagés (le caractère auto stable peut être recherché) ;
- soutènement du massif sol situé à l'arrière ;
- stabilité mécanique de l'ensemble constitué par le sol de fondation, le corps de digue en remblai et le rideau de palplanches.

Utilisation :

Le rideau de palplanches peut être mis en œuvre côté eau ou côté terre/zone protégée. Dans le premier cas, il aura souvent une fonction supplémentaire, de protection contre l'érosion externe et/ou d'étanchéité.

Variantes :

Une variante au rideau de palplanches métalliques qui est classiquement utilisé en France consiste à modifier le matériau constitutif du profilé : bois, béton, PVC (utilisé par exemple dans les pays nordiques et anglo-saxons), fibre de verre.
Une autre variante consiste à proposer une structure séparant la fonction de l'écran et de la résistance à la flexion avec un écran (en béton projeté, profilé minces de bois/béton) reportant les charges sur des éléments raides (pieu) comme par exemple les dispositifs de soutènement de la famille des parois berlinoises. L'usage des variantes n'est cependant pas adapté à toutes les hauteurs de soutènement, à l'ensemble des contraintes hydrauliques et à toutes les conditions de travaux. Aussi, une étude de l'ensemble des contraintes du soutènement est à mener pour choisir la solution la plus adaptée (cf. dimensionnement).

Le rideau de palplanches peut assurer le soutènement à lui seul ou être complété par un ancrage.

Alternatives :

Toute technique de soutènement notamment le mur poids, le mur en béton (cf. FT 5.3) ou encore le soutènement en gabions (cf. FT 5.5) pouvant avoir des performances analogues.

Dimensionnement :

Principe :

La stabilité générale de la digue est calculée en supprimant la butée de pied devant les palplanches. Cela signifie que les éventuels blocages de pied de rideau ne sont pas intégrés au calcul dans une optique sécuritaire

Les éléments de sortie du dimensionnement sont donc pour les états limites ultimes – ELU (CFBR, 2015) :

- 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) ;
- la stabilité du fond du lit vis-à-vis d'une rupture par soulèvement hydraulique global du terrain (selon le positionnement du rideau côté eau ou côté zone protégée/terre) ;
- la stabilité d'ensemble de l'écran et de la digue (stabilité globale) ;
- et, pour mémoire, si l'écran supporte des charges verticales (ce qui n'est généralement pas le cas), la capacité portante de la fondation de la fondation de l'écran est à vérifier.

Pour les états limites de service (ELS), il faut vérifier que :

- les efforts supportés par l'écran restent admissibles pour la structure de l'écran (notamment en cas de corrosion) ;
- l'effort supporté par un tirant reste admissible pour sa structure et pour éviter un fluage important de l'ancrage.

Les données de sortie en fin de phase de dimensionnement (définis par un processus itératif) porteront sur :

- la nature du rideau (auto stable, ancré avec le nombre de niveaux de tirants) ;
- la profondeur de fiche (éventuellement variable sur le profil en long) ;
- le type de palplanche (matériau, type de profilé, épaisseur dont épaisseur sacrificielle, protection…) et les ouvrages associés (ancrages, lierne de couronnement, injection de compensation si nécessaire…) ;
- les moyens de mise en œuvre (vibrofonçage, battage, vérinage) ;
- les dispositions complémentaires d'étanchéification des serrures de palplanches (si besoin) ;
- les difficultés attendues liées à la réalisation des travaux ;
- les dimensions des enrochements parafouilles (cf. fiche FT 7.2) si nécessaire ;
- la stabilité de la berge et/ou de la digue en phase chantier pour supporter le poids des engins.

Les calculs de dimensionnement doivent également intégrer les phases provisoires de chantier (prise en compte des charges spécifiques pendant la durée des travaux, circulation d'engins), ainsi que les problématiques de liquéfaction des sols et de risque sismique.

L'objectif final du dimensionnement du rideau est de déterminer la fiche (longueur de la palplanche qui se trouve dans le sol) nécessaire aux palplanches ainsi que la section (prise en compte au travers du module d'inertie) nécessaire qui permettront d'assurer la stabilité de l'ouvrage.

Paramètres d'entrée nécessaires au dimensionnement :

En particulier :

- nature et caractéristiques mécaniques :
  - des sols retenus et de ceux situés en fondation, déterminées à partir de reconnaissances adaptées (pénétromètre statique, dynamique, pressiomètre, sondages carottés, reconnaissances géophysiques, perméabilité in situ, essais d'identification des sols, essais de perméabilité, essais de cisaillement direct et triaxiaux …) ;
  - du ou des types de palplanches retenus ;
- les conditions hydrauliques dans la digue et son sol de fondation ;
- si possible, des informations sur l'historique de construction de la digue pour anticiper les éventuels obstacles au battage des palplanches dans le massif de fondation (rochers, blocs…), le cas échéant il faudra prévoir un essai de battage.

Modèle(s) disponibles :

Les méthodes de calcul de dimensionnement d'un rideau de palplanches font généralement appel à un modèle de poutre reposant sur un milieu semi-infini avec une approche « élasto-plastique » où l'interaction sol/structure est modélisée par :

- dans le domaine « élastique », des ressorts reliant la pression sur l'écran au déplacement relatif sol-écran ;
- dans le domaine plastique, la poussée ou la butée étant calculée selon les tables de Caquot-Kérisel (table de poussée et de butée des terres, J. Kérisel, E. Absi, 2003) ou autre méthode équivalente.

Ces méthodes sont appliquées via les logiciels et méthodes suivantes :

- méthode analytique de Blum ou de la poutre équivalente : disponible sur logiciel d'accès libre ProSheet (© ArcelorMittal Commercial RPS SARL) ;
- méthode aux équilibres limites des écrans (norme d'application nationale de l'Eurocode 7 relative aux écrans de soutènement, NF P94-282). La norme impose ce type de calcul pour les écrans auto-stables et l'autorise pour les écrans isostatiques (avec un niveau d'ancrage), méthodes dites MISS+MEL au sens de la norme, méthode MISS pour les autres types d'écran. Disponible sur le logiciel CARPE du Cerema ou le logiciel RIDO ou encore K-Rea.

Outre le dimensionnement structurel de la palplanche évoquée ci-avant, un calcul de stabilité générale (ouvrage et digue) peut également être nécessaire. Dans ce cas, ce type de calcul est effectué avec le logiciel TALREN ou la suite GeoStudio par exemple appliquant notamment les méthodes de Bishop ou ses dérivées.

Enfin, un calcul d'écoulement hydraulique en régime transitoire ou permanent est souvent nécessaire pour évaluer les pressions interstitielles de l'eau dans les sols (module Plaxflow de Plaxis, module SEEP dans la suite GeoStudio).
Si des critères aux ELS en déformation sont requis, un calcul aux éléments finis ou aux différences finies est conseillé (PLAXIS, FLAC, etc.).

À noter que le dimensionnement de palplanches en PVC doit prendre en compte son comportement mécanique particulier : son module élastique est très inférieur à celui de l'acier. De plus, il peut être nécessaire de prendre en compte les modifications de ses propriétés au cours de la vie de l'ouvrage (dues aux UV, aux cycles de température et au processus de fabrication). Généralement, le matériau est protégé contre les UV en y incorporant certains pigments réfléchissants ou absorbant les UV.

Paramètres à prendre en compte lors de la conception (autres que dimensionnement) :

En particulier :

- sensibilité à la densification du matériau en place (évaluation du risque de tassement lors des opérations de vibrofonçage) ;
- stabilité de la digue en phase travaux (au glissement et au poinçonnement) en cas de présence d'un atelier en crête de digue ;
- niveau d'eau et risque d'inondation lors des travaux du fait de la modification importante de l'ouvrage.

Réalisation du chantier :

En préalable à toute exécution de travaux, il est indispensable de réaliser un diagnostic afin d'appréhender les contraintes du site :

- s'informer de la position des différents réseaux concessionnaires dans le sol ;
- s'informer de l'incidence des travaux sur les avoisinants ou les mitoyens ;
- vérifier qu'aucun obstacle souterrain ou aérien n'altère la faisabilité de l'ouvrage.

En termes de réalisation de chantier, on se rapportera aux éléments figurant dans la fiche générique FT G1.

Pour remplir au mieux sa fonction, un rideau de palplanches est battu au plus proche de la verticale. La mise à l'aplomb permettra une meilleure pénétration dans le sol. De plus, la palplanche sera, le cas échéant, plus facile à arracher. Afin d'obtenir un aplomb et une implantation correcte du rideau, il est nécessaire d'utiliser un guide à un ou deux niveaux (Figure2). De manière générale, la hauteur du guide est d'environ un tiers de la hauteur de la palplanche.

Figure 2 : Guide de battage à 1 niveau – digue de Vigueirat à Arles (crédit photo : SYMADREM)

Des sujétions particulières peuvent être ajoutées si le rideau nécessite la mise en œuvre de tirants pour la stabilité et l'ancrage ou d'une protection de pied de type enrochements pour prévenir le risque d'affouillements.

Surveillance et contrôles :

- qualité des palplanches livrées (conformité avec le cahier des charges) ;
- technique d'enfoncement (conformité avec le cahier des charges) ;
- profondeur d'ancrage
    - en phase réalisation : enregistrement des paramètres de mise en œuvre ;
    - post-travaux : méthodes non destructives par réflexion, impédance, sismique parallèle…
- mise en œuvre des palplanches : rectitude du rideau (mesure des tolérances en profil en travers, en nivellement, en déversement), contrôle visuel d'enclenchement des serrures.

Les modalités de contrôles d'exécution sont explicitées dans la fiche générique FT G1; plus de détails sur la teneur des contrôles peuvent être obtenus dans le Fascicule 68 du CCTG ou la fiche palplanches du mémento pour la mise en œuvre sur ouvrage d'art (Memoar – II3, 2005).

Le déplacement admissible en tête de rideau est variable en fonction de la configuration de l'ouvrage et des enjeux associés : un déplacement de l'ordre de 1/100 de la hauteur libre totale est acceptable en configuration standard.

Traitement des points singuliers

Se référer à la fiche FT G1**.**

Références :

Se référer à la fiche FT G1.

- The International LeveeHandbook – chapitre 9, Ciria, 2013
- Référentiel technique digues maritimes et fluviales. Document établi par un groupe de travail à la demande du MEDDE, Version 1 de janvier 2015.
- Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai, CFBR, 2015.
- ROSA 2000 (Recommandations pour le calcul des états limites des ouvrages en site aquatique) - Fascicules « rideaux de soutènement » et « exemples commentés de notes de calcul, rideau de soutènement ancré ». Cetmef
- Digues et berges de Voies Navigables – Retour d'expérience sur les désordres et les réparations, 2010, CETMEF
- Mémento pour la mise en œuvre sur ouvrages d'art – MEMOAR – Collection de fiches techniques. Fiche n° II-3 "Les palplanches", 2005, SETRA
- Protection anticorrosion des ouvrages maritimes, manuel des bonnes pratiques. Edition Cerema, (à paraître)

	Fiche Technique **Soutènement en Gabions pour conforter la stabilité au glissement de la digue** Retaining wall made in Gabions	**Fiche FT 5.5**

Auteurs principaux : C. VARAGNAT (Safege) ; A. PLASTRE (Maccaferri)
Contributeurs : JC. PALACIOS (Safege) ; M. SUTTER ; D. POULAIN (INRAE) ; R. TOURMENT (INRAE)
Relecteurs : M. SUTTER (INRAE)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / résumé en anglais :
The gabions boxes are formed of parallelepipedic wire cages (generally double twist steel wire but other types of containers are presented as an alternative), generally of width between 0.50 m and 1m and filled with stones.

Gabions are typically used when the footprint is limited to build vertical or stepped supports. Gabions can also be placed on the base to better distribute the loads and dissipate under pressures from the foundation.

Main functions are to support and to stabilize of the dike (both protected area and side stream) and to get steeper dike embankments slopes to allow crest widening.

Étude(s) de cas correspondante(s) :
C.4.1 Digue de l'Agly

Indications :

Définition :

Les gabions ou gabions classiques sont des structures formées de cages grillagées parallélépipédiques appelées cage ou boite gabion (Figure 1). Généralement fabriquées en grillage double torsion* (d'autres types de conteneurs sont présentés en variante), les cages ont une hauteur de 0,5 ou 1 m, une largeur variable entre 0,50 et 2 m et une longueur variant entre 1,5 et 4 m et sont remplies de matériaux de type concassé ou galets.

* La simple torsion est à proscrire pour des ouvrages gabions, la rupture d'un fil entraine le démaillage complet de la cage. Par ailleurs, les résistances mécaniques des grillages et leurs raideurs sont bien inférieures et ne permettent pas de construire des ouvrages durables.

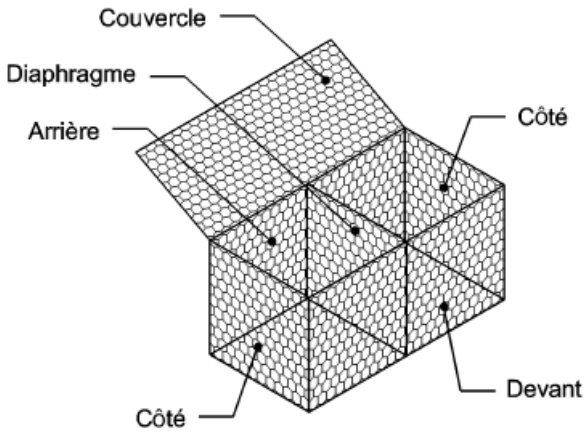


Figure 1 : Schéma d'une boite gabion (Source : NFP 94 325-1)

Les matelas gabions utilisés en semelle uniquement à fonction de protection (voir fiche FT 7.4) sont des cages de grande surface (largeur de 2 ou 3 m et longueur variable entre 2 et 6 m) et de faible épaisseur (moins de 30 cm). Il existe des matelas gabions avec diaphragmes incorporés à la base de la cage par pliage – matelas double diaphragmes – et des matelas gabions avec diaphragmes séparés et attachés à la base – matelas simple diaphragmes (Figure 2).

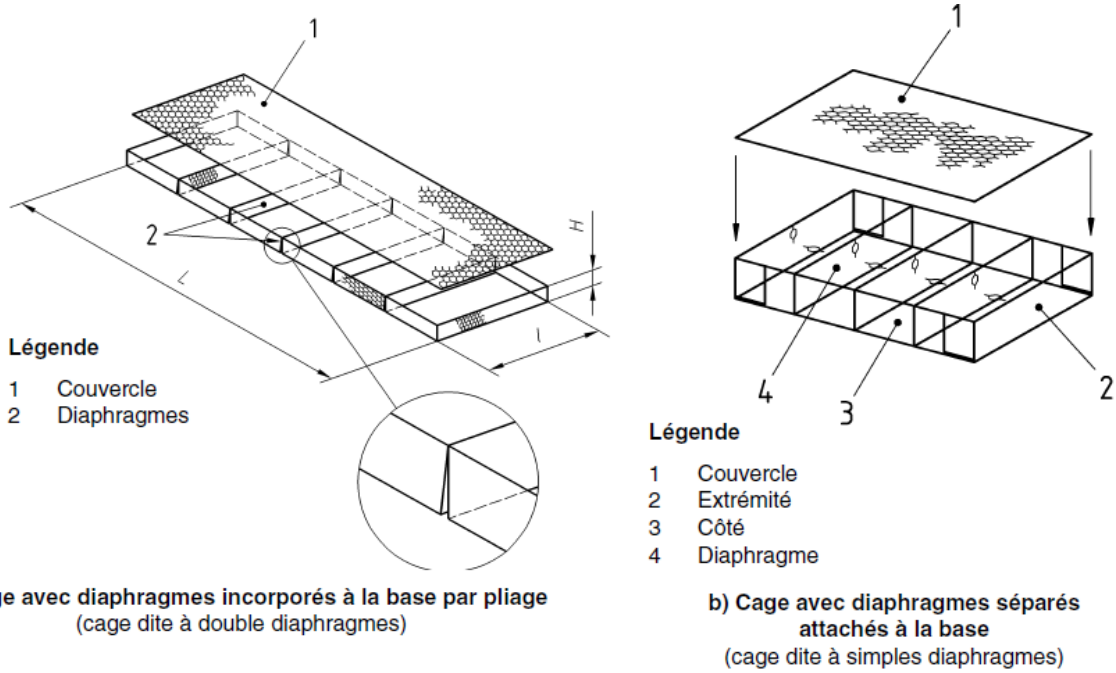


Figure 2 : Schémas d'un matelas gabions (Source : NFP 94 325-2)

Les gabions sont classiquement utilisés lorsque l'emprise au sol est limitée pour construire des soutènements verticaux ou en gradins. Des gabions peuvent également être placés en semelle afin de mieux répartir les charges et dissiper les sous pressions provenant de la fondation (Figures 3 et 4)

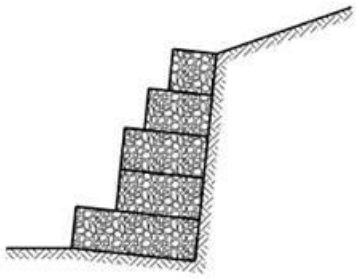


Figure 3 : Exemple de mur en gabions à « gradins extérieurs » (source NFP 94-325-1)

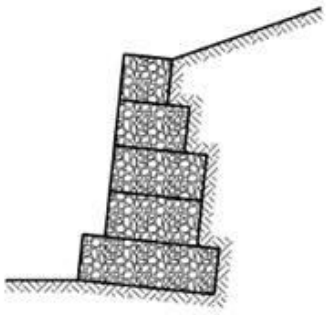


Figure 4 : Exemple d'ouvrage en gabions à semelle amont débordante (source NFP 94-325-1)

Sujet de la fiche :

Cette fiche s'intéresse aux ouvrages de soutènements composés d'éléments de type gabion (gabions classiques).

Fonction(s) principale(s) :

- soutènement et stabilisation de la digue aussi bien coté zone protégée que côté cours d'eau ;
- raidissement des talus de digues afin de permettre un élargissement en crête pour une emprise en pied égale.

Fonctions secondaires :

Cette solution permet également :

- un rendu architectural de qualité (bonne intégration environnementale) ;
- le drainage naturel du remblai situé à l'arrière du mur (porter attention à la filtration) ;
- la protection contre l'érosion externe (cf. fiche FT 7.4).

Description :

Performances recherchées

- **stabilité au glissement sur fondation et au renversement** des cages gabions soutenant les matériaux du corps de digue ;

- **flexibilité et déformabilité des cages** pour permettre d'encaisser les tassements différentiels. À noter que les cages en acier électro soudés, plus rigides, n'ont pas cette capacité ;
- **monolithisme de la structure**, du fait des liaisons par ligatures entre les gabions ;
- **drainage** assurée par la nature même de l'ouvrage (constitué de matériaux granulaires) ;
- **résistance à la corrosion.**

Notons que si le mur en gabion a également une fonction de protection, il sera recherché une :

- **résistance aux forces tractrices** de l'écoulement sur le talus. Classiquement, les cages et matelas gabions sont conçus pour supporter des contraintes de cisaillement de 150 N/m² à plus de 500 N/m². Pour les matelas gabions uniquement, l'utilisation de la technique de double diaphragme permet un gain de près de 100 N/m² par rapport à des matelas gabions équipés de diaphragmes simples attachés à la cage (cf. NFP94 325-2 - §6.3.6) ;
- **flexibilité et déformabilité des matelas** pour jouer leur rôle de protection contre les affouillements (cf fiche FT 7.4) ;
- **rugosité de parement** permettant un ralentissement des écoulements.

Utilisation

Technique assez largement utilisée en milieu fluvial, elle présente plusieurs avantages :

- **facilité** de mise en œuvre ;
- **s'adapte** à une grande variété de configuration et facilite les raccordements avec les ouvrages existants ;
- technique pouvant être **compétitive économiquement** ;
- permet une bonne **intégration paysagère** et environnementale.

Particulièrement adapté pour des hauteurs n'excédant pas 4 m, des dispositions particulières doivent être prises pour des hauteurs plus importantes (fruit du parement gradins…).

Son utilisation pour des contraintes plus importantes (chimiques, batillage…) telles que subies dans les domaines maritime ou torrentiel est également possible si des mesures particulières de conception sont prévues :

- protection spécifique contre la corrosion ;
- ancrage adapté des cages…

Variantes :

Outre les variantes concernant les matériaux utilisés (maillage, forme de la cage, matériaux de remplissage) présenté en détail dans la fiche FT 7.4, les variantes concernant les murs de soutènement en gabion reposent essentiellement sur la conception même du mur :

- parement en gradin ;
- parement droit.

Alternatives

Techniques alternatives aux ouvrages de soutènement en gabions (fonction principale de stabilité et secondaire de protection externe) :

- mur poids ou mur en T ou en L en béton armé (cf. FT5.3) ;
- rideau de palplanches (cf. FT 5.4).

Dimensionnement :

Principe :

Les murs de soutènement en gabion sont dimensionnés en termes en stabilité comme tout ouvrage de soutènement poids, en vérifiant la stabilité au glissement à la base du mur, au basculement par rapport au pied aval du mur, au poinçonnement du sol de fondation et au glissement d'ensemble du talus.
À cela s'ajoute un dimensionnement interne du mur.

En particulier pour les ouvrages de soutènement il sera ainsi nécessaire d'étudier :

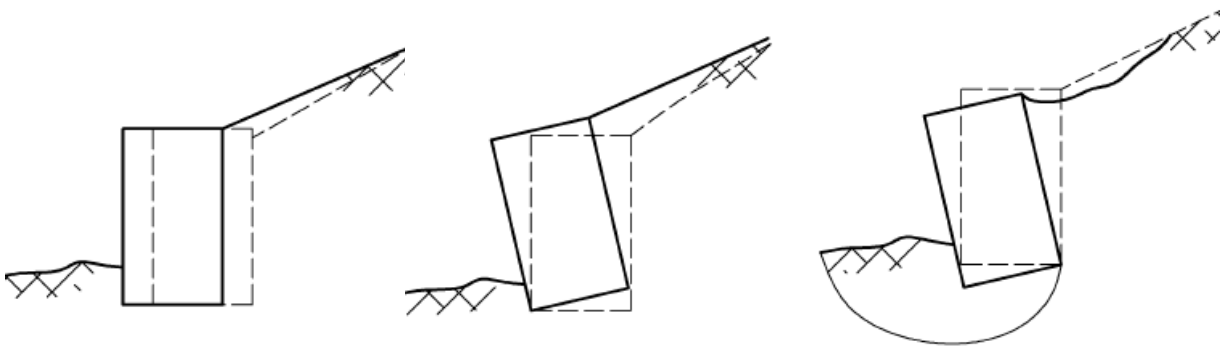
La stabilité interne :

La vérification de la stabilité interne des murs en gabion consiste à s'assurer que, sous l'effet des actions appliquées, le mur ne subira pas de dégradation mettant en cause son monolithisme. En considérant chaque élément depuis le haut vers le bas du mur, la stabilité de chaque rang constitutif de l'ouvrage de soutènement est vérifiée selon quatre critères :

- la stabilité au cisaillement des cages gabion ;
- la résistance au poinçonnement de chacune des cages ;
- la stabilité au glissement des cages entre elles ;
- la stabilité au basculement de chacune des cages par rapport au point aval du rang de gabion considéré.

La stabilité externe (Figure 5) :

- la stabilité au glissement sur fondation ;
- la stabilité au basculement (considérant le mur comme monolithique) ;
- la stabilité au poinçonnement de la fondation ;
- la stabilité au grand glissement en tenant compte d'un risque d'affouillement du fond. La construction du mur peut en effet provoquer une instabilité générale du site entrainant une rupture par grand glissement dans les terrains avoisinant l'ouvrage.



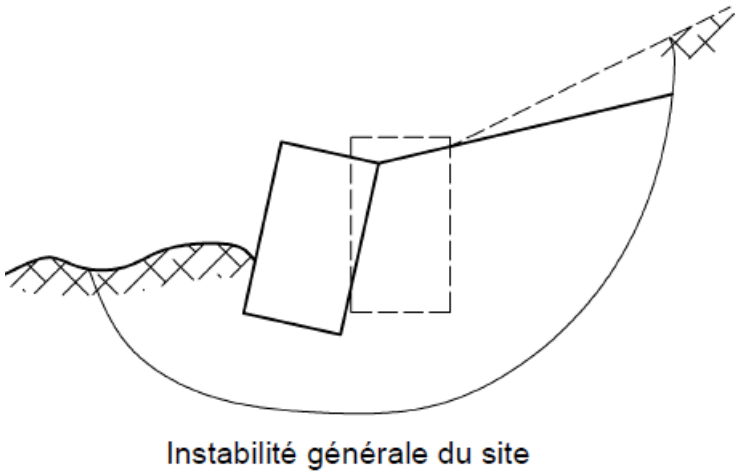


Figure 5 : Mécanismes de rupture externe d'un mur en gabions (Source : NFP 94-281)

Paramètres nécessaires :

Avant de mener à bien une étude de dimensionnement, au-delà des paramètres généraux rappelés en chapitre introductif, il est nécessaire de connaitre :

- les surcharges à prendre en compte ;
- les différents cas de charges et d'application des efforts ;
- les efforts dus aux variations du niveau d'eau : conditions hydrogéologiques du remblai à l'arrière du soutènement en gabions.

Modèles :

Les différents calculs et vérifications à mener reposent sur le non dépassement d'un état limite de contrainte (les contraintes prises en compte varient suivant la vérification menée). La démarche de calcul est explicitée dans l'annexe E de la NFP 94 281.

La stabilité globale de l'ouvrage de confortement est quant à elle menée selon des méthodes de calcul de stabilité des pentes classique, consistant au calcul d'un facteur de stabilité, traduisant un état limite de stabilité au glissement : calcul type Bishop ou éléments finis.

Les matériaux granulaires utilisés pour remplir les cages sont de petits enrochements répondant à certaines exigences de qualité, et tout particulièrement à des exigences granulométriques. Ils sont soumis à la norme française NFP 94 325-1 (§ 6.4.1)

- masse volumique : valeur minimale de 2200 kg/m^3 ;
- résistance à la rupture en compression supérieure à 60 MPa ;
- résistance à l'usure Micro Deval (MDE) inférieure à 45 ;
- résistance au gel-dégel : perte de masse inférieure à 0.5 % ;
- les matériaux granulaires utilisés pour le remplissage doivent être exempts de fines ou de matrice terreuse/argileuse.

En outre les matériaux granulaires utilisés pour remplir les cages doivent être exempts de fines ou de matrice argileuse.

Les structures grillagées sont conçues pour être résistantes et durables. Les fils de fer doivent être traités afin de résister aux agressions extérieures : ils peuvent être conçus ou bien revêtus d'un alliage en zinc aluminium ou PVC**. Les grillages ont généralement une maille hexagonale à double torsion (Grillage à

maille de forme hexagonale formée en torsadant deux par deux des fils adjacents alternativement vers la droite, puis vers la gauche).

** La galvanisation seule (Zn) n'est plus utilisée sur le marché français et ne présente pas des performances viables pour ce type de structures. D'un point de vue technique, la résistance à la corrosion est 3x meilleure avec des alliages Zn95%/Al5 % pour un surcoût faible. Pour des ouvrages en milieu hydraulique, il est même fortement conseillé d'avoir recours à des revêtements organiques sur fils revêtus de Zn/Al pour assurer une durée de vie supérieure à 25 ans. La norme NFP 94 325-2 précise que ce revêtement est nécessaire pour des ouvrages immergés en permanence ou temporairement pour des périodes de retour de crue inférieures à 10 ans (§ 6.10.3) ; actuellement, 90% des ouvrages neufs en gabions ont des fils revêtus de Zn/Al + gaine polymère (PVC, PE, PA6).

Les calculs de dimensionnement devront intégrer les phases provisoires de chantier (surcharges des engins pendant les travaux) et les risques sismiques.

Un exemple de calcul de dimensionnement est présenté en annexe de la présente fiche technique.

Aspects pratiques (CCTP, chantier…) :

Cahier des charges :

Le cahier des charges d'un confortement de digue à des fins de soutènement doit contenir en particulier les éléments suivants :

- le descriptif des cages utilisées et de leur remplissage (forme, taille, maillage, revêtement, granulométrie…), la définition des cages et des granulats peut éventuellement être laissée au dimensionnement par l'entreprise ;
- la géométrie du mur et des composants annexes (géotextiles…) ;
- les conditions de mise en œuvre (température notamment) ;
- les contrôles et essais à réaliser sur les matériaux et sur l'ouvrage ;
- maîtrise foncière y compris des accès (ou servitude de passage) en effet la pose de gabion peut nécessiter une zone de stockage importante.

Chantier :

- aménagement d'une zone de stockage ;
- mise en place éventuelle d'une semelle de fondation sous les gabions :
    - pour les gabions double torsion : semelle en GNT 0/31.5 pour avoir une assise propre et bien nivelée ;
    - pour les gabions éléctrosoudés : semelle semi rigide en grave ciment ou béton de propreté pour éviter une distorsion de la fondation ;
- en général, il convient de monter les cages de gabion par niveaux successifs et de ne réaliser le remplissage des gabions qu'une fois achevé le montage de tout ou partie d'un niveau ;
- il convient de mettre en place un géotextile de filtration pour éviter la migration des fines dans les gabions. Ce géotextile sera disposé au fur et à mesure de la montée du remblai, à l'arrière (également si nécessaire en fondation sous la 1ère couche) des cages de gabions (Figure 6) ;
- mise en place du remblai et compactage en même temps que la montée de l'ouvrage en gabion ;
- lorsque des venues d'eau en provenance des terrains retenus sont prévisibles, il convient de réaliser, à la base des remblais, un dispositif de drainage longitudinal à l'ouvrage en gabion pour collecter et acheminer ces venues d'eau vers un exutoire.

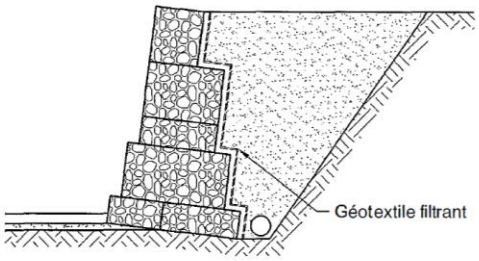


Figure 6 : Exemple de dispositif de filtration à l'interface gabions-remblai (source NFP 94-325-1)

Il est conseillé pour la pose des cages gabions de laisser un redent minimum de 5 cm entre deux rangées de gabions et de prévoir un léger fruit de quelques %.

Matériaux et matériels nécessaires :

- géotextile de filtration ;
- cages métalliques (grillage double torsion ou panneaux électro-soudés, diaphragmes, raidisseurs ou tirants, agrafes…) ;
    - double torsion (norme NF EN 10223-3): Type de grillage tissé dont les fils au droit de la torsade réalisent une double torsion. Les combinaisons maille/fil à considérer sont les suivantes :
        - gabions : maille type 8x10 et fil nu de diamètre 2.7mm (revêtement organique de 0.8mm d'épaisseur minimum sur le diamètre du fil) ;
        - matelas gabions : maille type 6x8 et fil nu de diamètre 2.2mm (revêtement organique de 0.7mm d'épaisseur minimum sur le diamètre du fil) ;
    - électrosoudé (norme NF EN 10223-8) : La jonction des fils ou barrettes se fait par soudure par point. Ce mode de fabrication permet d'obtenir des panneaux très résistants et plus rigides. Cependant, ce procédé ne permet pas la plastification des fils et la durabilité en milieu humide est plus limitée. Les mailles sont carrées ou rectangulaires et peuvent varier d'un coté à l'autre du panneau. En France les combinaisons maille fil utilisées sont les suivantes :
        - faces vues : maille 50x100mm, fil de diamètre 4.5mm ;
        - faces non vues : maille 100x100mm, fil de diamètre 4mm ;
- cailloux de remplissage issus de roches sédimentaires carbonatées, siliceuses ou de roches magmatiques et métamorphiques, dures à moyennement dures (se référer aux préconisations du constructeur pour les classes granulaires, en général 90/180 pour les cages et 90/130 pour les gabions) ;
- engins de terrassement (pelle, chargeur, …) ;
- massif de gabions avec treillis soudé galvanisé ;
- produits et matériaux filtrants et de séparation ;
- tirants, agrafes et fils de ligature ;
- prévoir un matériel de levage adéquat si gabion pré-rempli en carrière (pelle et élingues).

Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance)

Les contrôles d'exécution suivront les recommandations de la norme NFP 94 325-1&2 :

- planche d'essai pour validation en cas de mise en œuvre particulière (appareillement des faces vues) ;

- vérification de l'alignement des cages, du fruit général, de l'absence de tassements différentiels, des redents entre rangées de gabion, du bon remplissage des cages avant mise en place des couvercles.

Traitement de points singuliers (extrémités, ouvrages inclus notamment)

La technique Gabion se prête assez bien aux difficiles problèmes de raccordement avec les ouvrages existants, du fait de la possibilité d'adapter la découpe des cages et le plan de calepinage au voisinage des ouvrages.

Références

- NF P 94-325-1 (2004). Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Ouvrages en gabions en grillage métallique à maille hexagonale double torsion - Partie 1 : ouvrages hors site aquatique
- NF P 94 325-2 (2006). Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Ouvrages en gabions en grillage métallique à maille hexagonale double torsion - Partie 2 : ouvrages en site aquatique
- NF EN 10223-8 : « Fils et produits tréfilés en acier pour clôtures - Partie 8 : Gabions à mailles soudée »
- CEMAGREF (1992). Les ouvrages en gabion
- CETMEF (2002). *G*uide Enrochement – Chapitre 3, CIRIA
- NF EN 13383-1 (2003).Enrochements : spécifications et méthode d'essais
- NF P 94-281 (2014). Justification des ouvrages géotechniques – Normes d'application national de l'Eurocode 7 – Ouvrage de soutènement – Murs (Annexe E)
- Structures souples en gabions pour les ouvrages de soutènement des terres (Document Maccaferri)

Annexes

Exemple de calcul de dimensionnement (selon NFP 94-281):

1. **Critères à prendre en compte dans le dimensionnement des gabions :**

    a. Caractéristiques géométriques

Les murs en gabions présentent généralement une géométrie pyramidale avec un gabion de tête de section 1mx1m. Pour les rangs inférieurs, il est d'usage d'élargir de 50cm par mètre de hauteur supplémentaire.
Pour la suite de l'exemple de calcul, nous retenons la géométrie suivante, illustrée sur la figure 7. Le mur est constitué de deux rangs de gabions, de section 1x1m pour le rang de tête et de 1m50x1m pour le rang de base. Un redan de 20cm est mis en place entre les deux rangs et un talus à 2H :1V (27°) est au dessus de la tête de mur sur 1m de hauteur. En fondation un matelas gabions de 30cm est présent pour prévenir de l'affouillement.
En crête de digue, une circulation voiture est prévue dans certaines zones. Une surcharge de 10kPa est considérée.
Dans les calculs de stabilité, la contribution du matelas n'est considérée que dans la zone comprimée par le gabion (largeur du gabion de base).

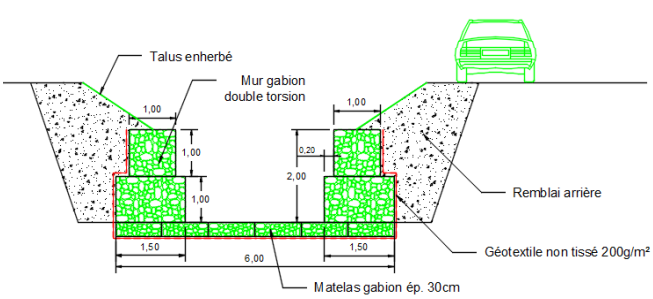


Figure 7 : coupe type et photos des digues sur la Roubine à St Paul 3 Chateaux (26) (Source : Maccaferri)

b. Contraintes transmises par le terrain

Les matériaux situés sous l'ouvrage et à l'amont du mur en gabion possèdent des caractéristiques géotechniques qu'il est nécessaire de prendre en compte dans la stabilité de l'ensemble
Dans cet exemple, le matériau d'assise est un sable présentant les caractéristiques suivantes :

- $\gamma h = 19\ kN/m^3$
- $\phi' = 30°$
- $c' = 0kPa$
- $pl^* = 0{,}35\ MPa$

Le matériau de remblai mis en place à l'arrière du mur est un tout venant compacté dont les caractéristiques sont les suivantes:

- $\gamma h = 19\ kN/m^3$
- $\phi' = 33°$
- $c' = 0\ kPa$

Pour le calcul du coefficient de poussée active, la méthode de Coulomb est employée, en considérant un plan de poussée incliné comme représenté sur la figure 8.
La résultante de la poussée active est inclinée d'un angle d par rapport à la perpendiculaire au plan de poussée. Cet angle d est égal à l'angle ϕ' pondéré par un facteur (1-G) lié à la présence du géotextile anti-contaminant (par le rapport des tangentes des angles). Une valeur de G=5% est retenue dans ce cas.

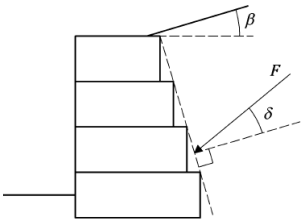


Figure 8 : inclinaison du plan de poussée pour un mur en gabions (norme NFP 94-281)

On obtient ici un angle d de 31.67° et une inclinaison de la poussée par rapport à l'horizontale de l =40.2°

L'application de la formule de Coulomb donne **$K_a = 0.599$**.

c. Paramètres propres aux gabions

Les gabions ont un poids volumique qui dépend du poids des matériaux de remplissage et de l'indice de vide.
Pour un matériau calcaire, un poids volumique de 24kN/m3 est retenu et un indice de vide de 35% est généralement obtenu. Cela conduit à un poids volumique des cages de $g_G = 15.6kN/m3$.

Pour effectuer les vérifications de **stabilité interne**, les paramètres suivants sont nécessaires:

- la valeur f_g du coefficient de frottement du matériau de remplissage des cages gabions ; cette valeur qui est égale à la tangente de l'angle de frottement interne du matériau, se détermine par des essais de laboratoire appropriés (notamment boite de cisaillement) ;
- la valeur C_g de la résistance au glissement des agrafes, avec un maximum de 15 kPa ;
- la valeur f_c du coefficient de frottement fictif des structures gabions due au frottement des pierres de remplissage ;
- la valeur C_c de la cohésion fictive des structures gabions due à la présence de l'enveloppe en grillage métallique.
- La résistance à la compression des gabions $s_{c;k}$

Ces trois derniers paramètres sont fournis par le fabricant des éléments et proviennent d'essais réalisés sur des configurations extrêmes (hauteur, pente, écartement horizontal des éléments).
Pour un prédimensionnement, on peut estimer ces paramètres à 0.7 pour f_c, 15kPa pour c_c et 400kPa pour $s_{c;k}$.

2. <u>Calcul de la poussée :</u>

La poussée du terrain sur le mur est définie par la relation :

$$P = K_a\left(\frac{1}{2}\gamma_{G;sup}\gamma_\gamma\gamma_R H^2 + \gamma_{Q;sup}qH\right) - 2cH\sqrt{K_a}$$

Avec

- P : poussée du terrain
- $g_{G;sup}$: coefficient partiel sur les charges permanentes défavorables = 1.35
- g_g: coefficient partiel sur le poids volumique = 1

- g_R : poids volumique du remblai = 19kN/m^3
- $g_{Q;sup}$: coefficient partiel sur les charges variables défavorables = 1.50
- q : charge variable = 10kPa
- H : Hauteur du mur = 2m30
- c : cohésion du matériau arrière = 0

=> **P = 61.30kN/m**

On en déduit les composantes horizontales et verticales de la poussée
P_h : Composante horizontale de la poussée= P cos l = 46.82kN/m
P_v = Composante verticale de la poussée = P sin l = 39.57kN/m

3. Calcul de la stabilité au glissement sur la base:

La condition de stabilité au glissement sur la base est définie par la relation :

$H_d \leq R_{h;d} + R_{p;d}$

Avec
- H_d : effort horizontal moteur
- $R_{h;d}$: effort résistant par frottement sur la base
- $R_{p;d}$: effort résistant par mobilisation de la butée

Note : *L'effort résistant par mobilisation de la butée est négligé comme très souvent pour ce type d'ouvrage. En effet, les gabions sont posés sur le sol de fondation, sans être foncés ou battus ; lorsqu'un remblaiement est effectué devant le mur, celui-ci n'est en général pas compacté suffisamment pour mobiliser un effort de butée*

L'effort horizontal moteur est apporté par la composante horizontale de la poussée => $H_d = P_h = 46.82kN/m$
L'effort résistant par frottement sur la base est défini par la relation : $R_{h;d} = \frac{V_d tan\delta_{a;k}}{\gamma_{R;h}\gamma_{Rd;h}}$

Où
- V_d : valeur de calcul de l'effort normal
- $d_{a;k}$: angle de frottement d'interface à la base du mur : lorsque le mur est fondé sur le terrain naturel, l'angle de frottement d'interface est considéré égal à l'angle de frottement du matériau le moins frottant, c'est-à-dire le sol dans ce cas : $d_{a;k}$:25°
  - $g_{R;h}$: coefficient partiel pour le glissement du sol = 1.1
  - $g_{Rd;h}$: coefficient de modèle pour le glissement du sol = 0.9

L'effort normal est constitué de la composante verticale de la poussée du terrain et du poids du mur gabions P_G.
Le poids du mur gabion est égal à : $P_G = \gamma_{G;inf}\gamma_\gamma\gamma_G * V_G$
Avec
- $g_{G;inf}$: coefficient partiel sur les charges permanentes favorables = 1.00

Note : *le poids du massif gabion est considéré favorable dans la vérification de stabilité (effet stabilisateur) ; dans certaines situations il peut être considéré défavorable, notamment lorsque lors de la vérification au poinçonnement. Une vérification complémentaire peut être nécessaire en considérant le coefficient pondérateur $g_{G;sup}$ (1.35).*

Il vient : P_G = 1.00x1.00x15.6x2.95 = 46.02kN/m3.
$V_d = P_v + P_G = 85.59kN/m$
$R_{h;d}$ =49.91kN/m

On a donc bien $H_d \leq R_{h;d}$, la stabilité au glissement sur la base est vérifiée.

4. Calcul de la stabilité au poinçonnement

La vérification de stabilité au poinçonnement est définie par l'inéquation :

$$V_d \leq R_{v;d} + R_0$$

Avec :

$$R_0 = Aq_0$$

$$R_{v;d} = \frac{A' q_{net}}{\gamma_{R;v}\gamma_{Rd;v}}$$

- V_d : valeur de calcul de l'effort normal
- q_{net} : contrainte nette du sol

- A: Base du mur
- $R_{v;d}$: valeur de la résistance nette du terrain sous la fondation du mur
- $g_{R;v}$: valeur du facteur partiel de portance = 1,4
- A' : valeur de la surface effective de la semelle : A'= B-2e
- g_{net} : valeur de la contrainte associée à la résistance nette du terrain sous la fondation du mur de soutènement calculée selon une méthode de calcul appropriée
- $g_{R;d;v}$: coefficient de modèle associé à la méthode de calcul utilisé (méthode pressiométrique ou pénétrométrique = 1,00)
- R_0 : valeur du poids du volume de sol constitué du volume de la fondation sous le terrain après travaux et des sols compris entre la fondation et le terrain après travaux
- q_0 : contrainte totale verticale que l'on obtiendrait à la fin des travaux à la base aval du mur en l'absence de celui-ci.

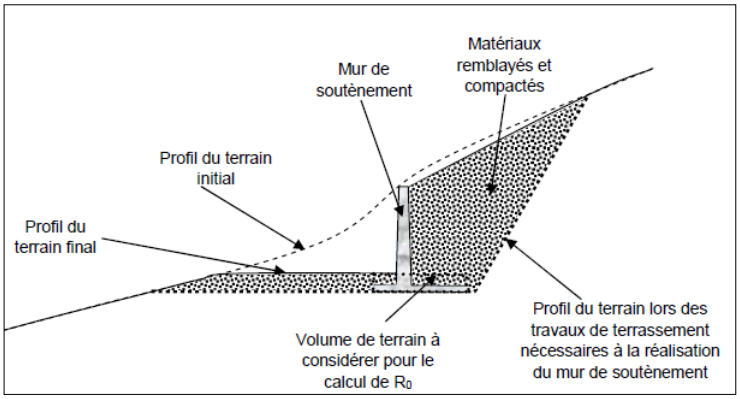


Figure 9 : schéma explicatif pour la détermination de R_0 (norme NFP 94-281)

Dans l'exemple présent, le matelas gabion étant ancré de sa hauteur dans le sol de fondation, R_0 = 1.5 x0.3x19 = 8.55kN/m

Lorsque la résistance du sol est calculée à partir d'essais pressiométriques, la contrainte nette est déterminée ainsi (NFP94-261) :

$$q_{net} = k_p * p_{l*} * i_\delta * i_\beta$$

- pl* : pression limite du sol
- k_p : facteur de portance pressiométrique ; pour un sol sableux, k_p = 1
- i_d : coefficient de réduction lié à l'inclinaison de la résultante des efforts sur la fondation ; pour un sol frottant $i_\delta = \left(1 - \frac{\delta_d}{90}\right)^2$ et $\delta_d = \tan^{-1}\left(\frac{H_d}{V_d}\right)$. On obtient $\delta_d = 28.67°$ et $i_\delta = 0.46$
- i_b : coefficient de réduction lié à la pente à l'aval de la fondation : en l'absence de talus à l'aval, i_b = 1

Note : pour des sols de natures différentes, les valeurs de k_p et la l'équation de détermination de i_d sont différentes (voir norme NFP 94-261).

On obtient :

$$q_{net} = 161kPa$$

Le calcul de la surface effective de la semelle A' s'effectue en déterminant l'excentrement e, qui se détermine par le calcul des moments agissant sur la fondation.

$$e = \frac{B}{2} - \frac{M_{net}}{V_d} \qquad \text{et} \qquad M_{net} = M_R - M_M$$

Avec

- B : Largeur de la base du gabion = 1m50
- M_{net} : moment net à la base de la fondation
- M_R: moment résistant
- M_M: moment moteur

Les moments sont calculés par rapport à la base aval du mur (point de pivotement potentiel).

$$M_R = P_{gabions} * \overline{x_G} + P_V * \overline{x_P}$$

$$M_M = P_H * \overline{y_P}$$

Avec $\overline{x_G}$, $\overline{x_P}$, $\overline{y_P}$ les points d'application des forces agissant sur le mur. Le point d'application de la poussée du terrain est situé à l'arrière du mur, à un tiers de la hauteur mécanique de l'ouvrage.

$$\overline{x_G} = \frac{1.5 * \frac{1.5}{2} * 1.3 + 1 * \left(0.2 + \frac{1}{2}\right) * 1}{1.5 * 1.3 + 1 * 1} = 0.73m$$
$$\overline{x_P} = 1.5m$$
$$\overline{y_P} = \frac{H_M}{3} = \frac{H + {}^{q}/_{\gamma}}{3} = 0.94m$$

Il vient :

$$M_R = 92.94kN.m/m$$
$$M_M = 44.01kN.m/m$$

Note *: la vérification au renversement n'est pas à vérifier au sens de la NFP94-281, la vérification au poinçonnement étant suffisante pour vérifier la condition de non-basculement ; on remarque ici que M_R est bien supérieur à M_M. Si le mur bascule, ce sera par défaut de résistance du sol.*

Les applications numériques successives donnent :

$$M_{net} = 48.93kN.m/m$$
$$e = 0.178m$$
A' = 1.14m
$$R_{v;d} = 131.1kN/m$$
$$R_{v;d} + R_0 = 139.65kN/m$$

Comme $V_d = 85.59kN/m$, la stabilité au poinçonnement est assurée.

5. Stabilité interne

La de stabilité interne comporte quatre vérifications :

- ✓ La stabilité au glissement à chaque niveau entre blocs
- ✓ La stabilité au cisaillement de chaque élément
- ✓ La stabilité au renversement de chaque élément
- ✓ La stabilité en compression de chaque élément

Les vérifications sont réalisées ainsi :

Rang	Largeur	Hauteur	Glissement	Cisaillement	Renversement	Compression
1	1m50	0.30m		X		X
2	1m50	1m	X	X	X	X
3	1m	1m	X		X	

Tableau 1 : synthèse des vérifications à réaliser (NFP 94-281)

Note : *Le glissement et le renversement ne sont pas effectués à la base du matelas gabion car il est en contact avec le sol de fondation et cela a été vérifié dans la stabilité externe.*
La vérification à la compression et au cisaillement du rang de tête n'est pas à réaliser, les vérifications sont basées sur le torseur des efforts en tête du bloc considéré, dont les valeurs sont nulles pour le rang de tête.

a. Vérification de stabilité au glissement entre blocs

Il est vérifié à chaque rang l'inéquation suivante

$$H_d \leq \frac{V_d f_g}{\gamma_{M;fg}} + \frac{c_g B}{\gamma_{M;cg}}$$

Avec:

- V_d et H_d: valeurs de calcul des efforts verticaux et horizontaux totaux calculés au niveau du rang i
- B est la largeur de contact entre le gabion au rang considéré et le gabion sous jacent
- f_g: valeur du coefficient de frottement du matériau de remplissage des gabions ; en considérant un matériau de remplissage avec un angle de frottement de 35° minimum, $f_g = 0.7$
- c_g: valeur de la résistance au glissement des agrafes. L'effort à l'ouverture d'une agrafe est égal à 2.2 kN (NF P 94-325-2). On limitera la valeur de c_g à 15 kPa

- $g_{M;fg}$: valeur du coefficient partiel relatif au coefficient de frottement pris égal à 1,1
- $g_{M;cg}$: valeur du coefficient partiel relatif à la contribution des agrafes à la résistance au cisaillement pris égal à 1,1

Pour le calcul de V_d et H_d, on utilise les même formules que pour la stabilité externe, en adaptant la hauteur d'application des efforts de poussée et du poids de l'ouvrage.

Rang	H_d	V_d	B	$\frac{V_d f_g}{\gamma_{M;fg}} + \frac{c_g B}{\gamma_{M;cg}}$
Base du rang 2	37.19 kN/m	70.43 kN/m	1.50 m	65.27 kN/m
Base du rang 3	12.73kN/m	26.36kN/m	1.00 m	30.41 kN/m

Tableau 2 : résultat des calculs de stabilité interne au glissement

La stabilité interne au glissement entre rangs est vérifiée.

b. Vérification au renversement d'un bloc

Il est vérifié à pour chaque bloc l'inéquation suivante :

$$\gamma_F M_{dst;k} \leq M_{stb;k}/\gamma_{R;d}$$

- $M_{stb;k}$: valeur caractéristique des moments stabilisateurs
- $M_{dst;k}$: valeur caractéristique des moments déstabilisateurs
- $g_{R;d}$: valeur du coefficient partiel relatif aux résistances égale à 1,1
- g_F: valeur du coefficient partiel relatif aux actions égale à 1,35

Pour le calcul de $M_{dst;k}$ et $M_{stb;k}$, on utilise les même formules que pour la stabilité externe, en adaptant la hauteur d'application des efforts de poussée et du poids de l'ouvrage.

Note : la vérification porte sur les valeurs caractéristiques (sans application des coefficients partiels)

Rang	$H_{c;k}$	$V_{c;k}$	$M_{dst;k}$	$M_{stb;k}$	$\gamma_F M_{dst;k} \leq M_{stb;k}/\gamma_{R;d}$
Base du rang 2	26.54 kN/m	61.42 kN/m	22.99kN.m/m	62.10 kN.m/m	31.04 ≤ 56.45
Base du rang 3	8.92 kN/m	23.14 kN/m	4.54 kN.m/m	15.34 kN.m/m	6.13 ≤ 13.95

Tableau 3 : Résultats des calculs de stabilité interne au renversement

La stabilité interne au renversement entre rangs est vérifiée

c. Vérification de stabilité au cisaillement d'un bloc

Il est vérifié pour chaque bloc l'inéquation suivante :

$$\tau_d \leq \frac{\sigma_d f_c}{\gamma_{M;fc}} + \frac{c_c}{\gamma_{M;cc}}$$

Avec:

- t_d et s_d : valeurs de calcul des contraintes tangentielles et verticales totales calculées au niveau du rang i
- f_c: valeur du coefficient de frottement fictif des structures gabions, due au frottement des pierres de remplissage
- c_c: valeur de la cohésion fictive des structures gabions, due à la présence de l'enveloppe en grillage métallique
- $g_{M;fc}$: valeur du coefficient partiel relatif au coefficient de frottement fictif pris égal à 1,1
- - $g_{M;cc}$: valeur du coefficient partiel relatif à la valeur de la cohésion fictive pris égal à 1,1

La contrainte appliquée sur chaque rang est définie par la relation entre l'effort normal V_d et la surface effective de contact A', qui dépend de l'excentrement (A' = A-2e).

A l'instar de la stabilité externe, l'excentrement e se calcule à partir des moments exercés sur les rangs considérés en valeurs de calcul (pondérées)

Rang	H_d	V_d	$M_{dst;d}$	$M_{stb;d}$	M_{net}	e	s_d
Base du rang 2	37.19 kN/m	70.43 kN/m	31.24 kN.m/m	75.62 kN.m/m	44.02 kN.m/m	0.12m	55.90 kPa
Base du rang 3	12.73kN/m	26.36kN/m	6.49 kN.m/m	18.56 kN.m/m	12.07 kN.m/m	0.04m	28.65kPa

Tableau 4 : Résultats des calculs de stabilité interne au cisaillement

Note : les points d'application des efforts pour le calcul des moments sont les suivants

Rang	$\overline{x_G}$	$\overline{x_P}$	$\overline{y_P}$
Base du rang 2	0.73 m	1.5 m	0.84 m
Base du rang 3	0.50 m	1 m	0.51 m

Tableau 5 : Position des points d'applications des efforts

La contrainte tangentielle de cisaillement est définie par le rapport entre l'effort horizontal de cisaillement H_d et la largeur du bloc considéré.
On peut alors vérifier l'inéquation :

Rang	t_d	$\frac{\sigma_d f_c}{\gamma_{M;fc}} + \frac{c_c}{\gamma_{M;cc}}$
Rang 1	24.79 kPa	49.21 kPa
Rang 2	8.48 kPa	31.87 kPa

Tableau 6 : Résultat des calculs de stabilité interne au cisaillement

La stabilité interne au cisaillement des rangs est vérifiée

d. <u>Vérification à la compression des blocs</u>

Il est vérifié pour chaque bloc l'inéquation suivante :

$$\gamma_F V_{c;k} \leq R_{c;k}/\gamma_R$$

- $V_{c;k}$: valeur caractéristique de la résultante des efforts verticaux qui est égale au poids total de la colonne d'éléments (matériau de remplissage compris) en tenant compte éventuellement de la composante verticale de la poussée
- $R_{c;k}$: valeur caractéristique de la résistance à la compression des éléments déterminée à partir **d'essais expérimentaux.** $R_{c;k} = \sigma_{c;k} * B$
- g_R: valeur du coefficient partiel relatif aux résistances qui vaut 1,25
- g_F: valeur du coefficient de modèle à considérer qui vaut 1,1

Note : à l'instar de la vérification au renversement, le calcul se fait à partir des valeurs caractéristiques

En reprenant les valeurs calculées pour la vérification au renversement, il vient :

Rang	$V_{c;k}$	B	$\gamma_F V_{c;k} \leq R_{c;k}/\gamma_R$
Rang 1	61.42 kN/m	1.50m	$67.56 \leq 480$
Rang 2	23.14 kN/m	1.50m	$25.45 \leq 480$

Tableau 7 : Résultat des calculs de stabilité interne à la compression

La stabilité interne à la compression des rangs est vérifiée

Exemple de chantiers

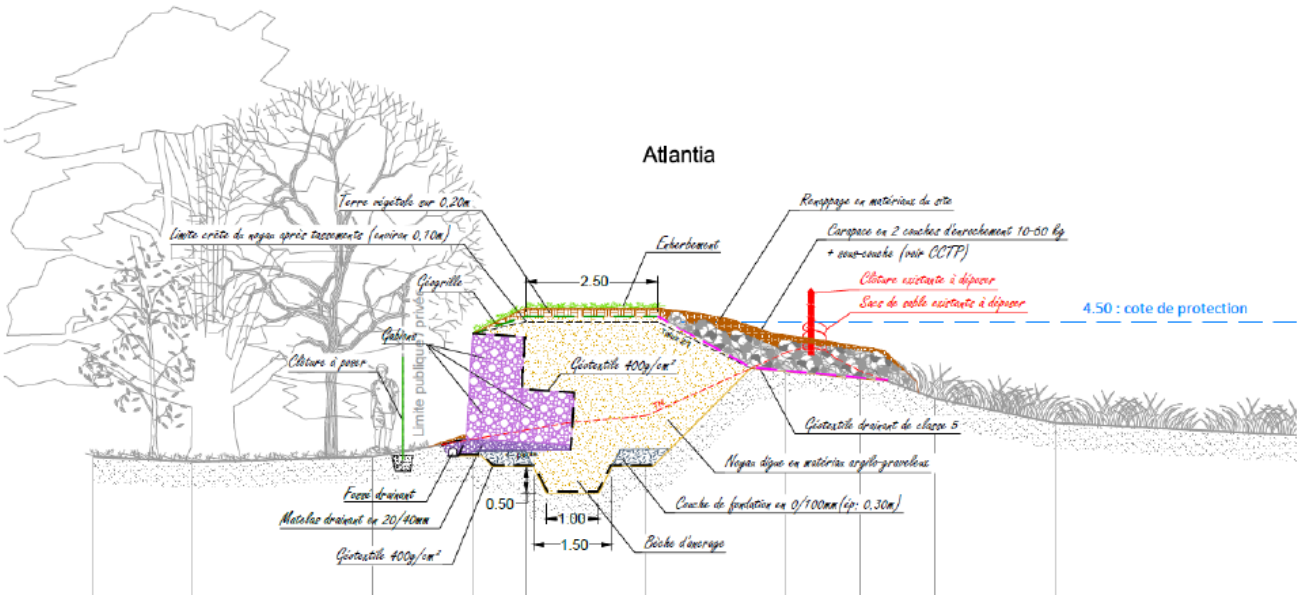


Figure 10 : Confortement des berges des digues de La Baule / Le Pouliguen (44) (Source : Artélia)

Figure 11 : photo en cours de chantier (Crédit photo : Maccaferri)

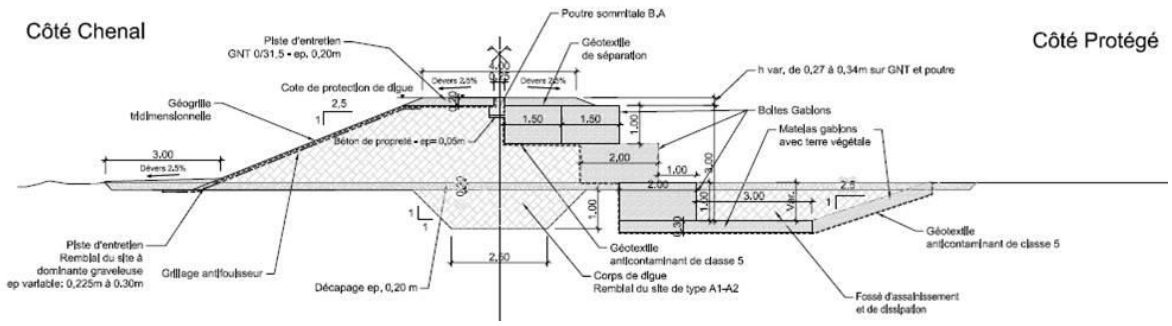


Figure 12 : Digue de Cuxac d'Aude (11) (Source : BRL Ingénierie)

Figure 13 : Digue de Cuxac d'Aude (11) (Crédit photo : Maccaferri)

	Fiche technique **Rehausse de digue par mur, muret et murette** Crest heightening thanks to wall	**Fiche FT 6.1**

Auteurs principaux : C. CHARTON (Maia Sonnier)
Contributeurs : JC. PALACIOS (Safege) ; M. SUTTER (INRAE) ; D. POULAIN (INRAE) ; R. TOURMENT (INRAE)
Relecteurs : S. PATOUILLARD (DREAL Centre-Val de Loire) ; P. LEDOUX (Cerema)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais :
An anti-flood wall is defined as any concrete, reinforced concrete, or masonry structure that increases the crest height and thus the level of protection of a dike. The distinction between terms is made with respect to the size and design of the enhancement. The walls may have a simple rectangular or trapezoidal profile, an L-shaped or T-shaped, or be recessed.

These anti-flood walls are to be distinguished from wave-barrier walls that are not designed to retain a permanent head and prevent any water passage; some low walls can have both functions.

Étude(s) de cas correspondante(s) :
T.4.5.1 Travaux de protection contre les inondations et de restauration environnementale de l'Yzeron à Oullins (69) pour le SAGYR

Indications :

Définition :

On qualifie de mur, muret ou murette anti-crue tout ouvrage en maçonnerie, béton ou béton armé permettant d'augmenter la cote de crête et donc le niveau de protection d'une digue. La distinction entre les termes est faite au regard de la taille et de la conception de la rehausse.

Ces murets anti-crues sont à distinguer des murs pare-vagues qui n'ont pas vocation à retenir une charge permanente et empêcher tout passage d'eau même si certains murets peuvent avoir les deux fonctions.

Les murs, murets et murettes ont généralement un profil rectangulaire ou trapézoïdal simple (des profils différents – parabole par exemple – ou plus complexes peuvent aussi se trouver), un profil en L ou en T, voir encastrés. Ils peuvent être réalisés en maçonnerie, en béton conventionnel ou armé, les profils complexes (T, L, encastrés) étant généralement en béton armé pour le report des efforts (Figure 1).

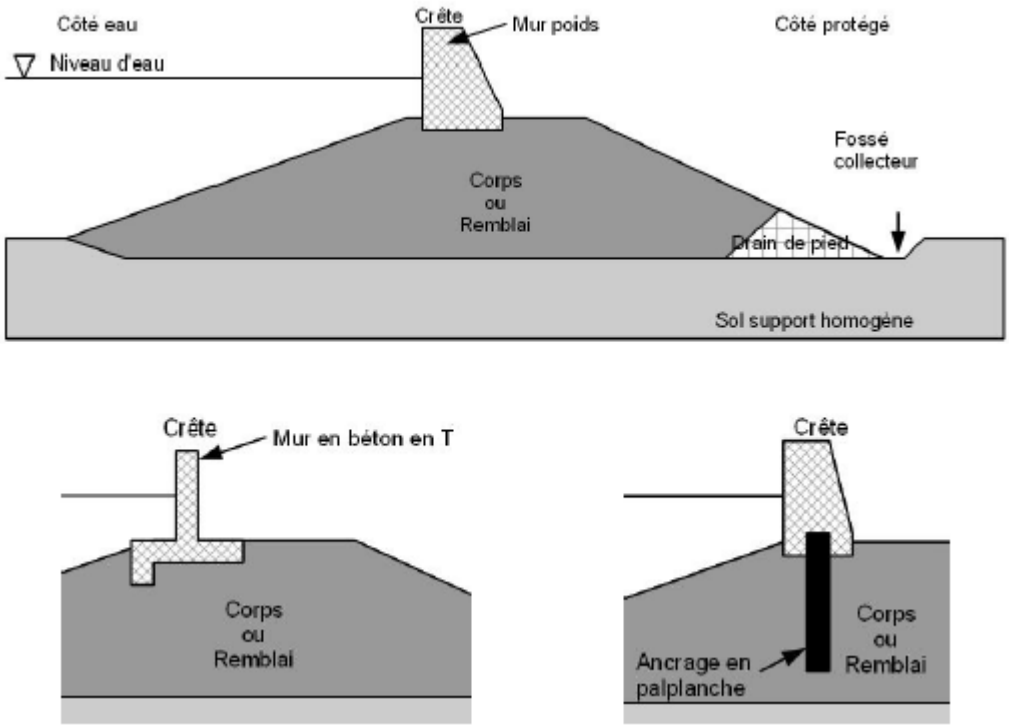


Figure 1 : quelques conceptions envisageables pour un mur/muret/murette anti crue (Source : Référentiel technique digue maritimes et fluviales – MEDDTL)

Sujet de la fiche :

Cette fiche s'intéresse aux ouvrages béton ou maçonnés mis en place en crête de digue afin d'en augmenter la cote et ainsi leur permettre de jouer leur rôle de protection pour une crue de période de retour donnée.

Fonction(s) principale(s) :

Lorsqu'ils sont ajoutés sur des digues en remblai existantes, les murs, muret et murettes anti-crues ont

pour fonction principale d'augmenter le niveau de protection contre les crues.

Dans une conception plus globale de la digue, leurs fonctions sont celles recherchées pour la digue : retenir les eaux jusqu'à une cote définie.

Fonction(s) secondaire(s) :

Des fonctions secondaires peuvent être identifiées :

- libérer de l'emprise en crête d'ouvrage pour les circulations ou pour les riverains, par rapport à une rehausse en remblai ;
- soutènement ;
- parapet pour les circulations en crête d'ouvrage ;
- une intégration architecturale dans le paysage.

Description :

Performances recherchées :

- Atteindre la cote recherchée afin qu'elle présente une cohérence sur l'ensemble du système d'endiguement (éviter des créer des points bas permettant une surverse non contrôlée) ;
- présenter une continuité mécanique et hydraulique avec le corps de digue ;
- avoir une emprise minimale.

Utilisation :

La rehausse murette anti-crue est utilisée dans les domaines fluviaux, maritimes et estuariens.

Ce type de confortement vient pallier une cote de crête trop basse résultant :

- d'une ré-estimation de la crue de dimensionnement ;
- d'un souhait d'augmenter le niveau de protection ;
- pour permettre d'uniformiser la cote de la crête sur un tronçon.

Il peut également être mis en œuvre afin d'améliorer la stabilité de la digue à emprise constante, par exemple en remplaçant par un muret la partie supérieure du remblai.

Variantes :

- Possibilité de préfabriquer les murettes pour une rapidité de mise en œuvre ;
- de tels murs peuvent consister à prolonger verticalement des ouvrages de soutènement ;
- choix du matériau constituant la murette : généralement en béton, béton armé ou maçonnerie ;
- ancrage dans le sol de la digue et/ou de la fondation.

Alternatives

En termes de rehausses de digue, il existe deux principales alternatives aux murettes anti crues :

- Les rehausses en remblai (cf. FT 6.3) ;

- Les rehausses amovibles, qui présentent l'avantage de conserver une faible emprise (cf. FT 6.2).

Dimensionnement :

Principe :

Le dimensionnement de la murette consiste à définir sa hauteur suite au dimensionnement hydraulique (cf. chapitre introduction générale) vérifier sa stabilité, d'une part interne et, d'autre part au renversement et au glissement.

Par ailleurs il est indispensable de vérifier :

- que l'implantation de la murette ne dégrade pas la stabilité globale de l'ouvrage ;
- qu'il n'y a pas de risque d'érosion interne au contact du mur et de la digue en remblai ;
- qu'en cas de surverse la partie recevant l'eau résiste à l'érosion (une chute étant nettement plus préjudiciable qu'un écoulement surfacique).

Paramètres nécessaires :

Avant de mener à bien une étude de dimensionnement de mur ou murette anti crue, il est en particulier nécessaire de connaitre :

- les caractéristiques des sols (sondages pressiométriques par exemple) ;
- les surcharges à prendre en compte (notamment les surcharges induites par le mur sur le corps de la digue) ;
- les efforts dus aux variations du niveau d'eau.

Eléments de conception :

- Choix du matériau et du profil type ;
- choix de mise en œuvre dépendant notamment de l'accessibilité au site (matériel de levage) et de l'emprise disponible (possibilité d'aire de préfabrication) …
- période de travaux ;
- limiter la coupure des corridors de faune.

Modèles :

- **Calculs de stabilité :**

Modèles classiques de calcul de stabilité mécanique (barrage poids, murs de soutènement, murs en béton armé…).
À ces sujets nous invitons notamment à consulter à consulter les EUROCODES 7 et en particulier l'annexe nationale française sur les normes :

- NF P 94-281 pour les conceptions de type murs poids ;
- NF P 94-282 : pour les conceptions de type écran.

- **Calculs hydrauliques**

Modèles permettant de définir le niveau de crête (voir le chapitre d'introduction générale).

Aspects pratiques (CCTP, chantier) :

Cahier des charges :

Pas de spécificité par rapport au cahier des charges définis de manière générale dans le chapitre 2 de la partie I du document, les éléments spécifiques de la conception seront également ici repris.

Chantier :

Le déroulement d'un chantier de rehausse par murette anti-crue suit généralement les étapes suivantes :

- réalisation d'une piste d'accès (si nécessaire) ;
- aménagement de la zone de travaux, création ou aménagement d'une zone de stockage ;
- terrassement et blindage éventuel au droit des futurs murs si besoin (réalisation d'une semelle, d'un soutènement …) ;
- mise en place du matériel de coffrage si le mur est coulé en place ou d'une plateforme de lebage (grue) pour la pose d'éléments préfabriqués…
- mise en œuvre du mur : béton de propreté, ferraillage et bétonnage si coulé en place ;
- mise en place si nécessaire des composants complémentaires matériaux drainants, géotextile, système d'évacuation.

L'ordre des étapes précitées devra être défini au préalable.

Nota : Réaliser les murets coulés en place est souvent une solution plus intéressante : gain de place, matériel moins encombrant. En cas de problème de délai, une solution « tout préfabriqué » peut tout de même être envisagée, mais il faut prêter attention au traitement de l'étanchéité des joints entre éléments.

Dans le cas d'un mur en béton armé, les spécifications suivantes pourront être prises en compte :

- la semelle du muret est mise hors gel sous le remblai fini ;
- suivant la conception du mur, un massif en matériaux drainants peut-être disposé sur la semelle (si présence d'une semelle) coté zone protégée afin de garantir la non mise en charge de l'ouvrage (côté zone protégée) en cas de surverse. Ce massif est entouré de géotextile filtrant. Ce matériau drainant doit être résistant également à l'érosion (granulométrie à respecter) s'il est mis en place jusqu'au niveau fini de la digue ;
- pour la gestion des écoulements internes à l'ouvrage, il peut être mis en place :
    - un clapet anti-retour : celui-ci permet d'évacuer les eaux du massif qui transitent dans le massif drainant et plus généralement dans le remblai de digue. Il peut également permettre l'évacuation des eaux de surface ayant pu être collectées (par un avaloir, un fossé…). La buse de l'organe d'évacuation, implantée dans le massif drainant doit présenter des ouvertures adéquates à son extrémité. Un calcul doit être mené pour connaitre le nombre de conduites à implanter afin d'évacuer les eaux notamment dans le cas le plus critique du ressuyage de la crue de référence ;
    - un drain remontant à la surface : l'évacuation se fait alors côté zone protégée avec récupération des eaux dans un fossé de pied ;
- mise en place d'un joint de dilation équipé d'un joint waterstop par plots de 5 à 10 m (longueur à définir selon projet) afin de maintenir une continuité de l'étanchéité sur le linéaire de l'ouvrage (Figure 2).

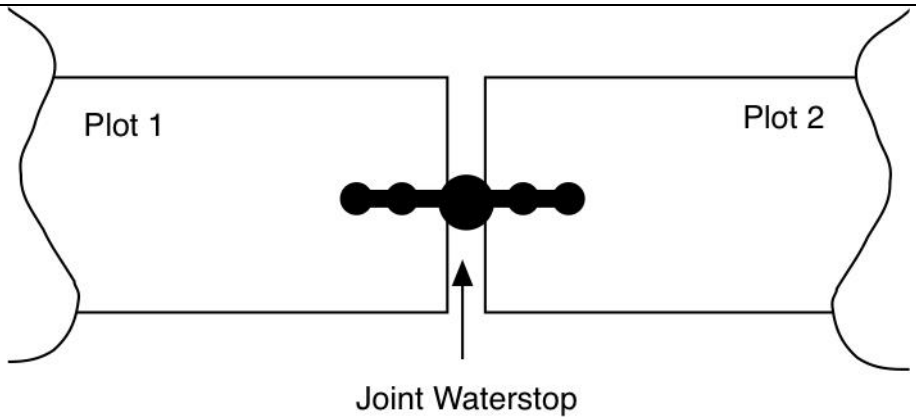


Figure 2 : Principe de mise en place d'un joint type Waterstop (Source : Rémy Tourment)

Une rehausse par muret est systématiquement associée à un dispositif de protection externe, afin d'empêcher l'érosion des parements de la digue et des matériaux de fondation du muret. Cette érosion risquerait en effet de déstabiliser la rehausse.

Matériaux et matériels nécessaires à la réalisation d'un mur, muret ou murette :

Si béton coulé en place :

- 1 petit engin de levage de type manuscopique ;
- coffrage manuportable ;
- béton ;
- ferraillage ;
- 1 Camion toupie pompe pour approvisionnement du béton ;
- un jeu d'aiguilles vibrantes ;
- petit outillage de ferraillage / coffrage / bétonnage.

Si préfabriquée (béton ou autres) :

Au-delà du matériel classique, on peut notamment noter les spécificités suivantes :

- 1 Camion 8x4 pour l'approvisionnement des murs sur la zone de pose ;
- 1 Grue adaptée à la pose des murs ;
- étais tirants-poussants ;
- 1 Pince pour la manutention.

Nuisances/environnement :

- emprise nécessaire à la mise en place ;
- gêne potentielle pour les riverains.

Contrôle d'exécution :

Pas de spécificité par rapport aux contrôles d'exécution évoqués de dans le chapitre 2 de la partie I du document.

Vitesse d'avancement :

Quelques mètres à plusieurs dizaines de ml/jour selon nature et taille du muret.

Traitement des points singuliers (cf fiches SG 8):

- contact entre mur et digue (voir plus haut) ;
- extrémités de la semelle des murs en T ou en L ;
- extrémités (à adapter selon raccordement à un ouvrage rigide ou un remblai) ;
- traversées éventuelles de réseaux ;
- ouvertures dans les murs (batardeaux).

Remise en état du site :

Pas de spécificité de remise en état du site par rapport à ceux évoqués de dans le chapitre 2 de la partie I du document.

Références :

- NF EN1990, Eurocodes structuraux - Bases de calcul des structures et les annexes nationales correspondantes,
- NF EN1991, Eurocode 1 : Actions sur les structures et les annexes nationales correspondantes,
- NF EN1992-1, Eurocode 2 – partie 1 : Calcul des structures en béton – règles générales, et les annexes nationales correspondantes,
- Ouvrages de soutènement : guide de conception générale, SETRA, 2010
- NF P 94-281 : Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Ouvrages de soutènement - Murs
- NF P 94-282 : Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènement - Écrans

Annexes :

Figure 3 : Travaux de protection contre les inondations et de restauration environnementale de l'Yzeron à Oullins (69) pour le SAGYRC. L'aménagement sert à la fois de protection contre les crues et de garde-corps pour les riverains. (Crédit photo : MAIA SONNIER)

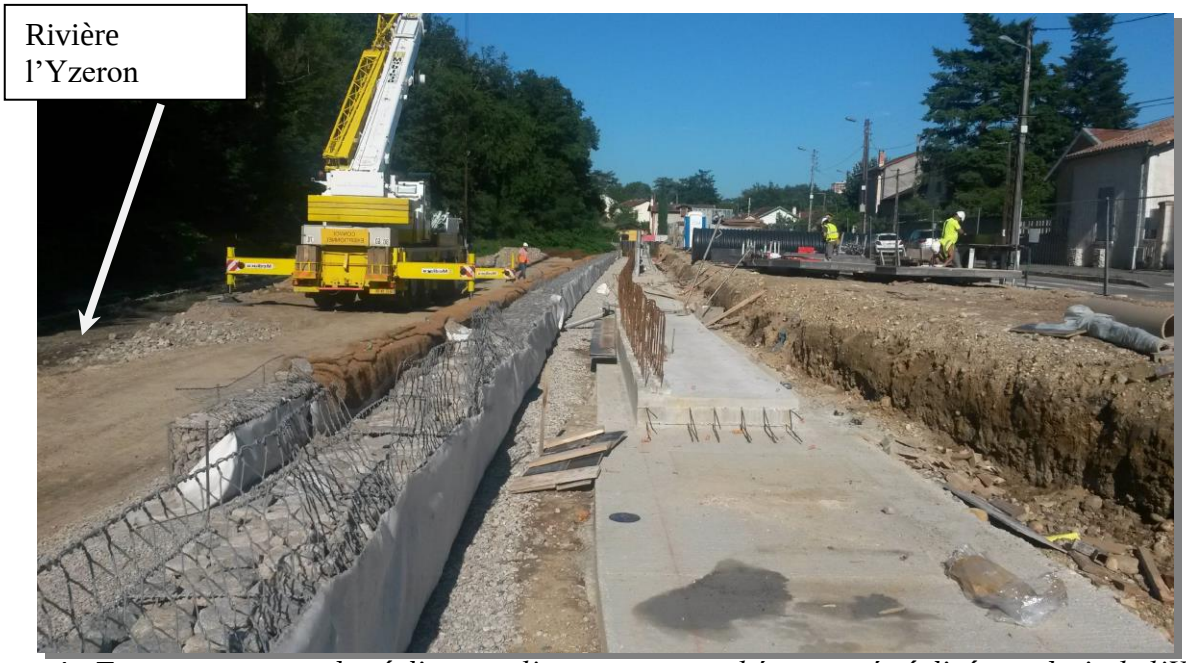


Figure 4 : Travaux en cours de réalisation d'une murette en béton armé réalisée au droit de l'Yzeron (Crédit photo : MAIA SONNIER)

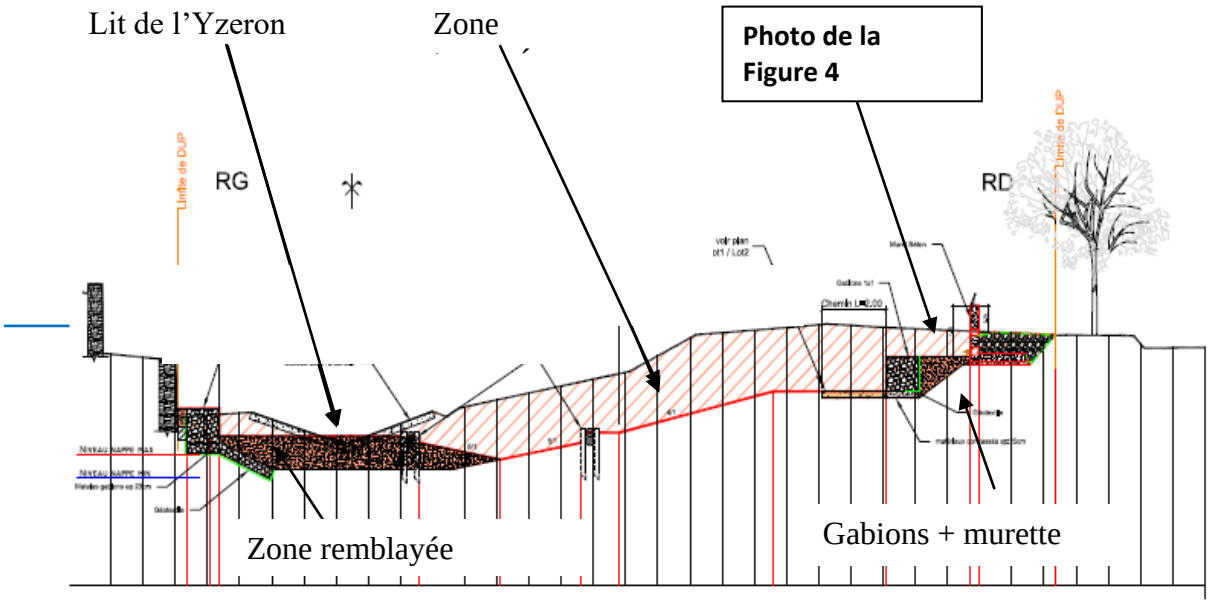


Figure 5 : Coupe de principe sur les travaux réalisés au droit de l'Yzeron, voir photo Figure 4 (Source : MAIA SONNIER)

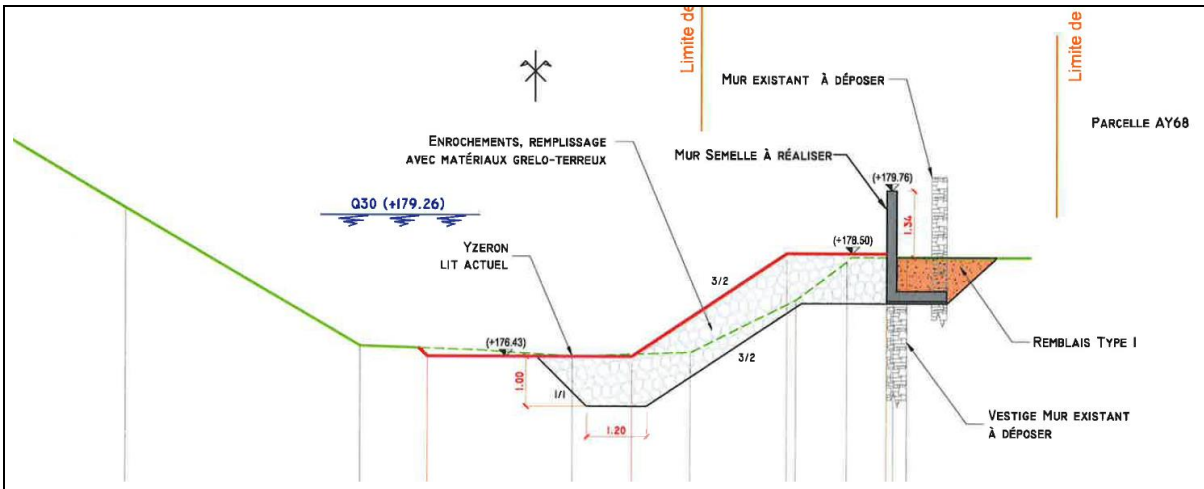


Figure 6 : Coupe de principe de rehausse avec murette anti crue (Source : MAIA SONNIER)

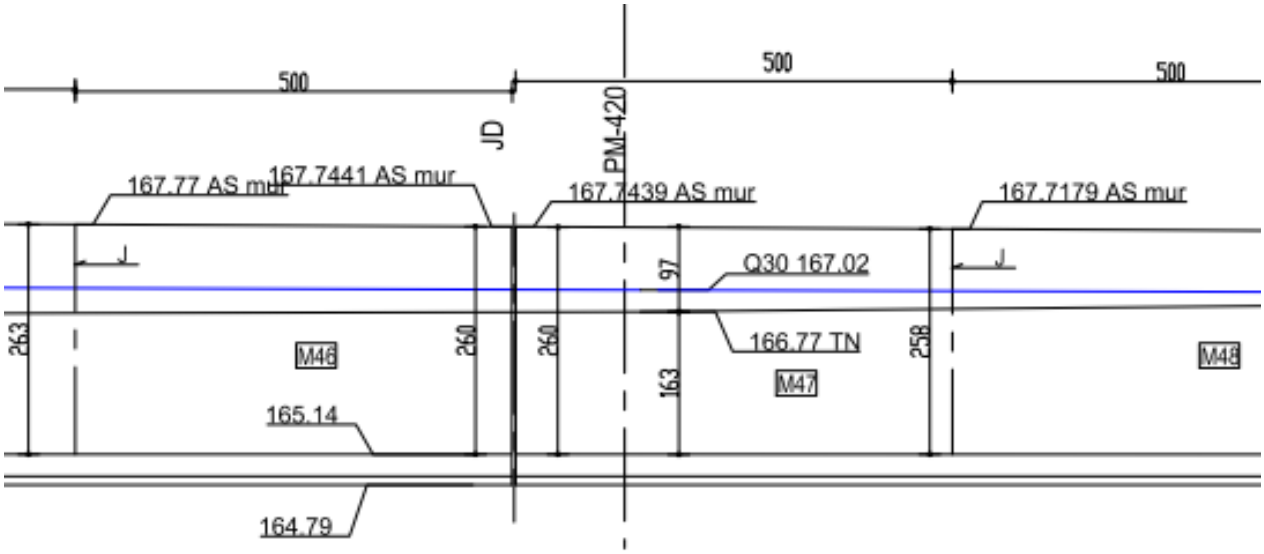


Figure 7 : Plans de coffrage des murettes de rehausse, coupe longitudinale. Les niveaux des cotes varient, car l'arase supérieure de la murette sert à la fois à se protéger de la crue Q30 et de garde-corps vis-à-vis de la rue à l'arrière – unités en m. (Source : MAIA SONNIER)

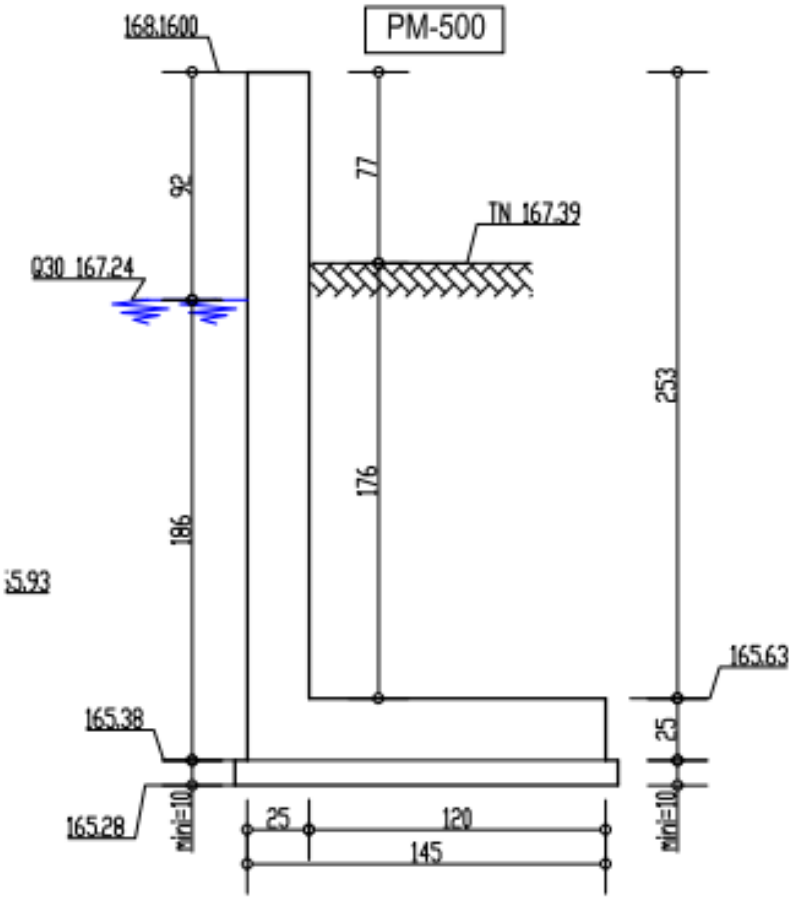


Figure 8 : Plans de coffrage des murettes de rehausse, coupe transversale de la murette – unités en m (Source : MAIA SONNIER)

Figure 9 : Rehausse sur les digues de Nevers en rive gauche (Crédit photo : Cerema)

	Fiche Technique **Rehausse temporaire à fondation permanente sur un linéaire de digue** Removable flood defence	**Fiche FT 6.2**

Auteurs principaux : L. PERRET (ESTHI)
Contributeurs : JC. PALACIOS (Safege) ; M. SUTTER (INRAE) ; D. POULAIN (INRAE) ; R. TOURMENT (INRAE)
Relecteurs : JF. FREZET (EGIS) ; P. LEDOUX (Cerema) ; PL. REGAZZONI (EGIS)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais :
Removable stoplogs also called removable flood defence system are a common technique used to provide temporary or/and mobile water retention. The most common technique is the use of a waterproof walls made of steel or aluminium posts (IPN/HEA type) and beams with seals to ensure low leakage. Other recent techniques include mobile systems made of air or water-filled tubes and passive techniques where no human intervention nor energy is needed. The installation of stoplogs needs a careful coordination with the civil engineering works (foundations.) and must follow manufacturer tolerances in order to get a low water leakage rate.

Étude(s) de cas correspondante(s) :
C4.6.1Protection de la ville de Givet (Ardennes) par un batardeau amovible de 3000 m^2

- **Indications :**

Définitions :

Les rehausses temporaires (ou amovibles) sont des structures linéaires invisibles, camouflées ou démontées hors crue : elles sont effacées visuellement et hydrauliquement.
Même effacées, les fondations, nécessaires à la mise en place des structures restent en place.

Au niveau structurel on peut donc définir ce type d'ouvrage, par :

- une fondation en place de manière permanente ;
- une partie mobile, dont la mise en place est réalisée de manière manuelle ou automatique avant l'arrivée d'une crue.

Sujet de la fiche :

Dans cette fiche, il sera question de différentes structures de tels ouvrages :

- les barrières modulaires dont la conception est similaire aux ouvrages de soutènement type parois berlinoises (Figure 1). Ces barrières sont formées d'éléments verticaux ancrés en fondation, entre lesquels des panneaux imperméables ou poutres jointes sont insérées ;
- les barrières rigides, qui sont des panneaux relevés en cas de crue pour empêcher l'eau de passer (Figure 2) ;
- les barrières flexibles, formées d'un matériau imperméable maintenu par des contreventements (Figure 3 et Figure 4) ;

Figure 1 : Exemple d'un système anti-crue type batardeau en aluminium
(Crédit photo : ESTHI)

Ces systèmes peuvent être utilisés en tant que rehausse d'une protection existante (rehausse de digue ou muret anti-crue) ou seuls comme une rehausse unique.

Sont donc exclues du périmètre de la fiche les rehausses utilisées en situation de travaux, pour une mise à sec du chantier ou en situation de crise.

Dans ce dernier cas, il existe de nombreuses techniques de protection amovibles qui sont bien adaptées aux situations de crise (confortement ou réparation d'urgence) ou à l'usage comme ligne de défense secondaire (protection individuelles des biens). On trouvera des informations à ces sujets dans la fiche FT 5.1 portant sur les géoconteneurs.

Rappelons que les protections temporaires définies en urgence sont à mettre en œuvre avec précaution car :

- la mise en place de la protection temporaire peut conduire à des surverses non anticipées à des endroits mal identifiés. Ces surverses peuvent donner lieu à des conséquences plus graves que la surverse contre laquelle on a cherché à se protéger ;
- la mise en œuvre d'une rehausse sur un tronçon non qualifié en termes de stabilité peut causer une rupture localement par instabilité ou érosion interne.

Les rehausses considérées dans cette fiche vont de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres. Des rehausses jusqu'à 5 mètres de hauteur ont été érigées en Europe.

Fonction(s) principale(s) :

- Protection temporaire contre les crues permettant hors crue une continuité entre la Zone Protégée (ZP) et le lit du cours d'eau (continuité des liaisons routières, continuités des liaisons douces, continuité écologique et intégration paysagère si nécessaire) ;
- À l'instar de n'importe quelle digue, la fonction principale est de créer une paroi étanche à l'eau. Ces protections se différencient principalement par leur caractère amovible/temporaire/mobile mais aussi par les matériaux les constituants et leur mode de pose. Pour la plupart du temps, les ouvrages de rehausse amovibles sont intégrées dans un système d'endiguement complexe intégrant différents ouvrages hydrauliques (digues en terre, barrages, vannes…).

Fonction(s) secondaire(s) :

- Isolement d'ouvrages en cours d'eau en vue de maintenance et réparation (batardage).

Description :

Performances recherchées :

- Les ouvrages de rehausse amovibles, doivent, de par leur conception, être mis en place avant la crue (ou le pic de crue) afin d'être fonctionnels. Les principales performances qu'ils doivent remplir sont donc liées à cet impératif :
    - mise en œuvre en adéquation avec le temps d'alerte de la crue et les moyens disponibles : si ce temps est court, il sera souhaitable de privilégier des dispositifs automatiques ou semi automatiques ;
    - si une mise en œuvre manutentionnée/manuelle est nécessaire :
        - le poids des structures est à minimiser ;
        - les manœuvres et processus de mise en place doivent être simplifiés et fiables ;
    - un encombrement du dispositif démonté en adéquation avec l'espace de stockage disponible ;
    - disposer d'une protection et de moyens pour s'assurer du bon fonctionnement des éléments en place de manière permanente. On les protégera notamment

contre le vandalisme s'ils intègrent des équipements hydrauliques, afin de pouvoir les déployer quand c'est nécessaire ;

- Ces structures doivent présenter des caractéristiques mécaniques en mesure de résister aux contraintes subies (charge d'eau, impacts…) ;
- Les ouvrages de rehausse amovibles doivent également atteindre la cote requise pour assurer la cohérence du système d'endiguement ;
- Bien qu'amovibles, il est indispensable que l'étanchéité de la structure soit suffisante pour éviter toute déstructuration de l'ouvrage, affouillement en pied, défaillance des dispositifs d'exhaure existants.

Utilisation :

L'utilisation de ces systèmes se fait principalement en milieu urbain, car ils permettent de limiter l'impact de la protection contre les inondations sur les axes de communication et l'esthétique de la ville.

Bien que la technique de la 'Paroi Berlinoise' (poutres horizontales empilée et maintenues en place par des poteaux en H) en aluminium ou en acier soit la plus couramment utilisée, de nombreuses variantes à cette technique existent, listées dans le paragraphe suivant.

Variantes :

Les rehausses amovibles pouvant nécessiter des temps de mise en œuvre importants, elles sont difficilement en mesure de former un système de protection entier. Elles sont la plupart du temps, intégrées dans un système de protection complexe comprenant différents ouvrages hydrauliques (digues en terre, barrages, vannes …).

On peut retenir deux types de variantes principales parmi ces équipements de protection « non mobiles », c'est-à-dire devant être mis en place sur une ligne de défense prédéfinie et pérenne.

- **Les dispositifs anti-crues démontables :** Cette catégorie regroupe l'ensemble des équipements de protection démontables et amovibles se posant au moment de l'annonce de crue. Les structures devant être mises en place sur une fondation existante peuvent parfois être stockées au niveau de la ligne de défense directement.

  Parmi ces structures, on retrouve aussi les structures quasi automatiques, c'est-à-dire généralement des structures stockées dans le sol et dont la mise en place nécessite une action humaine limitée (activation, déblocage…).

  On retrouve dans cette catégorie les ouvrages type « parois berlinoises » en aluminium. Leur conception peut être très variable : nature des points d'ancrage, nature des batardeaux, technique d'assemblage... On peut considérer que chaque constructeur a sa propre technique et propose ses propres dimensionnements de structure, pour des performances généralement équivalentes.

- **Les dispositifs anti-crues passifs :** Technologie plus récente (début années 2000), ces dispositifs se caractérisent par le fait que leur activation ne nécessite ni intervention humaine ni apport d'énergie. La barrière est stockée dans le sol soit à la verticale soit à l'horizontale et se lève automatiquement par la poussée d'Archimède. Elle redescend ensuite seule dans son caisson après la descente des eaux.

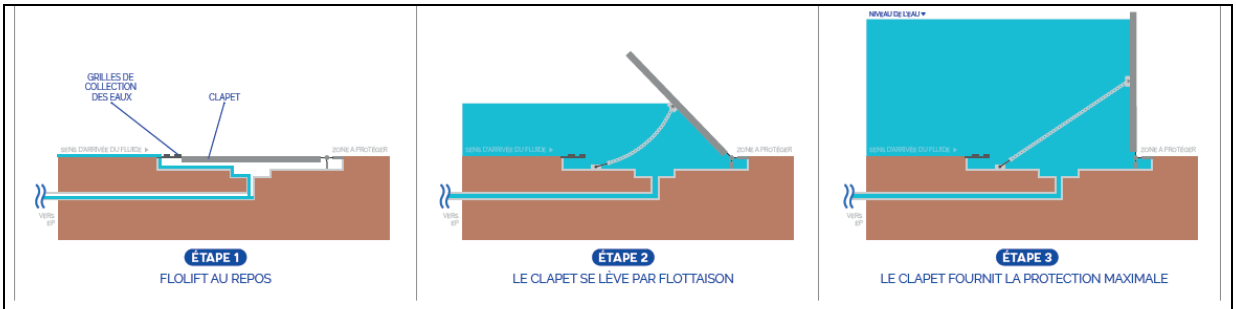


Figure 2 : FLOLIFT_H (ESTHI), un exemple de système anti-crue passif (Source : ESTHI)

Alternatives

D'autres techniques de rehausse anti-crue existent :

- **Les dispositifs anti-crues démontables mobiles et auto-stables :** Ces dispositifs ne nécessitent pas d'éléments fixes intégrés sur une ligne de défense définie. Aussi, ils peuvent se positionner sur différents sites d'où leur dénomination de protection mobile. Le sol sur lequel ils reposent doit cependant répondre à certains critères structurels et géométriques concernant notamment les aspérités, pentes, érodabilité… Leur mobilité implique qu'ils soient autostables, c'est-à-dire qu'ils sont conçus pour se maintenir érigés sans fondation ou support additionnel. En général, ils utilisent la pression de l'eau (ou du sable) pour leur ancrage et leur stabilité au sol.

  Par exemple, les tubes en PVC souple ou autres matériaux similaires que l'on gonfle d'air ou d'eau et qui fournissent une protection contre une crue. Ces dispositifs restent cependant moins fiables que les protections non mobiles dans le sens où l'ancrage est moins performant et qu'ils sont tributaires de la résistance du sol. Ils protègent donc pour des hauteurs inférieures aux dispositifs non mobiles (environ 1,5 m max de hauteur de protection ce qui couvre néanmoins un pourcentage élevé des besoins en crue). Leur mise en œuvre doit idéalement être prévue dans la cadre d'une étude globale de la ZP.

Figure 3 : Le K-System (ESTHI), un exemple de dispositif mobile auto-stable (Crédit photo : ESTHI)

Figure 4 : Le BOXWALL (ESTHI), un exemple de dispositif mobile auto-stable
(Crédit photo : ESTHI)

- **Les dispositifs anti-crues économiques :** Ces systèmes permettent d'ériger des barrières de protection à partir de sable ou matériaux tout venant. Ils sont en général constitués de modules de plusieurs mètres de long divisés en cellules ou compartiments que l'on remplit de sable (Figure 5). Leur auto-portance permet de les déployer et remplir rapidement. Ils constituent une alternative bien plus efficace que les sacs de sables.

Figure 5 : Le Rapid-Dam (ESTHI), un exemple de dispositif anti-crue économique
(Crédit photo : ESTHI)

Notons que ces deux familles de techniques sont particulièrement adaptées aux situations de crises et sont à exclure pour des rehausses en situation normale d'exploitation de la digue. Ces dispositifs sont souvent utilisés seuls en l'absence de digue en cas de crue exceptionnelle.

Pour rappel, les structures permanentes de rehausse sont présentées dans les fiches FT 6.3 (remblai) et FT 6.1 (murs).

Dimensionnement :

Principe :

Il n'existe pas de normes européennes spécifiques aux rehausses amovibles.

La plupart des fabricants de rehausses amovibles en aluminium et en acier utilisent donc pour

justifier leurs ouvrages les Normes Européennes de matériaux ainsi que certaines normes sur les équipements hydrauliques (listées en fin de fiche),
La technique consiste à mettre en place une paroi étanche reprenant la poussée hydrostatique, éventuellement un choc dynamique associé à des objets flottants et une étanchéité adaptée à sa fonction.

Dans ces dimensionnements, on retrouve les points clés suivants :

- un dimensionnement de fondation prenant en compte les sollicitations lorsque la rehausse est opérationnelle et lorsqu'elle ne l'est pas, et en prenant en compte les possibles écoulements dans le sol et les risques d'affouillement ;
- un dimensionnement de la structure mobile prenant en compte les contraintes de sa mise en place en plus de sa stabilité en charge ;
- une vérification globale de stabilité du système d'endiguement et de la partie d'ouvrage portant la rehausse.

Plus spécifiquement, lorsqu'une intervention humaine est nécessaire :

- le dimensionnement du système d'alerte crue ;
- le dimensionnement des moyens humains disponibles pour la mise en place du dispositif de protection (nombres de personnes, formation, organisation de l'astreinte).

Paramètres nécessaires :

Afin de mener à bien ce dimensionnement, il sera donc nécessaire de disposer de nombreux paramètres géotechniques, hydrauliques et structurels des matériaux supports et de la structure utilisée proprement-dite.
Notons en particulier qu'il faudra avoir la connaissance :

- du sol de fondation (généralement le corps de digue sous-jacent) et de son comportement ;
- de la nappe et des dispositifs d'exhaure ;
- de la Présence d'autres structures avoisinantes (éléments urbains, réseaux souterrains (DICT)…) ;
- de l'aléa hydrologique et des phénomènes associés (dont vitesse de montée de la crue et nature/caractéristiques des embâcles, notamment leur masse) ;
- des dispositifs et moyens techniques et humains mobilisables.

Eléments de conception :

- La rapidité de montage (entre quelques minutes à quelques heures généralement) : on fera le choix en fonction des possibilités de déploiement, des moyens mobilisables…) ;
- Le poids et la taille des éléments (de quelques kg à plusieurs centaines de kg par élément) : on cherchera à le minimiser dans le cas d'une mise en place manuelle. Cette contrainte est d'autant plus forte dans les zones à fort vent ;
- La facilité du montage : on cherchera à ce qu'un personnel non qualifié puisse monter la protection. Cela passe par le choix de pièces ayant un emplacement spécifique, une limitation des complexités de montage… ;
- La facilité de stockage/ nombre de pièces détachées différentes : on cherchera à limiter l'encombrement une fois démonté ;

- La gestion de possibles accumulations d'eau (pluie, ruissellement, remontée des eaux souterraines…) dans la Zone Protégée. Il faut aussi prévoir la récupération des fuites d'eaux du batardeau (pompage, drainage) ;
- Le choix du matériau : suivant le milieu environnant, il faudra par ailleurs adapter les matériaux utilisés pour former la protection amovible, en intégrant les contraintes d'insertion paysagère (bois, nuances d'inox) et les contraintes d'agressivité des eaux (en milieu marin, on utilise généralement l'inox 316).

Modèle(s):

- **Partie amovible :**

Les modèles de dimensionnement des parties amovibles de la rehausse utilisent classiquement les règles de Résistance des Matériaux (RDM) et/ou de conception de soutènements qu'on retrouve dans les Eurocodes (3 pour les aciers ; 5 pour le bois et 9 pour l'aluminium).

Il s'agit principalement de justifier la résistance d'une structure soumise à une force statique.
La justification est plus complexe lorsque l'on fait intervenir des chocs dynamiques. Dans ce dernier cas, la rehausse doit être soumise à une modélisation en éléments finis.

La structure peut être modélisée comme :

- des poutres encastrées ;
- des voiles ancrés en pied ou maintenus par des tirants.

En milieu fluvial, il est commun afin de modéliser un choc dynamique de le simplifier en l'assimilant à une pression statique supplémentaire permanente en tête de batardeau : par exemple 20 kN/m² sur le mètre supérieur du batardeau, ce qui peut correspondre à un choc d'un tronc d'arbre de 1 Tonne avec une vitesse et un angle d'impact déterminés (Figure 6). Bien entendu, une étude approfondie est nécessaire si l'impact est considéré comme significatif et à occurrence probable.

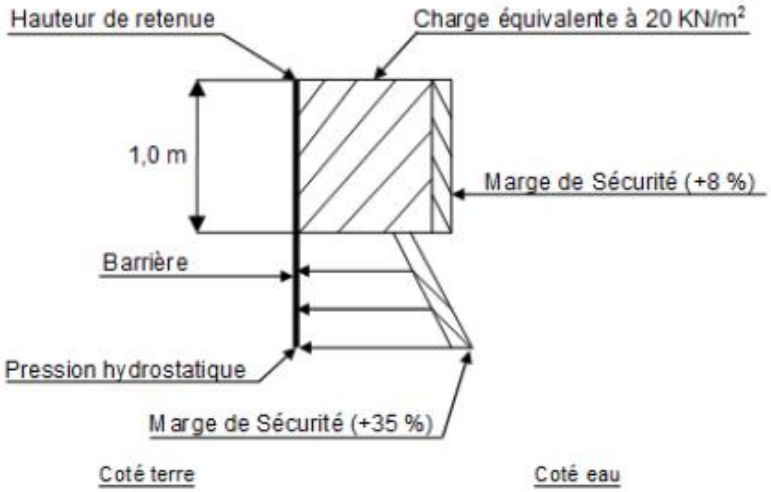


Figure 6 : Exemple de modélisation d'un choc d'objet flottant assimilé à un impact de 20 kN/m² en tête de batardeau (Source : ESTHI)

En milieu marin où les chocs dynamiques sont beaucoup plus importants, il devient souvent nécessaire de justifier l'ouvrage par une étude d'impact dynamique qui prendra en compte la force et la fréquence de la houle.
Dans les cas où la partie amovible est de manière permanente située au niveau de la ligne de

protection (barrières passives notamment), il sera nécessaire de veiller en particulier au bon fonctionnement du mécanisme d'activation par le biais d'un programme de maintenance bien suivi.

- **Fondation**

La partie fondation nécessitera des études similaires à celles effectuées pour un mur ou une murette anti-crue (voir fiche FT 6.1) : stabilité générale, stabilité au glissement, portance et non-poinçonnement du sol support.

Vérifier si l'eau peut s'infiltrer sous la rehausse amovible. Si tel est le cas, il sera peut-être nécessaire d'envisager un équipement visant à modifier/stopper le gradient hydraulique entre l'amont et l'aval du batardeau. Le rideau de palplanches est souvent utilisé dans ce cas.

Aspects pratiques (CCTP, chantier,) :

Cahier des charges :

En addition des éléments qu'on retrouve couramment dans les cahiers des charges des rehausses d'ouvrages hydrauliques, on prendra soin de décrire :

- les éléments relatifs à la partie permanente de l'ouvrage (profondeur d'ancrage, protection hors crue…
- les éléments relatifs à l'alerte de crue ;
- les éléments liés aux moyens mobilisables pour la mise en place du dispositif avant crue.

Chantier :

Construction du support de l'ouvrage (fondation/ancrage/rangement) :

- aménagement des accès ;
- amenée du matériel ;
- aménagement du site : démolition de la voirie (si besoin) ;
- identification des réseaux et modifications si nécessaires
- réalisation des fouilles, interface ligne de défense mobile-corps de digue (mur généralement) ;
- réalisation des fondations ;
- mise en place des équipements fixes : mécaniques ; hydromécaniques...

Mise en place des parties mobiles (si non déjà en place sur la ligne de protection) :

- réception d'une alerte crue (ou montage à blanc lors de la construction) ;
- amenée des parties mobiles de leur site de stockage à leur emplacement de pose ;
- mise en place de l'équipement (montage suivant des consignes définies et encadrées par du personnel formé) ;
- surveillance de l'ouvrage en crue, notamment de son étanchéité ;
- en fin de crue, démontage des équipements, nettoyage et remplacement/réparation des parties endommagées, rangement (afin que l'ouvrage soit à nouveau pleinement opérationnel à la prochaine alerte).

Pour la technique dérivée du soutènement type parois berlinoise, couramment utilisée à

l'heure actuelle, la mise en œuvre des parties mobiles est détaillée ci-après dans les annexes (Figures 9, 10, 14 et 15).
Des profilés en H verticaux (éléments mobiles) sont implantés sur la ligne de protection (élément fixe) à un entraxe précis puis des poutrelles sont encastrées entre chacun des H afin de constituer un mur tout le long du linéaire. Le mur ainsi constitué inclut des joints d'étanchéité entre chaque élément pour assurer un taux de fuite acceptable. Des valeurs sont données dans la norme DIN 19569-4
Le caractère amovible de ce type d'ouvrage nécessite l'utilisation de techniques appropriées :

- les poteaux en H sont en général vissés dans des platines d'ancrage qui restent à demeure ancrées dans la fondation ;
- les poutrelles doivent pouvoir facilement être encastrées entre les H puis facilement retirées après l'utilisation ;
- un dispositif d'étanchéité utilisant des joints entre chaque élément assure un taux de fuite acceptable ;
- un système de compression mécanique assure la compression des joints ;
- l'utilisation de matériaux légers comme l'aluminium facilite la manutention et permet un montage rapide avec peu ou sans engin de levage.

Matériel :

Il est à noter qu'une rehausse en batardeaux amovibles est un ouvrage qui intègre deux éléments bien spécifiques, chacun nécessitant des matériels spécifiques :

- une partie fixe, comprenant la fondation pérenne coulée en général dans le sol qui nécessite pour sa mise en place une bonne fois pour toute, l'ensemble des matériaux utilisés dans le domaine des fondations superficielles ou profondes : béton, ferraillage…
- une partie amovible en acier, aluminium (ou autre matériau) installée en surface dont la nature dépendra de la technique utilisée (poteaux, poutres, jambes de force). Dans la mesure du possible, on cherchera à limiter l'utilisation de matériel spécifique et à standardiser les éléments.

Nuisances/environnement :

Les parties fixes sont par définition assez peu visibles.
La principale nuisance à vérifier est l'impact sur l'écoulement des nappes à proximité d'un cours d'eau (zone d'échange nappe / cours d'eau) s'il est nécessaire d'avoir une fondation profonde pour garantir les performances hydrauliques de la barrière.

Contrôle d'exécution :

Concernant la rehausse amovible, il s'agira de s'assurer que :

- la coupe longitudinale de la rehausse respecte les tolérances constructeurs (pente maximum, courbes et angles, entraxes maximums entre poteaux amovibles…) ;
- la pose des éléments fixes (platines, glissières coulées dans le béton) suive les tolérances de pose constructeur. En règle générale, les fabricants fournissent les tolérances de pose et proposent souvent une assistance technique à la pose ;
- les procédures de pose soient intégrées par les équipes/ le personnel qui sera chargé de les mettre en place ;
- le seuil où repose la rehausse soit conforme aux exigences constructeur (reprise des aspérités sur enrobés par exemple ou sol pavés) ;

- le déroulement du montage à blanc a été correct ;
- les joints sont continus et intacts (contrôle visuel) et les pièces de liaisons toutes en places.

Point d'arrêt : avant le coulage béton des fondations des poteaux, un géomètre doit vérifier les tolérances de pose (entraxe/planéité des platines d'ancrage des poteaux, aplomb des glissières, etc.). Des constats contradictoires et des autocontrôles sont nécessaires.

Dans certains cas, un test en eau peut être effectué sur une partie de l'ouvrage.

Outre le contrôle d'exécution, il sera nécessaire de réaliser des contrôles du dispositif avec au besoin des montages hors crue régulier (exercice) tout au long de la vie de l'ouvrage, afin d'être certain de pouvoir mettre en œuvre la protection en cas de crue.

Vitesse d'avancement :

Une fois les supports mis en place lors du chantier, la pose des batardeaux doit être rapide et adaptée à la vitesse de montée de crue.

Traitement des points singuliers :

Afin d'éviter tout souci d'étanchéité au niveau des points particuliers de digue, il est dans tous les cas, préférable d'y associer une partie fixe.

Du fait de leur caractère non permanent, ces techniques peuvent se présenter comme un point faible des systèmes d'endiguement car leur mise en place dépend généralement d'un système d'alerte, de l'intervention humaine ou de mécanismes qui peuvent faire défaut. Par ailleurs le temps de mise en place peut être conséquent, limitant de fait le linéaire qui peut être équipé.

Remise en état du site

Après le passage de la crue, les batardeaux peuvent être rangés, laissant des ouvertures dans le système d'endiguement.
Un contrôle et si nécessaire un nettoyage des pièces fixes est à intégrer.

Références :

Il n'existe pas de normes européennes spécifiques aux batardeaux amovibles. De nombreux guides et ressources existent. Le projet Européen http://www.smartfloodprotection.com/ a récemment fourni une étude ample sur le sujet.

La plupart des fabricants de rehausses amovibles en aluminium et acier type parois berlinoises utilisent donc pour justifier leur ouvrage les normes Européennes de matériaux ainsi que certaines normes sur les équipements hydrauliques (dont les équipements de vantellerie type vannes murales et batardeaux d'assainissement) dont notamment les normes allemandes suivantes :

- DIN 19704-1. Constructions Hydrauliques Métalliques - Partie 1 : Dimensionnement : pression hydrostatique ;
- DIN EN 1990 (2010-12). EUROCODE 0 : Base de calcul des structures
- DIN EN 1991-1-1 (2010-12). EUROCODE 1 : Actions sur les structures - Part 1-1 : Actions générales- Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments.
- DIN EN 1993-1-1 (2010-12). EUROCODE 3 : Calcul des structures en acier - Part 1-1 : Règles générales et règles pour le bâtiment.
- DIN EN 1999-1-1 (2010-05). EUROCODE 9 : Calcul des structures en aluminium - Part 1-1 : règles générales.
- DIN 19569-4 (2000-11). Stations d'épuration- Principes de calcul des structures et équipements techniques - Partie 4 : Principes spécifiques pour équipements de régulation : Vannes murales, batardeaux…
- DIN 19569-4 Stations d'épuration - Principes de construction pour bâtiments et équipements - Partie 4: Principes spéciaux pour organes de vannage - Kläranlagen - Baugrundsätze für Bauwerke und technische Ausrüstungen - Teil 4: Besondere Baugrundsätze für gehäuselose Absperrorgane. Cette norme est la plus utilisée en Europe pour ce qui concerne le taux de fuite admissible

- Temporary and demountable Flood Protection Guide, Flood and Coastal Erosion Risk Management Research and Development Program , Defra-EA, 2011.

- Les sites de producteurs (non exhaustif): ESTHI, IBS, ThyssenKrupp,

Annexes :

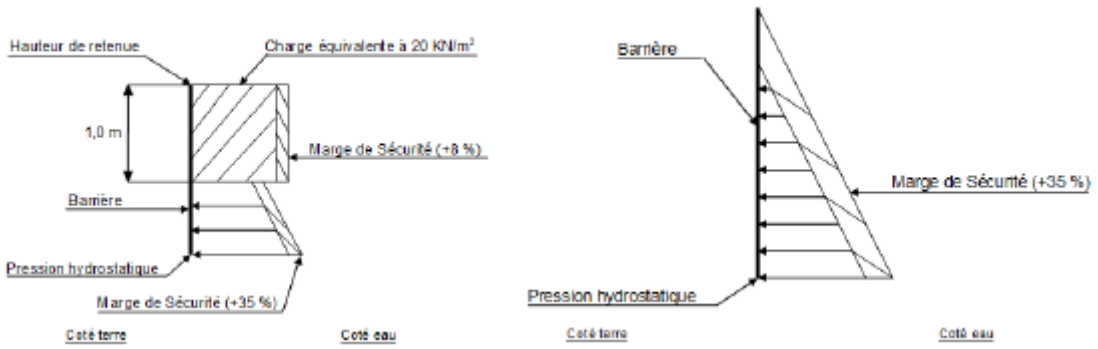


Figure 7 : Exemple de modèle de dimensionnement de batardeaux amovibles (Source : www.esthifrance.com)

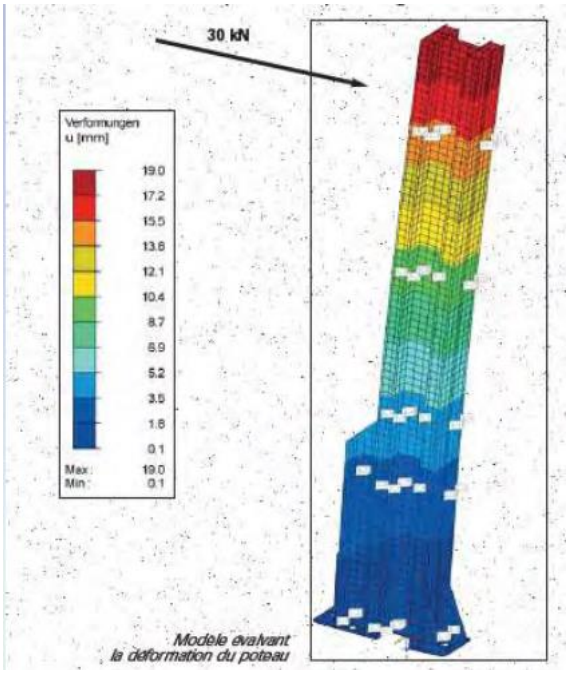


Figure 8 : Modélisation d'un impact de 30 KN sur un poteau amovible d'un batardeau anti-crue (Source : www.esthifrance.com)

Figure 9 : Batardeaux amovibles anti crue sur voirie (Source : www.esthifrance.com)

Figure 10 : Une partie montée du batardeau amovible anti-crue de la ville de Givet (Source www.esthifrance.com)

Figure 11 : Exemple d'un entreposage de racks de stockages pour barrières anti-crue (Source : www.esthifrance.com)

Figure 12 : Système de batardeau anti-crue passif 'Flolift-H' – le dispositif se soulève par la simple poussée de l'eau sans intervention humaine ni énergie (Source : www.esthifrance.com)

Figure 13 : Système de batardeau anti-crue en tube PVC rempli d'air (Source : www.esthifrance.com)

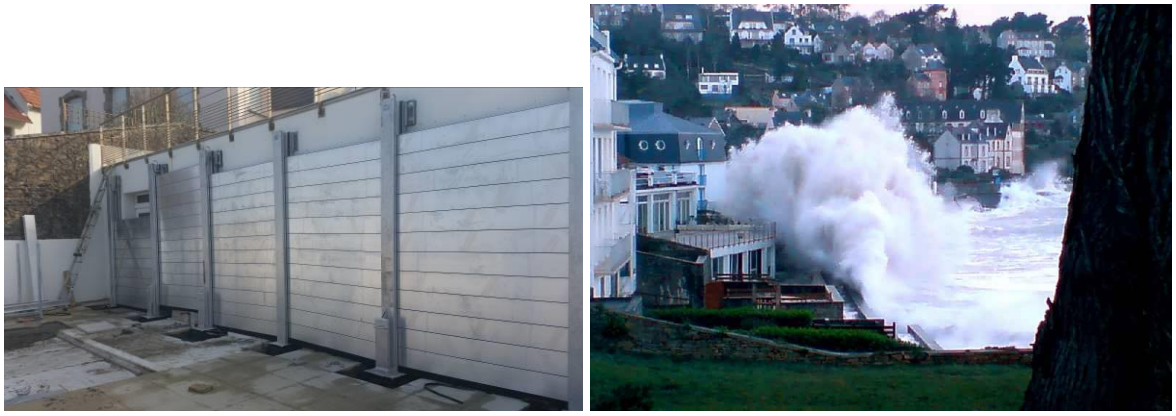


Figure 14 : Système de batardeau anti-crue pour protection contre la houle marine – Thalasso de Douarnenez- réalisation 2001 (Source : www.esthifrance.com)

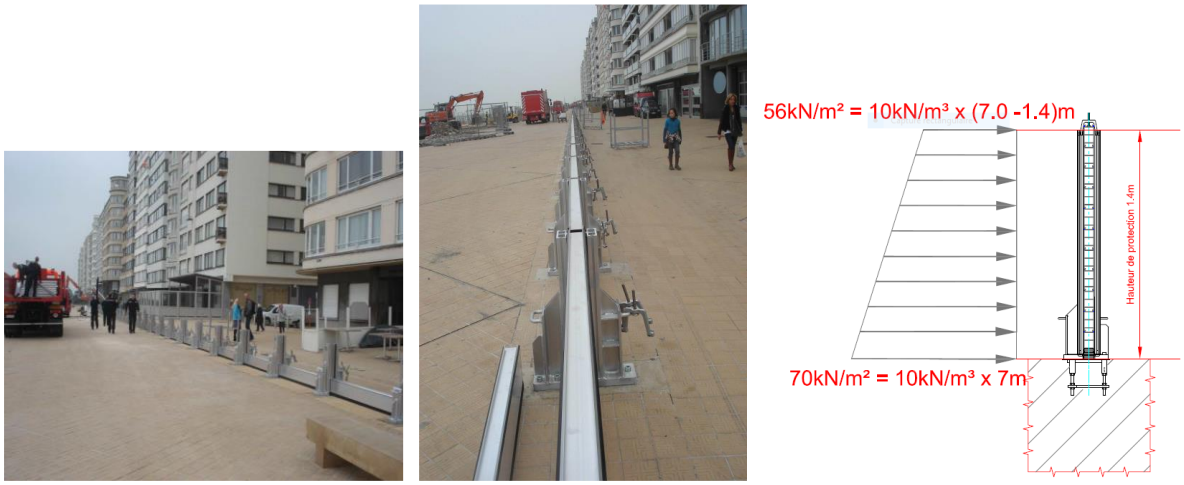


Figure 15 : Système de batardeau anti-crue pour protection contre la houle marine – Ostende - Belgique par (Source : www.esthifrance.com)

	Fiche Technique **Recharge/épaississement et/ou rehausse en remblai** Recharge / thickening and / or embankment enhancement	**Fiche FT 6.3**

Auteurs principaux : JF. FREZET (EGIS) ; D. POULAIN (INRAE)
Contributeurs : JC. PALACIOS (Safege); M. SUTTER (INRAE); R. TOURMENT (INRAE)
Relecteurs : JF. FREZET (EGIS) ; S. PATOUILLARD (DREAL Centre-Val de Loire) ; PL. REGAZZONI
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais : Increasing height of an existing embankment is not a simple task. Checks on the conditions of the existing embankment are needed to make sure that with the height increase, the embankment is still fulfilling designs standards (slope stability, seepage, internal erosion). Quite frequently, increasing the height leads to widen the embankment to stay within the designs standards and to additional checks on differential settlements, and bearing capacity.

Étude(s) de cas correspondante(s) :

Indications :

Définition :

On appelle recharge ou remblai stabilisateur l'épaississement d'un remblai existant par des matériaux d'apports (c'est-à-dire l'ajout d'un remblai accolé à l'existant) pour assurer sa stabilité, généralement en diminuant la pente d'un (ou des deux) parement(s) et/ou en créant une risberme.

On appelle rehausse en remblai, un composant d'ouvrage constitué de remblai permettant d'augmenter la hauteur d'une digue. Il est rare que cette rehausse ne soit formée que d'un merlon créé en crête d'ouvrage et y sont généralement associées des modifications du profil de l'ouvrage.
De ce fait, les deux types de confortement et/ou rehausse sont traités sur cette même fiche.

Sujet de la fiche :

La présente fiche traite de tout type de modification/extension et/ou rehausse réalisée au moyen d'un remblai et destinée à améliorer la stabilité ou à rehausser la crête de la digue existante.

Ne seront pas ici abordés les éléments géotechniques de dimensionnement et de réalisation d'un remblai (caractérisation des matériaux, essais Proctor, compactage…) qui sont traités dans nombre d'ouvrages (SETRA/LCPC, 2000). La fiche traitera par contre des éléments d'interface entre le remblai existant et le confortement.

Fonction(s) principale(s) :

Les fonctions principales d'une recharge ou d'une rehausse en remblai peuvent être :

- stabilité globale du remblai ;
- reconstitution de la protection hydraulique : lorsque la digue actuelle est trop basse par rapport à la cote de protection objectif ;
- reconstitution de revanche : lorsque que la protection actuelle est adéquate, mais ne permet pas de fonctionner avec la sécurité suffisante.

Fonction secondaires :

Des fonctions secondaires peuvent être identifiées :

- étanchéité ou drainage selon que le confortement se fait du coté eau ou du coté zone protégée (ZP) ;
- protection contre l'érosion externe (voir fiches du SG 5) ;
- reconstitution de cheminement en crête (avec ou sans élargissement), lorsqu'il s'agit de garantir la qualité du cheminement en crête d'ouvrage pour des raisons de service ou autre (circulation douce par exemple).

Description :

Performances recherchées :

Les performances à atteindre pour les recharges et/ou rehausses en remblai sont définies par :

- **la géométrie** de l'ouvrage garantissant ses performances en termes de protection en crue et de stabilité. Cette géométrie doit être garantie durant la vie de l'ouvrage, et donc intégrer les tassements à long terme générés par le confortement ;
- le maintien des marges de stabilité de l'ouvrage existant dans le cas d'une rehausse sans reprofilage global ;
- **la portance** et la traficabilité en crête si cheminement ;
- le traitement de l'interface entre la digue dans son état initial et la recharge. Il est nécessaire d'avoir une certaine continuité pour éviter la formation d'écoulements préférentiels, de zones de faiblesse mécanique ou d'érosion interne ;
- l'absence de sensibilité du nouveau composant de l'ouvrage aux phénomènes de retrait-gonflement.

Utilisation :

Comme formulé précédemment, la recharge d'un remblai s'intègre généralement dans un programme de confortement plus global dont elle est un des composants.

Variantes :

Cette technique ne présente pas de variantes à proprement parler mais nécessite de s'adapter en fonction des matériaux disponibles.
Par ailleurs si on doit élargir la digue existante, les choix suivants sont à faire :

- élargir d'un côté eau ou du coté ZP ?
- faut-il adjoindre une étanchéité ou un drainage ?

Alternatives

Pour les recharges stabilisatrices du remblai, les alternatives sont décrites dans les autres fiches du chapitre dédié à la stabilité globale des digues (Fiches FT 5.x).

Dans les cas spécifiques de rehausses, les seules techniques alternatives peuvent être:

- Les murets maçonnés (fiche FT 6.1) ;
- Les rehausses en palplanches ;
- Les protections provisoires démontables moins fréquemment (fiche FT 6.2).

Dimensionnement :

Principes :

Le dimensionnement d'un confortement en remblai comporte deux aspects :

- Un dimensionnement structurel reposant sur les méthodes classiquement utilisées en stabilité des pentes, analyse des tassements et vérification de la portance (CFBR, 2015) ;
- Pour une rehausse de la crête en particulier, un dimensionnement hydraulique (écoulement de surface) consistant à déterminer la cote nécessaire pour assurer la protection de la Zone Protégée au passage d'une crue. Celle-ci étant définie auparavant selon des critères réglementaires ou selon les objectifs de protection du gestionnaire.

Paramètres nécessaires :

Avant tout, il est essentiel d'avoir des connaissances précises concernant la digue existante. Un diagnostic approfondi ou une étude regroupant des informations équivalentes permet d'avoir le niveau de détail suffisant. On cherchera particulièrement les éléments suivants au niveau de l'emprise du futur projet :

- la géométrie précise de la digue existante ;
- les conditions d'écoulements en crue (cote, vitesse, limnigrammes de crue) ;
- les conditions de nappe (niveau, évolution pendant la crue) ;
- la nature et les caractéristiques mécaniques de matériaux constitutifs de la digue et de sa fondation (nécessité de reconnaissances géotechniques) ;
- la présence de réseaux.

Eléments complémentaires de conception:

- Le tassement du nouveau remblai mis en place et de la fondation dans les zones où elle subira une surcharge doit être pris en compte (notamment différentiel de tassement entre parties existantes et nouvellement construites du remblai) ;
- si nécessaire, conception et dimensionnement d'une protection externe du parement (coté eau notamment) ;
- prise en compte de l'accessibilité du site et emprise des travaux ;

Si la digue bénéficie de pistes en pied ou de servitudes, le chantier sera facilité.

Sinon, sans utilisation d'emprises temporaires continues, le chantier sera souvent réduit en surface. L'accessibilité et l'approvisionnement des matériaux pourront poser problème (faire demi-tour est souvent impossible sur la recharge d'une digue pour un poids lourd).

Les moyens matériels doivent être adaptés à l'exiguïté du travail sur les recharges et/ou en crête d'ouvrage et des élargissements ponctuels et provisoires peuvent être créés pour faciliter le chantier dans les zones d'emprises disponibles (côté eau ou ZP).

Modèles :

Trois principaux aspects sont étudiés en termes de dimensionnement structurel d'une recharge et/ou rehausse d'une digue en remblai :

- écoulements internes déterminés sur des logiciels tels que : SEEP/PLAXLOW. Il existe de nombreux critères permettant d'étudier ces phénomènes. Par exemple, l'analyse du gradient global (FEMA, 2011 ; CFBR, 2015 ; CIGB, 2017) ou des critères plus complexes comme ceux développés dans le cadre du projet ERINOH ;
- stabilité globale de la digue constituée du remblai existant et de sa recharge. Ce sont des calculs classiques selon des théories développées dans le cadre de l'étude de la stabilité de pentes. Ils reposent sur une vérification de non-atteinte d'un état limite généralement défini par un facteur de sécurité calculé sur des logiciels tels que TALREN ou GEOSTUDIO ;
- tassements de la digue et de sa fondation sous le poids de la recharge, tassement propre de la recharge et portance sous cette dernière. Il existe de nombreuses méthodes classiques en mécanique des sols, reposant sur des calculs analytiques ou numériques et implémentées dans des logiciels tels que PLAXIS, FOXTA ou développées sur des feuilles de calcul.

Notons que ces différents aspects du dimensionnement sont fortement dépendant l'un de l'autre. Ainsi par exemple, l'écoulement interne doit être pris en compte dans le calcul de stabilité.

Les caractéristiques mécaniques et hydrauliques spécifiques des interfaces entre les remblais existants et nouveaux devront être pris en compte dans la modélisation.

Pour plus de références à ces sujets, nous invitons le lecteur à se reporter aux éléments fournis dans la partie I du présent guide.

Aspects pratiques (CCTP, chantier) :

Cahier des charges :

- Définition des installations et circulations de chantier ;
- définition et délimitation des emprises provisoires ;
- inventaire des réseaux et identification des ouvrages singuliers ;
- définition des spécifications des matériaux et des autres fournitures ;
- **interface entre la digue existante et le nouveau remblai (modalités de l'interface et contrôles) ;**
- définition des modes de mise en œuvre du remblai et du plan de contrôle ;
- mission géotechnique G3 (selon NF P94-500) pour l'entreprise travaux ;
- mission géotechnique G4 (selon NF P94-500), vis-à-vis des tassements notamment pour la maîtrise d'œuvre.

Chantier :

Au-delà des recommandations générales sur les conditions de réalisation des chantiers communes à toutes les techniques et présentées dans la partie I du document, nous rappelons quelques recommandations qui concernent spécifiquement ou avec plus d'acuité les travaux de réalisation de recharges stabilisatrices, à savoir :

- le contrôle de l'interface avec la digue existante ;
- le contrôle de l'interface aux extrémités du tronçon ou au droit de points singuliers (ouvrages traversants).

Ces éléments peuvent être portés par :

- la mission géotechnique G4 (selon NF P94-500) pour la réception des fouilles et la vérification du respect du plan de contrôle ;
- la mission de contrôle extérieur, à intégrer selon l'ampleur du chantier. Le contrôle extérieur permet la réalisation d'essais par une tierce partie, indépendante de l'entreprise. Cela permet la vérification des résultats du contrôle entreprise.

Traitement de points singuliers (extrémités, ouvrages inclus notamment) :

- L'interface entre la digue existante et le nouveau remblai doit faire l'objet d'un soin particulier, notamment :
    - les spécificités de mise en œuvre : décapage de toute la terre végétale, scarification, humidification de la partie du remblai existant en contact avec la

recharge afin de permettre une bonne continuité entre matériaux anciens et neufs ;

- la prise en compte des conditions de filtre et/ou la mise en place d'une couche de transition (sols et/ou géosynthétiques) remplissant le rôle de filtre et/ou drain.

- les ouvrages traversants sont une source potentielle de complexité dans la réalisation d'un confortement, notamment en cas de présence de regards ou d'ouvrages sensibles (gazoduc notamment). Pour plus de détails sur leur traitement, nous invitons le lecteur à se reporter aux méthodologies présentées au chapitre 8 de la partie I du document ;
- en cas d'élargissement de la digue existante une attention particulière sera apportée à la fondation sous l'élargissement de manière à notamment s'affranchir d'éventuels problèmes liés à des tassements différentiels ou des affouillements au pied du parement nouvellement construit.

Références :

- CFBR (2015). Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai.
- SETRA / LCPC (2000). Réalisation des remblais et des couches de forme -GTR fascicules 1&2.
- CIGB/ICOLD (2017). Bulletin n°164 L'érosion interne dans les digues, barrages existants et leurs fondations »,
- Federal Emergency Management Agency – FEMA (2011). Filters for Embankment Dams – Best Practices for Design and Construction.

Annexes :

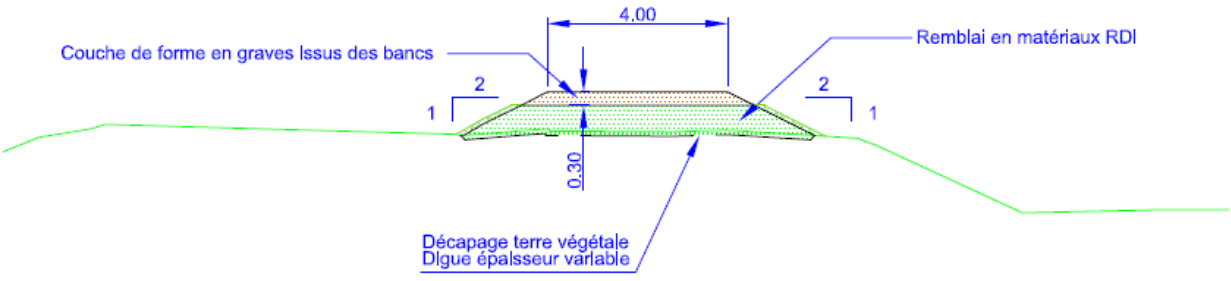


Figure 1 : Profil de rehausse seule sur le projet Isère Amont, maître d'ouvrage SYMBHI, maître d'œuvre Egis Eau (Source : EGIS)

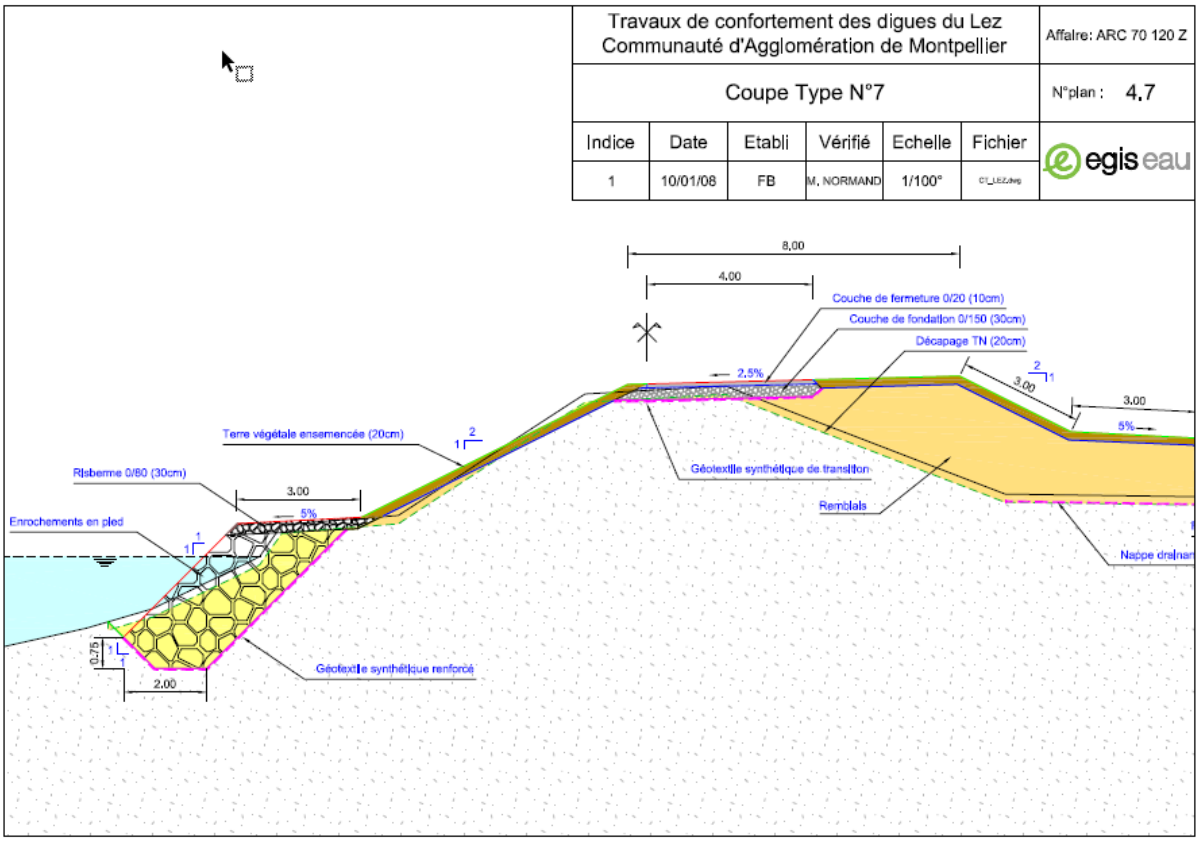


Figure 2 : Profil de rehausse avec épaississement sur les digues du Lez – maître d'ouvrage : Communauté d'Agglomération de Montpellier, maître d'œuvre Egis Eau (Source : EGIS)

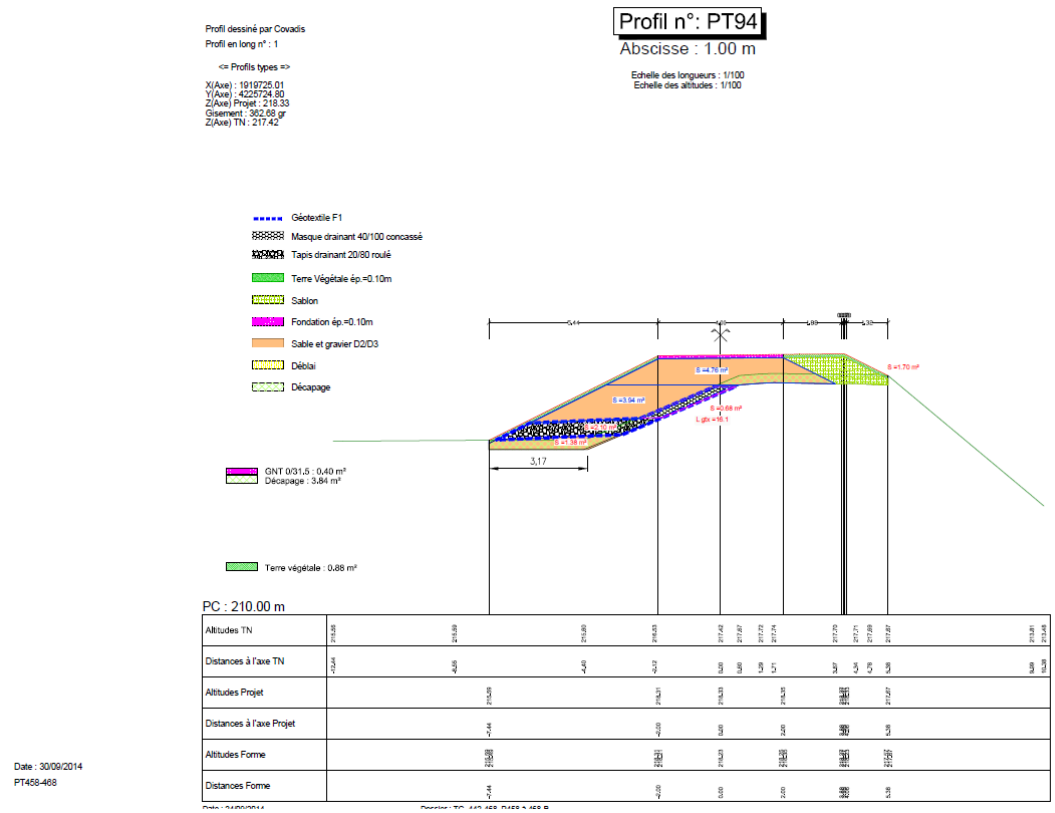


Figure 3 : Profil de rehausse avec épaississement sur le projet Isère Amont, maître d'ouvrage SYMBHI, maître d'œuvre Egis (Source : EGIS)

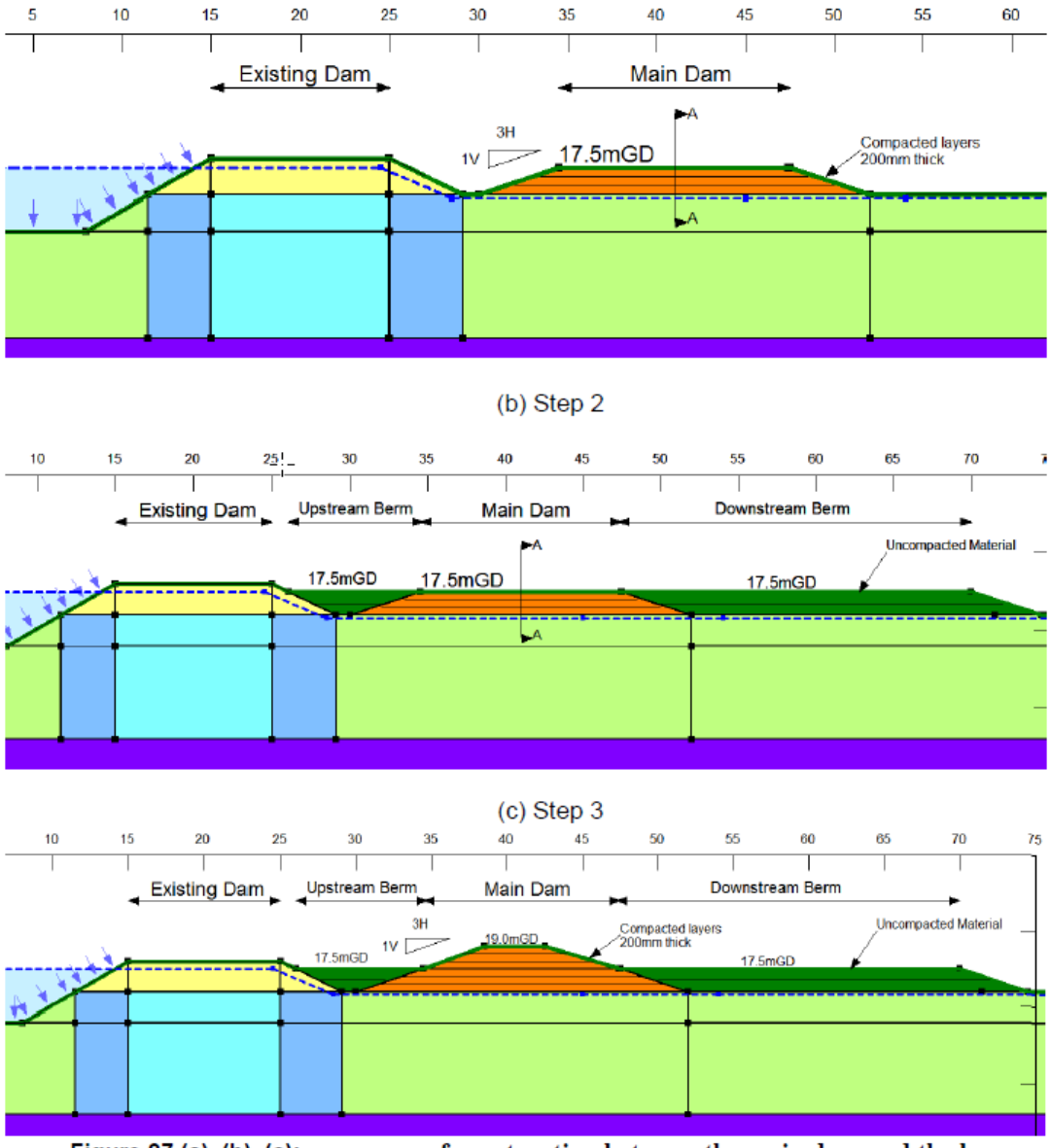


Figure 27 (a), (b), (c): sequences of construction between the main dam and the berms

Figure 4 : Rehausse avec déplacement complet de l'axe de la digue et intégration de la digue existante en berme côté eau – Cas extrême où la nature très compressible des sols (tourbes) ne permet pas une rehausse en place et où des rehausses d'entretien sont nécessaires pour garantir le maintien de la cote d'exploitation – East Demerara Water Conservancy (EDWC) Dam rehabilitation, Ministry of Agriculture of Guyana, maître d'oeuvre SRKN engineering avec assistance Egis Géotechnique (Source : SRKN/EGIS)

	Fiche Technique **Protection externe par enrochements libres** External protection by armourstone or rip-rap	**Fiche FT 7.1**

Auteurs principaux : Y. BOUSSAFIR (IFSTTAR) ; O. ARTIERES (TENCATE)
Contributeurs : N. AUGER (DREAL Centre) ; D. POULAIN (INRAE) ; M. SUTTER (INRAE)
Relecteurs : P. LEDOUX (Cerema) ; L. SAUSSAYE (Cerema) ; B. CHALUS (CNR) ; S. PATOUILLARD (DREAL Centre-Val de Loire) ; JC. PALACIOS (Safege) ;
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais:
Armourstone (or rip-rap) is widely used and comprises natural or artificial rock laid over a granular or geotextile filter layer on the levee slope. Its permeable nature means that it is both able to absorb external wave and current energy and to allow drainage of internal pore water from the levee. The thickness or armourstone layer required can be large and may need to be taken into account in the design, to reflect the maintenance capability of the levee management authority. Although armourstone may not have significant environmental impacts, the uneven surface and voids within it may pose some health and safety risks when used in recreational or residential areas and so this issue does need to be managed.
(Extract from The International Levee Handbook, p. 1040)

Etude(s) de cas correspondante(s) :
C5.4 : Isère Grenoble amont campus
C3.1 : Berges de l'Isère-Grenoble
C3.4 : Barrage de Valcros

Indications :

Définitions :

Le terme « enrochement » désigne un matériau répondant aux spécifications de la norme NF EN 13 383. Par extension, l'utilisation de ce matériau dans le cadre d'ouvrages de génie civil et plus particulièrement d'ouvrages hydrauliques donne le nom d'enrochements à la partie d'ouvrage utilisant ce matériau.

On parle d'enrochements libres (contrairement aux enrochements liés) lorsqu'aucun liant ne vient assurer une cohésion entre chaque bloc.

Sujet de la fiche :

Cette fiche traite de l'usage d'enrochements libres en tant que protection de talus. Elle traite de l'ensemble de la conception et du dimensionnement du confortement, y compris le filtre (si nécessaire) mis en place entre l'enrochement de protection et le remblai support.

Fonction principale :

Lutte contre l'érosion externe.

La fonction principale recherchée par l'utilisation de ce type de confortement est de limiter les effets des sollicitations hydrauliques (batillage, crue, houle…) et mécaniques (impact des sollicitations hydrauliques – vagues -, des embâcles…) sur le talus et de protéger ainsi la surface et le pied du talus des phénomènes d'érosion et d'affouillement. Le filtre posé à l'interface entre le sol et l'enrochement (de plus en plus souvent en géotextile) intervient indirectement dans la protection contre l'érosion externe en évitant l'arrachage des particules du sol.

Figure 1 : Enrochement (ici mélange de différentes tailles de blocs – LM15/300 et CP45/25 - afin d'avoir une blocométrie fermée et continue et ainsi éviter l'utilisation d'un filtre spécifique) en milieu fluvial – Chantier de Melleray, 2012 (Crédit photo : DREAL Centre-Val de Loire)

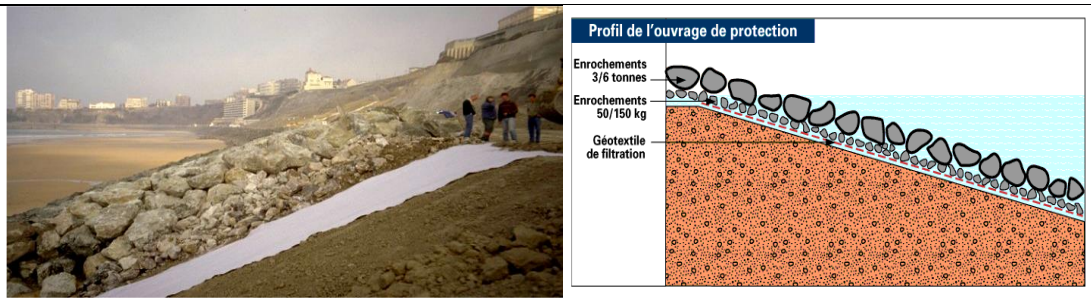


Figure 2 : Protection de côte maritime par enrochement en deux couches (carapace extérieure en 3–6 t ou HM3000/6000 et enrochement secondaire 50-150 kg ou LM50/150). Le rôle de filtre est joué par un géotextile de filtration - Côte des Basques, Biarritz (64) (Source : TenCate Geosynthetics)

Fonctions secondaires :

Les enrochements permettent d'assurer d'autres fonctions grâce à leurs caractéristiques :

- fonction de stabilisation mécanique du talus sous la forme d'ouvrage poids, de butée de pied (cf. fiche 5.13) ;
- fonction de drainage (blocométrie ouverte et absence de matériau évolutif).

Fonction induite :

Lutte contre l'érosion interne grâce au filtre qui y est joint, ou à la composition blocométrique de l'enrochement lui-même.

Description :

Performance à atteindre :

Les performances recherchées sur ce type de confortement visent à lutter contre deux types de mécanisme de rupture de la digue :

- l'érosion externe : la protection externe par enrochements libres doit pouvoir atténuer l'énergie hydraulique du cours d'eau ou de la mer au contact de l'ouvrage et ainsi éviter le départ des particules de sols qui composent le corps de digue par arrachement. Le dimensionnement des blocs est adapté à la force du courant. Les spécifications tiendront également compte des conditions environnementales qu'ils subissent (température, gel, impacts…) qui ne doivent pas abaisser les performances de l'ouvrage pendant la durée de service prévue ;
- L'érosion interne : elle est provoquée soit par l'écoulement alterné de l'eau à l'intérieur du corps de digue sous l'action des vagues soit par un écoulement côté eau de la digue vers la zone protégée, côté terre. Dans le premier cas, les différences de pressions à l'interface entre l'extérieur et l'intérieur de l'ouvrage (qui se traduisent par des surpressions d'eau au sein du massif) peuvent induire un gradient hydraulique qui génère un écoulement venant de l'intérieur du massif. La protection externe par enrochements libres doit alors être associée à un filtre qui permet l'évacuation de l'eau interne (drainage) tout en maintenant les particules qui composent la digue.

D'autres performances sont liées au choix d'un filtre géotextile :

- il doit être suffisamment perméable pour laisser circuler l'eau perpendiculairement à son plan/sa surface (cf. fiche FT 4.1) ;
- la protection externe en enrochements sollicite fortement le filtre en traction lorsqu'il s'agit d'un géotextile, principalement à la mise en œuvre des blocs, provocant des étirements, des poinçonnements locaux, pouvant entraîner des déchirures : ce point spécifique fait l'objet d'une partie du dimensionnement du filtre (cf. fiche FT 4.1).

Utilisation :

Les enrochements peuvent convenir dans pratiquement toutes les situations ce qui en fait le type d'ouvrage le plus couramment préconisé :

- en milieu fluvial (Figure 1) ou maritime (Figure 2*Figure 1*) ;
- pour les ouvrages hydrauliques neufs ou en protection d'ouvrages existant ;
- en partie d'ouvrage immergée ou hors d'eau.

Dans chaque situation il convient de définir précisément les caractéristiques et performances attendues.
Les conditions d'emploi qui peuvent limiter l'usage de ces ouvrages peuvent être liées à la ressource locale en matériaux (quantité ou qualité), aux conditions d'entretien, aux conditions de mise en œuvre (accessibilité, contraintes liées à la loi sur l'eau, emprises disponibles), aux conditions environnementales.

Ils sont très souvent utilisés en réparation d'urgence du fait de leur mise en œuvre rapide, facile et à coûts maîtrisés, nécessitant peu voire pas de dimensionnement préalable. Ils peuvent être réalisés dans le cadre des marchés d'entretien ou en régie ce qui explique en grande partie les avantages cités ci-dessus. Notons que ce type de confortement est provisoire et devra mener à des travaux plus pérennes.

Variantes :

Les variantes dans le cadre d'un marché peuvent porter sur la nature pétrographique du matériau et sur l'origine du matériau (naturel ou artificiel – cf. fiche FT 7.7). Toute variante nécessitera un dimensionnement spécifique pour valider les modifications liées aux caractéristiques du matériau proposé : la modification de la nature pétrographique entraîne une modification de la masse volumique, de la taille des blocs, des conditions de durabilité et de mise en œuvre (fissuration ou fracturation naturelle, forme, sensibilité aux conditions météorologiques...).

Le filtre géotextile peut être doublé ou remplacé par un filtre granulaire constitué d'une ou plusieurs couches de granulats dont les granulométries respectent successivement les règles de filtre granulaire avec les autres couches en contact, incluant le sol de digue à filtrer et la carapace externe en enrochements. Il convient de rester très prudent avec certaines pratiques ayant tendance à abandonner ces dispositions jugées compliquées à respecter et à mettre en œuvre mais néanmoins indispensables à une bonne conception.

La végétalisation des enrochements est un sujet laissé à l'appréciation du gestionnaire car elle n'est pas obligatoire. Elle favorise l'insertion environnementale et paysagère de l'ouvrage et peut constituer une aide à la circulation sur l'ouvrage pour son entretien ultérieur.

Variantes locales : le cas des enrochements à blocométrie continue :

Plusieurs expériences, menées par la DREAL et les DDT de la région Centre-Val de Loire, ont conduit à préconiser la réalisation d'ouvrages en enrochements composés d'un mélange de deux fournitures d'enrochement, le plus souvent un petit et un moyen (cas des chantiers de Melleray, Figure 1 ; chantier de Veuve, Figure 4). Les entreprises sont chargées de mélanger les deux fournitures par reprise sur stock ou par un mélange en carrière.
L'enrochement ainsi constitué est par retour d'expérience plus résistant aux sollicitations hydrauliques de la Loire. L'ouvrage est immédiatement circulable en surface (Figure 3). Le retour d'expérience montre qu'il est plus facile d'organiser des passages de tondeuse régulièrement sur ces ouvrages à granulométrie continue que d'envisager du débroussaillage sur un ouvrage peu circulable surtout si la végétation a poussé de manière anarchique et depuis un certain temps.

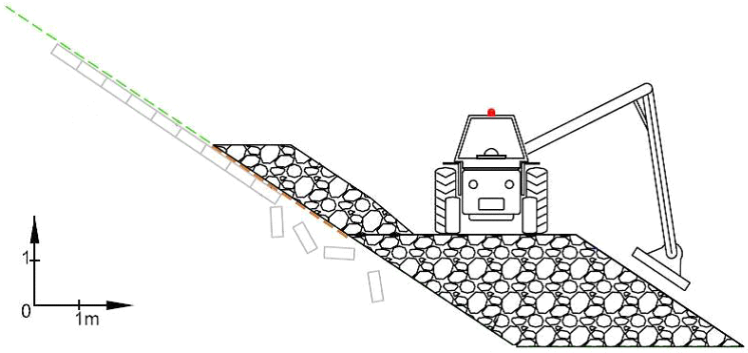


Figure 3 : Profil en travers type illustrant la forme d'un enrochement et son usage pour un entretien par fauchage : la largeur du massif est suffisante pour un tracteur (Source : DREAL Centre Val de Loire)

Après une hausse du niveau de la Loire, le dépôt naturel des limons et autres alluvions conduit à une reprise de la végétation qui peut être anarchique. La DREAL Centre-Val de Loire recommande, pour maîtriser ces phénomènes, une fermeture des enrochements grâce à ces matériaux granulaires à granulométrie continue. Le dépôt des sédiments qui se fait par la suite favorise la reprise d'une végétation herbacée plus facile à entretenir par fauchage (Figure 3 et Figure 4).

Figure 4 : (a) exemple d'enrochement avec piste circulable et végétation entretenue, (b) dépôts après une crue illustrant la reprise de la végétation (Crédit photos : Cerema)

Alternatives :

Les enrochements peuvent être remplacés par des gabions ou des matelas Reno (cf. fiche FT 7.3).

Pour certaines fonctions plus particulières, il est également possible d'envisager des perrés (cf. fiches FT 7.6 et FT 7.6), des enrochements liés au béton (cf. fiche FT 7.2), etc.
Dans le cas où l'espace est limité, si les sols sont instables ou dans des zones affouillables, l'alternative consiste à modifier le profil de digue en réalisant par exemple des ouvrages de soutènement (cf. fiches FT 5.3, FT 5.4 et FT 5.5 notamment).

La butée de pied quant à elle peut être de deux conceptions différentes : sabot ou semelle (cf.fiche FT 7.1).

Dimensionnement :

Principe :

La stabilité de la protection externe en enrochements sur le talus devra être vérifiée.
Une conception particulière est à prévoir pour le pied de digue côté eau de l'ouvrage afin d'assurer la stabilité et la pérennité de la protection.
Il convient de s'assurer que les caractéristiques mécaniques du géotextile sont compatibles avec les conditions de mise en œuvre des enrochements.

Le dimensionnement des enrochements est mené selon le guide Enrochement (CIRIA, 2009).
L'ouvrage en enrochements est dimensionné vis-à-vis des sollicitations hydrauliques connues.
Le matériau répond pour cela à des spécifications précises en blocométrie et en masse volumique.

Les éléments propres au dimensionnement de l'ouvrage sont :

- la géométrie de l'ouvrage (Figure 5 ou Figure 6) incluant, selon le cas, la cote du haut de l'ouvrage (dimensionné le plus souvent par rapport à la cote de crue), l'épaisseur du massif, l'ancrage en pied (bêche ou sabot), la butée, la largeur de la berme, la pente de talus ;
- la vérification de la stabilité mécanique de l'enrochement (interne et globale) y compris butée de pied ;
- l'intégration de l'ouvrage dans la digue et son environnement : dimensionnement du filtre, gestion des transitions, réflexion sur la végétalisation et sur l'entretien de l'ouvrage (accessibilité).

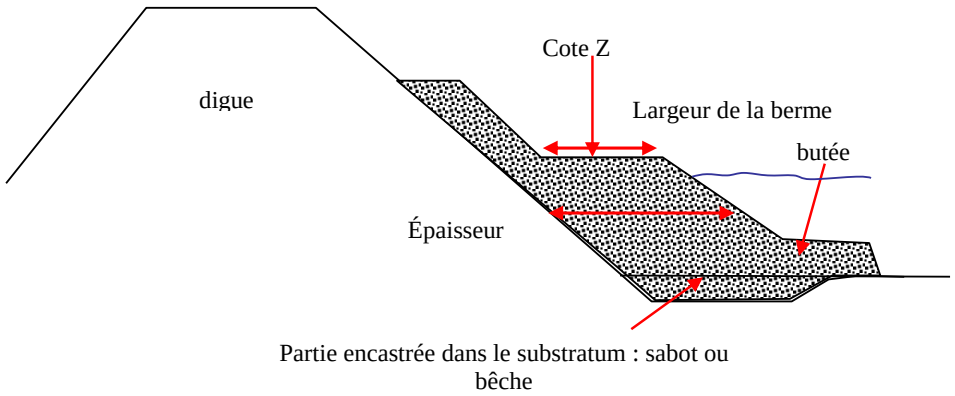


Figure 5 : Profil en travers type présentant les différents cas envisageables pour stabiliser un enrochement : la berme, la butée et la bêche dépendent des conditions de site et de stabilité. La fonction de stabilisation mécanique se cumule ici à la fonction protection contre l'érosion externe. Le filtre ne figure pas sur cette figure (Source : Cerema)

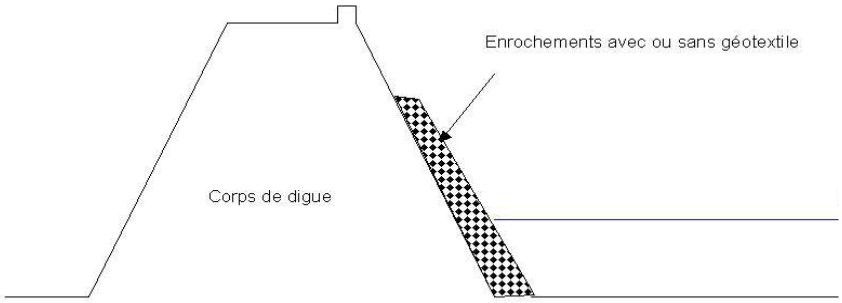


Figure 6 : Profil en travers type d'un enrochement dans sa forme la plus simple : l'ouvrage joue ici pleinement son rôle de protection contre l'érosion externe (Source : Cerema)

En cas de géotextile de filtration, la couche d'enrochements aura une épaisseur suffisante pour ne pas exposer le filtre directement aux UV. En cas d'une carapace monocouche de blocométrie uniforme, l'épaisseur minimale est de 1,8 fois la taille du bloc.
La stabilité des enrochements soumis aux forces hydrodynamiques doit être vérifiée, y compris pour éviter tout frottement cyclique abrasif sur le filtre géotextile.
En cas de blocs de taille importante (par exemple pour une digue à la mer), il est recommandé d'interposer une couche d'enrochements secondaire, dont la blocométrie est stable par rapport à la couche primaire externe (la règle de filtre de Therzaghi doit être respectée – cf. chapitres 3 et 4 de la partie I du document général), pour répartir uniformément le poids sur la surface du filtre géotextile (Figure 2).

Eléments de conception :

Les données nécessaires à la conception de l'ouvrage sont définies en détail dans le chapitre 4 du guide Enrochement (CIRIA, 2009). Les éléments nécessaires au dimensionnement du projet sont :

- pour les caractéristiques générales de l'enrochement :
  - des relevés bathymétriques et topographiques ;
  - des conditions liées au gel ;
- en milieu marin, la caractérisation hydraulique maritime et côtière portant sur :
  - les données de vent, les niveaux d'eau, la marée, les surcotes, la houle, l'élévation du niveau de la mer, le niveau d'eau de dimensionnement ;
- en milieu fluvial, la caractérisation hydraulique fluviale portant sur :
  - les débits et les courants, la turbulence, les crues (cote à retenir pour définir la cote supérieure de l'ouvrage), l'onde de propagation, le batillage, la position dans un méandre (intrados, extrados) ;
- pour les données géotechniques :
  - les reconnaissances de site, les essais et interprétations des résultats ;
  - la nature des matériaux en place (description, granulométrie, propreté) et leur répartition géométrique ;
  - la stabilité mécanique des matériaux en place (envisager éventuellement un adoucissement de la pente en place) et leur aptitude à reprendre des charges ;
  - les aléas géologiques (cavités, karsts, sécheresse, sismicité…).

<u>Autres données</u> pouvant conditionner le choix de la technique, de la conception du projet et les modalités d'intervention :

- périodes d'étiage définissant les dates préférentielles de travaux (Figure 8) ;
- contraintes d'entretiens (circulation sur l'enrochement, conditions d'accès) ;
- localisation des carrières, disponibilités en matériaux, distance au chantier ;
- modalité de stockage et de reprise de stock de matériaux (enrochement, sable, géotextile…) (Figure 9) ;
- accessibilité aux engins de chantier (Figure 7), zones de retournement ou de croisement Figure 133), nuisances liées au trafic chantier (bruit, pollution, poussières...) ;
- gestion de l'environnement (application de la loi sur l'eau, protection de la faune et de la flore, gestion des déchets...) ;
- techniques associées : débroussaillage, décapage de la terre végétale, déblayage/ remblayage, reprise des ouvrages existants/traversants/de transition, végétalisation ;

Figure 7 : Exemple de contraintes spécifiques liées aux sites : à gauche mise en œuvre d'un pont passerelle provisoire (chantier de Guilly, 2011) ; à droite jonction de la piste avec la route existante (chantier de Melleray, 2012) (Crédit photos : DREAL Centre-Val de Loire)

Figure 8 : Exemple de chantier inaccessible pour cause de hausse de niveau d'eau (chantier de Guilly, 2011) (Crédit photos : DREAL Centre-Val de Loire)

Figure 9 : Stock d'enrochement provisoire (chantier de Sully) (Crédit photo : DREAL Centre-Val de Loire)

- modalité de pose des géotextiles (Figure 10 et Figure 11) : la pose des géotextiles sous eau est plus contraignante qu'à l'air libre, en termes de recouvrement entre lés (un tuilage dans le sens du courant et difficultés de mise en œuvre pour des vitesses élevées) et, éventuellement, d'ancrage (il est préférable d'éviter les ancrages qui bloquent le filtre et peuvent provoquer des déchirures : il est préférable d'opter pour un maintien par poids) ;

Figure 10 : Mise en œuvre des géotextiles avant l'enrochement : à gauche, chantier de Bou (2013), à droite, chantier de St-Pierre-des-Corps (2011) (photos : DREAL Centre-Val de Loire)

- modalité de pose des enrochements en place : on cherchera à limiter la hauteur de chute des blocs, éviter la ségrégation. Cela mènera à en fonction des contraintes, à distingue plusieurs méthodes de pose :
  - déversement (en général sous eau avec fortes profondeurs) ;
  - pose non appareillée avec réarrangement des blocs au godet de pelle (protection classique) ;
  - pose appareillée pince ou grappin (pour de cas très spécifiques, notamment si les vitesses sont fortes ou qu'une forte dissipation d'énergie est constatée) (figure 11) ;

- prescriptions pour protéger les géotextiles des risques de poinçonnement par les blocs.

Figure 11 : Pose de gros enrochements au grappin pour limiter les hauteurs de chute et améliorer le calage des blocs. Le géotextile est visible sur la photo de droite (Source : TenCate Geosynthetics)

Modèles disponibles :

- **Filtration par géotextile :**

Les caractéristiques du sol à filtrer utilisées dans le dimensionnement du géotextile de filtration sont énumérées dans la fiche FT 4.1. Le gradient hydraulique i_s usuel pris dans le cas d'un écoulement alterné est de i_s= 5, sauf calcul spécifique.
Pour le dimensionnement du filtre en lui-même, cf. fiche FT 4.1.

- **Matériaux pour enrochement :**

Les spécifications des fournitures d'enrochements sont définies dans la norme NF EN 13383-1 et les essais nécessaires à leur évaluation dans la norme NF EN 13383-2. Elles se traduisent par une classe d'enrochement (CP, LM ou HM) et une indication mini-maxi de la répartition des éléments :

  - dans le cas des petits enrochements (CP), les chiffres indiqués correspondent à la distribution granulométrique en mm. Par exemple CP45/125, CP63/180, CP90/250, CP45/180, CP90/180) ;
  - dans le cas des moyens (LM) et gros (HM) enrochements, de catégorie A ou B, les chiffres indiqués correspondent à la distribution des masses en kg. Par exemple : LM5/40, LM10/60, LM40/200, LM60/300, LM15/300 ;HM300/1000, HM1000/3000, HM3000/6000 (Figure 12), HM6000/10000, HM10000/15000.

La norme précise les autres éléments de performance tels que la forme (élancement), la masse volumique réelle, la résistance à la compression simple, l'acceptabilité environnementale (pollution, compatibilité physico-chimique avec les ouvrages), les critères de durabilité (résistance au gel, usure par l'eau…).

Figure 12 : Exemple d'enrochements calcaires – carrière de Bléré, Indre-et-Loire (Crédit photo: Cerema)

Les outils de dimensionnement figurent au chapitre 5 du guide Enrochement (CIRIA, 2009), que ce soit pour un dimensionnement fluvial ou maritime.

Il est fréquent pour les digues fluviales de retenir les règles de dimensionnement d'Isbach pour déterminer les dimensions des enrochements nécessaires. Ils sont dimensionnés par rapport à la vitesse de l'eau circulant tangentiellement à l'axe de la digue à l'aide de la formule d'Isbach applicable en milieu fluvial :

$$D_{50} \geq \frac{b}{\lambda} \times \frac{V_v^2}{2g} \times \frac{\gamma_e}{\gamma_s - \gamma_e}$$

où

D_{50} : diamètre médian des blocs (m)
V_v : vitesse du courant au droit de l'enrochement ($m.s^{-1}$)
b = 0,7 (enrochements enchâssés)
γ_s : masse volumique des blocs ($kg.m^{-3}$)
γ_e : masse volumique de l'eau ($kg.m^{-3}$)
λ : coefficient de Lane

avec

$$\lambda = \cos\varphi \sqrt{1 - \frac{\tan^2\varphi}{\tan^2\theta}}$$

θ : angle d'équilibre des blocs
φ : angle du talus avec l'horizontale

Le dimensionnement maritime pose des questions supplémentaires en lien avec la houle (liées aux marées, conditions météorologiques) se traduisant par des paramètres tels que la hauteur, le volume d'eau, l'énergie... En particulier, le dimensionnement s'intéressera aux hauteurs maximum (run-up) et minimum (run-down), au franchissement des vagues, aux évolutions 3D de la houle (transmission et réflexion). De nombreuses méthodologies/formules existent sur ces aspects (cf. guide enrochement - chapitre 5, CIRIA, 2009).

Il convient de s'assurer que les caractéristiques mécaniques du géotextile sont compatibles avec les conditions de mise en œuvre :

- la résistance à la traction T_{max} en kN/m (NF EN ISO 10319). À réaliser dans le sens de production et en travers ;
- l'allongement à l'effort de traction maximal ε_{max} en % (NF EN ISO 10319). Cette

caractéristique est très importante en cas de sol déformable, car un géotextile à fort allongement, supérieur à 50%, fera passer l'énergie de chute du bloc dans la déformation du sol support. A réaliser dans le sens de production et en travers ;

- l'énergie E absorbable par le géotextile, en kN/m, s'écrit :
  $E = (T_{max}. \varepsilon_{max})/2$. Moyenne arithmétique des énergies dans le sens de production et en travers ;
- la résistance au poinçonnement P_s en kN (NFG38019). Le poinçon simule le cisaillement d'une arête d'enrochement. Résultat obtenu : effort maximal d'un poinçon pyramidal.

Aspects pratiques (CCTP, chantier) :

Cahier des charges :

Les éléments qui permettent de rédiger le cahier des charges des fournitures sont au minimum les suivants (liste non exhaustive) :

Pour les enrochements : les enrochements peuvent être naturels (issus de carrières) ou artificiels, doivent être conformes aux normes produits de construction et suivent les protocoles du marquage CE ;

- la ou les classes d'enrochements à retenir ;
- la nature pétrographique (si nécessaire) ;
- la masse volumique minimale ;
- la résistance au gel-dégel, au coup de soleil ;
- les valeurs mécaniques réalisées sur la matrice rocheuse de type : résistance en compression simple (R_c), résistance à la fragmentation via le coefficient Los Angeles (LA), résistance à l'usure via le coefficient Micro-Deval (MDE), vitesse des ondes primaires (V_p)...

Pour les autres fournitures :

- la nature du matériau de protection du géotextile (sable…) ;
- les spécifications du géotextile.

Pour l'ouvrage proprement dit :

- l'épaisseur et la longueur du massif à réaliser ;
- la cote supérieure de l'enrochement ;
- la réalisation d'une butée de pied ancrée ou non dans le sol support ;
- la jonction avec la digue (préparation du sol : décapage, dessouchage, adoucissement de la pente, compactage, purge…) ;
- la nature de la protection de surface de l'ouvrage si elle est envisagée ;
- détail des contraintes en terme de gestion des stocks approvisionnés, pose des matériaux, respect de l'environnement, aménagement du site en phase chantier…
- liste des servitudes applicables sur le site : contraintes de circulation, gestion des déchets, planning/période d'intervention (y compris conditions d'intempérie)…
- dossier de plan (localisation du site, des profils, des zones de stockage, des pistes d'accès…) et profils en travers types ;
- plan de contrôle attendu (agréments de la carrière et de la fourniture, nature des essais,

fréquence des contrôles), liste des points d'arrêts et points critiques.

Il est préférable de mettre en place les lés de géotextile en déroulant le rouleau placé sur un palonnier dérouleur positionné en tête de digue (du pied vers la crête) (Figure 10). Avec un accès à partir de la crête de digue, des lés de géotextile peuvent également être prédécoupés et déroulés depuis la crête de digue. Prévoir éventuellement une assistance par plongeurs pour une mise en œuvre sous l'eau. Lorsque la mise en œuvre se fait sous eau, la vitesse du courant doit être inférieure à l m/s, voire moins si le lé de géotextile à mettre en place est de grande taille. Le géotextile ayant tendance à flotter entre deux eaux, il peut être nécessaire de le maintenir en tête dans une tranchée pour le positionner sur l'ouvrage avant de le lester : cordes, barre métallique fixée à son extrémité sous l'eau ou insérée dans un ourlet cousu. Les recouvrements entre lés sous eau doivent être au minimum de 1 m. La couture de plusieurs lés assure la continuité de la structure de filtration.
Le déroulage du géotextile se fait dans le sens de la pente (par tuilage dans le sens du courant de l'amont vers l'aval). Exceptionnellement, le géotextile peut être déroulé dans le sens de la digue si sa largeur couvre la totalité du développé à filtrer (cf. fiche FT 4.1), en incluant les bêches de pied et les ancrages éventuels.
Le géotextile sera déroulé d'un seul tenant sur la totalité du rampant et du dispositif de lestage provisoire en tête de manière à éviter toute discontinuité.
Aucune coupe ni recouvrement ne peut se faire dans le rampant.
Le géotextile doit être parfaitement plaqué contre le sol au cours du chargement par les enrochements.
Pour éviter les effets des aléas climatiques, il est recommandé de recouvrir le géotextile à l'avancement des travaux.
La couche d'enrochements sera montée du bas du talus vers la crête de digue.

Chantier (voir illustrations dans la partie conception) :

Les enrochements seront butés en pied de talus amont. Une zone de transition horizontale de quelques mètres à partir du pied de talus sera également protégée par un filtre et des enrochements pour éviter un affouillement en pied dû aux turbulences.
Le talus de la digue doit être décapé et reprofilé afin d'obtenir une surface de pose plane. Tout objet pouvant endommager le filtre (dans le cas fréquent où la fonction filtration est assurée par un géotextile), type caillou ou racine, sera supprimé. Il est courant qu'une couche (en sable le plus souvent) soit mise en œuvre dans ce but à l'interface entre le géotextile et l'enrochement, mais cette situation est à éviter car cela n'est utile qu'en phase travaux, et, à long terme, il y a de fortes probabilités de lessivage du matériau fin avec risque de déstabilisation des blocs.

Le filtre est appliqué sur le talus amont de la digue à l'interface entre le sol et la structure de protection externe en enrochements.

Le plus grand soin doit être apporté lors de la pose des blocs : les spécifications devront indiquer que la mise en place se fera avec une hauteur de chute la plus faible possible, que le déchargement des camions d'approvisionnement sur stock se fera depuis le pied du stock (dans l'idéal), avec une reprise par chargeur ou pelle pour homogénéisation.

Matériaux et matériels nécessaires :

- matériaux et/ou techniques associés : sables, géotextiles, terre végétale, matériau de remblai, drainage, béton…

- matériel de pose classique : pelles, camions, chargeurs
- matériel spécifique pour chantiers spéciaux : équipement GPS pour la pose, barges, moyens de treuillage, palans, éventuellement bande transporteuse
- besoins spécifiques pour appareillage : main d'œuvre qualifiée, sable de pose, béton/ciment

Nuisance/ environnement :

Voir généralités en introduction.

Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance) :

- agrément de la carrière et du processus de production (origine des enrochements) dans le cas de matériaux naturels
- agrément du produit sur la base d'une fiche technique produit (FTP)
- validation du PAQ et des procédures liées à la mise en œuvre
- contrôle d'approvisionnement (vérification du marquage CE sur les bordereaux de livraison)
- contrôle des fournitures (facultatif) sur la base des spécifications demandées au marché
- contrôle de la réalisation du stock et de la reprise des matériaux (éviter la ségrégation)
- contrôle d'exécution de la mise en œuvre

Les recommandations générales applicables aux géotextiles peuvent être résumées comme suit :

- le géotextile doit être entreposé dans un endroit propre et plan, et protégé des UV
- dans le cas d'ouvrages suffisamment importants, la méthode et le plan de pose doivent être connus avec précision à l'avance
- le géotextile ne doit pas être perforé ou déchiré
- le géotextile ne doit pas être traîné sur le sol, dans la boue, pour éviter de créer une fine pellicule imperméable à la surface du filtre. Le fond et les abords immédiats de la zone de pose doivent être exempts de boue et de fines en suspension dans l'eau. Un nettoyage préalable peut être nécessaire.

En cas de mise en œuvre en partie sous le niveau d'eau en pied de talus, un système de repérage et de contrôle de la réalisation doit être spécifiquement prévu pour contrôler notamment les volumes d'enrochement et la forme du pied de l'ouvrage. Un contrôle par plongeurs peut s'avérer utile. La réalisation d'une épreuve de convenance est fortement conseillée pour convenir des moyens et des méthodes ainsi que des objectifs atteignables dans les conditions du chantier.

Vitesse d'avancement :

La vitesse de pose des enrochements est essentiellement liée à la vitesse d'approvisionnement des camions au droit de l'ouvrage souvent réduite du fait de l'exiguïté des pistes d'accès et de l'absence de zone de croisement ou de retournement (Figure 133), ainsi que de la méthode de pose des enrochements (bloc par bloc, à la pelle…).

Figure 13 : Exemple de zone de retournement/croisement pour les camions - chantier d'Ouvrouer, 2007 (45) (Crédit photo : Cerema)

La vitesse d'avancement est également liée à la difficulté de dérouler les géotextiles et à les plaquer contre le talus, surtout en présence d'eau.
Compter environ quelques dizaines de mètres linéaires par jour.

Traitement de points singuliers

La butée de pied est dimensionnée comme indiqué dans la fiche FT 7.10, en distinguant un dimensionnement en domaine fluvial similaire au reste de la carapace, d'un dimensionnement en domaine maritime s'appuyant sur la formule de Van der Meer-Gerding.

La mise en œuvre d'enrochements est une technique qui autorise de nombreuses adaptations pour le traitement des points singuliers.

L'exemple de la variante à blocométrie continue, a mis en évidence la nécéssité d'être particulièrement soigné dans la confection des mélanges (reprise sur chantier si besoin), dans la pose des enrochements (fermeture à réaliser au godets, difficultés de réalisation « en aveugle » sous l'eau).

Références :

- NF EN13383-1(2003). Enrochements. Spécifications Edition AFNOR
- NF EN13383-2(2003).Enrochements. Méthodes d'essais Edition AFNOR
- CIRIA (2013). The International Levee Handbook. C731. Ed. Ciria. 1332 pages
- CIRIA, CUR, CETMEF (2009). Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques. Version française du Rock Manual. P09-01, Edition Cetmef Compiègne. 1302 pages.
- Cerema (2016). Atlas des carrières d'enrochement-consultation en ligne. 355 pages. Edition Cerema. Réf. SKU1746155657.
- Cerema (2015). Base de données CARTELIE des carrières produisant des enrochements ou des blocs. Validité 04/2019.
- G38-061 (1993). Articles à usages industriels - Recommandations pour l'emploi des géotextiles et produits apparentés - Détermination des caractéristiques hydrauliques et mise en œuvre des géotextiles et produits apparentés utilisés dans les systèmes de drainage et de filtration. Edition AFNOR
- Recommandation pour l'emploi des géosynthétiques dans les systèmes de drainage et de filtration (2013) édition CFG (*http://www.cfg.asso.fr/sites/default/files/files/publications/CFG-Fascicule%20Fitration-Drainage.pdf*)

Annexes :

Figure 14 : Protection de côte maritime avec enrochements et géotextile de filtration (Source : TenCate Geosynthetics)

Figure 15 : Autre exemple de protection par enrochement sur géotextile (Source : TenCate Geosynthetics)

Figure 16 : Enrochements à Lacanau (protection littorale) (Crédit photo : Ifsttar)

	Fiche recommandation **Protection externe par enrochements liés au béton**	**Fiche FT 7.2**

Auteurs principaux : B. CORTIER (HYDRATEC)
Contributeurs : M. SUTTER (INRAE) ; D. POULAIN (INRAE)
Relecteurs : S. PATOUILLARD (DREAL) ; J-C. PALACIOS (Safege)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais :
Dikes are subject to external attacks due to river flows.
Rip-rap linked with concrete, implemented on a transition layer and a filter geotextile provide effective protection against external hydraulic erosion when it is necessary to have to stiffen the slopes or when hydraulic stresses are very high (torrentiel flows). Special precautions must be observed for the implementation of concrete and the connection of the protection to the banks and existing structures.
This technical sheet describes the methods generally used on dikes, but the Engineering Contractor and the Owner need to ensure that the method chosen is suitable for the purpose and the site.

Fiches d'études de cas correspondantes(s) :

Introduction :

Définition :
Le confortement de type protection en enrochements liés au béton est souvent utilisé lorsque les emprises disponibles nécessitent de raidir les talus, et/ou lorsque la protection doit servir de soutènement. L'ouvrage comporte deux parties :

- une réserve de pied en enrochements libres, appelé sabot devant accompagner l'évolution du lit en cas d'affouillement de ce dernier et de façon à toujours protéger le pied de talus ;
- la protection proprement dite en enrochements liés au béton, sur la hauteur du talus à protéger et/ou à soutenir. Le fruit peut atteindre 1H/1V ou plus raide (sous réserve de la stabilité globale du remblai constituant la digue).

Les enrochements sont généralement mis en place après la pose d'un géotextile filtre ayant une résistance suffisante pour ne pas subir de blessure (déchirure) lors de la pose des blocs.

Sujet de la fiche :
Cette fiche traite de la conception et de la réalisation de l'enrochement lié au béton proprement-dit utilisé en protection contre l'érosion externe.
Les aspects de conception et de dimensionnement du sabot sont regardés en détail dans la fiche FT 7.10 – Recharge en pieds par enrochements.

Notons par ailleurs que ces confortements peuvent nécessiter des réparations auquel cas les méthodes mises en œuvre sont généralement similaires à celles utilisées pour les maçonneries (voir fiche FT 7.5).

Fonction(s) principale(s)
Lutte contre l'érosion externe.

Fonction(s) secondaire(s)

Soutènement de berge (enrochements cyclopéens).
Maitriser les écoulements dans le corps de digue par étanchement du parement coté eau.

Description

Performance à atteindre :

- résistance au glissement de talus en considérant un affouillement du pied (basculement du sabot) ;
- résistance de la fondation (poinçonnement, tassement) ;
- résistance au renversement pour un ouvrage cyclopéen jouant un rôle de soutènement ;
- résistance des matériaux constituant aux contraintes extérieures.

Utilisation :

La réalisation de protections en enrochements liés au béton est à privilégier en cas d'emprise limitée nécessitant le raidissement des talus, pour améliorer l'étanchéité amont côté eau ou dès lors que les contraintes hydrauliques sont fortes (vitesses > 5m/s). Les enrochements liés sont également adaptés pour les digues surversantes.

Variantes :

Les variantes, pour ce type de confortement reposent essentiellement sur la blocométrie des enrochements utilisés ainsi que sur la nature du béton.

Alternatives

Perrés maçonnés (cf fiche FT 7.5)
Murs gabions (cf fiche FT 7.3)
Murs béton de type poids ou en L (cf fiche FT 5.3) si la fonction principale est le soutènement et non la protection contre l'érosion externe.
Ouvrages en BCR (domaine qui fait l'objet d'expérimentations et de recherche et qui n'a donc à ce stade pas de fiche dans le présent guide)

Dimensionnement :

Principe :

- la résistance au glissement de talus est vérifiée par un calcul au grand glissement en situation non drainée avec nappe haute dans le remblai de la digue et niveau bas dans le cours d'eau et en considérant un affouillement du pied (basculement du sabot) on considère généralement un monolithe blocs + liant ;
- les choix de conception des enrochements liés au béton reposent sur les propriétés géométrique et physiques (résistance à l'érosion, adhérence bloc-liant) des matériaux et la vitesse du courant ;
- le respect des règles de filtre derrière les enrochements liés est moins essentiel que dans le cas d'un enrochement libre, le liaisonnement au béton ayant pour effet d'empêcher la migration des fines au travers des blocs. Un filtre sera par contre nécessaire pour éviter la pollution du système de drainage par le béton.
  Le drainage derrière les enrochements est en revanche indispensable pour éviter les sous pressions. Il sera réalisé en mettant en place une couche granulaire respectant les règles usuelles de filtre entre cette dernière et la berge et en réalisant des barbacanes traversantes muni d'un bouchon de géotextile à son extrémité. En fonction de la nature de la berge, il peut être nécessaire de mettre en place également entre la couche drainante et la berge, un géotextile filtre.

Les conditions de drain et de filtre à respecter sont les suivantes :

- non entrainement des matériaux fins de la berge : $D_{15\ drain}/d_{85\ berge}<5$;
- perméabilité du filtre : $D_{15\ drain}/d_{15\ berge}>5$;
- condition d'uniformité : $2<D_{60\ drain}/D_{10\ drain}<8$.

À noter qu'il est courant que le dimensionnement des enrochements liés se fasse en ne considérant pas le liant, c'est à dire comme un enrochement non lié.

La Figure 1 illustre une protection en enrochements liées au béton.

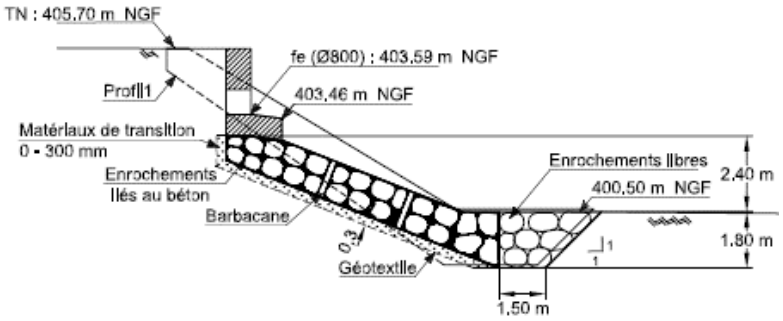


Figure 1 : Exemple de protection en enrochements liées au béton intégrée à un ouvrage traversant, digue de l'Arve à Etrembières (74) (Source : MOE Setec hydratec/MOA SM3A).

Paramètres nécessaires :

On cherchera en particulier à connaitre :

- la vitesse d'écoulement ;
- la profondeur d'affouillement potentielle (dépendra principalement de la granulométrie des alluvions, des hauteurs et vitesses de l'écoulement, de la configuration de la berge, de son éloignement de la digue et de l'existence ou non du substratum).

Éléments de conception:

- ressource locale en matériaux pour enrochements (disponibilité, qualité, éloignement) ;
- disponibilité et conditions d'accès pour le béton (idéalement mis en œuvre à la pompe) ;
- risques de pollution des eaux liés en cas de non confinement de la laitance d'autant plus difficile si le parement est vertical.

Modèle(s) disponible(s) :

Spécification sur la taille des enrochements

Les spécifications des enrochements sont définies dans la norme NF EN 13383-1 et les essais nécessaires à leur évaluation dans la norme NF EN 13383-2.

Si pour les enrochements libres, la blocométrie se définit essentiellement à partir des conditions de hauteur d'eau et de vitesses d'écoulement pour la crue de référence et issues de modèles hydrauliques 1D ou 2D, pour les enrochements liés au béton, les facteurs supplémentaires à prendre en compte sont les conditions de pose et de bétonnage en phase travaux. Il importe en effet de ne pas descendre en dessous d'un certain diamètre médian afin de pouvoir correctement liaisonner les interstices et d'assurer une stabilité suffisante des blocs au moment de la pose en cas de raidissement du talus.

Spécification sur les caractéristiques des enrochements

Les enrochements doivent présenter également des caractéristiques de forme, de dureté, continuité, non fragilité, faible altérabilité, non gélivité. Ce dernier paramètre est particulièrement important afin de ne pas avoir de fracturation des blocs.

Spécification sur le béton
Le béton utilisé devra être de consistance plastique.
On donne ci-après des valeurs de classes usuelles à respecter, à adapter en fonction des contraintes spécifiques du site :

- classe de résistance à la compression : C30/37 ;
- classe d'exposition : XF3 (F) ;
- classe de consistance : S2 ;
- dosage : 350 Kg/m3 .

Privilégier des bétons prêts à l'emploi, en provenance de centrales agréées. Fabrication conforme à la norme EN 206-1

Spécification sur le géotextile de filtration
Doit jouer un rôle de filtre vis-à-vis des matériaux fins (à dimensionner en fonction de la nature des sols présents). Se référer à la fiche technique FT 4.1.

Spécification sur la couche drainante
Elle est mise en place sous les enrochements et sert également de transition entre le géotextile et les blocs (couche anti poinçonnement).

Calcul de stabilité : modèles géomécaniques existants (Talren, Plaxis, Slope-W,...)
Calcul de stabilité externe : renversement, poinçonnement,

Aspects pratiques (CCTP, chantier,) :

Drainage derrière les enrochements liés au béton assuré par une couche de transition (en fonction de la nature des terrains) et des barbacanes traversantes. Ce dispositif drainant vise à limiter les sous pressions pouvant apparaitre en phase de décrue et pouvant affecter la stabilité du massif.

Cahier des charges :
Fournitures

- **Blocs** conforme à la norme NF EN 13383-1 et NF EN 13383-2. Blocométrie à préciser en fonction des caractéristiques des écoulements et du fruit du talus (voir règles de dimensionnement) ;
- **Béton :** voir spécifications ci-dessus ;
- **Matériaux de transition :** assure un rôle de drain derrière la protection liée au béton et de répartition des contraintes entre les blocs et le géotextile. Pour des blocs de type HMA 300/100 et plus gros, une couche de transition de 0,3 m d'épaisseur sera nécessaire. Pour des blocs plus petits, l'épaisseur peut être réduite à 0,2 m ;
- **Géotextile :** conseillé même avec pose de matériaux de transition (résistance au poinçonnement suivant NFG 38019 > 1,2 kN à définir en fonction des caractéristiques des blocs et de la nature de la couche de transition) ; pour les autres caractéristiques, se référer à la fiche technique FT 4.1.

Chantier :
La mise en œuvre des enrochements se fera à l'aide de pelles hydrauliques, en commençant par la partie la plus basse et en remontant vers le haut. La mise en œuvre par déversement à partir de la crête des talus ou par poussage aux engins est à proscrire.
Les blocs qui seront liés au béton doivent être nettoyés au jet avant mise en place.

- Pour le sabot, les blocs seront imbriqués au fur et à mesure de leur mise en place et disposés « en écaille », c'est à dire que leur grand axe devra être incliné sur la verticale (de 10 à 15 degrés environ), le haut de chaque bloc fuyant le courant et recouvrant partiellement le bloc suivant (vers l'aval), à la manière des tuiles d'un

toit (Figure 2) ;

- sur le talus, les blocs seront, suivant le même principe, disposé en « boutisse ». C'est-à-dire que leur plus grand axe devra être sensiblement perpendiculaire à la pente des protections et au sens de l'écoulement. Les différentes couches d'enrochements du perré seront réalisées une par une, afin que les blocs soient imbriqués au fur et à mesure de la constitution de la protection depuis le bas vers le haut du talus.

Les blocs d'enrochements seront disposés de manière qu'il subsiste le minimum de vides. Aucun espace entre blocs, supérieur à la plus petite taille des enrochements, ne doit subsister.

Les enrochements devront obligatoirement être mis en œuvre sur deux rangées minimum soigneusement encastrées (pour configuration en talus).

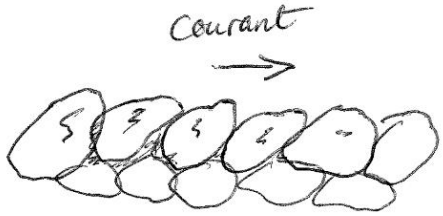


Figure 2 : Schéma illustrant la mise en œuvre des blocs « en écaille » dans le sens du courant (Source : B. Cortier)

Béton de liaisonnement

Le béton est mis idéalement à la pompe où à l'aide d'un skip. Les bétons seront pré-vibrés pour assurer le bon remplissage entre les blocs et suffisamment plastique pour ne pas s'écouler à l'extérieur des joints. Ces derniers seront donc réalisés en creux, avec si nécessaire, un curage à la main après la pose.

Exécution du bétonnage des blocs en suivant les séquences ci-dessous :

- mise en place d'une rangée de blocs encastrés sur un lit de béton frais ;
- comblement des vides par le béton. Ce dernier ne devant pas être trop liquide pour éviter tout écoulement sur les parois ;
- constitution d'un nouveau lit de béton pour que le cycle recommence.

Il convient dès lors de :

- s'assurer que l'ensemble de la protection y compris la partie en fondation est liée au béton ;
- s'assurer que la rugosité des parois du talus soit suffisante en évitant un rejointoiement des blocs à la manière d'un mur en maçonnerie. Pour cela il faut dans l'idéal garder des joints creux d'au moins 0,15 à 0,20 m ;
- d'effectuer un nettoyage au jet pour enlever toute trace de laitance de béton sur les enrochements.

Matériaux et matériels nécessaires :

- matériel topographique pour implantation ;
- skip/toupie/pompe à béton ;
- pelle mécanique avec godet ou pince à enrochements ;
- chargeur ;
- gabarit poids pour respect géométrie du perré.

Nuisance/ environnement :

Les points de vigilance en termes d'environnement portent sur : le bruit, la poussière liée à la circulation de chantier, la pollution éolienne par les fines et aquatique par la laitance, toute autre pollution accidentelle (carburant, huile…), gestion des déchets de chantier, protection faune / flore…

Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance) :

- Agrément de la carrière et du processus de production (origine des enrochements) ;
- Agrément du béton (composition, fabrication, manutention) : on notera pour les constituants granulaires, les essais Los Angeles, Micro Deval Humide, porosité, granulométrie ;
- Agrément du produit sur la base d'une fiche technique produit (FTP) ;
- Blocs témoin pour gabarit des blocs à installer en début de chantier ;
- Validation du PAQ et des procédures liées à la mise en œuvre ;
- Contrôle d'approvisionnement (vérification du marquage CE sur les bordereaux de livraison de matériaux synthétiques) ;
- Contrôle des fournitures sur la base des spécifications demandées au marché ;
- Contrôle de la réalisation du stock et de la reprise des matériaux (éviter la ségrégation) ;
- Contrôle d'exécution de la mise en œuvre ;
- Réception des enrochements distincte de réception du confortement.

Vitesse d'avancement :

Variable en fonction de la géométrie de l'ouvrage et de la blocométrie des enrochements. Pour un échelon de mise en œuvre (1 pelle + 1 chargeur + 1 camion toupie) et pour des enrochements type HMA 300/1000, environ 50 à 100 m^3/heure

Traitement de points singuliers :

Les principaux points singuliers portent sur

- les ouvrages traversants (dalots, buses, …),
- les raccordements avec les protections existantes

Ces singularités peuvent nécessiter d'adapter le fruit des enrochements liés au béton et leur blocométrie (pour bien assurer la continuité de la structure au contact des ouvrages à raccorder), et prévoir les risques de tassement différentiel entre enrochements liés et ouvrages ou berges existants. Pour ce dernier cas, réaliser un raccordement sur quelques mètres en enrochements libres.

Références :

AFNOR (2003). *NF EN13383-1. Enrochements. Spécifications*

AFNOR (2003). *NF EN13383-2. Enrochements. Méthodes d'essais*

Composition et fabrication du béton : Norme EN 206-1

CIRIA (2013). *The International Levee Handbook*. C731. Ed. Ciria. 1332 pages

CIRIA, CUR, CETMEF (2009). *Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques. Version française du Rock Manual*. P09-01, Edition Cetmef Compiègne. 1302 pages.

Guide Enrochement « Utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques – version Française du Rock Manual (2ème édition) - CETMEF

NF P 18-554 (poids volumique de roche)

Annexes :

Voici un exemple de réparations de protections en enrochements liés ayant subi un démantèlement

Figure 3 : Point singulier au droit du raccordement avec la berge ou un ouvrage - Protection hydraulique des berges de l'Arc de Maurienne à Saint André (Crédit Photo : MOE Setec hydratec/MOA SFTRF)

Figure 4 : Incision du lit avec démantèlement partiel du sabot en enrochements libres - Protections hydrauliques des berges de l'Arc de Maurienne au Cône du Fay (Crédit Photo : MOE Setec hydratec/MOA SFTRF)

Figure 5 : Travaux de reconstitution du sabot en enrochements libres - Protections hydrauliques des berges de l'Arc de Maurienne au Cône du Fay (Crédit Photo : MOE Setec hydratec/MOA SFTRF)

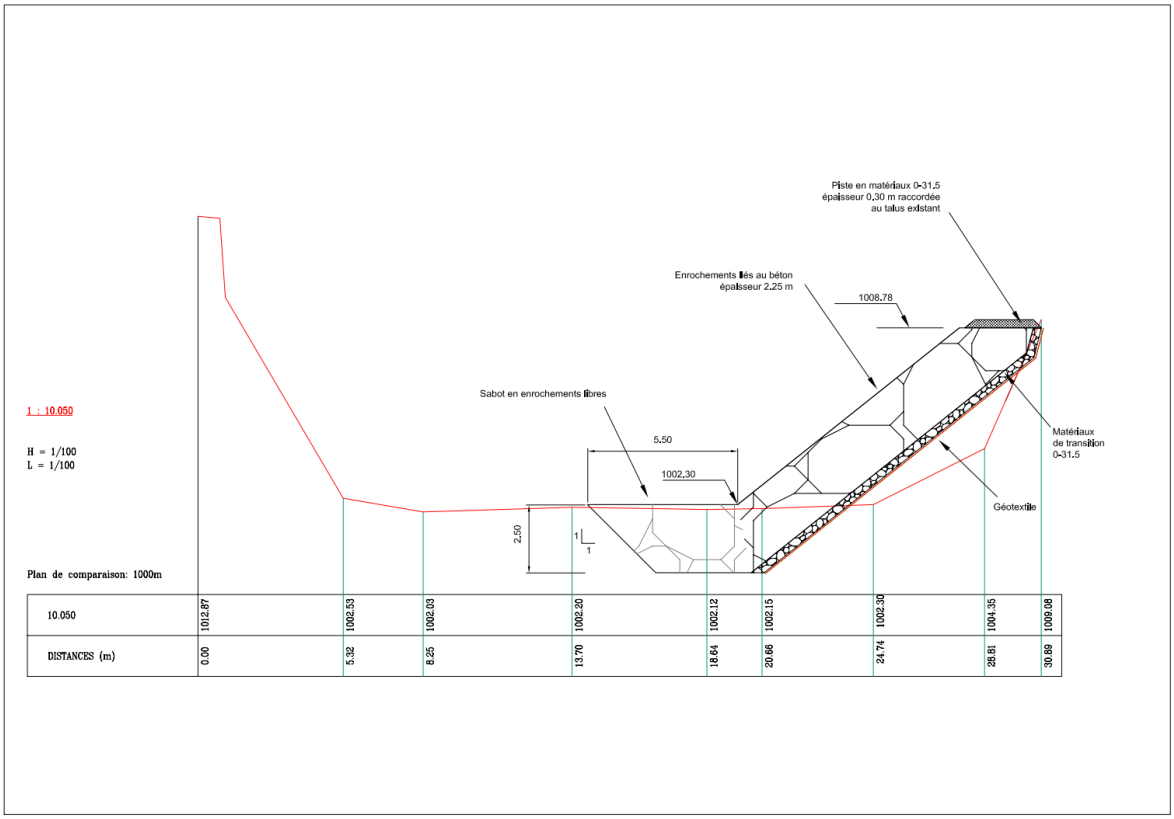


Figure 6 : Coupe type de protection en enrochements liés (travaux de réparation des protections de l'A43 sur l'Arc à Saint André (73) (Source : Setec hydratec – 2008)

Figure 7 : Mise en œuvre de protections en enrochements liés au béton sur un coursier de déversoir – Mise en place du géotextile et des matériaux de transition sous la couche d'enrochements (Ouvrage de Marle - MOE Setec hydratec/MOA Entente Oise Aisne)

Figure 8 : Mise en œuvre de protections en enrochements liés au béton sur un coursier de déversoir – Liaisonnement au béton des blocs à la pompe et à l'aide d'une aiguille (Ouvrage de Marle - MOE Setec hydratec/MOA Entente Oise Aisne)

	Fiche Technique **Protection contre l'érosion externe en Gabions** Gabions protection	**Fiche FT 7.3**

Auteurs principaux : B. CORTIER (HYRDATEC) ; A. PLASTRE (Maccaferri)
Contributeurs : D. POULAIN (INRAE) ; M. SUTTER (INRAE)
Relecteurs : P. CHEVRIER (EGIS)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais :
The gabions boxes are formed of parallelepipedic wire cages (generally double twist steel wire but other types of containers are presented as an alternative), generally of width between 0.50 m and 1 m and filled with stones.

They can be used in external levees protection by their nature and their roughness (reduction of the flow velocity).

Étude(s) de cas correspondante(s) :
C 5.11 Protection à l'aléa surverse des digues du Vidourle – Secteur Gallargues et Aimargues
C 5.34 Réparation de la brèche (2005) sur une digue des basses Plaines de l'Aude par reconstitution du corps de digue et pose d'un Enkamat A20 ancré

Introduction:

Définitions :

Les gabions ou gabions classiques sont des structures formées de cages grillagées parallélépipédiques – la cage ou boite gabion comme présenté sur la Figure 1 (généralement grillage double torsion (*) mais d'autres types de conteneurs sont présentés en variante), ayant une hauteur de 50 cm ou 1 m, une largeur variable entre 0.50 m et 2m et une longueur variant entre 1 m50 et 4 m remplies de matériaux de remplissage de type concassé ou galets.

(*) : La simple torsion est à proscrire pour des ouvrages gabions, la rupture d'un fil entraine le démaillage complet de la cage. Par ailleurs, les résistances mécaniques des grillages et leurs raideurs sont bien inférieures et ne permettent pas de construire des ouvrages durables.

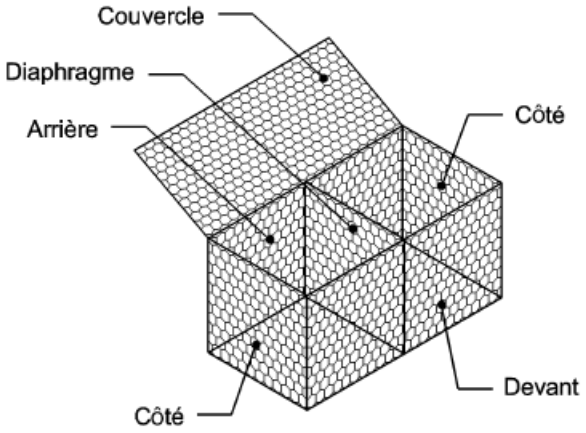


Figure 1 : Schéma d'un gabion boite (Source : NFP 94 325-1)

Les matelas gabions (Figure 2) sont des cages de grande surface (largeur 2m ou 3m et longueur variable entre 2 et 6m) et de faible épaisseur (17, 23 ou 30cm). Il existe des matelas gabions avec diaphragmes incorporés à la base de la cage par pliage (matelas double diaphragmes – type matelas Reno) et des matelas gabions avec diaphragmes séparés et attachés à la base (matelas simple diaphragmes).

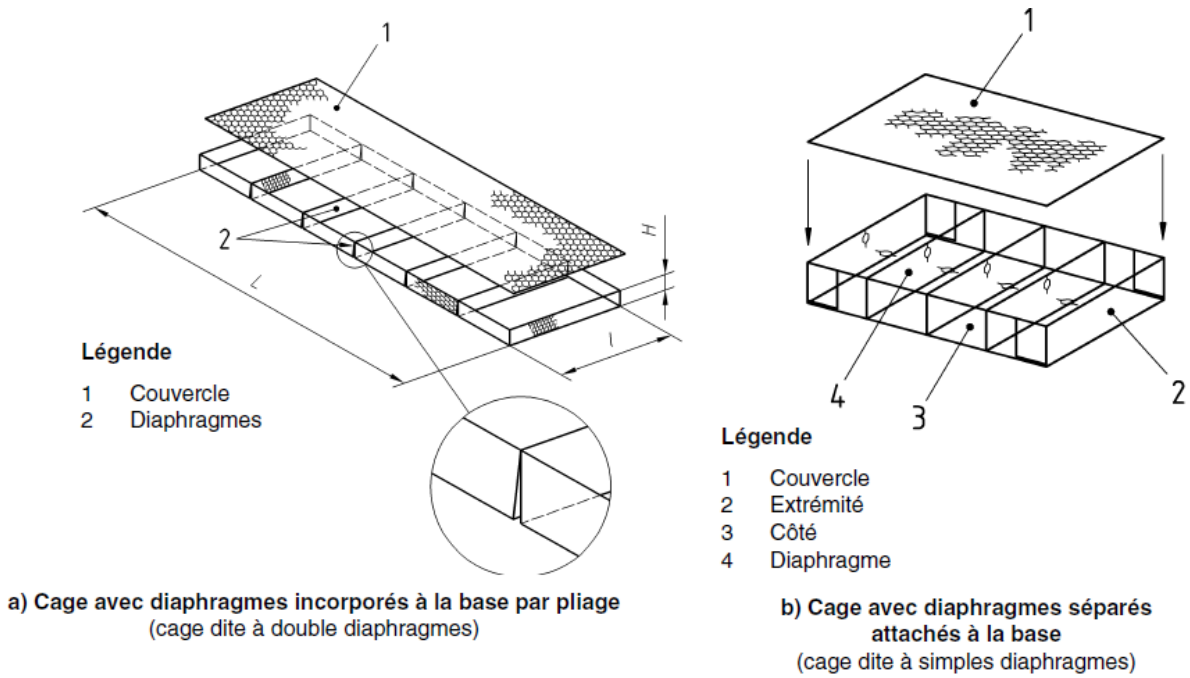


Figure 2 : Schéma d'un matelas gabions (Source : extrait NFP 94 325-2)

Les gabions cylindriques ou gabions sacs sont des unités cylindriques en grillage à double torsion en fils d'acier, comportant une ouverture à une extrémité permettant de la remplir de pierres sur le chantier (rarement utilisés mais adapté à des interventions de confortement rapides (fermeture de brèches)).

Les spécifications relatives à la fabrication des gabions, matelas gabions et gabions sacs sont définies dans la norme NF EN 10223-3.

Les spécifications relatives à leur mise en œuvre en milieu aquatique sont décrites en détail dans la norme NFP 94-325-2.

Sujet de la fiche :

Cette fiche traite de l'ensemble des structures de type gabion, utilisées afin d'améliorer la protection des talus d'une digue. Les structures concernées sont aussi bien les gabions classiques, les gabions semelles que les matelas gabions, ou encore les gabions sacs ou cylindriques.

Fonction principale :

- lutte contre les érosions hydrauliques externes liées aux écoulements et/ou aux surverses y compris affouillement. phénomènes ayant lieu sur des sections de digues courantes (pied de talus coté eau et/ou talus) ou surversantes (crête et coté zp) (figure 3).
- associée à cette fonction on peut dans certains cas, y associer une fonction de ralentissement des écoulements (rugosité du parement).

Fonction(s) secondaire(s) :

- soutènement du remblai de digue et raidissement du talus des digues. cette fonction est remplie uniquement par les gabions classiques (figure 3).
- filtration du corps de la digue.
- drainage.

Figure 3 :
Photo de gauche : matelas gabion sur talus - digue surversante de l'ouvrage écrêteur de Dampierre-les-Bois dans le Doubs (25) (Crédit Photo : setec-hydratec)
Photo de droite) : cage gabion en protection de berge/digue jouant également un rôle de soutènement Feschotte dans la traversée de Fesches-le-Châtel dans le Doubs (25) (Crédit Photo : setect-hydratec)

Description :

Performance à atteindre :

- **résistance aux forces tractrices** de l'écoulement sur le talus. classiquement, les cages et matelas gabions sont conçus pour supporter des contraintes de cisaillement de 150 n/m² à plus de 500 n/m². l'utilisation de la technique de double diaphragme permettrait un gain de performance ;
- **souplesse et flexibilité des matelas** pour jouer leur rôle de protection contre les affouillements ;
- **monolithisme de la structure**, du fait des liaisons par ligatures entre les gabions ;
- **drainage** assurée par la nature même des gabions (constitué de matériaux granulaires) ;
- **rugosité de parement** permettant un ralentissement des écoulements ;
- **résistance à la corrosion.**

Notons que si une fonction de soutènement est associée, les performances recherchées seront également :

- **stabilité au glissement sur fondation et au renversement** des cages gabions soutenant les matériaux du corps de digue ;
- **flexibilité et déformabilité des cages gabion en grillage** double torsion pour permettre d'encaisser les tassements différentiels. a noter que les cages en acier électro soudés, plus rigides, n'ont pas cette capacité.

Utilisation :

Technique de protection externe assez largement utilisée en milieu fluvial, du fait de ses nombreux avantages :

- relative facilité de mise en œuvre ;
- permet de s'adapter à une grande variété de configuration et facilite les raccordements avec les ouvrages existants ;
- technique compétitive économiquement ;
- permet une bonne intégration dans l'environnement ;
- Possibilité de fonction de soutènement et/ou augmentation de la stabilité au glissement (cf. fiche FT 5.5).

Son utilisation en domaine maritime, bien que moins courante du fait de contraintes plus importantes (hauteur de houle, abrasion,…) reste néanmoins possible pour des hauteurs de houle modérées inférieures ou égales à 1m50 (Rock manual, Ciria). Des mesures particulières de conception doivent être alors prévues :

- protection contre des fils à l'abrasion ;
- ancrage fort des cages…

Variantes :

Comme mentionné précédemment, il n'existe pas de conception unique pour de tels ouvrages de protection. On peut envisager des gabions de faible épaisseur ou non, parallélépipédiques ou cylindrique. Par ailleurs, il existe de nombreuses conception au sein même de ces familles (simples, avec diaphragmes, sac, paillasse…).

Il existe également de nombreuses variantes concernant les matériaux utilisés et leur mise en œuvre :

- matériau contenu et modalités de mise en œuvre ;
- le grillage : taille des mailles, forme, cage simple, cage débordante, cage fermée ou « panier » ; enrobage des fils, double diaphragme…

Alternatives

Techniques alternatives aux matelas gabions :

- protections minces (matelas jk, géocomposite, perré bitumineux) (cf. fiche FT 7.4) ;
- perrés béton (cf. fiche FT 7.6) ;
- protection technique mixte (cf. fiche FT 7.13) lorsque des replantations sont associées aux gabions.

Dimensionnement :

Principe :

En termes de dimensionnement, on distinguera deux techniques :

- les techniques de **gabion cage,** utilisées pour assurer un double rôle de protection externe et de soutènement du remblai de la digue ;
- **les matelas gabions,** mis en place sur les talus des digues et assurent uniquement un rôle de protection externe vis-à-vis des contraintes hydrauliques.

Les premiers seront dimensionnés comme ouvrage de soutènement (cf. fiche FT 5.5). Ce dimensionnement repose sur des calculs de stabilité (interne, générale), auxquels est jointe une vérification de résistance aux écoulements.

Les seconds sont dimensionnés sous différents aspects :

- stabilité d'ensemble ;
- résistance à la vitesse des écoulements ;
- résistance aux contraintes de cisaillement.

Lors du dimensionnement de tels ouvrages, sont également étudiés les matériaux utilisés, leur agencement,….

En particulier il sera ainsi nécessaire d'étudier la stabilité externe :

- la stabilité au poinçonnement des fondations ;
- la stabilité au glissement sur fondation ;
- la stabilité au grand glissement en tenant compte d'un risque d'affouillement du fond ;
- les contraintes d'érosion tangentielle sur le fond et sur les berges ;
- les contraintes normales (sous-pressions) liés aux effets dynamiques de l'écoulement ;
- la sensibilité à l'affouillement du lit (en termes de profondeur d'affouillement potentielle).

Paramètres nécessaires :

Afin de mener à bien ce dimensionnement, il est particulièrement nécessaire d'acquérir les informations suivantes :

- la bathymétrie/topographie du lit et des berges (notamment pour les aspects affouillement) ;
- la nature et les caractéristiques mécaniques des matériaux de la digue à soutenir et à protéger (γh, ϕ', c') ;
- la nature et la granulométrie des fonds ;
- les contraintes hydrauliques (vitesses, pentes, hauteurs d'eau, contraintes de cisaillement) pour les crues de projet à considérer ;
- les données liées à l'environnement du site et aux ouvrages existants.

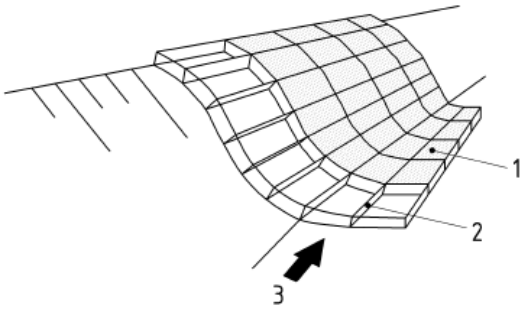
<u>Éléments de conception :</u>

La conception de la réparation par technique gabion doit tenir compte des problématiques d'accès et de montage des gabions (qui peuvent également être préfabriqués et mises en œuvre directement moyennant certaines précautions).

- en cas d'ouvrages et de réseaux existants, prévoir un plan de calepinage et soigner les raccordements (cf. traitement des points singulier et ouvrages de transition) ;
- prévoir un fruit de quelques pourcent (6% recommandé) vers le centre de la digue ou des redans de 10cm/m pour prévenir les risques de basculement (particulièrement pour les murs de grande hauteur, voir Figure 4), tenir compte de la poussée des terres après remblaiement, et des problématiques de tassement du sol de fondation ;
- dans le cas de talutage au-dessus du mur, il est conseillé de faire partir le talus à l'arrière du gabion de tête.

Figure 4 : Exemple de basculement de cages gabions après mise en place des remblais de la digue - problème de compactage du remblai argileux en tête de gabion, poinçonnement de la fondation ayant entrainé un basculement sans ruine de l'ouvrage gabion (Crédit Photo : setec-hydratec)

Les matelas gabions doivent être disposés sur la berge de façon à pouvoir se déformer, c'est-à-dire avec les diaphragmes disposés parallèlement à l'écoulement (Figure 5).



Légende

1 Protection parafouille
2 Orientation des diaphragmes dans le sens du courant
3 Sens du courant

Figure 14 — Dispositions constructives de protection superficielle sur berge

Figure 5 : Dispositions constructives de protection superficielle sur berge (Source : NFP 94 325-2)

Lorsqu'ils sont placés à l'horizontale en fond de cours d'eau, il est préférable de les placer avec les diaphragmes disposés perpendiculairement à l'écoulement.

Modèle(s) disponible(s) :

La littérature existante se base sur des essais réalisés par l'entreprise Maccaferri à l'université de Fort Collins aux USA en 1984.

- Résistance à la vitesse du courant :

On vérifie que la vitesse de début d'entrainement du matériau utilisé pour remplir les cages et pondéré d'un pourcentage prenant en compte le grillage de la cage, est supérieure aux vitesses d'écoulement calculée dans le cours d'eau.

Le tableau 1 donne des ordre de grandeur des matériaux de remplissage des gabions à mettre en œuvre en protection en fonction de la vitesse.

Tableau 1 : Vitesses admissibles des structures gabions en fonction de leur épaisseur (Source Maccaferri)

Type	Epaisseur (m)	Pierraille de remplissage		Vitesse critique (m/s)	Vitesse limite (m/s)
		Calibrage (mm)	d_{50} (m)		
Matelas Reno	0,15 - 0,17	70 - 100	0,085	3,5	4,2
		70 - 150	0,110	4,2	4,5
	0,23 - 0,25	70 - 100	0,085	3,6	5,5
		70 - 150	0,120	4,5	6,1
	0,30	70 - 120	0,100	4,2	5,5
		100 - 150	0,125	5,0	6,4
Gabions	0,50	100 - 200	0,150	5,8	7,6
		120 - 250	0,190	6,4	8,0

- Résistance aux contraintes de cisaillement : voir tableau 2.

Tableau 2 : Contraintes admissibles des structures gabions en fonction de leur épaisseur (Source Maccaferri)

Revêtement	Epaisseur	Contrainte critique (N/m^2)	Contrainte limite (N/m^2)
Matelas Reno	0.17	224	269
	0.23	268	322
	0.30	336	403
Gabions	0.50	470	564
	1.00	500	600

Sur berge un coefficient réducteur égal à $r = \sqrt{1 - \frac{(\sin\theta)^2}{(\sin\varphi)^2}}$ doit être appliqué à la contrainte

Avec : θ = Pente de la berge
φ = Angle de frottement des matériaux de remplissage (généralement entre 40 et 50°).

- Stabilité d'ensemble :

Mené selon des méthodes de calcul de stabilité des pentes classique, consistant au calcul d'un facteur de stabilité, traduisant un état limite de stabilité au glissement : calcul type Bishop… ; ou éléments finis.

- Stabilité interne :

Conformément à la norme NF P94-281, on vérifie la compression, le basculement, le cisaillement et le glissement entre éléments en gabions.

- Choix des matériaux :

Les matériaux granulaires utilisés pour remplir les cages sont de petits enrochements répondant à certaines exigences de qualité, et tout particulièrement à des exigences granulométriques. Conformément à la norme française NF P 94-325-2, ils doivent présenter :

  - une granulométrie de 90/180 pour les cages de gabions ;
  - une granulométrie de 80/125 pour les matelas gabions ;
  - une masse volumique : valeur minimale de 2300 kg/m^3 ;
  - une résistance à l'usure MDE inférieure à 45 (essais micro-Deval) ;
  - une résistance au gel-dégel : perte de masse inférieure à 0.5 % ;
  - les matériaux granulaires utilisés pour remplir les cages doivent être propre.

Il est aussi généralement attendu une résistance à la rupture supérieure à 60 MPa.

Les gabions à maille hexagonales double torsion sont fabriqués à partir de fils d'acier revêtus d'alliage de Zinc et d'aluminium (généralement Zn/95%/Al5%) ou un revêtement organique. Pour les applications en milieu hydraulique, la norme NFP 94-325-2 impose l'utilisation d'une gaine polymère (PVC, PE, PA6).
Les combinaisons maille/fil standard sont les suivantes :

  - gabions : maille 80x100 avec fil de diamètre nu 2.7mm ;
  - matelas gabions : maille 60x80 avec fil de diamètre nu de 2.2mm.

Aspects pratiques (CCTP, chantier,) :

Cahier des charges :

Rien de spécifique par rapport à un gabion utilisé en soutènement (cf. fiche FT 5.5).

Chantier :

Rien de spécifique par rapport à un gabion utilisé en soutènement (cf. fiche FT 5.5).

Traitement des points singuliers :

- nécessité de la présence d'une poutre sommitale pour les matelas mis en œuvre en protection du talus vis-à-vis de la surverse ;
- traitement de potentielles interfaces avec un gabion cage : découpage des cages à la dimension et forme souhaitée et fermeture de la cage par agrafage ;
- raccordement à des ouvrages en béton : pour éviter le glissement à cette interface il est conseillé de fixer le gabion contre le béton au moyen d'ancrages (goujons, tiges filetées) et de platines (Figure 6).

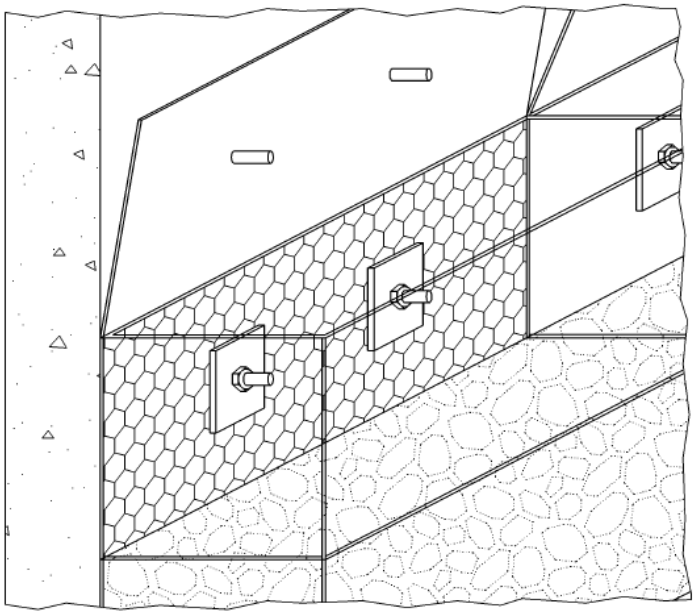


Figure 6 : Exemple de raccordement d'un ouvrage en gabion à un ouvrage béton (Source : NFP 94 325-1)

Références :

- Maccaferri (1986). Structures souples en gabions pour les ouvrages de soutènement des terres
- SETRA (1998). Guide pour la conception des ouvrages de soutènement, SETRA
- (1993). Fascicule 62 titre V du CCTG.
- Normes relatives aux caractéristiques des structures métalliques avec revêtement de protection et aux matériaux granulaires :
  - NF EN 10223-3 (2014). Fils et produits tréfilés en acier pour clôtures et grillages - Partie 3 : produits en grillage à mailles hexagonales en acier pour applications en génie civil
  - NF EN 10218-2 (2012). Fils et produits tréfilés en acier - Généralités - Partie 2 : dimensions et tolérances des fils
  - NF EN 10244-2 (2009). Fils et produits tréfilés en acier - Revêtements métalliques non ferreux sur fils d'acier - Partie 2 : revêtement de zinc ou d'alliage de zinc
  - NF EN 10245-2 (2011). Fils et produits tréfilés en acier - Revêtements organiques sur fils d'acier - Partie 2 : fils à revêtement de PVC
  - NF EN 10245-3 (2011). Fils et produits tréfilés en acier - Revêtements organiques sur fils d'acier - Partie 3 : fils à revêtement de PE
- NF P 94-325-1 (2004). Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Ouvrages en gabions en grillage métallique à maille hexagonale double torsion - Partie 1 : ouvrages hors site aquatique
- NF P 94 325-2 (2006). Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Ouvrages en gabions en grillage métallique à maille hexagonale double torsion - Partie 2 : ouvrages en site aquatique
- NF EN 13383-1 (2003).Enrochements : spécifications et méthode d'essais
- NF P 94-281 (2014). Justification des ouvrages géotechniques – Normes d'application national de l'Eurocode 7 – Ouvrage de soutènement – Murs (Annexe E)
- CEMAGREF (1992). Les ouvrages en gabion
- CETMEF (2002). *G*uide Enrochement – Chapitre 3, CIRIA

	Fiche Technique **Protections minces contre l'érosion externe**	**Fiche FT 7.4**

Auteurs principaux : E. VUILLERMET (BRLi) ; B. CORTIER (Setec hydratec) ; G. QUESNEL (Setec hydratec)
Contributeurs : M. SUTTER (INRAE) ; D. POULAIN (INRAE)
Relecteurs : JF. FREZET (Egis**)** ; JC. PALACIOS (Safege) ; S. PATOUILLARD (DREAL)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Résumé en anglais :

Thin external erosion protection methods differ from other methods by their light structure. These methods are generally more economical. They are of several kinds and it will be up to the project manager and the holder of the works contract to choose, according to the adequacy of the technique employed to the requirements of the work and the site.

Indications :

Définition :
Dans le terme « Protection mince » nous intégrons les matériaux en tout ou partie manufacturés dont la dimension « épaisseur » est très largement inférieure aux deux autres dimensions. Nous intégrons dans cette catégorie :

- les géosynthétiques notamment type géogrille tridimensionnelle, géonattes, systèmes alvéolaires…
- les panneaux tridimensionnels : panneaux 3D remplis de matériaux concassés 40/60, associés ou non à un grillage,

Sujet de la fiche :
Cette fiche traite de l'usage de ces composants dans le cadre de la protection contre l'érosion externe d'ouvrages hydrauliques. Les matelas gabions traités dans la fiche FT 7.3 ne sont pas abordés ici. Quelques types de protection mince sont décrites à titre d'exemple.

Fonction principale :
Lutte contre l'érosion externe, notamment :

- coté eau : la fonction principale recherchée par l'utilisation de ces matériaux est de constituer un parement sur le talus capable de résister à l'érosion hydraulique externe ;
- coté zone protégée (ZP) : une fonction permettant de lutter contre l'érosion liée aux eaux pluviales et une fonction de protection temporaire vis-à-vis des écoulements liés à une surverse.

Fonction(s) secondaire(s) :
Ces protections peuvent avoir un effet positif sur la stabilité superficielle des talus (cercles de peau). Cet effet est majoré pour les protections végétalisées en phase finale. Il faut cependant garder en mémoire que le développement d'arbres côté eau n'est pas recommandé.

Description :

Performance à atteindre :
Coté eau, une résistance à l'érosion externe, due à l'écoulement longitudinal de l'eau, mais aussi aux actions des vagues et du batillage.
La protection externe par des parements minces nécessite d'être composée d'un matériau au fort pouvoir de résistance aux forces tractrices.

Coté zone protégée, une résistance à l'érosion externe, liée soit au ravinement des eaux pluviales (on cherchera à maintenir les matériaux de couverture mis en œuvre le temps que le développement racinaire de la couverture herbacée vienne prendre le relai), soit aux écoulements liés à la surverse (un fort pouvoir de résistance aux forces tractrices est attendu en fonction du niveau de surverse).

Utilisation :
Ces techniques peuvent être mises en œuvre suite soit aux constats d'un désordre et dans ce cas il faudra envisager de reconstituer le remblai support, soit suite à un diagnostic mettant en évidence une défaillance probable, soit dans la recherche d'une amélioration de la sureté de l'ouvrage vis-à-vis de l'aléa « surverse » (à titre d'exemple ces techniques peuvent être utilisés pour des réparations de perrés en pierre sèches, en complément de techniques plus traditionnelles).

On utilise ces méthodes comme des protections permanentes ou transitoires. C'est notamment le cas lorsqu'on souhaite protéger un talus en attendant le développement d'une couverture végétale suffisante pour remplir la fonction de protection à l'érosion externe ou pour les protéger face à des phénomènes climatiques extrêmes (utilisation expérimentale à ce jour).

Variantes :
Outre les différentes techniques susceptibles d'entrer dans la définition « paroi mince » ainsi que les ouvrages de type matelas gabions (cf. fiche FT 7.3), la principale variante s'inscrit dans l'association avec les techniques de protection « végétale » (techniques mixtes ou enherbement ; cf fiches FT 7.12 et FT 7.13).

Alternatives :

Les perrés maçonnés (FT 7.5) ou perrés béton (FT 7.6) sont les techniques les plus à même de se présenter en alternative aux parois minces, du fait de leur épaisseur comparable.
Mais si l'épaisseur n'est pas le critère de choix déterminant, toute autre technique de confortement par protection externe est envisageable.

Dimensionnement :

Principe :
Le dimensionnement met en parallèle :

- L'évaluation des contraintes érosives limites caractérisant le matériau sollicité dans sa configuration de protection ;
- L'évaluation des vitesses d'écoulement au droit du contact avec les matériaux.

Il repose donc sur l'atteinte de paramètres de résistance suffisants aux sollicitations (écoulement mais aussi vieillissement) pour les composants assurant la protection de la digue face à l'érosion externe.

Dans la mesure où cette résistance n'est pas forcément assurée par le composant seul, d'autres composants (ancrages, tirants, poutres…) peuvent aussi nécessiter un dimensionnement.

Paramètres nécessaires *:*

Les données nécessaires à la conception sont les données « produit » fournies par le constructeur (géo synthétiques ou autres matelas tridimensionnels). On distingue en général deux critères : la résistance aux sollicitations hydrauliques (écoulements tangentiels et/ou frontaux) et le vieillissement (fluage).

Les données « produits » concernant les géotextiles peuvent être :

- L'épaisseur ;
- La masse surfacique (NF EN ISO 9864) ;
- La résistance à la traction SP/ST (NF EN ISO 10319) ;
- La déformation à l'effort de traction maximale (NF EN ISO 10319)
- Les limites de force tractrice, sont généralement données à titre indicatifs par les fournisseurs sans que les valeurs ne soient normalisées.

Pour les matelas tridimensionnels (grillage métallique avec remplissage en matériaux concassés par exemple), les fournisseurs précisent les résistances longitudinales et transversales, la granulométrie des matériaux de remplissage et les techniques de pose et d'ancrage sur le sol support.

Les données projet nécessitent :

- D'avoir les résultats des études hydrauliques ;
- De vérifier la nécessité ou non de dimensionnement d'une couche filtrante au contact protection mince et remblai ;
- D'évaluer éventuellement le risque d'endommagement de la protection par des embâcles.

Éléments de conception:

- Nécessité de la présence d'une poutre sommitale pour les matelas tridimensionnels ou les géosynthétiques mis en œuvre en protection du talus coté ZP vis-à-vis de la surverse. L'ajout d'une poutre sommitale permet de caler la cote de surverse et d'éviter une érosion par sous cavage de la protection ;
- Travaux préparatoires de reconstitution de la couche support.
- Caractéristiques de la couche support (type de matériaux, module) pour évaluer les conditions de pose et la nécessité de mise en place d'un filtre.

Modèle(s) disponible(s) :

Pour la méthodologie globale de justification : Chapitre 8.4 et 9.6 de The International Levee Handbook

Concernant les matelas tridimensionnels proposés par les constructeurs : guide de pose, dimensionnement des clous d'ancrage, vérification de la résistance des matelas aux efforts de traction et de cisaillement.

Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans la lutte contre l'érosion - Édition de 2003

Le dimensionnement intègre généralement :

- La stabilité mécanique du talus mais aussi de la protection (dimensionnement de son ancrage en tête voir de ses ancrages) ;
- Pour la résistance à l'arrachement sous écoulement, on se référera à l'International Levee Handbook qui présente quelques approches.

Aspects pratiques (CCTP, chantier,) :

Cahier des charges :

Le CCTP précise les caractéristiques attendues et les spécifications particulières en fonction des produits retenus (géogrille 3D ou matelas 3D).
Ces techniques sont à mettre en œuvre hors d'eau, en cas de réparation sous eau, il convient de privilégier d'autres techniques.

Chantier :

Il convient de vérifier notamment :

- Le stockage des fournitures ;
- Lors de la préparation :
  - La qualité du sol support
  - Le réglage des talus
- Lors de la pose :
  - Le respect de la tranchée d'ancrage : profondeur, nature des matériaux de remblai, compactage ;
  - Le respect du plan de calepinage et plus particulièrement des largeurs de recouvrements et des sens de pose ;
  - Le respect de la densité des agrafages s'il existe ;
  - Le respect de la période de végétalisation.

Matériaux et matériels nécessaires

Informations données à titre d'exemple pour mise en place de matelas tridimensionnels en acier galvanisé remplis de matériaux concassés et géogrilles.

- Pour les matelas:
  - Pelle à bras long pour remplir les cages situées en talus
  - Agrafeuse pneumatique indispensable pour un bon agrafage des cages
  - Marteau pneumatique et compresseur pour le battage des clous
  - Echelle,
  - Coupe câbles
  - Harnais de sécurité pour le personnel
- Pour les nappes de géosynthétique :
  - Palonnier pour les dérouler. Il est manœuvré avec une pelle hydraulique ou des grues mobiles
  - Masse pour pose des cavaliers
  - Pelle mécanique pour la tranchée sommitale
  - Coupe câbles pour les ancrages
  - Agrafeuse si trame en grillage

Nuisance/ environnement :
Outre les nuisances présentées dans le chapitre 2 de la partie I du document, la mise en place de ce type de protection ne présente pas de problématiques particulières.

Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance) :

- Agrément du produit sur la base d'une fiche technique produit ;
- Validation du PAQ et des procédures liées à la mise en œuvre ;
- Contrôle d'exécution de la mise en œuvre : remplissage des cages et agrafage dans le cas des matelas tridimensionels ;
- Contrôle de la réalisation de la couche sous-jacente reconstituée (si existante) ;
- Ancrage des nappes très minces : en tête, en pied et si besoin en talus (Ancre de type Platipus) ;

- Liaisons entre les nappes ou dispositifs alvéolaires.

Vitesse d'avancement :

Pour un géotextile, de 1000 à 2 500 m²/j.
Pour un matelas tridimensionnel mince : 100 à 500 m²/j

Traitement de points singuliers :

Il est nécessaire de gérer de façon singulière les limites latérales du traitement afin d'éviter le retroussement des protections très minces, de même que la connexion avec un ouvrage rigide.

Pour les solutions avec nappe tridimensionnelle enrichie en matériaux sablo-bitumineux, l'ensemencement doit être engagé avant la pose de la nappe et donc dans des conditions climatiques permettant la pousse végétative sans dégradation des graines par la chaleur.

Il faut également garder en tête la vulnérabilité du talus coté eau pendant la phase transitoire précédant le développement de la couverture végétale (risque de départ de fines, mise en tension de la géogrille, risque de déchirures, etc).

Références :

- The International Levee Handbook *Chapitre 8.4 et 9.6 – CIRIA - 2013*
- The Rock Manual: The Use of Rock in Hydraulic Engineering- chap 3 – CIRIA - 2007
- Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans la lutte contre l'érosion Édition de 2003 – Comité Français des Géosynthétiques

- Une norme européenne traite des gabions tissés (EN 10223-3) et une autre est plutôt une norme d'application : NF P 94-325-2 - « Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Ouvrages en gabions en grillage métallique à maille hexagonale double torsion - Partie 2 : ouvrages en site aquatique »
- Concernant les panneaux métalliques, en l'absence de normes, on peut se référer aux notes de dimensionnement des constructeurs.

Annexes :

Tableau 1 : types d'aménagements selon le niveau de sollicitation (Source : Aquaterra-Solution)

Sollicitations / Solutions	Faibles *Vitesses d'écoulement entre 0,1 & 0,5 m/s Berges < 3/1 (H/V)*	Modérées *Vitesses d'écoulement entre 0,5 & 1 m/s Berges < 2/1 (H/V)*	Moyennes *Vitesses d'écoulement, batillage entre 1 & 2 m/s Berges >2/1 (H/V)*	Fortes *Vitesses d'écoulement, batillage entre 2 & 3,5 m/s Berges >2/1 (H/V)*
Géomats (géogrilles tridimensionnelles) traditionnels	++	+++	++	-
Géomats avec remplissage de fibres de coco C350	-	+++	+++	+++
Géomats avec remplissage de fibres de polypropylène P550	-	++	+++	+++
Géonattes pré-végétalisées	-	+++	++	-
Gabions matelas de 0,2 à 0,3 m	-	-	++	+++
Gabions matelas de 0,5 m	-	-	-	++
Enrochements de 0,8 m	-	-	+	+++

- : pas adapté; + : adapté, sous certaines conditions; ++ : bien adapté; +++ : très bien adapté

Figure 1 : Pose de panneaux tridimensionnels à structure en aciers galvanisés (à gauche) et mise en place des ancrages avant remplissage par des matériaux concassés (Crédit photo et MOE : Setec-hydratec)

Figure 2 : Mise en place d'une géogrille 3D combinée avec grillage antifouisseur sur la partie supérieure de talus de la digue coté Seine – Confortement de la digue de Fouchy, en Rive Gauche à Troyes (2018-2021)
(Crédit photo : Troyes Champagne Métropoles - MOE : Setec hydratec)

Fgure 3 : Détail de la tranchée d'ancrage en crête de digue – Confortement de la digue de Fouchy, en Rive Gauche à Troyes (2018-2021)
(Crédit photo : Troyes Champagne Métropoles - MOE : Setec hydratec)

Figure 4 : Réensemencement et mise en place d'une natte coco pour assurer la bonne tenue de la terre avant reprise de la végétation – Confortement de la digue de Fouchy, en Rive Gauche à Troyes (2018-2021)
(Crédit photo : Troyes Champagne Métropoles - MOE : Setec hydratec)

	Fiche Technique **Réparation de perré maçonné**	**Fiche FT 7.5**

Auteurs principaux : E. VUILLERMET (BRLi)
Contributeurs : M. SUTTER (INRAE) ; D. POULAIN (INRAE) ; R. TOURMENT (INRAE)
Relecteurs : JF-FREZET (Egis) ; S. PATOUILLARD (DREAL)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Résumé en anglais :

Embedded stone pitching is a composite material consisting of larger stones bounded together by mortar. Made from different elements, these structures are exposed to several kind of disorders. Among the repairing methods proposed in this paper, the Engineering Contractor and the Owner still need to ensure that it is compatible with the purpose of the structure and with the configuration in situ.

Indications :

Définitions :

Le terme « perré maçonné » tel qu'utilisé dans cette fiche, renvoi à des ouvrages composés d'un matériau composite comprenant de gros éléments (pierres de maçonnerie, moellons bruts ou briques), unis par un mortier (le joint et le hourdage). Ils forment un des composants d'un ouvrage et peuvent être de conception très variées : mur simple, mur double, parement… (Figure 1).

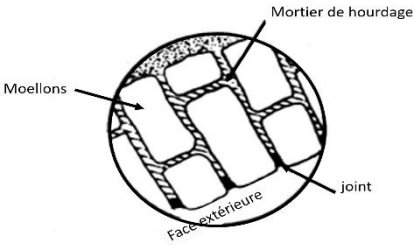


Figure 1 : Parement en perrés maçonnés – talus coté fleuve (Crédit photo : BRLi) et coupe de principe des différents composants (Source : BRLi)

Ces ouvrages se retrouvent aussi bien dans le domaine fluvial que maritime et peuvent présenter une grande diversité de désordre/pathologies :

- Pathologies des matériaux constituants :
  - Moellons : érosion, abrasion, dissolution...
  - Mortier : dissolution, écaillage, déjointoiement…
- Désordres de l'ouvrage maçonné : stabilité générale, tassements différentiels, effondrements localisés, déplacements, affouillement en pied, déchaussement de moellons, cavités sous-jacentes, désordres au droit des couches support...

Sujet de la fiche :

Cette fiche s'intéresse à la réparation de tels ouvrages souvent contraints à des intégrations paysagère/architecturale particulières, car anciens (antérieur à la fin du XIXème siècle).

Fonctions principales

Les fonctions principales des perrés maçonnés, en fonction de leur environnement, sont les suivantes (ces fonctions ne sont pas systématiquement toutes recherchées):

- Résistance à l'érosion externe coté eau (milieu maritime et milieu fluvial) ;
- Soutènement coté eau (milieu maritime et milieu fluvial) ;
- Soutènement coté terre (milieu maritime et milieu fluvial) ;
- Résistance à l'érosion externe coté terre ou surverse (plutôt en milieu maritime ; milieu fluvial dans une moindre mesure) ;

Fonctions secondaires :

Les perrés maçonnés permettent une fonction propre d'étanchéité (bien qu'imparfaite sur le long terme) qui doit être associée à un dispositif de drainage, notamment sur coté Zone Protégée (ZP).
Il peut aussi assurer une fonction de stabilité de peau, voire de protection superficielle d'un composant principal mince assurant l'étanchéité.
Coté val, on peut y adjoindre une fonction s'apparentant à la stabilisation de talus raidis.

On notera, qu'il existe aussi des maçonneries en « pierres sèches », c'est à dire sans hourdage. Cependant, ce type de maçonnerie nécessite systématiquement une association avec d'autres techniques pour satisfaire les fonctions recherchées (par exemple un géotextile filtrant, un système de drainage...).

Description :

Performances à atteindre :

Les performances à atteindre dépendent des fonctions assurées par le perré maçonné :

- Pour l'érosion externe, il est recherché une résistance du perré et de ses composants vis-à-vis des différentes sollicitations envisageables (forces tractrices, abrasion…), issues de l'action des vagues, du batillage, des écoulements rapides de surverse ou d'éléments flottants…
- Pour la tenue mécanique du talus, il sera recherché une résistance à la poussée des terres et de l'eau. Il peut aussi être recherché une certaine cote, afin d'empêcher la surverse pour une crue de projet définie ;
- Pour l'étanchéité, le parement doit limiter le transit de l'eau au travers de la digue, mais, au contraire des barrages, sans pour autant rechercher une étanchéité parfaite puisque le chargement hydraulique n'est pas permanent.

Ces différentes performances sont obtenues via :

- la conception globale du perré ;
- la taille et qualité des moellons ;
- la qualité de l'agencement ;
- la qualité et le tenue dans le temps des mortiers de hourdage et de jointoiement ;
- l'adjonction de composants supplémentaires en plus du perré (drains, filtres, géotextiles de renforcement...).

Utilisation :

Le perré maçonné est une technique peu utilisée pour la construction d'une digue, par contre la réparation de tels ouvrages présents sur des digues anciennes est une opération courante. Cette réparation passe généralement par le remplacement de moellons, la réfection des joints ou le remplacement complet de perrés maçonnés sur un ouvrage existant.

Les « gros éléments », forment l'essentiel de la masse du perré maçonné. Parfois en raison de leur état de dégradation, il est nécessaire de corriger leur forme et/ou les remplacer. Ils sont généralement composés de matériaux résistants et agencés afin de minimiser les vides (comblés par du mortier) : moellons, pierres de taille, briques...

On distingue deux types de mortiers mis en place sur les perrés maçonnés :

- les mortiers de hourdage (ou joints structurels), utilisés en réparation lorsqu'il est nécessaire de conforter des fonctions structurelles de l'ouvrage (monolithisme, résistance mécanique du perré…)
- les joints situés sur les parements (entre 3 et 5 cm de profondeur) utilisés afin de satisfaire des fonctions d'étanchéité et/ou de protection du mortier de hourdage.

Variantes :

Au niveau des matériaux utilisés il existe différentes variantes :

- l'injection de résine époxy pour combler des fissures (notamment dans des moellons) ;
- des mousses polyuréthane pour améliorer l'étanchéité ;
- des enduits pour améliorer l'étanchéité (hydrofuge) ou protéger le parement.

Alternatives :

Quand les travaux à entreprendre sur un perré maçonné sont trop importants, la principale alternative est de juxtaposer à l'existant, des composants permettant d'assurer les fonctions attendues du tronçon de digue, ou de refaire l'ouvrage à neuf.

Dans les deux cas on assimilera le confortement à un ouvrage neuf puisqu'il consistera à donner de nouvelles fonctions à l'ouvrage par l'ajout de composants et nécessitera généralement une déconstruction partielle voir complète de l'ouvrage d'origine.

Techniquement, il est ainsi envisageable d'adjoindre un parement en béton projeté, un dallage en béton (cf. fiches FT 7.6 et FT 7.9) ou encore un géotextile ou une géomembrane en amont ou en aval du perré existant.

Dimensionnement

Principes :

Le dimensionnement des perrés en maçonnerie à proprement parler n'est guère pratiqué et l'approche s'apparente à une remise en état à l'identique tout en conservant/rigidifiant la structure moellon-joint.

À noter qu'on aura une approche et une composition différente des mortiers suivant la fonction du joint :

- joints de hourdage, qui sont des joints « internes », qui permettent à la maçonnerie de garder un certain monolithisme. Le mortier nécessitera donc des caractéristiques de résistance à la compression et au cisaillement conséquentes ;

- Les joints de parement jouant essentiellement un rôle de protection vis-à-vis des attaques extérieures et assurant une continuité du parement, devra présenter une résistance à la traction, au cisaillement, et généralement une étanchéité importante.

Les moellons, pierres de maçonnerie ou briques quant à eux sont choisis en fonction de leurs caractéristiques mécaniques et de leur intérêt esthétique. Compte tenu que ces ouvrages ont généralement été construits par le passé, il est courant que la carrière d'origine (situé à proximité du site) soit inconnue ou épuisée. Afin de conserver un aspect esthétique équivalent, il est courant de réutiliser les moellons en place et baser la réparation sur l'usage et l'adaptation du mortier.

En plus de ces approches, il est généralement nécessaire d'ajouter des calculs de stabilité globale du perré. Ces calculs s'apparentent à ceux réalisés pour des murs de soutènement en maçonnerie. On citera :

- Les guides établis par le STRESS (SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE REPARATION ET DE RENFORCEMENT DES STRUCTURES) de la série « Les ouvrages en béton et maçonnerie » ;
- les travaux de recherche de :
    - Benjamin Terrade « *Évaluation structurale des murs de soutènement en maçonnerie* », 2017 – Université Paris-Est – Ifsttar.
    - Marie Bisoffi-Sauve « Etude des ouvrages maçonnés en pierre par la méthode des éléments discrets : caractérisation et modélisation du comportement cohésif des joints », 2016 – Université de Bordeaux

Paramètres nécessaires :

Les données nécessaires à la conception des réparations sont des données de diagnostic portant sur :

- l'état des moellons : dégradation des blocs par altération et/ou cycle de gel dégel…
- l'état des joints qui selon leur nature (chaux, mortier bâtard, mortier...) et leur fonction (hourdage ou joint de surface) ;
- l'état du support : présence de cavité sous-jacente par sous-cavage, présence de chainage…
- le retour d'information sur l'origine des désordres : vieillissement des joints, désagrégation des moellons, affaissement par départ des matériaux sous-jacents, déformation sous l'action de végétation, circulations d'eau liées à de l'érosion interne ;
- La présence de composants associés au perré existant (barbacanes, regards, ouvrage traversants...).

Ces données plutôt qualitatives sont généralement complétées par des données quantitatives, notamment lorsque des fonctions spécifiques sont en jeu : perméabilité si drainage, paramètres mécaniques (angle de frottement…) si calcul de stabilité...

Éléments de conception :

- Ressource locale en moellons (disponibilité, qualité, éloignement de la carrière) si on recherche une reconstitution à l'identique et que des pierres sont manquantes. En l'absence de cette ressource locale, il est courant d'extraire le moellon et de le remettre en place au mieux en compensant les irrégularités par des injections de mortier, sinon réemploi après extraction soignée ;
- Travaux préparatoires de nettoyage des joints : il existe différents matériels en fonction du joint, du burin pneumatique à la lance haute-pression. L'objectif est d'ôter les matériaux dégradés et non adhérents, de permettre d'avoir une épaisseur minimale pour le nouveau mortier de rejointoiement, d'avoir des supports sains pour garantir une bonne adhérence… Cette phase nécessite un « lavage » des supports ;

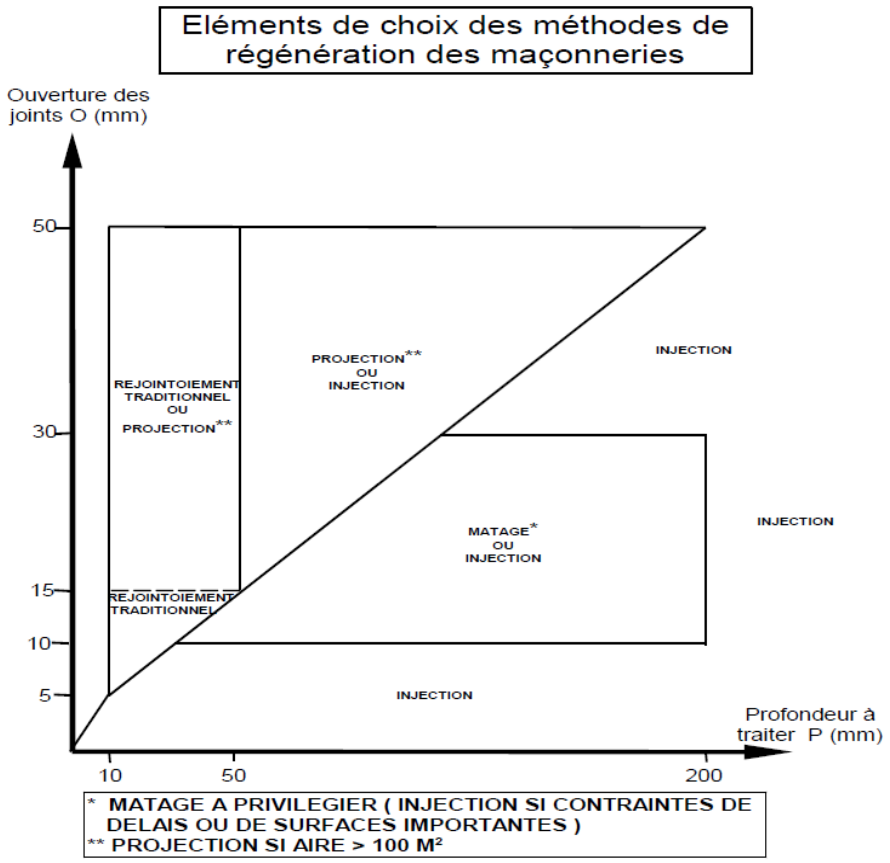
- Travaux préparatoires des supports : la reconstitution de la couche support, qui peut être par exemple une grave ciment (pas de caractère drainant mais limite les tassements), un matériau sablo-graveleux, ou une GNT 0-20 ;
- Accessibilité au site lors de la mise en œuvre et contrainte temporelles de mise en œuvre (notamment en milieu maritime en raison de la houle et des marées)
- Conditions environnementales : tout au long du chantier et plus particulièrement lors des travaux préalables de nettoyage ;
- Intégration architecturale en lien avec les contraintes sur les sites classés « Monument Historique ».

Modèles :

On distingue différentes méthodes de mise en œuvre (la Figure 2 présente des éléments de choix de la méthode) :

- Le matage qui consiste en un bourrage manuel des joints sur une profondeur importante et qui doit être suivi d'un rejointoiement traditionnel ;
- Le rejointoiement traditionnel manuel ;
- Les méthodes de projection : le mortier acheminé par conduite est projeté à l'air comprimé et projeté dans les joints;
- Les méthodes d'injection.

Figure 2 : Éléments de choix des méthodes de réparation des joints de maçonnerie (source : CETMEF)



Choix du mortier :

Les dosages des mortiers de rejointoiement sont essentiellement fonction de la profondeur de dégarnissage, l'ouverture des joints, la nature des « gros éléments », des contraintes de mise en œuvre et sont liées à la fonction du joint.

Par exemple, on peut retenir les dosages suivants :

- dosage du mortier bâtard de rejointoiement par la méthode traditionnelle (fermeture du joint sur une profondeur réduite) : 400 à 500 kg de liant par m^3 de sable avec 1/3 de ciment et 2/3 de chaux hydraulique;
- dosage du mortier bâtard de matage : jusqu'à 600 kg de liant par m^3 de sable avec 1/3 de ciment et 2/3 de chaux hydraulique;
- dosage du mortier mis en place par voie sèche ou par voie mouillée (remplissage des joints sur une profondeur importante) : le dosage en liant du mortier une fois mis en place doit être de l'ordre de 400 à 500 kg/m^3 de sable.

Toujours à titre d'exemple, les dosages du Tableau 1 ont été utilisés pour la réhabilitation d'un perré en partie enterrée avec un rejointoiement à la machine à enduire équipée d'un pistolet :

Tableau 1 : exemple de dosages de ciment pour un perré maçonné.

PARTIES D'OUVRAGE	Classe du béton ou mortier	consistance du béton frais ou mortier	Résistance caractéristique FC 28	Dosage minimum en ciment	Dimension maximum du granulat
Rejointoiement des maçonneries hors d'eau = surfaces visibles	Mortier bâtard	S2 –S3	20 MPa	200 Kg/m³ de ciment 42,5 + 300 kg de chaux hydraulique XHN ou XHA	0 / 3 ou 0 /6
Rejointoiement des maçonneries enterrées (marnage de la nappe)	Mortier au ciment	S2 – S3	20 MPa	500 Kg/m³ de ciment 42,5	0/3 ou 0/6

Pour les spécificités des composants du mortier et pour des dosages spécifiques, le lecteur est invité à se reporter aux normes et recommandations listées en fin de fiche. Il est possible aussi d'utiliser des mortiers prêts à l'emploi qui permettent de mieux maitriser l'homogénéité des produis mis en œuvre sous réserve de bien respecter l'apport en eau défini par le fabricant.

Nota : Suivant le dosage, les techniques de mise en place (manuelles, semi-manuelles ou mécaniques) sont plus ou moins adaptées. Il est donc nécessaire de regarder ces deux aspects en parallèle lors du choix. Pour valider le choix, une planche d'essai est systématiquement réalisée. Il faudra notamment vérifier l'adéquation entre le mortier de hourdage et de rejointoiement.

Pour des éventuels calculs de stabilité, on utilisera des méthodes et modèles d'équilibre limite, d'éléments finis… en adéquation avec la géométrie de l'ouvrage à justifier. Il est courant de ne pas étudier la stabilité lors de la réparation d'un perré maçonnée. La seule justification parfois attendu est celle de la densité de barbacanes à mettre en place afin de drainer efficacement le nouveau perré.

Aspects pratiques :

Cahier des charges :

La fourniture est spécifiée dans le CCTP en listant les caractéristiques attendues pour :

- les moellons/pierres/briques ;
- le type de joint
- le mortier de joint : mortier bâtard / mortier de ciment en fonction de la localisation des joints (voir tableau ci-après) ;
- la nature du liant est aussi fonction de l'agressivité des eaux et la nature de l'exposition de l'ouvrage (par exemple : les ambiances marines nécessitent l'emploi de liant adapté pour limiter l'attaque des ciments par l'eau de mer (attaque de la chaux, attaque du C_3A composant les ciments).

Il définit aussi le principe de purge des moellons pour leur remplacement.

Il est défini les particularités de pose des joints : hors période de gel ou de très forte chaleur/sécheresse et dans l'idéal entre 5 et 30°C. Il convient également de prendre en considération les conditions hydrauliques (marnage, crues, etc.).

Chantier :

Lors du chantier de réparation de perré maçonné, on distingue plusieurs étapes :

- le dégarnissage partiel ou total des anciens joints et mortiers (Figure 3) :
  - les joints sont enlevés manuellement ou mécaniquement. L'objectif est d'enlever le maximum de joints tout en conservant la structure maçonnée. En fonction de paramètres tels que la cohésion on l'adhérence du joint, le dégarnissage sera réalisé plus ou moins en profondeur, tout en vaillant à éviter d'épaufrer les pierres, briques ou moellons. Le dégarnissage des joints existants s'effectue, en principe, sur une profondeur minimum égale à environ 2 à 2,5 fois l'épaisseur du joint ;
- si nécessaire un mortier de hourdage sera mis en place ;
- la préparation des supports des joints : avant toute remise en place du joint il est nécessaire de nettoyer les interfaces de contact du joint avec les autres éléments du perré maçonné. Ce nettoyage consiste à dépoussiérer et/ou brosser ces interfaces, afin d'en évacuer tout élément susceptible de perturber l'adhérence du joint.
- le rejointoiement : afin de permettre une bonne adhérence du nouveau joint, le support de pose doit présenter une humidité suffisante à la prise du joint. Il peut être nécessaire d'humidifier (par aspersion) ces supports ou au contraire de mettre en place des méthodologies permettant de limiter les ruissellements à la surface du perré (Figure 4) ;
- cure du parement.

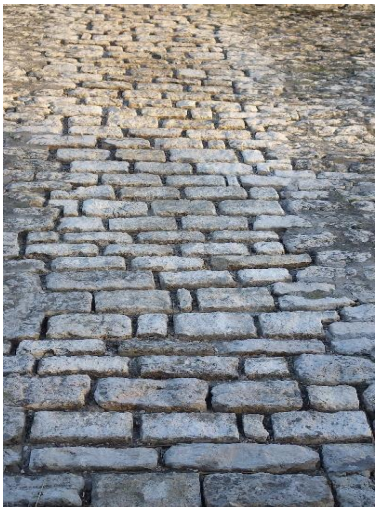


Figure 3 : Nettoyage du parement et dégagement des joints (crédit photo : BRLi)

Figure 4 : Atelier de mise en œuvre de nouveaux joints – Pompe injection et pistolet pneumatique (Crédit photo : BRLi)

Figure 5 : Photographie d'un parement réhabilité (crédit photo : BRLi)

Remarques :

- Lors du chantier les différentes étapes de dégarnissage-rejointoiement doivent être réalisée progressivement et en évitant de déstabiliser la structure (au besoin étaiement). Pour cela ce sont de petites surfaces qui sont traités.
- Lorsqu'il y a un marnage, il est essentiel de prendre en compte les variations de niveau d'eau (interne et externe) en compte lors du phasage, afin que la prise soit faite lors de l'immersion du perré ;
- En milieu maritime, les dosages chaux-ciment sont à proscrire en raison de l'influence de l'eau de mer sur ces matériaux ;

Matériel :

Le nettoyage des surfaces est nécessaire pour éliminer toute trace de mousses, de calcite, des salissures, ou de la végétation afin de pouvoir réaliser les travaux sur un support sain. Il peut être réalisé à partir de différents matériels et méthodes (Tableau 2) nécessitant une main d'œuvre qualifiée afin de ne pas altérer les matériaux :

Tableau 2 : méthodes et matériel nécessaire au nettoyage des surfaces lors de travaux sur un perré maçonné

À sec avec sablage léger et brossage	Cabine de sablage haute pression variable (sableuse pneumatique)– sables très fins ou enrichi – Protection du personnel
Par sablage à l'eau et brossage	Nettoyeur haute pression avec kit d'hydrosablage – brosse sur nettoyeur HP
Par sablage hydropneumatique consistant à projeter sous pression un mélange de sable et d'eau – (Nettoyage par abrasion)	Pompe à haute pression et lance

Le dégarnissage des mortiers existants nécessite des matériels différents suivant la consistance et la profondeur de dégarnissage du mortier. On utilisera ainsi généralement :

- Le burin et marteau ;
- Le burin pneumatique ;
- Un disque abrasif ;
- Ou de l'eau sous pression (environ 10 à 20 bars).

Il existe également différentes méthodes pour le rejointoiement, présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : méthodes et matériel nécessaire au rejointoiement lors de travaux sur un perré maçonné

Méthode	Matériel nécessaire
Manuelle traditionnelle et par matage	Jet manuel et bourrage à la truelle « langue de chat ». Finition si besoin à l'éponge et à la brosse
Par projection ou injection (sèche ou humide)	Pompe à vis ou pot sous pression Pistolet pneumatique

Remarque : Pour ce genre de travaux où le coût de la main d'œuvre et prédominante par rapport au coût des fournitures, les mortiers de rejointoiement Haute Performance prêt à l'emploi sont à préférer aux mortiers fabriqués sur place. En effet ils garantissent une meilleure homogénéité du produit et une facilité d'emploi.

Nuisances/Environnement :

- Gestion des eaux de lavage (pouvant être faite par pose d'un géotextile en pied d'ouvrage pour filtration avant rejet, gouttière pour canaliser les eaux et les décanter ou les filtrer par la suite…
- Gestion des poussières en incorporant de l'eau : projection par voir humide, soufflage par mélange air/eau, lavage à l'eau plutôt qu'à l'air...

Contrôle d'exécution :

- Agrément du produit sur la base d'une fiche technique produit ;
- Validation du PAQ et des procédures liées à la mise en œuvre ;
- Validation sur planche d'essai : méthodologie et couleur ;
- Contrôle d'exécution de la mise en œuvre : remplissage des joints ;
- Contrôle de la réalisation de la couche sous-jacente reconstituée (si existante) ;
- Travaux de finition : brossage des projections ;
- Par temps venteux et/ou fortement ensoleillé : humidification des joints ou produit de cure.

Pour plus de détails voir « Rejointoiement des ouvrages maritimes en maçonnerie, CETMEF », pour lequel nous présentons le Tableau 4, récapitulatif des contrôles :

Vitesse d'avancement :

Très variable selon l'état de dégradation du perré et les moyens pouvant être mis en œuvre. Certaines méthodes ou moyens manuels sont en effet imposés par l'architecte ou liés à l'exiguïté des lieux...).

Traitement des points singuliers :

Dans la mesure où le perré est composé de moellons ou de pierres de géométrie voisines mais non identiques, de nombreux points singuliers peuvent être considérés. Le mode de confortement ou de réparation du perré prend donc en compte ces points singuliers, généralement compensés par un ajout de mortier. Ce mortier est bien entendu dimensionné de manière à adhérer correctement aux différentes interfaces (maçonnerie, ouvrage traversant, sol…).

Remise en état du site :

Le rejointoiement salit les pierres adjacentes au joint. Il est donc nécessaire de les nettoyer en fin de pose du joint.

Tableau 4 : Extrait de la fiche Aide-Mémoire : Le rejointoiement des ouvrages maçonnés en milieu marin –CEREMA Ouest- Avril 2018

Phasage	Points à contrôler	Actions de contrôle
Épreuve de convenance	Nettoyage – garnissage-finition-cure-nettoyage sur planche d'essai : vérification de la conformité au PAQ en termes de résultat et de moyens (efficacité, non altération des pierres, profondeur de dégarnissage, fond de joint, couleur du joint).	Visuel et documentaire (réception des matériaux)
Dégarnissage	Profondeur de piquage - Élimination complète des parties altérées	Visuel
	Stabilité de l'ouvrage pendant la phase travaux	Examen visuel, instrumentation
Préparation	Propreté et humidification du fond de joint	Visuel (saturation sans ruissellement)
Garnissage	Composition et caractéristiques du mortier	Essais de consistance et de compression sur éprouvettes
		Prélèvements conservatoires
	Garnissage homogène du joint, forme du joint	Visuel
Finition	Aspect extérieur, teinte	Visuel
Nettoyage général	Propreté des parements maçonnés	Visuel

Source : STRRES et Cerema

Références :

- Rejointoiement des ouvrages maritimes en maçonnerie, CEREMA - 2017
- « Rejointoiement des ouvrages en site maritime », Nicolas BOURNETON, Jacques BILLON, Michel MENGUY , Benoît THAUVIN, Laurent RIOU, XIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil - Cherbourg, 12-14 juin 2012
- Ouvrage de maçonnerie, juin 2006, Sous-direction des Monuments Historiques et des Espaces Protégés
- Guides Cerema/CETMEF dans le domaine des aménagements fluviaux
- Guides Cerema/CETMEF en technique portuaire
- Ouvrages d'art (ex. fascicules CCTG pour les murs et ponts en maçonnerie et guides IQOA)
- Professionnels (artisans bâtisseurs en pierres sèches) http://www.pierreseche.fr/lire/index.php?rubid=14
- Eurocodes 6

Ainsi que les documents à partir desquels ces guides ont été rédigés :

- Normes et recommandations associées aux constituants des mortiers :
  - Ciment :
  - Granulats :
  - Mortiers : NF EN 998-2 : définition et spécifications des mortiers pour maçonnerie
  - Eaux de gâchage :
  - Produits « prêts à l'emploi » :
- Fascicule 64,CCTG
- NF P95-102 : réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – béton projeté
- NF P95-107 : Réparation et renforcement des maçonneries

	Fiche Technique **Perré bétonné** Concrete riprap	**Fiche FT 7.6**

Auteurs principaux : B. CORTIER (Setec hydratec) ; G. QUESNEL (Setec hydratec)
Contributeurs : D. POULAIN (INRAE) ; M. SUTTER (INRAE)
Relecteurs : JF. FREZET (Egis) ; S. PATOUILLARD (DREAL)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais :
Concrete riprap are slope protection composed of an inclined facing which is made of concrete slabs scraped or not scraped.
This type of bank protection, which was previously used for hydraulic reasons (reducing the roughness of the banks, is practically no longer used in rivers; especially for environmental considerations.

Etude(s) de cas correspondante(s) :
Digues du Reyran (Fréjus)

Indications :

Définition :

Le terme « perré bétonné » s'applique aux protections de talus de digue composées d'un parement incliné constitué de dalles (coulée sur place ou préfabriquée) en béton ferraillé ou non ferraillé.

Ce type de protection de berge qui a pu être utilisé par le passé pour des raisons hydrauliques (réduction de la rugosité des parois et donc amélioration de l'écoulement) n'est pratiquement plus mis en œuvre dans les cours d'eau ; notamment compte tenu de considérations environnementales. Par ailleurs le diagnostic visuel de ce type de parement ne permet pas de se rendre compte des évolutions possibles du remblai de la digue sur laquelle repose les dalles (problématique de stabilité) et en particulier de la formation de cavités, sous la protection, pouvant entrainer leur ruine.
Cette technique est encore employée pour les canaux hydrauliques, mais ces ouvrages ne sont pas explicitement visés par la présente fiche.

Sujet de la fiche :

Malgré cela, cette fiche s'intéressera à cette technique en tant que réparation de protection externe d'une digue.
Notons que sont décrites les techniques utilisées pour conforter les perrés de tels ouvrages mais que généralement les désordres sont tels qu'une reprise plus globale doit être réalisée.

Fonction principale :

Protection contre l'érosion externe

Fonction(s) secondaire(s) :

- Augmentation de la débitance des cours d'eau (réduction de la rugosité de paroi)
- Etanchéité de la digue

- Stabilisation mécanique du talus amont vis-à-vis de glissements superficiels.

Description :

Performances à atteindre :

- Résistance aux forces tractrices de l'écoulement sur le talus
- Résistance aux affouillements
- Stabilité des dalles béton sur leur support
    - maîtrise du tassement du remblai support
    - maîtrise de l'érosion interne pour éviter la formation de cavités par migration des fines à travers le remblai

Utilisation :

Actuellement, cette technique n'est guère utilisée en ouvrage neuf compte tenu :

- de son impact sur l'environnement et la qualité du milieu environnant
- de son coût souvent prohibitif
- des difficultés liées à la surveillance et à la maintenance (interventions souvent délicates)

Historiquement les ouvrages équipés de tels parements sont pour l'essentiel des digues de canaux, des digues de protection maritimes ou des digues soumises à des écoulements à forte vitesse

Aujourd'hui les principales interventions sur ce type de structure portent donc des ouvrages déjà en place et consistent en :

- le traitement des cavités existantes sous les dalles.
- la reconstruction de parement béton détruits par les crues (voir Figures 1, 2 et 3, exemple du Reyran à Fréjus).
- la reprise des joints et des dispositifs de drainage.
- le traitement de désordres ponctuels : fissures, affaissements
- la réfection de perrés maçonnés.

Variantes :

Les dalles de béton peuvent être conçues avec ou sans ferraillage

Dans le cas de travaux sur ouvrage existant, différentes techniques de reprise en fonction des désordres existant peuvent être utilisées : injection, remplacement complet de la dalle, ancrage…

Alternatives :

Si l'on doit conserver une protection mince (problème de place, conservation de la section hydraulique)

Après déconstruction complète du perré s'il doit être réparé :

- matelas gabions, cf fiche FT 7.3
- matelas JK, cf fiche FT 7.4
- géosynthétiques) (cf. fiche FT 7.3 et 7.4)

Sinon passage à une protection épaisse :

- Butée en enrochement (rechargement)

Dimensionnement :

Principe :

Le dimensionnement porte sur :

- la résistance des dalles béton aux efforts de traction :
  - se développant du fait des circulations d'eau,
  - pouvant se développer dans le béton dans le cas d'un défaut de portance du sol support (prise en compte d'un défaut de portance) ;
- la longrine (ou autre ouvrage béton) mis en place en pied d'ouvrage qui a fonction de :
  - butée de pied du point de vue de la stabilité mécanique,
  - parafouille du point de vue de la résistance à l'érosion externe ;
- le drainage derrière le parement. Bien que le parement béton puisse être considéré comme imperméable, les perrés en béton, n'ont pas forcément un rôle d'étanchéité. Ce point s'avère d'une importante primordiale pour éviter les risques de sous-pressions derrière les parements. Les eaux drainées derrière le perré peuvent être évacuées par des barbacanes ou collectées dans la longrine (si elle a une fonction de drainage associée) en pied de talus. Le drainage doit être associé à un filtre mis en place entre le corps du remblai et le matériau drainant ;
- le traitement des joints entre dalles (mortier de réparation, mastic élastomère…).

Paramètres nécessaires :

Les données nécessaires à la conception des réparations portent particulièrement sur :

- Le diagnostic géotechnique du remblai (nature et caractéristiques mécaniques des matériaux, nature de la couche support, identification de zones de décompression, etc.) ;
- Le diagnostic des ancrages existant : existence ou non d'une longrine de pied, profondeur d'ancrage, etc. ;
- Une inspection de l'état de l'ouvrage sous le parement. On cherchera notamment à repérer et définir les cavités (taille, connexions). Pour ce faire on utilisera des techniques géophysiques telles que le radar, associées à des reconnaissances destructives ponctuelles permettant d'apprécier plus finement les désordres : carottage et vidéo-endoscopie ;
- Le recueil d'information sur 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 caractéristiques des écoulements ou de la houle ;
- La connaissance des profondeurs d'affouillement ;
- La connaissance des niveaux de nappe, et de leur vitesse de variation (cas des marées).

Éléments de conception:

- En préalable à la conception de la protection, il faudra s'assurer de la stabilité géotechnique du remblai sans prise en compte des dalles, hormis le cas échéant pour l'analyse de la vidange rapide ;
- Choix et méthodologie de réfection des joints (cf. fiche FT 7.5) ;
- Conception du filtre et du drainage : cf. les fiches FT 4.1, FT 4.2, FT 4.3 et FT 4.4.

Modèle(s) disponible(s) :

- Règles de dimensionnement des poutres et voiles en béton armé (EC2) pour dimensionner structurellement la dalle ainsi que la longrine.

Le dimensionnement usuel correspond à des dalles de 3 à 4 m de largeur, séparées par un joint sec (réalisé au mortier ou à la résine, si la fonction étanchéité s'avère nécessaire), et d'épaisseur 0.2 m.
Les causes de fracturation des dalles sont généralement liées à une perte de compacité du remblai sous-jacent, elle-même résultant de circulations d'eau, de tassements différentiels, ou de l'action du racinaire si les talus sont boisés. Dans ce cas, la mise en place d'un ferraillage permet de garantir une bonne durabilité de la réparation, en palliant de nouvelles fracturations lorsque les causes n'ont pu être clairement identifiées ou traitées.
En général, sur des sols portants, la mise en place du ferraillage minimum permet de traiter des pertes ultérieures de capacité. Un taux de ferraillage moyen de 40 kg/m^3 peut être retenu en ordre de grandeur, ainsi qu'une épaisseur de 20 cm, suffisante pour la mise en place de deux nappes d'acier.

Aspects pratiques (CCTP, chantier,) :

Cahier des charges :

Il faut que le cahier des charges décrive en particulier :

- les conditions de mise en œuvre. On insistera notamment sur les conditions / modalités de vidange du canal si la digue est en eau comme c'est le cas pour la plupart des digues disposant de tels revêtement ;
- les fonctions du perré (éviter le jointoiement étanche alors que l'ouvrage n'a pas de fonction d'étanchéité ou si la circulation d'eau dans le remblai ne présente pas de risque pour la pérennité du remblai support…).

Chantier :

- réalisation des accès pour engins de terrassement et approvisionnement ;
- mise hors d'eau du chantier (déviation des eaux/batardeau si nécessaire en cours d'eau ou mise à sec du bief pour les digues de canaux ;
- Pour le traitement des cavités sous le perré :
    - injection par coulis de ciment (type 250 S5 D14) ou mortier faiblement dosé,
    - Pour la réfection de joints : cf fiche FT 7.5) ;
- Pour la reconstruction du perré béton :
    - enlèvement de l'ancien perré,
    - terrassement sur remblai : purge des matériaux de surface,
    - pose de géotextile filtrant ou anticontaminant sur la face inférieure de la couche drainante,
    - mise en place d'une couche de matériaux drainants avant coulage du perré respectant les conditions de filtre avec les matériaux sous-jacents (remblai de la digue). A défaut il est nécessaire de mettre en place un géotextile filtre entre ces deux couches. La couche drainante peut-être faiblement dosé au béton afin de lui assurer la cohésion suffisante pour pourvoir intervenir sur le talus lors de la mise en place du ferraillage ;

- réalisation longrine/butée de pied / parafouille (Figure 4) ;
- pose géotextile filtrant ou anticontaminant sur la face supérieure de la couche drainante ;
- mise en place barbacanes traversant le perré ;
- ferraillage (treillis soudés) ;
- bétonnage (épaisseur de dalle de 20cm minimum pour respecter les enrobages prescrits pour les armatures– pour la dalle, béton de structure type C30/37 de classe de consistance S2) (Figures 2 et 3) ;
- réalisation joints secs entre dalles béton.

Figure 1 : Dalles d'un perré bétonné détruites après une crue (Crédit photo : Setec hydratec)

Figure 2 : Exemple de reconstitution du perré bétonné sur les digues du Reyran à Fréjus selon technique de pianotage avec procédé espagnol Horpend : après une vibration classique à l'aiguille, le tambour assure le lissage du béton depuis sa mise en place jusqu'à sa prise (Crédit photos : Setec hydratec)

Figure 3 : Exemple de reconstitution du perré bétonné sur les digues du Reyran à Fréjus avec une technique de réglage et talochage manuel (Crédit photo : Setec hydratec)

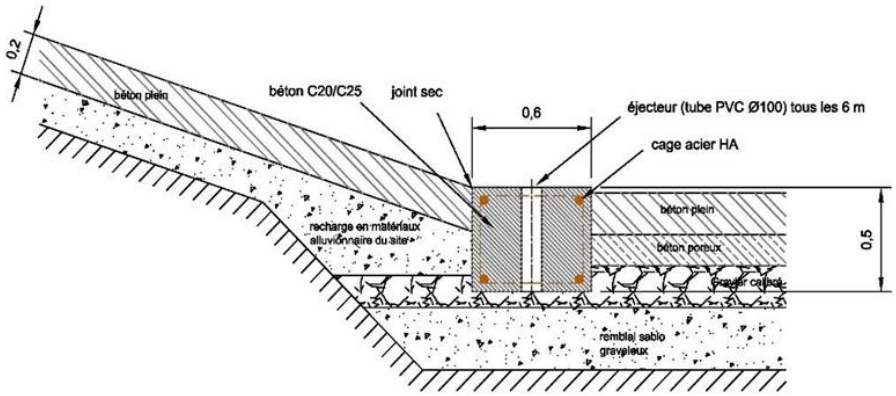


Figure 4 : Vue de détail d'une longrine de pied reconstituée (Source : Setec hydratec)

<u>Matériaux et matériels</u> :

Matériel :

- skip, pompe à béton ;
- engins de terrassement : chargeur, pelle mécanique, compacteur si nécessité de refaire la couche support...
- grue de manutention.

Matériaux :

- matériaux de reconstitution du remblai de la digue au droit des démantèlements de dalle ;
- matériaux de la couche drainante sous dalle (géocomposite ou sol) ;
- matériau filtre / drain (généralement des géotextiles) ;
- ciment pour le perré, ciment pour la longrine de pied ;
- acier pour treillis soudés, raidisseur, aciers de montage ;
- mortier et/ou coulis de ciment pour comblement des vides sous le perré ;
- barbacanes (PVC).

<u>Nuisance/ environnement</u>

Il faut être particulièrement vigilent au risque de pollution de l'eau, comme pour toutes les techniques mettant en œuvre du béton sur place.

Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance) :

- Agrément des fournitures sur la base d'une fiche technique produit ;
- Validation du PAQ et des procédures liées à la mise en œuvre des matériaux (compactage et réglage des talus, couche de transition, ferraillage, bétonnage...) ;
- Etudes d'exécution :
    - Planche d'essai pour validation phase de bétonnage du perré,
    - Essais sur béton.

Vitesse d'avancement :

Très variable suivant la densité et le type de travaux à prévoir.
La reconstruction complète de dalles, pour un ouvrage d'accès facile, s'effectue avec une cadence de l'ordre de 30 m² par jour, à deux équipes (une équipe de 4 personnes pour la mise en place du géotextile et ferraillage, et une équipe de 4 personne au coulage/talochage).

Traitement de points singuliers :

Raccordement au perré en place : réalisation de joints.

Références :

- NF EN 1992 (2006). Eurocode 2 – Calcul des structures en béton armé.

	Fiche Technique **Protection externe par blocs artificiels** External protection by artificial blocks	**Fiche FT 7.7**

Auteurs principaux : T. MONIER (Artélia)
Contributeurs : M. SUTTER (INRAE) ; R. TOURMENT (INRAEA) ; D. POULAIN (INRAE)
Relecteurs : S. PATOUILLARD (DREAL) ; M. SUTTER (INRAE)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais :
The main strength parameter for most types of sea levees is the type of armour and the weight of this armour. The interlocking between the units is important. Interlocking is the principle that units in a levee armour "work together". By doing so, they distribute the forces caused by waves to neighbouring units. This way, the mass of individual armour units can be reduced. Rocks and concrete cubes have relatively little interlocking whilst other units such as e.g. Dolos, Coreloc, Accropode and Xbloc are designed to have a high interlocking rate. The placement of the blocs units above the seawater level and underwater must be consistent and homogeneous. This homogeneity allows regular and natural settlement which shall prevent sudden settlements, rearrangement of the mesh, disorganization of the structure and eventually breakages.

Étude(s) de cas correspondante(s):
C 5.10 : Canal du Rhône à Sète –Frontignan (34)

Indications :

Définition :

Le terme « bloc artificiel » désigne des éléments préfabriqués en béton initialement destinés à remplacer les enrochements naturels des carapaces pour des raisons de qualité ou de taille insuffisante de ces derniers en vue de la réalisation de digues à talus (par opposition aux digues caissons et digues verticales). Par la suite, des recherches ont permis d'améliorer la tenue intrinsèque de ces blocs pour s'orienter vers des structures de pose optimisées de type monocouches nettement plus économiques.

Ces blocs de dimensions variables tels que par exemple l'ACCROPODE et l'ECOPODE, le CORELOC, le X-BLOC, le SHED, le DOLOS et le SEABEE sont quasi exclusivement utilisés dans le domaine des ouvrages maritimes (digues à talus, brise-lame, musoirs). En fluvial on peut les rencontrer au niveau des embouchures (c'est-à-dire à l'interface avec le maritime). On trouve quelques exemples d'utilisation sur la Loire (cf. figure 8 et figure 9) en remplacement de perrés maçonnés.

À noter que certains de ces blocs sont soumis à la possession de licences permettant de les exploiter, les vendre....

Sujet de la fiche :

Cette fiche s'intéresse à l'usage de tels blocs afin de renforcer des ouvrages déjà existants (Figure 1). Ces ouvrages présent(ai)ent généralement déjà un parement, qui n'a cependant pas résisté aux importantes sollicitations ayant lieu en milieu marin.

Les ouvrages traités dans cette fiche sont les digues côtières, mais également les ouvrages en mer (brises lames ...) ou à l'interface terre-mer (jetées, moles, épis). Bien que leurs fonctions soient différentes, elles peuvent présenter une conception similaire.

Figure 1 : Différentes utilisations de blocs artificiels (Crédit photo : ARTELIA)

Les rares exemples en fluvial sont à rapprocher en terme de conception de perrés maçonnés (cf. fiche FT 7.5) le bloc jouant le rôle d'un moellon.

Fonction(s) principale(s) :

La fonction principale recherchée par l'utilisation de ce matériau est de résister à l'érosion externe (érosion et affouillement) sous l'effet du batillage, de la houle, des franchissements… et ainsi de protéger la surface d'un talus de digue. Cette dernière est généralement constituée de plusieurs couches.

Pour les ouvrages de type brise-lame/ brise vague : les blocs sont conçus pour absorber un maximum d'énergie hydraulique et ainsi avoir des sollicitations plus faibles sur les digues côtières qu'ils protègent (Figure 2).

Fonction(s) secondaire(s) :

Les blocs artificiels permettent d'assurer d'autres fonctions grâce à leurs caractéristiques :

- fonction de drainage (blocométrie ouverte et absence de matériau évolutif) ;
- fonction de limitation des franchissements (overtopping) de la crête pour les blocs aux formes les plus élancées.

Description :

Performance à atteindre :

Afin d'atteindre la performance recherchée en termes de protection contre l'érosion externe, le concepteur cherchera à atteindre certaines caractéristiques mécaniques et comportementales du parement en blocs artificiels, agrégées dans le coefficient de stabilité hydraulique (voir plus loin descriptif de la formule d'Hudson).

Pour les fonctions secondaires, les performances recherchées sont diverses et reposent sur l'atteinte de caractéristiques seuils des matériaux composant l'ouvrage (perméabilité, granulométrie) et/ou des sollicitations après effet de l'ouvrage (forces des vagues,…)

Ces différentes performances sont obtenues via :

- la géométrie des blocs artificiels et de la carapace qu'ils constituent ;
- les caractéristiques des matériaux composants ces blocs ;
- l'agencement des blocs ;
- les interactions avec les autres composants de l'ouvrage et notamment la couche support.

Utilisation :

En raison de leur coût, les blocs artificiels sont utilisés quasi exclusivement dans le domaine maritime où ils suppléent à l'insuffisance des enrochements en fonction du critère de l'amplitude de la houle incidente à l'ouvrage (H) ; en fonction de ce critère sont généralement considérés les confortements suivant:

- $H < 3{,}0$ m : enrochements naturels ;
- $3 < H < 4{,}5$ m : enrochements naturels ou blocs artificiels ;
- $H > 4{,}5$ m : blocs artificiels.

Notons que certains blocs artificiels sont spécifiquement conçus pour venir réparer les désordres présents sur des ouvrages déjà constitués d'autres blocs artificiels : c'est le cas par exemple du CORE-LOC qui sert à réparer des désordres des carapaces en DOLOS.

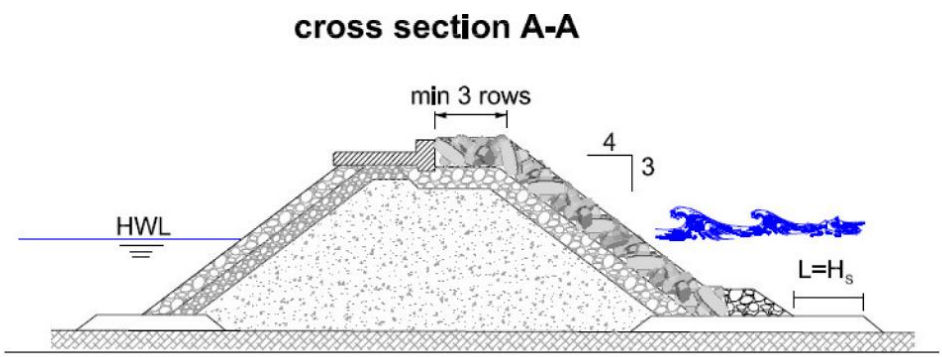


Figure 2 : Coupe type d'une digue de protection (Source : http://www.concretelayer.com)

Variantes :

Les blocs artificiels peuvent êtres de plusieurs géométries (cf. les photos présentées à la fin de cette fiche). et nécessiter des mises en œuvre spécifiques. Parmi les blocs les plus couramment utilisés on citera l'ACCROPODE, l'ECOPODE, le CORE-LOC, le X-BLOC, le SHED, le DOLOS et le SEABEE.

Alternatives :

Pour un ouvrage donné les blocs artificiels n'ont pas d'équivalent.
On peut néanmoins remplacer une digue à talus par une digue verticale (caisson) en particulier quand la profondeur de fond augmente ; et dans le cas des faibles profondeurs un adoucissement du talus peut rendre faisable une carapace en gros enrochements de carrière.

Dimensionnement :

Principe :

Le dimensionnement des blocs artificiels est généralement mené selon les recommandations du BS 6349 Partie 7 (1991).

Il consiste à étudier les potentiels désordres que créeraient les vagues sur la protection et dimensionner de façon à limiter les dégâts. Lorsque la digue est implantée par **faible ou moyenne profondeur** (cas le plus fréquent pour les digues à talus) c'est la houle déferlante sur les fonds qui constitue la houle de projet (les houles les plus fortes déferlent au large). Dans ce cas la détermination du niveau de la mer à prendre en compte est sur le chemin critique.

Outre la protection, les blocs artificiels devront ainsi répondre à certaines spécifications précises qui portent sur :

- Les dimensions et le tonnage maximum (variables suivant les types) ;
- La résistance à la compression du béton (> 25 MPa) ;
- La résistance à la traction du béton (> 3 MPa) ;
- Le rapport eau/ciment (> 0,45) ;
- La masse volumique du matériau constituant les blocs (2,4 t/m3).

Pour comparer les blocs artificiels entre eux, à qualité d'imbrication comparable, le coefficient de stabilité hydraulique (voir plus loin descriptif de la formule d'Hudson) est adapté.

Par ailleurs il est nécessaire de dimensionner les différents autres composants du confortement pour respecter la stabilité d'ensemble de l'ouvrage et les règles de filtre...

Paramètres nécessaires :

Les éléments nécessaires au dimensionnement des blocs artificiels et à la géométrie de l'ouvrage sont :

- des relevés bathymétriques ;
- données de vent, les niveaux d'eau, la marée, les surcotes, la houle, l'élévation du niveau de la mer, le niveau d'eau de dimensionnement ;
- la nature des sols en place (description, granulométrie, etc..) et leur répartition géométrique ;
- la stabilité mécanique des matériaux en place et leur aptitude à reprendre des charges.

Éléments de conception:

- la pente du talus : une pente de 4H/3V ou 3H/2V favorise une meilleure résistance; en effet l'expérience des essais de modélisation montre que les oscillations pendant les tempêtes contribuent en fait à augmenter l'imbrication et le frottement entre les blocs. Contrairement aux enrochements, dans le cas de blocs aux formes élancées avec une pose monocouche, des pentes inférieures à 3H/2V diminuent les forces de frottement et d'enchevêtrement. Les interfaces entre carapace sous-couche et noyau sont rigoureusement parallèles ;
- la géométrie et caractéristiques de la butée de pied, du noyau, des sous-couches, du couronnement et de la protection du talus aval (en cas de franchissement pour les blocs n'ayant pas de fonction de rehausse) ;
- le nombre maximum de rangées sur le talus d'une carapace (avec une profondeur minimum correspondant au double de la hauteur de la houle de projet au-dessous du niveau des plus basses eaux) ;
- le plan de pose théorique : chaque bloc est posé selon un maillage (grille de pose) mais avec des attitudes aléatoires pour obtenir la densité de pose spécifiée ;
- une optimisation de la taille du bloc. La valeur minimale de dimensionnement n'est pas forcément la plus économique. De faibles diminutions des quantités de béton peuvent en contrepartie entraîner des augmentations importantes du nombre de blocs à fabriquer, à transporter et à poser ;
- la superficie de l'aire de préfabrication (stockage) : distance à l'ouvrage à réaliser.

Modèle(s) disponible(s) :

Afin de déterminer les sollicitations (houle) de projet, il faut considérer attentivement :

- La composante astronomique (niveau de vive-eau moyenne) ;
- La composante météorologique (calcul des surcotes dues au vent et à la dépression pour des conditions exceptionnelles) ;
- La géométrie de la côte et des fonds.

A l'heure actuelle, la formule la plus couramment employée pour les blocs artificiels est celle d'**Hudson** (Van der Meer a également proposé une formule liant la hauteur de houle significative au diamètre nominal via un nombre de stabilité)**.** Cette formule s'appuie sur de très nombreux essais effectués au Laboratoire de Vicksburg (USA) et a pour forme :

$$M = \frac{\rho_s H^3}{K_d \left(\frac{\rho_s}{\rho_e} - 1 \right)^3 \cot g \alpha}$$

avec :

M = masse médiane des blocs (kg) ;
ρ_s = Masse volumique du matériau (kg/m^3) ;
ρ_e = Masse volumique de l'eau de mer (kg/m^3) ;
H = Hauteur de la houle de projet (m) (usuellement = Hs, houle significative) ;
α = angle du talus avec l'horizontale ;
K_d = Coefficient de stabilité adimensionnel qui tient compte de la nature et de l'arrangement des blocs (cf tableau 1). Ce coefficient correspond à un critère dit de « non-dommage » dans lequel on admet (ils sont déterminés expérimentalement) :

- jusqu'à 5 % de dommages pour les blocs en deux couches ;
- l'absence de chute pour les blocs en monocouche (pour lesquels la perte d'un bloc peut engendrer rapidement des dégâts significatifs).

Tableau 1 : Valeurs des Kd pour différents types de bloc (Source : SOGREAH)

Kd (Hudson)		
Type d'unité	Houle déferlante	Houle non déferlente
Enrochements (2 couches)	3,5	4,0
Blocs cubiques (2 couches)	6,5	7,5
Blocs « Antifer » (2 couches)	7	8
Dolos (2 couhces)	7	8
Tétrapode (2 couches)	7	8
Accropode (mono-couche)	12	15
Accropode II (mono-couche)	13	16
Core-Ioc (mono-couche)	13	16
X-bloc (mono-couche)	13	16

Les sous-couches :

Afin d'éviter la dégradation du sol formant le corps de digue (par des phénomènes d'érosion interne, par poinçonnement,…), les confortements en bloc artificiels sont systématiquement complétés par des couches filtres. Les blocs artificiels étant généralement de grande dimension, il est courant que ces sous-couches soient des enrochements de dimension plus faibles que le bloc artificiel. Compte tenu de la nécessité de respecter les règles de filtres avec le sol en place il est souvent nécessaire de prévoir plusieurs sous-couches de granulométrie décroissante (Figure 3).

Il faut que ces sous couches respectent les règles de filtre (Terzaghi) de façon que toutes les couches jouent le rôle de filtre en empêchant les matériaux les plus fins de passer à travers les couches les plus grossières (les percentiles en diamètre et poids sont déduits des courbes granulométriques caractéristiques des matériaux en contact):

$$\frac{D_{15ext}}{D_{85\,\mathrm{int}}} \leq 5$$

$$5 \leq \frac{D_{50ext}}{D_{50\,\mathrm{int}}} \leq 60$$

où l'indice « ext » se réfère à la couche externe (en matériaux plus grossiers) et l'indice « int » à celle plus interne. D_{15}, D_{50}, D_{85} signifie que le diamètre est dépassé respectivement par 15, 50 & 85% des éléments de l'échantillon considéré.

Entre la sous-couche et la carapace, il faut vérifier :

- une règle de filtre (par exemple règles de Terzaghi) ;
- une règle pratique de rapport entre les poids moyens, qui a pour objectif d'assurer un bon positionnement des blocs de la carapace sur sa sous-couche :

$$10 \leq \frac{P_{50s-c}}{P_{50car}} \leq 15$$

P_{50} signifie que le poids est dépassé respectivement par 50% des éléments de l'échantillon considéré.

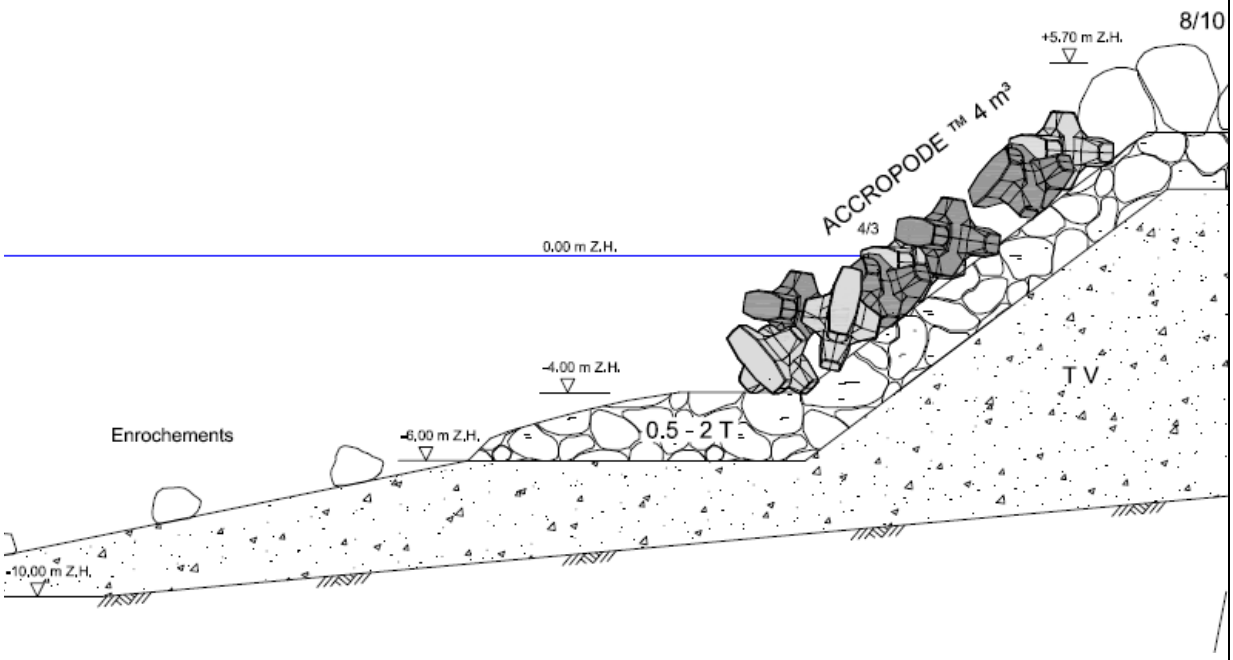


Figure 3 : Protection d'un talus de digue contre la houle par bloc artificiel (sous-couche 0.5-2 t ; blocs artificiels 9.6 t) (Source : ARTELIA)

Indications :

Cahier des charges :

La fabrication et la pose sont spécifiées dans le CCTP en listant les caractéristiques attendues (voir description ci-dessus) ;

- Les détails des contraintes en termes de : gestion du stock de préfabrication, cadence de pose des matériaux, capacité de transport du réseau routier… ;
- La liste des servitudes applicables sur le site : contraintes de circulation, gestion des déchets, planning / période d'intervention (marées)… ;
- Le dossier de plan (localisation du site, des profils, des zones de stockage, des pistes d'accès…) et **en particulier le plan de pose (blocs numérotés)** ;
- Le plan de contrôle attendu (qualité du béton, nature des essais, fréquence des contrôles), liste des points d'arrêts et points critiques de la qualité d'imbrication.

Chantier :

- Préfabrication :

les blocs monocouches sont préfabriqués avec des moules double-coque, généralement en acier et sans fond. Les moules métalliques peuvent être réutilisés jusqu'à 500 fois avant d'être remplacés (d'où l'intérêt de limiter le nombre de blocs à mettre en œuvre; le coût des moules ne représente pas plus de 10% du coût de fabrication total). Une attention particulière accordée aux joints, aux fixations et au produit de décoffrage après chaque bloc fabriqué, peut sensiblement augmenter la production et la durée de vie des moules. Le nombre de moules pouvant être approvisionné sur le site sera fonction de la taille de l'aire de fabrication et le rythme de production de la centrale à béton mise en place sur le site.

- Pose :

la méthode habituelle pour poser les blocs est basée sur l'utilisation de repères de pose prédéterminés calculés par rapport au centre de gravité du bloc avec une orientation du bloc aléatoire produisant la densité de pose. Cela signifie que la position de chaque bloc est simplement donnée par la position de la grue, l'angle et la longueur de la flèche, et l'angle de rotation de celle-ci.

Matériaux et matériels nécessaires :

- Matériel pour fabriquer les blocs : moules, centrales béton ;
- Matériel de pose classique : grue, camions pour le transport ;
- Matériel spécifique pour chantiers spéciaux en milieu offshore: équipement GPS pour la pose, barges, moyens de treuillage et d'arrimage ;
- S'assurer que les grues sont équipées d'un second tambour à câble qui pourra être utilisé avec un crochet à dégagement rapide fiable, évitant ainsi le recours à des plongeurs pour dégager les élingues une fois le bloc en place sur l'ouvrage.

Contrôle d'exécution :

Assistance à l'exécution permettant également un contrôle :

- Avant de commencer les opérations de pose, effectuer une planche d'essai de pose à sec avec une dizaine de blocs ;
- Que ce soit par voie terrestre ou par voie maritime, il existe plusieurs façons de contrôler avec précision la pose, selon les méthodes de travail et le matériel de chaque Entrepreneur :
    - triangulation par théodolite sur le câble de la grue ;
    - un mélange de triangulation par théodolite et de suivi depuis la cabine de la grue (rotation, angle...) ;
    - systèmes de positionnement électronique GPS totalement indépendants avec affichage en cabine ;

  Avantages et utilisation de chaque technique :

    - La technique de triangulation est la méthode classique utilisée sur site pour la pose des blocs. Les angles sont directement affichés sur un écran dans la cabine de la grue ;
    - Le GPS présente comme principal avantage une pose des blocs plus rapide. Cette méthode est généralement utilisée lorsque la pose est effectuée depuis une grue montée sur une barge (appareil DGPS SERCEL KART ou similaire, installé directement sur la grue avec affichage numérique en cabine). A partir de ce point de référence principal, des points de référence provisoires sont ensuite déterminés sur le site, dont la position par rapport au point de

référence principal ne varie que très peu (quelques centimètres). Après prise en compte de l'écart initial de positionnement, la pose de chaque bloc peut être effectuée avec précision dans les limites de tolérance (la densité de pose devra être comprise entre 95 % et 105 % du plan de pose théorique) et suivie depuis la cabine de la grue.

- Plus récemment, un système de positionnement par guidage électronique simplifie la pose par voie terrestre et a été adopté sur de nombreux sites ;
- En plus de l'utilisation des systèmes de positionnement électronique, et grâce à la facilité d'élingage des blocs, tout en sachant que leur orientation finale n'a pas d'importance particulière (les blocs devront être posés avec une imbrication maximale sans laisser de vide, l'orientation des blocs doit être variée mais leur position exacte n'est pas prédéfinie par un plan de pose), il n'est pas nécessaire de disposer de l'assistance de plongeurs lors de la pose. Des crochets permettant un dégagement rapide à distance et spécialement conçus sont généralement utilisés en toute sécurité par les grutiers.

Contrôle qualité après la pose

- La tâche la plus difficile est de vérifier la position des blocs placés sous l'eau sans visibilité. On peut estimer la densité de pose obtenue sous l'eau en comparant simplement les positions théoriques avec les positions réelles obtenues. Toutefois, cette estimation n'est pas suffisante pour des grutiers moins expérimentés, à moins de disposer sur le site de contrôleurs à pied d'œuvre ;
- En utilisant l'appareil ASCOREL, on peut également contrôler en permanence les coordonnées des blocs posés sur le site. L'utilisation d'échosondeurs à balayage latéral fournit une image réelle de l'orientation des blocs dans leur position finale, une tâche qui peut être effectuée simplement à partir d'une embarcation correctement équipée (exemple : échosondeurs SEABAT fabriqué par RESON) ;
- Les plans de récolement et ces images peuvent ensuite attester que la carapace de la digue a été construite conformément aux plans d'exécution.

Vitesse d'avancement :

- Adaptation des engins de pose : la grue prévue doit permettre de poser les blocs avec la bonne portée. Si l'engin est trop près des limites de sécurité, la cadence et la précision de pose seront réduites ;
- Poser de préférence des blocs à partir d'une grue par voie terrestre. Les opérations de pose par voie maritime risquent de diminuer les cadences de pose de plus de 50%, sans compter les temps morts causés par une trop forte houle.

Traitement de points singuliers (extrémités, ouvrages inclus notamment) :

- Les couches intermédiaires (filtres) qui peuvent se situer :
  - entre la carapace extérieure et le noyau central en tout-venant ;
  - entre le corps de l'ouvrage et le terrain naturel (dune ou plage sableuse, remblais sableux).

Il convient de privilégier l'utilisation de rochers provenant de carrières locales et sélectionner généralement les catégories blocométriques suivantes :

0,5 à 500 kg (limite basse définie pour respecter les règles de filtre),

500 kg – 1 t,

1 – 2 t,

2 – 5 t.

- Les blocs devront être en contact contre le mur de couronnement s'il existe et imbriqués avec la dernière ligne dans le talus ;
- L'angle formé par la pente et la berme horizontale en pied d'ouvrage doit être particulièrement bien formé et clairement identifiable. Dans le cas d'une berme de pied, celle-ci doit respecter les tolérances de la sous-couche. Par ailleurs, la berme ne doit pas présenter de pente dans le sens perpendiculaire à l'ouvrage.

Eléments de coût de réalisation

Le coût de réalisation d'une carapace en bloc artificiel dépend de nombreux facteurs :

- Le type de bloc retenu
- La structure mono ou bicouche de la protection
- La profondeur de fond marin au droit de l'ouvrage
- Les conditions marines locales particulières

Le coût d'un chantier de construction d'une carapace en blocs artificiels se décompose généralement entre le coût des droits d'utilisation (nuls dans le cas de blocs anciens comme le tétrapode hors brevet) et les coûts de préfabrication et de pose. On retiendra comme base de prix un coût au m^3 posé de bloc artificiel compris entre 300 et 400 € HT.

Durabilité / Pérennité des travaux

Les carapaces en blocs artificiels diffèrent par leur caractère monocouche ou bicouche. La technique monocouche est **en soi plus sûre** que la plupart des autres techniques de carapaces artificielles utilisées aujourd'hui. Bien qu'avec cette technique, une rupture puisse intervenir de façon plus abrupte qu'avec une technique bicouche, le début de cette rupture apparaîtra à un niveau de sollicitation qui aurait engendré la destruction totale d'une carapace bicouche équivalente. C'est pour cette raison que les blocs constituant les carapaces monocouches disposent tous de facteurs de sécurité inhérents à leur poids unitaire de l'ordre de 1,7. Par conséquent, on peut affirmer que si la houle de projet est correctement estimée, si les règles de pose sont respectées, et si les recommandations des concepteurs sont suivies, aucun ouvrage protégé par ces blocs ne peut subir de dommages supérieurs à 1 %.
Il faut également rappeler que si les solutions monocouches sont conçues pour subir moins de 1% de dommages, d'autres types de carapaces peuvent par contre subir des dommages allant jusqu'à 5% pour les mêmes critères de projet.
Les retour d'expérience portant sur les 40 dernières années montrent que les principaux types de désordres sont des érosions de pied de digue dues aux affouillements des tapis de protection. Leur réparation consiste à ajouter des blocs par le haut pour compenser le vide lié au glissement.

Références :

- British Standards BS 6349 (1991). Part VII, Guide to design and construction of breakwaters.
- Site Internet CORE-LOC™ : http://bigfoot.wes.army.mil/C963.html
- Harbour and Ocean Engineering 1997, Trivandrum.
- M. Kobayashi (1994). Hydraulics characteristics and field experience of ACCROPODE®. Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering 1994, Kobe.
- J. Melby et G. Turc (1997). Port St Francis,South Africa : The first completed CORE-LOC™ prototype structure, Published in CERCular Vol. CERC-97-4, October 1997.
- Muttrey et al (1995). Run-up processes et the seaward slope of a rubble mound breakwater. Proceedings of the International Conference on Coastal and Port

Engineering in Developing Countries, Rio, 1995; p. 1232 - 1251.
- G. Turc et J. Melby (1997). CORE-LOC™ Concrete Armour Unit: Technical Guidelines, Miscellaneous Paper CHL - 97 - 6, US Army Corps of Engineer, Waterways Experiment
- J.W. Van der Meer (1988). Stability of Cubes, Tetrapods and ACCROPODE®, Paper presented at Breakwater '88, ICE, Eastbourne.
- J.W. Van der Meer (1987). Stability formula for breakwaters armoured with ACCROPODE®. Report on Basic Research No. H 546, Deft Hydraulics Laboratory, 1987.

Annexes :

Figure 4 : exemple de carapace de blocs monocouche – Cap Sicié 83 & Frontignan (Crédit photo : ARTELIA)

Figure 5 : Décoffrage Accropode (Crédit photo : ARTELIA)

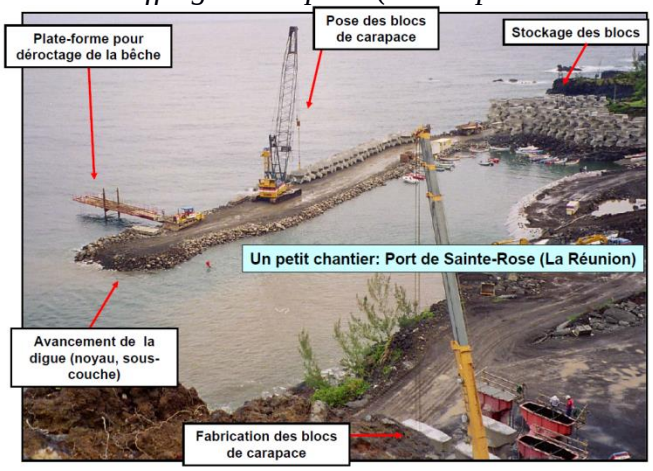
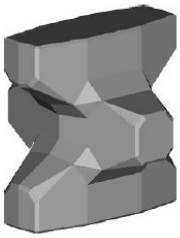
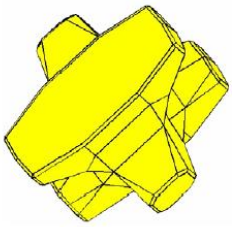
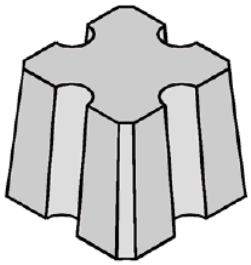


Figure 6 : Organisation d'un chantier de blocs artificiels (Crédit photo : ARTELIA)



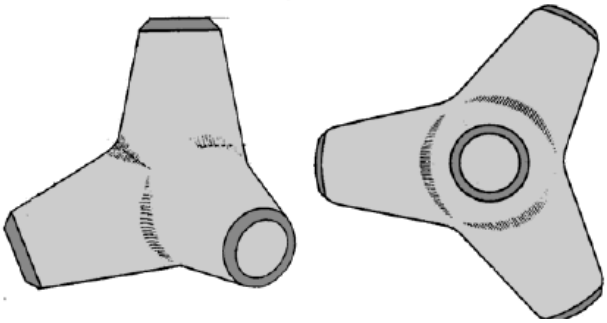




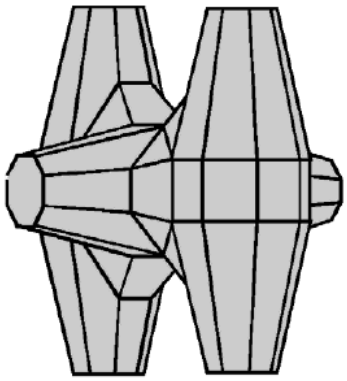
Bloc ACCROPODE

Bloc BCR (« Antifer »)

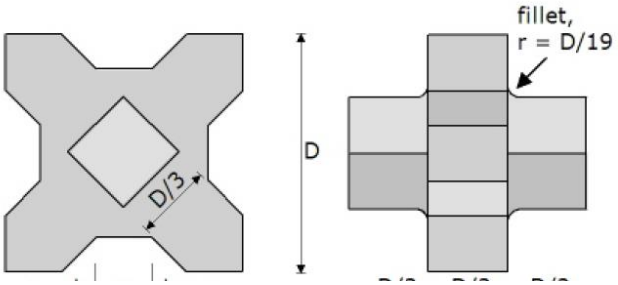
Bloc DOLOS



Bloc TETRAPODE



Bloc CORELOC



X-BLOC

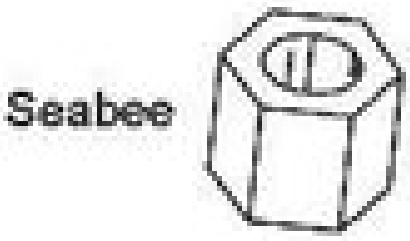


Figure 7 : exemple de blocs (Source : ARTELIA)

Figure 8 : Blocs artificiels mis à jour sur la partie basse du perré dans la levée d'Orléans à Jargeau - 2015 (Crédit photo : – DREAL CVL)

Figure 9 : Reprise du talus après avoir retiré les blocs artificiels formant la base du perré sur et réutilisation des blocs pour le blocage du massif en pied -2017 (Crédit photo : DREAL CVL)

	Fiche Technique **Protection externe de la digue par mise en place d'épis de protection** External protection : groynes	**FT 7.8**

Auteurs principaux: T. MONIER (Artélia)
Contributeurs: M. SUTTER (INRAE) ; D. POULAIN (INRAE)
Relecteurs: S. PATOUILLARD (DREAL Centre-Val de Loire) ; B. CHALUS (CNR)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais:
Groyns are one of protection structure available for river and sea works as well as banks enrockment. Generally used in large bedded torrential rivers or coastal reinforcement, they can be put in row or settle in one single place. Its permeable nature means that it is both able to absorb external wave and current energy. The design of such structure can be help by physical or numerical modeling. The technical means needed for groin building comprise rockfill, masonry or wooden structures.

Étude(s) de cas correspondante(s) :
C 5.11 : épi de protection Durance Manosque

Indications :

Définitions :

Le terme « épi » désigne un ouvrage perpendiculaire ou oblique au sens du courant, destiné à modifier la courantologie locale tant dans le domaine fluvial que maritime (Figure 1). Le terme historique en marine fluvial est « chevrette ».

On peut distinguer les épis longs souvent destinés à recentrer l'écoulement, des épis courts dont le but est de favoriser le rechargement naturel et de dissiper l'énergie avant contact du courant avec une digue ou une berge. Des épis très courts s'apparentent à une macro-rugosité du lit du cours d'eau.

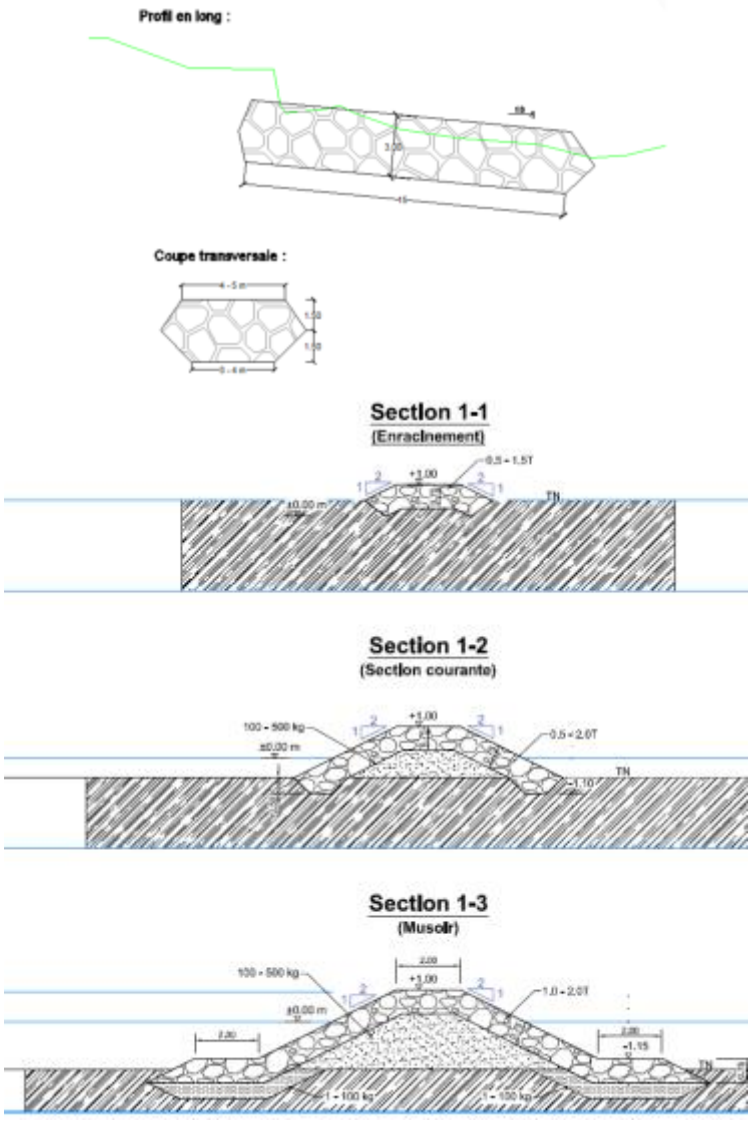


Figure 1 : Exemples de vues en coupe d'épis en domaine fluvial (haut) et maritime (bas) (Source : note technique Sogreah)

Sujet de la fiche :

Cette fiche considère l'utilisation d'épis à des fins de protection du parement coté eau d'une de digue. C'est à dire soit en éloignant (hors ou pendant la crue) les écoulements les plus forts du corps de la digue, soit en diminuant la puissance des écoulements transitant à proximité de la digue.

Fonction(s) principale(s) :

La fonction principale recherchée au travers de la mise en œuvre de ce type d'ouvrage est de permettre à la digue de résister à l'érosion externe.
Cette fonction principale se traduit pour les différentes conceptions d'épis par les fonctions suivantes :

- canalisation des courants dans un chenal éloigné du corps de digue ;
- abaissement des vitesses d'écoulement afin de limiter les risques d'affouillement et arrachement des matériaux du corps de digue lors de phénomènes d'érosion externe.

Fonction(s) secondaire(s) :

Les épis transversaux permettent d'assurer d'autres fonctions grâce à leurs caractéristiques :

- fonction de concentration des écoulements en rivière dans un chenal central à des fins de navigation (parfois dénommés épis de navigation). Cette fonction est particulièrement recherchée dans le cas de cours d'eau à faibles débits ;
- fonction de restauration d'un trait de berge ou de côte par engraissement des espaces situés à l'aval de l'épi (sens du courant) ;
- fonction de contrôle de la pente générale de la ligne d'eau en substitution de seuils transversaux permettant d'éviter les problèmes en lien avec le maintien de la continuité écologique.

Description :

Performance à atteindre :

L'érosion externe est due soit à l'écoulement de l'eau tangentiellement à la berge dans le cas des rivières, soit à l'attaque frontale par la houle dans le domaine maritime. Dans tous les cas la surface de la berge est progressivement érodée par l'arrachage du sol sous l'effet des forces tractrices ou tend à s'effondrer dans des fosses formées sous l'effet des courants.

Afin d'assurer sa fonction de protection, on demande aux épis:

- une résistance individuelle au contournement permise par la géométrie de son ancrage en berge ;
- une résistance à l'érosion des parties exposées au courant :
    - par la constitution de la structure de protection (blocs naturels ou artificiels, maçonnerie, tunage, fascine ou caisson ;
    - par l'ancrage du corps d'épi à la berge ou au corps de digue ;
    - par la constitution et l'orientation de la tête d'épi ;
    - par la souplesse de la protection bicouche autorisant de petits déplacements tout en maintenant une protection efficace du corps de l'épi ;
- une résistance d'ensemble pour une série d'épis mis en place (on met rarement en place un unique épi) permettant d'atteindre un effet global de protection à l'échelle d'un tronçon de digue de plusieurs centaines de mètres.

Utilisation:

En domaine fluvial, les épis sont utilisés :

- dans un contexte de rivière torrentielle à fort potentiel de mobilité en vue d'éviter une artificialisation systématique des berges sur de grands linéaires ;
- afin de canaliser resserrer le chenal et faciliter la navigation. Ils peuvent alors être associés à des ouvrages longitudinaux (c'est le cas pour les duits sur la Loire par exemple) dans le lit de la rivière (Figure 8 et Figure 9).

Dans le domaine maritime, les épis en enrochement peuvent apporter des solutions alternatives à la réparation de protections lourdes en fonction du critère de houle (H < 4.5m épis en blocs artificiels au-delà) ainsi que dans un objectif associé de restauration de trait de côte.

L'ouvrage peut être isolé ou disposé en rangées, submersible ou non, incliné ou non par rapport à l'axe du courant.

Variantes :

Les épis sont couramment réalisés avec un parement (et un corps) en enrochements.

Historiquement, sur la Loire ce sont généralement des ouvrages maçonnés parfois complexes.

Cependant il est tout à fait envisageable d'utiliser tout autre protection en mesure de résister aux sollicitations produites par l'écoulement : blocs artificiels, maçonnerie, parement béton, gabions, génie écologique (tunage, fascine), utilisation de géotubes…

Alternatives

L'application sous forme de séries d'épis transversaux (par rapport à l'axe général d'écoulement) constitue une solution alternative à la protection longitudinale continue.

En particulier en ce qui concerne la réduction de la puissance des écoulements, les épis peuvent venir se substituer à des parements en enrochement, en gabion…

Autres alternatives à de telles structures mentionnons les brises lames en milieu maritime et les seuils en milieu fluviales (non traités dans ce document).

Dimensionnement :

Principes :

Les ouvrages de type « épi » présentent la particularité d'une conception à deux échelles :

- Celle de l'aménagement d'ensemble pouvant comporter plusieurs épis en série dont la définition repose sur une analyse géomorphologique du tronçon à protéger ;
- Celle de l'épi pris individuellement qui se caractérise par des dispositions constructives spécifiques.

Dans le cadre d'un besoin de réparation, nous développerons uniquement l'approche individuelle. Les calculs de dimensionnement portent sur deux parties de l'ouvrage :

- dimensionnement des blocs de carapace qui doivent résister aux forces tractrices et à la houle ;
- dimensionnement de l'épaisseur du tapis anti-affouillement dont la taille doit permettre d'absorber une érosion en pied tout en maintenant sa fonctionnalité de blocage de la carapace.

Deux solutions sont possible soit une mise en place en souille avec la base du tapis qui correspond à la profondeur d'affouillement soit une mise en place en semelle calée plus haut que la profondeur d'affouillement mais d'un volume suffisant pour parvenir à combler ce dernier sans désorganiser l'ensemble de la structure.

La fiche ne traite pas du fonctionnement de l'épi dans son environnement (rôle d'un groupe d'épi et interactions entre chacun d'entre eux).

Eléments de conception :

Les principaux points à étudier pour la conception des épis sont :

- La géométrie : largeur en crête, largeur des bèches latérales, épaisseur de la carapace ;
- La constitution du profil en long (ouvrage plongeant pour limiter le risque d'affouillement) et en travers (continuité et d'ancrage dans la digue et avec la fondation) ;
- L'orientation de l'ouvrage : sens du courant, opposé au sens du courant, perpendiculaire au sens du courant (en fluvial ils sont généralement orientés vers l'amont pour limiter les risques d'affouillement et favoriser la chenalisation du cours d'eau) ;
- Espacement entre les épis.

Modèle(s) disponible(s) :

Les enrochements qui peuvent constituer la carapace répondent à des spécifications précises qui portent sur (NF EN 13383-1):

- Les dimensions et le tonnage maximum (variables suivant les sollicitations) ;
- La masse volumique 2,4 t/m^3 au minimum ;
- La résistance à l'abrasion, usure et fragmentation (Los Angeles, Micro-Deval) ;
- La résistance au gel/dégel (indice de continuité).

En domaine fluvial le dimensionnement de la blocométrie des épis peut être mené :

- En utilisant la formulation d'Isbach (voir fiche FT 7.1) en adaptant le coefficient d'écoulement local et l'épaisseur de la couche limite à une mise en vitesse rapide autour de l'ouvrage ;
- En réalisant un modèle réduit physique à échelle adaptée comme le montre la Figure 2 (possibilité de représenter le comportement d'une série d'épis transversaux)

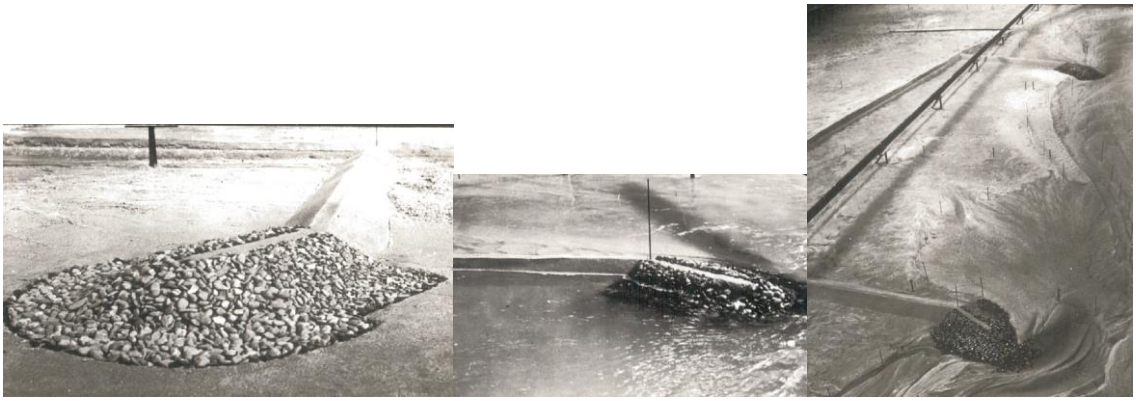


Figure 2 : Etude sur modèle réduit d'épis fluviaux (Crédit photo : CNR)

Plus on conserve de l'espace entre 2 épis, plus la force de courant entre ces épis sera forte. Les tourbillons entre deux épis doivent être forts et stables. La stabilité d'un tourbillon s'écrit par un ratio sans dimension esp, défini comme le rapport :

de la perte de charge dans la rivière entre deux épis (en mètres) : $\frac{U^2 \times S_{sp}}{C^2 \times h}$

à la charge hydrodynamique de la rivière (en mètres) : $\frac{U^2}{2g}$

Où :

U = est la vitesse moyennée sur la profondeur (m/s)
Ssp = espace entre les épis (m)
C = coefficient de Chézy (m1/2/s)
h = hauteur d'eau moyenne de la section transversale de la rivière (m).

La stabilité d'un tourbillon s'écrit alors :

$$e_{sp} = \frac{2g}{C^2} \times \frac{S_{sp}}{h}$$

Ceci constitue le paramètre le plus important, il ne doit jamais dépasser 1. D'après Delft Hydraulics (essais sur modèles physiques – 1973), ce rapport doit être inférieur à 0.6. Jansen (et al., 1979 1994) recommande de se tenir à des valeurs encore plus basses.

La distance entre deux épis est ensuite critiquée par l'équation de stabilité du tourbillon :

$$\frac{S_{sp}}{B} = 1 \text{ à } 2$$

Où B = largeur de la rivière après rétrécissement (m).

L'augmentation des distances entre épis augmente également l'affouillement exercé.

En considérant les aménagements réalisés ayant subis peu de désordres, la disposition des épis en série respecte généralement les ratios suivants :

L (espacement longitudinal) = 4.5 x B (distance entre têtes rive droite et rive gauche) pour les tronçons rectilignes.
L = B dans l'extrado d'une courbe
L= 2 B dans l'intrado d'une courbe.
La longueur Lsp des épis est variable, selon Jansen (et al., 1979 1994), le ratio Ssp/Lsp varie de 1 à 6 pour des épis servant à stabiliser ou à rétrécir le chenal dans des rivières à méandres.

En domaine maritime en dehors du modèle physique, la formule la plus couramment employée pour le dimensionnement des blocométries est celle d'**Hudson** qui s'appuie sur de très nombreux essais effectués au Laboratoire de Vicksburg (USA). Elle a pour forme :

$$N_s = \frac{H_{s\ ouvrage}}{\Delta D_{n50}} \qquad \Delta = \frac{\rho_r}{\rho_w} - 1$$

$$N_s = (K_D \cot(\alpha))^{(1/3)}$$

avec :

D_{n50} : Diamètre nominal médian (dimension du cube médian équivalent)
Δ : Densité relative déjaugée de la roche
K_d : Coefficient de stabilité adimensionnel qui tient compte de la nature et de l'arrangement des blocs (voir Tableau 1). Ce coefficient de stabilité correspond à un critère dit de « non-dommage », dans lequel on admet :

- jusqu'à 5 % de dommages pour les blocs en deux couches,
- l'absence de chute pour les blocs en monocouche (pour lesquels la perte d'un bloc peut engendrer rapidement des dégâts significatifs)

Tableau 1 : valeurs des K_d pour différents matériaux (Source : SOGREAH) – Le tableau complet est disponible dans la fiche FT 7.7

Kd (Hudson)		
Type d'unité	*Houle déferlante*	*Houle non déferlante*
	Kd	Kd
a) Enrochements (2 couches)	3,5	4

Pour les épis conçus avec une carapace en enrochement, on pourra se référer à la fiche FT 7.1 du présent guide. Les volumes des réserves de pied sont dimensionnés en relation avec le calcul de la profondeur d'affouillement.

Aspects pratiques (CCTP, chantier,) :

Cahier des charges :

Le cahier des charges devra s'attarder à détailler précisément les points suivant :

- La fourniture est spécifiée en listant les caractéristiques attendues (voir description ci-dessus) et la géométrie de l'ouvrage ;
- Détail des contraintes en termes de : gestion du stock approvisionné, pose des matériaux, respect de l'environnement… ; La mise en œuvre pouvant avoir lieu en eau
- Liste des servitudes applicables sur le site : contraintes de circulation, gestion des déchets, planning / période d'intervention… ;
- Plan de contrôle attendu (agréments de la carrière et de la fourniture, nature des essais, fréquence des contrôles), liste des points d'arrêts et points critiques

Chantier :

Rien de spécifique pour l'épi en lui-même. On pourra se référer aux fiches FT 7.1, FT 7.2 ou encore FT 7.7.

Matériaux et matériels nécessaires :

- Matériaux et/ou techniques associés : géotextiles, matériau de remblai, matériaux de parement ;
- Matériel de pose classique : pelles, camions, chargeurs. Problème de la portée ; si l'engin limité en puissance est trop près des limites de sécurité, la cadence et la précision de pose seront réduites. Privilégier les pelles à long bras ou une grue (type PPM) ;
- Matériel spécifique pour chantiers spéciaux : équipement GPS pour la pose, barges ;
- Besoins spécifiques pour appareillage : main d'œuvre qualifiée.

Nuisance/ environnement :

Les points de vigilance en termes d'environnement portent sur : le bruit, la poussière liée à la circulation de chantier, la pollution particulaire par les fines (dans l'eau), la pollution accidentelle, gestion des déchets de chantier, protection faune/flore.

Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance) :

- Agrément de la carrière et du process de production (origine des enrochements) dans le cas de matériaux naturels ;
- Agrément du produit sur la base d'une fiche technique produit (FTP) ;

- Validation du PAQ et des procédures liées à la mise en œuvre ;
- Contrôle d'approvisionnement (vérification du marquage CE sur les bordereaux de livraison) ;
- Contrôle des fournitures (facultatif) sur la base des spécifications demandées au marché ;
- Contrôle de la réalisation du stock et de la reprise des matériaux (éviter la ségrégation) ;
- Contrôle d'exécution de la mise en œuvre.

Eléments de coût de réalisation

Le coût de réalisation d'une protection de berge en épi dépend de nombreux facteurs :

- L'intensité des sollicitations hydrauliques marines fluviales ou torrentielles
- La structure des épis
- La profondeur de fond marin au droit de l'ouvrage dans le cas des épis de protection d'ouvrages maritimes

Le coût d'un chantier de construction d'une protection externe en épi diffère suivant le contexte en domaine fluvial on se rapportera au coût d'une protection longitudinale en enrochement (fiche FT 7.2) qui s'applique aussi bien à une variante « épi » pour un même linéaire d'application. On retiendra comme base de prix d'un rechargement un coût au m^3 posé d'enrochement de 50 à 100 € HT en domaine fluvial et de 100 à 200 € HT en domaine maritime.

Durabilité / Pérennité des travaux

La durée de vie des ouvrages de type épi diffère fortement suivant leur niveau de sollicitation hydraulique. En domaine marin, les séries d'épis (souvent plusieurs dizaines) en enrochement subissent de fortes sollicitations qui nécessitent des recharges fréquentes sur tout ou partie des éléments de la série.
En domaine torrentiel, les épisodes majeurs d'une période de retour supérieure à dix ans peuvent remanier tout ou partie des ouvrages.
En domaine fluvial comme c'est le cas sur la Loire, les épis (chevrette, duits, etc…) sont moins fortement exposés et ne nécessitent qu'un entretien réduit à l'échelle de quelques dizaines d'années.

Références :

- British Standards BS 6349, (1991), Part VII, Guide to design and construction of breakwaters.
- (2005) Rock Manual chapitre 8, conception des ouvrages en rivière et en canal, CIRIA
- Cemagref (1992) les ouvrages en gabions.
- NF EN13383-1 (2003). Enrochements. Spécifications Edition AFNOR

Annexes :

Figure 3 : exemple d'épi de protection de l'A7 (Durance à Orgon) (Crédit photo : ARTELIA)

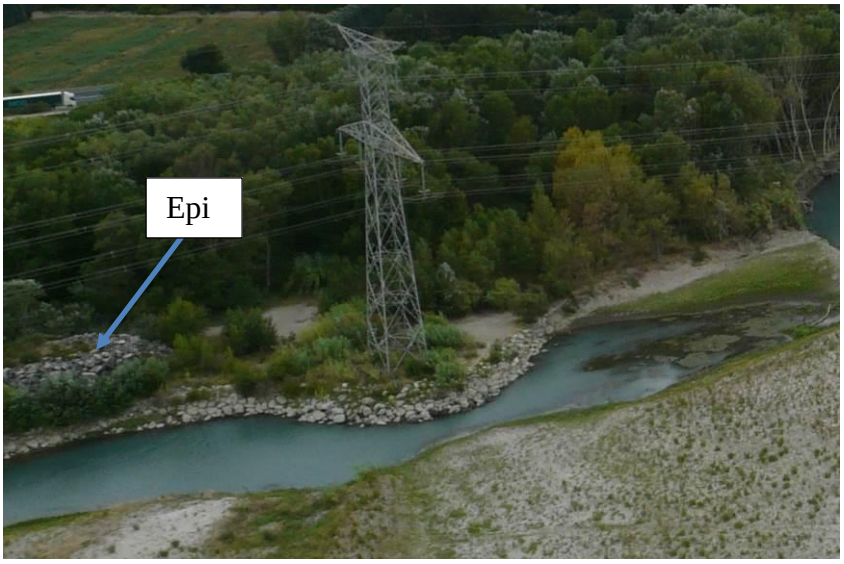


Figure 4 : exemple d'épi de protection de l'A7 accolé à une protection locale de pylône (Crédit photo : ARTELIA)

Figure 5 : vue rapprochée (Crédit photo : ARTELIA)

Figure 6 : Epis maritimes en cours de confortement (Crédit photo :ARTELIA)

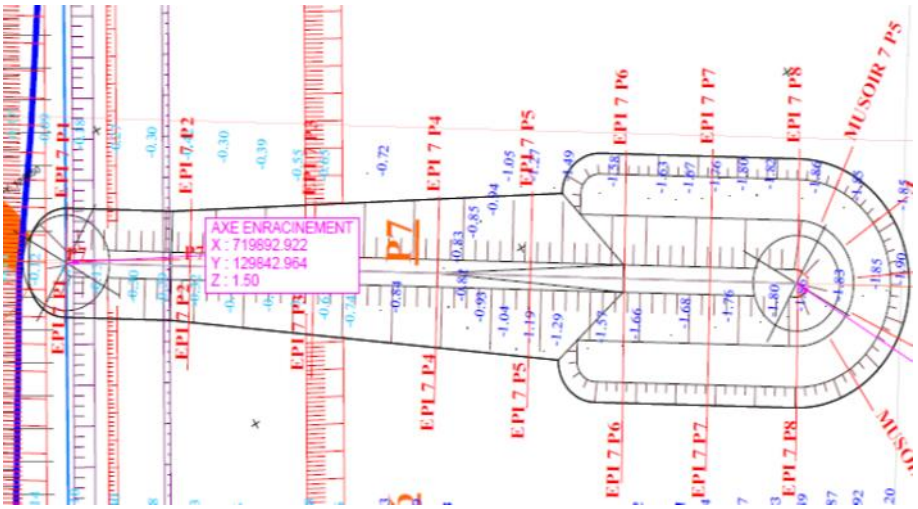


Figure 7 : Vue en plan d'un épi de protection du Lido de Frontignan (Source : ARTELIA)

Figure 8 : Vue d'Orléans et de ses duits (1970 – Crédit photo : DREAL Centre Val de Loire)

Figure 9 : Duit St Charles à Orléans (2011 – Crédit photo : DREAL Centre Val de Loire)

	Fiche Technique **Protection externe par la reprise d'un mur par béton projeté** External protection thanks to the recovery of a wall by shotcrete	**Fiche FT 7.9**

Auteurs principaux : T. MONIER (Artélia)
Contributeurs: M. SUTTER (INRAE) ; D. POULAIN (INRAE)
Relecteurs: PL. REGAZZONI ; S. PATOUILLARD (DREAL Centre-Val de Loire) ; B. CHALUS (CNR)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais :
Shotcrete is a sticking material, which cast on a structure can repair or reinforce it. It develops a resistance with time on the support without the need of a complete formwork to maintain it in place. These characteristics make it as a preferred material for specific uses like structures repair works. It can replace the use of concrete walls or embedded stone pitching together with rockfill at bottom.

Étude de cas correspondante :
Fiche descriptive D5.12 : Romanche – St Pierre-de-Mésage (38)

Indications :

Définitions :

Le terme « mur » tel qu'utilisé dans cette fiche se rapporte à un ouvrage à parement vertical ou quasi – vertical généralement construit à des fins de soutènement ou/et de protection.

La technique du béton projeté consiste à l'épandage sous pression d'une couche de béton sur une armature de type treillis soudés.

Les murs en béton armé et les perrés de maçonnerie sont des éléments constitutifs des systèmes d'endiguement. Souvent anciens, ils présentent parfois des dégradations très importantes qu'une opération d'entretien classique ne permettra pas à elle seule de corriger : forte érosion, fissuration et déplacements différentiels, ...
La réparation de ces ouvrages par reprise totale ou partielle de leur structure au moyen d'un voile en béton projeté (Figure 1) permet de réaliser de telles corrections tout en limitant les nuisances sur l'environnement immédiat et optimisant les travaux de confortement (économiquement et temporellement).

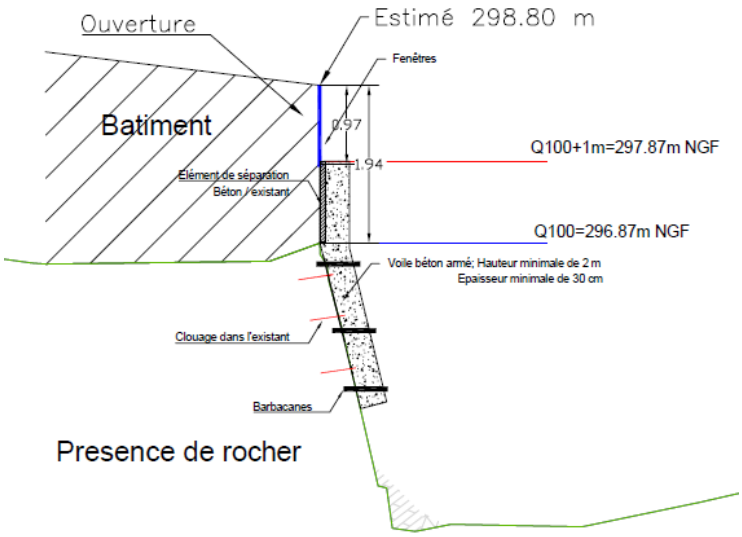


Figure 1 : Exemple de reprise de mur par béton projeté (Source : ARTELIA)

Sujet de la fiche:

Cette fiche présente l'utilisation d'une telle technique dans le cadre du confortement d'ouvrages déjà existants.

Fonction(s) principale(s) :

La fonction principale recherchée est de résister à l'érosion externe côté eau (érosion par le courant, batillage, résistance à la houle…) et, ainsi de protéger et pérenniser le corps de digue.

Ce type de confortement joue par ailleurs généralement aussi un rôle de soutènement via des ancrages et une paroi dimensionnés (épaisseur) dans cet objectif. Ces ancrages permettent également au confortement en béton projeté de jouer un rôle de confinement en empêchant le départ de matériaux du mur conforté.

Fonction(s) secondaire(s) :

Les voiles en béton projeté peuvent également assurer une fonction d'étanchéité de par les caractéristiques des matériaux qui les composent.

Description :

Performance à atteindre :

Les performances attendues d'un confortement en béton projeté chercheront à répondre aux fonctions de celui-ci.

Ainsi en termes de protection externe, le confortement devra résister aux différentes sollicitations extérieures que sont l'actions des vagues, des écoulements, des flottants, et l'agressivité chimique des milieux.

En termes de soutènement, il sera recherché, de la part des ancrages et de l'écran en béton projeté (béton et treillis) une résistance à la traction et à la flexion vis-à-vis des efforts dus à la poussée des terres, à l'eau et à d'éventuelles surcharges extérieures :

- Action due à l'eau statique ;
- Action due à l'eau en conditions dynamiques (forces de courant) ;
- Efforts internes à reprendre (en crue et en décrue).

Utilisation :

Tant pour les ouvrages neufs que pour les confortements, cette technique est couramment utilisée dans toutes les spécialités de travaux : ouvrages souterrains, talus routiers, ouvrages maritimes et fluviaux,...

Cette technique est généralement mise en œuvre sur la partie haute des talus (zone hors d'eau au moins ponctuellement). Dans ces cas elle n'est donc pas dimensionné pour prendre en compte le risque d'affouillement de pied susceptibles de se produire lorsque le fond du lit du cours d'eau est constitué de matériaux meubles. Il est donc généralement nécessaire d'adjoindre à ce type de confortement d'autres techniques permettant de traiter ce risque (cf. l'ensemble des fiches relatives aux protections externes).

Variantes :

Les variantes dans le cadre d'un marché peuvent porter sur le mode de projection (voie sèche ou mouillée), la formulation du béton (ajout de fibre ou de micro-silice), les dispositifs de ferraillage et d'ancrage éventuels.

Alternatives :

Le confortement en béton projeté est une technique avantageuse sur bien des aspects (mise en œuvre, coût, réponse à une multiplicité de situations…) mais certaines contraintes (notamment esthétiques et patrimoniales) peuvent amener à utiliser d'autres techniques.

On pourra ainsi remplacer les éléments du parement existant défectueux (cf fiche T5.8 par exemple – remplacement des moellons).

Il est également possible de mettre en place des structures rigides (maçonnés, béton armé préfabriqué, …) en surface du parement existant (cf. fiche de cas 5.13)

Dimensionnement :

Principe :

On peut dimensionner un renforcement en béton projeté en supposant que la structure renforcée aura un comportement monolithique et en appliquant les Eurocodes : NF EN 1990 : Eurocode 0 – base du calcul des structures ; - NF EN 1991 : Eurocode 1 – Actions sur les structures ; - NF EN 1992 : Eurocode 2 – Calcul des structures en béton armé.

Pour un ouvrage, ces normes considèrent différents aspects du dimensionnement en se référant aux :

- Calcul de la flèche théorique ;
- Calcul de l'effort tranchant maximum et du moment fléchissant maximum.

Outre ce dimensionnement et ces vérifications d'ouvrage, il est nécessaire de définir les matériaux constitutifs de l'ouvrage et de définir les composants attenants à l'ouvrage :

- Dimensionnement du béton projeté (armé) ;
- Dimensionnement des ancrages au rocher (longueur de scellement des barres) ;
- Dimensionnement d'organes de drainage si besoin (aspect non traité dans cette fiche).

De plus, il faut vérifier la stabilité générale de l'ouvrage conforté.

Paramètres nécessaires :

Les données nécessaires à la conception et au dimensionnement de la géométrie de l'ouvrage sont en particulier :

- pour les caractéristiques générales : les caractéristiques météorologiques et climatiques du site (notamment gel, fortes températures, mais également humidité).
- en milieu marin, la caractérisation hydraulique maritime et côtière portant sur les données de vent, les niveaux d'eau, la marée, les surcotes, la houle, l'élévation du niveau de la mer, le niveau d'eau de dimensionnement ;
- en milieu fluvial, la caractérisation hydraulique fluviale portant sur les hauteurs d'eau caractéristiques, la vitesse de courant, la turbulence, le batillage ;
- pour les données géotechniques :
    - la nature des matériaux en place et leur répartition géométrique ;
    - la stabilité mécanique des matériaux en place et leur aptitude à reprendre des charges y compris en cas d'affouillement du pied de mur en prenant notamment en compte la nature de la liaison mur/fondation ;
    - L'agressivité des eaux du site (distinction milieu marin et fluvial notamment) qui est particulièrement importantes vis-à-vis de la durabilité de l'ouvrage et se traduit en termes de dimensionnement dans le choix du béton, des armatures et de l'épaisseur d'enrobage.

Ces données permettent de déterminer les caractéristiques attendues pour le béton et plus généralement pour le confortement à mettre en place.

Eléments de conception :

Outre les éléments communs à tout confortement (cf. chapitre introductif), il est nécessaire de prêter attention aux points ci-dessous:

- Dimensionnement de la liaison entre le mur et sa fondation (et vigilance notamment en présence d'une bèche parafouille) ;

- Mise en place d'un drainage afin d'éviter la mise en charge du parement ;
- Accessibilité au site lors de la mise en œuvre (livraison de béton prêt à l'emploi) ;
- Difficultés prévisibles liées à la mise en œuvre (température, vent, crue) ;
- Conditions environnementales ;
- Conditions d'entretien et/ou de maintenance ;
- Techniques associées existantes sur l'ouvrage existant et/ou mises en place dans le cadre du chantier: batardeau provisoire, reprise des ouvrages existant / traversant / de transition, gestion des déchets et de l'environnement.

Modèle(s) disponible(s) :

- **Choix du béton :**

Les spécifications des bétons projetés sont définies dans les normes relatives au béton projeté : NF EN 14 487-1 et NF EN 14 487-2 Elles portent en particulier sur :

  - Granularité : 0 à 8 mm (fuseau AFTES) ;
  - Densité ciment : 1850 kg/m^3 ;
  - Résistance à la compression à 28 jours :> 30 N/mm² pour le C 30/37 ; > 35 N/mm² pour le C 35/45 ; > 40 N/mm² pour le C 40/50.

selon les situations, les critères suivants se rajoutent aux critères généraux :

  - La nature des adjuvants (accélérateur de prise…) ;
  - L'origine des granulats ;
  - Limiter la perte par rebond et la différence entre béton en place et mélange initial
  - La nature et la qualité des armatures (éventuellement des fibres) ;
  - La qualité de l'enrobage des armatures ;
  - Les critères de durabilité (tel que définies dans l'EC2).

- **Calcul de résistance du « voile » béton**

Les calculs spécifiques de résistance en crue et en décrue font intervenir

  - Le calcul de la poussée statique :

$$\sigma \text{ (kPa)} = H \times \gamma_w$$

Avec :

γ_w le poids volumique de l'eau en kN/m^3.
H hauteur d'eau en m, différence entre le niveau de la surface libre de la nappe et le niveau où la pression de poussée est calculée.

  - Le calcul de l'action du courant :

Selon l'Eurocode 0 partie 4.9, il convient de déterminer l'intensité de la force horizontale totale Fwa (N) exercée par les courants sur la surface verticale à l'aide de l'expression suivante :

$$F_{wa} = \frac{1}{2} k \rho_{wa} h b v_{wa}^2$$

Où :

v_{wa} est la vitesse moyenne de l'eau rapportée à sa profondeur, exprimée en m/s ;
ρ_{wa} est la masse volumique de l'eau, exprimée en kg/m^3 ;
h est la profondeur de l'eau, sans prendre en compte la profondeur d'affouillement local, exprimée en m ;
b est la largeur de l'obstacle, exprimée en m ;
k est le coefficient de forme où :

  - k = 1.44 pour un obstacle de section carrée ou rectangulaire perpendiculaire au

courant ;
    - k = 0.70 pour un obstacle de section circulaire en plan.

Les résultats de ces calculs préliminaires constituent les actions à prendre en compte à la crue et à la décrue lors du calcul des efforts internes à reprendre.

- **Etude du soutènement définitif** (Norme NF EN 1992-1-1),

Les calculs ci-dessous sont généralement dimensionnant, toutefois il peut être nécessaire de les adapter en cas de configuration particulière :

- En crue
    - Calcul des efforts internes à reprendre (moment fléchissant & effort tranchant maximum) par la structure ;
    - Dimensionnement du béton projeté armé ;
    - Calcul de la flèche théorique ;
- En décrue
    - Dimensionnement des ancrages au rocher ;
    - Calcul des efforts agissants à l'ELU (moment fléchissant & effort tranchant maximum) ;
    - Dimensionnement du béton projeté armé à la décrue ;
    - Dimensionnement de la longueur de scellement des ancrages.

Aspects pratiques (CCTP, chantier):

Cahier des charges :

La fourniture est spécifiée dans le CCTP en listant particulièrement les caractéristiques attendues (voir description ci-dessus).

Il sera aussi nécessaire de détailler des contraintes en termes de : conditions d'approvisionnement et de chantier, technique de projection (sèche ou humide), respect de l'environnement…

Chantier :

La mise en œuvre du renforcement suit plusieurs étapes :

- reconnaissance et traitement du parement existant, il est nécessaire d'avoir un support propre, sain et non gelé. Cela peut nécessiter des traitements avant la pose du béton : nettoyage et rejointoiement des maçonneries – reprise des joints de dilatation sur mur existant à l'aide d'une résine mastic ;
- Mise en place d'une ou plusieurs nappes de treillis soudés ancrées au support avec barbacanes (permettant le drainage du sol situé à l'arrière du parement) intercalées ;
- Mise en place du béton par projection. Généralement cela se fait comme suit : le béton est propulsé par air comprimé dans des tuyaux jusqu'à la lance de projection. L'eau arrive séparément à la lance et y est dosée de façon à assurer l'humidification du mélange, en proportion et consistance voulues (généralement S3 – béton très plastique avec contrôle du slump au cône d'Abrams), juste au moment de la projection sur la paroi.

Notons quelques particularités à prendre en compte lors de la mise en œuvre de béton projeté :

- Plage de température de l'air et du support pour la mise en œuvre : de + 5 à + 35° C (suivant les spécifications associées à chaque béton) ;

- Mise en œuvre par couches de 20 à 40 mm pour une épaisseur totale comprise entre 80 et 200 mm.

Matériaux et matériels nécessaires :

- Matériel de nettoyage par jet sous pression ;
- Matériaux spécifique associés au composant mis en œuvre : béton, armatures et ancrages ;
- Matériel relatif au contrôle d'exécution sur site (prélèvement d'échantillon, cône) ;
- Matériel de projection classique : machine à rotor ou péristaltique, silo projeteur, lance de projection, trémie de stockage (Figure 2) ;

Figure 2 : Chantier de mise en œuvre de béton projeté (Crédit photo : ARTELIA)

- Appareillage nécessitant compétences spécifiques : doseur d'adjuvant, robot, suppresseur d'eau, main d'œuvre qualifiée (orientation et conduite de la lance, arrêt de bétonnage) ;
- Barbacanes (densité généralement de l'ordre de 1 pour 4 m²) crépinées et perforées en partie intérieure et équipées d'un géotextile imputrescible perméable à l'eau faisant obstacle à tous matériaux solides.

Nuisance/ environnement :

Les points de vigilance en termes d'environnement portent sur : le bruit, la poussière liée à la circulation de chantier, la pollution particulaire par les fines (dans l'eau), la pollution accidentelle, gestion des déchets de chantier, protection faune/flore.

Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance) :

- Agrément de la formule de béton ;
- Agrément des granulats utilisés ;
- Validation du PAQ et des procédures liées à la mise en œuvre ;
- Contrôle d'approvisionnement, vérification des caractéristiques de consistance par slump-test (cône d'Abrams : NF EN 12350-2 -Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement) ;
- Contrôle des armatures (treillis soudé type ST, ancrage type HA, etc..) vérification de la conformité au plan d'exécution (position, diamètre, chainage, etc…) ;
- Contrôle de performance du béton mis en œuvre (essais de résistance à la compression sur échantillons prélevés après mise en œuvre).

Vitesse d'avancement :

Entre 20 et 40 m² de paroi traitée par jour de travail.

Traitement de points singuliers :

Réservation pour rejet d'eau pluviale
Transitions avec enrochements liaisonnés ou autre protection de pied

Eléments de coût de réalisation

Le coût de réalisation d'un voile en béton projeté par voie sèche est compris entre 500 et 1000 € HT du m^3 en intégrant toutes les suggestions induites.

Durabilité / Pérennité des travaux

Grace à leur bonne étanchéité et à une forte résistance au gel, les bétons projetés par voie sèche présentent généralement une résistance supérieure à celle des bétons ordinaires. Ils présentent également une densité plus élevée qu'un béton classique et offrent donc une meilleure durabilité.

Références :

- NF EN 1990 : Eurocode 0 – base du calcul des structures ;
- NF EN 1991 : Eurocode 1 – Actions sur les structures ;
- NF EN 1992 : Eurocode 2 – Calcul des structures en beton armé ;
- NF EN 14487-1 2006 Béton projeté : définitions, spécifications et conformité ;
- NF EN 14487-2 2006 Béton projeté : Exécution ;
- ASQUAPRO (2010-2013). Guide technique « bétons projetés », 8 fascicules ;
- (1991) Recommandations Clouterre, Pont et Chaussées

Annexes :

Figure 3 : état des lieux avant confortement – La Romanche à St Pierre de Mésage, Isère (Crédit photo : ARTELIA)

Figure 4 : exemple de projection par voie sèche – La Romanche à St Pierre de Mésage, Isère (Crédit photo : ARTELIA)

Figure 5 : exemple après réparation liaison avec mur maçonné – La Romanche à St Pierre de Mésage, Isère (Crédit photo : ARTELIA)

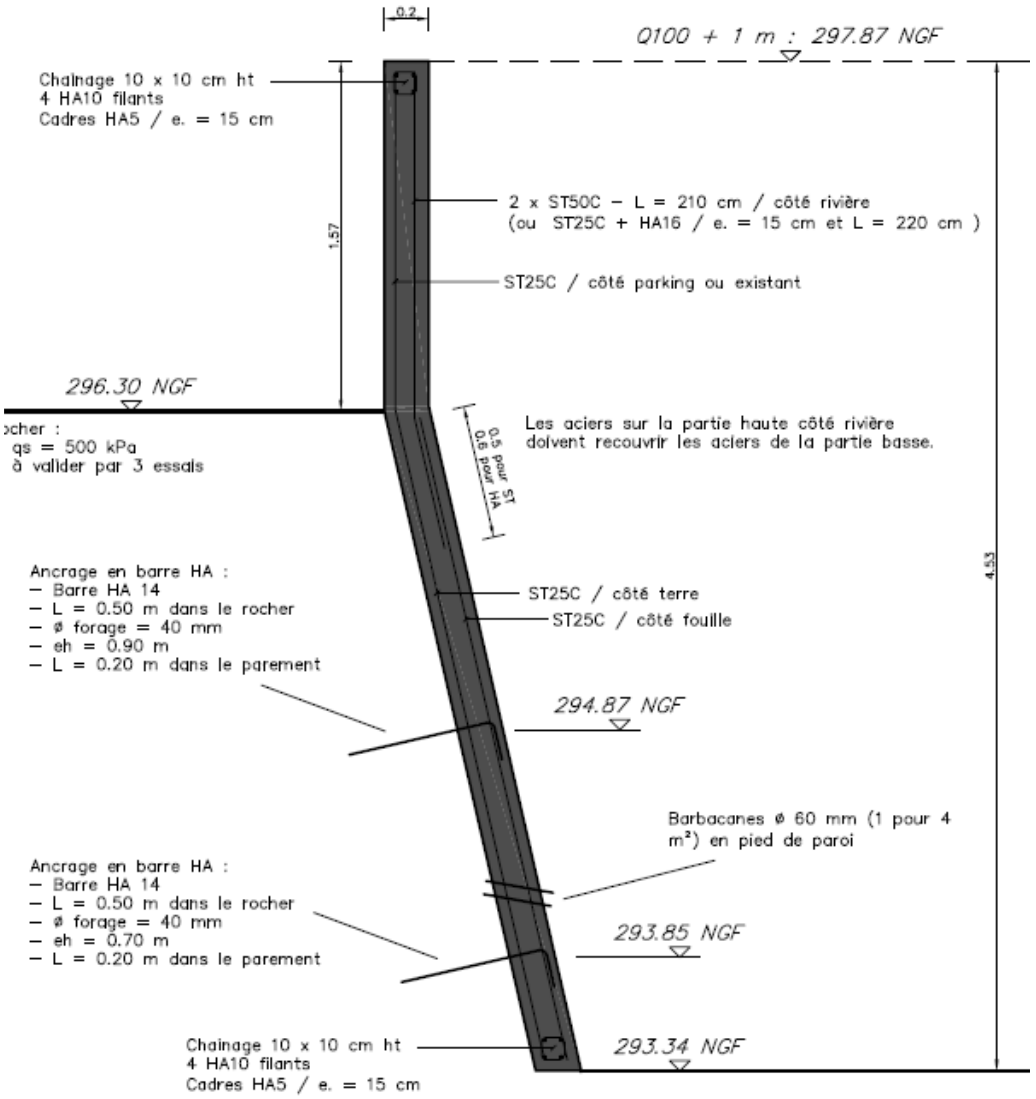


Figure 6 : schéma d'armature d'un confortement en béton projeté (Source : ARTELIA)

Figure 7 : détail de la liaison mur fondation (Crédit photo : ARTELIA)

	Fiche Technique **Protection externe : recharge / réserve de pied en enrochements** External protection : rockfill refil / rockfill reserve	**Fiche FT 7.10**

Auteurs principaux : T. MONIER (Artelia)
Contributeurs : P. LEDOUX (Cerema) ; D. POULAIN (INRAE) ; M. SUTTER (INRAEA)
Relecteurs : L. SAUSSAYE (Cerema) ; L. GERVAIS (DREAL) ; S. PATOUILLARD (DREAL)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais :
Avoiding scour holes at the toe of banks protections has always been a main difficulty for designers. The main strength parameter for this kind of design is the maximum depth of scouring under riverbed which defines the thickness of coursed rockfill layer. This toe protection will prevent sudden settlements, rearrangement of the mesh, disorganization of the structure and eventually breakages of upstream face and, at the end, levee breach. In many cases, toe protection repair can be manage in single way without any works on upper protection like stone pitching for example.

Étude(s) de cas correspondante(s) :
C 5.13 Romanche VIZILLE (38)

Indications :

Définition :

En période de crue morphogène, les rivières à fond mobile sont susceptibles de remanier leurs lits avec pour conséquence l'apparition de fosses d'affouillement au contact des points durs des berges. Ce phénomène a conduit les concepteurs de protections de berge à prévoir une réserve de matériaux en pied d'ouvrage, parfois appelée « sabot », en base de protection, de manière à compenser l'abaissement localisé du fond du lit par un pavage progressif de la fosse de surcreusement sans mettre en péril la stabilité du parement de berge ou de digue.

Les recharges de pied sont majoritairement (cf. Variantes ; cf. Alternatives) constituées par des enrochements disposés en couches. Sur la Loire ce sont généralement des mélanges homogènes.

Sujet de la fiche :

Dans cette fiche, il sera question du dimensionnement de ce type de composant, dans le cas où il est mis en œuvre en pied de talus côté eau d'une digue existante et de la recharge de ce type de composant avec des matériaux supplémentaires, les matériaux initialement mis en place ayant été érodés ou déplacés. Dans certains cas les désordres n'affectent que la réserve de pied, qui peut être rechargée en sous œuvre sans avoir à reprendre l'ensemble de la protection de talus.

Fonction(s) principale(s) :

La recharge de pied d'une protection longitudinale contre l'érosion externe a pour principale fonction de parer au sous-cavement des protections de talus, en comblant, dès l'amorce de leur formation, les fosses d'affouillement en pied d'ouvrage. Elle joue donc un rôle de protection externe.

Fonction(s) secondaire(s) :

La recharge de pied permet d'assurer d'autres fonctions grâce à ses caractéristiques :

- fonction de drainage (blocométrie ouverte et absence de matériau évolutif) ;
- fonction de stabilisation des composants sus-jacents. Sur les ouvrages anciens, elle est mise en place afin de retrouver un état d'équilibre, perdu du fait d'un sous-cavement de la protection de talus ou de son pied ;
- fonction de filtre dans le cas où les matériaux mis en place sont de blocométrie/granulométrie en mesure que les règles de filtre (cf. introduction chapitre 3) soient respectées avec le matériau sous-jacent.

Description :

Performance à atteindre :

- pérennité de la recharge (durabilité des enrochements, adaptation aux variations locales des fonds) ;
- efficacité de la recharge (volume, foisonnement, déformabilité…) ;
- adaptabilité aux contraintes du site et des fonctions recherchées (anti-affouillement ou protection externe et stabilité).

Utilisation :

Les enrochements utilisés en recharge de pied peuvent convenir dans pratiquement toutes les situations :

- milieu marin ;
- milieu fluvial ;
- ouvrages hydrauliques neufs ou renforcement d'ouvrages existant ;
- ouvrage immergé ou hors d'eau.

Ceci impose, dans chaque situation, de définir précisément les caractéristiques attendues pour dimensionner le matériau au contexte dans lequel il sera mis en œuvre et aux sollicitations auxquelles il sera soumis.

Les conditions d'emploi qui peuvent limiter l'usage de ces matériaux peuvent être liées : à la ressource locale en matériau, aux conditions d'entretien, aux conditions de mise en œuvre, aux conditions environnementales.
Généralement de tels confortements sont réalisés en pied d'ouvrage rigide ou considéré comme tel, par exemple des talus en enrochements liés ou des perrés maçonnés

Variantes :

Si des performances à court terme sont visées/recherchées, tout type de matériau en mesure de résister au courant peut être utilisé (sol ou roche). Dans cette situation, la recharge a également une fonction de stabilité du talus. C'est le cas généralement en environnement/milieu littoral, où il arrive que des recharges en sable soient réalisées à la suite d'une érosion afin de limiter les risques en cas d'évènement arrivant à court terme, en attendant la mise en place d'un confortement plus durable.

Alternatives :

Les recharges de pied en enrochements peuvent être remplacées par des matelas de gabions disposés en tapis horizontal dans le cas de sols sont fins, peu portants ou instables (cf. fiche T5.5) ou encore par des boudins remplis de matériaux granulaires fins.

Dimensionnement :

Principes (état des pratiques avant les travaux du GT érosion externe du CFBR):

Dans le cas de digues fluviales, le dimensionnement des recharges de pied porte essentiellement sur le volume minimum à constituer en vue de combler les fosses d'affouillement susceptibles de se former en pied d'ouvrage. Il s'appuie sur les formules de transport solide qui permettent de déterminer la profondeur de fond non remanié (Ramette, 1981) ou la profondeur maximum d'affouillement dans les coudes (CETMEF, 1990).

Dans le cas des digues maritimes, la recharge est une butée de pied (cf. fiche 5.2) qui a également pour fonction le soutien de la carapace avec deux alternatives (*Figure 1*) :

- dans le concept de la souille (a), le principe est d'ensouiller l'ouvrage jusqu'à la profondeur

d'affouillement prévisible ;

- dans le concept de semelle (b), le principe est de mettre en place suffisamment d'enrochements pour combler l'affouillement.

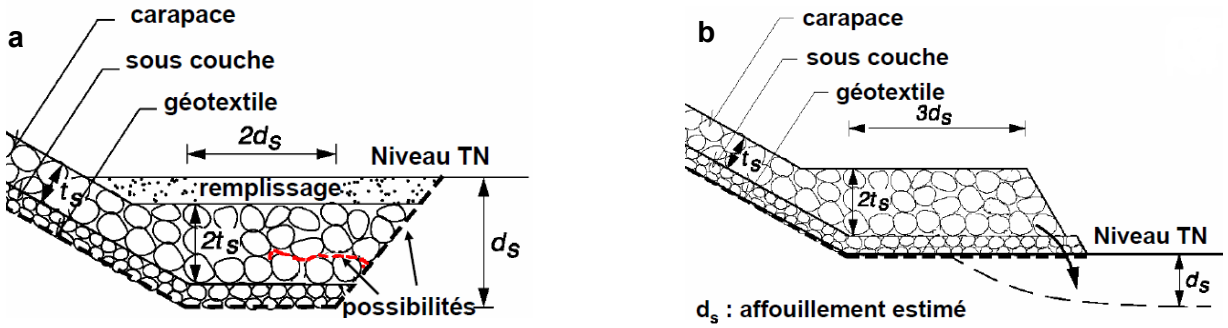


Figure 1 : Schéma de principe de mise en œuvre d'une recharge de pied en enrochements a) sabot ensouillé et a) semelle (dimensions et compositions type) (Source :ARTELIA)

Les spécifications des enrochements sont définies dans la norme NF EN 13383-1 et les essais nécessaires à leur évaluation dans la norme NF EN 13383-2. Elles portent sur :

- la distribution granulométrique pour les petits enrochements (CP) ;
- la distribution des masses pour les moyens (LM) et gros enrochements (HM) ;
- la forme (élancement) ;
- la masse volumique ;
- la résistance à la rupture (résistance à la compression simple).

Selon les situations (pose en souille ou en banquette), les critères suivants se rajoutent aux critères généraux :

- le nombre de faces cassées ;
- l'absorption d'eau ;
- des critères d'évolutivité (résistance à l'usure, résistance de chute, degré de fissuration…) ;
- des critères de durabilité (résistance au gel-dégel, coup de soleil, résistance à la croissance cristalline…).

Paramètres nécessaires :

Les éléments clés du diagnostic préalables sont liés à :

- la morphodynamique fluviale et notamment aux tendances évolutives du lit (érosion de fond ou engraissement généralisé) ;
- à la forme des courants gouvernée par les caractéristiques géométriques du lit ou de l'estran en plan et en profil en long ainsi qu'à la nature granulométrique des sédiments mobilisables en période de crue.

Outre ces aspects, les éléments nécessaires au dimensionnement d'une recharge de pied sont :

- le positionnement en XYZ des structures existantes (parement, ouvrages de génie civil…) ;
- la distribution granulométrique des sédiments.

Éléments de conception (détails autres que dimensionnement) :

- mise en place d'une sous-couche ou d'un filtre géotextile assurant la transition avec le matériau de fondation ;
- répartition des blocs à adapter au cas par cas, selon la configuration locale (plus de volume en partie haute ou basse du sabot), afin de favoriser la continuité du pavage en cas d'abaissement du terrain naturel en pied d'ouvrage. A ce sujet, nous invitons le lecteur à se référer à la bibliographie sur le sujet (G. DEGOUTTE (2006). Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : hydraulique et morphologie fluviales appliquées, p. 204 ou Ph LEFORT (1996). transports solides dans le lit des cours d'eau, p. 181 ou Guide Enrochement, p. 1036, CETMEF, 2009) ;
- percolation possible avec des graves 0/20 mm pour améliorer la capacité de filtration ;
- accessibilité au site lors de la mise en œuvre, dérivation provisoire et batardeau ;
- difficultés prévisibles liées à la mise en œuvre (reprise en sous-œuvre, présence d'ouvrage traversant) ;
- conditions environnementales (turbidité) ;
- coût de construction.

Modèle(s) disponible(s) :

- **Modèle pour une recharge à vocation anti-affouillement :**

1) Calcul de la profondeur de fond non perturbé (Ramette, 1981)

$$f_p = 0{,}73.q^{2/3} / d^{1/6}$$

avec :

- f_P ou d_S, profondeur des fonds perturbés par rapport à la ligne d'eau correspondant au débit Q ;
- q = Q/L (en $m^3/s/m$), débit liquide par unité de largeur ;
- d (en m), diamètre moyen des sédiments.

2) Affouillement dans les coudes

La profondeur h_e correspondant au début d'entraînement de matériaux de diamètre d_{50} donnée par la formule de début d'entraînement de Meyer-Peter :

$$he=0{,}047\left(\frac{\gamma'-\gamma}{\gamma}\right)\frac{d_{50}}{i}$$

avec :

- γ', poids volumique déjaugé du matériau ;
- γ, poids volumique de l'eau ;
- d_{50}, diamètre médian du matériau ;
- i, gradient hydraulique ;

Des essais en laboratoire ont permis d'établir, pour différentes configurations géométriques, une série de relations entre $(H-h)/h_e$ et h/h_e (*Figure 2*) avec :

- H, profondeur maximum d'affouillement sous le niveau d'eau ;
- h_e, profondeur moyenne correspondant au début d'entraînement ;
- h, la profondeur du fond moyen sous le niveau d'eau.

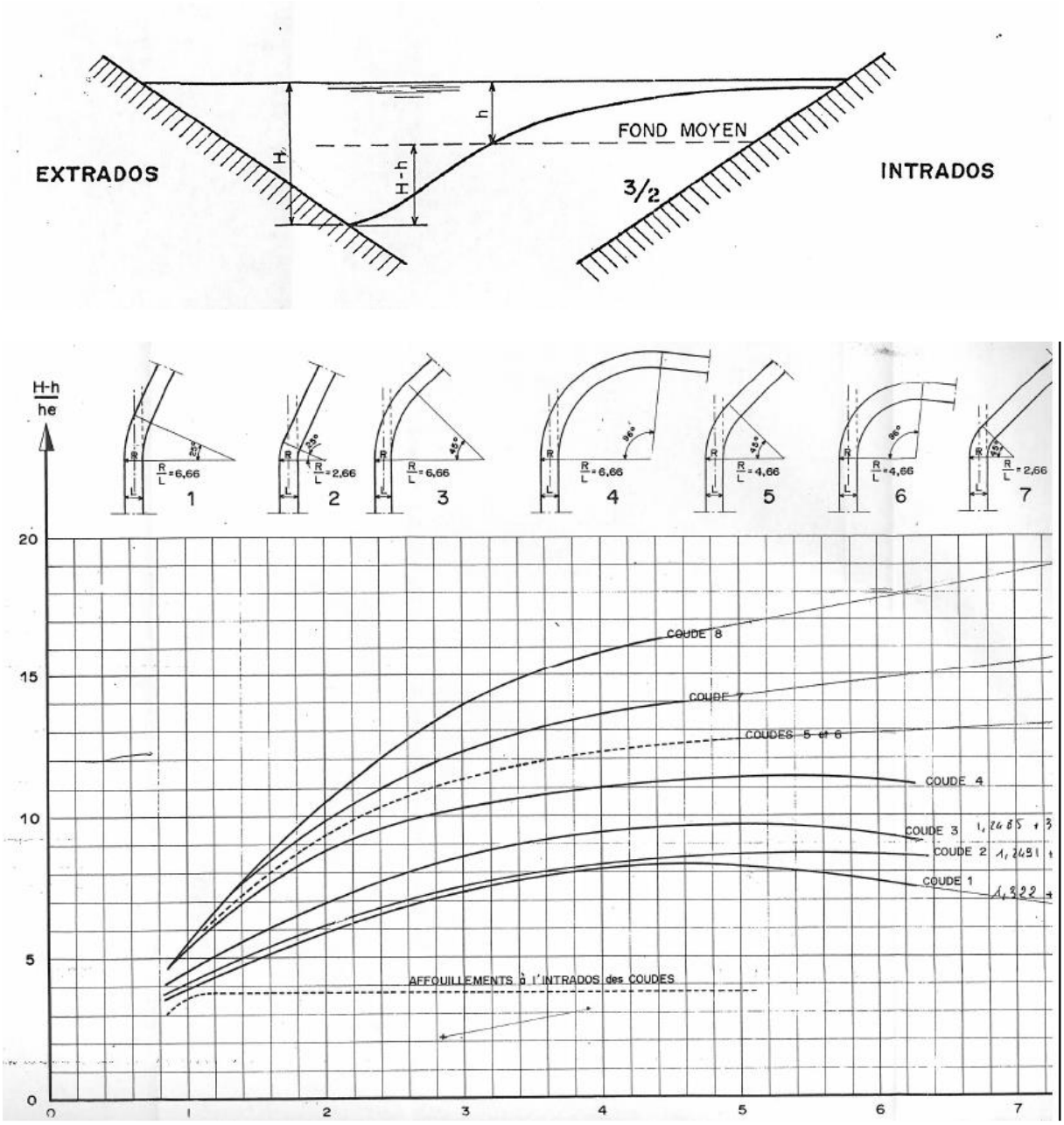


Figure 2 : Exemple d'abaque de détermination des profondeurs d'affouillement (Les affouillements et la protection des berges dans les coudes des rivières à fond mobile – Source : CETMEF, 1971)

- **<u>Modèle pour une recharge type butée de pied :</u>**
  - dans le cas des digues fluviales, sauf cas particulier, la blocométrie est identique à celle de la carapace (valeur conservative) – on pourra se référer à la fiche 5.2 pour les aspects dimensionnement ;
  - dans le cas des digues maritimes, la blocométrie est déterminée par la formule de Van der Meer-Gerding.

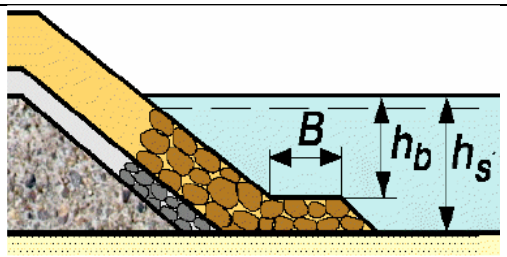


Figure 3 : Dimensionnement de la blocométrie par la formule de Van der Meer Gerding – Source : documentation Sogreah

$$(h_s / \Delta \times D_{n50}) = (0{,}24 \times (h_b / D_{n50} + 1{,}6) \times N^{0{,}15}$$

avec :

- D_{n50}, diamètre caractéristique (50% des blocs ont un diamètre inférieur à cette valeur) ;
- N, niveau des dégâts :
  - 0,5 absence de dégâts ;
  - 2 dégâts acceptables ;
- valable pour h_b/h_s compris entre 0,4 et 0,9 et h_b/D_{n50} compris entre 3 et 25 ;
- Δ est le poids volumique déjaugé de l'enrochement $\gamma_{roche}/\gamma_{eau}-1$.

Aspects pratiques (CCTP, chantier) :

Cahier des charges :

Plan de contrôle attendu (agréments de la carrière et de la fourniture, nature des essais, fréquence des contrôles), liste des points d'arrêts et points critiques.

Chantier :

- contrôle des fournitures (bloc témoin) ;
- contrôle de la pose (raccordement soigné aux parties d'ouvrage en place, purge des matériaux impropres, déversement et poussage des blocs prohibé, mise en place bloc par bloc, réduction des vides par imbrication maximum, pas de nids de petits blocs) ;
- assèchement partiel des fouilles à l'abri d'un batardeau.

Matériaux et matériels nécessaires :

- matériaux et/ou techniques associés : géotextiles, matériau de remblai, enrochements
- matériel de pose classique : pelles, camions, chargeurs. Problème de la portée ; si l'engin est trop près des limites de sécurité, la cadence et la précision de pose seront réduites. Privilégier les pelles à long bras ou une grue à bras télescopique ;
- matériel spécifique pour chantiers spéciaux : équipement GPS pour la pose, barges ;
- besoins spécifiques pour appareillage : main d'œuvre qualifiée.

Nuisance/ environnement :

Au-delà des nuisances produites par l'ensemble des techniques décrites (cf. chapitre introductif), il peut y être ajouté le risque spécifique de désordres sur le parement sus-jacent.

Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance) :

Le contrôle d'exécution devra respecter les règles générales définies en introduction, dont plus spécifiquement les points suivants :

- agrément de la carrière et du process de production (origine des enrochements) dans le cas de matériaux naturels ;
- agrément du produit sur la base d'une fiche technique produit (FTP) ;
- validation du PAQ et des procédures liées à la mise en œuvre ;
- contrôle d'approvisionnement (vérification du marquage CE sur les bordereaux de livraison) ;
- contrôle des fournitures (facultatif) sur la base des spécifications demandées au marché ;
- contrôle de la réalisation du stock et de la reprise des matériaux (éviter la ségrégation) ;
- contrôle d'exécution de la mise en œuvre.

Traitement des points singuliers :

Le dégagement et le nettoyage de l'interface avec le parement en place constitue un point d'arrêt.

Eléments de coût de réalisation

Le coût de réalisation d'un rechargement de la réserve de pied d'une carapace en enrochement libre est compris entre 50 et 100 € HT du m^3 avec comme principal incidence sur le coût final, les conditions d'accès au pied de digue (profondeur du fond, courantologie, etc…).

Durabilité / Pérennité des travaux

La réserve de pied d'une protection en enrochement peut être considérée comme un consommable qui doit être remplacé dès que l'on constate une tendance à la formation de fosses d'affouillement notamment dans l'extrados des coudes. Il est donc nécessaire de prévoir un contrôle bathymétrique régulier au droit de ces ouvrages (à minima lors des revues de sureté décennales).

Références :

- NF EN13383-1 (2003). Enrochements. Spécifications. AFNOR
- NF EN13383-2 (2003). Enrochements. Méthodes d'essais. AFNOR
- CIRIA (2013). The International Levee Handbook - 1332 pages.Ciria.
- CIRIA, CUR, CETMEF (2009). Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques. Version française du Rock Manual. P09-01, Edition Cetmef Compiègne. 1302 pages.
- RAMETTE M. (1981) Guide d'hydraulique fluviale - Rapport HE/40/81/04 du Laboratoire
- National d'Hydraulique (Chatou), 172 p.
- DEGOUTTE G. (2006). Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : hydraulique et morphologie fluviales appliquées, Tec & Doc Lavoisier p. 204
- LEFORT Ph. (1996). Transports solides dans le lit des cours d'eau. p. 181

Annexes

Figure 3 : Repérage du pied de perré existant (Crédit photo :ARTELIA)

Figure 4 : Reconstitution de la recharge de pied (Crédit photo :ARTELIA)

Figure 5 : En fin de travaux (Crédit photo :ARTELIA)

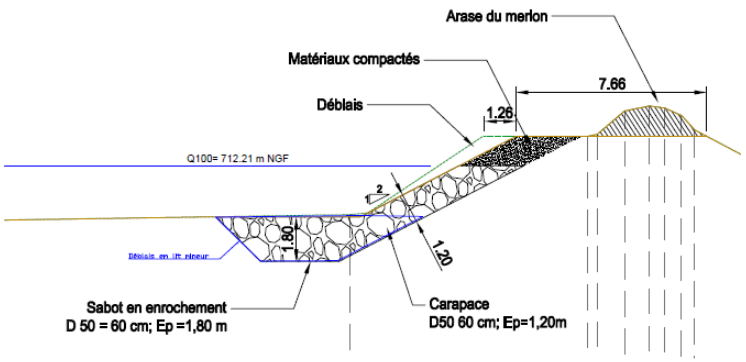


Figure 6 : Profil en travers : recharge de pied (Source :ARTELIA)

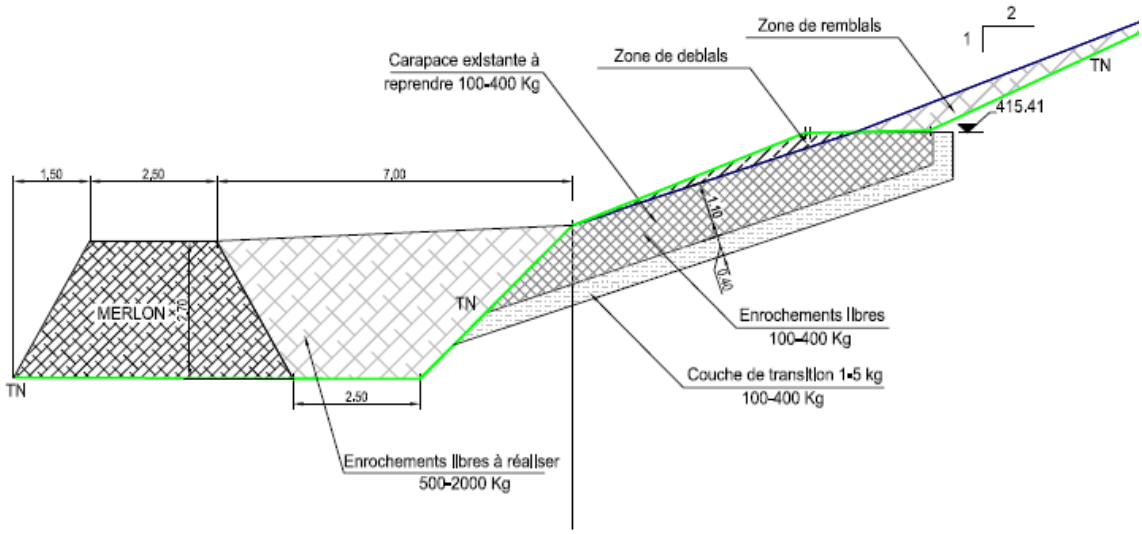


Figure 7 : Profil en travers : recharge de pied Romanche Aval (Source :ARTELIA)

	Fiche Technique **Palplanches de protection contre l'érosion externe en pied de talus côté eau** Sheet piles for protection against external erosion at the foot of the slope on the water side	**Fiche FT 7.11**

Auteurs principaux : Y. BOUSSAFIR (IFSTTAR)
Contributeurs : P. LEDOUX (Cerema) ; D. POULAIN (INRAE) ; M. SUTTER (INRAE) ; R. TOURMENT (INRAE)
Relecteurs : L. SAUSSAYE (Cerema) ; L. GERVAIS (DREAL) ; S. PATOUILLARD (DREAL)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais :
Protection of toe levee against very intensive scour erosion on the river side can be realised with sheet piles. The piles are driven to a depth determined for proper stability and located generally directly at the toe of the levee. The protection is most of time self sufficient but can be associated with other protection according to the mechanisms of erosion. Attention must be paid for the difficulty of the works (on water side or on protected area and the design of the technique that must be prepared with appropriated geotechnical studies.

Étude(s) de cas correspondante(s) :
C5.14 : Palplanche en pied de talus, St-Benoît-sur-Loire (45)

NB : Cette fiche complète la fiche FT G1 pour ce qui concerne les aspects spécifiques de l'utilisation de palplanches pour lutter contre un affouillement de pied de digue ou de berge.

Indications :

Définition :

Une protection externe d'un pied de talus par rideau de palplanches correspond à la mise en place d'un ensemble de palplanches formant un rideau côté eau qui protège le pied de la digue contre des risques d'affouillement (*Figure 1*). Ce dispositif peut être envisagé pour les digues en charge permanente ou non, en milieu maritime ou fluvial. Il permet de retarder voire d'empêcher un mécanisme d'érosion externe dans des sites particulièrement affouillables ou à très fort courant.

Figure 1 : Exemple de rideau de palplanches sur la Loire, en pied de digue, à St-Benoît-sur-Loire (à gauche) et à Onzain (à droite) (Crédit photos : DREAL Centre-Val de Loire)

Sujet de la fiche :

Cette fiche s'intéresse à l'usage fait des palplanches en tant que protection contre l'érosion externe en pied de digue côté eau (*Figure 2*). Elle vient en complément des généralités concernant les palplanches présentées dans la fiche FT G1.

Fonction(s) principale(s) :

Lutte contre l'érosion externe et l'affouillement côté eau.

Fonction(s) secondaire(s) :

Le rideau de palplanches est rarement utilisé dans l'unique but de protéger contre l'érosion externe. Il assure généralement une ou plusieurs fonctions secondaires parmi les suivantes (*Figure 2*) :

- soutènement pour le corps de digue côté eau (cf. fiche FT 5.4). C'est particulièrement utilisé en maritime en deuxième rang derrière une recharge en matériaux « érodable » ;
- étanchéité côté eau et réduction du risque érosion interne dans le sol de fondation. On pourra se rapporter à la fiche FT 3.1 pour les aspects étanchéité ;

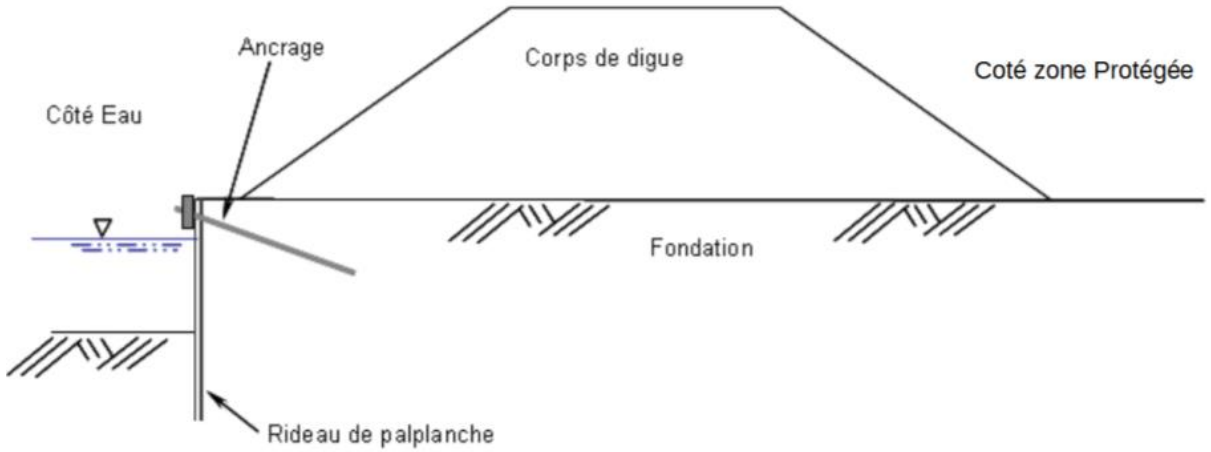


Figure 2 : Schéma de principe d'une protection contre l'affouillement (érosion externe) par rideau de palplanches (Source : Ifsttar)

Description :

Performance à atteindre :

Le rideau de palplanches apporte une très grande résistance aux sollicitations hydrauliques externes (érosion) côté eau et contribue dans le même temps à la stabilisation et au maintien des matériaux qui constituent la digue et son sol de fondation. Indirectement, le rideau de palplanches contribue à réduire les circulations d'eau en pied et dans le sol de fondation de la digue.

Utilisation :

La mise en œuvre d'un rideau de palplanches est souvent préconisée dans le cas d'une zone sensible à l'affouillement, avec des fosses d'érosion profondes et pour laquelle l'enrochement utilisé comme technique traditionnelle, seul, a pu montrer ses limites. C'est souvent le cas dans des méandres de rivière (Figure 3) ou de fleuve ou sur le littoral. La technique est mise en œuvre préférentiellement en sites meubles, peu sensibles aux nuisances liées à la mise en œuvre.

Figure 3 : Rideau de palplanches associé à un enrochement en talus – digue de Saint-Loubès (Crédit photo : Cerema)

Dans les zones très exposées aux affouillements, il peut être nécessaire d'associer une butée de pied côté eau (Figure 4, Figure 5). Cette protection supplémentaire permet de retarder le phénomène

d’affouillement en pied d’ouvrage notamment dans les méandres de rivière ou sur le littoral et contribue à stabiliser le rideau de palplanches.

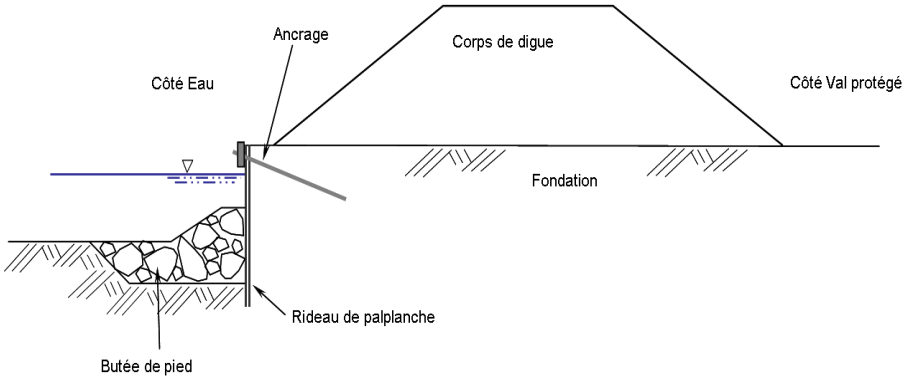


Figure 4 : Schéma de principe de la butée de pied en milieu fluvial (Source : Ifsttar)

Variantes :

La variante la plus classique au rideau de palplanches métalliques, classiquement utilisé en France, consiste à modifier le matériau voire le type de profilé par du bois, du béton (paroi berlinoise, parois bétons…), du PVC (principalement dans les pays nordiques et anglo-saxons), de la fibre de verre…

La conception du dispositif peut être déclinée selon plusieurs modalités :

- le rideau de palplanches assurant seul la protection contre l’affouillement (Figure 2) ;
- le rideau de palplanches avec une butée de pied de taille et de dimension variable (Figure 4 et *Figure 5*) ;
- le rideau de palplanches surmonté/recouvert d’un enrochement associé ou non à une butée de pied (Figure 6).

Figure 5 : Exemple de rideau de palplanches associé à une protection par butée en pied de digue. À gauche en phase chantier, à droite vue de détail en fin de chantier (Crédit photo : Cerema)

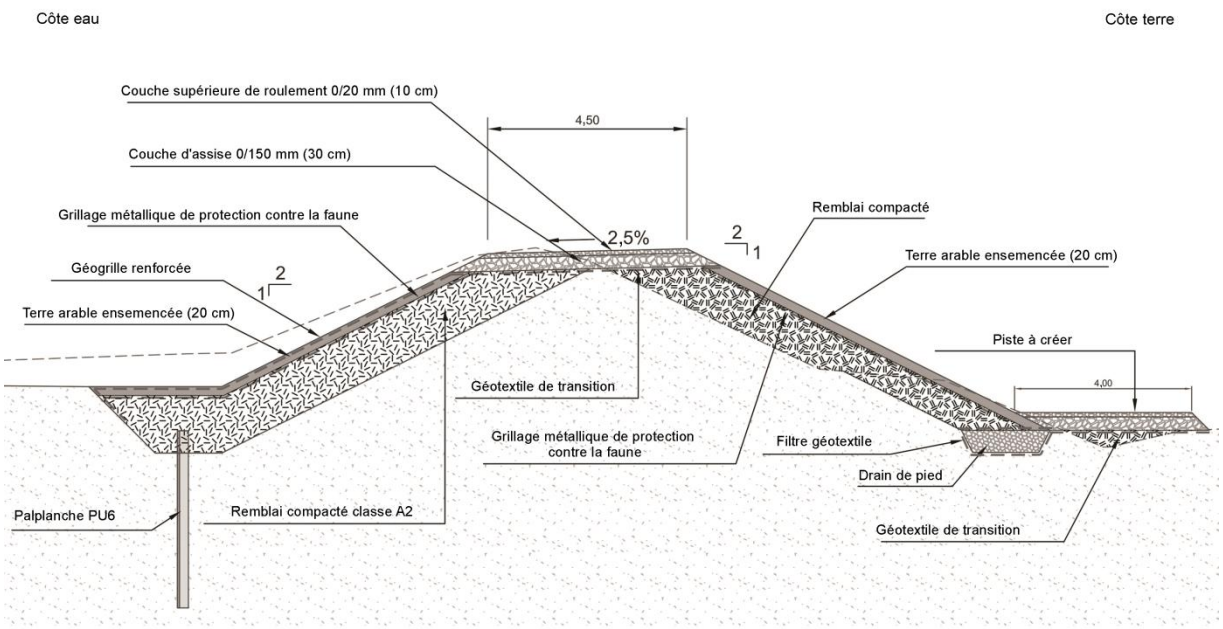


Figure 6 : Dispositif complexe composé de palplanches en pied de digue, recouvertes d'un enrochement et d'une butée de pied (Source : CIRIA, 2013)

Le liaisonnement en tête de dispositif peut faire l'objet d'une adaptation (accompagnement de type longrine en béton, jonction avec l'ouvrage en terre par remblai…).

Alternative :

L'alternative au rideau de palplanches métalliques consiste à créer une protection externe la plus résistante possible à l'affouillement, par exemple en enrochement massif (FT 7.1), en blocs béton (FT 7.7), en boîtes métallique remplie de cailloux (matelas Reno, gabion… - FT 7.4), en parement bétonné...

Dimensionnement :

Principe :

Le dimensionnement d'un rideau de palplanches de protection repose sur plusieurs aspects :

- une estimation de la profondeur affouillable ou prévisible d'affouillement en pied de digue afin de prédéfinir une profondeur d'encastrement (cf. fiche 7.10) ;
- la stabilité du rideau en temps qu'interface, soit corps de digue-eau, soit corps de digue-air (cf. fiche FT 5.4) associée à la stabilité générale de la digue ;
- la durabilité de la palplanche qui sera directement exposée aux attaques extérieures (cf. fiche FT G1).

Compte tenu du phasage des chantiers, les protections externes par palplanches jouent généralement un rôle de soutènement du talus de pied de digue en phase chantier, critère qui est dès lors prépondérant dans le dimensionnement. Les palplanches sont des composants standardisés adaptés à des conditions définies.

Paramètres nécessaires :

Pour ce qui est de l'aspect protection externe, le dimensionnement s'appuiera plus particulièrement sur les paramètres suivants :

- l'estimation de la profondeur potentiellement affouillable ;
- l'inventaire des sollicitations physiques extérieures (batillage, chocs de bateau, vitesse du courant…) ;
- l'agressivité chimique du milieu environnant (salinité, matière organique…) ;
- la prise en compte éventuelle du gel ;
- les structures de digue à l'amont et à l'aval de la zone traitée (notamment pour la prise en compte de l'impact du rideau de palplanches sur la vitesse des courants) ;
- les parties d'ouvrages complémentaires : butée de pied, couronnement du rideau, remblais d'accompagnement (Figure 7) ;
- l'accessibilité de l'ouvrage (pour le chantier et l'entretien/inspection ultérieure).

Figure 7 : Rideau de palplanches métalliques, sans couronnement, avec un remblai d'accompagnement en arrière du rideau en matériau granulaire (Source : Cerema)

Modèle(s) disponible(s) :

- détermination de la profondeur d'affouillement prévisible: par analyse morphologique du lit actuel, du contexte hydraulique et des évolutions prévues (voir la fiche FT 7.10 à ce sujet) ;
- calcul de la stabilité (phase chantier et en service) : Les éléments de sortie du dimensionnement sont définis selon l'annexe 3 du guide CFBR (2015) détaillés dans la fiche FT 5.4 ;
- conditions de durabilité : cf. fiche FT G1.

Éléments de conception spécifiques à ce type de fonction (détails autres que dimensionnement) :

Il convient d'intégrer les éléments suivants à la réflexion :

- la possibilité d'entretenir le dispositif : selon le cas, le choix se portera sur un ouvrage plus ou moins rustique ou par un accompagnement avec une piste en pied d'ouvrage ;
- la possibilité de réparer, remplacer ou entretenir plus spécifiquement le dispositif anticorrosion dans les environnements soumis à des eaux légèrement agressives ou à des alternances de périodes en eau et hors d'eau…

- le dispositif d'accompagnement aux extrémités du rideau (zone de transition de part et d'autre de l'ouvrage à la jonction avec le pied de digue en l'état) : le rideau de palplanches conduit souvent à une accélération des vitesses de courant le long du rideau, ce qui augmente le potentiel érosif dans les zones attenantes non protégées. Pour cette raison, il est recommandé de prévoir un aménagement de la zone de transition par des éléments en enrochement ou d'autres techniques de protection externe ;
- le dispositif d'accompagnement éventuel en pied de palplanches dans le lit mineur par butée de pied : en cas de site fortement affouillable, le rideau de palplanches peut être complété par une butée de pied, souvent en enrochement, dont le rôle consiste à ralentir le mécanisme d'érosion externe par affouillement ;
- le remblai d'accompagnement en arrière du rideau de palplanches : nature du matériau de remblai accepté, dispositions en matière de remblaiement (compactage, consignes à appliquer, contrôles).

Aspects pratiques (CCTP, chantier) :

Cahier des charges :

On se reportera plus spécifiquement à la lecture de la norme NF EN 12063 (1999) dont les principaux éléments sont détaillés dans la fiche FT G1.

Concernant l'aspect protection externe, il est retenu que :

- les caractéristiques du rideau de palplanches : type de palplanches, profilé, épaisseur, longueurs, protection de surface, les systèmes de protection et de préservation, ainsi que la nécessité, si besoin, d'un blocage des serrures, pour garantir la transmission des efforts de cisaillement longitudinaux ou pour garantir l'étanchéité ;
- les caractéristiques de résistance nécessaires en ce qui concerne le trafic fluvial et/ou maritime ;
- une partie de la palplanche, peut rester hors sol et faire l'objet d'un remblaiement en arrière pour recréer un pied de digue traficable (c'est-à-dire un pied de digue permettant l'accessibilité par le gestionnaire d'ouvrage pour des opérations d'entretien de l'ouvrage). Généralement la hauteur hors sol est limitée à une quinzaine de mètres compte tenu des contraintes en termes de stabilité du rideau (stabilité acquise par la mobilisation de la butée de pied) ;
- mise en place de joints d'étanchéité à l'interface entre deux palplanches afin d'assurer l'étanchéité du rideau si cette fonction étanchéité est recherchée.

Matériaux et matériels nécessaires :

Se référer à la fiche générique FT G1.

Nuisance/ environnement :

Se référer à la fiche générique FT G1.

Passage des réseaux enterrés :

Se référer à la fiche générique FT G1.

Remise en état du site :

Se référer à la fiche générique FT G1.

Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance) :

Se référer à la fiche générique FT G1.

Vitesse d'avancement :

Entre 10 et 25 mètres linéaires par jour, dépendant de la profondeur de pose, de la nature des terrains et du type de mise en œuvre (le plus efficace étant le vibrofonçage).

Traitement de points singuliers (extrémités, ouvrages inclus notamment) :

- traitement de l'interface rideau-digue (figure 8) : aménagement d'une zone de transition entre le début du rideau de palplanches et le pied de digue : cette zone peut faire l'objet d'un aménagement par un dispositif de protection externe de type enrochement ;

Figure 8 : Exemples d'érosion externe dans la zone de transition entre le rideau de palplanches et le pied de digue (à gauche) ou de berge de canal (à droite) (Crédit photos : Cerema)

- conception de la butée de pied : souvent réalisée en enrochement , il convient de rajouter les spécifications concernant le dimensionnement de cette butée, en incluant les profils en travers et en long de la butée (dimensions globales et volume), la nature et les spécifications physiques des enrochements (NF EN 13 383-1), ainsi que les modes d'exécution (creusement et évacuation des terres ou de la vase) et de réception (par pige depuis un bateau…). Cette partie d'ouvrage est souvent réalisée sous eau ce qui peut poser des problèmes d'exécution des profils et de contrôle du volume : les tolérances doivent être précisées dans le CCTP ainsi que les modalités de contrôle. La pose d'un géotextile filtre peut être demandée. Les conditions de pose doivent alors être précisées (cf. fiche FT 7.1).

Références
Voir fiche FT G1.

	Fiche Technique **Protection externe du talus par technique d'enherbement** External protection of embankment by weeding technique	**Fiche FT 7.12**

Auteurs principaux : W. BRASIER (CNR) ; B. CHALUS (CNR)
Contributeurs : C. MOIROUD ; M. SUTTER (INRAE) ; D. POULAIN (INRAE) ; P. LEDOUX (Cerema)
Relecteurs : F. PEGUIN (EGIS) ; M. SUTTER (INRAE)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais :
The slope protection solution by grassing meets a dual purpose of protection and ecological restoration of the bank. However, it is applicable only under certain conditions. It interest also lies in the landscaping of the bank when compared to a purely mineral technique.

Études de cas correspondantes :
Restauration hydraulique et environnementale du Charbonnières (69),
Réfection en technique mixte des parements de berge de Donzère Mondragon (26)

Indications :

Définition :

Traditionnellement, les digues présentent une protection externe dimensionnée pour résister aux contraintes, principalement hydrauliques, qui est en général issue de techniques de génie civil (enrochements, béton, bitume…). Suivant le niveau de sollicitation et les cas de figure, il est envisageable de substituer ou de compléter, ce type de protection par la mise en œuvre de techniques végétales, telles que l'enherbement.

Sujet de la fiche :

La fiche s'intéresse aux techniques mises en œuvre afin d'aboutir à un enherbement adapté dans un objectif de protection externe des talus d'un ouvrage hydraulique.

Fonction principale :

Lutte contre l'érosion externe provoquée par le ravinement des eaux de pluie (sur les 2 parements) ou par le courant le long de l'ouvrage coté eau.

Fonction(s) secondaire(s) :

Ce parement permet d'assurer d'autres fonctions grâce à sa conception :

- Intégration paysagère ;
- Diversification et valorisation écologique (entomofaune notamment).

Description :

Performance à atteindre :

L'érosion externe est due aux contraintes hydrauliques suivantes :

- Vitesses d'écoulement en crue ;
- Clapot en crue ;
- Ravinement lors de fortes précipitations.

Les zones érodées sont principalement les talus coté eau, progressivement érodés par l'arrachage du sol du fait notamment de la mise en vitesse des écoulements.
La protection externe des parements doit donc former un ensemble présentant une capacité de résistance aux forces tractrices, par un choix adéquat d'espèces végétales.

Généralement, ce type de protection nécessite aussi des performances en termes de rétention des matériaux fins (terre végétale), permis notamment sur le court terme par l'utilisation d'un géotextile biodégradable.

Utilisation :

Pour des ouvrages neufs, des confortements d'ouvrage, ou des ouvrages dont les talus sont à nu, on cherche parfois spécifiquement à mettre en place une végétation à même de protéger le talus : un enherbement avec des espèces soigneusement choisies.

Cette végétation n'est pas adaptée à toutes les situations, car les forts courants et les chocs la dégradent très rapidement. C'est pourquoi ces techniques sont principalement utilisées en milieu fluvial dans des zones « calmes », et subissant de lentes montées et descentes de crue.

Suivants les contraintes, différentes techniques peuvent être éprouvées :

Tableau 1 : Les critères physiques relatifs à chaque technique (source CNR).

Techniques	CONTRAINTES														
	Foncier		Substrat			Pente de berge		Batillage	Vitesses maximales			Embâcles	Marnage		
	Largeur		Blocs	Galets, graviers, sable..	Argiles, marnes, limon.	Faible	Forte								
	< 5 m	5 m>				10/1 à 3/1	2.5/1 à 1,7/1		< 0.5m/s	0.5<v< 2m/s	2<v<3m/s		Aucun	<1m	> 1 m
Techniques végétales															
Ensemencements hélophytiques	O	O	N	O	O	O	O	O	O	N	N	N	O	O	O
Ensemencements terrestres	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	N	O	O	O

O ou N Possibilités de réalisation (oui, non).

O Réalisation possible uniquement avec protection.

Variantes :

Il existe de nombreuses espèces végétales à même de permettre cette protection ; il est nécessaire de bien les sélectionner pour obtenir une protection durable en toute saison. Une étude au cas par cas est à mettre en place en fonction des conditions locales (exposition au soleil, sols, etc..).

Par ailleurs on notera que la conception de ce parement est fonction de sa position sur l'ouvrage. On peut retenir, d'une manière générale, les principes suivants :

- La lutte contre l'érosion du haut de talus de digue ou des parements coté zone protégée, dans le cas où ils sont rarement sous eau, et sur le cours terme (temps de développement de l'enherbement) est réalisée avec des géotextiles de type « jute » et/ou biodégradable (voir fiche FT 7.4) adapté à des milieux plus terrestres ;
- La partie intermédiaire du talus plus exposée à l'érosion de surface mais aussi à l'érosion liée aux vitesses de l'eau en crue nécessite des techniques de protections de surfaces plus robustes. L'utilisation d'un géotextile coco biodégradable est préconisée. Il est parfois rendu plus robuste par une fixation renforcée de fils de fer entrecroisés qui plaque le géotextile au sol par le biais de pieux bois notamment dans les concavités dans le profil en long de la digue (intrados) ;
- La partie basse du talus est la plus sollicitée par les différentes contraintes en rivière : marnage, batillage, vitesses du courant. Elle sera préférentiellement traitée par des techniques mixtes, associant une protection minérale et en génie végétal (voir fiche technique FT 7.13).

Alternatives :

Il n'existe pas de technique aussi « légère », qu'un parement enherbé, cependant, toute technique de protection externe plus « lourde » pourra la remplacer de manière pertinente quand il n'y a pas d'enjeux particulier de biodiversité ni de contrainte de coûts.

Dimensionnement :

Principe :

Le dimensionnement des talus enherbés repose sur deux principales considérations :

- le choix des espèces végétales (dont on ne discutera pas spécialement dans cette fiche dans la mesure où c'est très variable suivant les sollicitations, le climat,…) ; des études au cas par cas sont nécessaires ;
- la stabilité du confortement, notamment avant la pousse.

Paramètres nécessaires :

Avant d'avoir recours à des techniques d'enherbement sur des ouvrages de protection, le contexte, les enjeux et les différentes contraintes hydrauliques doivent faire l'objet d'une analyse approfondie.

Cela passe notamment par une connaissance approfondie des données suivantes :

- Topographiques (pentes, banquettes existantes, …) ;
- Nature de matériaux constituant la berge ;
- Dégradations observables à mettre en relation avec l'état « naturel » de la digue ;
- Conditions hydrauliques (débits, niveaux, marnage, hydrologie, clapot…) ;
- Etat, type, densité de la végétation de la berge (du pied à la crête) ;
- Usages et contexte du site ;
- Modalités et coûts d'entretien des surfaces.

Éléments de conception :

- Période d'intervention : en lien notamment avec la période optimale de la pousse de la végétation sélectionnée, afin de laisser le talus « nu » le moins de temps possible ;
- Disponibilité des ressources locales des espèces végétales (disponibilité, qualité, éloignement) ;
- Accessibilité au site lors de la mise en œuvre ;
- Conditions d'entretien et/ou de maintenance.

Modèles disponibles :

Le choix des espèces végétales repose sur des critères tels que :

- Leurs caractéristiques biomécaniques propres : il faut qu'elles puissent assurer un bon enracinement et qu'elles possèdent une certaine tolérance aux opérations d'entretien (fauche…) ;
- Le lieu de provenance des essences : il est nécessaire d'utiliser uniquement les végétaux produits ou récoltés à proximité du site des travaux. Les espèces en provenance d'autres pays sont à proscrire ou tout du moins à étudier précisément au cas par cas ;
- Afin d'avoir un mélange le plus diversifié possible, les graines peuvent être directement prélevées dans le milieu naturel en suivant le protocole d'une marque type « Végétal Local » ou provenir des pépiniéristes réalisant une production à partir de souches locales.

Aspects pratiques (CCTP, chantier,…)

Cahier des charges :

Rien de particulier (on se référera au contenu classique d'un CCTP présenté en introduction) hormis :

- les performances à atteindre par la protection ;
- des limitations sur les espèces utilisables ;
- clauses de garantie : 95% de recouvrement de sol sur une période de 2 ans.

Chantier :

Le déroulé classique d'un chantier est le suivant :

- reprofilage du corps de digue (si besoin) ;
- pose d'un géotextile accroche-terre, (option suivant les conditions hydrauliques locales et les pentes de talus) ;
- nappage de 20 cm minimum de terre végétale si non présente ;
- pose d'un géotextile biodégradable (jute, coco…) si besoin renforcement à court terme avant implantation de l'herbe ;
- mise en œuvre de semis herbacé par hydroseeding sur les grandes surfaces complété par du semis manuel sur les zones moins accessibles. Il convient d'effectuer une préparation de sols soignée (griffage fin et superficiel réalisé manuellement et/ou mécaniquement pour éviter que les graines descendent sur la partie inférieure de l'ouvrage de protection, enlèvement des déchets, racines, pierres…) avant la mise en œuvre des ensemencements.
- Entretien et suivi à prévoir : fauchage de densification du semis, arrosage en période caniculaire si nécessaire.

Matériaux et matériels nécessaires :

- Mélange grainier contenant des espèces à fort pouvoir racinaire : des espèces du genre fétuques notamment ayant une très bonne résistance aux forces d'arrachement. Les espèces devront être choisies en fonction des conditions biogéoclimatiques du site.

  Le retour d'expérience montre que ce mélange doit présenter une diversité spécifique assez élevée (10 – 15 espèces). Il doit par ailleurs, pour l'aspect biodiversité, présenter une répartition d'environ
  - 85 % de graminées
  - 5-10% de légumineuses
  - 5 % d'autres plantes (dites « à fleur ») : espèces mellifères…
- Afin de servir de support à la végétation on utilisera de la Terre végétale ou des alluvions limoneux sur 20 cm ayant la composition suivante (composition « idéale » à ajuster aux conditions locales) :
  - Eléments grossiers : type graviers (2 mm à 2 cm) : moins de 30 % en poids de matière sèche ;
  - Eléments fins :

    sables grossiers (0,2 à 2 mm) :30 à 35 % ;

    sables fins (0,02 à 0,2 mm) :10 à 15 % ;

    limons (0,002 à 0,02 mm) : 30 à 35 % ;

    argile (- de 0,002 mm) : 4 à 6 % ;

- Matières organiques : 2 à 3 % (alluvions limoneux de la rivière) ou 3 à 15% (terre végétale) ;

- Si une stabilisation sur le cours ou long terme est nécessaire, les produits suivant peuvent par ailleurs être utilisés :
  - Géotextile en toile de jute (classiquement 732 g/m²) sur les talus type terrestre (haut de parements ou parements extérieurs à l'écoulement) ;
  - Géotextile en toile de coco (classiquement 740 g/m² ou 900 g/m²) sur les talus type berge de cours d'eau ;
  - Géogrille tridimensionnelle.

Nuisance/ environnement :

Les points de vigilance en termes d'environnement portent sur : le bruit, la poussière liée à la circulation de chantier, la pollution accidentelle, gestion des déchets de chantier, protection faune / flore.

En outre, des périodes d'intervention sont généralement réduites pour prendre en compte les périodes de reproduction de la faune ainsi que les périodes optimales de pousse de la flore. Par exemple pour les espèces herbacée les créneaux s'étendent généralement de septembre / octobre à mars / avril.

Contrôles d'exécution (y compris essais de convenance) :

Il est nécessaire de s'assurer de la conformité du matériel végétal. Il s'agit de valider les éléments suivants :

- La qualité des géotextiles à employer si nécessaire ;
- La provenance des graines. Il est préférable d'accepter uniquement les végétaux produits ou récoltés à proximité du site (souches locales) ;
- Le respect des normes associées aux semis.

Agrément des produits (au-delà des recommandations générales rappelées en chapitre introductif) :

- Validation sur planche d'essai (mélanges testés en pépinière) ;
- Contrôle d'approvisionnement.

Outre le contrôle d'exécution dans sa définition classique une telle protection demande une surveillance et un entretien régulier afin d'être efficace.

Traitement des points singuliers :

A proximité avec un réseau, un ouvrage… on privilégiera une mise en œuvre manuelle.

Par ailleurs la proximité avec ces points singuliers peuvent modifier le comportement des espèces mises en œuvre et demandera une attention particulière : croissance défavorisée ou favorisée dû à un ombrage, un stockage d'eau….

Références :

- LEBLOIS, Solange ; EVETTE, André ; RECKING, Alain ; FAVIER, Gilles, Amélioration des méthodes de dimensionnement des ouvrages de génie végétal en berges de cours d'eau par une approche empirique, *Revue Science Eaux & Territoires*, article hors-série, 7 p.,

13/06/2016
- http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD1011/bei/beiere/groupe2/node/78
- P-A Frossard; A.Evette (2009). Le génie végétal pour la lutte contre l'érosion en rivière : une tradition millénaire en constante Evolution, Ingénierie n°spécial.

Annexes :

Exemple de protection du talus de digue par géotextile biodégradable en toile de jute et enherbement sur une digue mixte gabion-terre.

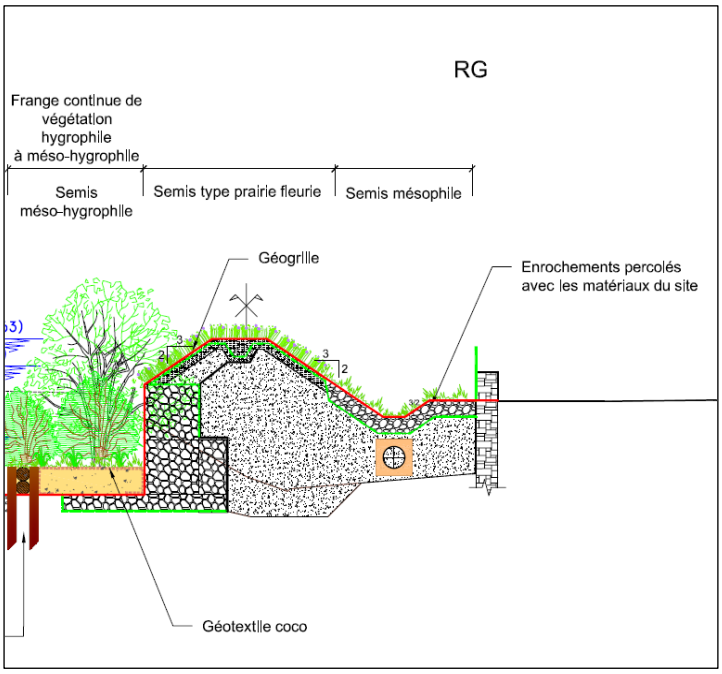


Figure 1 : Exemple de protection de talus (Source : CNR – Charbonnières)

Figure 2 : Protection de talus avec de la toile en filet jute de 732g/m2 – immédiatement après pose (Crédit Photo : CNR – Charbonnières)

Figure 3 : Protection de talus avec de la toile en filet jute de 732 g/m2 – au printemps après démarrage du semis (Crédit Photo : CNR – Charbonnières)

Figure 4 : Protection de talus de diguette par géotextile coco 900 g/m² – immédiatement après pose (Crédit Photo : CNR – Charbonnières)

Figure 5 : Géotextile coco 900 g/m² sur une partie de digue exposée au cours d'eau - laisse de crue encore visible (Crédit Photo : CNR – Charbonnières)

Figure 6: Digue gabion-terre de Charbonnières – géogrille + géotextile en toile de jute 732 g/m² + semis + plantes lianescantes - vue de profil (Crédit Photo : CNR – Charbonnières)

Figure 7 : Digue gabion-terre de Charbonnières – géogrille + géotextile en toile de jute 732 g/m²+ semis - vue de dessus (Crédit Photo : CNR – Charbonnières)

	Fiche Technique **Protection externe de talus par association Génie Civil – Génie Écologique** Upstream slope protection by Civil and Ecologic Engineering	**Fiche FT 7.13**

Auteurs principaux : B. CHALUS (CNR) ; C. MOIROUD (CNR)
Contributeurs : M. SUTTER (INRAE) ; D. POULAIN (INRAE) ; R. TOURMENT(INRAE) ; P. LEDOUX (CEREMA)
Relecteurs : J.-M. FLOHR (EGIS) ; S. PATOUILLARD (DREAL Centre-Val de Loire)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract / Résumé en anglais :
Upstream slope protection solutions by mixed media can be implemented preferentially on dikes in charge. In fact, to allow proper development of plants, they need a regular water level. These techniques have a dual purpose of protection and ecological restoration of the bank.

Étude(s) de cas correspondante(s) :
C5.1 Digues du Rhône : Technique mixte en enrochements/gabions + génie végétal Rhône – Beaucaire et Vallabrègues

Introduction

Définition :

En matière de protection de digues, les techniques d'aménagement dites « mixtes » consistent à associer des solutions classiques en génie civil (parement minéral ou enherbés) aux techniques issues du génie écologique.

Sujet de la fiche :

Cette fiche présente les éléments relatifs au génie écologique et leur intégration dans la protection mixte. Il existe potentiellement de nombreuses variantes à une telle technique de confortement ; aussi la fiche se limitera à présenter celles les plus couramment mises en place.

Fonction principale :

Lutte contre l'érosion externe : la fonction principale recherchée par l'utilisation de cette technique est de constituer un parement en talus, coté eau généralement, capable de résister à l'érosion externe.

Fonction(s) secondaire(s) :

Ce type de confortement ne présente pas systématiquement de fonction secondaire relative au fonctionnement de l'ouvrage ; toutefois certaines techniques peuvent avoir des fonctions de soutènement ou de drainage (absorption et évaporation par la végétation).
Par ailleurs, ces techniques ont des fonctions d'intégration dans leur environnement :

- intégration paysagère ;
- diversification et valorisation écologique.

Description

Performances recherchées :

En termes de protection contre l'érosion externe, la protection par technique mixte cherchera en priorité à protéger l'ouvrage des contraintes hydrauliques suivantes :

- vitesses d'écoulement tangentielles ;
- marnage.

Ces contraintes se traduisent par des forces de cisaillement ou des forces de traction sur le parement de la digue.

La protection externe réalisée sur le talus amont doit ainsi pouvoir résister à ces différentes forces qui peuvent s'exercer sur l'ouvrage.

La protection mixte étant en grande partie constituée de végétaux, il est par ailleurs nécessaire de pouvoir contrôler la prolifération de ceux-ci afin d'éviter qu'ils ne produisent des désordres sur le corps de l'ouvrage.

Utilisation :

Les techniques mixtes sont utilisées préférentiellement sur les digues fluviales en charge.
Suivant les conditions existantes et les objectifs fixés, on distingue deux situations dans lesquelles des techniques mixtes peuvent être utilisées :

- Dans le cadre d'**ouvrages de restauration** : ce sont des ouvrages étroits et

longitudinaux, ils peuvent nécessiter un modelage du parement amont de la digue (alternance de valeurs de pentes, de manière à créer une « banquette » ou un « festonnage » comme sur les Figures 1 et 2). Ils regroupent principalement des formations végétales linéaires composées *d'hélophytes* ou éventuellement d'arbustes.

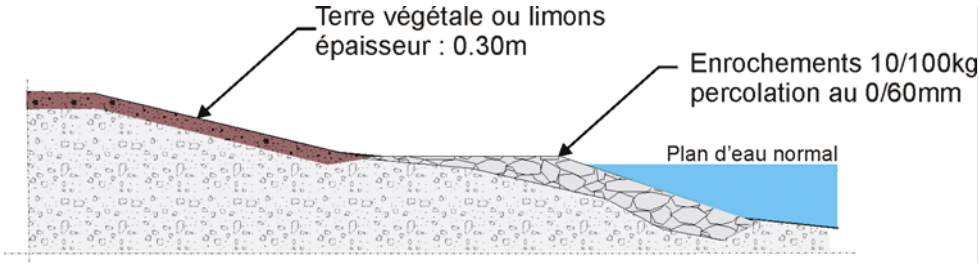


Figure 1 : Profil standard de type « banquette » – schéma de principe (Source : CNR)

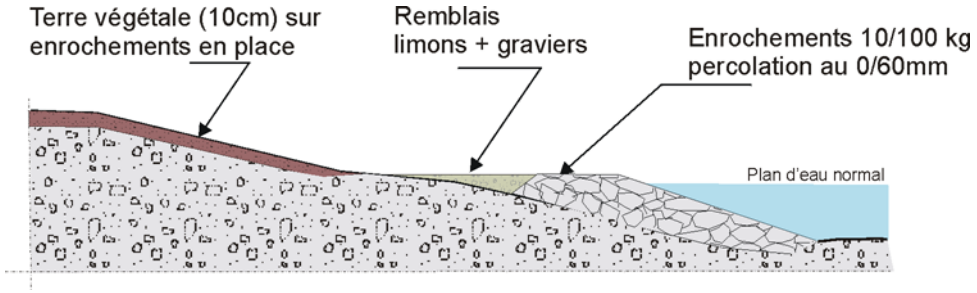


Figure 2 : Profil « Festonnage » – schéma de principe (source : CNR)

- Dans le cadre d'**ouvrages de valorisation :** ce sont des ouvrages relativement larges (> 5 m) et étendus (> 500 m²), ils peuvent être déconnectés de l'écoulement principal. Il s'agit d'unités écologiques de type « *frayère* » ou « *roselière* » (Figures 3 et 4). La hauteur d'eau de la *frayère* lui confère un rôle de reproduction piscicole, alors que celui de la *roselière*, moins profonde, permet d'abriter des batraciens, des reptiles et des oiseaux.

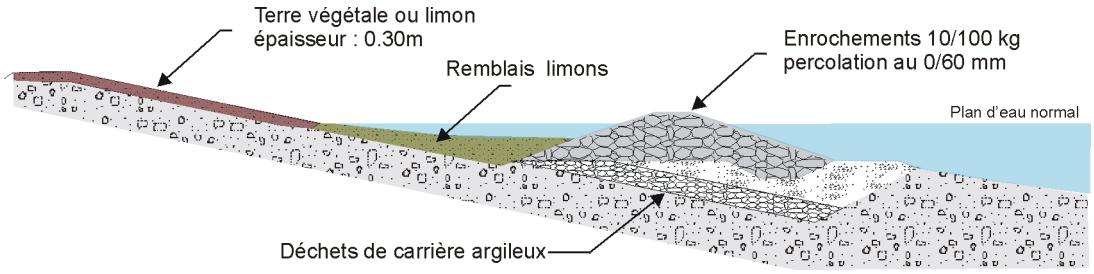


Figure 3 : Profil « Frayères » – schéma de principe (Source : CNR)

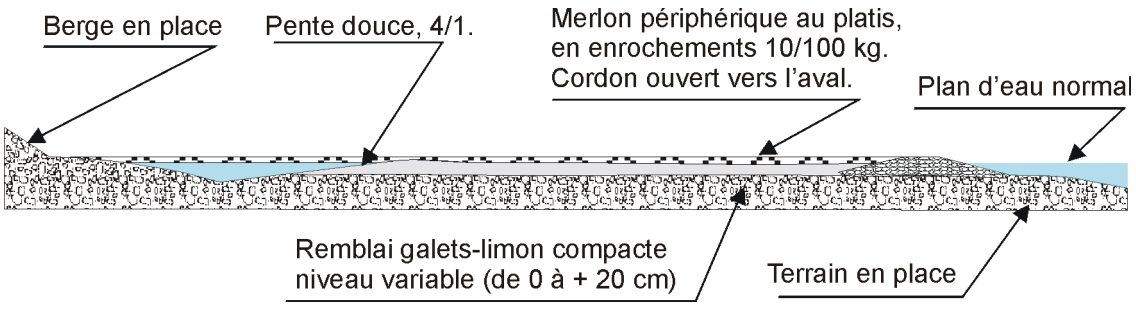


Figure 4 : Profil « Platis / Roselière » – schéma de principe (Source : CNR)

Variantes :

Concernant l'aspect génie écologique, différentes techniques peuvent être éprouvées, comme illustré sur le Tableau 1 suivant :

Tableau 1 : comparaison de l'efficacité des différentes techniques de parements en fonction des contraintes du site (Source : CNR)

		contraintes								
Types d'ouvrages écologiques (cf. fig. 6)		foncier		sécurité	substrat			pente de berge	
		largeur							
		< 5 m	> 5 m		blocs	galets, graviers, sables	argiles, marnes, limons	faible 10/1 à 3/1	forte 2.5/1 à 1.7/1
valorisation	frayères	N	O	conformité obligatoire	N	O	O	O	N
valorisation	roselières	N	O		N	O	O	O	N
restauration	hélophytes diversifiées	O	O		N	O	O	O	N
restauration	ripisylve arbustive	N	O		O	O	O	O	O

O ou N	Possibilité de réalisation (oui, non)
O	Réalisation possible uniquement avec protection
O(1)	Selon le marnage
O(2)	Selon vitesse

		contraintes							
Types d'ouvrages écologiques (cf. fig. 6)		batillage	vitesses maximales (m/s)			embâcles	marnage		
			v < 0.5	0.5 < v < 2	v > 2		Aucun	< 1 m	> 1 m
valorisation	frayères	O	O	O	N	O	O	O	O
valorisation	roselières	O	O	N et O(1)	N	O	O	O	O
restauration	hélophytes diversifiées	O	O	N et O(1)	N	O	O	O(2)	O(2)
restauration	ripisylve arbustive	O	O	O	O	O	O	O	O

Suivant les habitats et les écosystèmes environnants, la technique peut présenter de nombreuses variantes en termes de conception aussi bien que d'espèce végétales mises en œuvre.

Pour la conception globale de la technique mixte, il est possible d'imaginer différentes associations entre génie écologique et génie civil. Notons les plus courantes :

- enrochement et végétation arbustive ;
- enrochement et végétation herbacée (hélophytique) ;
- gabion en pied de talus et végétation herbacée (hélophytique) ;
- géotextile et végétation (cf. fiche FT 7.12).

Les ouvrages peuvent prendre différentes formes (cf. annexes):

- bouturage ;
- lit de plants et plançons ;
- plantation de mottes de plantes hélophytes
- couche de branches à rejet ;

- fascine (saules, hélophytes) souvent associé à une protection en enrochement. Les fascines sont rarement suffisantes pour assurer la stabilité de pied du pied de talus;
- peigne ;
- clayonnage.

Notons que pour les digues situées loin du lit mineur, il est généralement plus pertinent de se contenter d'un enherbement du talus avec des espèces végétales adaptées (cf fiche FT 7.12).

Alternatives

Les alternatives à de tels confortements se divisent en deux catégories :

- les techniques de génie civil (dans le cas où les aspects protection sont privilégiés): cf l'ensemble des techniques étudiées par le SG5 ;
- les techniques purement végétales : sur les mêmes principes que les confortements mixtes ; mais en utilisant uniquement la technique végétale, qu'il est envisageable de mettre en œuvre préférentiellement en partie haute de parement, moins sollicitée que le pied.

Dimensionnement

Principe :

Pour les dispositifs mixtes comprenant des enrochements ou des gabions/matelas, le matériau et les dispositifs constructifs répondent à des spécifications précises en blocométrie, en agencement et en masse volumique répondant aux contraintes auxquelles l'ouvrage est soumis.

Paramètres nécessaires

Les données nécessaires à la conception de l'ouvrage sont très diversifiées ; celles qu'il faudra particulièrement prendre en compte dans le dimensionnement d'une protection mixte sont :

- la topographie existante et celle recherchée (pentes, banquettes existantes…) ;
- la bathymétrie (profil sous fluvial de la berge) ;
- nature de matériaux constituant la berge (pédologie) ;
- stabilité de la berge (tenue des terres en surface) ;
- dégradations observables ;
- conditions hydrauliques (débits, niveaux, marnage, hydrologie, clapot…) ;
- hydromorphologiques (sédimentation…) ;
- hydrogéologiques (nappe…) ;
- etat, type, densité de la végétation de la berge (du pied à la crête) ;
- usages et contexte du site ;
- disponibilité des emprises, accessibilité à la berge ;
- modalités d'entretien.

Éléments de conception (détails autres que dimensionnement) :

En particulier :

- période d'intervention (adéquation avec techniques végétales) ;
- ressource locale en agrégats et espèces végétales (adéquation, disponibilité, qualité, éloignement) ;
- accessibilité au site lors de la mise en œuvre (vis-à-vis du marnage) conditions d'entretien et/ou de maintenance.

Modèle(s) disponible(s)

- calcul de stabilité mécanique (notamment à la décrue) ;
- calcul de stabilité de blocs (dans le cas d'une protection avec blocs) – voir fiche FT 7.1
- calcul éventuel de l'écoulement interne suivant fonctionnement de l'ouvrage
- modèle hydraulique du cours d'eau pour prise en compte de l'impact de la végétation sur les écoulements en crue : adaptation du coefficient de strickler en fonction de la densité (choix généralement empirique) ;
- calcul des forces tractrices s'exerçant sur le parement amont (dimensionnement des ouvrages en techniques végétales) ;
- choix de l'espèce végétale (tableau 2).

Tableau 2 : Résistance mécanique à la traction pour différentes espèces végétales (Source : http://www.set-revue.fr/amelioration-des-methodes-de-dimensionnement-des-ouvrages-de-genie-vegetal-en-berges-de-cours-deau)

Technique		Résistance mécanique τ en N/m²		
		À la réalisation	1 à 2 ans après	3 ou 4 ans après
Enherbement		4 (3)-20 (3)	25-30 (3)	30 (3)-100 (2)
Boutures		10 (3)	60 (3)-150 (1)	60 (3)-165 (1)
Boudin d'hélophytes		10 (3)-30 (2)	20-30 (3)	50 (3)-60 (1)
Clayonnages		10 (2,3)	10-15 (3)	10 (3)-120 (1)
Fascines		20 (3)-60 (2)	50 (3)-60 (3)	80 (2)-250 (4)
Saules			50-70 (4)	100-140 (4) 800 (20 ans) (4)
Plantation d'arbre		20 (2)		120 (2)
Lit de plants et plançons		20 (2,3)	120 (3)	140 (2,3)
Couche de branches à rejet		50 (2,3)-150 (3)	150 (3)–300 (3)	300 (2,3)-450 (3)
Caissons végétalisés		500 (3)	600 (3)	600 (3)
Enrochements	Végétalisés	100 (3)-200 (2)	100 (3)-300 (3)	300 (2)-350 (3)
	Nus	250 (2)	250 (2)	250 (2)

(1) Faber, 2004 ; (2) Schiechtl et Stern, 1996 ; (3) Venti *et al.*, 2003 ; (4) Lachat, 1994.

Notons que le choix des espèces repose également sur des critères plus pragmatiques tels que

- le lieu de provenance : il est préférable d'accepter uniquement les végétaux produits ou récoltés à proximité du site (dans la même aire biogéographique). On prend généralement comme référence le label « végétal local ». Les espèces en provenance d'autres pays sont à proscrire ou au minimum à étudier précisément au cas par cas ;
- le matériel végétal peut être directement prélevé dans le milieu naturel (en prenant soin de valider les zones de cueillettes) ou provenir des pépiniéristes réalisant une production à partir de souches sauvages et locales (végétaux labélisés).

Aspects pratiques (CCTP, chantier,…)

Cahier des charges :

- géotextile synthétique et biodégradable, si nécessaire : détailler la fonction de ce géotextile : filtre, drain, stabilité le temps de la reprise des végétaux…
- enrochements, si besoin : détailler les caractéristiques techniques (blocométrie, nature

de la roche, porosité, masse volumique, résistance à l'usure…), les conditions d'approvisionnement et de mise en œuvre ;

- végétaux : détailler les espèces, les contraintes de site, les contraintes de mise en œuvre… (par exemple : diamètre de plants x cm, pas de plants à racines nues, saison….) ;
- caractéristiques de la terre végétale (granulométrie, ph, composition minérale…) :

*Éléments grossiers type graviers (2 mm à 2 cm) : moins de 30 % en poids de matière sèche,

* Eléments fins :

-sables grossiers (0,2 à 2 mm) :	30 à 35 %
-sables fins (0,02 à 0,2 mm) :	10 à 15 %
-limons (0,002 à 0,02 mm) :	30 à 35 %
-argile (- de 0,002 mm) :	4 à 6 %

*Matières organiques : 2 à 3 %

Il faut également détailler les transitions entre les composants de la protection mixte (espèce végétal, matériau support, corps de digue initial, corps de digue attenant…).

Chantier (cas des solutions avec enrochements):

- réalisation des accès pour engins de terrassement et approvisionnement ;
- travaux préparatoires pour déviation des écoulements derrière batardeau ;
- enlèvement du perré ou éléments de l'ancien talus à reconstituer ;
- purge des matériaux de remblai décomprimé ;
- pose de géotextiles si nécessaire (voir fiche FT 7.1) ;
- reconstitution et réglage des talus ;
- mise en place couche support ;
- mise en œuvre d'enrochements et percolation des enrochements (limons/graviers) ou autre technique de génie civil ;
- mise en place des matériaux sur les enrochements suivant rapport 60% graviers/40% limons ;
- bourrage hydraulique à la pompe, voire barre à mine ;
- mise en œuvre des végétaux (herbacées, arbustes, hélophytes…) ;
- 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.

Matériels :

- engins classiques de terrassements pour mise en œuvre de protections minérales et réglage de talus ;
- pompe et barre à mine (percolation).

Nuisance/ environnement :

Les points de vigilance en termes d'environnement portent sur : le bruit, la poussière liée à la circulation de chantier, la pollution accidentelle, gestion des déchets de chantier, protection de la faune / flore.
En outre, des périodes d'intervention sont généralement réduites pour prendre en compte les périodes de reproduction de la faune.

Contrôles d'exécution :

Agrément des matériaux et végétaux

Validation du PAQ et des procédures liées à la mise en œuvre

Validation sur planche d'essai

Contrôle d'approvisionnement

Contrôle des fournitures sur la base des spécifications demandées au marché

Contrôle de la réalisation

Contrôle d'exécution de la mise en œuvre :

- polarité de branches ;
- fixation géotextile ;
- compactage des branches ;
- distribution des espèces ;
- densité ;
- granulométrie / blocométrie ;
- contrôle végétaux par essai d'arrachage manuel.

Pour les végétaux notons particulièrement :

- les spécifications techniques : la dimension des boutures ou des branches, leur état sanitaire sont à vérifier avec attention ;
- les conditions de préparation : délais entre le prélèvement, la livraison et les conditions de stockage sur le chantier (mise en *jauge*),

Traitement des points singuliers :

Suivi après travaux

- clauses de garantie de reprise des végétaux sur 2 voire 3 années de végétation
- entretien et suivi à prévoir sur 2 voire 3 ans ;
- en cas de solution avec enherbement, la période de mise en œuvre doit respecter les conditions de pousse. privilégier l'hydroseeding (compresseur, citerne à eau et nacelle pour les ouvriers).

Références

- **http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD1011/bei/beiere/groupe2/node/78**
- P-A Frossard; A.Evette (2009). Le génie végétal pour la lutte contre l'érosion en rivière : une tradition millénaire en constante Evolution, Ingénierie n°spécial.

Annexes :

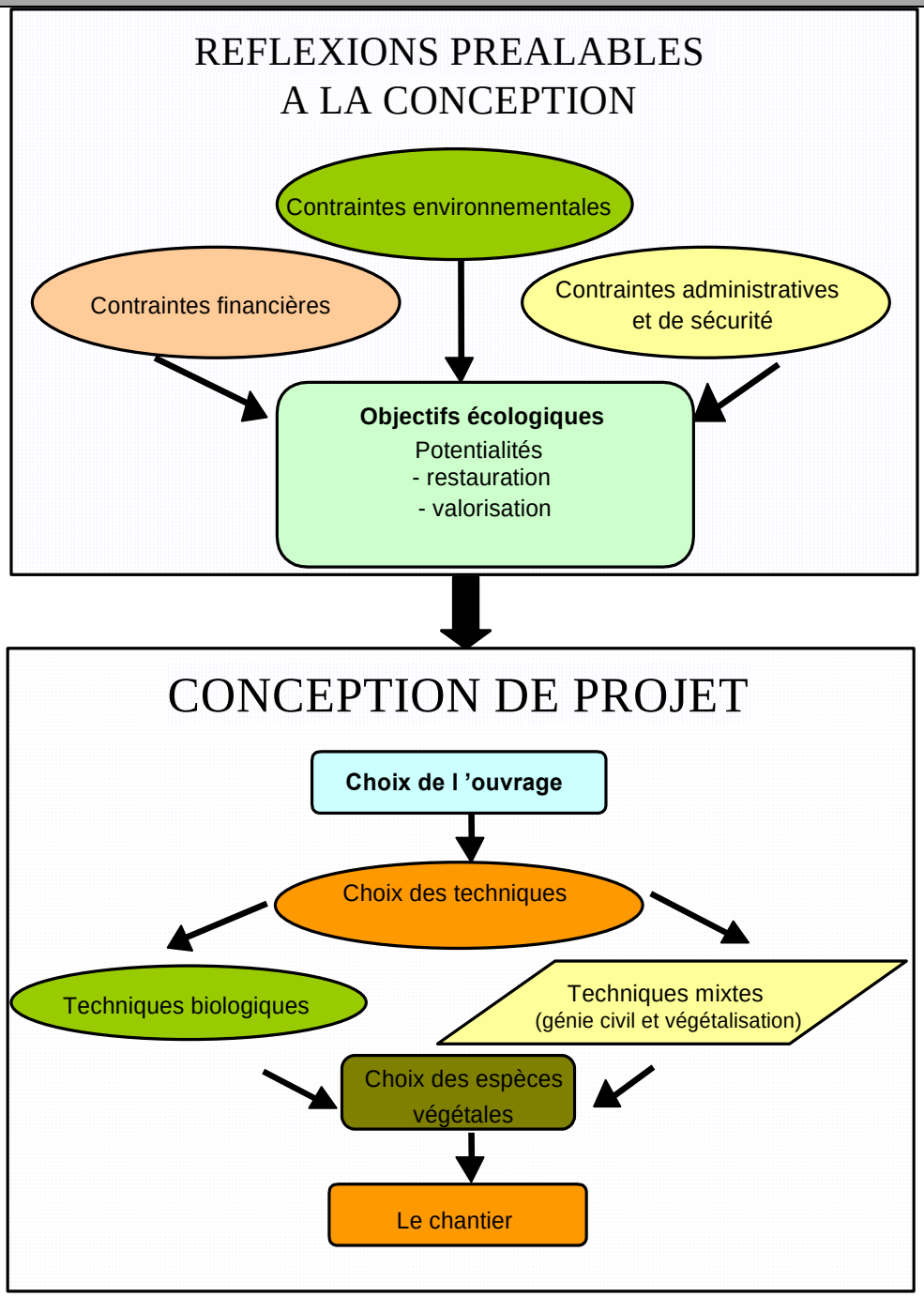


Figure 5 : processus de réflexion et d'aide à la décision (Source : CNR)

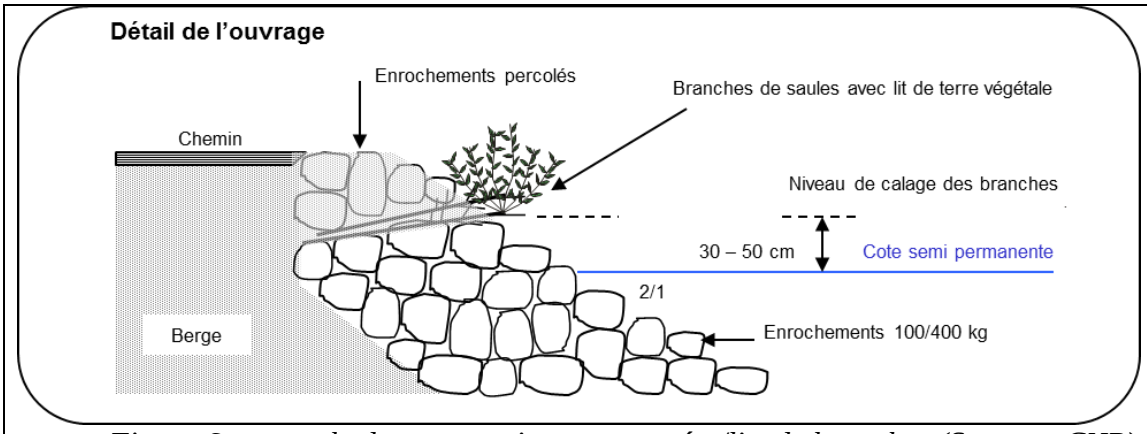


Figure 6 : exemple de restauration par rangées/lits de branches (Source : CNR)

Développement des branches (1 mois après travaux) Finition du haut de berge

Figure 7 : travaux en cours pour ouvrage de restauration par lits de branches (Crédit photo : CNR)

Recouvrement des branches évolution de la végétation après deux saisons

Figure 8 : rendu des travaux après recouvrement et après 2 saisons (Crédit photo : CNR)

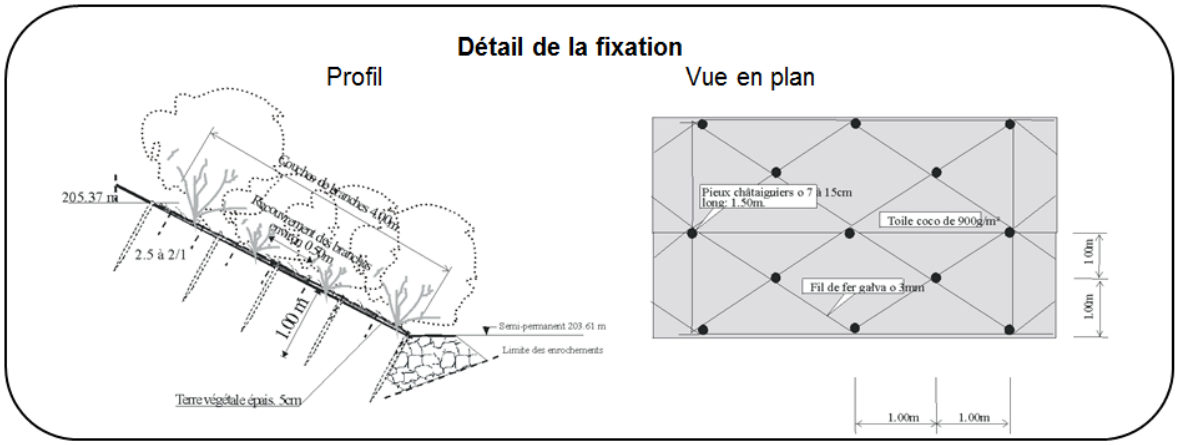


Figure 9 : exemple de restauration par couches de branches (Source : CNR)

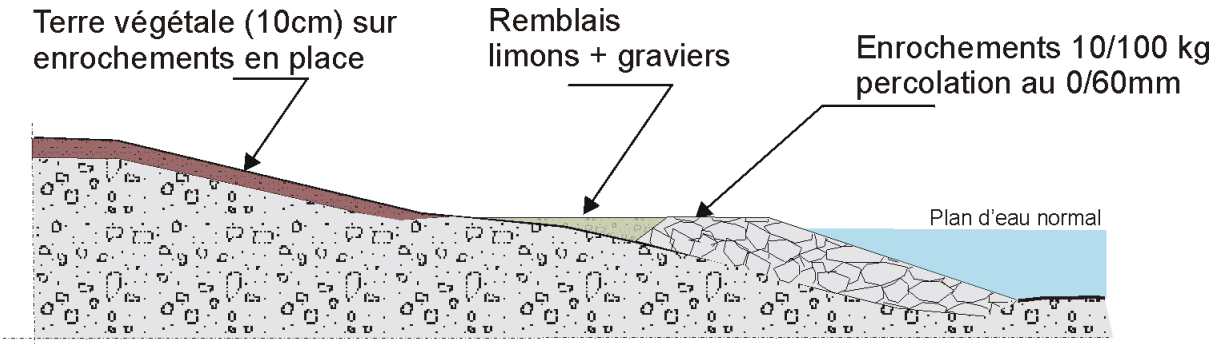


Figure 10 : Exemple de restauration par « festonnage » (Source : CNR)

Remblais de festonnage — festonnage après remblais

Figure 11 : travaux génie civil pour ouvrage de restauration par festonnage (Crédit photo : CNR)

Festonnage végétalisé après 1 saison — Vue d'ensemble du festonnage végétalisé

Figure 12 : rendu des travaux après action de restauration par festonnage (crédit photo : CNR)

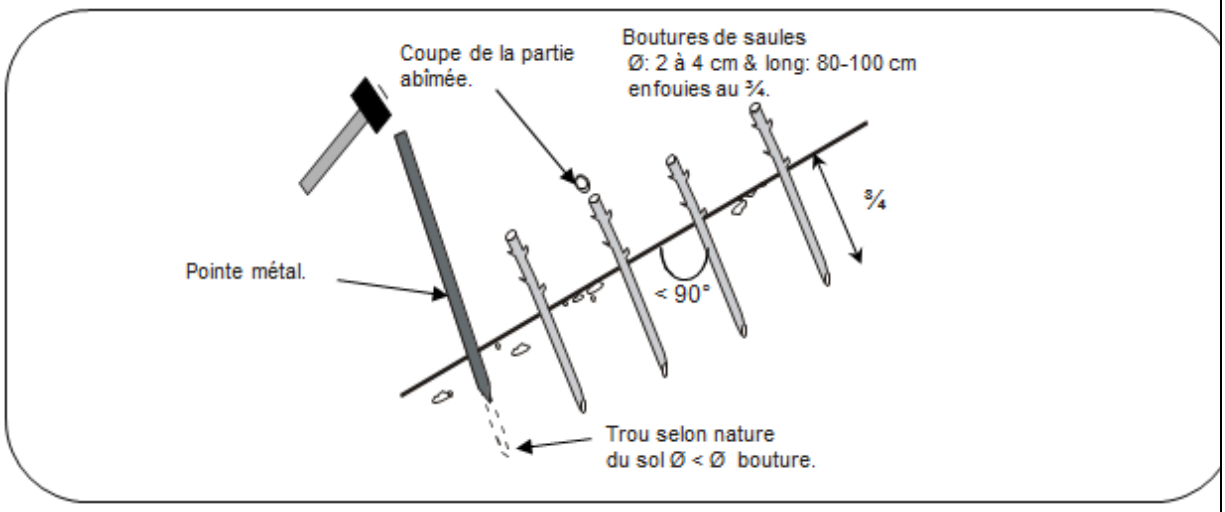


Figure 13 : principe de mise en œuvre de boutures de saules (Source : CNR)

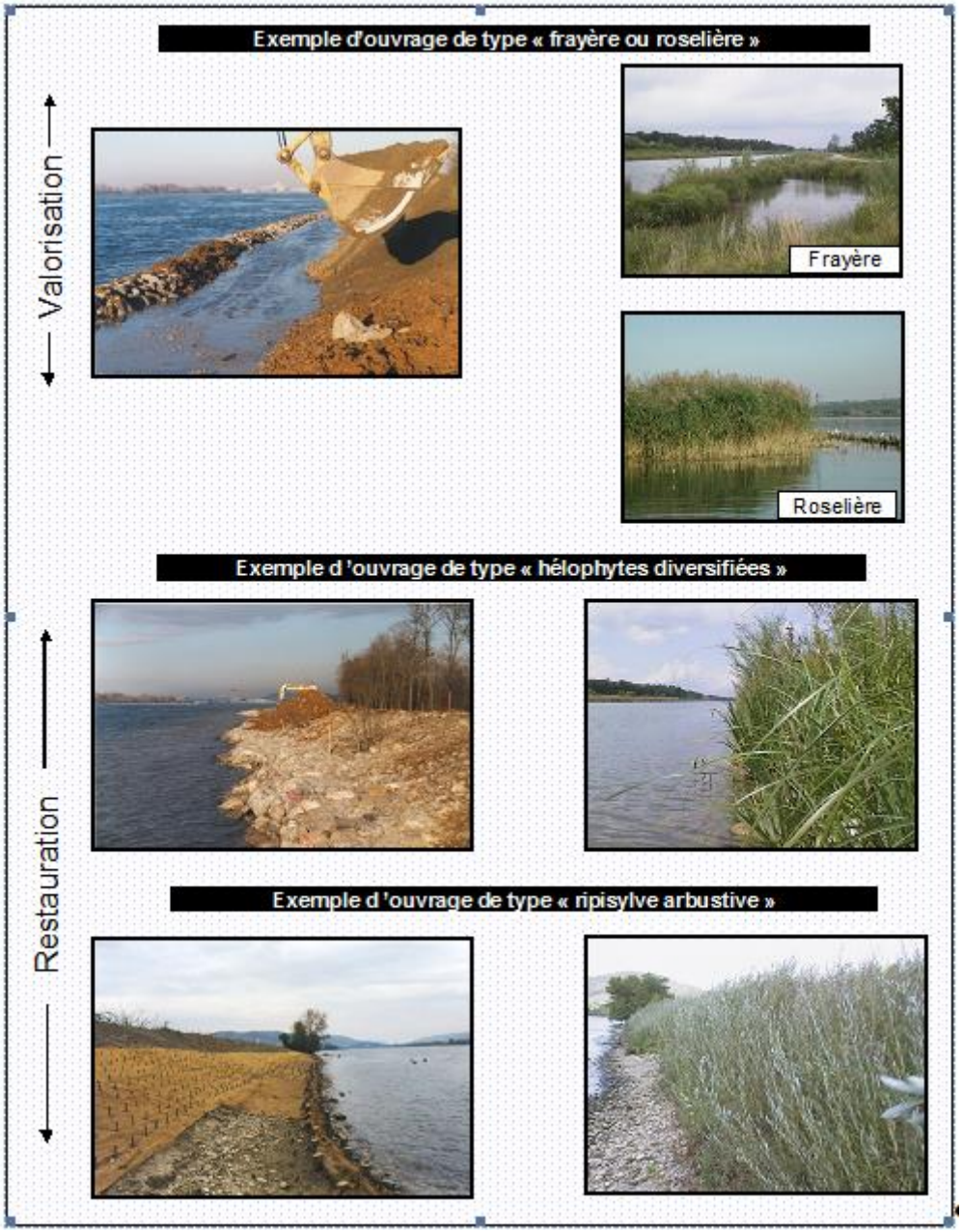


Figure 14 : principaux types d'ouvrages écologiques (Source : CNR)

Figure 15 : Travaux de fascinage dans la levée d'Orléans réalisés d'aval en amont par tronçons d'environ 100 ml pour se prémunir d'une éventuelle montée des eaux (Crédit photo : 2011-DREAL Centre – Val de Loire)

Arrêt des travaux - Décembre 2011

1ère crue du 5 janvier 2012

Figure 16 : Suite aux crues hivernales et à l'épisode des frasils (mi-février 2012), la fascine a été dégradée dans la zone exposée aux courants (Crédit photo : 2011-DREAL Centre – Val de Loire)

Figure 17 : Mise en place du treillis coco et bouturage complémentaire - mars 2012 (Crédit photo : 2011-DREAL Centre – Val de Loire)

FICHES DE CAS

2. Fiches de cas

FC.1. Confortement de la digue de protection contre les inondations d'Albaron (13) – Petit Rhône RG

FC.2. Confortement des digues du Lez à Lattes et Montpellier (34)

FC.3. Travaux de la digue de l'Yzeron à Oullins (69)

FC.4. Renforcement et filtration/drainage de la digue de « Bou – La Binette » sur la Loire à Bou (45)

FC.5. Confortement de la digue en amont de la colline du Wawel à Cracovie (Pologne)

FC.6. Renforcement de corps de digue des zones de non-recouvrement du val d'Orléans par technique de mélange en place sur les communes de Guilly et Sigloy (45) – Plan Loire Grandeur Nature

FC.7. Réalisation d'un écran étanche dans la digue de Loire par mise en œuvre d'un rideau de palplanches sur la commune de Saint-Père-sur-Loire (45) – Plan Loire Grandeur Nature

FC.8. Digue de la Polka – Moselle – Jouy-aux-Arches (57)

FC.9. Reconstitution en eau du talus et du pied de digue côté rivière par banquette de pied en tout-venant de carrière

FC.10. Confortement des digues des Amidonniers/Sept-Deniers (Digues D12, D13 et D14) – Raccordement entre le nouveau parement béton des digues en remblai et une digue type mur béton – Toulouse (31)

FC.11. Travaux spécifiques au droit d'une zone de transition pour raccorder un écran étanche sur la digue de la Blanchisserie et l'ouvrage hydraulique de l'ancienne écluse de la Jonction – NEVERS (58)

FC.12. Reconstruction après démontage d'un tronçon de digue du val d'Orléans – Commune de Saint-Pryvé - St-Mesmin (45)

FC.13. Confortement des digues des Amidonniers/Sept-Deniers (Digues D12, D13 et D14) – Traitement du talus aval par grillage anti-fouisseurs – Toulouse (31)

FC.14. Confortement et protection des digues de l'Aude en RD et RG sur les communes de Sallèles d'Aude, Narbonne, Cuxac d'Aude et Coursan (11)

FC.15. Traitement des terriers de lapins présents dans le corps de la digue du val d'Orléans – Commune de Sandillon (45)

FC.16. Déboisement avec enlèvement des souches et reconstitution du talus de digue côté Loire – Commune de Mareau-aux-Prés (45) – Plan Loire Grandeur Nature

FICHE DE CAS

Confortement de la digue de protection contre les inondations d'
Albaron (13) - Petit Rhône – Rive Gauche

I. I. Descriptif de la digue initiale

- Longueur du tronçon de digue étudiée : 1 160 m
- Date de construction : entre 1865 et 1885
- Type de digue :
  - remblai homogène en matériaux limoneux-sableux
  - présence d'un perré maçonné en amont, sur un linéaire de 500m
- Données géométriques :
  - ancienne digue de Camargue au profil peu régulier
  - hauteur moyenne de l'ouvrage : 4 m
- Fonctionnement hydraulique du cours d'eau :
  - débit moyen Petit Rhône : 175 m^3/s
  - Q_{100} = 1 337 m^3/s
- Données morpho-dynamiques :
  - extérieur de la courbe
  - distance avec le cours d'eau : de 4 à 9m
  - pas d'évolution du niveau du lit du cours d'eau

II. Désordres et mécanismes à l'origine des travaux étudiés

- Date : suite aux crues du Rhône d'octobre 1993 et de janvier 1994
- Description factuelle :
  - renards hydrauliques
  - terriers d'animaux
  - dégradation du pied de digue côté fleuve
- Mécanismes :
  - érosion interne
  - affouillement

III. Travaux étudiés

- Objectifs :
  - corriger la stabilité générale de l'ouvrage
  - corriger l'étanchéité générale de l'ouvrage
  - empêcher les animaux fouisseurs de creuser des terriers
  - rendre l'ouvrage circulable
- Dispositifs mis en place :
  - palplanches en pied côté fleuve - quand perré, en crête
  - recharge étanche côté fleuve
  - recharge côté terre
  - grillage anti-fouisseurs sur les 2 talus
  - géosynthétique renforcé sur le talus côté fleuve
  - terre ensemencée sur les 2 talus

    - cordon drainant en pied de digue côté zone protégée
    - chemin en crête de digue

- Principales modifications :
    - épaississement de la digue côté zone protégée
    - décaissement côté fleuve
    - modification du profil de la digue
- Données géométriques :
    - largeur du chemin en crête de digue : entre 5,3 et 6 m
    - pente des 2 talus : 1/2
    - longueur des palplanches : 3 m, quand perré 3,50 m
- Travaux réalisés dans des conditions normales
- Coût des travaux : estimation de 2,50 millions d'euros HT
- Date de début des travaux : juin 2004
- Durée des travaux : 8 mois
- Avis sur les travaux effectués : l'ouvrage a été conçu dans les règles de l'art. L'étanchéité est assurée par un rideau de palplanches et un masque d'argile, la stabilité de l'ouvrage est réalisée par le rideau de palplanches, les talus sont protégés des animaux par un grillage anti-fouisseurs, et un chemin en crête de digue permet d'assurer l'entretien de l'ouvrage. Le seul bémol est la réalisation, sur un faible linéaire, d'une clé d'étanchéité qui complète le rideau de palplanches. Pourquoi ne pas avoir choisi de mettre des palplanches plus longues ?

IV. Acteurs des travaux étudiés

- Maître d'ouvrage / propriétaire / gestionnaire du tronçon étudié : SYMADREM ;
- Maître d'œuvre du tronçon étudié : BCEOM
- Entreprise : BAULAND T.P.

FICHE DE CAS
Confortement des digues du Lez
- Lattes & Montpellier (34) -

Technique 1	Technique 2	Technique 3	Qualité de la documentation existante
Remblais côté ZP Protection en enrochements côté eau	Soutènement gabions coté ZP	Mur poids coté ZP	++

Auteur : Mathieu NORMAND - EGIS
Coordonnées de l'auteur : mathieu.normand@egis.fr / 06.27.27.27.09

Version	Date	Nom	Action	Statut
0.1	22/09/2015	NORMAND M.	Création	Projet
0.2	29/07/216	JC Palacios-Safege	Relecture	Projet

I. Descriptif de la digue initiale

- Longueur du tronçon de digue étudiée : 13 km
- Date de construction : 2010 / 2013
- Type de digue : Remblais poids en matériaux étanches
- Données géométriques :
  - hauteur de la digue par rapport au terrain naturel côté val : variable, de 2 à 3m
  - pente de talus : côté cours d'eau /rivière/canal/fleuve : 1H/1V à 3H/2V
  - côté val (ou côté zone protégée) : 1H/1V à 3H/2V
  - largeur de crête : variable, de 2 à 3m

- Fonctionnement hydraulique du cours d'eau : Régime méditerranéen. Alimentation karstique du haut bassin versant et influence pluviale de la Ville de Montpellier sur l'aval du bassin versant.

- Données morpho-dynamiques :
  - distance de la digue par rapport au cours d'eau : digue en bordure immédiate du Lez, présence d'une risberme circulable en pied
  - intérieur ou extérieur de la courbe : les deux configurations sont présentes sur le linéaire étudié
  - tendance d'évolution du niveau du lit du cours d'eau : Lit stable et fixé par des seuils, peu de transport solide.
  - autres éléments (ex : anciens méandres…) : Lit rectifié et recalibré dans les années 80, recoupement d'anciens méandres. Seuils historiques liés à la navigation sur le Lez, encore présente sur la partie aval du linéaire étudié.
  - sources (Référence d'étude ou nom de la personne) : Aucune donnée

II. Désordres et mécanismes à l'origine des travaux étudiés

- Date ou époque d'apparition/évènement (si connus) : Début des années 2000 après plusieurs crues importantes (2002 et 2003).

- Description factuelle :
  - Erosions de surface
  - Amorces de glissements de talus
  - Capacité limite du lit endigué

- Mécanismes :
  - Pentes raides
  - Défaut d'entretien, présence de végétation et terriers
  - Conception ancienne des ouvrages, hétérogénéités des matériaux, non-respect des règles de l'art

- Scénario :
  - Etude des ouvrages en condition fondamentale / crue du Lez en régime transitoire / Décrue rapide / Séismes, avant les recommandations du guide CFBR

III. Travaux étudiés

- Objectifs :
  - Assurer le transit des crues de projet (750m3/s) sans débordement
  - Limiter au maximum le risque de brèche pour les crues supérieures
  - Protéger les talus côté Lez de l'érosion

- Nouveaux ouvrages ou parties d'ouvrage mis en place :
  - Arasement complets de certains linéaires au droit des zones urbaines + création d'un soutènement côté terre (remblais traités au liant hydraulique avec habillage gabions ancrés par géogrilles) pour constituer la nouvelle digue dans une emprise limitée
  - Reconstitution de certaines risbermes érodées, notamment au droit des zones avec soutènement côté terre (emprise réduite ne permettant pas de tolérer des phénomènes d'érosion ou glissement côté Lez)
  - Création d'un profil de digue résistant à la surverse sur la partie amont du linéaire pour permettre le débordement des crues supérieures à la crue de projet

- Principales modifications des ouvrages existants :
  - Confortement par épaulement côté terre des digues existantes
  - Retalutage des talus et diminution de pente côté rivière
  - Mise en place de dispositifs anti-érosifs adaptés aux contraintes sur les talus côté Lez

- Données géométriques :
  - H/TN : de 2 à 3m
  - Pentes :

        - Talus côté rivière : 2H/1V à 3H/2V selon les contraintes d'emprise
        - Talus côté terre : 2H/1V, avec risberme intermédiaire sur les longs talus
        - Risbermes en enrochements et brut d'abattage : 1H/1V à 3H/2V
    - Largeur en crête : de 5 à 12m selon les contraintes d'emprise

- Travaux réalisés dans des : Conditions Normales
- Coût des travaux : 14 050 000 €HT
- Date de début des travaux : Janvier 2009
- Durée des travaux : 20 mois + 14 mois
- Difficultés rencontrées :
    - Transport de plus d'1 million de m3 en zone urbaine
    - Conditions météo de mise en œuvre de matériaux fins parfois difficile
    - Peu d'accès à la zone de travaux
    - Circulations sur le sol support difficile
    - Manque de préparation dans la libération préalable des emprises chez les riverains
    - Gestion du risque de crue sur certains secteurs à araser en totalité
- Enseignement des travaux

Avis sur les travaux effectués (y compris adéquation de la technique au chantier à réaliser) : Technique adaptée au chantier. Nécessité d'investissement important en encadrement de la part du groupement et en suivi de la part du maître d'œuvre.

IV. Acteurs des travaux étudiés

- Maître d'ouvrage des travaux étudiés :
    - Nom : Montpellier Méditerranée Métropole (Anciennement Communauté d'Agglomération de Montpellier)
    - Adresse : Place Zeus – 34 000 MONTPELLIER
- Propriétaire du tronçon de digue :
    - Nom : Montpellier Méditerranée Métropole
    - Adresse : Place Zeus – 34 000 MONTPELLIER
- Gestionnaire du tronçon de digue :
    - Nom : Montpellier Méditerranée Métropole
    - Adresse : Place Zeus – 34 000 MONTPELLIER
- Maître d'œuvre des travaux étudiés :
    - Nom : EGIS EAU
    - 889 rue de la vieille Poste – CS89017 – 34000 MONTPELLIER Cedex2
- Entreprise(s) :
    - Nom : Groupement d'Entreprise RAZEL-BEC / BUESA
    - Adresse : 1111 Avenue Justin BEC – 34 680 SAINT-GEORGES-D'ORQUES

Vues des digues du Lez avant les travaux

Reprofilage et reconstitution des risbermes

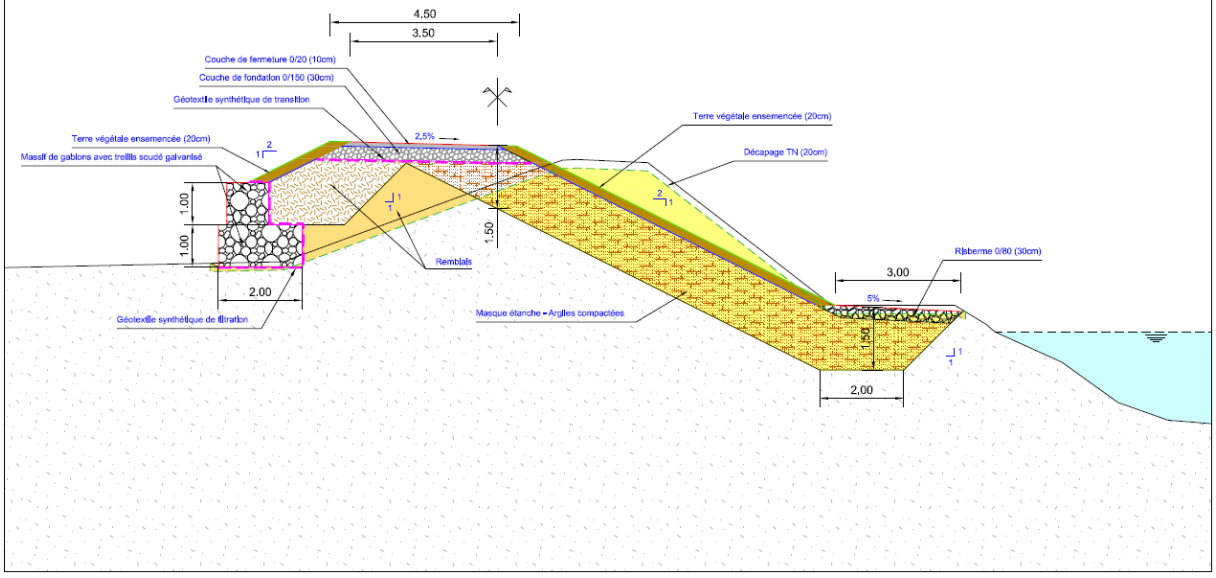
Arasement des digues et reconstruction avec soutènement au droit des habitations + protection des risbermes en matelas de gabions

Protection des talus contre l’érosion, mise en place de matelas de gabions / blocs d’enrochements / géogrilles selon les secteurs

Reconstitution et protection des risbermes au droit des zones de soutènement

Epaississement des digues côté val (à gauche) et protection en géogrille côté Lez (à droite)

Travaux de confortement des digues du Lez Communauté d'Agglomération de Montpellier						Affaire: ARC 70 120 Z
Coupe Type N°6						N°plan : 4.6
Indice	Date	Etabli	Vérifié	Echelle	Fichier	egis eau
1	10/01/08	FB	M. NORMAND	1/100°	CT_LEZ.dwg	



FICHE DE CAS
Travaux de la digue de l'Yzeron
Oullins (69) -

Technique 1	Technique 2	Technique 3	Qualité de la documentation existante
Rehausse murettes en BA	Digue en terre		++

Auteur de la fiche synoptique : Caroline CHARTON (Maia Sonnier)

Version	Date	Nom	Action	Statut
0.1	*26/08/16*	*C.CHARTON*	*Création*	*Projet*
0 .2	*29/08/2016*	*JC PALACIOS*	*Relecture*	*Projet*

I. Descriptif de la digue initiale

- Longueur du tronçon de digue étudiée : 1470m
- Date de construction :
- Type de digue : rehausse murette en béton armé
- Données géométriques :
  - hauteur de la digue par rapport au terrain naturel côté val : +0.75m
  - pente de talus : côté cours d'eau : 4H1V
    côté val: -
  - largeur de crête > à 2.25m

- Fonctionnement hydraulique du cours d'eau : pluvial très contrasté (fluctuation saisonnière de débits importants)

- Données morpho-dynamiques :
  - distance de la digue par rapport au cours d'eau : digue de protection contre le cours d'eau
  - intérieur ou extérieur de la courbe : en alternance
  - tendance d'évolution du niveau du lit du cours d'eau : pente de 0.27%
  - autres éléments (ex : anciens méandres…) :-
  - sources (Référence d'étude ou nom de la personne) : Roche 1999, SAGYRC

II. Désordres et mécanismes à l'origine des travaux étudiés

- Date ou époque d'apparition/évènement (si connus) :
- Description factuelle :
  - Augmentations des inondations des riverains en zone urbaine ou peri urbaine
- Mécanismes :
  - Le ruissellement et l'érosion ont fait apparaitre la roche primitive
- Scénario : cette structure géologique du bassin a un faible pouvoir d'absorption de l'eau d'où une rapide saturation du sol.

III. Travaux étudiés

- Objectifs :
  - Protection de l'ensemble des riverains des communes contre le risque de crue
- Nouveaux ouvrages ou parties d'ouvrage mis en place :
  - Mur en béton armé avec massif drainant anti érosion à l'arrière du mur
  - Protection des berges existantes par gabions
- Principales modifications des ouvrages existants :
  - Elargissement du cours d'eau
  - Endiguement par mur Béton armé hauteur moyenne 80cm
  - Protection des berges par un parement en gabion complété par le mur en BA
- Liste des techniques employées décrites dans des fiches "Techniques du GT" :
  - Rehausse murette anti-crue
- Données géométriques :

Les dimensions des murets BA

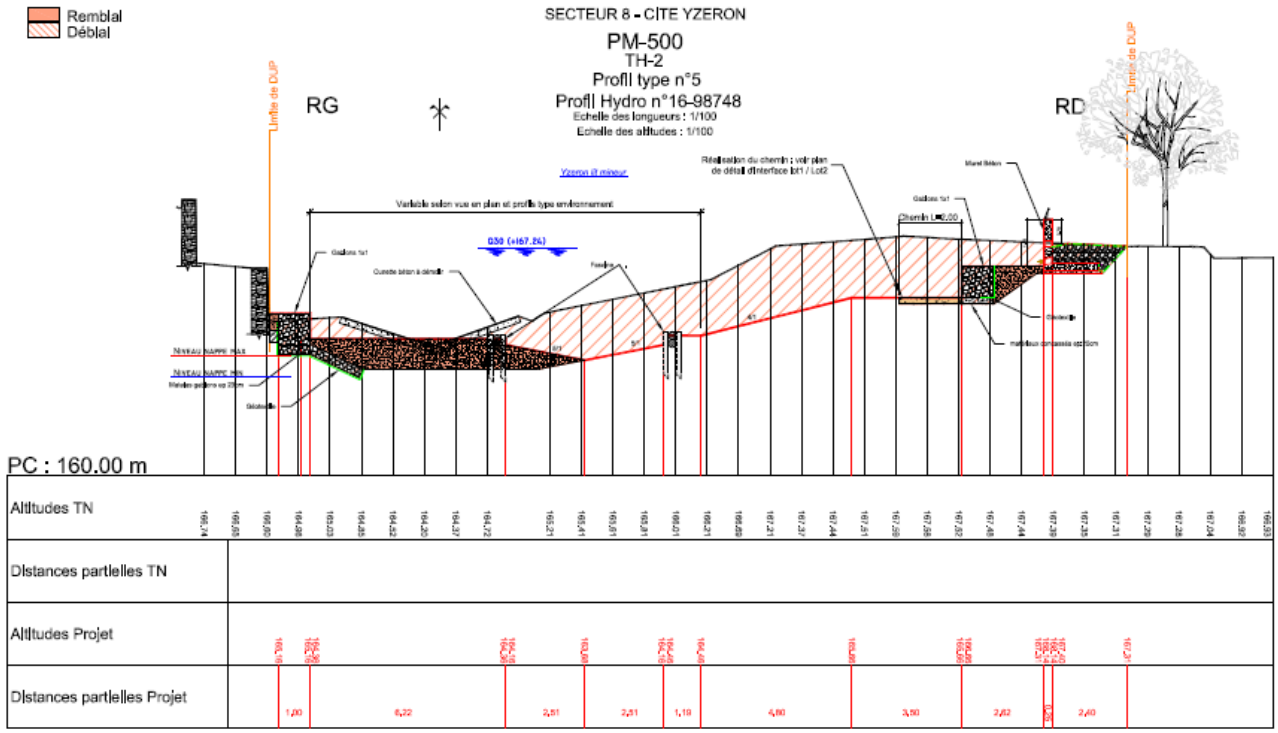
  - Hauteur de 3.00 à 1.75m
  - Largeur de 1.45 à 1.20m

- Travaux réalisés dans des : Conditions Normales,
- Date de début des travaux : mars 2104
- Durée des travaux : 8 mois
- Difficultés rencontrées :
  - La gestion des crues de l'Yzeron pendant les travaux (gestion du matériel notamment)
  - Zone de travaux étroite
  - Travaux en zone urbaine avec réseaux existants au droit du mur à réaliser
- Enseignement des travaux
  - De préférence couler les murs en place pour une meilleure gestion de l'étanchéité
  - Réaliser de sondages préalables pour la détection des réseaux existants + DICT
  - Faire un relevé précis de l'existant afin d'optimiser les niveaux des murs réhausse.

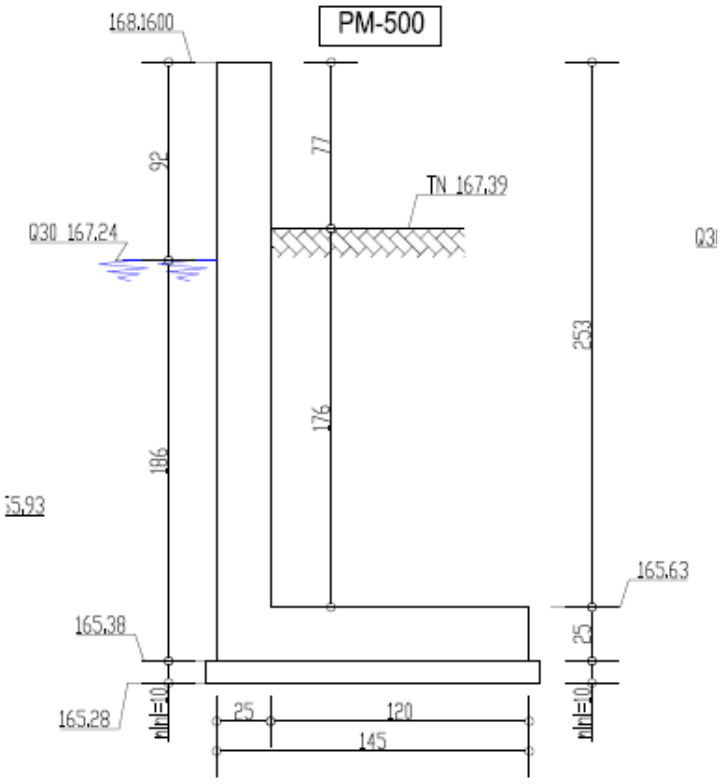
Avis sur les travaux effectués (y compris adéquation de la technique au chantier à réaliser) : Lors des phases de réalisation des murets coulés en place, nous avons remarqué que la stabilité des gabions n'était pas assurée. Nous avons dû approfondir les murets de rehausse jusqu'au niveau de l'assise des gabions.

IV. Acteurs des travaux étudiés

- Maître d'ouvrage des travaux étudiés : Syndicat d'aménagement et de gestion de l'Yzeron, du Ratier et de Charbonnières (SAGYRC)
- Propriétaire du tronçon de digue : Ville d'Oullins
- Gestionnaire du tronçon de digue : SAGYRC
- Maître d'œuvre des travaux étudiés : CNR
- Entreprise(s) : PERRIER TP - MAIA SONNIER – GREEN STYLE – RAMPA – MAIA FONDATIONS



Coupe sur les travaux à réaliser en rive gauche et droite de l'Yzeron au niveau d'Oullins



Coupe type sur le muret de réhausse en béton armé

Travaux de mise en place des murettes de rehausse coté riverains

Vue des murettes coté riverain

FICHE DE CAS
Renforcement et filtration /drainage de la digue de « Bou – La Binette » – La Loire - Bou (Loiret, 45) -

Auteur(s) de la fiche synoptique : Yasmina Boussafir (Univ. Gustave Eiffel)
Coordonnées de l'auteur :

Documentation disponible : (APS, Projet, Photos, Plans…) site Internet du plan Loire
http://www.plan-loire.fr/fr/les-plates-formes/ouvrages-domaniaux-de-letat-et-securite/les-travaux-sur-le-lit-et-les-levees/loiret/digues/bou/index.html
Dossier complet disponible à la DREAL Orléans

Technique(s) mise(s) en œuvre : filtration / drainage côté val par géocomposite et filtre / drain granulaire

I. Descriptif de la digue initiale

- Longueur du tronçon de digue étudiée : 70 mètres
- Date de construction : antérieure au XIX^{è} siècle avec plusieurs phases de constructions successives
- Type de digue : digue fluviale sèche
- Données géométriques :
  - hauteur de la digue par rapport au terrain naturel côté val : 5 mètres
  - pente de talus : côté cours d'eau /rivière/canal/fleuve/mer :
    côté val (ou côté zone protégée) :
  - largeur de crête : environ 6-7 mètres

- Fonctionnement hydraulique du cours d'eau : méandre – fonctionnement fluvial

- Données morpho-dynamiques :
  - distance de la digue par rapport au cours d'eau :
  - intérieur ou extérieur de la courbe : intérieur de la courbe
  - tendance d'évolution du niveau du lit du cours d'eau :
  - autres éléments (ex : anciens méandres…) :
  - sources (Référence d'étude ou nom de la personne) : Présentations sur le site Internet du Plan Loire : page générale, diaporama de la séance publique, photographie des travaux

II. Désordres et mécanismes à l'origine des travaux étudiés

- Date ou époque d'apparition/évènement (si connus) : sans objet
- Description factuelle :
  - Présence d'une maison encastrée limitant la largeur de la digue et ayant empêché la réalisation de filtres/drains lors de la compagne « NEDECO » (dans les années 1970)
  -
- Mécanismes :

- Risque d'évolution par infiltration d'eau et développement d'érosion interne notamment le long des interfaces entre la digue et les dépendances attenantes à la maison
- Aléa karstique connu dans cette zone mais sans manifestation de surface

- Scénario :
  - Rupture

III. Travaux étudiés

- Objectifs :
  - Limiter le risque d'érosion interne
  -

- Nouveaux ouvrages ou parties d'ouvrage mis en place :
  - Mise en œuvre d'un tapis et d'un massif drainant et filtrant
  - Reprise du talus côté val par remblayage et compactage

- Principales modifications des ouvrages existants :
  - Destruction du bâtiment encastré
  - Reconstruction de la digue

- Liste des techniques employées décrites dans des fiches "Techniques du GT" :
  - Filtration/ drainage par géocomposite
  - Filtre / Drain par couche granulaire
  - Remblayage en matériaux recyclés (classification GTR C1B4)

- Données géométriques :
  - Voir profil type
  -

- Travaux réalisés dans des : conditions normales, ~~d'urgence ou d'extrême urgence~~
- Coût des travaux : 120 000 € TTC, hors acquisition de la maison
- Date de début des travaux : juillet 2014
- Durée des travaux : 3 mois
- Difficultés rencontrées : difficulté d'appréciation de l'aléa karstique : s'est traduit par un sur-épaississement de la digue pour créer une réserve de matériau en cas d'effondrement
- Enseignement des travaux :

Avis sur les travaux effectués (y compris adéquation de la technique au chantier à réaliser) :

IV. Acteurs des travaux étudiés

- Maître d'ouvrage des travaux étudiés :
  - Nom : État – DDT 45
  - Adresse : Cité administrative Coligny, 131, faubourg Bannier 45042 Orléans
- Propriétaire du tronçon de digue :
  - Nom : DDT 45
  - Adresse : Cité administrative Coligny, 131, faubourg Bannier 45042 Orléans
- Gestionnaire du tronçon de digue :

    - Nom : DDT 45
    - Adresse : Cité administrative Coligny, 131, faubourg Bannier 45042 Orléans
- Maître d'œuvre des travaux étudiés :
    - Nom : DREAL - Service Loire et Bassin Loire-Bretagne - Département Études et Travaux Loire - Bureau d'Études et de Travaux Ouest
    - Adresse : 5, avenue Buffon CS 96407 45064 Orléans Cedex 2
- Entreprise(s) :
    - Nom : Les Travaux Publics du Loiret et l'entreprise Agri-territoires pour la démolition
    - Adresse :

Joindre photographies (accompagnées des crédits photographiques et d'une légende), plans,…

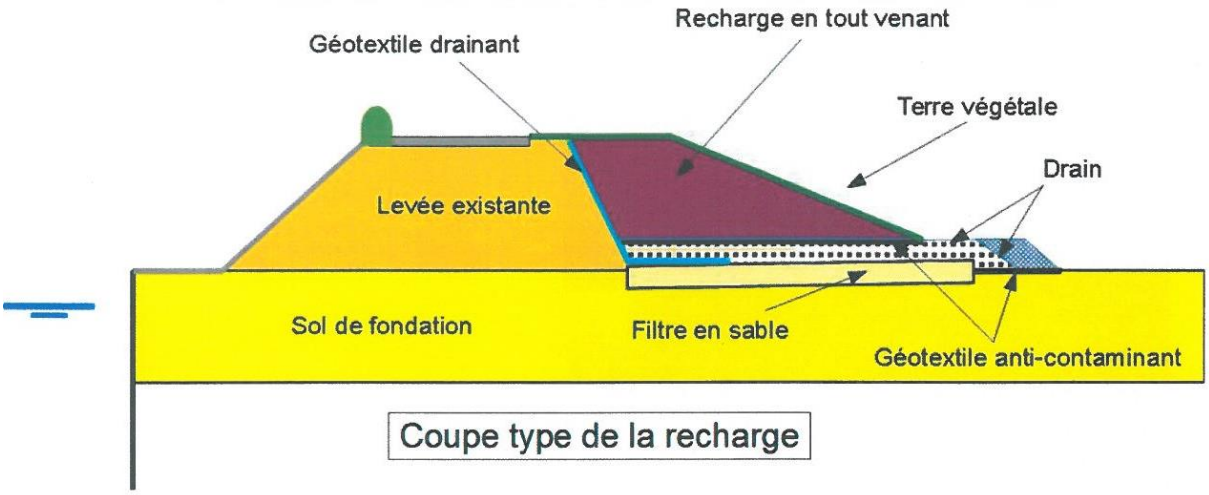
Située sur la commune de Bou, au lieu-dit la Binette, une partie de la levée du val de Bou est sujette aux risques d'érosion interne et jusque là à un de défaut de stabilité côté val, dus à la présence d'une maison encastrée. Ces phénomènes, susceptibles de porter atteinte à l'intégrité de la levée, peuvent provoquer une rupture de la digue protégeant ce val (environ 1 000 personnes concernées). L'État a donc décidé de racheter la propriété, de procéder à sa démolition et de renforcer la levée.

La technique de renforcement consiste à réaliser une couche drainante et filtrante puis à remblayer le volume dégagé jusqu'à obtenir un profil homogène sur la section de digue correspondante.

vue du site avant travaux – position de la maison encastrée (Photo DREAL Centre)

vue du site après travaux – reconstitution de la digue et de la chaussée (Photo DREAL Centre)

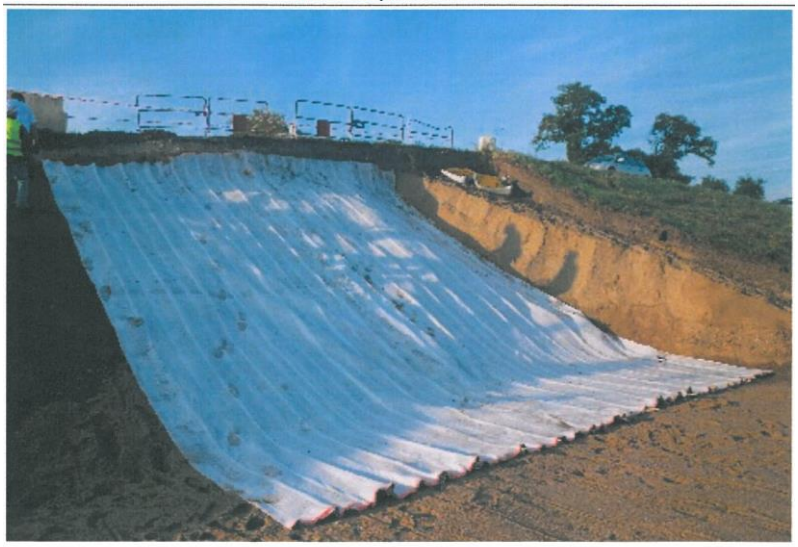
profil en travers type des travaux réalisés à Bou secteur de La Binette (45)



Les photos ci-dessous sont de la DREAL Centre

Durant la démolition

Mise en place du filtre en sable



Mise en œuvre du géocomposite drainant et filtrant

Réalisation du drain en graviers

(gravillons recyclés C1B4)

Compactage du remblai

	FICHE DE CAS **Confortement de la digue en amont de la colline du Wawel - Cracovie (Pologne) – Wisla (Vistule)**	**Guide pratique**

Technique 1	Technique 2	Technique 3	Qualité de la documentation existante
Batardeau type EKO	Paroi d'étanchéité		++

Version	Date	Nom	Action	Statut
0.1	25/02/2008	BDD R Tourment	*Création*	*Projet*
0 .2	22/02/2016	D Raulin (Fugro)	*Relecture*	*Projet*
0 .3	29/07/2016	JC Palacios-Safege	*Relecture*	*Projet*

Résumé :

La digue faisant l'objet de la présente fiche est constituée d'un seul tronçon long de 453,37 m dans une zone fréquentée par le public, à proximité de monuments historiques. Posée sur une ancienne embouchure de la Rudawa, la digue a des fondations de très faible compacité, de constitutions variables avec présence d'infrastructures internes.

Les problèmes à résoudre étaient de stabiliser le talus de la digue malgré le sol médiocre, améliorer l'étanchéité du corps de digue sans endommager les canalisations à proximité des fondations, garder une hauteur en crête suffisante, sans porter atteinte à l'esthétique du site.

Pour répondre à ces objectifs, les travaux suivant ont été effectués : reprofilage du talus selon une pente inférieure ou égale à 1V/3H, pose de parois d'étanchéité DSM (Deep Soil Mixing) côté zone protégée (amélioration de la stabilité et de l'étanchéité), construction d'une banquette de béton armé fondée sur la paroi d'étanchéité, avec bardage et mise en place des niches du batardeau EKO-SYSTEM d'une hauteur de 50 cm au dessus des banquettes, 1,50 m ailleurs.

I. RENSEIGNEMENTS GENERAUX

1. Identification du tronçon concerné par les travaux :

- Nom du tronçon : digue de Wisla - T6
- Catégorie de digue : digue de protection contre les inondations
- Département : Malopolska
- Commune(s) : Cracovie
- Nom du cours d'eau ou/et du fleuve : Wisla (Vistule)
- Tronçon situé en : rive gauche

- Longueur du tronçon : 453,37 m
- Linéaire concerné (PK amont / PK aval) : PK 76+440 - PK 76+893
- Intéresse la sécurité publique : forts enjeux - plusieurs monuments historiques et proximité du centre-ville

2. Maître d'ouvrage des travaux de construction :

- Nom : Direction de l'Amélioration et de l'Equipement Hydraulique de Malopolska
- Adresse : 73, r. Szlak ; 31-153 Cracovie – POLOGNE

3. Maître d'œuvre à la construction:

- Nom : Hydrotrest Skanska
- Adresse : 52, r. Ks. Jozefa ; 30-206 Cracovie – POLOGNE

4. Maître d'ouvrage des travaux faisant l'objet de la fiche :

- Nom : Direction de l'Amélioration et de l'Equipement Hydraulique de Malopolska
- Adresse : 73, r. Szlak, 31-153 Cracovie – POLOGNE

5. Gestionnaire du tronçon, si différent du maître d'ouvrage :

- Nom : Mairie de la Ville de Cracovie

6. Propriétaire, si différent du maître d'ouvrage :

- Nom : Mairie de la ville de Cracovie

7. Maître d'œuvre des travaux faisant l'objet de la fiche :

- Nom : Biuro Projektów Hydroprojekt Kraków
- Adresse : 22, r. Pilsudskiego ; 31-109 Cracovie – POLOGNE

8. Service de contrôle :

- Nom : Direction de l'Amélioration et de l'Equipement Hydraulique de Malopolska
- Adresse : 73, r. Szlak ; 31-153 Cracovie – POLOGNE

9. Zone protégée :

- Nom de la zone : Cracovie – centre-ville
- Département : Małopolska
- Surface de la zone protégée : inconnu
- Enjeux:
  - ✓ nombres d'habitants permanents : inconnu
  - ✓ voies de communication importantes : non
  - ✓ autres enjeux importants : monuments historiques

II. DESCRIPTION DE LA CONSTITUTION INITIALE DE LA DIGUE

1. Date de construction : 1962- 65

2. Type de digue : mixte : remblais + quai (bas)

3. Données géométriques :

- Hauteur de la digue par rapport au terrain naturel côté val :
  - ✓ hauteur minimale pour le tronçon: 0 m
  - ✓ hauteur maximale pour le tronçon: 1,85 m
  - ✓ hauteur moyenne pour le tronçon: 1,0 m
- Pente de talus :
  - ✓ côté cours d'eau : variable
  - ✓ côté val: inconnue
- Largeur de crête : 3,0 m

4. Matériaux constitutifs (hors protections et drains éventuels) :

Tout venant : la lithologie de la digue et des fondations (jusqu'à 6 - 8 m de profondeur par rapport au niveau du sol) est très variable : sable, argile, argile silteuse, sable limoneux, localement des fragments de pierre calcaire et des briques. La compacité est faible à très faible (la densité du sol est à 66-71 % de la densité Optimum Proctor). La cote du toit du terrain naturel est à 197 - 198 m (sable et sable graveleux – compacité moyenne)

5. Travaux importants antérieurs au projet et date : inconnu

6. Autres caractéristiques de la digue :

La digue est étanche dans la masse, mais il n'y a pas de dispositif d'étanchéité connu.

7. Présence et nombre de singularités :

Vanne	☒ Présence	☐ Inconnu	Nombre : 2	
Conduite	☒ Présence	☐ Inconnu	Nombre : 5	
Pertuis	☒ Présence	☐ Inconnu	Nombre : 2	
Câble	☒ Présence	☐ Inconnu	Nombre : 1	
Passages batardables	☐ Présence	☒ Inconnu	Nombre :	
Déversoir	☐ Présence	☒ Inconnu	Nombre :	Longueur(s) :
Route	☐ Présence	☒ Inconnu	Nombre :	
Maison	☐ Présence	☒ Inconnu	Nombre :	

Autres : arbres ☒ Présence ☐ Inconnu Nombre : 4 - 5

8. Fonctionnement hydraulique du cours d'eau :

- Débit et fréquence de la crue de dimensionnement :
- Débits de crues à diverses périodes de retour :

Fréquence (an)	1000	200	100	10	Référence
Débit de pointe	3500 m^3/s	2690 m^3/s	2410 m^3/s	1330 m^3/s	
cote d'eau	206,4 m				hydrogramme Q_{1000}

Les mesures de débit ont été effectuées à partir de mesures sur une échelle fluviale Bielany.

9. Fonctionnement morpho-dynamique du cours d'eau :

- Distance de la digue par rapport au cours d'eau : 0 m (boulevard Czerwieriski)
- Intérieur ou extérieur de la courbe : extérieur
- Tendance d'évolution du niveau du lit du cours d'eau : inconnu
- Autres éléments (ex : anciens méandres…): ancienne embouchure de Rudawa remblayée de façon non contrôlée (100 m env. en aval du pont Debnicki)
- Sources (Référence d'étude ou nom de la personne) : dossier après travaux

III. DESORDRES

1. Désordres à l'origine des travaux :

- Détection lors de la crue : inconnu
- Date ou époque d'apparition / évènement (si connu) : inconnu
- Description factuelle :
  - digue posée sur une ancienne embouchure de la Rudawa - fondation de très faible compacité, constitution variable avec présence d'une infrastructure interne ;
  - impossibilité de rehaussement de la digue par rechargement - opposition des services de conservation des monuments pour raison esthétique ;
  - mauvais état de la digue.
- Photos : non

2. Mécanismes supposés de dégradation :

- Scénario :
  - Stabilité insuffisante causée par une qualité de sol médiocre.

- Possibilité de circulation interne aggravée par les infrastructures traversantes (outre celles connues, présence d'un collecteur d'évacuation du XIXe siècle, non protégé dont la position n'est pas connue).

- Témoignage : B. NOWAK (Direction de l'Amélioration et de l'Equipement Hydraulique de Malopolska)
- Critique du témoignage : non
- Existence d'un diagnostic : non
- Expert en charge du diagnostic : -
- Résumé du diagnostic : -
- Diagnostics préalables: inspection visuelle
- Etudes préalables au projet de travaux: géotechnique/géophysique, historique, hydraulique/hydrologie

  (Calcul et analyse de la stabilité en condition de filtration instable : Chaire Indépendante de la Construction d'Ouvrages Hydrauliques, UPK, Cracovie 1998)

IV. TRAVAUX FAISANT L'OBJET DE LA FICHE

1. Type de travaux : confortement, gros entretien

2. Objectifs de la solution retenue :

- amélioration de la stabilité et de l'étanchéité ;
- élargissement de la crête, régularisation du profil en long de la crête ;
- régularisation du profil transversal (talus côté rivière).

3. Descriptif des travaux :

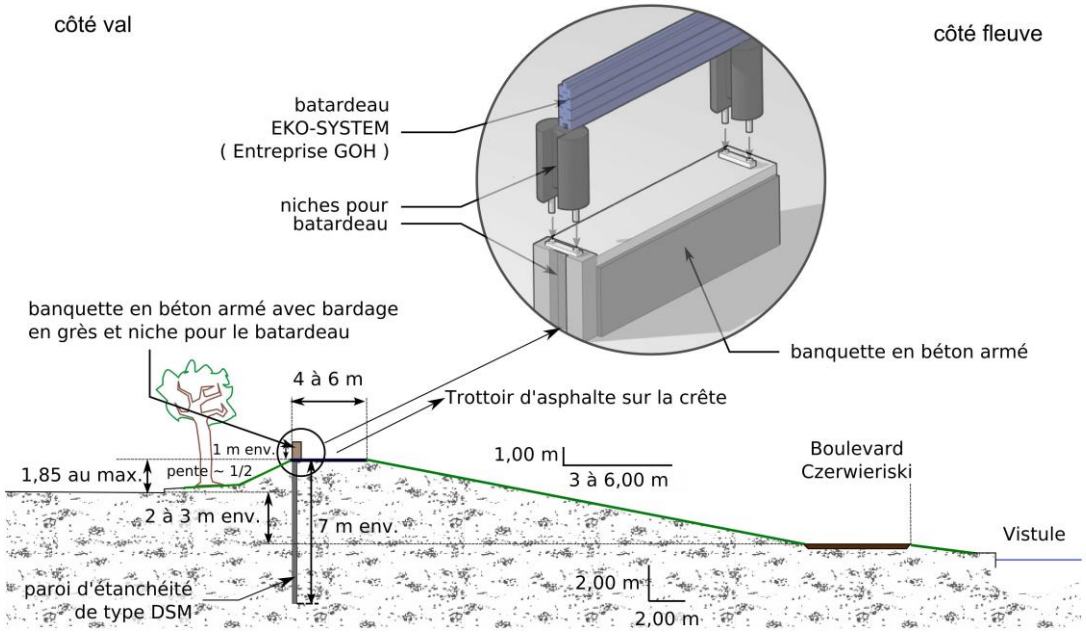
- Nouveaux ouvrages ou parties d'ouvrage (rideau de palplanches, grillages anti-fouisseur…) :
  - réparation des escaliers et de la rampe ;
  - réalisation d'une banquette (hauteur de 1 m) sur la crête côté val – selon des indications de l'architecte de la ville ; banquette de béton armé avec bardage et niches pour la mise en place d'un batardeau de type EKO ;
  - batardeau EKO (poutrelles d'aluminium - hauteur de 50 cm) au dessus des banquettes ;
  - trottoir d'asphalte sur la crête ;
  - paroi d'étanchéité de type DSM- Deep Soil Mixing jusqu'à la cote du toit du sol naturel. Cette solution à été retenue plutôt que le « jet grouting », car elle parait moins dangereuse pour les canalisations à proximité.

- Principales modifications des ouvrages existants (modification du profil…) :
  - élargissement de la crête ;
  - régularisation du profil transversal, du talus côté rivière.

4. Alternative envisagée : inconnue

5. Détails des travaux :

- paroi d'étanchéité DSM côté zone protégée (amélioration de la stabilité et de l'étanchéité) ;
- banquette de béton armé avec bardage (en grès) fondée sur la paroi d'étanchéité ; hauteur de banquette : 1 m par rapport au niveau de la crête ;
- mise en place des niches du batardeau EKO-SYSTEM (GOH -Gesellschaft fur Operativen Hochwasserschutz ; http://www.goh.de/)- poutrelles d'aluminium avec joints et fermetures ;
- hauteur du batardeau EKO : 50 cm au dessus des banquettes ; 1,50 m ailleurs.



Coupe type après travaux – batardeau EKO-SYSTEM

Photo 1 *– Talus côté rivière*

Photo 2 *– Niches du batardeau EKO-SYSTEM*

Photo 3 *– Talus côté rivière après des entretiens (octobre 2005)*

6. Caractéristiques géométriques générales :

- largeur de crête : 5 – 6 m
- pente du talus côté rivière :
  - ✓ côté val: 1V/2H- 1V/2,25H
  - ✓ côté rivière par rapport au boulevard Czerwieriski : variant de 1V/6H à l'amont du tronçon à 1V/3H à l'aval du tronçon

7. Informations sur les travaux :

- Travaux terminés ou en projet : travaux terminés
- Date du projet : novembre 1998
- Entreprise(s) :
  - ✓ Nom : Hydrotrest Skanska

- ✓ Adresse : 52, r. Ks. Jozefa ; 30-206 Cracovie – POLOGNE
- Bureau de contrôle :
  - ✓ Nom : inconnu
- Date début travaux : 2000
- Date fin des travaux : 2001
- Conditions de réalisation (notion d'urgence) : conditions normales
- Travaux soumis à : autorisation
- Date de l'arrêté : -
- Coût des travaux : 1 210 000 euros env. (pour le tronçon PK 76+440 à PK 77+600)
- Coût des études :
  - ✓ Diagnostic initial : inconnu
  - ✓ Etudes préalables : inconnu
- Retour d'expérience sur le vieillissement de l'ouvrage : Circulation pédestre intensive sur le talus - destruction et érosion de talus – nécessité de grands entretiens.
- Critique de la solution :
- Avis du Cemagref : Si l'instabilité du talus est avérée, il faudrait faire une analyse plus poussée et éventuellement un compactage couche par couche.

8. Annexes :

- Plans et coupes après travaux :
  - ✓ mise en annexe d'un plan de situation au 1/10 000 : oui
  - ✓ mise en annexe d'un plan d'ensemble : oui
  - ✓ mise en annexe de coupes types : coupe- schéma
  - ✓ autres documents en annexe: néant

- Photos : 04/10/2005, A. ŻAK

Date : 04/10/2005
Rempli par : A. ZAK
Lieu : Krakow
Documents consultés : dossier après des travaux
Personnes consultées : B. NOWAK (Direction de l'Amélioration et de l'Equipement Hydraulique de Malopolska)
Mise en forme : L. ARGELLIES (22/11/2007), M.VUILLET (18/11/2008)
Relecture : Rémy TOURMENT, Patrice MERIAUX

Annexe 1 *: Localisation et plans après travaux*

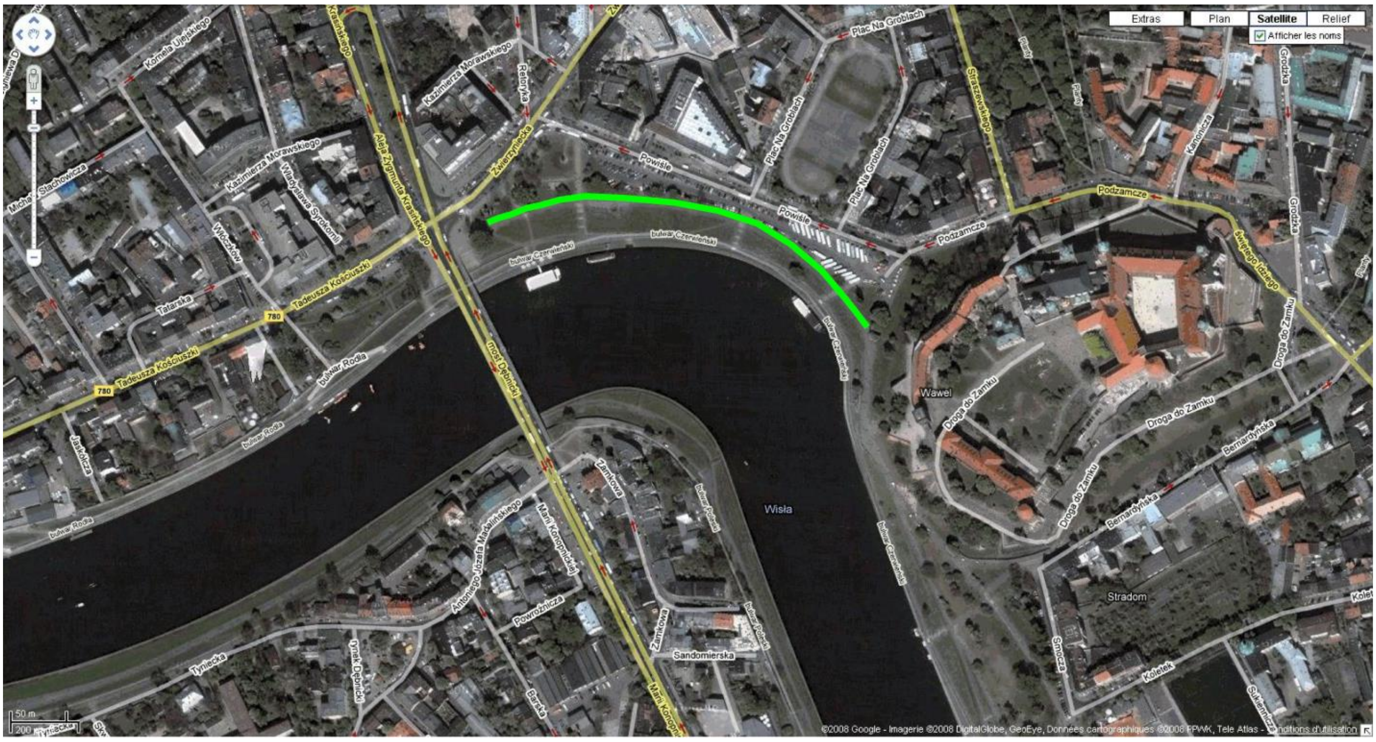


Schéma 1 : *Localisation*

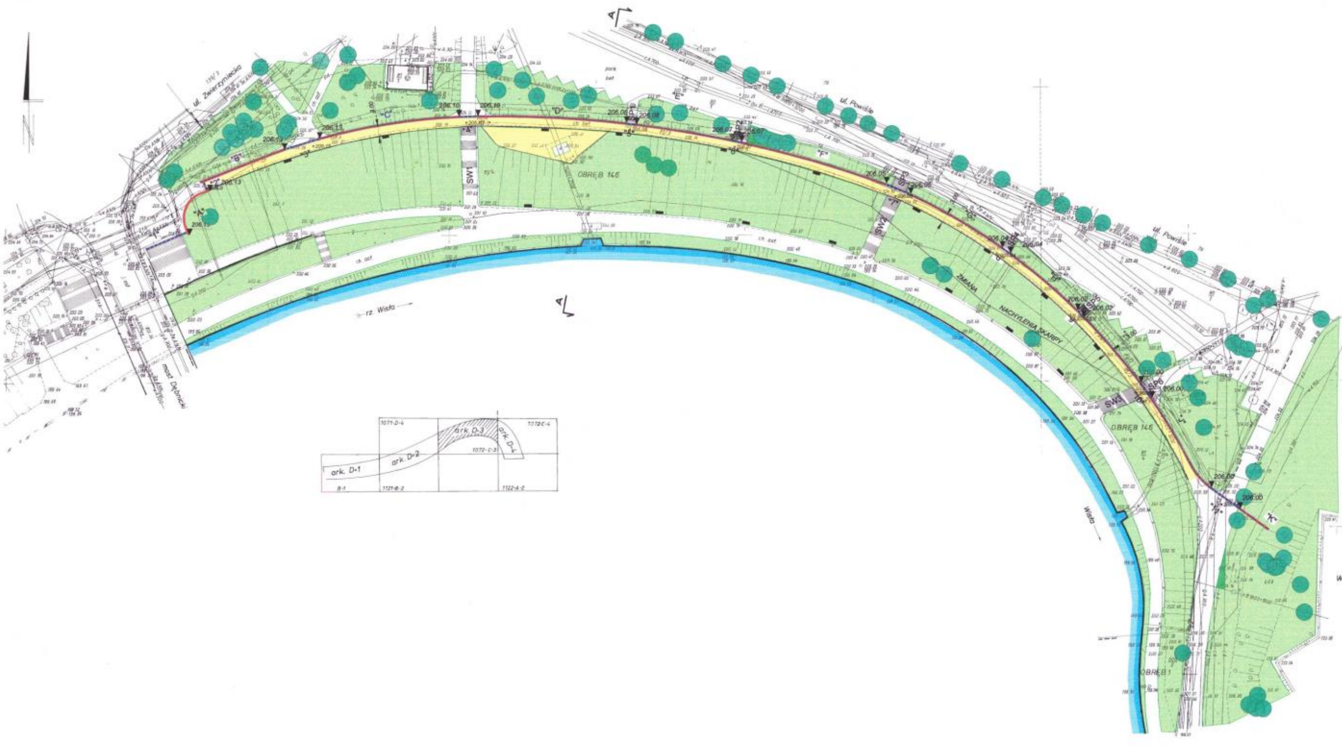


Schéma 2 : *Plan d'ensemble*

FICHE DE CAS
Renforcement de corps de digue des zones de non-recouvrement du val d'Orléans par technique de mélange en place sur les communes de Guilly et Sigloy (45)
Plan Loire Grandeur Nature

Auteur : Loïc GERVAIS (DREAL Centre)
Technique(s) mise(s) en œuvre : Tranchée de sol mixé (par voie sèche et par voie humide)

I. Descriptif de la digue initiale

- Longueur du tronçon de digue étudiée :
  - Guilly « Maison Vieille » : 110 m en voie sèche
  - Sigloy amont : 100 m en voie humide
- Date de construction : De début mars à fin avril 2013
- Type de digue : Digue « sèche » dans les 2 cas
  - Corps de digue majoritairement constitué de limon sur le site de « Maison Vieille » avec présence d'argile
  - Corps de digue majoritairement constitué d'argile sablo-limoneuse sur le site de Sigloy amont
- Données géométriques :
  - hauteur de la digue par rapport au terrain naturel côté val :
    - « Maison Vieille » : environ 5 m
    - Sigloy amont : environ 3,50 m
  - pente de talus : côté fleuve : de l'ordre de 1/1 à 3/2 (H/V)
    côté val (ou côté zone protégée) : de l'ordre de 3/2 à 2/1 (H/V)
  - largeur de crête : 7 à 10 m (selon si l'on prend en compte la banquette ou pas)

  Fonctionnement hydraulique du cours d'eau : Régime fluvial
  Le site « Maison Vieille » se situe au début d'un méandre, plus particulièrement sur la rive concave de celui-ci
  Le site de Sigloy amont se situe sur la rive concave du même méandre.
  Ces 2 tronçons de digue ne sont pas en contact direct avec la Loire.

- Données morpho-dynamiques :
  - distance de la digue par rapport au cours d'eau :
    - Guilly « Maison Vieille » : 20 m environ
    - Sigloy amont : 20 m à 50 m
  - intérieur ou extérieur de la courbe : rive concave d'un méandre pour les 2 sites
  - tendance d'évolution du niveau du lit du cours d'eau :
  - autres éléments (ex : anciens méandres…) :
  - sources (Référence d'étude ou nom de la personne) :

II. Désordres et mécanismes à l'origine des travaux étudiés

- Date ou époque d'apparition/évènement (si connus) : Discontinuités identifiées à la jonction de 2 zones de renforcement (côté val / côté Loire) souvent dues à une difficulté particulière telle une structure encastrée. Ces points de faiblesse peuvent remettre en cause l'intégralité du système de protection du val.
- Description factuelle :
  - Présences de maisons encastrées réduisant la largeur de la digue
  - Voie communale/chemin rural en crête de digue
  - Ouvrage sensible aux infiltrations en cas de crue majeure
- Mécanismes :
  - Risque d'érosion interne
- Scénario :
  - La circulation d'eau dans le corps de digue est propice à la formation de renard hydraulique, premier stade avant la rupture complète de la digue

III. Travaux étudiés

- Objectifs :
  - Réduction du risque d'érosion interne par l'amélioration de l'étanchéité de la digue
  - Limiter les écoulement internes en cas de crue

- Nouveaux ouvrages ou parties d'ouvrage mis en place :
  - Mise en œuvre d'un écran étanche sol-ciment sur une profondeur moyenne de
    - 8,00 m sur le site de « Maison Vieille »
    - 7,50 m sur le site de Sigloy amont

- Principales modifications des ouvrages existants :
  - En théorie, aucune modification structurelle
  - Limitation, au maximum, des perturbations d'écoulement aux interfaces

- Liste des techniques employées décrites dans des fiches "Techniques du GT" :
  - Site de « Maison Vieille » : Tranchée de sol mixé par voie sèche
  - Site de Sigloy amont : Tranchée de sol mixé par voie humide

- Données géométriques :
  - Profondeur moyenne d'écran : 8,00 m pour « Maison Vieille » et 7,50 m pour Sigloy amont
  - Largeur d'écran inférieure à 40 cm
  - Longueur d'écran réalisé :
    - Guilly « Maison Vieille » : 110 m
    - Sigloy amont : 100 m

- Travaux réalisés dans des : conditions normales, d'urgence ou d'extrême urgence :
  Travaux réalisés sans contraintes de temps si ce n'est celle du marché contractuel. Les accès aux 2 zones de travaux ont été fermés pour la durée des travaux.
- Coût des travaux : 440 000 €HT – 530 000 €TTC
- Date de début des travaux : début mars 2013 in situ (hors période de préparation)
- Durée des travaux : Période d'exécution de 3 mois + 2 mois de période de préparation
- Difficultés rencontrées : Habitat / Méconnaissance de la technique / Propreté
  Habitat : gestion des accès des riverains, contrôle bruit et vibrations

Méconnaissance de la technique : travaux à caractères expérimentaux nécessitant une adaptation de la surveillance de la maîtrise d'œuvre et du contrôle extérieur. Le tout a nécessitait la mise en œuvre de multiples essais de contrôle.
Propreté : la gestion du spoil n'a pas été concluante

- Enseignement des travaux :

Avis sur les travaux effectués (y compris adéquation de la technique au chantier à réaliser) : Travaux ayant permis d'avoir un premier aperçu de ces techniques innovantes pour les digues de Loire. A première vue, ces techniques sont adaptées aux milieux urbains (nuisances minimes comparées à d'autres techniques) et aux chantiers à durée limitée (rendement élevé).
Toutefois, sur ces chantiers, l'aspect propreté n'a pas apporté une entière satisfaction.

IV. Acteurs des travaux étudiés

- Maître d'ouvrage des travaux étudiés : Etat – Préfecture du Loiret – DREAL Centre-Val de Loire
  - Adresse : 5, avenue Buffon – BP 6407 – 45064 Orléans Cedex 2
- Propriétaire du tronçon de digue : DDT du Loiret
- Gestionnaire du tronçon de digue : DDT du Loiret / SLRT
- Maître d'œuvre des travaux étudiés : DREAL Centre / SLBLB
- Entreprise(s) : SOLETANCHE BACHY France

FICHE DE CAS
Réalisation d'un écran étanche dans la digue de Loire par mise en œuvre d'un rideau de palplanches sur la commune de Saint-Père-sur-Loire (45)
Plan Loire Grandeur Nature

Auteur : Loïc GERVAIS (DREAL Centre)
Technique(s) mise(s) en œuvre : Palplanches par vibrofonçage

I. Descriptif de la digue initiale

- Longueur du tronçon de digue étudiée : 285 m
- Date de construction : Du 24/01/2011 au 26/04/2011
- Type de digue : Digue « sèche », matériau principal, classe B
- Données géométriques :
  - hauteur de la digue par rapport au terrain naturel côté Loire : de 3,50 à 3,70 m
  - pente de talus : côté fleuve : 2/1 (H/V)
    côté val (ou côté zone protégée) : 2/1 (H/V) + 1 zone remblayée jusqu'à la crête de digue (présence d'habitations)
  - largeur de crête : 8 à 10 m

- Fonctionnement hydraulique du cours d'eau : Régime fluvial
  Au droit de la commune de Saint-Père-sur-Loire, la Loire est relativement rectiligne. Elle n'est pas en contact direct avec la levée

- Données morpho-dynamiques :
  - distance de la digue par rapport au cours d'eau : entre 150 et 200 m
  - intérieur ou extérieur de la courbe : à la fin d'une courbe et au début de la suivante
  - tendance d'évolution du niveau du lit du cours d'eau :
  - autres éléments (ex : anciens méandres…) :
  - sources (Référence d'étude ou nom de la personne) :

II. Désordres et mécanismes à l'origine des travaux étudiés

- Date ou époque d'apparition/évènement (si connus) : Secteur non-renforcé situé entre 2 zones de renforcement. Par ailleurs, une modélisation hydrogéologique a démontré qu'il existait un risque de renard hydraulique dans la couche d'alluvions propres situées sous la couche de limons supportant la digue.
- Description factuelle :
  - Présences d'une zone habitée entre la Loire et la levée
  - Présences de réseaux/canalisations traversants (au droit d'un carrefour routier)
  - RD 60 en crête de digue (menant d'Ouzouer-sur-Loire à Saint-Benoit-sur-Loire)
  - Franchissement de la levée par une voie ferrée toujours en activité (transport de marchandise)
  - Présence d'une banquette en crête de digue côté Loire, empierrée côté val
- Mécanismes :
  - Risque d'érosion interne

- Scénario :
  - La circulation d'eau sous la levée est propice à la formation de renard hydraulique, premier stade avant la rupture complète de la digue

III. Travaux étudiés

- Objectifs :
  - Limitation des écoulements sous la digue
  - Réduction du risque d'érosion interne par l'amélioration de l'étanchéité de la digue

- Nouveaux ouvrages ou parties d'ouvrage mis en place :
  - Mise en œuvre d'un écran étanche par mise en œuvre d'un rideau de palplanches sur une profondeur moyenne de 12,50 m

- Principales modifications des ouvrages existants :
  - En théorie, aucune modification structurelle
  - Ancrage du rideau de palplanches de 0,50 m dans le substratum

- Liste des techniques employées décrites dans des fiches "Techniques du GT" :
  - Mise en œuvre d'un rideau de palplanches par vibro-fonçage

- Données géométriques :
  - Profondeur moyenne d'écran : 12,50 m
  - Largeur d'écran inférieure à 2 cm (lame métallique)
  - Longueur d'écran réalisé : 285 m

- Travaux réalisés dans des : conditions normales, d'urgence ou d'extrême urgence :
  Les travaux se sont déroulés sous circulation alternée car l'axe routier devait rester ouvert pour les services de secours et les transports scolaires.

- Coût des travaux : 600 000 €HT – 710 000 €TTC
- Date de début des travaux : 24 janvier 2011 in situ (hors période de préparation)
- Durée des travaux : Période d'exécution de 3 mois + 2 mois de période de préparation
- Difficultés rencontrées : Habitat / réseaux / circulation / voie ferrée
  Habitat : gestion des accès des riverains, contrôle vibrations
  Réseaux : intervention des concessionnaires, gestion de la coactivité
  Circulation : emprise de travaux limitée due à la circulation alternée mise en place
  Voie ferrée : gérer l'avancement des travaux en fonction des prévisions de passage de train
- Enseignement des travaux :

Avis sur les travaux effectués (y compris adéquation de la technique au chantier à réaliser) : Technique générant des nuisances sonores importantes mais également source de vibrations non négligeable.

IV. Acteurs des travaux étudiés

- Maître d'ouvrage des travaux étudiés : DDT du Loiret
- Propriétaire du tronçon de digue : DDT du Loiret
- Gestionnaire du tronçon de digue : DDT du Loiret / SLRT
- Maître d'œuvre des travaux étudiés : DREAL Centre / SLBLB
- Entreprise(s) : DODIN Ile de France

SOGEA
SOGEA

FICHE DE CAS
Digue de la Polka – Moselle - Jouy-aux-Arches (57)

Auteur : Serge Lambert (Keller Fondations Spéciales)
Technique(s) mise(s) en œuvre : Paroi mince au coulis ciment

I. Descriptif de la digue initiale

- Longueur du tronçon de digue étudiée : 160 ml
- Données géométriques :
  - hauteur de la digue par rapport au terrain naturel côté val :
  - pente de talus : côté cours d'eau /rivière/canal/fleuve/mer :
    côté val (ou côté zone protégée) :

- Données morpho-dynamiques :
  - distance de la digue par rapport au cours d'eau :
  - intérieur ou extérieur de la courbe :
  - tendance d'évolution du niveau du lit du cours d'eau :
  - autres éléments (ex : anciens méandres…) :
  - sources (Référence d'étude ou nom de la personne) :

Le sol

- Des remblais de type argiles marneuses et sableuses
- jusque vers 4,80 m de profondeur par rapport au TN ;
- Des alluvions constituées de sables et graviers propres
- jusque vers 9,50 m de profondeur par rapport au TN ;
- Un substratum marneux au-delà.

II. Désordres et mécanismes à l'origine des travaux étudiés

- Date ou époque d'apparition/évènement (si connus) :
- Description factuelle :
  - Phénomènes d'érosion interne de la berge.

III. Travaux étudiés

- Objectifs :
  - Limiter les circulations d'eau entre la Moselle et un étang
    Le principe consiste à réaliser une tranchée qui est en permanence remplie par un coulis composé de bentonite et liant hydraulique qui permet, grâce à sa densité, de compenser la poussée des terres et de maintenir la tranchée "ouverte". C'est le coulis utilisé qui, en durcissant, va former le corps de la paroi. La paroi est réalisée par injection d'un coulis de liant hydraulique dans l'empreinte laissée dans le sol par un outil constitué d'un profilé métallique foncé à l'aide d'un vibrofonceur.

- Nouveaux ouvrages ou parties d'ouvrage mis en place :
  - Aménagement végétal

- Principales modifications des ouvrages existants :
  - Accès par piste cyclable de 2.50km – enrobés sur 3.00m delarge
  - Débroussaillage, étêtage des arbres et évacuation des bois morts
  - Réalisation d'une plateforme de 250m² pour base vie et matériel
  - Réalisation de la tranchée et du voile mince sur 160 ml et 7.00m de profondeur/PF
  - Reconstitution du corps de chaussée et enrobés
  - Aménagement anti-batillage des berges avec treillis coco et plantation de saules

- Liste des techniques employées décrites dans des fiches "Techniques du GT" :
  - Voile mince bentonite-ciment

- Données géométriques :
  - Epaisseur : 8 cm
  - Profondeur : 7 m
  - Linéaire : 160 ml
  - Surface : 1075 m²

- Travaux réalisés dans des : conditions normales, d'urgence ou d'extrême urgence
- Coût des travaux : 203 k€
- Date de début des travaux : novembre 2013
- Durée des travaux : 3 semaines
- Difficultés rencontrées :
- Enseignement des travaux :
  Controles :
  - *Études de sol et contrôles*
  - *Planche d'essai.*
  - *Enregistrement systématique des paramètres.*
  - *Réalisation de 9 essais de perméabilité sur éprouvettes de coulis en laboratoire.*
  - *Réalisation de 9 essais d'écrasement d'éprouvettes de coulis en laboratoire.*

  Avis sur les travaux effectués (y compris adéquation de la technique au chantier à réaliser) :

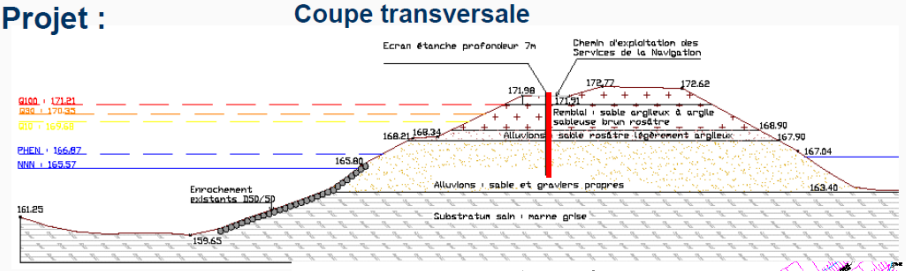
IV. Acteurs des travaux étudiés

- Maître d'ouvrage des travaux étudiés : SYNDICAT INTERCOMMUNAL POUR LE CANAL DE JOUY
- Maître d'œuvre des travaux étudiés : ARTELIA
- Entreprise(s) : Keller Fondations Spéciales

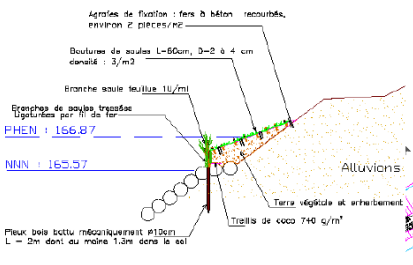
Zone voile mince :
Longueur : 160m
Profondeur : 7.00m
Surface 1075m²
Zone d'installation
chantier : 250m²
Accès piste cyclable
Long. : 2.50km
Largeur : 3.00m
La Moselle
Canal de la Moselle
Rue de Metz
Conforama
Dépot
D657
D11

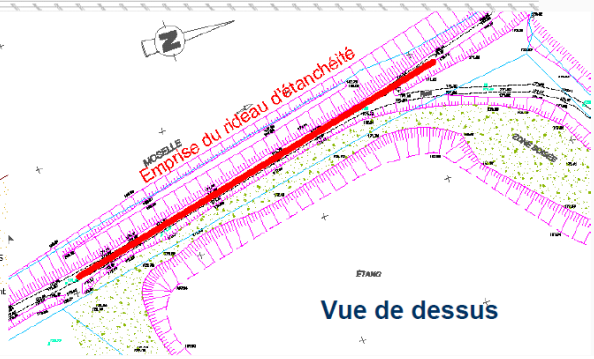
Projet :

Coupe transversale

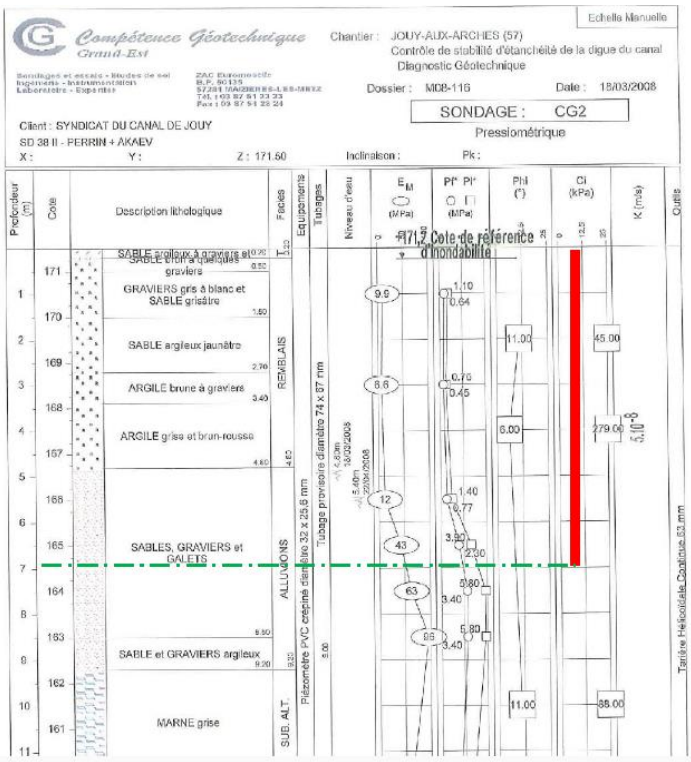


Aménagement végétal



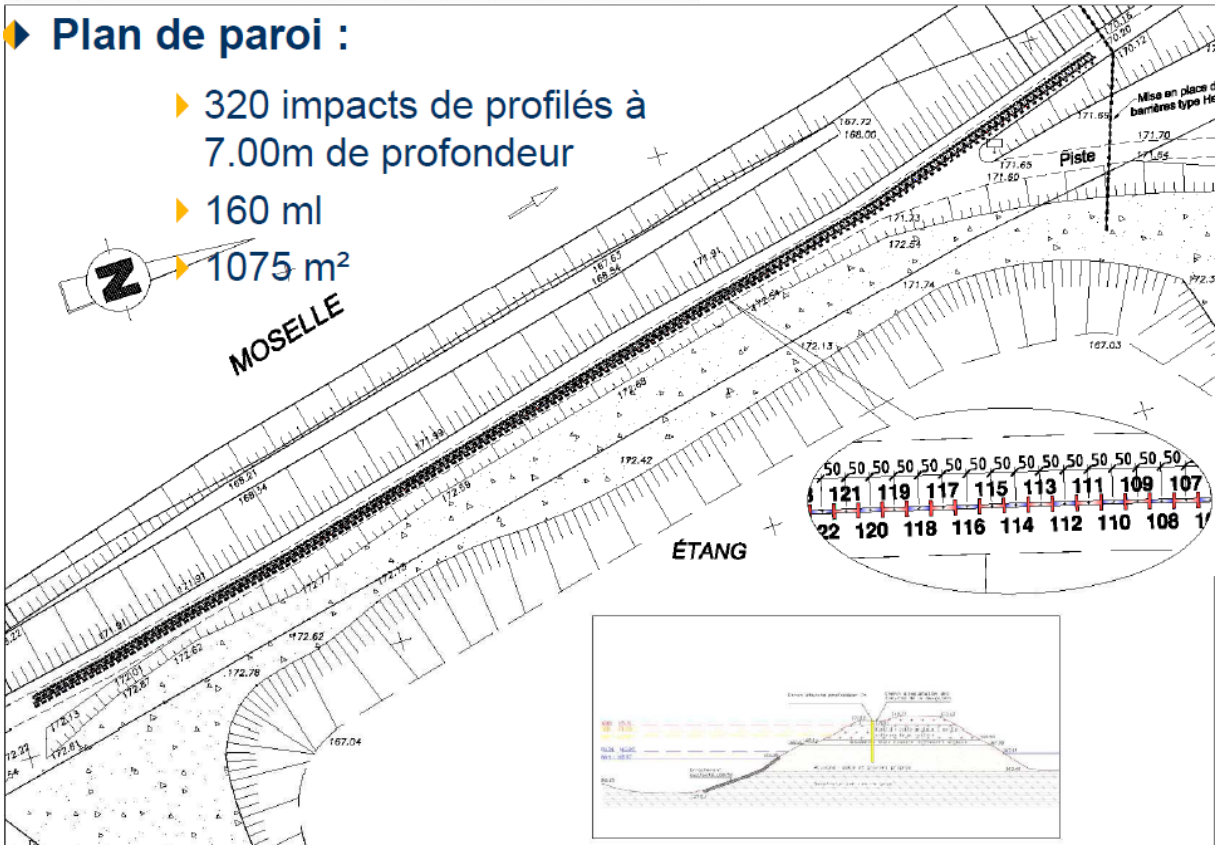


Vue de dessus



Plan de paroi :

- 320 impacts de profilés à 7.00m de profondeur
- 160 ml
- 1075 m²



Fiche de cas

Reconstitution en eau du talus et du pied de digue côté rivière par banquette de pied en tout-venant de carrière

Auteurs principaux : M. PINHAS (Symbhi), P. ARGENTIER (Symbhi)
Relecteurs : Y. BOUSSAFIR (Université Gustave Eiffel), R. TOURMENT (INRAE), J-F. FREZET (Egis), P. LEDOUX (CEREMA), T. MONIER (Artelia)
Finalisation : A. RULLIERE (INRAE)

Abstract/Résumé en anglais :

Many levees are old, relatively narrow and wooded… The toe of slopes are permanently under water, sometimes with great depths, due to scour holes (-3 to -7m). Remedial works on riverside are necessary to stabilize the slopes, which are too steep and often scoured.
These works consist in filling the scours and caves, to build a new slope or a berm, and a protection against erosion, all that with rip rap berms.

Introduction :

Définition :

Il s'agit de réaliser un remblai en eau, à l'aide d'un matériau de type sous-produit d'abattage 0/400mm (désigné souvent également sous le vocable « déchet de carrière ») qui vienne, selon l'objectif et la géométrie qui seront choisis, reconstituer d'une part le terrain d'assise de la digue avec son talus, d'autre part la partie amont du remblai de digue, l'ensemble pouvant faire l'objet ou non d'une protection contre l'érosion de surface. Le mode de mise en œuvre permet de prendre en compte des hauteurs de travail qui ne permettent pas d'opérer directement depuis la crête (Figure 1).

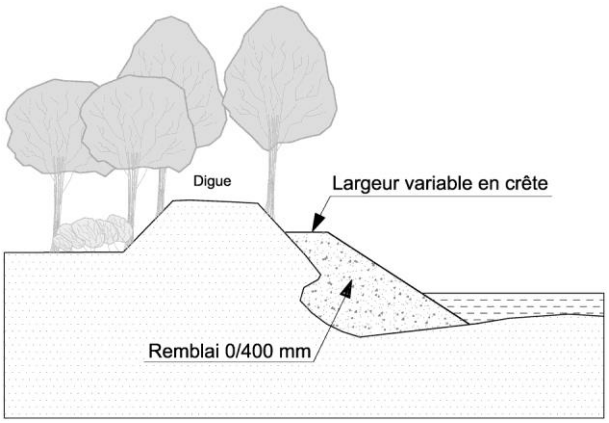


Figure 1 : Schéma de principe de reconstitution en eau du talus et du pied de digue côté rivière par banquette de pied en tout venant de carrière (Source : ADIDR)

Sujet de la fiche :

Les digues implantées en bordure du lit vif de la rivière (dites *« pied dans l'eau »*) sont très fréquentes dans les grands systèmes d'endiguement des rivières s'écoulant dans les vallées alpines. En effet, l'espace dédié aux activités humaines y étant souvent contraint, les occupants de ces vallées ont souvent repoussé l'ouvrage de protection au plus près de la rivière, c'est-à-dire au contact de cette dernière. Les digues « pied dans l'eau » sont donc la plupart du temps

des digues anciennes qui peuvent être caractérisées par la raideur des talus (3H pour 2V voire moins) et l'étroitesse de la crête (4 m). Enfin – et c'est ici qu'intervient l'intérêt de la technique présentée – l'enfoncement du lit lié aux extractions passées conduit à un faciès de talus caractérisé par les deux points suivants :

- un pied de talus (qui est en réalité la berge naturelle du lit) très dégradé, raide, source de nombreuses instabilités engageant l'ensemble du talus amont de la digue, voire de tout le corps de digue ;
- une grande hauteur entre la crête et le plan d'eau, d'une part, et *a fortiori* entre la crête et le fond du lit, souvent sur-creusé par les affouillements.

La pathologie résultant d'un tel faciès est un glissement d'ensemble du talus dans la rivière, tel qu'illustré par les Figures 2 et 3.

Figure 2 :
À gauche : Érosion du pied ayant entrainé le glissement du talus de berge et de digue. Le pied de l'ouvrage est en permanence sous eau – Isère RG/ La Rivière (Crédit photo : ADIDR-SYMBHI)
À droite : Érosion de pied entamant la stabilité du talus de la digue proprement dite – Isère RD/ Lumbin (Crédit photo : ADIDR-SYMBHI)

Figure 3 : Érosion longitudinale entre deux atterrissements sur Isère RG / La Rivière (Crédit photo : SYMBHI)

Ce glissement peut être déclenché suite à diverses sollicitations, le moteur du phénomène restant la stabilité précaire du talus amont et de sa fondation (berge). Ces sollicitations peuvent être :

- une érosion lente mais régulière de la berge, liée à un courant incident défavorable dans des courbes ou aux confluences
- une érosion lente mais régulière de la berge engendré par le mouvement plus ou moins lent des bancs, que ces derniers soient mobiles et à fleur d'eau, ou largement hors d'eau et soumis également aux érosions ;
- une érosion marquée suite à une montée d'eau (crue) ;
- un enfoncement général du lit (incision) ;
- une chute d'arbre(s) implanté(s) en berge, avec arrachement racinaire.

Se pose alors la nécessité de réparer l'ouvrage, c'est-à-dire de reconstituer la fonction de protection contre l'érosion externe de la digue, ainsi que son assise côté rivière.
La difficulté provient du fait qu'une partie de l'ouvrage, et en particulier son pied, est tombée dans la rivière et que s'y est substitué un recul de berge surmonté d'une facette de glissement du remblai de digue. Au premier abord, il s'agit de reconstituer la berge et le remblai de digue. La solution la plus simple, la plus fiable, et la moins coûteuse serait de s'éloigner de la berge pour construire un remblai de digue en retrait de la rivière, en remplacement du tronçon endommagé (recul de digue). Pour rationnelle qu'elle soit, cette solution est souvent difficile à mettre en œuvre lorsqu'il s'agit de désordres ponctuels. En effet :

- le foncier peut être contraint, et non disponible hors opération d'ensemble de type grand projet ;
- le raccordement avec les tronçons amont/aval de l'ouvrage s'avère délicat, et souvent peu hydraulique et génère des singularités dans les écoulements de crue qui peuvent nécessiter des compléments d'aménagement ou de protection ;
- le talus de berge (très raide) doit néanmoins être stabilisé sous peine de reculer régulièrement et de fragiliser le nouveau remblai : or le talutage s'avère consommateur d'espace, ce qui renforce les contraintes évoquées aux points précédents.

Par conséquent, on est souvent amené à reconstituer l'intégrité de l'ouvrage **en lieu et place** de la partie disparue.

Cette reconstitution partielle de l'ouvrage présente une réelle spécificité lorsqu'elle concerne des travaux à réaliser **en eau,** c'est-à-dire lorsque le pied du talus est **sous eau** en permanence, la profondeur d'eau pouvant aller de -1m à -8m sous le fil d'eau d'étiage ou de basses eaux, qui est la période généralement choisie pour ces travaux.

La technique traditionnelle qui consiste à exécuter les travaux à l'abri d'un batardeau présente dans un tel contexte un certain nombre d'inconvénients :

- l'emprise du batardeau s'ajoute à celle des travaux, ce qui contraint localement l'écoulement, avec les risques d'érosion et de submersion ;
- la mise en œuvre renchérit notablement le coût des travaux. Or rappelons qu'il s'agit ici de réparations ponctuelles dont on cherche à priori à limiter le coût ;
- la mise en œuvre en eau peut rapidement s'avérer délicate et nécessiter de l'enrochement lourd pour assurer la tenue dans le courant ;
- le principe du batardage est de permettre de travailler à sec. Or dans un lit en eau, qui plus est avec un fond graveleux, le pompage devient vite nécessaire. Les coûts risquent alors de s'envoler, ce qui sort de l'épure de tels travaux ;
- sensibilité du batardeau aux crues et risques (lié à ces crues) pour le chantier et la digue en amont de ce dernier (surélévation des niveaux)

- batarder peut conduire à renvoyer l'écoulement vers la berge opposée selon une incidence conduisant à accroitre les risques d'érosion ;
- enfin, dans les rivières à fort charriage, la présence d'un batardeau peut contribuer à fortement engraver l'amont : c'est ce qui a été constaté sur l'Isère en 2020, au droit du chantier du nouveau pont de La Buissière (38), où la présence prolongée d'un batardeau a contribué à engraver de façon problématique le bief amont sur quelques km.

Une autre technique, consistant à travailler depuis la crête de digue pour reconstituer le pied, peut trouver elle aussi rapidement ses limites du fait de la hauteur de travail imposée à la pelle mécanique. En effet, les pelles dites « à grand bras » ne peuvent travailler efficacement à plus de 8 m sous leur niveau d'appui (en général la crête de digue). Le travail sous eau devient alors hasardeux, tant pour la mise en œuvre de remblai que d'enrochements.

C'est pourquoi la technique très simple de « **banquette de pied en tout venant de carrière** » développée par l'AD-Isère dans le cadre de sa maitrise d'œuvre réalisée en interne (agrément travaux) a pour objet d'effectuer de tels travaux à l'aide d'une méthode rustique, économique, et dont le retour d'expérience sur 15 à 20 ans a montré l'efficacité. La méthode décrite permet des interventions rapides et en eau, ce qui est particulièrement utile pour un gestionnaire de digue.

Fonctions principales :
Reconstitution sous eau du pied de talus par un remblai en matériau *insensible à l'eau* (on définira plus loin ce qui est entendu par *insensible à l'eau*), doté de très bonnes caractéristiques mécaniques (portance, tassement, perméabilité adaptée, résistance à l'érosion) permettant ensuite de compléter si besoin par une protection plus lourde (en partie basse) ou plus légère (végétalisation en partie haute). Sécurisation du pied de digue par un remblai suffisamment résistant pour faire face à tout évènement hydraulique, sous réserve de contrôle et de complément éventuel post évènement.

Fonctions secondaires :
Création d'une plateforme de circulation à mi-hauteur côté rivière (promeneurs, pêcheurs, mais aussi surveillance et entretien de l'ouvrage).
Contrôle des fosses d'affouillement en extrados : les dernières peuvent être comblées lors de la mise en œuvre de la banquette, le comblement permettant la mise en place de sabots d'enrochement calés à des profondeurs raisonnables.

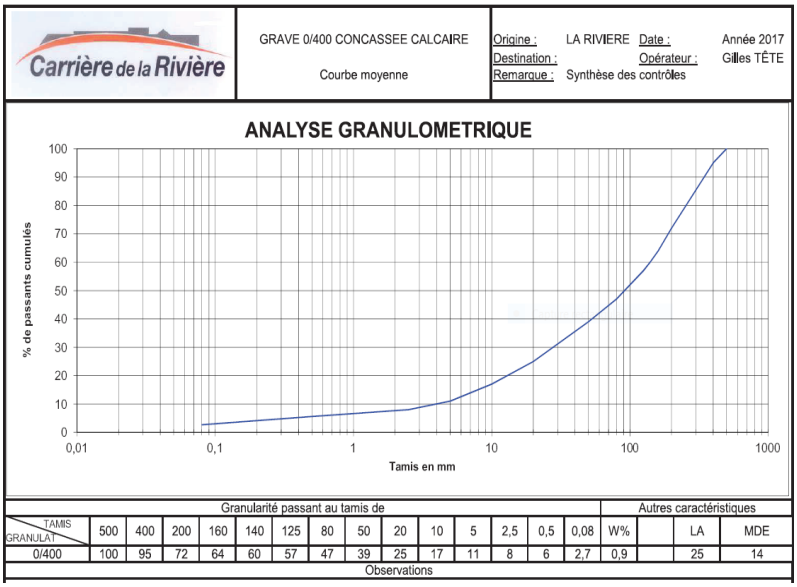
Cette technique de réparation peut éventuellement, selon le contexte et le mode de mise en œuvre, améliorer l'étanchéité de la digue. Nous invitons cependant à la prudence car le renforcement de l'étanchéité n'est pas le but premier de cette technique et le lecteur trouvera plus d'information concernant le confortement ou la réparation de la fonction d'étanchéité dans les FT 3.X.

Description :

Performances à atteindre :
Le matériau dit « 0/400mm » correspond à du brut d'abattage de carrière. L'intérêt réside dans sa rusticité : peu de criblage, pas de concassage. Les matériaux varient suivant leur origine (calcaire le plus souvent, mais également 0/200 en schistes, ou 0/400 en gneiss). La granulométrie type est représentée par un D10/D50/D90 respectivement de 5/100/400 mm (voir figure 4), ce qui en fait un matériau grossier, mais à granulométrie suffisamment continue pour favoriser une bonne mise en place et une bonne compacité après un éventuel compactage. Ces matériaux, au sens du GTR, peuvent être classés D31.

Par rapport à un remblai lambda, l'avantage de ces matériaux sont :

- leur bon comportement sous eau : pas de gonflement/rétraction, conservation d'un bon angle de frottement (à l'inverse de matériaux type sablons ou limons ou comportant des fractions argileuses significatives).
- leur mise en œuvre sous eau n'est généralement suivie d'aucune période de chargement de consolidation (en rivière, toute période d'attente en situation intermédiaire expose l'ouvrage aux crues). Pourtant, le REX sur 20 ans n'a jamais mis en évidence des tassements significatifs(c'est-à-dire visibles et (ou)préjudiciables).



Granularité passant au tamis de															Autres caractéristiques			
TAMIS / GRANULAT	500	400	200	160	140	125	80	50	20	10	5	2,5	0,5	0,08	W%		LA	MDE
0/400	100	95	72	64	60	57	47	39	25	17	11	8	6	2,7	0,9		25	14
Observations																		

Figure 4 : courbe granulométrique 0/400 (Source : ADIDR)

Dans le cas où on décide de reconstituer le **corps de digue** dans la continuité de la banquette, on peut éventuellement attendre quelque temps que s'opèrent les éventuels tassements (non constatés à ce jour sur Isère, Drac, ou Romanche), vérifier la compacité au pénétromètre, puis monter les couches supérieures en les compactant. Dans ce dernier cas, les valeurs de densité après compactage, mesurées au gamma densimètre, sont de l'ordre de 2.25, ce qui dénote une très bonne compacité (et aptitude au compactage) [digue du Replat / St Quentin s/Isère/ 2013].

Notons enfin la bonne perméabilité de la banquette : les mesures effectuées au double anneau après compactage donnent une perméabilité de 10^{E}-3 (essais EGIS 2013/ digue du Replat). Ceci la protège des glissements lors de la décrue, en favorisant un drainage intergranulaire en rapport avec la cinétique de baisse des niveaux..

En ce qui concerne les autres mécanismes de détérioration, les choses peuvent être résumées comme suit :

- **érosion interne** : en matière de fuite de fines suite à un lessivage lié à l'écoulement longitudinal, l'érosion interne reste limitée, d'une part vu la répartition granulométrique du matériau, et d'autre part au vu du REX qui n'a jusqu'à présent pas mis en évidence de tassements préjudiciables-voire simplement repérables à l'œil. Si on se place au niveau du corps de digue, l'interface avec le matériau en place sera contrôlée par un géotextile (qui garantit l'absence de migration dans les deux sens transversaux). Néanmoins, puisque ce matériau peut se substituer au matériau d'origine de la digue, une réflexion relative aux gradients admissibles en résultant peut être nécessaire selon la géométrie et les matériaux en place de cette dernière. Cette réflexion, menée sur les ouvrages du SYMBHI et pour les valeurs de remplacement du SYMBHI (1/3 de la largeur au maximum) ne nous a jusqu'alors pas conduits à renforcer l'étanchéité amont ou à épaissir le talus aval.

- En terme de **stabilité au glissement**, les bonnes caractéristiques « frottantes » de ce matériau nous renvoient aux préconisations classiques relatives à la mise en œuvre de carapaces sur remblais : fruit minimum de 3H2V, voire de préférence 2H1V, l'ensemble restant tributaire, comme pour toute digue « pieds dans l'eau » de l'évolution des fonds et des anticipations que l'on peut en faire.
- En terme de résistance à **l'érosion externe**, ce matériau autorise deux types de choix :
  - **Choix n°1** : le gestionnaire estime que, vu le contexte (géométrie de l'ouvrage, enjeux, position fonctionnelle de la banquette, accès), il n'est pas nécessaire de garantir (au sens de la réglementation) l'absence de désordre sur **un** évènement, et il s'autorise alors un coefficient de sécurité égal ou inférieur à 1 (au sens du rapport [contrainte admissible/contrainte imposée]. La barrière de sécurité consiste alors dans la capacité de détection et d'intervention post désordre (en pratique : bien connaitre et suivre ses ouvrages, via le SIRS –Digues par exemple, avoir les marchés de travaux et la compétence *ad hoc* pour entreprendre rapidement les réparations). Les recharges et reprises sont généralement aisées. A défaut d'une réparation lourde (plus coûteuse en ressources, temps et impacts), ce type de réparation permet d'implanter un élément (la banquette en 0/400), au pire des cas très progressivement fusible, entre l'écoulement et le corps de digue. Dans le cas de digues historiques au talus amont souvent très raide, ce pied d'ouvrage reconstitué, sera toujours plus stable que le talus d'origine.
  - **Choix n°2** : c'est un choix plus classique conduisant à prendre une marge de sécurité. Dans ce cas, une analyse classique des contraintes doit être menée qui peut conduire, là encore selon le contexte hydraulique, soit à laisser la banquette telle quelle, soit à la protéger par une carapace jusqu'au module (ou au Qn), soit à végétaliser la fraction hors d'eau, soit à faire un mix de ces possibilités. Le REX du SYMBHI met en évidence des banquettes végétalisées qui ont résisté à des vitesses de l'ordre de 3.5 m/s dans des contextes d'écoulement à faible incidence. En général, dans les courbes, la partie basse est équipée d'un enrochement parafouille.

Utilisation :

Cette technique est particulièrement adaptée à la consolidation/réparation/reconstitution du pied de digue côté rivière lorsque ce dernier est « pieds dans l'eau » non seulement en hautes eaux (cas des rivières divagantes) mais également pour les débits ordinaires, ce qui rend aléatoires les techniques traditionnelles de travail à l'abri d'un batardeau.

La simplicité de mise en œuvre et le faible facteur d'échelle rend cette technique aussi bien opérationnelle sur un linéaire conséquent que sur des réparations ponctuelles (quelques dizaines de mètres), qui sont souvent les plus délicates à mettre en œuvre.

C'est pourquoi ce type de confortement, très économique, concerne particulièrement le gestionnaire de digues qui s'est donné les moyens d'intervenir en direct selon une chaine opérationnelle courte : maitrise d'œuvre interne (donc agrément digues et petits barrages), marchés à bon de commande.

Variantes :

Cette technique peut également être utilisée côté zone protégée, en cas de dégradation du talus suite à un glissement ou à la présence de fouisseurs rendant nécessaire la purge du talus et sa reconstitution. Dans ce cas, après mise en œuvre d'un géotextile filtrant à l'interface avec le terrain d'origine, on peut constituer très facilement un massif drainant dont la géométrie et la fonction couvrent une gamme allant de la simple reconstitution à la confection d'une butée de pied pour les talus les plus hauts et les plus raides.

Alternatives :

Ce sont les techniques traditionnelles de confortement de berge :

- soit depuis le haut de talus et avec des blocs pour combler la fosse d'affouillement ;
- soit depuis le bas lorsqu'il est possible de travailler à sec en détournant les écoulements ;
- soit par une pelle sur un ponton ou une barge.

Dimensionnement :

Principe :

Le dimensionnement découle de la mise en parallèle de l'état dégradé du talus (berge comprise) et du profil objectif qui est visé après réparation. Ceci autant en ce qui concerne le profil en travers que la vue en plan, qui intègre les points cruciaux que sont : l'empiètement dans le lit, le caractère « hydraulique » du tracé, les raccordements amont/aval à l'existant. Viennent ensuite se greffer les paramètres plus classiques de résistance à l'érosion externe imposés par le contexte hydraulique.

Paramètres nécessaires :

- hauteur crête/fond du lit : au-delà de 8 à 9m, même avec une pelle à grand bras, il est nécessaire de réaliser une banquette intermédiaire. Les volumes d'apport doivent être calculés en projetant les différentes phases intermédiaires de terrassement. Le niveau de la banquette intermédiaire résulte de l'optimisation du volume initial approvisionné et du choix de sa largeur. Aucune évacuation n'est en principe à prévoir, hormis les purges de mauvais matériaux en place ;
- morphodynamique locale : appréciation des vitesses (hors extrados et incidences marquées, le remblai 0/400 tient sans problème jusqu'à 3m/s. Le REX sur l'Isère montre que des vitesses de l'ordre de 4m/s en crue ont pu être atteintes sans dommages). Lorsqu'on estime nécessaire d'en mettre, les perrés de bloc sont rarement montés au-delà de la cote du terrain naturel. Dans tous les cas, l'analyse de la présence ou non d'anciens perrés enfouis ou perchés est un élément important des cotes de calage du remblai et (ou) de la protection de bloc associée ;
- enrochements : nous renvoyons leur spécification et mise en œuvre à la fiche dédiée (FT 7.1).

Éléments de conception :

Relevé topographique détaillé (courbes de niveau, figuré des singularités et discontinuités, arbres et autres revêtement visibles, donc nécessité d'une vérification terrain si LIDAR) complété par un relevé bathymétrique.

Modèles disponibles :

Dans la plupart des cas, seul le modèle hydraulique fournira des indications sur les contraintes (vitesses) et les niveaux (vérifications éventuelle de l'absence d'impact pour les demandes d'autorisation). Les caractéristiques mécaniques du matériau (angle de frottement, perméabilité après compactage), alliées à des profils en rapport (fruit minimum de 3H2V), peuvent ne pas rendre nécessaire la mise en œuvre de calculs de stabilité (ce qui est communément le cas lors de la mise en œuvre de protections type enrochement) . Seul le cas d'une stabilisation côté zone protégée ou bien lorsque la banquette amont se substitue à une partie non négligeable du corps de digue pourra utilement se trouver être validée par des éléments de calcul relatifs à la stabilité (glissement, érosion interne),

Aspects pratiques (chantier, CCTP) :

Cahier des charges :

Le CCTP doit indiquer à l'entreprise le type de mise en œuvre qui est attendu et avec quel matériau. Les spécifications du matériau porteront sur sa nature rocheuse (dureté, non gélivité :critères identiques à de l'enrochement) et sa répartition granulométrique (D10/D50/Dmax). On se rapportera à la courbe granulométrique de la Figure 4, qui peut être adaptée. En effet, de cette mise en œuvre dépendent les prix, les délais d'exécution et l'outillage déployé. De plus, il est important de valoriser la réduction de l'aléa de mise en œuvre qu'offre une telle technique, ce qui aura pour effet, côté entreprise, de moins provisionner le risque (et donc l'incidence sur le coût).

Dans le cas où un compactage des couches supérieures sera demandé (implication fonctionnelle dans le corps de digue), un objectif de densité minimum de 2 au gamma densimètre, ainsi qu'une vérification par essai de plaque avec 50mPa<EV2<100mPa seront les paramètres à atteindre.

Bien veiller à vérifier les voies d'accès pour l'approvisionnement : en effet, si ce type de mise en œuvre ne nécessite pas d'aire de stockage, elle ne permet pas les retournements. Il convient donc de bien anticiper le circuit et les éventuels croisements sur l'ouvrage (utilisation des surlargeurs).

Chantier :

Prescriptions générales

L'emprise du chantier peut être limitée aux seules voies d'accès. Il n'y a pas d'aire de stockage. Les rotations de camion laissent le temps de la mise en œuvre par la pelle ou le chargeur. Un tel chantier mobilise une pelle et 2 à 3 camions (selon la distance à la carrière). L'absence de batardeau réduit le risque pour le chantier et son environnement. Par contre, un tel chantier nécessite une bonne habitude des travaux en rivière, tant du côté des chauffeurs (recul sur banquette) que du pelleteur (risque de basculement de la pelle en rivière en cas de fausse manœuvre). Une personne en veille sur la berge peut être nécessaire. L'avantage d'un tel chantier est d'être facilement adaptable au fur et à mesure de son exécution, ce qui permet de faire face aux imprévus quant à l'état des talus de berge et de digue lors des terrassements, ainsi que vis-à-vis d'une bathymétrie généralement peu précise

Mise en œuvre

- Variante n°1 : Mise en œuvre d'une banquette en 0/400 mm sans protection complémentaire

Phase 1 : Confection de la piste à mi-hauteur (Figure 5).

Une rampe d'accès est d'abord réalisée, de longueur et largeur adaptée aux engins d'approvisionnement (camions semi-remorque ou 8x4). La confection de la plateforme initiale est la phase la plus délicate et peut nécessiter quelques blocs de stabilisation en face amont, le temps d'accumuler hors d'eau un volume suffisant. Si l'occasion se présente, on peut se mettre dans l'ombre hydraulique (en aval) d'un banc existant. Pour plus de détails, on se reportera au paragraphe « Traitement des points singuliers ».

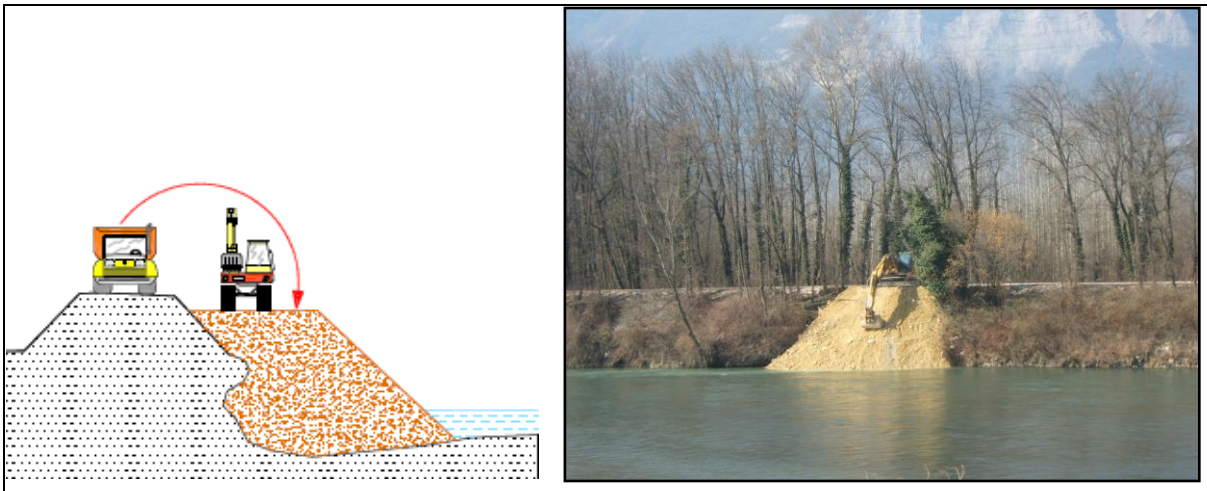


Figure 5: Confection de la rampe et de la plateforme initiale (Source : ADIDR-SYMBHI)

La banquette est réalisée d'amont vers l'aval comme suit : une semi-remorque recule sur l'embryon de piste ainsi créé (Figure 6). La largeur minimum de la piste est de 6 à 7m, avec un cordon de matériau en chasse roue pour sécuriser le recul des camions. Le camion décharge le matériau sur l'extrémité provisoire du remblai (et non directement dans l'eau) et c'est la pelle mécanique (ou un chargeur) qui viendra pousser les matériaux dans l'eau (Figure 6 et Figure 7) : on évite ainsi une ségrégation des matériaux et une perte de fines dans la rivière (turbidité non souhaitable : on est à l'étiage). La banquette est calée 1,50 m au-dessus du fil d'eau. La longueur maximum d'une telle piste est de 300 m (c'est en effet la distance maximum raisonnable pour faire progresser un camion en marche arrière sur une plateforme étroite. Au-delà, il faut une nouvelle rampe. Les rampes peuvent être maintenues si une plateforme intermédiaire est ménagée, ou démontée dans le cas contraire.
La purge des matériaux instables du talus ainsi que le retrait de la végétation gênante se font à l'avancement.

Figure 6 : Approvisionnement en 0/400 par semi-remorque et mise en eau par pelle mécanique (Crédit photo : ADIDR)

Figure 7 : Confection de la rampe, puis de la piste (Source : ADIDR)

Phase 2: Mise au gabarit

La pelle mécanique, travaillant sur la piste, met cette dernière au gabarit choisi. Le travail se fait d'aval vers l'amont (Figure 8). La largeur est donc généralement réduite et les matériaux en excédent servent à rehausser le remblai à la cote projet.

Figure 8 : La pelle met la piste initiale à une largeur de 7 m environ (crédit photo : ADIDR-SYMBHI)

Une largeur finale de 4m permet une circulation ultérieure (Figure 9). On remarquera que les talus sous eau et hors d'eau sont dressés selon le fruit choisi, l'ensemble étant favorisé par un bon angle de frottement du matériau.

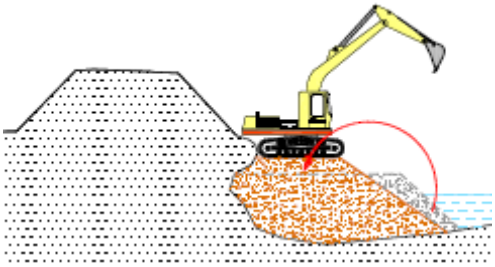


Figure 9 : mise au gabarit de la piste à 4m (Crédit photo ADIDR)

En reculant, la pelle peut laisser jusqu'à une largeur de 2m en crête du remblai : c'est la largeur minimum pour le passage d'un compacteur (Figure 10).

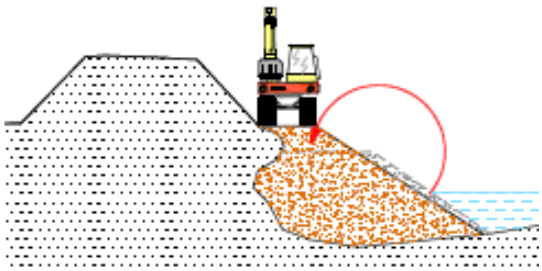


Figure 10 : mise au gabarit à 2m et purge du talus (Crédit photo : ADIDR-SYMBHI)

<u>Phase 3 :</u> Finitions

Le talus de la banquette peut être végétalisé pour sa partie située au-dessus du module de la rivière (terre végétale + hydro-ensemencement). Le talus de la digue peut également être nettoyé, retaillé puis végétalisé (Figure 11).

Figure 11 : Banquette calée au niveau du terrain naturel sur Isère amont (Crédit photo : ADIDR-SYMBHI)

Dans le cas où on souhaite une finition jusqu'en crête, cette dernière peut se faire avec une pelle travaillant depuis la crête et remblayant avec un remblai terreux qui sera ensemencé par la suite (sur Figure 12 ci-dessous : une pelle à grand bras)

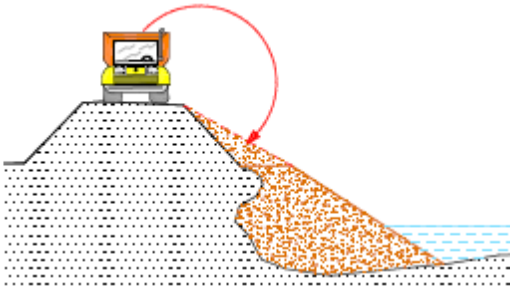


Figure 12 : finition du talus jusqu'en crête (Crédit photo : ADIDR-SYMBHI)

- Variante n°2 : Mise en œuvre d'une banquette en 0/400 mm avec protection en enrochement

Lorsqu'on décide de mettre en œuvre une protection contre le talus, la phase 2 est menée jusqu'à une cote altimétrique permettant de garder une largeur minimum de 6 à 7m de façon à autoriser l'approvisionnement en marche arrière des camions ou semi-remorques d'enrochement (Figure 12). Pour assurer la sécurité d'une telle manœuvre, il faut disposer des blocs « chasse-roue » à intervalles réguliers sur le bord extérieur de la piste (voir Figure 13 ci-dessous).

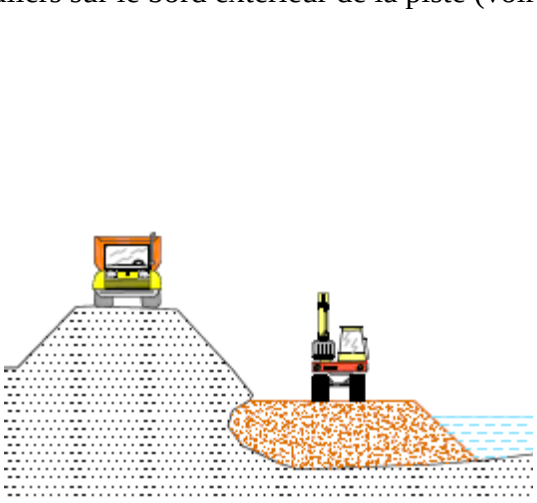


Figure 13 : À gauche : mise en forme banquette avant pose (Source : ADIDR)
À droite : Blocs chasse roue en crête (Crédit photo : ADIDR-SYMBHI)

Une pelle mécanique est positionnée en extrémité aval du remblai ainsi taillé; le camion recule jusqu'à la pelle pour déverser devant elle les enrochements sur la plateforme (Figure 14)

Figure 14 : approvisionnement en blocs sur la banquette et reprise par la pelle (Crédit photo : ADIDR-SYMBHI)

Les blocs seront repris et ainsi positionnés au godet contre le talus, sous eau et hors d'eau. Des sabots d'enrochement pourront être constitués si nécessaire, sous la forme d'une réserve de pied à l'horizontale du pied de talus, sur le fond du lit (sans excavation). Le contrôle de la mise en place des blocs par le conducteur de la pelle se fait très correctement avec les capteurs et le contrôle électronique des angles de travail dont sont munies les pelles mécaniques modernes (Figure 15).

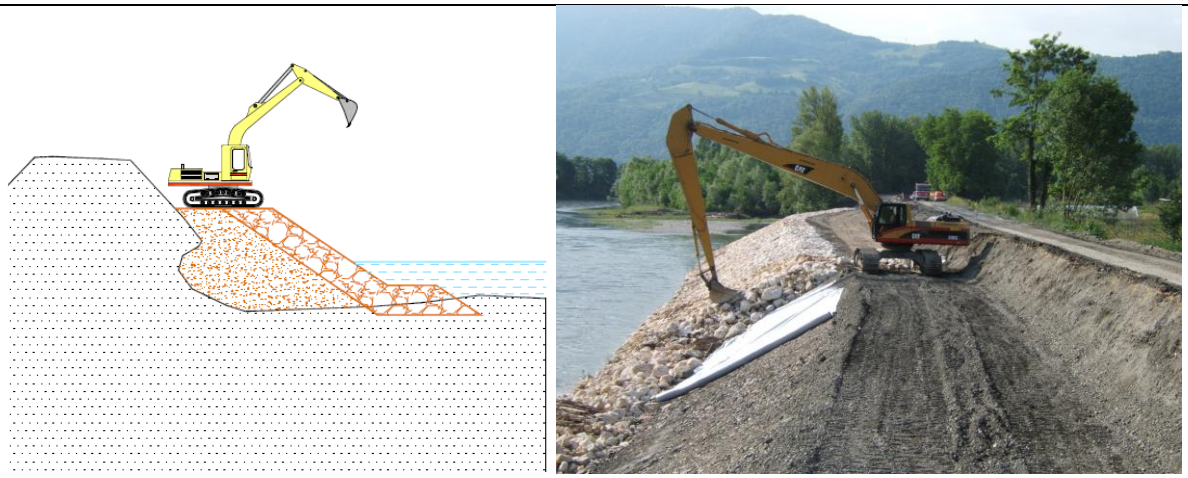


Figure 15 : Pose des blocs d'aval vers l'amont. Approvisionnement en blocs par l'amont (Source : ADIDR-SYMBHI)

Finitions : Il peut être intéressant de conserver une plateforme intermédiaire, qui permet de réduire les vitesses locales à des valeurs compatibles avec un enherbement effectué par hydro-ensemencement après mise en place de remblai terreux (Figure 16).

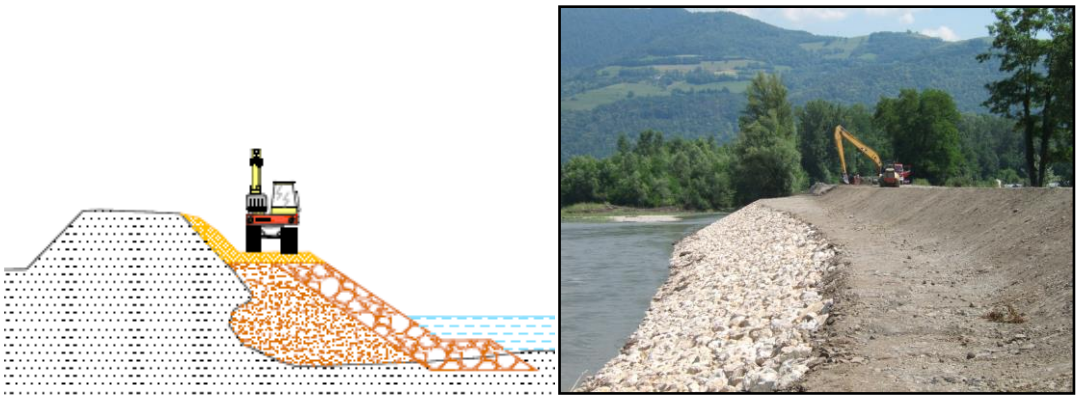


Figure 16 : Finition de la banquette (Source : ADIDR)

Matériaux et matériel nécessaire :

- un chargeur ;
- une pelle généralement à grand bras (V : -13m sous les chenilles ; H :+8m de la cabine) ;
- quatre semi-remorques minimum (10/12 m3) ou 8x4 non articulé (6/8 m3) ;
- 2 personnes sur place, plus les chauffeurs.

Règlementation :

Ce type de travaux est soumis à minima à la rubrique 3.1.4.0 de la loi sur l'eau (déclaration si L<200m, sinon autorisation). Rien ne distingue la mise en œuvre de 0/400 de la pose d'enrochement. Qu'on soit en procédure de déclaration ou d'autorisation, il importe de faire le tour des impacts potentiels

Impacts :

- Hydraulique :

L'emprise hydraulique d'une telle réparation est, pour une rivière large d'environ 100 m comme l'Isère ou le Drac, suffisamment modeste pour que le problème de surélévation de la ligne d'eau pendant et après travaux ne se pose pas, d'autant qu'il s'agit souvent de remplacer un élément préexistant (talus de berge) emporté par l'érosion externe : la comparaison entre les profils en travers

d'origine (=historiques) et le profil projet permet d'argumenter en ce sens. Le calcul hydraulique de l'impact n'est donc généralement pas à faire.

- Environnement

En général, la turbidité liée au chantier reste très ponctuelle (le 0/400 est *poussé* et non *déversé*) car les terrassements sont peu intrusifs dans le lit. Ensuite, la meilleure résistance à l'érosion externe de ce matériau comparée à celle d'un remblai de tout venant autorise souvent à ne se contenter que d'une finition végétalisée (enherbement), ce qui en diminue l'impact environnemental au sens large.
Enfin, ce mode d'intervention présente l'avantage pour les usagers de la digue (promeneurs, cyclistes...) de permettre, dans certaines configurations, la conservation d'un rideau de végétation en crête de digue.

Contrôles d'exécution :

Matériau : tout-venant de carrière 0/400 mm ("brut d'abattage)

Le matériau, dont les spécifications sont exposées plus haut, doit provenir d'une carrière agréée ou d'un site de prélèvement autorisé (cône d'éboulement par exemple). Une courbe granulométrique sera fournie par l'entreprise, ainsi que la certification en matière de non gélivité et de dureté de la roche d'origine (critères identiques à ceux de l'enrochement). Tout déséquilibre entre la fraction fine et la fraction grossière est à proscrire.
La conformité du matériau proposé sera avantageusement constatée sur site. Un tas « témoin » conforme peut être constitué en carrière (comme il est fait avec les blocs témoins lorsqu'il s'agit d'enrochement). Il est important de vérifier régulièrement, lors des approvisionnements, la présence des éléments les plus gros, car ce sont eux qui constituent la charpente résistant aux sollicitations hydrauliques. Comme en matière d'enrochement, il faut se prémunir d'une dérive des caractéristiques au fil des approvisionnements.

Vitesse d'avancement :

Ce type d'intervention s'effectue en général avec un nombre très réduit d'engins de chantier : une pelle mécanique ou un chargeur pour la mise en œuvre des matériaux et une flotte de camions pour l'approvisionnement. La vitesse d'avancement du chantier dépend donc essentiellement de la cadence d'approvisionnement en matériaux ; cette dernière est conditionnée par les deux éléments suivants : distance du site d'approvisionnement (carrière, dépôt de l'entreprise…) et nombre de véhicules affectés quotidiennement au transport.
Outre le volume global de l'ouvrage à réaliser, les conditions bathymétriques au droit des travaux (présence éventuelle d'une fosse d'affouillement) peuvent également influencer significativement la vitesse d'avancement du chantier.

Suivant le type d'intervention et en fonction de l'éloignement du site d'approvisionnement, les vitesses d'avancement* se situent dans les intervalles suivants :

- banquette en remblai 0/400mm = 50 à 110 ml par semaine (soit 1000 à 2500m^3/semaine) ;
- banquette en remblai 0/400mm + enrochements = 20 à 40 ml par semaine ;
- réparation ponctuelle (remblai 0/400m + enrochements) = 15 à 40 ml par semaine.

*y compris approvisionnement des matériaux, accès, mise en œuvre, talutage…

Traitements des points singuliers :

Les raccordements amont et aval à l'existant constituent les points délicats des réparations ponctuelles. Généralement, le secteur à réparer se présente soit comme une « dent creuse » au sein d'un linéaire où les atterrissements stabilisent encore les talus (Figure 3 ci-dessus), soit dans le prolongement d'une réparation antérieure. Par conséquent, on cherchera la plupart du temps à se raccorder sur ces parties

en place, qui présentent en général des talus ou des volumes propices à la transition avec le remblai de la réparation.

- **Le raccordement amont** doit être particulièrement soigné car d'une part il peut être utile de conserver la rampe d'accès après travaux, et, surtout, sa vulnérabilité engage celle de la réparation (Figure 16). La face amont du talus de la rampe sera souvent renforcée par des blocs (Figure 18).

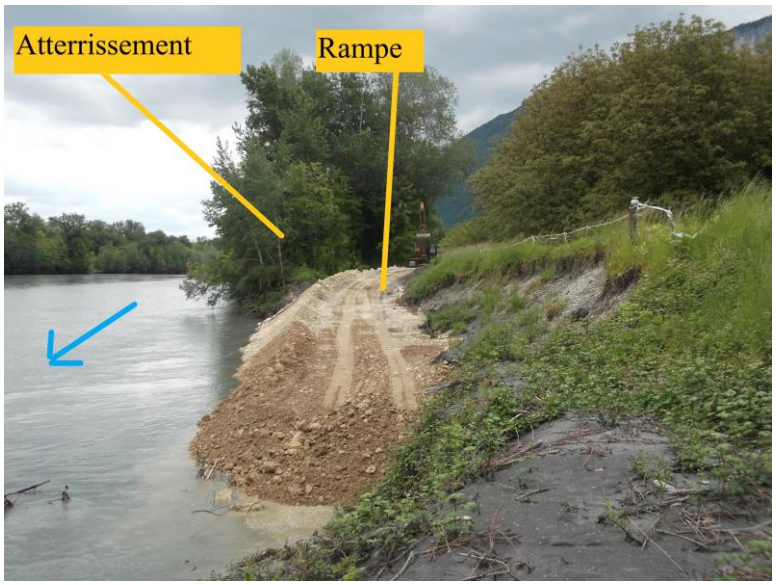


Figure 17 : Isère RG La Rivière- Confection de la rampe (Crédit photo : ADIDR-SYMBHI)

Figure 18 : Isère aval RD Pt de St Quentin/ rampe d'accès protégée en amont (Crédit photo : ADIDR-SYMBHI)

- **Le raccordement aval** (Figure 19) peut se refermer également sur l'atterrissement aval, lorsqu'il s'en trouve un. Sinon, il se fait au mieux en quart de cône ou en sifflet, de préférence en allant jusqu'au perré historique lorsque ce dernier existe. Le savoir-faire du pelliste y est pour beaucoup.

Figure 19 : Isère RG La Rivière/raccordement aval sur un banc (Crédit photo : ADIDR-SYMBHI)

Une surveillance régulière après les hautes eaux s'impose pour suivre l'évolution possible des atterrissements d'ancrage : c'est le travail du gestionnaire de digues.

<u>Remise en état du site</u> :
La remise en état d'un tel chantier est assez classique : réparation des pistes d'accès, démontage des plateformes éventuelles de stockage. Les rampes d'accès à la banquette mi-talus pourront être utilement conservées pour inspection et entretien. La végétalisation des talus doit être incluse dans les travaux proprement dits.

Annexes :

Petite réparation sur anse érosion localisée : Isère aval RG La Rivière [Profil 186] réalisé en 2015. Linéaire : 47ml. Remblai : 1700 m^3 Enrochement : 900 m^3. Coût total HT : 65 000 euros. Maitrise d'œuvre : interne AD-Isere Drac Romanche (Figures 18, 19, 20 et 21).

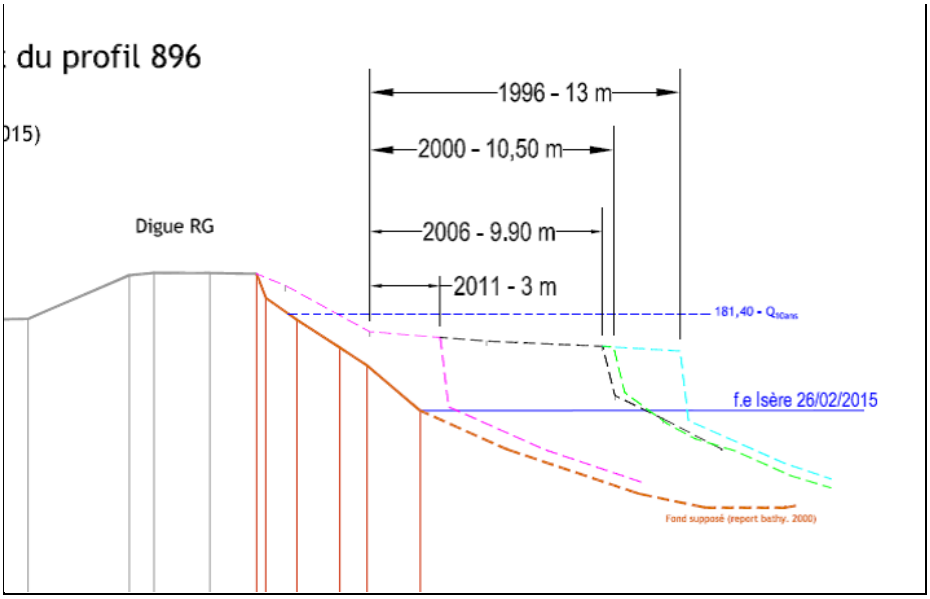


Figure 20 : Situation avant travaux avec tracé du recul progressif de la berge au fil des années (crédit ADIDR)

Figure 21 : Situation avant travaux. On mesure le recul de la berge (Crédit photo : ADIDR-SYMBHI)

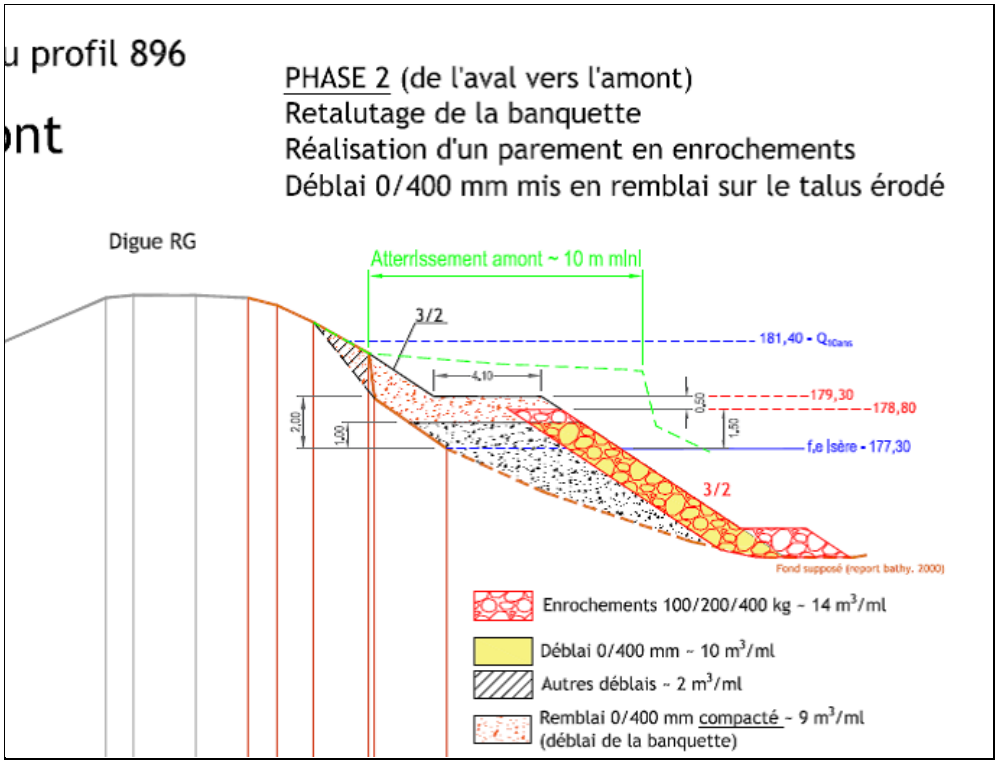


Figure 22 : Coupe de la réparation (crédit ADIDR)

Figure 23 : Situation après travaux : banquette 0/400 (phase 1) puis retalutage (phase 2) pour mise en place du perré et compactage de la finition.(Crédit photo : ADIDR-SYMBHI)

FICHE DE CAS
Confortement des digues des Amidonniers/Sept-Deniers (Digues D12, D13 et D14)
Raccordement entre le nouveau parement béton des digues en remblai et une digue type mur béton
Garonne – Toulouse (31)

Auteur : V. GILI (DDT31)

I. RENSEIGNEMENTS GENERAUX

1. Identification du tronçon concerné par les travaux :

- Nom des tronçons : **D12, D13 et D14 ; rive droite**
- Catégorie de digue : remblai revêtue d'un parement côté fleuve
- Département : 31
- Commune(s) : Toulouse
- Nom du cours d'eau ou/et du fleuve : Garonne
- Tronçon situé en : Occitanie/Haute-Garonne
- Identifiant(s) et nom(s) du/des tronçon(s) (code SIOUH) : FRD0310017
- Longueur des tronçons : respectivement 1421 m (D12), 1011 m (D13) et 895 m (D14)
- Linéaire concerné par les travaux (PK amont / PK aval) : 4+721 à 6+142 (D12), 6+142 à 7+153 (D13) et 7+153 à 8+048 (D14)
- Classe réglementaire de l'ouvrage : B en attendant le reclassement en A du système d'endiguement.

- Maître d'ouvrage des travaux étudiés : DDT de la Haute-Garonne
- Gestionnaire du tronçon, si différent du maître d'ouvrage : Cf. maître d'ouvrage.
- Propriétaire, si différent du maître d'ouvrage : Cf. maître d'ouvrage.
- Maître d'œuvre des travaux étudiés : groupement de bureaux d'études Arcadis/ISL
- Service de contrôle : DREAL Occitanie

2. Zone protégée :

- Nom de la zone : Amidonniers/Sept-Deniers/Ginestous
- Département : 31
- Enjeux :
  - ✓ nombres d'habitants permanents : 15670 habitants*
    * selon Plan Inondation Communal Version 2015 et en référence à la crue historique de 1875
  - ✓ voies de communication importantes : A620/A621 (mais vulnérabilité pas complètement établie au vu des caractéristiques de ces voies en grands remblais)
  - ✓ autres enjeux importants (à détailler) : 5 écoles, 1 STEP, 1 établissement hospitalier, zones d'activité

II. DESCRIPTION DE LA CONSTITUTION INITIALE DE LA DIGUE

- Date de construction : Années 60.
- Type de digue : remblai revêtu d'un parement béton
- Données géométriques :
  - Hauteur de la digue par rapport au terrain naturel côté val :
    - ✓ hauteur minimale pour le tronçon : 0 m (en considérant que les zones de grand remblai adossé constituent le terrain naturel)
    - ✓ hauteur maximale pour le tronçon : 6,40 m environ
  - Pente de Talus :
    - ✓ côté cours d'eau : principalement 1H/1V avant travaux pour D12 et D14 ; 1H/4V pour D13
    - ✓ côté val : 1,7H/1V à 1,4H/1V
  - Largeur de crête : variable 3 à 5m + zones avec remblai adossé

- Matériaux constitutifs : limons sableux et sables limono-graveleux (hétérogène)

- Travaux importants antérieurs au projet et date : Renforcement et réhausse du parapet dans certaines zones (1997)

- Autres caractéristiques de la digue :
  - Plusieurs zones avec remblai adossé de plusieurs dizaine de mètres
  - D12 : une section de 300 m avec mur de soutènement côté val
  - D14 : une zone dépourvue de palplanche en pied côté rivière

Dispositifs de protection :

	Talus côté val	**Crête**	**Talus côté rivière**	**Pied côté rivière**	**Risbermes Val Rivière**	
Palplanches				x		
Pieux en bois						
Enrochements libres						
Enrochements liés						
Gabions						
Matelas Reno						
Dalles de béton			x			
Perré en pierres						
Enherbement	**x**					
Technique végétale						
Grillage anti-animaux fouisseurs						
Autres : revêtement type enrobé bicouche		x				

Dispositifs d'étanchéité :

- Présence d'étanchéité interne ☐ oui ☒ non ☐ inconnu
  Type(s) :
- Présence d'étanchéité côté cours d'eau : ☒ oui ☐ non ☐ inconnu
  Type(s) : Drain à clapet pour D13
- Digue étanche dans la masse : ☐ oui ☒ non ☐ inconnu
  Type(s) :
- Dispositifs d'étanchéité fondations : ☐ oui ☒ non ☐ inconnu
  Type(s) :

Dispositifs de drainage :

Présence : ☒ oui ☐ non ☐ inconnu
Type(s) :

Présence et nombre de singularités :

Vanne	☒ Présence	☐ Inconnu	Nombre : 5	
Conduite	☐ ☒ Présence	☐ Inconnu	Nombre :	
Pertuis	☐ Présence	☐ Inconnu	Nombre :	
Câble	☐ Présence	☐ Inconnu	Nombre :	
Passages batardables	☐ Présence	☐ Inconnu	Nombre :	
Déversoir	☐ Présence	☐ Inconnu	Nombre :	Longueur(s) :
Route	☐ Présence	☐ Inconnu	Nombre :	
Maison	☐ Présence	☐ Inconnu	Nombre :	
Autres (à préciser)	☐ Présence	☐ Inconnu	Nombre :	

Fonctionnement hydraulique du cours d'eau :

- Débit et fréquence de la crue de dimensionnement : 7500 m³ : environ 300 ans (crue 1875)
- Débits de crues à diverses périodes de retour : cf. page suivante.

Fonctionnement morpho-dynamique du cours d'eau :

- Distance de la digue par rapport au cours d'eau : 4 m mini (à l'étiage)

Fréquence approximative			25 ans (crue 2000)	100 ans	Référence 300 ans (crue 1875)	Exceptionnelle 600 ans (crue 1875 + 50 cm)
Débit de pointe			5100 m3	5100 m3	7500 m3	8250 m3
Côte / quelle référence ?					D12 : 137,5 à 136 m D14 :	
Hauteur d'eau / quelle référence disponible ?			4,38 m (station Pont-Neuf)	/	7,55 m (station Pont-Neuf)	8,05 m (station Pont-Neuf)
Hauteur de surverse (-)			D12 : 137,5 à 136 m D13 : 136 à 135,4 m D14 : 134,5 à 132,1 m hors parapet + 1m avec parapet			
Ligne d'eau disponible					D12 : 135,8 à 134,4 m D13 : 134,4 à 133,7 m D14 : 133,5m à 132,3 m	
Hydrogramme en annexe ?			Cf ci-dessous	Cf ci-dessous	Cf ci-dessous	non
Référence d'étude(s) hydrologique(s)			Etudes CACG (1988) et BCEOM (1994)			
Référence d'étude(s) hydraulique(s)			Etudes hydrauliques de la Garonne à Toulouse, Sogréah (2003 et 2006)			

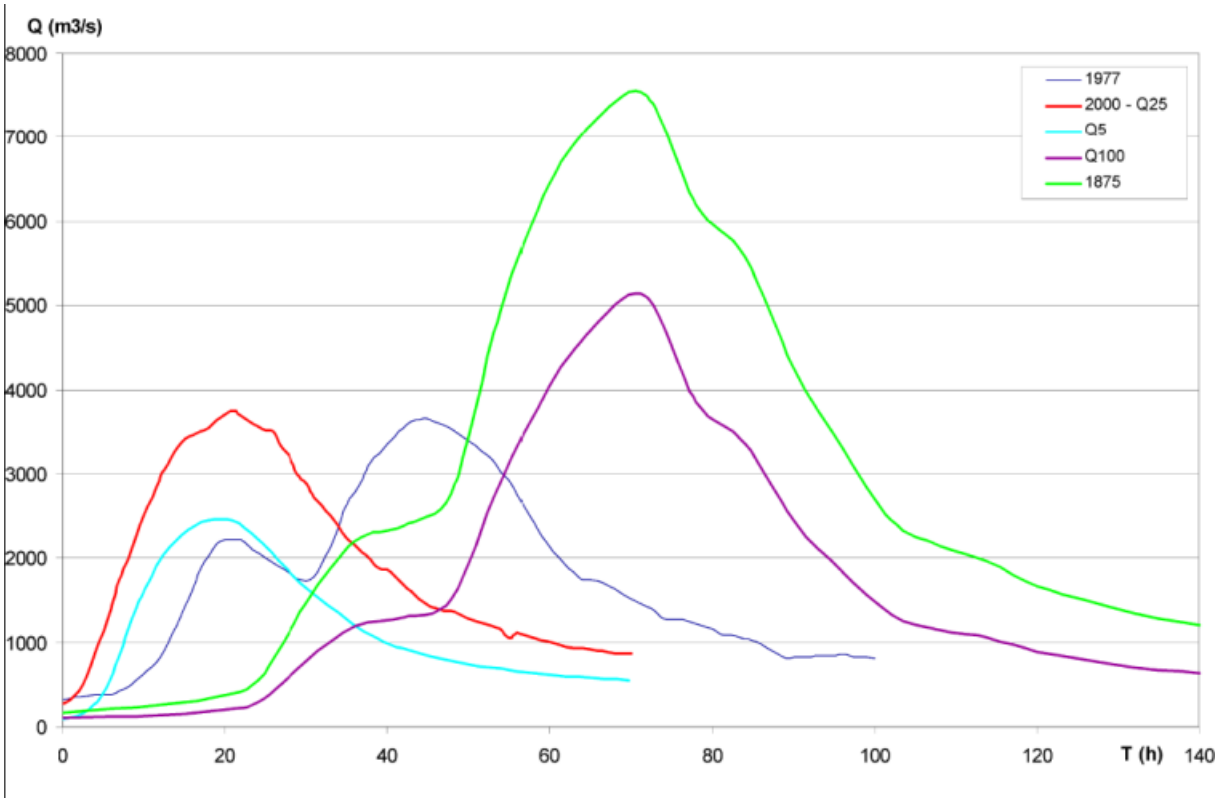


Figure 1 : Hydrogrammes des crues de 1977, 2000, 1875 et de périodes de retour 5 ans et 100 ans (Sogréah, mars 2006)

III. DESORDRES, MOTIVATION DU RENFORCEMENT

1. Désordres à l'origine des travaux et/ou motivation du renforcement :

- Surveillance en crue : ☐ oui ☒ non ☐ inconnu
- Renforcement motivé par résultat d'un diagnostic : ☒ oui ☐ non ☐ inconnu
- Constat des désordres (qui, quand) : EDF/GETEC, 2005 ; ISL(VTA annuelle)
- Description factuelle :

  Concernant D12 et D13 :
  - côté fleuve, désordres substantiels et les plus conséquents (disjointement de dalle, végétation sur le parement,...etc)
  - côté val, développement intempestif de végétation, présence de terriers, suspicions d'affaissements,...etc

  Concernant D13, dispositif de drainage défectueux (clapets manquants, drains obstrués,...etc)

2. Mécanismes supposés de dégradation :

- Scénario : principalement instabilité par érosion interne pour les digues en remblai
- Existence d'un diagnostic : ☒ oui ☐ non
- Expert en charge du diagnostic : EDF/GETEC, 2005 ; Fondasol, 2005 : Egis, 2009 ; Arcadis/ISL, 2012

- Etudes préalables au projet de travaux :

☐ Historique ☒ Hydraulique/hydrologie ☒ Géotechnique/géophysique
☒ Inspection visuelle ☒ Morphodynamique

IV. TRAVAUX FAISANT L'OBJET DE LA FICHE

Préambule :

Les principaux objectifs des travaux en confortement entrepris sur D12 et D14 sont :

- *la réalisation d'un nouveau masque béton étanche côté fleuve et son ancrage par des clous scellés dans un sol cohérent (molasse)*
- *la reprise du système de drainage du remblai*
- *le traitement du talus côté zone protégée avec notamment la mise en place d'un grillage anti-fouisseur.*

Cette opération a consisté également à remettre à niveau le dispositif de drainage de D13 (curage et remplacement des clapets anti-retour).

La vocation de la présente fiche est d'illustrer le raccordement entre le nouveau parement béton des digues en remblai (D12 et D14) et la digue type mur béton (D13) dans le cadre de la réfection de la digue en remblai.

La suite de la fiche est donc dédiée aux dispositions mises en œuvre pour assurer ces transitions entre ouvrages hétérogènes.

1. Type de travaux :

☐ Réparation ☒ Confortement ☐ Gros entretien

2. Objectifs de la solution retenue:

Assurer la continuité de l'étanchéité entre des ouvrages de nature et pente différentes

3. Descriptif des travaux :

- réalisation d'une engravure dans le mur poids béton
- mise en place du joint waterstop et scellement au mortier
- raccordement effectué par béton armé coulé en place

4. Caractéristiques géométriques générales :

Hauteurs approximatives du talus :

- 8,86 m (hors parapet) au droit du raccordement de D12 à D13
- 8,19 m (hors parapet) au droit du raccordement de D13 à D14

5. Alternatives envisagées :

En fonction des gradients et de la dilatation du béton attendus, une alternative pourrait être la pose d'un joint hydrogonflant en substitution du joint waterstop

Motif du choix effectué : joint hydrogonflant moins performant mais ne nécessite pas d'engravure dans le mur béton (cas de D12 et D14 : technique utilisée à l'interface entre le parement béton et les ouvrages traversants d'évacuation des eaux pluviales)

6. Détails des travaux :

- Principes de conception et de réalisation

- réalisation d'une engravure réalisée dans le mur poids béton de l'ordre de 20 cm
- contact béton/béton avec joint waterstop vertical scellé au mortier dans cette engravure et également pris dans le béton de la transition
- raccordement effectué par béton armé coulé en place (technique adaptée à une pente évolutive et ne pas créant pas d'arête vive propice à la formation d'embâcles et à des dégradations en crue)
- adaptation du pas entre les lignes de clous (afin de ne pas risquer d'affecter le mur-poids) et de la longueur du dernier plot de parement béton (pour tenir compte de la longueur coulée en place en remplacement des pré-dalles remplies de béton à l'arrière)

- Méthode d'exécution retenue par l'entreprise pour le cas du raccordement D13/D14 (issue du DOE de D14, document « PEX Raccordement D13-D14 ») :
  - démolition de l'escalier au BRH pour obtenir une épaisseur d'environ 20cm
  - réalisation d'une saignée à la tronçonneuse thermique dans le parement existant de D13 d'environ 8cm de large
  - mise en place du joint waterstop dans la saignée et scellement au mortier 731
  - mise en place à la pelle des deux nappes de treillis sur toute la hauteur et des U de fermeture tous les 40cm
  - maintien du joint waterstop parallèle au parement : ligature au treillis
  - positionnement du Zemdrain sur la peau de coffrage
  - mise en place à la pelle du coffrage par levée de 2,5m et calage par des filières
  - bétonnage par levée de 2,5m

- Points d'attention et spécifications particulières

Cahier des charges :
- agrément par le maître d'œuvre des fiches produit du joint, du mortier, du béton, du ferraillage, etc.
- béton de classe C30/37
- mortier de scellement sans retrait
- qualité du coffrage : propreté des outils coffrants,...etc.
- dispositions concernant les conditions de stockage du joint avant utilisation : endroit plutôt frais, couvert et opaque ; exposition au soleil limitée ; éviter toute pollution d'huile ou de graisse

Chantier :
- pose du joint : respect des conditions de stockage mentionnées dans le CCTP et dans la fiche produit, contrôle de l'état du joint (non déformé), choc à éviter avec engins et outils, placement soigné de la bande (béton régulier, etc.)
- point d'arrêt particulier pour chaque levée : contrôle de la qualité du béton et du coffrage formalisée par une fiche de suivi visée par le contrôle interne de l'entreprise et par le maître d'œuvre

7. Informations sur les travaux :

- Travaux terminés ou en projet :

☒ Travaux terminés ☐ Projet de travaux finalisé ☐ Autres à préciser

- Date du projet : août 2017

- Entreprise(s) :
  - Nom : GTM Sud-Ouest TP GC

- Date début travaux (confortement global) : 09/04/2018
- Date fin des travaux (confortement global) : 20/12/2019
- Conditions de réalisation (notion d'urgence) :

☐ Extrême urgence ☐ Urgence ☒ Conditions normales

- Travaux soumis à : ☐ Autorisation ☒ Déclaration ☐ Procédure d'urgence
- Date de l'arrêté : 02/08/2017 pour D12 et D13 ; 29/12/2017 pour D14
- Coût effectif des travaux :
  projet global de confortement : 11 378 680,02 € HT

- Retour d'expérience sur le vieillissement de l'ouvrage :
  Pas suffisamment de recul. Toutefois, s'agissant d'un point singulier, il convient de mettre en place une surveillance particulière permettant de vérifier l'absence de déformation continue de la zone : suivi au moins visuel des fissures et écoulements éventuels ; surveillance du bon état des drains à proximité.

8. Aspects sociologiques

- Impact du choix de la solution :
  en phase travaux, fermeture notamment de la crête de digue qui constitue un lieu de promenade et qui constitue un axe structurant de la circulation des modes doux ; toute autre solution aurait eu le même impact.
  en phase exploitation, RAS.
- Réaction ultérieure de la population :
  Accueil favorable, essentiellement lié à la réouverture des lieux de promenade
  N.B. les travaux de confortement constituaient avant tout une attente des promoteurs étant donné certaines prescriptions provisoires du PPRi.

9. Annexes :

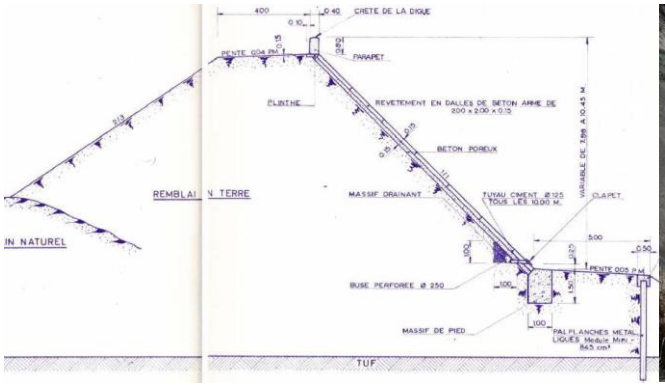
- Plans et coupes après travaux
  - ✓ mise en annexe d'un plan de situation : ☒ oui ☐ non
  - ✓ mise en annexe d'un plan d'ensemble : ☐ oui ☒ non
  - ✓ mise en annexe de coupes types : ☒ oui ☐ non
  - ✓ autres documents en annexe (à préciser) : ☐ oui ☐ non
    schémas de principes Types :

- Photos : état initial et réalisation des travaux

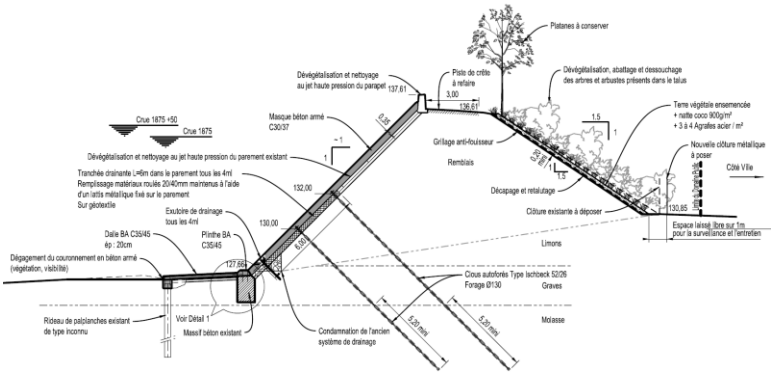
Annexe 1 : plan de situation

Annexe 2 : coupe-type et photos des ouvrages en section courante

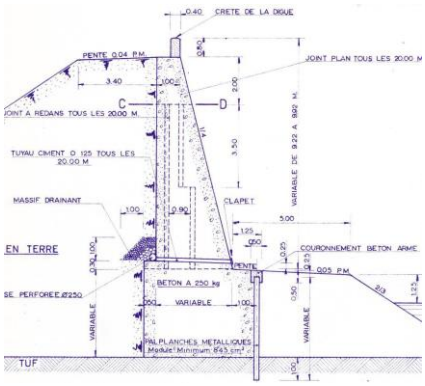
- D12 et D14 avant confortement :



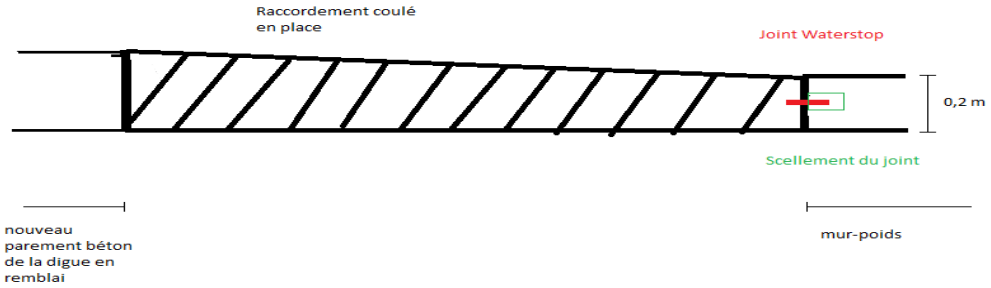
- D12 et D14 après confortement (coupe projet)



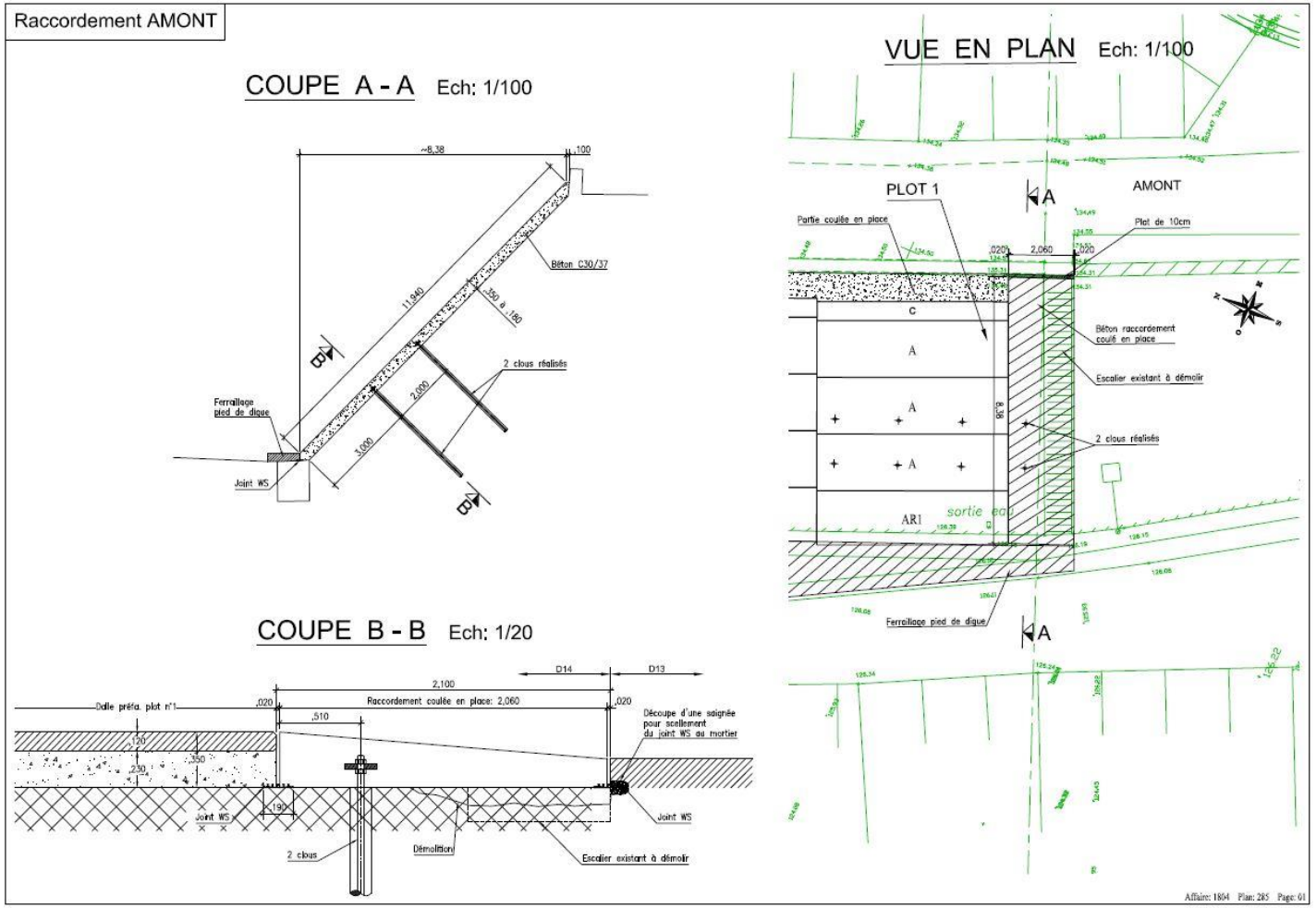
- D13



Annexe 3 :
schémas de principe- schéma grossier (vue en plan)
- schéma grossier (vue en plan)



- ex. de la transition D13-D14, issue du DOE de D14 (document « coffrage ferraillage des raccordements »)



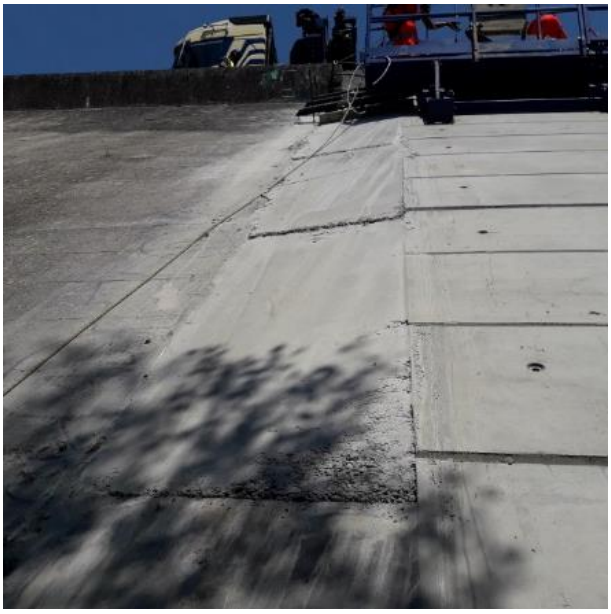
Annexe 4 : photos des transitions

1) Raccordement D12 sur D13 :

a) Etat Initial

b) Vue du dernier plot avec coffrage sur la partie coulée en place :

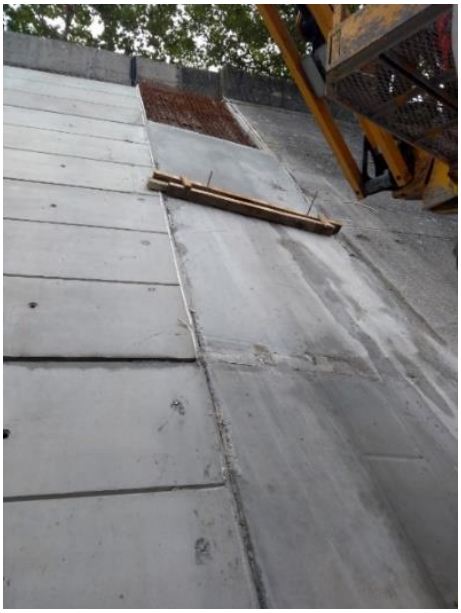
c) coffrage de la partie haute du raccordement et rendu final de la partie basse



2) Raccordement D14 sur D13 :

a) Réalisation de la saignée dans D13

b) raccordement coulé en place



FICHE DE CAS
Travaux spécifiques au droit d'une zone de transition pour raccorder un écran étanche sur la digue de la Blanchisserie et l'ouvrage hydraulique de l'ancienne écluse de la Jonction – Loire - NEVERS (58) – PAPI Agglo Nevers

Auteur : A. ROST (DDT de la Nièvre)

Technique(s) mise(s) en œuvre : écran étanche en soil-mixing, voile béton, paroi en coulis bentonite, rejointoiement de perrés maçonnés.

I. Descriptif de la digue initiale

- Longueur du tronçon de digue étudiée :
  La levée de la Blanchisserie immédiatement en aval de celle du canal de la Jonction s'étend depuis l'ancienne écluse en amont jusqu'à son raccordement à la rue de la Jonction en aval, le tout sur environ 400m.
- Ouvrage de fermeture de l'ancienne écluse sur environ 10m.

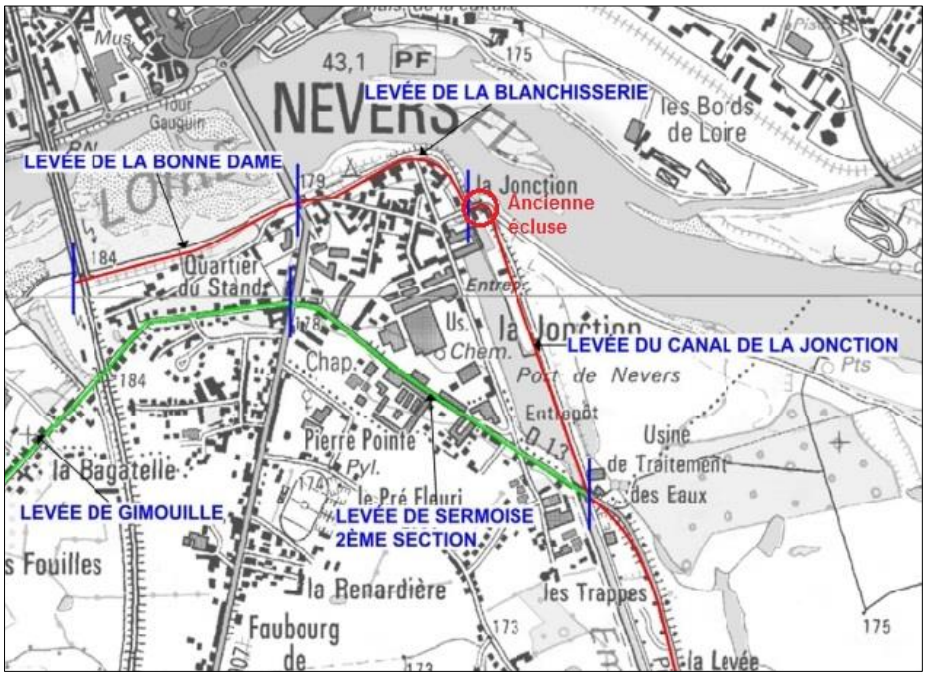


Figure 1 : Localisation du tronçon de digue étudié (source : EDD – Egis Eau)

- Date de construction : inconnue
- Type de digue :
  - Digue « sèche », la digue est principalement constituée de sables légèrement argileux à graveleux.
  - L'ancienne écluse est fermée et constituée :
    - En partie supérieure par un mur d'épaisseur 0.30m, qui est supposé réalisé en moellons du fait des traces visibles sur le parement côté Loire.
    - En partie inférieure par un voile en béton armé percé de quatre ouvertures.

- Données géométriques de la digue de la Blanchisserie :
    - Hauteur de la digue par rapport au terrain naturel côté val : environ 3m (4m côté Loire)
    - Les talus ont une pente de l'ordre de 2H/1V côté Loire et côté val
    - Largeur de crête d'environ 4m et présence d'une banquette côté Loire d'une hauteur d'environ 30 cm.

- Fonctionnement hydraulique du cours d'eau :
  La levée du canal de la Jonction est encore protégée par un franc-bord jusqu'au raccordement avec la levée de la Blanchisserie, qui est en contact direct avec la Loire. Le secteur est caractérisé par la confluence avec la Nièvre (Illustration 2 ci-dessous) en rive droite. Le lit vif de la Loire est situé en rive gauche. Cela est induit par l'apport et le dépôt de matériaux de la Nièvre en rive droite avec formation d'un cône de déjection. Ce processus est certainement accentué par la position convexe de ce dépôt par rapport au thalweg de la Loire et par l'effet de seuil du radier du pont, en période de basses eaux. La protection du pied de berge en enrochement de la terminaison aval de la levée du canal de la jonction s'explique par :
  - des pressions hydrauliques plus importantes sur ce secteur situé en extrados de méandre,
  - sa situation dans l'axe d'écoulement de la Nièvre.
  Les cartes SIEL de 2000 montrent que 60% du linéaire amont présentent un renforcement des pieds de la berge. Les 40% restant présentent une importante végétation en pieds de berges et quelques zones d'érosion ainsi qu'une zone humide d'une cinquantaine de mètres.

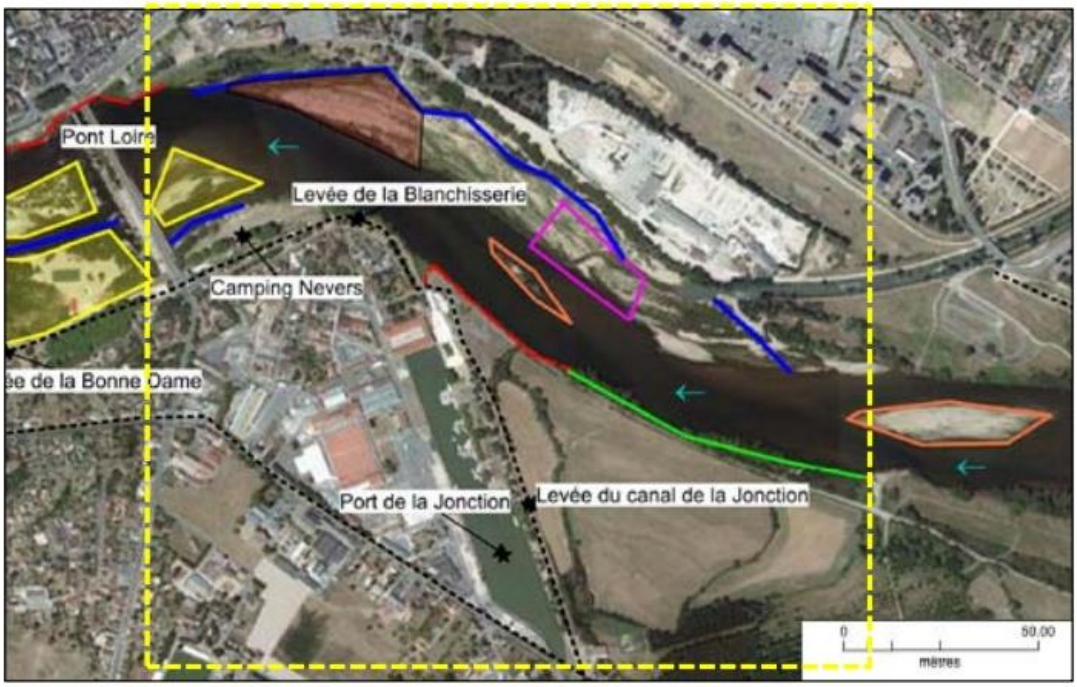


Figure 2 : Localisation du tronçon d'étude : levée du canal de la Jonction au pont de Loire – cal de Nevers (58) – (source :EDD – Egis Eau)

- Données morpho-dynamiques :
    - distance de la digue par rapport au cours d'eau : en contact avec le fleuve
    - intérieur ou extérieur de la courbe : en extrados de méandre, érosion de berge au niveau de la levée du canal de la Jonction. Ensuite le décalage de l'ancienne écluse protège de l'érosion la partie amont de la digue de la Blanchisserie, zone étudiée dans cette fiche.
    - tendance d'évolution du niveau du lit du cours d'eau : phénomène d'apport de matériaux issus de la Nièvre conduit à relever le niveau moyen du lit
    - sources: étude morphodynamique menée par EGIS Eau dans le cadre des études de danger des digue domaniales de Nevers.

II. Désordres et mécanismes à l'origine des travaux étudiés

- Date ou époque d'apparition/évènement (si connus) :

Les levées de ce val sont des ouvrages anciens, elles sont le résultat d'élévations et d'élargissements successifs depuis le Moyen Âge.

L'Étude De Dangers (EDD) de ces levées domaniales, réalisée en 2015, montre que le niveau de sûreté des ouvrages du système d'endiguement (associé à la crue T50 pour la Loire – débit de 3300m³/s à la station de Nevers) est bien inférieur à leur niveau de protection apparent (crue T200 – débit de 4870m³/s). Ainsi, l'EDD préconise d'engager en priorité des travaux de restauration pour fiabiliser la digue.

La réalisation des travaux de restauration proposés permettrait de fiabiliser le système d'endiguement pour un niveau d'eau correspondant à une crue de période de retour 200 ans.

- Description factuelle :
    - Ancienne écluse :

      L'ancienne piscine municipale a été partiellement construite dans l'emprise de l'écluse qui reliait la Loire au canal de Jonction. Dans le cadre de ces travaux réalisés fin des années cinquante, un mur transversal a été construit afin de fermer l'écluse. La solidité de ce mur n'étant pas garantie en cas de crue, un confortement de celui-ci a donc été étudié.

      L'ancienne écluse est fermée :

      • en partie supérieure par un mur d'épaisseur 0.30m, qui est supposé réalisé en moellons du fait des traces visibles sur le parement côté Loire. Du côté piscine les peintures ne permettent pas de confirmer cette hypothèse ;

      • En partie inférieure par un voile en béton armé percé de quatre ouvertures. Des poteaux raidisseurs séparent les pertuis et servent d'engravure aux vannes de vidange (cf. ci-après). La configuration exacte de l'aménagement derrière ce voile (dont l'épaisseur est inconnue) est difficile à appréhender (voir Figure 3).

Figure 3 : Connexions hydrauliques entre le Port et la Loire (source : Étude avant-projet - BRLi)

Figure 4 : Vue générale du mur existant de fermeture de l'écluse (source : Étude avant-projet - BRLi)

- Digue de la Blanchisserie :
  La présence de végétation arborescente en crête de digue sur la majeure partie du linéaire et la géométrie de la digue ont contribué à identifier l'érosion interne comme facteur principal pouvant conduire à l'apparition de dégradations ou de brèches en cas de crue.

- Mécanismes :
  - Risque d'érosion interne
- Scénario :
  - Pour une crue d'un débit supérieur à 2300 m3/s (Q50), le risque d'érosion interne par infiltration d'eau dans la digue est présent. Les mécanismes de ce processus constituent souvent le premier stade avant la rupture complète de la digue.

III. Travaux étudiés

- Objectifs :
  - Réduction du risque d'érosion interne par réalisation d'un voile béton en contrefort de l'ancienne écluse et réalisation d'un écran étanche dans le corps de digue de la Blanchisserie.
  - Remonter le niveau de sûreté à Q200
  - Travaux réalisés dans le cadre du marché de confortement des digues domaniales rive gauche de Nevers (2019-2020)

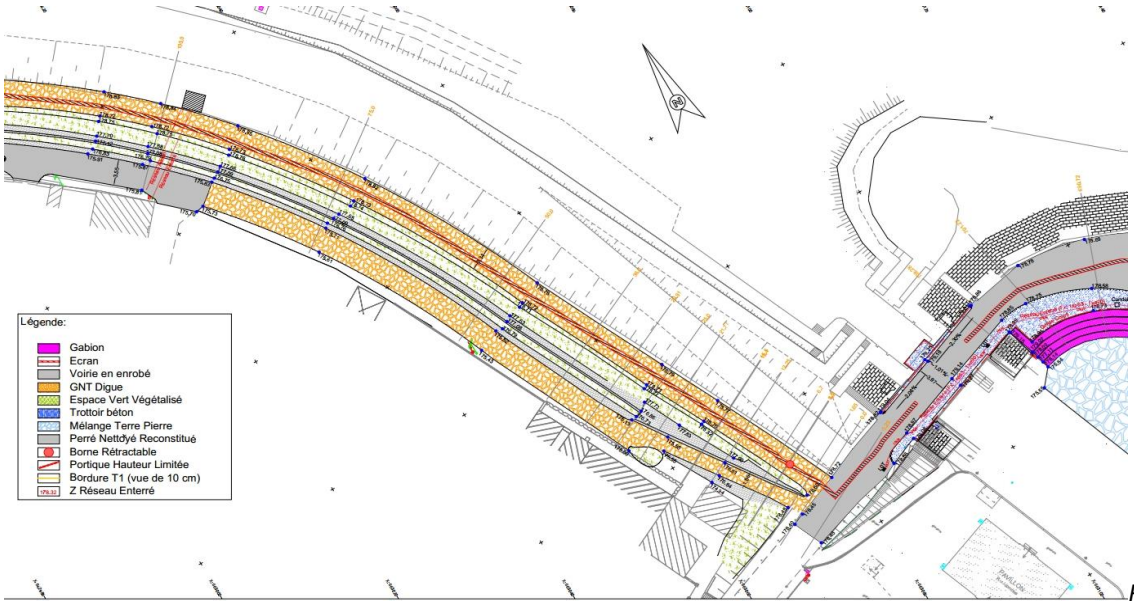


Figure 5 : Plan de récolement des travaux de confortement des digues domaniales rive gauche de Nevers (source : VCT)

- Nouveaux ouvrages ou parties d'ouvrage mis en place :
  - Au niveau de l'ancienne écluse :
    - Construction d'un voile en béton armé autoportant ancré et fondé sur micropieux pour renforcer le mur existant condamnant l'ancienne écluse.
      Epaisseur voile retenue : 30 cm
      Nombre de micropieux : 6

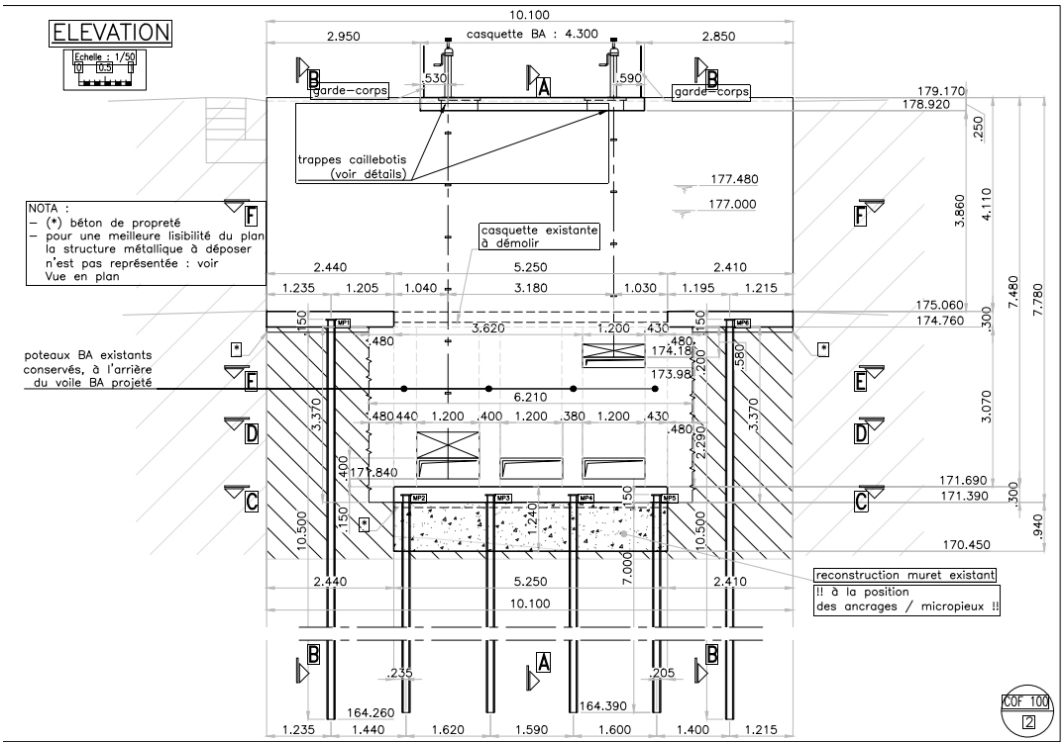


Figure 6 : plan d'exécution du voile béton sur micropieux (source : EUROVIABETON)

Figure 7 : Photographies de la réalisation du voile en béton armé renforçant le mur existant (source: DDT58)

- Principales modifications des ouvrages existants :
    - Digue de la Blanchisserie :
        - Écran étanche en soil-mixing d'une profondeur de 9m depuis la crête dans le corps de digue et d'une épaisseur de 47 cm sur toute la longueur de la digue.
        - Écran étanche en paroi au coulis assurant le raccordement entre l'écran en soil-mixing et le mur existant condamnant l'ancienne écluse. Les dimensions de la paroi au coulis sont les mêmes que l'écran étanche en soil-mixing.

          L'excavation est effectuée depuis la crête de la levée jusqu'à la profondeur cible. La profondeur demandée est définie dans les plans d'exécution : elle est de 9 m environ par rapport à la plateforme au niveau des levées de la Blanchisserie et celle de la Jonction.

          1. Raccordement écran étanche/paroi au coulis

          Le raccordement ente l'écran étanche et la paroi au coulis est réalisé différemment selon deux cas :
            - Cas n°1 : si l'écran est antérieur à la paroi, raccordement sur l'écran étanche en « grattant » celui-ci en Trenchmix® avec les dents de la pelle.
            - Cas n°2 : si c'est la paroi est antérieur à l'écran, raccordement sur la paroi au coulis en remordant celle-ci avec la trancheuse.
        - Le coulis dans un cas ou le spoil dans l'autre s'insère dans les aspérités créées et assure l'étanchéité.

Vue générale d'une trancheuse

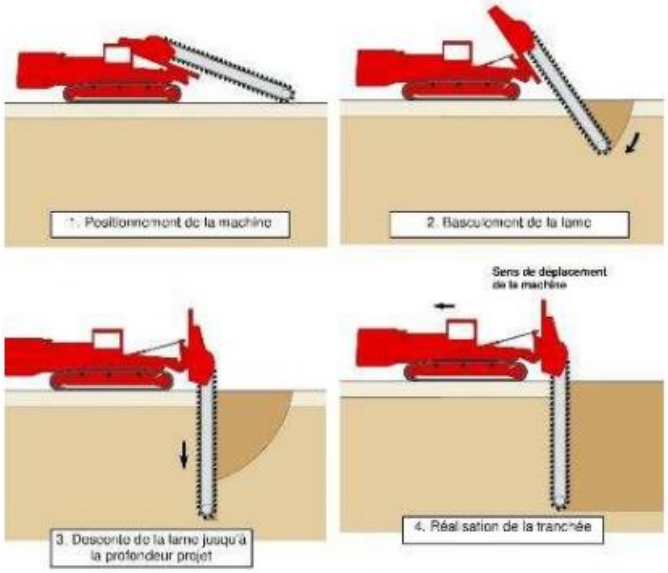


Figure 8 : Principe générale du fonctionnement de la trancheuse pour la technique de l'écran étanche en soil-mixing (source : VCT)

2. Raccordement bajoyer/paroi au coulis

Le raccordement entre la paroi au coulis et le bajoyer de l'écluse est réalisé en raclant délicatement le mur maçonné du bajoyer avec un godet équipé d'une lame de raclage. Lors de la mise en œuvre du coulis, celui-ci vient alors se placer contre le bajoyer ce qui assure l'étanchéité.

L'excavation est exécutée directement sous coulis auto durcissant. La profondeur est contrôlée au niveau du bras de la pelle bras.

L'épaisseur de l'écran (0,47m) est contrôlée de manière indirecte par vérification de la largeur du godet de la pelle réalisant l'excavation.

L'axe de l'écran est matérialisé par un marquage à la peinture au sol avant et après décapage de la chaussée.

Illustration 9 : Réalisation du raccordement bajoyer/paroi coulis (source : DDT58)

Figure 10 : Creusement de la tranchée et injection du coulis 1/2 (source : DDT58)

Figure 11 : Creusement de la tranchée et injection du coulis 2/2 (source : DDT58)

Figure 12 : Méthode employée pour injecter le coulis dans la tranchée (source : DDT58)

- Données géométriques : Aucune modification topographique de la levée par rapport à l'état initial
  - Dimension de l'écran étanche dans le corps de digue :
    - Longueur :
      - digue de la Jonction : 250 m
      - digue de la Blanchisserie : 520 m
    - Épaisseur : environ 47 cm
    - Profondeur par rapport à la crête de digue : environ 9m
    - Profondeur sous le pied de digue : environ 6 m

- Travaux réalisés dans des : conditions normales
  - Travaux réalisés sans contraintes de temps si ce n'est celle du marché contractuel.

- Coût des travaux : Coût global des travaux de renforcement des digues de la Jonction, Blanchisserie et de la Bonne Dame : 3 538 308 € HT – 4 245 970 € TTC
- Date de début des travaux : 5 octobre 2019
- Durée des travaux : 11 mois pour l'ensemble des travaux de renforcement

IV. Acteurs des travaux étudiés

- Maître d'ouvrage des travaux étudiés :
  - Nom : Etat – Préfecture de la Nièvre – DDT58
- Propriétaire du tronçon de digue :
  - Nom : Etat – Préfecture de la Nièvre – DDT58
- Gestionnaire du tronçon de digue :
  - Nom : DDT58
- Maître d'œuvre des travaux étudiés :
  - Nom : Groupement SAFEGE (mandataire) - BRLi
- Entreprise(s) :
  - Nom : Groupement VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT (mandataire) – SOLETANCHE BACHY – EUROVIA BETON
    VCT : coordination – terrassements – massifs filtrant – tranchées
    SOLETANCHE : soilmixing par technique de trenchmix
    EUROVIA : voile béton
    Sous-traitant pour micropieux : TEMSOL

FICHE DE CAS
Reconstruction après démontage d'un tronçon de digue du val d'Orléans - Loire
Commune de Saint-Pryvé - St-Mesmin (45)

Auteur : Mathieu MONACO (DREAL Centre-Val de Loire)
Technique(s) mise(s) en œuvre : Déconstruction par couches homogènes, retrait de canalisations, reconstruction du tronçon de digue et réalisation d'un écran étanche pour traiter l'interface et tronçon non renforcé.

I. Descriptif de la digue initiale

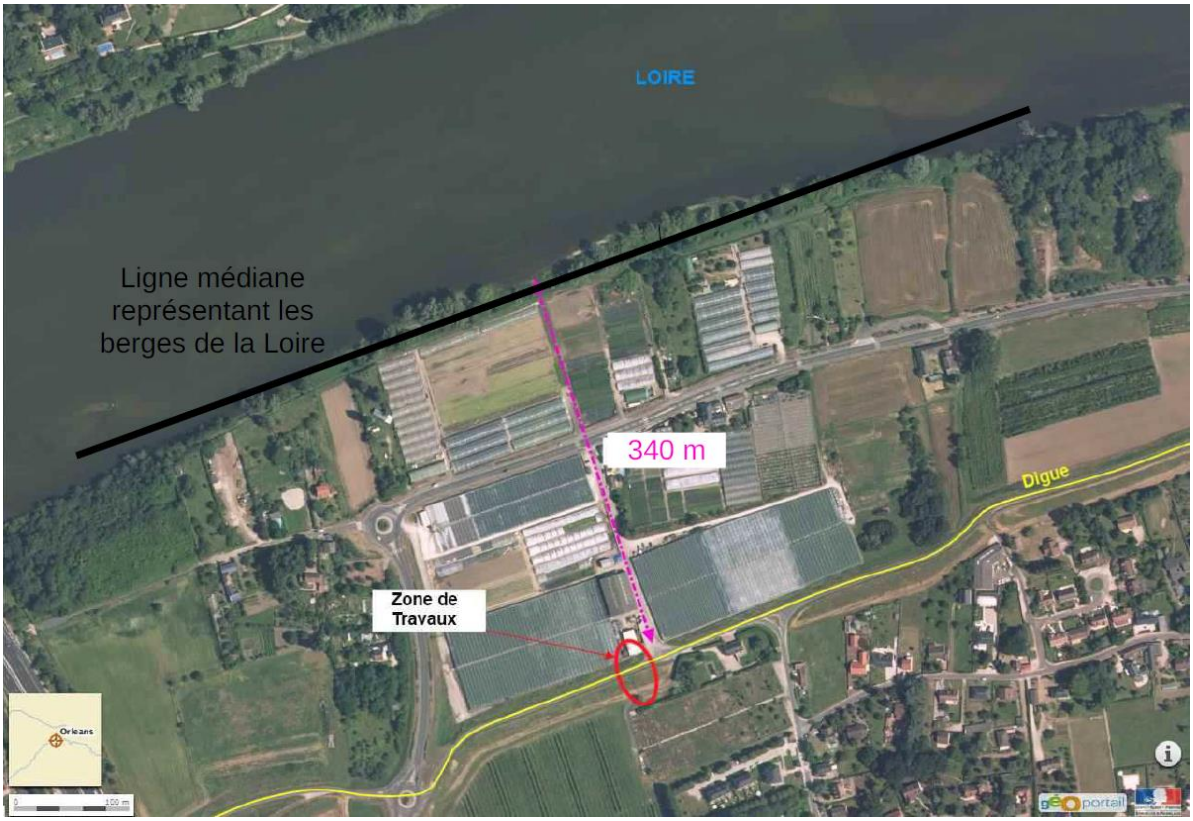


Figure 1 : Vue globale de la zone de travaux de démontage de la levée

Le tronçon étudié fait partie intégrante du système d'endiguement du val d'Orléans (classe A). Le linéaire total de digue concerné par les travaux est de 30 mètres, localisé sur la commune de Saint-Pryvé – Saint-Mesmin en aval de la ville d'Orléans.

- Longueur du tronçon de digue étudiée : 30 mètres environ
- Date de construction : inconnue
- Type de digue : Digue « sèche », constituée de matériaux sablo-argileux
- Données géométriques :
  - hauteur de la digue :
    - 3,40 m environ par rapport au terrain naturel côté val
    - 3,30 m côté Loire
  - pente de talus : côté cours d'eau /rivière/canal/fleuve : 2/1
    côté val (ou côté zone protégée) : 3/4
  - largeur de crête : 9,90 m au total

- Fonctionnement hydraulique du cours d'eau :

Le site de travaux est assez éloigné du lit mineur de la Loire, localisé dans un ségonal formant un casier hydraulique. Dans ce secteur, en sortie de la traversée d'Orléans, le fleuve est assez rectiligne. La zone de travaux est inscrite en amont de l'amorce d'un méandre, positionné dans l'intrados. Dans ce secteur les débordements du fleuve touchent le pied de digue à partir de la crue d'occurrence T 50 ans (4,16 m à l'échelle d'Orléans, débit à Orléans de 4 040 m³/s). Par phénomène de remous, le pied de digue coté val est en contact par inondation de la Loire remontant par son affluent le Loiret pour une crue inférieure à T 500 ans (6,25m à l'échelle d'Orléans, débit de 6 790 m³/s).

- Données morpho-dynamiques :
  - distance de la digue par rapport au cours d'eau : 340 m
  - intérieur ou extérieur de la courbe : intrados de l'amorce d'un méandre
  - tendance d'évolution du niveau du lit du cours d'eau : incision
  - autres éléments (ex : anciens méandres…) : système d'endiguement ouvert avec la confluence du Loiret, affluent de rive gauche de la Loire

II. <u>Désordres et mécanismes à l'origine des travaux étudiés</u>

- Date ou époque d'apparition/évènement (si connus) :

L'étude de dangers (EDD) de 2012 de la levée d'Orléans a identifié une série de mesures structurelles à mettre en œuvre sur le système d'endiguement en vue de restaurer ou de maintenir le niveau de sûreté de l'ouvrage au niveau de protection apparent (5,77m à l'échelle d'Orléans, soit T 200 ans). Parmi toutes les mesures identifiées, on trouve :

  - Finir de renforcer le corps de la digue pour limiter le risque d'érosion interne et de glissement de talus ;
  - Traiter les canalisations.

Le projet global de fiabilisation issu de l'EDD a repris l'ensemble des mesures en les hiérarchisant et en identifiant les travaux à réaliser. Ainsi, un tronçon de digue sur le secteur de Saint-Pryvé-Saint-Mesmin a été identifié en raison de l'absence de dispositif de renforcement contre le risque d'érosion interne. De plus, des investigations ont montré que sur ce tronçon des ouvrages traversants localisés en pied de digue étaient présents.

- Description factuelle :
  - Absence du renforcement par épaississement et pose d'un drain filtrant opéré dans les années 80 sur ce tronçon de digue.
  - Présence de différents réseaux abandonnés, positionnés sous la digue, provenant de l'alimentation en énergie (chauffage, électricité, eau télégestion), d'une exploitation maraîchère située à l'origine de part et d'autre de la levée.
  - Aucun dispositif de protection contre le risque d'érosion interne au droit du passage des anciens réseaux traversants la levée.
- Mécanismes :
  - Risque d'érosion interne
- Scénario :
  - Dans le secteur, la présence d'une maison en pied de digue côté val a empêché le renforcement coté val par recharge de talus avec filtre drainant sur 150 m, réalisé au cours des années 1980.
  - La circulation d'eau dans le corps de digue par l'intermédiaire et le long des réseaux traversants constitue un facteur aggravant du risque d'érosion interne.

III. Travaux étudiés

- Objectifs :
  - Réduction du risque d'érosion interne par retrait des réseaux traversants avec démontage et reconstruction de la digue
  - Traitement des interfaces entre la portion de digue reconstruite et l'ancienne partie existante avec la réalisation d'un écran étanche dans un secteur n'ayant fait l'objet d'aucun renforcement.

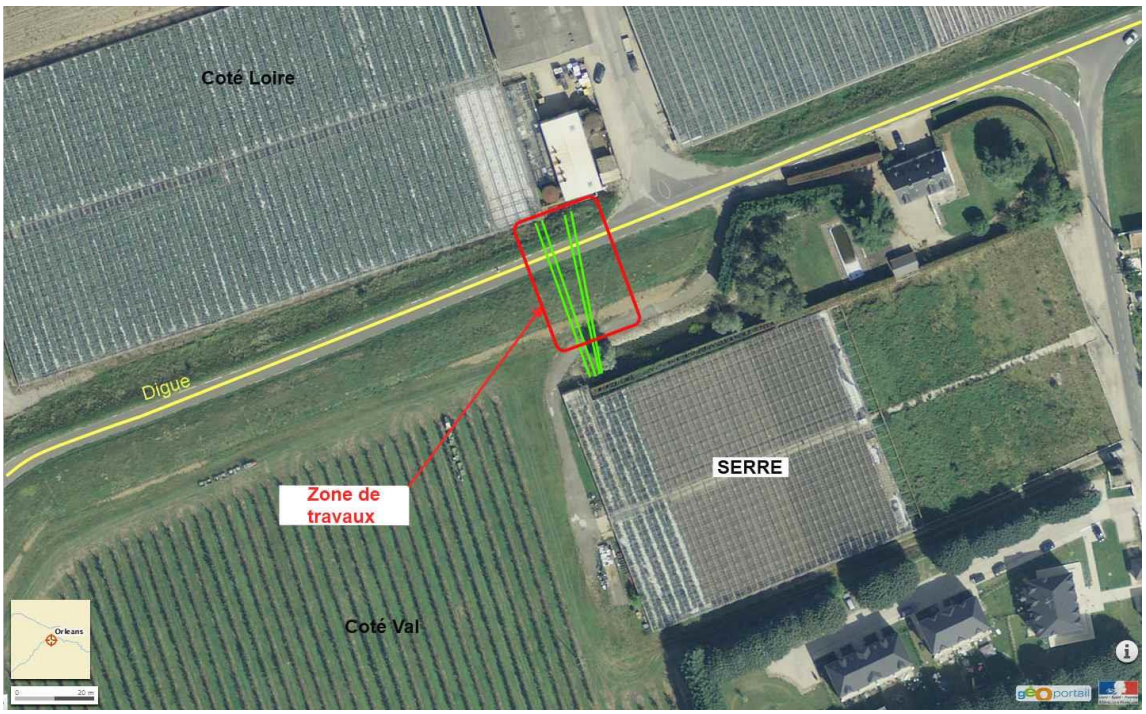


Figure 2 : Localisation de la zone de travaux

- Nouveaux ouvrages ou parties d'ouvrage mis en place :
  - 1ère phase : Identification des successions de couches constituant la levée et détermination du niveau de compacité ;
  - 2nde phase : démontage du tronçon de digue (30 mètre environ) avec stockage des matériaux par couches homogènes, préalablement identifiées ;
  - 3ème phase : retrait des réseaux traversants en pied de l'ouvrage

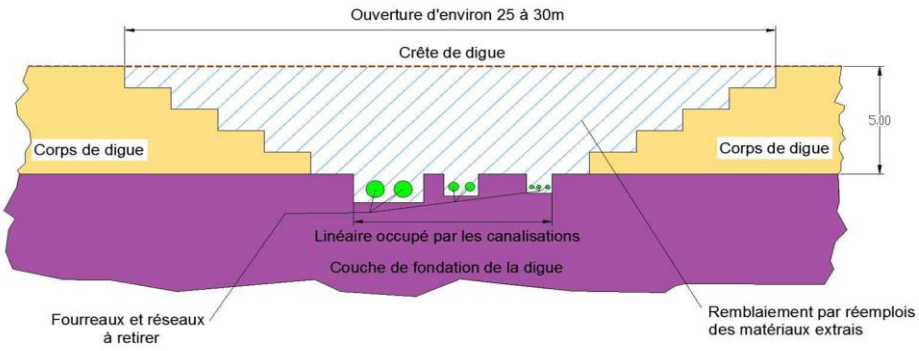


Figure 3 : Schéma de principe de l'ouverture de la levée pour le retrait des ouvrages traversants (source : DREAL CVL)

Figure 4 : Réalisation du démontage de la levée avec présence des réseaux traversants (source : DREAL CVL)

- 4ème phase : reconstruction du tronçon de digue par réemploi des matériaux historiques préalablement stockés avec respect des successions de couches établies avant le démontage et compactage selon les caractéristiques intrinsèques du reste de l'ouvrage.

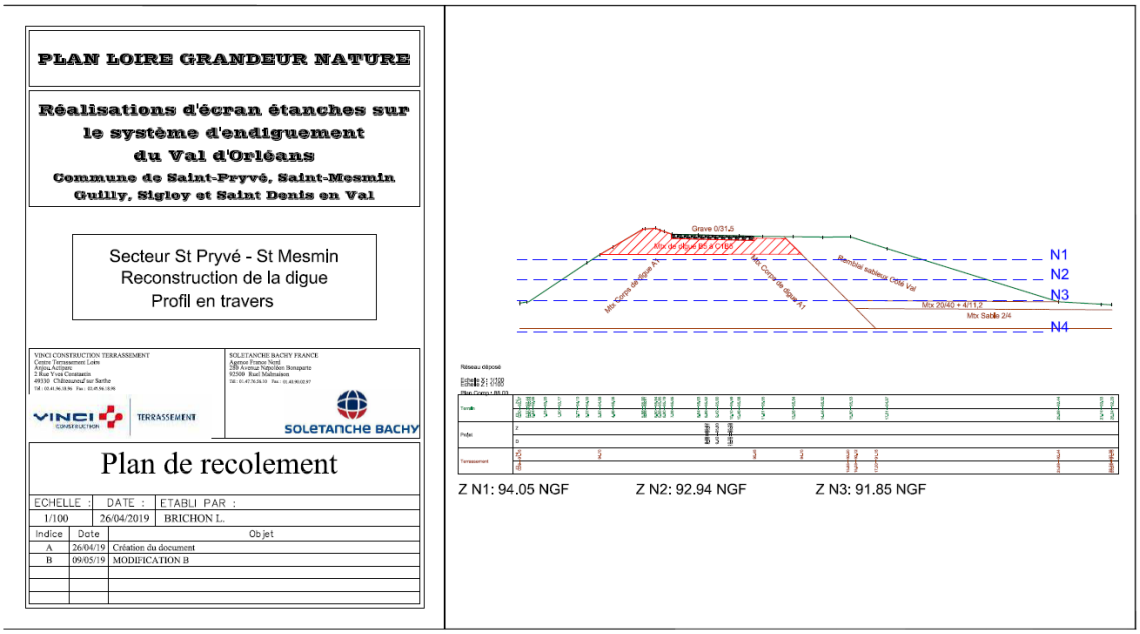


Figure 5 : Plan de récolement à l'issu de la reconstruction (source : VCT – DREAL CVL)

- 5ème phase : réalisation d'un écran étanche par la technique du soil-mixing pour traiter d'une part les interfaces entre le tronçon de digue reconstruit et la partie historique, et d'autres part pour renforcer un linéaire plus étendu (850 m) n'ayant pas fait l'objet de travaux de renforcement durant les années 80.

Figure n 6 : Réalisation de l'écran étanche par technique du soil-mixing

- Principales modifications des ouvrages existants :
  - Amélioration de l'étanchéité de l'ouvrage par réalisation d'un écran étanche afin de limiter le risque d'érosion interne ;
  - Retrait des canalisations dans le corps de digue facteur aggravant dans les mécanismes d'érosion interne.

- Données géométriques :
  - Aucune modification topographique de la levée par rapport à l'état initial, avec une reconstruction à l'identique ;
  - Dimension de l'écran étanche dans le corps de digue :
    - Longueur : 850 m
    - Épaisseur : environ 45 cm
    - Profondeur par rapport à la crête de digue : entre 6,20 m et 6,60 m
    - Profondeur sous le pied de digue : environ 2 m

- Travaux réalisés dans des : conditions normales
- Coût des travaux :
  - Démontage de la levée sur 30 m, retrait des canalisations et reconstruction : 275 000 €TTC
  - Écran étanche sur 850 m : 525 000 €TTC
- Date de début des travaux :
  - Démontage de la levée sur 30 m, retrait des canalisations et reconstruction : septembre 2018
  - Écran étanche sur 850 m : novembre 2018
- Durée des travaux :
  - Démontage de la levée sur 30 m, retrait des canalisations et reconstruction : Période d'exécution de 7 semaines + 2 mois de période de préparation ;
  - Écran étanche sur 850 m : Période d'exécution de 7 semaines + 2 mois de période de préparation

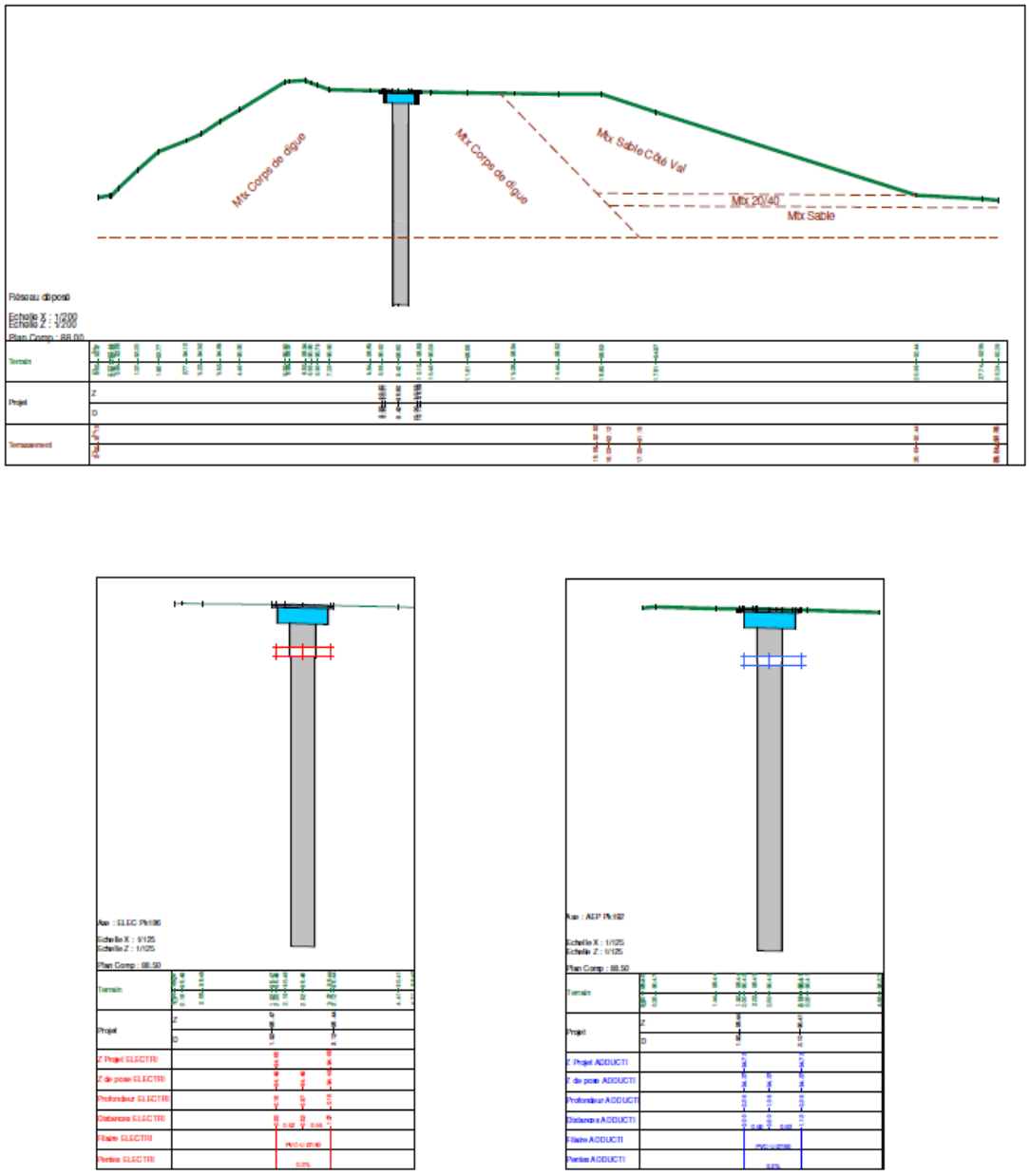


Figure 7 : Profils en travers du plan de récolement de l'écran étanche (source : VCT – DREAL CVL)

IV. Acteurs des travaux étudiés

- Maître d'ouvrage des travaux étudiés :
  - Nom : Etat – Préfecture du Loiret - DDT du Loiret
- Propriétaire du tronçon de digue :
  - Nom : Etat – Préfecture du Loiret - DDT du Loiret
- Gestionnaire du tronçon de digue :
  - Nom : DDT du Loiret / SLRT
- Maître d'œuvre des travaux étudiés :
  - Nom : DREAL Centre Val de Loire / SLBLB / DETL
- Entreprise(s) :
  - Nom : VINCI Construction Terrassement, SOLETANCHE BACHY

FICHE DE CAS
Confortement des digues des Amidonniers/Sept-Deniers (Digues D12, D13 et D14)
Traitement du talus aval par grillage anti-fouisseurs
Garonne – Toulouse (31)

Auteur : V. GILI (DDT31)

I. RENSEIGNEMENTS GENERAUX

1. Identification du tronçon concerné par les travaux :

- Nom des tronçons : **D12, D13 et D14 ; rive droite**
- Catégorie de digue : remblai revêtue d'un parement côté fleuve
- Département : 31
- Commune(s) : Toulouse
- Nom du cours d'eau ou/et du fleuve : Garonne
- Tronçon situé en : Occitanie/Haute-Garonne
- Identifiant(s) et nom(s) du/des tronçon(s) (code SIOUH) : FRD0310017
- Longueur des tronçons : respectivement 1421 m (D12), 1011 m (D13) et 895 m (D14)
- Linéaire concerné par les travaux (PK amont / PK aval) : 4+721 à 6+142 (D12), 6+142 à 7+153 (D13) et 7+153 à 8+048 (D14)
- Classe réglementaire de l'ouvrage : B en attendant le reclassement en A du système d'endiguement.

- Maître d'ouvrage des travaux étudiés : DDT de la Haute-Garonne
- Gestionnaire du tronçon, si différent du maître d'ouvrage : Cf. maître d'ouvrage.
- Propriétaire, si différent du maître d'ouvrage : Cf. maître d'ouvrage.
- Maître d'œuvre des travaux étudiés : groupement de bureaux d'études Arcadis/ISL
- Service de contrôle : DREAL Occitanie

2. Zone protégée :

- Nom de la zone : Amidonniers/Sept-Deniers/Ginestous
- Département : 31
- Enjeux :
  - ✓ nombres d'habitants permanents : 15670 habitants*
    * selon Plan Inondation Communal Version 2015 et en référence à la crue historique de 1875
  - ✓ voies de communication importantes : A620/A621 (mais vulnérabilité pas complètement établie au vu des caractéristiques de ces voies en grands remblais)
  - ✓ autres enjeux importants (à détailler) : 5 écoles, 1 STEP, 1 établissement hospitalier, zones d'activité

II. DESCRIPTION DE LA CONSTITUTION INITIALE DE LA DIGUE

- Date de construction : Années 60.
- Type de digue : remblai revêtu d'un parement béton
- Données géométriques :
  - Hauteur de la digue par rapport au terrain naturel côté val :
    - ✓ hauteur minimale pour le tronçon : 0 m (en considérant que les zones de grand remblai adossé constituent le terrain naturel)
    - ✓ hauteur maximale pour le tronçon : 6,40 m environ
  - Pente de Talus :
    - ✓ côté cours d'eau : principalement 1H/1V avant travaux pour D12 et D14 ; 1H/4V pour D13
    - ✓ côté val : 1,7H/1V à 1,4H/1V
  - Largeur de crête : variable 3 à 5m + zones avec remblai adossé

- Matériaux constitutifs : limons sableux et sables limono-graveleux (hétérogène)

- Travaux importants antérieurs au projet et date : Renforcement et réhausse du parapet dans certaines zones (1997)

- Autres caractéristiques de la digue :
  - Plusieurs zones avec remblai adossé de plusieurs dizaine de mètres
  - D12 : une section de 300 m avec mur de soutènement côté val
  - D14 : une zone dépourvue de palplanche en pied côté rivière

Dispositifs de protection :

	Talus côté val	**Crête**	**Talus côté rivière**	**Pied côté rivière**	**Risbermes Val Rivière**	
Palplanches				x		
Pieux en bois						
Enrochements libres						
Enrochements liés						
Gabions						
Matelas Reno						
Dalles de béton			x			
Perré en pierres						
Enherbement	**x**					
Technique végétale						
Grillage anti-animaux fouisseurs						
Autres : revêtement type enrobé bicouche		x				

Dispositifs d'étanchéité :

- Présence d'étanchéité interne ☐ oui ☒ non ☐ inconnu
  Type(s) :
- Présence d'étanchéité côté cours d'eau : ☒ oui ☐ non ☐ inconnu
  Type(s) : Drain à clapet pour D13
- Digue étanche dans la masse : ☐ oui ☒ non ☐ inconnu
  Type(s) :
- Dispositifs d'étanchéité fondations : ☐ oui ☒ non ☐ inconnu
  Type(s) :

Dispositifs de drainage :

Présence : ☒ oui ☐ non ☐ inconnu
Type(s) :

Présence et nombre de singularités :

Vanne	☒ Présence	☐ Inconnu	Nombre : 5	
Conduite	☐ ☒ Présence	☐ Inconnu	Nombre :	
Pertuis	☐ Présence	☐ Inconnu	Nombre :	
Câble	☐ Présence	☐ Inconnu	Nombre :	
Passages batardables	☐ Présence	☐ Inconnu	Nombre :	
Déversoir	☐ Présence	☐ Inconnu	Nombre :	Longueur(s) :
Route	☐ Présence	☐ Inconnu	Nombre :	
Maison	☐ Présence	☐ Inconnu	Nombre :	
Autres (à préciser)	☐ Présence	☐ Inconnu	Nombre :	

Fonctionnement hydraulique du cours d'eau :

- Débit et fréquence de la crue de dimensionnement : 7500 m³ : environ 300 ans (crue 1875)
- Débits de crues à diverses périodes de retour : cf. page suivante.

Fonctionnement morpho-dynamique du cours d'eau :

- Distance de la digue par rapport au cours d'eau : 4 m mini (à l'étiage)

Fréquence approximative			25 ans (crue 2000)	100 ans	Référence 300 ans (crue 1875)	Exceptionnelle 600 ans (crue 1875 + 50 cm)
Débit de pointe			5100 m3	5100 m3	7500 m3	8250 m3
Côte / quelle référence ?					D12 : 137,5 à 136 m D14 :	
Hauteur d'eau / quelle référence disponible ?			4,38 m (station Pont-Neuf)	/	7,55 m (station Pont-Neuf)	8,05 m (station Pont-Neuf)
Hauteur de surverse (-)			D12 : 137,5 à 136 m D13 : 136 à 135,4 m D14 : 134,5 à 132,1 m hors parapet + 1m avec parapet			
Ligne d'eau disponible					D12 : 135,8 à 134,4 m D13 : 134,4 à 133,7 m D14 : 133,5m à 132,3 m	
Hydrogramme en annexe ?			Cf ci-dessous	Cf ci-dessous	Cf ci-dessous	non
Référence d'étude(s) hydrologique(s)			Etudes CACG (1988) et BCEOM (1994)			
Référence d'étude(s) hydraulique(s)			Etudes hydrauliques de la Garonne à Toulouse, Sogréah (2003 et 2006)			

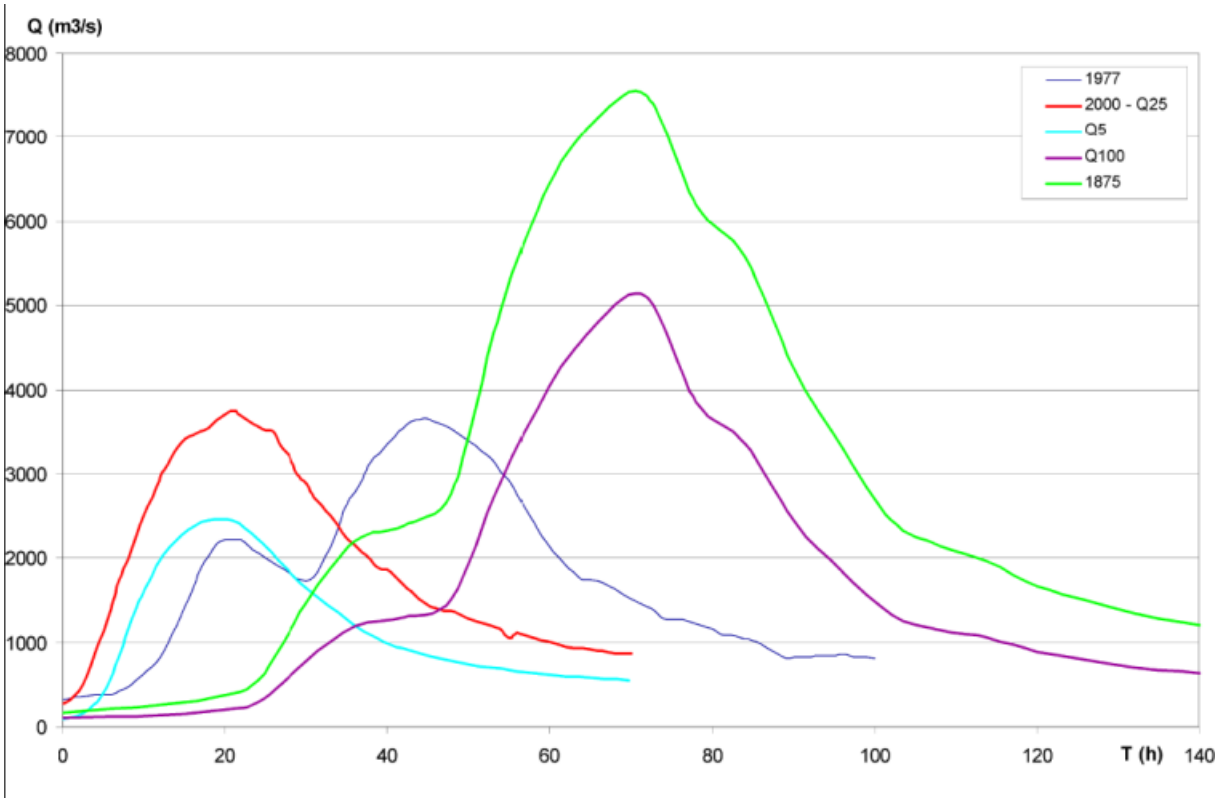


Figure 1 : Hydrogrammes des crues de 1977, 2000, 1875 et de périodes de retour 5 ans et 100 ans (Sogréah, mars 2006)

III. DESORDRES, MOTIVATION DU RENFORCEMENT

1. Désordres à l'origine des travaux et/ou motivation du renforcement :

- Surveillance en crue : ☐ oui ☒ non ☐ inconnu
- Renforcement motivé par résultat d'un diagnostic : ☒ oui ☐ non ☐ inconnu
- Constat des désordres (qui, quand) : EDF/GETEC, 2005 ; ISL(VTA annuelle)
- Description factuelle :
  côté fleuve, désordres substantiels et les plus conséquents (disjointement de dalle, etc.)
  côté val (objet de la fiche), nombreux désordres : développement intempestif de végétation, présence de nombreux terriers, suspicions d'affaissements, etc.

2. Mécanismes supposés de dégradation :

- Scénario : instabilité par érosion interne (principalement)
- Existence d'un diagnostic : ☒ oui ☐ non
- Expert en charge du diagnostic : EDF/GETEC, 2005 ; Fondasol, 2005 : Egis, 2009 ; Arcadis/ISL, 2012
- Etudes préalables au projet de travaux :

☐ Historique ☒ Hydraulique/hydrologie ☒ Géotechnique/géophysique
☒ Inspection visuelle ☒ Morphodynamique

IV. TRAVAUX FAISANT L'OBJET DE LA FICHE

Préambule :

Les principaux objectifs des travaux en confortement entrepris sur D12 et D14 sont :

- *la réalisation d'un nouveau masque béton étanche côté fleuve et son ancrage par des clous scellés dans un sol cohérent (molasse)*
- *la reprise du système de drainage du remblai*
- *le traitement du talus aval*

La vocation de la présente fiche est d'illustrer le traitement du talus aval, principalement vis-à-vis de la problématique des animaux fouisseurs.

La suite de la fiche est donc dédiée au dispositif de protection mis en œuvre sur le talus aval.

1. Type de travaux :

☐ Réparation ☒ Confortement ☐ Gros entretien

2. Objectifs de la solution retenue:

- Diminuer le risque d'érosion interne (renard hydraulique, etc.) dans le talus
- Faciliter de façon pérenne la surveillance et l'entretien du talus aval
- Assurer une meilleure intégration paysagère de la digue (située en milieu urbain et qui constitue un lieu prisé de promenade)
  N.B. en particulier, il a été fait le choix de conserver les platanes en crête, d'en tenir compte dans le dimensionnement du projet tout en mettant en place un suivi phyto-sanitaire de ces arbres.

3. Descriptif des travaux :

- Nouveaux ouvrages ou parties d'ouvrage (rideau de palplanches, grillage anti-fouisseur…) **:**
  ➔ mise en place du grillage anti-fouisseur *(étape 4)*
- Principales modifications des ouvrages existants (modifications du profil…) :
  ➔ dévégétalisation complète du talus (arrachage, dessouchage, retrait des racines) *(étape 1)*
  ➔ décapage de l'ordre de 10-15 cm environ (*étape 2)*
  ➔ réglage du talus selon une pente régulière de 1,5H/1V *(étape 3)*, mise en place de terre végétale *(étape 5)*, de natte coco *(étape 6)* et ensemencement *(étape 7)*

4. Caractéristiques géométriques générales :

Linéaires approximatifs concernés :

- D12 : 1080 m (sur un linéaire de digue de 1420 m)
- D14 : 870 m (sur un linéaire de digue de 895 m)

Hauteur du talus variable et allant jusqu'à 6,4 m environ.

Quantité finale issue du détail quantitatif du marché (décompte final) :
pose de 19 314,25 m² de grillage anti-fouisseurs

5. Alternatives envisagées :

Une alternative à la pose d'un grillage anti-fouisseur serait la pose d'un parement béton.

Motif du choix : coût excessif de la solution alternative

6. Détails des travaux :

N.B. les éléments qui suivent sont principalement basés sur le projet et le DCE établis par le maître d'œuvre, ainsi que sur la procédure d'exécution établie par l'entreprise et visée par le maître d'œuvre

Description détaillée et spécifications par étape :

- Etape 1 : dévégétalisation complète du talus
  - Mise en œuvre :
  Dessouchage et abattage de l'ensemble des arbres et des arbustes présents sur la digue (excepté les platanes)
  Attention particulière portée autour des platanes en crête de talus afin de ne pas endommager leur système racinaire ; traitement des racines endommagées
  - Commentaires (difficultés rencontrées, etc.) :
  Anticipation de cette étape en fonction des prescriptions de l'arrêté pris au titre du Code de l'Environnement

- Etape 2 : décapage
  - Mise en œuvre :
  Dessouchage à la pelle des souches qui n'ont pas pu être dessouché lors de l'étape 1
  Décapage du talus sur 10-15cm en cherchant à redonner une pente régulière au talus
  Evacuation des matériaux en décharge agrée par des camions 6x4 ou 8x4
  - Spécifications particulières :
  Suppression de toutes les souches et racines de diamètre supérieur à 1 cm
  - Commentaires (difficultés rencontrées, etc.) :
  Réutilisation possible de la terre décapée à l'étape 5 au lieu d'une évacuation en décharge
  Profondeur de décapage à adapter à l'état initial du talus (décapage léger si talus en bon état)
  Difficulté ponctuelle liée à la gestion des accès pour amener du matériel et évacuation de la terre (difficulté valable pour les autres étapes, notamment celles nécessitant un approvisionnement)

- Etape 3 : réglage du talus à 3H/2V par rechargement
  - Mise en œuvre :
  Réglage seulement lorsque le talus est plus raide que le minimum de 3H/2V
  Dans ces zones, approvisionnement de tout venant roulé 0/80 par le crête de digue et vidange en bi-benne
  Dressage du matériau à la pelle depuis le pied de digue et crête de digue
  - Spécifications particulières :
  Granulométrie 0/80 mm bien graduée ; 10 à 15% en poids d'éléments inférieurs à 80 µm ; 25% de concassé au minimum ; équivalent de sable compris entre 30 et 50 ; coefficient Los Angeles inférieur à 30.
  Fouilles d'essouchage à refermer
  Matériaux d'apport à compacter de façon soignée : objectif de compacité de type q5 a minima
  - Commentaires (difficultés rencontrées, etc.) :
  Problématique des accès (cf. étape 2)
  Risque à maîtriser : surplus de matériaux en zone basse et granulométrie hétérogène après déchargement (les matériaux ont tendance à rouler en bas, notamment ceux de la fraction de granulométrie haute)
  Talus mis à nu : obligation d'enchaîner rapidement les étapes suivantes (risque d'érosion), notamment en période d'orages

- Etape 4 : mise en place du grillage anti-fouisseur
  - Mise en œuvre :
  Agrément préalable par le maître d'œuvre de la fiche produit « grillage »
  Approvisionnement du grillage en crête de digue au chariot télescopique
  Déroulage du rouleau de grillage, dans le sens de la pente des talus et perpendiculairement à l'axe de l'ouvrage, à l'aide du dérouleur, en tête jusqu'à la partie revêtue de la crête, en pied jusqu'en pied de talus
  Fixation du grillage dans le talus avec des crosses en HA 8mm.
  - Spécifications particulières :
  Grille de mailles de 50 mm x 50 mm simple torsion en métal galvanisé de classe A selon la norme NF EN 10244-2
  Fils de diamètre minimal de 2,7 mm
  Recouvrement entre les lés : environ 10 cm à 20 cm.

Fixation avec les crosses : tous les mètres sur les jonctions de grillage ; au moins un par mètre carré au centre des lés

- Commentaires (difficultés rencontrées, etc.) :

Difficulté de mise en place des crosses dans les zones de plus grande hauteur

- Etape 5 : mise en place de terre végétale

  - Mise en œuvre :

  Agrément préalable par le maître d'œuvre de la fiche produit « terre végétale »

  Approvisionnement de la terre en crête de digue et vidange en bi-benne.

  Dressage de la terre à la pelle (léger compactage), depuis le pied de digue puis la crête de digue, avec une épaisseur moyenne de 20cm.

  - Spécifications particulières :

  Terre de support tamisée à 20 mm, de densité sèche de moins de 1 500 kg/m³ et conforme à la norme NFU 44-551.

- Etape 6 : mise en place de natte coco

  - Mise en œuvre :

  Agrément préalable par le maître d'œuvre de la fiche produit « natte coco »

  Approvisionnement de la natte coco en crête de digue au chariot télescopique. Dépliage et mise en œuvre à la main, en tête jusqu'à la piste cyclable, en pied jusqu'en pied de talus.

  Fixation à l'aide de U en HA 8mm

  - Spécifications particulières

  Type H2M9 (densité □ 900 g/m² ; couverture au sol □ 65% ; fibres trempées ; cordes anjengo et Aratory, construction par dm² 13 x 7).

  Recouvrement entre les lés : au moins 30 cm ; de plus, les lés amont recouvrent les lés aval.

  Fixation avec les crosses : tous les 50 cm sur les jonctions de natte ; au moins un par mètre carré au centre des lés

  - Commentaires (difficultés rencontrées, etc.) :

  Attention à porter au plaquage afin de ne pas mettre en péril l'efficacité de l'étape 7

- Etape 7 : ensemencement

  - Mise en œuvre

  Agrément préalable par le maître d'œuvre de la fiche produit « mélange ensemencement »

  Ensemencement à la lance (hydro-seeding) depuis la crête de digue

  - Spécifications particulières

  Densité d'ensemencement : 30 g/m².

  - Commentaires (difficultés rencontrées, etc.) :

  Ensemencement inefficace dans certaines zones et pousse hétérogène : mise en place d'un 2e passage.

  En été, prévoir l'arrosage des talus et le renouvellement de cette opération (2 fois /semaine)

7. Informations sur les travaux :

- Travaux terminés ou en projet :

☒ Travaux terminés ☐ Projet de travaux finalisé ☐ Autres à préciser

- Date du projet : août 2017
- Entreprise(s) : GTM Sud-Ouest TP GC

- Date début travaux (confortement global) : 09/04/2018
  N.B. les opérations de traitement du talus aval ont plutôt commencé vers juin 2019, en parallèle d'autre s tâches.
- Date fin des travaux (confortement global) : 20/12/2019
- Conditions de réalisation (notion d'urgence) :

☐ Extrême urgence ☐ Urgence ☒ Conditions normales

- Travaux soumis à : ☐ Autorisation ☒ Déclaration ☐ Procédure d'urgence
- Date de l'arrêté : 02/08/2017 pour D12 ; 29/12/2017 pour D14
- Coût effectif des travaux :
  projet global de confortement : 11 378 680,02 € HT
  coût spécifique au traitement du talus aval (hors prix généraux) : 391 642,45 € HT (hors révisions de prix)
- Retour d'expérience sur le vieillissement de l'ouvrage :
  Veiller au bon ancrage du grillage et à sa couverture pérenne (risque fort de vandalisme en milieu urbain)
  Si possible, tenir compte de la meilleure période d'ensemencement dans le déroulement des travaux

8. Aspect sociologique

- Impact du choix de la solution :
  en phase travaux, fermeture notamment de la crête de digue qui constitue un lieu de promenade et qui constitue un axe structurant de la circulation des modes doux ; toute autre solution aurait eu le même impact.
  en phase exploitation, RAS.
- Réaction ultérieure de la population :
  Accueil favorable, essentiellement lié à la réouverture des lieux de promenade
  N.B. les travaux de confortement constituaient avant tout une attente des promoteurs étant donné certaines prescriptions provisoires du PPRi.

9. Annexes :

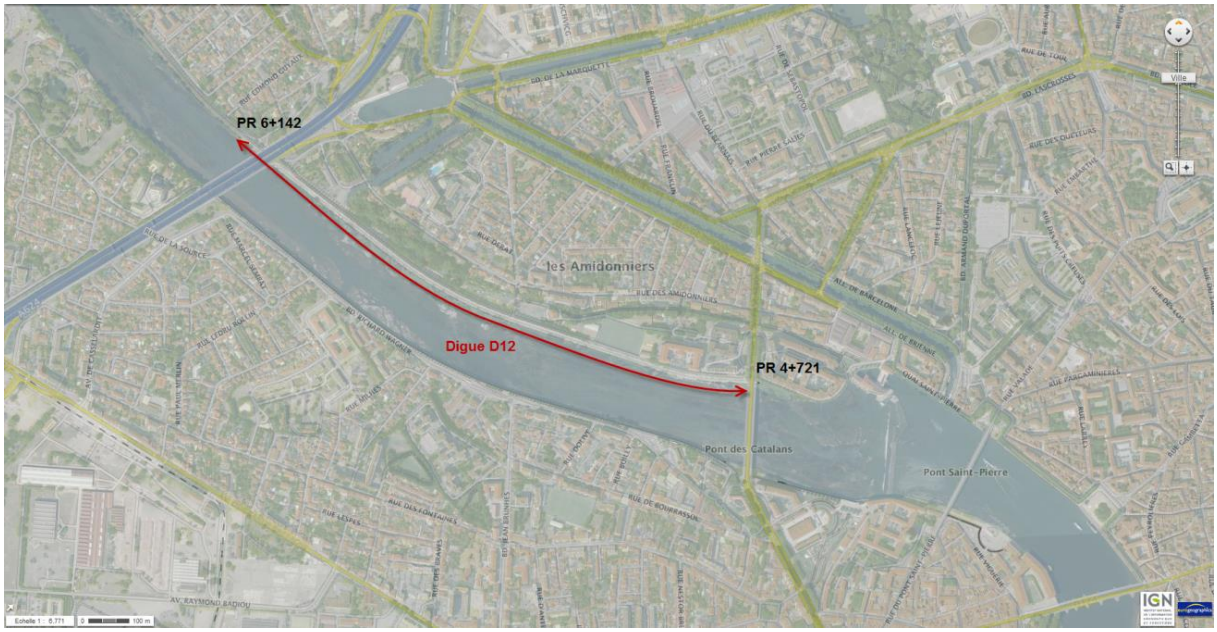
- Plans et coupes après travaux

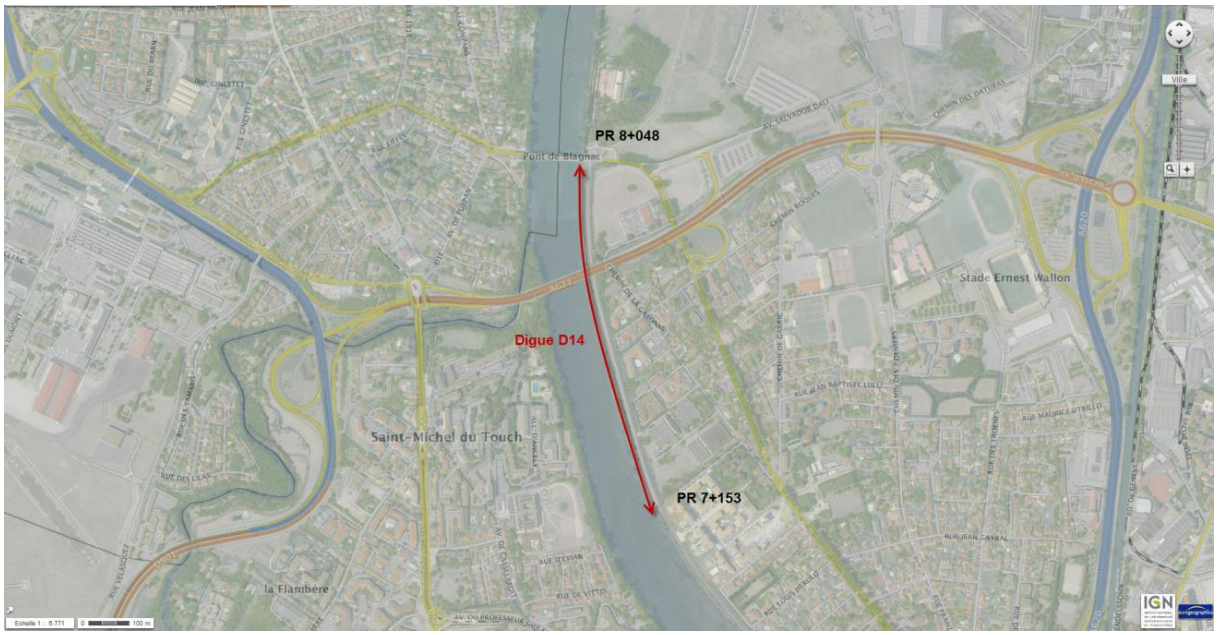
✓ mise en annexe d'un plan de situation :	☒ oui	☐ non
✓ mise en annexe d'un plan d'ensemble :	☐ oui	☒ non
✓ mise en annexe de coupes types :	☒ oui	☐ non
✓ autres documents en annexe (à préciser) :	☐ oui	☐ non
	Types :	

- Photos : différentes étapes de la réalisation des travaux

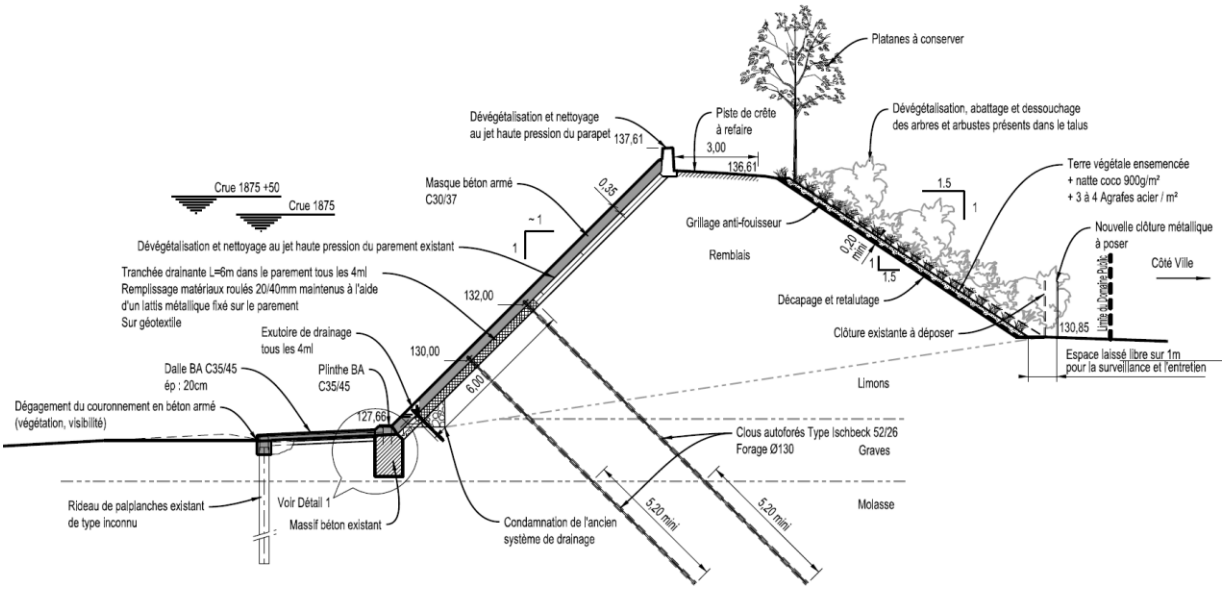
:

Annexe 1 : plan de situation





Annexe 2 : coupe-type de projet



Annexe 3 : photos de la réalisation des travaux

- décapage du talus (source : GTM ; DOE)

- rechargement du talus et réglage (source : GTM ; DOE)

- mise en place du grillage anti-fouisseurs (source : GTM)

- mise en place de la terre végétale (source : GTM)

- après mise en place de la natte coco et ensemencement (source DDT31)

FICHE DE CAS
Confortement et protection des digues de l'Aude en RD et RG sur les communes de Sallèles d'Aude, Narbonne, Cuxac d'Aude et Coursan (11)

Auteur : A. PLASTRE (Maccaferri)

I. Descriptif de la digue initiale

- Longueur du tronçon de digue étudiée : plusieurs tronçons, au total : 4947 ml
- Type de digue : Digue en terre
- Données géométriques :
  - hauteur de la digue par rapport au terrain naturel côté val : variable entre 2 et 5 m
  - pente de talus : côté cours d'eau /rivière/canal/fleuve : 2H/1V
    côté val (ou côté zone protégée) : 2H/1V
  - largeur de crête : ~ 4 m
- Fonctionnement hydraulique du cours d'eau : fluvial
- Données morpho-dynamiques :
  - distance de la digue par rapport au cours d'eau : en bordure
  - intérieur ou extérieur de la courbe : extérieur

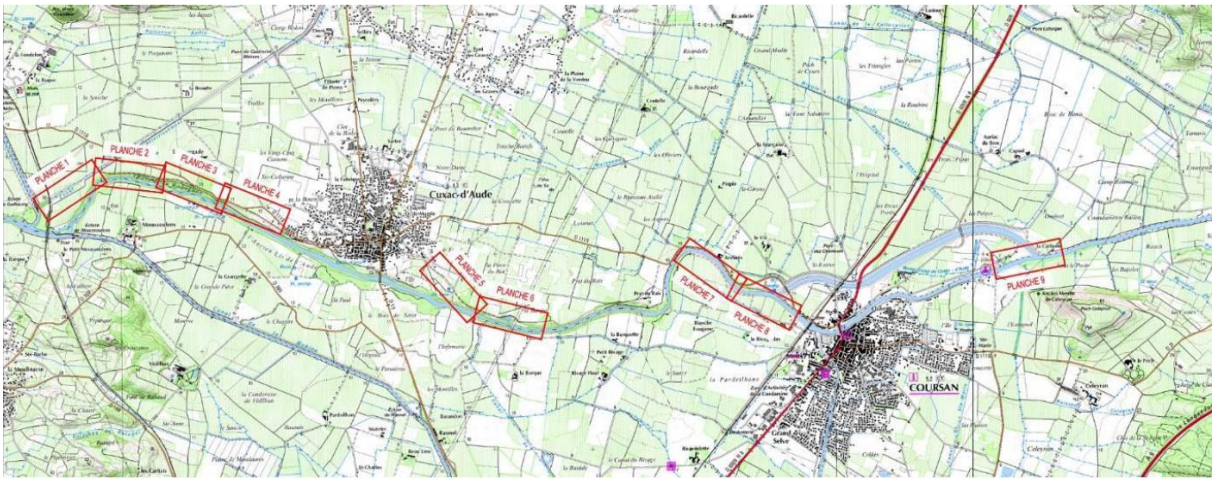


Figure 1 : localisation des tronçons de digues étudiés (Source : CCTP marché)

II. Désordres et mécanismes à l'origine des travaux étudiés

- Description factuelle : problèmes d'infiltrations et d'homogénéité géométrique
  - Hétérogénéité des terrains constituant la digue
  - Absence de clé d'ancrage
  - Géométrie et calage géométrique de l'ouvrage non maitrisé
  - Présence localisée d'infiltrations
- Scénario : pas de désordres constatés mais risques de :
  - Erosion interne suite à une infiltration
  - Initiation de brèche
  - Déversement mal maitrisé en cas de crue

III. Travaux étudiés

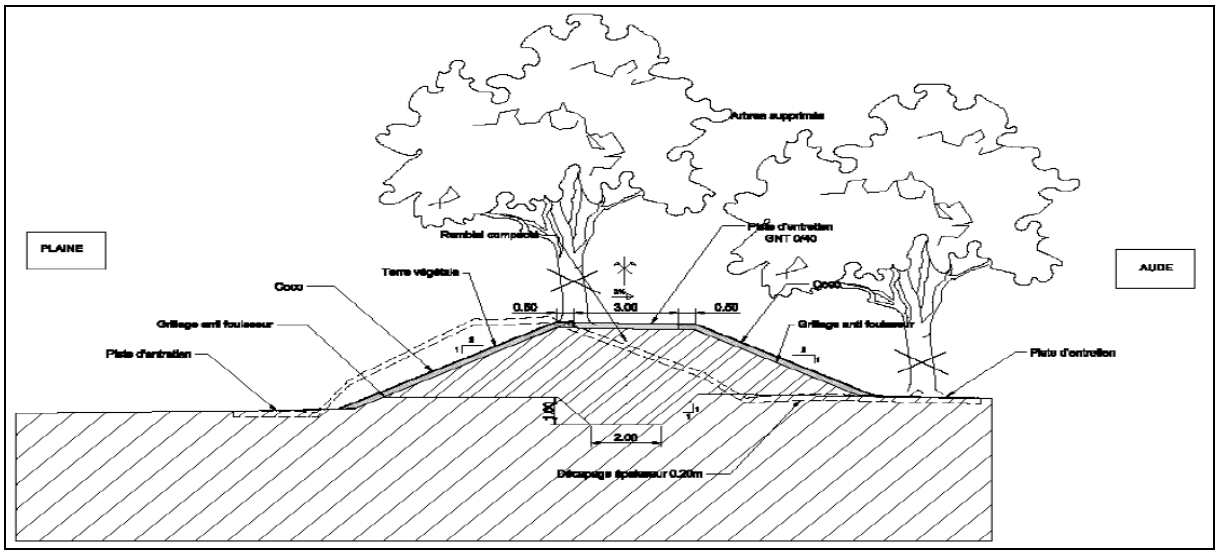
- Objectifs :
  - Assurer un fonctionnement contrôlé du fleuve dans la basse plaine
  - Pérenniser le système de protection

- Nouveaux ouvrages ou parties d'ouvrage mis en place :
  - Reconstruction totale des digues

- Principales modifications des ouvrages existants :
  - Clé d'ancrage de 1 m de profondeur
  - Homogénéisation géométrique de la digue et des matériaux de remblai
  - Protection à la surverse de tronçon spécifiques (création d'un déversoir)
  - Protection contre les animaux fouisseurs de l'ensemble du linéaire des digues en face amont et aval : ***utilisation d'un grillage double torsion à maille 6 x 8 – fil de diamètre nu 2,2 mm revêtu d'un alliage Zn95%/Al5% et d'une gaine PVC de 1mm d'épaisseur sur le diamètre – SURFACE = 57,000 m²***

Figure 2 : Photos de la digue pendant la pose du grillage anti fouisseur et après les travaux (Crédit photo : Maccaferri)

- Données géométriques :
  - Linéaire total de digue : 4947 m
  - Linéaire total de déversoir : 499 ml
  - Talus amont & aval des digues: 2H : 1V
  - Largeur en crête de digue : 4 m
  - Piste d'entretien en tête : 3 m
  - Hauteur variable suivant le calage altimétrique de la digue et le niveau des terrains en place à l'aval



Profil type du tronçon Gailhousty à la Bourgade (Source : CCTP marché)

- Travaux réalisés dans des : CN, C d'U, C d'E U
- Coût des travaux : 3.8 M €
- Date de début des travaux : Octobre 2019
- Durée des travaux : 22 mois

IV. Acteurs des travaux étudiés

- Maître d'ouvrage des travaux étudiés :
  - Nom : Syndicat Mixte du Delta de l'Aude (SMDA)
  - Adresse : Narbonne (11)
- Propriétaire du tronçon de digue :
  - Nom :
  - Adresse :
- Gestionnaire du tronçon de digue :
  - Nom :
  - Adresse :
- Maître d'œuvre des travaux étudiés :
  - Nom : BRL ingénierie
  - Adresse : Nîmes (30)
- Entreprise(s) :
  - Nom : Groupement CAZAL TP / LAVOYE TP
  - Adresse : Salles sur l'Hers (11) / Port la Nouvelle (11)

FICHE DE CAS
Traitement des terriers de lapins présents dans le corps de la digue du val d'Orléans
Commune de Sandillon (45)

Auteur : Thierry VOILLOT (DDT du Loiret)

I. Descriptif de la digue initiale

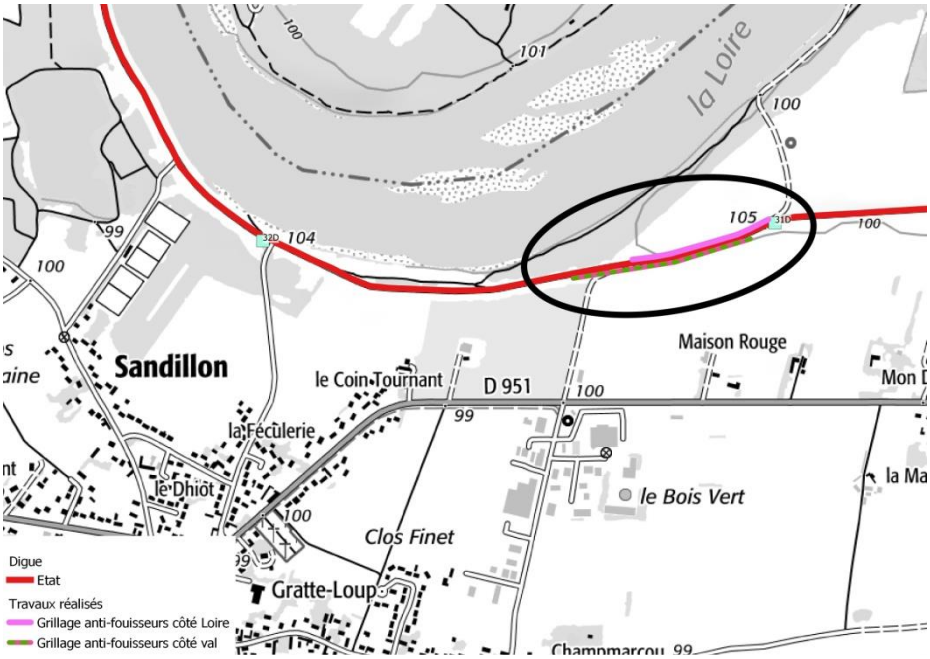


Figure 1 : plan de localisation du tronçon de digue traité

- Le secteur étudié est situé à hauteur du lieu-dit « Maison rouge » à Sandillon.
- Longueur du tronçon de digue étudié : 500 m
- Date de construction : inconnue
- Type de digue : Digue « sèche »

  La digue est principalement constituée de sables lâches qui peuvent être localement légèrement graveleux.

  A noter, qu'à cet endroit, le talus de digue côté Loire est dépourvu de perré.

- Données géométriques :
  - hauteur de la digue :
    - 4.5 m environ par rapport au terrain naturel côté val
    - 5.5 m côté Loire
  - pente de talus :

    Les talus ont une pente de l'ordre de 2H/1V côté Loire et de 3H/1V côté Val.
  - largeur de crête :

    Un chemin revêtu d'environ 4,50 m de large est présent en crête de digue. Deux banquettes, d'une hauteur d'environ 40 cm, sont présentes de part et d'autre de ce chemin.

- Fonctionnement hydraulique du cours d'eau :
  Sur ce secteur, la digue est située à plus de 100 m du lit de la Loire, en amont d'un extrados du fleuve.

- Données morpho-dynamiques :
  - distance de la digue par rapport au cours d'eau : 100 m
  - intérieur ou extérieur de la courbe : amont extrados

Figure 2 : carte (à gauche) de 1850 et prise de vue aérienne (à droite) du tronçon de digue d'intérêt

En comparant la carte de 1850 et la photo aérienne de 2016 (Figure 2), on constate que les berges du lit mineur de la Loire ont très peu évolué. Seule une île s'est développée au milieu du lit mineur.

II. Désordres et mécanismes à l'origine des travaux étudiés

- Date ou époque d'apparition/évènement (si connus) :
  Présence de nombreux terriers de lapins présents dès 2015 sur le talus côté val ainsi que de quelques terriers côté Loire.
  Augmentation du nombre de terriers côté Loire depuis 2018.

- Description factuelle :
  - Présence de terriers de lapins sur les talus de la digue côté val et côté Loire.
  - Déstructuration des talus avec présence de tas de matériaux aux entrées des terriers.

- Mécanismes :
  - Risque d'érosion interne

- Scénario :
  La circulation d'eau dans le corps de digue, accélérée par la présence de conduits (terriers), est propice à la formation d'érosion de conduit, premier stade avant la rupture complète de la digue.

III. Travaux étudiés

- Objectifs :
  - Réduction du risque d'érosion interne par comblement des terriers présents.
  - Eviter la création de nouveaux terriers.

- Nouveaux ouvrages ou parties d'ouvrage mis en place :
  - Mise en place de grillage anti-fouisseurs sur les talus côté val et côté Loire.

- Principales modifications des ouvrages existants :
  - Aucune modification structurelle si ce n'est la mise en place d'un grillage anti-fouisseurs.
- Travaux réalisés dans des conditions normales et lorsque les conditions météorologiques étaient favorables (en dehors des périodes de précipitations).
- Description détaillée (voir photographies) :
  - Préalablement aux travaux, des opérations de destruction des lapins ont été réalisées avec un lieutenant de louveterie
  - Décapage de la terre végétale sur une vingtaine de centimètres
  - Ouverture des terriers existants jusqu'au fond des galeries
  - Comblement des terriers avec le matériau en place
  - Reprofilage du talus
  - Mise en place du grillage anti-fouisseurs et ancrage
  - Renappage de la terre végétale
    - soit à la pelle mécanique
    - soit au bulldozer avec chenillage transversal (solution privilégiée sur les derniers chantiers car cette méthode a un rendement plus élevé, assure un meilleur tassement de la terre végétale et évite l'érosion superficielle en cas de pluie importante avant que la végétation herbacée n'ait repris).
- Coût des travaux :
  - talus côté val – 2017 – 5 250 m² - 48 600 € TTC
  - talus côté Loire – 2020 - 4 200 m² - 41 600 € TTC
- Date de début des travaux :
  - talus côté val : février 2017
  - talus côté Loire : novembre 2020
- Durée des travaux :
  - talus côté val : 13 jours
  - talus côté Loire : 9 jours

IV. Acteurs des travaux étudiés

- Maître d'ouvrage des travaux étudiés :
  - Nom : Etat – Préfecture du Loiret – DDT du Loiret
- Propriétaire du tronçon de digue :
  - Nom : Etat – DDT du Loiret
- Gestionnaire du tronçon de digue :
  - Nom : Etat – DDT du Loiret
- Maître d'œuvre des travaux étudiés :
  - Nom : Etat – DDT du Loiret - Service Loire, risques, transports – pôle Loire
- Entreprise(s) :
  - Nom : Vinci Construction Terrassement

V. Travaux similaires

- Val d'Ardoux - Beaugency – 2016 – talus côté val – 2 430 m²
- Val de Gien – Poilly-lez-Gien – 2016 – talus côté Loire – 600 m²
- Val d'Ardoux - Beaugency – 2019/2020 – talus côté Loire et côté val – 18 900 m²
- Val d'Ouzouer-sur-Loire – Germigny-des-Prés – 2019/2020 - talus côté Loire et côté val – 8 400 m²

VI. Photographies

- Travaux 2017 (talus côté val) :

Figure 3: décapage de la terre végétale

Figure 4 : renappage terre végétale

Figure 5 : finition du renappage de terre végétale

- Chantier 2020 (talus côté Loire) :

Figure 6 : décapage de la terre végétale

Figure 7 : mise en place du grillage anti-fouisseurs

Figure 8 : renappage de la terre végétale

Figure 9 : chenillage du talus

- Autre site avec chenillage transversal (Beaugency – 2020) :

Figure 10 : talus avec chenillage transversal

FICHE DE CAS
Déboisement avec enlèvement des souches et reconstitution du talus de digue côté Loire
Communes de Mareau-aux-Prés (45)
Plan Loire Grandeur Nature

Auteur : Loïc GERVAIS (DREAL Centre-Val de Loire)
Technique(s) mise(s) en œuvre : Déboisement et dessouchage, reconstitution du talus et réalisation d'un parement en enrochement, le tout, côté Loire

I. Descriptif de la digue initiale

Longueur du tronçon de digue étudiée : Le secteur étudié, situé à hauteur du lieu-dit « le Vieux Bourg », est composé de deux zones, une zone A de 560 m sur la partie amont et une zone B de 320 m sur la partie aval. Le linéaire cumulé est de 880 mètres.
Ce tronçon de digue fait partie du système d'endiguement du val d'Ardoux et se situe sur la commune de Mareau-aux-Prés

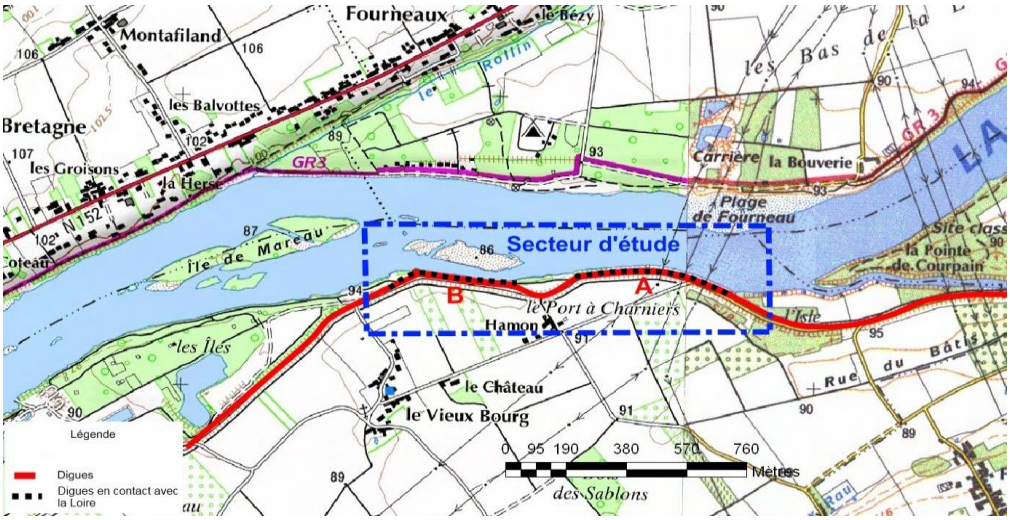


Figure 1: Plan de situation

- Date de construction : Les levées du val d'Ardoux sont des ouvrages anciens qui ont été construits et reconstruits par élévations et élargissements successifs depuis le Moyen Âge (recharges majoritairement en provenance du lit mineur de la Loire). Il s'agit, pour la plupart du linéaire, d'ouvrages en terre, non résistants à la surverse.
  Les rehausses dites « banquettes », constituées d'un merlon de terre, ont été majoritairement construites après la crue de 1846.

- Type de digue : Digue « sèche »
  Les remblais sont essentiellement composés de matériaux fins sableux à sablo-argileux, sablo-limoneux et limono-argileux, avec des passages d'argile d'épaisseur variable.
  A titre d'information, le sol d'assise est constitué d'une couche de matériaux argileux ou argilo-limoneux d'épaisseur variable (peu perméables et sujet au mécanisme de soulèvement hydraulique), d'une couche de matériaux sableux plus ou moins grossier à passage de graves (perméables) et du substratum marno-calcaire.

- Données géométriques :
  - Hauteur de la digue :
    - 5 m environ par rapport au terrain naturel côté val
    - 10 m côté Loire
  - Pente de talus :
    Les talus ont une pente de l'ordre de 2H/1V côté Loire et de 3H/1V côté Val.
  - Largeur de crête :
    Une voie en revêtement enrobé et circulable d'environ 3,50 m de large, dite « rue de Verdun » est présente en crête de digue. Deux banquettes, d'une hauteur d'environ 40 à 60 cm, sont présentes de part et d'autre de ce chemin. La largeur totale avoisine les 8 m.
    Il est à noter que le parcours de « La Loire à vélo » emprunte cette voie.

- Fonctionnement hydraulique du cours d'eau : Régime fluvial
  Le site de travaux se situe en extrados d'un léger méandre de la Loire. Cette configuration engendre des vitesses d'écoulement plus fortes le long des berges et une sensibilité accrue au risque d'érosion externe.
  À cet endroit, la levée est en contact permanent à deux reprises avec le lit vif de la Loire.

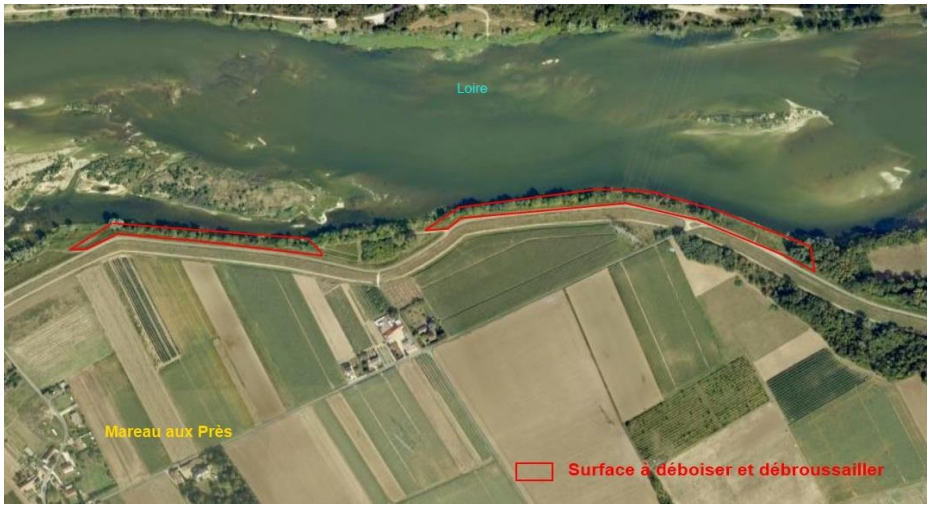


Figure 2: Zone de travaux

- Données morpho-dynamiques :

En comparant la carte de 1850 et la photo aérienne de 2015 (Fig. 3 et 4), on constate que :
- Les berges du lit mineur de la Loire ont très peu évolué
- L'île de Mareau (1) n'a pratiquement pas évolué géographiquement
- Le chenal situé entre l'île de Mareau et la rive gauche (2) est maintenant au contact de la berge sur tout le linéaire. Il provoque une accélération et une concentration de l'écoulement au niveau du pied de la levée.

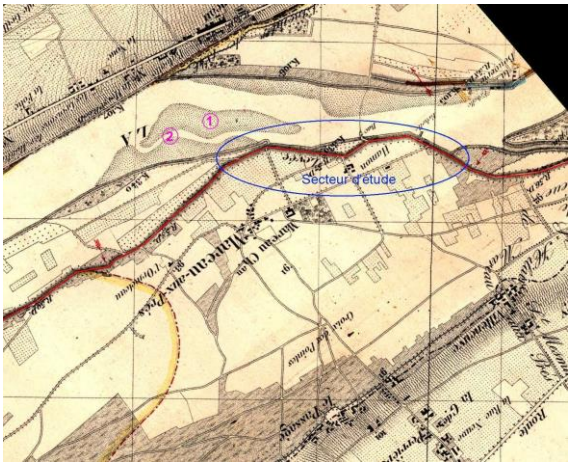


Figure 3: Localisation du secteur d'étude sur une carte de 1850

Figure 4: Photo aérienne 2015 (DREAL-Centre – Données SIEL)

II. Désordres et mécanismes à l'origine des travaux étudiés

- Date ou époque d'apparition/évènement (si connus) :

Portion de digue identifiée comme étant sensible aux phénomènes d'érosion externe (érodabilité due au contact direct avec le fleuve) et d'érosion interne (présence d'arbres) :
- Une étude du LRPC de Blois de 2007 a démontré le risque d'érosion externe existant sur ce tronçon, ce qui a été confirmé par une étude bathymétrique en 2010.
- De plus, la présence d'une végétation abondante, observée lors des inspections de terrain, est un facteur aggravant au risque d'érosion interne.
- Ensemble des points de faiblesse mis en évidence dans le diagnostic établi par la DREAL Centre en 2011.

- Description factuelle :
  - Présence d'une végétation abondante et de nombreux arbres ce qui ne permet pas d'accéder au pied de levée côté Loire
  - Absence de chemin de service en pied de levée côté Loire ce qui empêche tout entretien depuis le bas du talus du fait de la grande hauteur de la levée (10m)
  - Fleuve en contact direct avec l'ouvrage
  - Existence d'un chenal entre la levée et l'île de Mareau favorisant une accélération du courant
  - Érosion importante du pied de levée sur toute la partie en contact avec le lit vif de la Loire et affaissement du perré
  - Destructuration du perré existant par le système racinaire de la végétation
  - Voie « Loire à vélo » en crête de digue
  - Présence de banquettes côté fleuve et côté val

- Mécanismes :
  - Risque d'érosion externe
  - Risque d'érosion interne

- Scénario :
  - Le fait que le fleuve soit au contact direct de l'ouvrage associé à une incision du lit de la Loire [Réf 1] a favorisé l'érosion du pied de levée, ce qui peut ensuite conduire à une déstabilisation du talus.
  - La circulation d'eau dans le corps de digue, engendrée par le système racinaire de la végétation, est propice à la formation de renards hydrauliques, premier stade avant la rupture complète de la digue.

III. Travaux étudiés

- Objectifs :
  - Réduction du risque d'érosion externe par un renforcement du pied de levée
  - Réduction du risque d'érosion interne par retrait de la végétation et reconstitution de la digue (talus et perré)

- Nouveaux ouvrages ou parties d'ouvrage mis en place :
  - 1ère phase de travaux (2013) : abattage des arbres et débroussaillage de la végétation sur la levée (talus côté Loire)

Figure 5: Talus avant déboisement (DREAL Centre)

Figure 6: Talus après déboisement – Souches laissées apparentes (DREAL Centre)

  - 2nde phase de travaux (fin 2014 – étés 2015 et 2016) : exécution d'un renforcement du pied de levée, côté Loire, par mise en œuvre d'enrochements
    - Réalisation de la piste en pied (chemin de service)
    - Arrachage des souches suivi d'une réfection du perré et du talus
    - Parement en enrochement

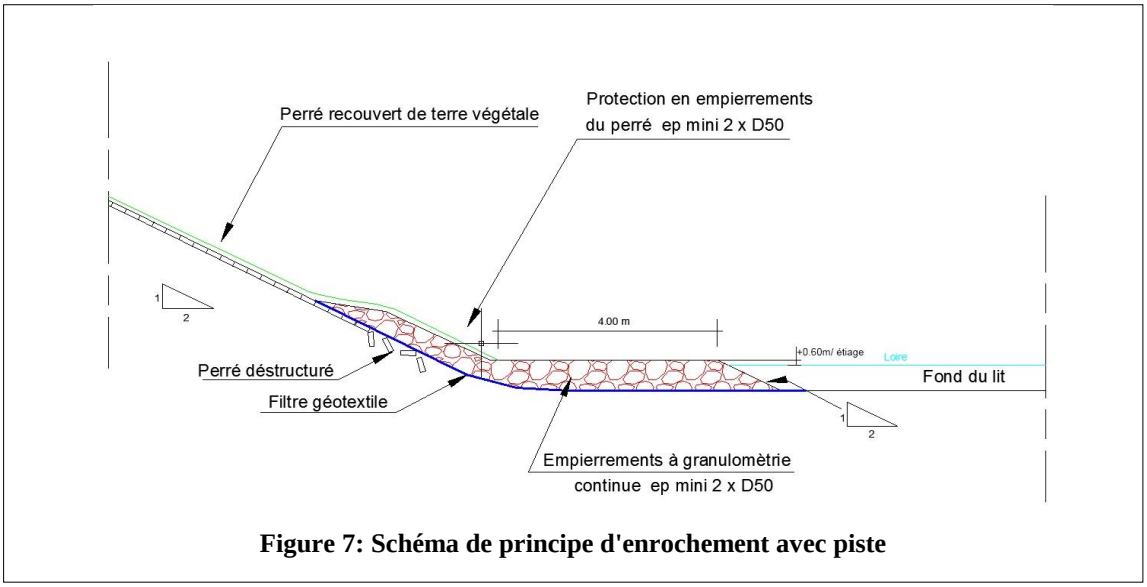


Figure 7: Schéma de principe d'enrochement avec piste

- Principales modifications des ouvrages existants :
  - En théorie, aucune modification structurelle (reconstitution à l'identique)

<u>Procédure théorique de réparation du perré (prévue au CCTP)</u>

L'arrachage des souches et des racines à la dent Becker occasionne une destructuration du perré et des dommages au talus sur une épaisseur variable. Cela implique une réfection du perré et du talus .

Ainsi, le comblement des cavités dues à l'arrachage des souches et racines doit être réalisé à l'aide de matériaux de nature argileuse proche du matériau constitutif de la levée, compacté dans les règles de l'art. Plusieurs cas de figures peuvent être rencontrés :

Cas 1 : Traitement ponctuel d'une cavité due à l'extraction d'une souche isolée (Figures 8, 9 et 10)

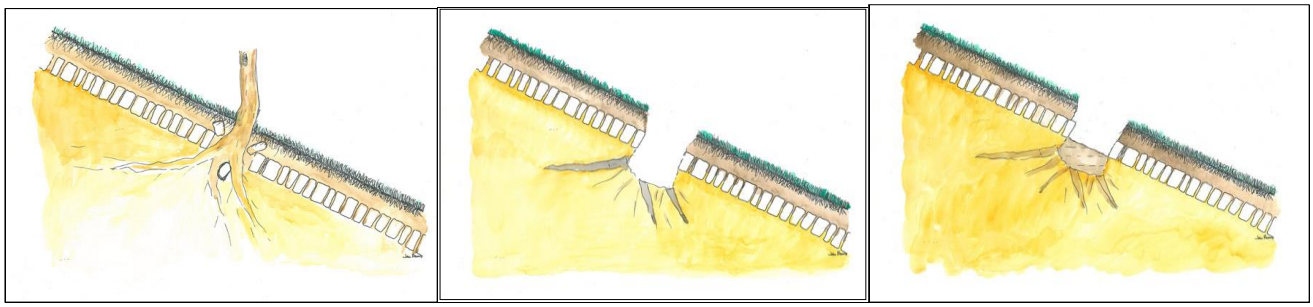


Figure 8: Schéma en coupe de principe : vue de la situation avant travaux (à gauche), arrachage et traitement des parties non saines (au centre) et comblement des vides par des matériaux argileux (à droite) (illustration Jean Maurin - DREAL Centre)

➔ Dégagement de la zone en enlevant la végétation rase et la terre végétale présente au niveau des zones détériorées jusqu'en limite du perré sain

- Enlèvement de toutes les parties non saines du perré et du matériau argileux derrière le perré et la récupération des pierres du perré. Arrachage de la souche et cavité expurgée des racines (Figure 8)
- Comblement des vides par des matériaux de type argileux (Figure 8)

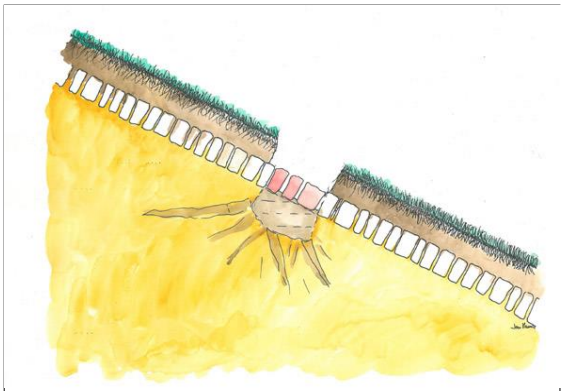


Figure 9: Réfection ponctuelle du perré (Jean Maurin – DREAL Centre)

Figure 10: Principe de végétalisation localisée (Jean Maurin – DREAL Centre)

- Remise en place soignée des pierres du perré récupérées et mise en œuvre de joints afin d'obtenir un aspect identique aux zones saines (Figure 9)
- Remise en place d'une couche de 20 cm de terre végétale issue du décapage (Figure 10)

Cas 2 : Traitement des cavités due à l'extraction de souches denses et/ou rapprochées (Figures 11, 12 et 13)

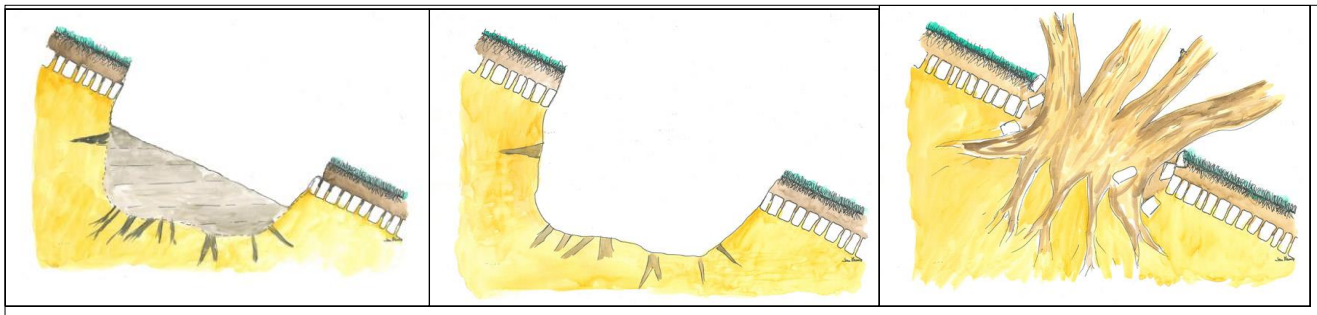


Figure 11: Schéma en coupe de principe : vue de la situation avant travaux (à gauche), arrachage et traitement des parties non saines (au centre) et comblement des vides par des matériaux argileux avec pose d'un géotextile (à droite) (illustration Jean Maurin - DREAL Centre)

➔ Dégagement de la zone en enlevant la végétation rase et la terre végétale présente au niveau des zones détériorées jusqu'en limite du perré sain
- Enlèvement de toutes les parties non saines du perré et du matériau argileux derrière le perré. Arrachage de la souche et cavité expurgée des racines (Figure 11)
- Comblement des vides par des matériaux de type argileux et pose d'un géotextile (Figure 11)

➔ Mise en œuvre d'un empierrement LMA 10/60 + CP 45/125 et de joints afin d'obtenir un aspect identique aux zones saines (Figure 12)
- Remise en place d'une couche de 20 cm de terre végétale issue du décapage et d'une géogrille (Figure 13)

Figure 12: Réfection du perré sur de grandes surfaces (Jean Maurin – DREAL Centre)

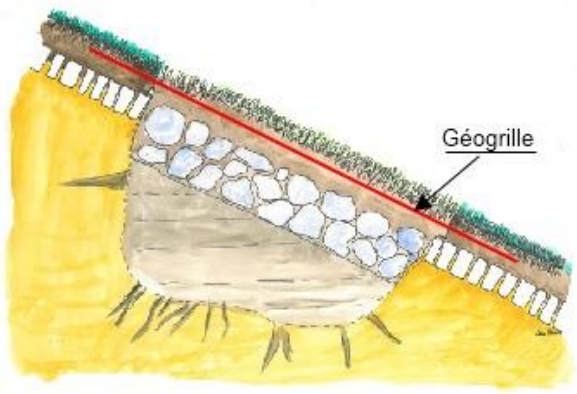


Figure 13: Principe de végétalisation sur de

Procédure de réparation du perré appliquée en phase opérationnelle

Dans les faits, suite au décapage et à la mise au propre du talus, il a été constaté que le profil de la digue était modifié. En effet, en pied de talus, on a observé une butte de 60cm/1,00m d'épaisseur, sur environ 1,50m/2m de hauteur. Elle est constituée d'un mélange de pierres et terre végétale. Il a été supposé qu'il s'agissait d'une zone déjà réparée après une destruction du perré d'origine par la végétation. Il a été décidé de préserver le plus possible ce massif d'empierrements lors de l'extraction des souches.

Figure 14: Massif pierres/terre en pied de talus (DREAL Centre)

➔ Réparation du perré sur 1er secteur

- Décapage de la terre végétale au-dessus du massif empierré
- Enlèvement des souches non prises dans le massif empierré
- Arrachage des souches prises dans le massif empierré à l'aide de la dent ripper
- Enlèvement au maximum des racines
- Nettoyage du trou (Figure 15)
- Comblement du trou par le matériau GNT 0/31,5 (Figure 16)
- Compactage à la plaque vibrante
- Mise en place du géotextile recouvert de 25cm de CP 45/125 (Figure 17)

- Mise en œuvre de 20cm de terre végétale, issue du décapage (Figure 18)
- Protection de la terre végétale contre l'érosion par une toile de coco
- Ensemencement

Figure 15: Fond de fouille (DREAL Centre)

Figure 16: Comblement à la GNT 0/31,5 (DREAL Centre)

Figure 17: GNT recouverte du géotextile (DREAL Centre)

Figure 18: Empierrement CP 45/125 (DREAL Centre)

➔ Réparation du perré sur 2nd secteur
- Décapage de la terre végétale au-dessus du massif empierré
- Enlèvement des souches non prises dans le massif empierré
- Arrachage des souches prises dans le massif empierré à l'aide de la dent ripper
- Enlèvement au maximum des racines
- Nettoyage du trou (Figure 19)
- Comblement des trous avec le mélange pierres récupérées/terre végétale jusqu'à épuisement du stock.

Le comblement s'est ensuite fait avec de l'empierrement LMA10/60 et CP45/125 recouvert de GNT 0/31,5 (Figure 20)
- Compactage à la plaque vibrante puis balayage manuel (Figures 21 et 22)
- Mise en œuvre d'une couche de 10cm de terre végétale, issue du décapage puis d'une géogrille Enkamat 7020. Celle-ci est recouverte de 5cm de terre végétale. (Figures 23 et 24)
- Protection de la terre végétale contre l'érosion par une toile de coco
- Ensemencement sur une zone. Le reste est une zone test laissée libre à un ensemencement naturel

Figure 19: Fond de fouille (DREAL Centre)

Figure 20: Mélange LMA10/60 et CP45/125 (DREAL Centre)

Figure 21: Compactage à la plaque vibrante (DREAL Centre)

Figure 22: Balayage manuel exécuté (DREAL Centre)

Figure 23: Mise en place géogrille (DREAL Centre)

Figure 24: Terre végétale (DREAL Centre)

Cette expérimentation des procédés de comblements des fosses de dessouchage fait l'objet d'un suivi de la part du Cerema.

En effet, le Cerema a proposé de suivre l'évolution des zones de dessouchage de manière qualitative par comparaison de photographies et de façon quantitative par comparaison de levés topographiques.

Des points de vue fixes et géoréférencés ont été mis en place depuis le chemin de service pour visualiser l'évolution des comblements de fouilles sur le talus de la levée. Un passage biennal a été proposé avec un état initial instauré début 2018.

Sur la même fréquence, un maillage de points topographiques est réalisé à l'intérieur et au pourtour des zones de comblements pour déceler les éventuels mouvements de terrain.

- Liste des techniques employées décrites dans des fiches "Techniques du GT" :
  - Renforcement par enrochement
  - Traitement de la végétation sur talus de digue côté fleuve

- Données géométriques :

  L'emplacement de chaque zone ayant fait l'objet d'une réparation du perré a été repéré sur plan. Ce repérage en X, Y et Z a été effectué par un géomètre.

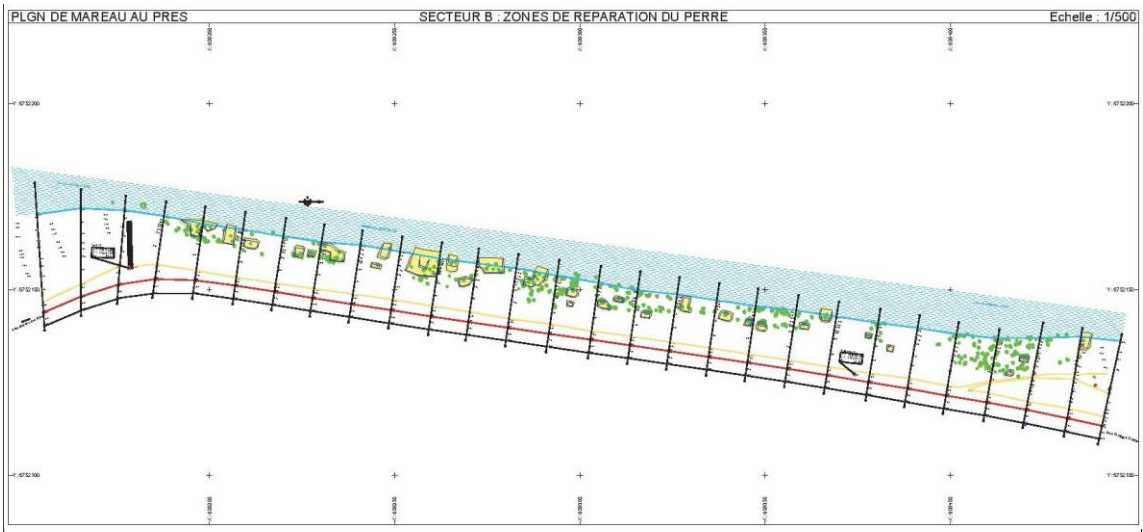


Figure 25: Repérage des zones de réparation du perré

- Conditions de réalisation des travaux :
  Travaux réalisés sans contraintes de temps si ce n'est celle du marché contractuel. Mise en place d'une déviation « Loire à vélo ». Principale contrainte liée au niveau de la Loire ce qui a étalé les travaux sur près de 3 ans
- Coût des travaux : 775 000 €HT – 930 000 €TTC
- Date de début des travaux : Fin 2014, été 2015 et été 2016
- Durée des travaux :
  - Abattage/débroussaillage : 2 mois
  - Renforcement par enrochement : 2 mois de période de préparation +période d'exécution de 4 mois
- Difficultés rencontrées :
  Délais de réalisation contraints au niveau de la Loire
- Enseignement des travaux :
  - Contrainte environnementale : proximité de la réserve naturelle
  - Optimiser la période de réalisation des travaux
  - Lancement des travaux au début de la période d'étiage

IV. Acteurs des travaux étudiés

- Maître d'ouvrage des travaux étudiés :
  - Nom : État – Préfecture du Loiret – représentée par la DDT du Loiret
- Propriétaire du tronçon de digue :
  - Nom : DDT du Loiret
- Gestionnaire du tronçon de digue :
  - Nom : DDT du Loiret / SLRT
- Maître d'œuvre des travaux étudiés :
  - Nom : DREAL Centre / SLBLB / DETL
- Entreprise(s) :
  - Nom : VINCI Construction Terrassement

V. Bibliographie

Zbigniew gasowski, L'enfoncement du lit de la Loire, 1994

Figure 26: Végétation avant travaux (DREAL Centre)

Figure 27: Déboisement en cours (DREAL Centre)

Figure 28: Déboisement terminé (DREAL Centre)

Figure 29: Chemin de service en cours de réalisation (DREAL Centre)

Figure 30: Exécution du dessouchage à partir du chemin de service (DREAL Centre)

Figure 31: Enlèvement du maximum de racines (DREAL Centre)

Figure 32: Nettoyage des trous (DREAL Centre)

Figure 33: Comblement par empierrement LMA 10/60 + CP45/125 (DREAL Centre)

Figure 34: Couverture en GNT 0/31,5 puis compactage (DREAL Centre)

Figure 35: Aspect de finition (DREAL Centre)

Figure 36: Terre végétale (DREAL Centre)

Figure 37: Toile coco (DREAL Centre)