

# **Synthèse méthodologique sur le confortement des digues présentant des désordres chroniques en Nouvelle Aquitaine**





## Métadonnées

<i>Titre</i>	SYNTHÈSE MÉTHODOLOGIQUE SUR LE CONFORTEMENT DES DIGUES
<i>Sous-titre</i>	Synthèse méthodologique sur le confortement des digues présentant des désordres chroniques en Nouvelle Aquitaine
<i>Nature</i>	Rapport
<i>Commanditaire (s)</i>	DREAL Nouvelle Aquitaine Monsieur VARRIERAS
<i>Références client</i>	SRNH Cité Administrative Rue Jules Ferry BP 90 33090 BORDEAUX Cedex
<i>Réalisée par</i>	Cerema Sud-Ouest Département Laboratoire de BORDEAUX Groupe GAÏA/DOF/RGT
<i>Affaire suivie par</i>	Yves NEDELEC
<i>Références Cerema</i>	Devis n° C19SB0092 - Affaire 14.33.G603
<i>Résumé</i>	Ce document présente une nomenclature de désordres et de réparations plus particulièrement rencontrés sur des systèmes d'endiguement exposés à des sollicitations répétées (estuaires, lagunes). Cette nomenclature est suivie de questions/réponses pour aider à bien prendre en compte ces dégradations chroniques dans la protection.
<i>Mots clés</i>	<b>Mots clés selon les thésaurus <a href="#">URBAMET</a> et/ou <a href="#">ECOPLANETE</a></b>  <b>PRÉVENTION DES INONDATIONS, ESTUAIRES, LAGUNES</b>  <b>Mots clés géographiques</b>  FRANCE, NOUVELLE AQUITAINE
<i>Droits</i>	Ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans autorisation expresse de : DREAL Nouvelle Aquitaine Crédits photos – Illustrations : Cerema / Département Laboratoire de BORDEAUX / GAÏA



Référence  
documentaire

N° ISRN  oui  non  
Cerema-DTerSO-2019- 118-FR

Conditions de  
diffusion

**Notice (auteurs, titre, résumé, ...)**

diffusable  
 non diffusable

**Rapport d'étude**

libre (document téléchargeable librement)  
 contrôlé (celui qui en veut communication doit en faire la demande et obtenir l'autorisation et les conditions d'usage auprès du commanditaire)  
 confidentiel (document non diffusable)

Historique versions

Version (s)	Date	Commentaire
V.1	20/01/2020	
V.2	04/03/2020	
V.3	14/05/2020	

Validation du document

Rédacteur (s)	Yves NEDELEC	Cerema / Département Laboratoire de BORDEAUX <a href="mailto:yves.nedelec@cerema.fr">yves.nedelec@cerema.fr</a> Tél. 05.56.70.63.68
Relecteur (s)	Emeric VEDIE	Cerema / Département Laboratoire de BORDEAUX <a href="mailto:emeric.vedie@cerema.fr">emeric.vedie@cerema.fr</a> Tél. 05.56.70.63.95
Validé par	Yves NEDELEC	Cerema / Département Laboratoire de BORDEAUX <a href="mailto:yves.nedelec@cerema.fr">yves.nedelec@cerema.fr</a> Tél. 05.56.70.63.68

Envoi du rapport

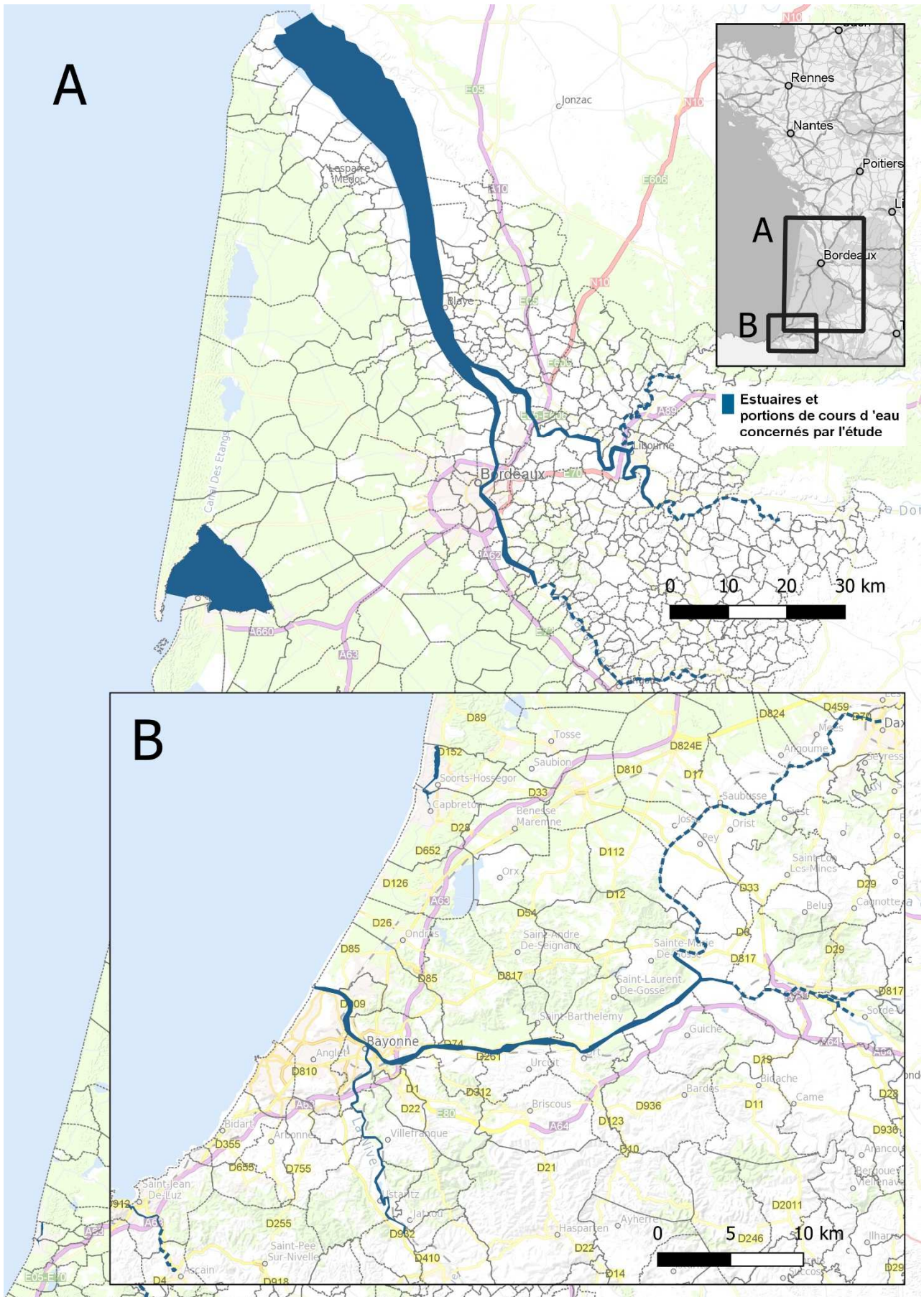
Destinataire (s) et nombre d'exemplaires	Date d'envoi
1 ex. DREAL Nouvelle Aquitaine (M. VARRIERAS)	6 mars 2020 (PDF) 15 mai 2020 (version définitive)
1 ex. Cerema / Département Laboratoire de BORDEAUX	



## Sommaire

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>1 - NOMENCLATURE DES DÉSORDRES (NATURE ET CAUSES) .....</b>	<b>4</b>
<b>2 - NOMENCLATURE DES TRAITEMENTS OPÉRÉS SUITE À DES DÉGRADATIONS .....</b>	<b>9</b>
<b>3 - CANEVAS DE RÉFLEXION POUR LE TRAITEMENT DES DÉGRADATIONS CHRONIQUES.....</b>	<b>13</b>
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>32</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>33</b>

# PLAN DE SITUATION





# RAPPORT

---

## INTRODUCTION - CONTEXTE

La région Nouvelle Aquitaine présente un linéaire très important de rivages fluviaux estuariens et maritimes où il est nécessaire de protéger des terres basses riveraines contre des inondations ou des intrusions d'eaux marines. Prenant le plus souvent la forme de digues bordant les terres exposées, les structures protectrices artificielles peuvent aussi être des quais, des murs ou des portions de terrain naturel, spécialement remodelées. Les dispositifs de défense ainsi constitués sont parfois très anciens et sont intimement liés à la possibilité de circuler, travailler et résider sur les territoires protégés.

Le rôle de protection est activé dans plusieurs cas de figure : crue fluviale, montée du niveau marin sous l'effet des marées, afflux d'eau par paquets sous l'effet des vagues. L'efficacité de la protection repose alors sur l'adéquation entre les caractéristiques physiques de la structure (géométrie, résistance à la poussée des eaux, cohésion des matériaux, ...) et l'intensité de la sollicitation hydraulique.

La structure doit également s'insérer dans un système de défense approprié. A ce titre, elle doit être en accord avec l'ensemble des principes de sécurité des biens et des personnes, de préservation des milieux aquatiques et de gestion raisonnée des berges et du trait de côte, dont la nécessaire cohérence fonde l'exercice de la compétence GEMAPI (Introduction à la prise de compétence GEMAPI – Cerema 2018).

Des épisodes hydrométéorologiques remarquables par leur violence, viennent régulièrement démontrer la possibilité de défaillance qui affecte les systèmes de défense (Cf. "Etude des systèmes de protection contre la submersion marine – Méthodologie"). Ils sont notamment à l'origine de brèches, ruptures ou affaissements qui occasionnent ou aggravent la submersion des terres et nécessitent, la plupart du temps, des réparations d'urgence ou des renforcements de la structure touchée.

En dehors des périodes de sollicitations hydrauliques extrêmes, les structures de défense sont également victimes de dégradations qui n'exposent pas directement les territoires protégés au risque d'inondation ou de submersion mais qui fragilisent ou amoindrissent leur résistance aux aléas d'origine hydroclimatique. Ces dégradations touchent le plus souvent les structures elles-mêmes (déformation, altération de l'étanchéité, ...) mais peuvent aussi toucher leur environnement (modification des fonds voisins, affaiblissement des sols de fondation, ...) et ainsi avoir un effet indirect. En particulier, l'accumulation de dégradations mineures mais chroniques peut mener à une perte de résistance problématique. Ce caractère chronique est particulièrement favorisé par les milieux exposés à des phénomènes récurrents : marée pour le littoral et les estuaires, mascaret pour les estuaires, batillage causé par une navigation fluviale intense. La carte de situation ci-contre montre les principaux cours d'eau et estuaires concernés par cette exposition au Sud de la Gironde (figurés en bleu foncé).



L'attention portée à la réparation préventive des dégradations qui affaiblissent les structures de défense est d'une importance comparable à celle portée aux réparations curatives faisant suite à une défaillance majeure. Mais lorsque les réparations doivent être fréquemment ou durablement renouvelées, la pertinence du dispositif maintenu et la justification de sa durabilité peuvent soulever des questions en l'absence d'amélioration sensible. Ces questions se posent notamment aux services de la DREAL chargés de vérifier la sécurité des ouvrages hydrauliques en application des articles R.214-112 à R.214-151 du Code de l'Environnement.

Dans le cadre de l'instruction des demandes d'autorisation ou déclaration de travaux sur digues, le Service de Contrôle de la Sécurité des Ouvrages Hydrauliques (SCSOH) donne un avis technique sur la pérennité et la sécurité des ouvrages classés.

Le niveau de sécurité évalué comme bon et maîtrisé à un instant donné, notamment à travers l'étude de dangers, ne peut-il être amélioré par un choix judicieux de la technique de réparation ou l'adoption de modifications substantielles de l'ouvrage ?

Il est également prévu de déclarer les événements importants pour la sûreté hydraulique d'une digue (EISH) selon les modalités indiquées dans l'arrêté du 21 mai 2010, pris pour application de l'article R 214-215 du Code de l'Environnement. Cet arrêté est complété par un formulaire de déclaration officiel mis à disposition des exploitants d'ouvrages hydrauliques.

Le principe de la déclaration d'EISH est une information de l'autorité compétence en matière de mise en danger, réelle ou potentielle, de personnes ou de biens par l'ouvrage exploité. Le niveau de dangerosité est traduit par 3 classes :

- rouge dans le cas de décès, de blessures graves ou de pénétration de l'eau dans la zone protégée suite à la formation d'une brèche
- orange dans le cas d'une mise en danger de personnes ou de dégradations importantes de l'ouvrage à réparer d'urgence
- jaune dans le cas de dégradations à réparer dans les meilleurs délais.

Le texte de 2010 insiste sur le caractère hydraulique de l'évènement qualifiable d'EISH pour les digues et l'essentiel des déclarations se trouve naturellement associé à un évènement hydro-météorologique sévère ou à l'origine des désordres observés.

L'arrêté prévoit la déclaration d'évènements ou d'évolutions précurseurs, de nature autre qu'hydraulique le cas échéant, mais n'envisage ce cas que pour les barrages. Les désordres chroniques affectant les berges et les digues qu'elles supportent, pourraient pourtant suivre une pratique similaire.

Enfin, le décret digues du 12 mai 2015 introduit pour les systèmes d'endiguement, un registre de suivi qui permet de conserver des traces d'éléments importants par leur caractère répétitif, même si pris isolément, ils paraissent anodins.

Les situations présentées ici montrent que des évolutions d'origine mécanique, touchant la digue mais aussi, dans certains cas, la berge qui la supporte, requièrent une surveillance régulière des lieux, sans toutefois toujours aboutir rapidement à un défaut de protection. Des ouvrages fissurés se stabilisent ainsi sans constat de brèche ou d'effondrement. La résistance à des épisodes extrêmes futurs n'est toutefois pas garantie. Une telle évolution doit donc être connue au même titre que des dysfonctionnements hydrauliques. Il serait donc pertinent qu'elle soit traduite sous la forme d'une déclaration d'EISH ou une forme voisine, précisant qu'il s'agit d'un constat d'évolution et non d'un évènement isolé.



Pour évaluer méthodiquement la pérennité de réparations, il s'agit finalement de porter une attention appropriée aux évènements touchant une structure de défense et envisager avec pertinence l'éventuelle modification de celle-ci.

Ce document s'appuie sur ces cas réels et propose, dans le contexte des ouvrages sujets à dégradations chroniques :

- une nomenclature des facteurs et processus à l'origine des dégradations
- une nomenclature des traitements opérés suite à ces dégradations
- une mise en relation des dégradations ou altérations chroniques aux défaillances redoutées sous la forme de questions à se poser durant la conception, la gestion et la projection de l'avenir à long terme, de l'ouvrage.

Les éléments introduits dans ce document concernent essentiellement des aspects mécaniques et géotechniques, mais d'autres ensembles de critères non abordés précisément ici, seront abordés plus qualitativement : environnementaux, socio-économiques et patrimoniaux.

Les photographies illustrant ce document, sauf mention contraire, concernent des ouvrages et berges situées dans les secteurs présentés sur le plan de situation et sont propriétés du Cerema, à l'exception de l'illustration de la question 10.



## 1 - NOMENCLATURE DES DÉSORDRES (NATURE ET CAUSES)

Les catégories de désordres sont présentées dans un tableau qui comprend son intitulé, un texte descriptif, une ou quelques photos d'illustration et un ensemble de points demandant une attention plus particulière pour chaque cas.

Huit catégories de désordres ont été définies en rassemblant des facteurs et des processus menant à la dégradation d'une digue ou à la diminution de sa capacité de protection (risque accru de défaillance, niveau de franchissement abaissé) :

- érosion interne par infiltration d'eau
- érosion interne suite à l'apparition d'un orifice ou d'un défaut d'origine hydraulique
- affaissement et fissuration sur la rive
- brèche ou rupture d'un ouvrage
- déplacement ou disparition d'une partie de la berge
- déplacement ou disparition d'une partie de la digue
- déformation superficielle de la crête de digue ou accumulation de matériaux
- déformation superficielle de la crête suffisante pour observer un passage d'eau.

Ces désordres qui ne constituent pas tous une perte directe des fonctions protectrices de la digue, sont toutefois de nature à déclencher le démarrage d'une démarche de vigilance. Il peut s'agir de :

- un enregistrement dans le registre de suivi prévu dans le décret digue du 12 mai 2015
- la rédaction d'une fiche de déclaration d'évènement important pour sa sûreté hydraulique. Cela peut notamment s'expliquer par le risque d'une aggravation de la détérioration, allant jusqu'à la rupture de l'ouvrage. Les désordres affectant les seules berges sont à considérer comme de tels évènements importants
- la mise en œuvre d'une étude consacrée à l'examen détaillé des facteurs et à l'élaboration de parades appropriées. Le domaine de cette étude peut dépasser la seule ingénierie des ouvrages hydrauliques
- la mise en œuvre à l'échelle d'un gestionnaire ayant la compétence GEMAPI, d'une action spécifiquement dédiée à ces facteurs et processus, à l'image des stratégies élaborées dans le contexte du recul du trait de côte (contexte proche notamment du recul observé par certaines berges estuariennes).

Les stratégies locales de gestion de la bande côtière permettent notamment aux collectivités de connaître le niveau d'aléa par des diagnostics approfondis (mesures, historiques d'observations, modélisation, ...), de disposer d'une vision des enjeux menacés à court et moyen termes et de choisir la solution de gestion la mieux adaptée.

Des indications sont fournies sur ce point par le guide de l'action locale élaboré par le GIP Littoral Aquitain (Cf. bibliographie).

Les points particuliers mentionnés selon chaque situation sont présumés conduire aux risques ou aux évolutions suivantes :

- **réparation nécessaire** : la fonction de protection n'est plus assurée
- **surveillance nécessaire** : le désordre est évolutif et des observations répétées doivent être effectuées pour évaluer le sens et la rapidité de l'évolution
- **diagnostic expérimental** : l'observation visuelle est insuffisante pour déceler le désordre ou en évaluer l'ampleur. Des mesures physiques doivent être pratiquées (mesure de perméabilité, localisation d'eau dans le corps ou dans le pied de digue)



Illustration 1



- **diagnostic de contexte nécessaire** : le désordre peut dépendre de facteurs résultant de la configuration des lieux et du contexte de l'ouvrage touché (voisinage, contraintes météorologiques). Ces facteurs doivent, dans ce cas, être mis en évidence pour préciser la cause probable du désordre et, le cas échéant, résoudre des problèmes plus étendus
- **incidence hydraulique** : le désordre occasionne des phénomènes hydrauliques autres que ceux liés à la protection par l'ouvrage (perturbations de courants ou de la surface de l'eau, assèchement d'un cours d'eau)
- **incidence environnementale** : le désordre s'accompagne d'un effet sur l'environnement (pollution, présence de matériaux nuisibles, dégradation d'écosystèmes).

La nomenclature de traitements présentées dans la deuxième partie indique quelles orientations donner aux parades envisagées face à ces désordres.

INTITULÉ	DESCRIPTION	POINTS PARTICULIERS
Erosion interne, infiltration	<p>Le mécanisme en jeu ici est la disparition des matériaux solides constitutifs de la digue et de son support, sous l'action d'une circulation des eaux au sein d'un milieu poreux. De manière naturelle, l'eau circule dans le sol et les sédiments qui forment la berge et l'estran, lorsque le cours d'eau est influencé par la marée ou par le drainage naturel de la nappe phréatique.</p> <p>La circulation de l'eau risque d'occasionner le départ de matériaux solides et d'affaiblir le corps de digue lorsqu'elle se produit en dehors des conditions d'écoulement courantes (marées et/ou pluies très fortes). Désordre interne difficile à déceler. Il peut être favorisé par une dégradation importante du corps ou du pied de digue (<i>Cf. illustration 1 ci-contre sur laquelle l'étanchéité du corps de digue est impacté par sa substitution de terre meuble par des graves</i>).</p> <p>L'agent moteur des désordres est la différence de charge entre les faces de la digue (forts coefficients de marée aggravants, puis entre la nappe et la surface de la rivière.</p>	<p>→ Diagnostic expérimental :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- mesure de flux d'eau dans les matériaux</li> <li>- détection de vides</li> <li>- mesure de la porosité</li> </ul> <p>→ Surveillance nécessaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- végétation, suintement</li> <li>- dépôts de sédiments exfiltrés</li> </ul>



Illustration 2



Illustration 3



Illustration 4



Illustration 5

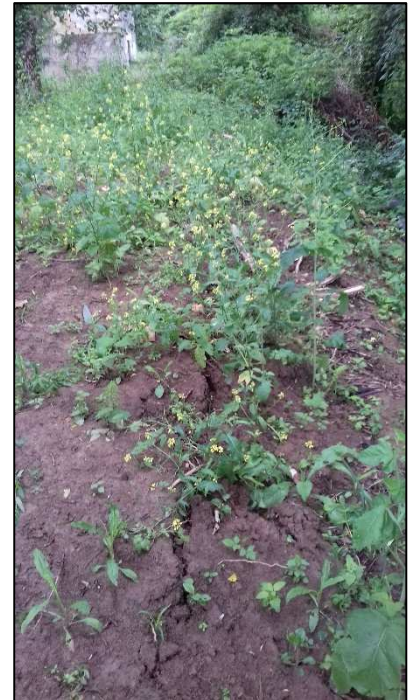


Illustration 6

INTITULÉ	DESCRIPTION	POINTS PARTICULIERS
Erosion interne, orifice ou défaut d'organe hydraulique	<p>Les eaux circulent, dans ce cas, à travers un orifice dans le corps de digue dans la berge ou dans un espace vide associé à un organe hydraulique (l'organe lui-même s'il présente un défaut de fonctionnement ou l'espace de jonction entre l'organe et le corps de la digue (<i>Cf. illustrations 2 et 3 ci-contre</i>)).</p> <p>La circulation de l'eau agrandit rapidement le vide traversé s'il est inclus dans un matériau meuble.</p> <p>Les eaux émergeant de l'orifice peuvent, en outre, dégrader le pied de la digue.</p> <p>L'agent moteur du désordre est la différence de charge entre les faces de la digue (forts coefficients de marée aggravants).</p> <p>L'orifice peut être d'origine naturelle (terrier, racine, ...).</p>	<p>→ Surveillance nécessaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- passage d'eau</li> <li>- détection de vides</li> <li>- détérioration de l'organe hydraulique</li> <li>- concentration de flottants ou de sédiments déplacés</li> </ul> <p>→ Incidence hydraulique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- affouillement</li> <li>- arrivées d'eau intempestives</li> <li>- renard hydraulique</li> </ul>
Affaiblissement, fissuration	<p>Le corps de digue, le pied de digue ou encore la berge, présente une ou des fissures visibles, d'une ouverture de quelques centimètres (<i>Cf. illustrations 4 à 6 ci-contre</i>).</p> <p>Ces fissures ne compromettent pas, à court terme, l'étanchéité de la digue mais elles peuvent être le signe avant-coureur d'une rupture. Elles favorisent, en outre, le départ massif de matériaux constitutifs de la digue ou de la berge.</p> <p>L'agent moteur du désordre est une mauvaise caractéristique du matériau constitutif (manque de cohésion, sensibilité à l'hydratation et la dessiccation), une déformation de l'ouvrage ou une déformation de la berge surchargée ou perdant appui sur le lit du cours d'eau (affouillement, glissement régressif).</p>	<p>→ Surveillance nécessaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- repérage et mesure des fissures</li> <li>- mesure de déplacements verticaux</li> </ul> <p>→ Diagnostic de contexte nécessaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- évaluation du risque de surcharge (diagnostic géotechnique)</li> <li>- évaluation du risque d'affouillement ou de glissement régressif (étude hydro-sédimentaire, hydro-morphologique)</li> </ul>



Illustration 7



Illustration 8



Illustration 9



Illustration 10

INTITULÉ	DESCRIPTION	POINTS PARTICULIERS
Brèche, rupture	<p>Désordre majeur pour une digue : la fonction de protection n'est plus assurée. Facile à déceler, l'impact d'une brèche sur la sécurité dépend toutefois de la part du corps de digue effacée, en hauteur et en longueur. Ce désordre s'accompagne souvent de dommages secondaires : accumulation des matériaux face à l'ouverture, affouillement au passage de l'eau (<i>Cf. illustrations 7 et 8 ci-contre</i>).</p> <p>L'agent moteur du désordre est une érosion interne ayant évolué à l'extrême ou un franchissement de la crête détruisant l'intégralité du corps de digue.</p>	<p>→ Réparation nécessaire</p> <p>→ Diagnostic de contexte nécessaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- évènement hydrologique et hydraulique à l'origine de la brèche</li> <li>- histoire du tronçon touché</li> </ul>
Affaiblissement, déplacement, disparition de berge	<p>Dans ce cas, la berge en pied de digue a été dégradée et sa capacité à supporter la digue ou sa capacité à maintenir le cours d'eau à distance, sont altérées. Ce désordre peut s'accompagner d'une disparition partielle du corps de digue (<i>Cf. illustration 9 ci-contre</i>).</p> <p>L'agent moteur du désordre est une instabilité mécanique du talus que constitue la berge, un affouillement (<i>Cf. illustration 10 ci-contre</i>) occasionné par les courants ou l'agitation de la surface de l'eau ou encore, la chute d'arbres. La dynamique du phénomène peut être à examiner sur une large part de l'environnement de l'ouvrage (amont, aval, bathymétrie devant l'ouvrage, apports massifs d'eau de nappe).</p>	<p>→ Diagnostic expérimental :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- sondages géotechniques</li> <li>- bathymétrie</li> </ul> <p>→ Surveillance nécessaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- mesure du recul de la berge</li> <li>- surveillance de l'estran et des fonds</li> <li>- surveillance de l'aplomb des arbres et pieux en berge</li> </ul> <p>→ Diagnostic de contexte nécessaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- évènements hydrologiques et hydrauliques à l'origine du déplacement de la berge</li> <li>- histoire de la berge et des fonds touchés</li> </ul>



Illustration 11



Illustration 12



Illustration 13



Illustration 14



Illustration 15



Illustration 16

INTITULÉ	DESCRIPTION	POINTS PARTICULIERS
Affaiblissement, déplacement, disparition d'une partie de digue	<p>Dans ce cas, c'est le corps de digue qui est largement endommagé sans toutefois avoir perdu sa fonction d'obstacle. Le départ de matériaux se produit généralement vers le cours d'eau mais un franchissement par l'eau au-dessus de la crête peut endommager l'autre face (<i>Cf. illustrations 11 et 12 ci-contre</i>).</p> <p>L'agent moteur du désordre est une instabilité mécanique du flanc de l'ouvrage, un affouillement ou une chute d'arbres.</p> <p>Un lien avec un désordre touchant la berge est à rechercher et étudier, le cas échéant (cas intermédiaire entre celui-ci et le précédent).</p>	<p>→ Réparation nécessaire</p> <p>→ Surveillance nécessaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- observation de la tenue de la portion de digue restante</li> <li>- déplacements verticaux</li> </ul>
Déformation superficielle de la crête, accumulation de matériaux	<p>La crête de digue évolue suite à une déformation locale ou la présence de végétaux qui permettent l'insertion de matériaux flottants.</p> <p>Avec le temps, cette accumulation se consolide et le corps de digue se trouve partiellement constitué de matériaux impropres à la protection (<i>Cf. illustrations 13 et 14 ci-contre</i>).</p> <p>L'agent moteur du désordre est un niveau d'eau élevé, doublé de matériaux flottants en grande quantité souvent piégés par la végétation.</p>	<p>→ Incidence environnementale :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nettoyage, enlèvement d'objets dangereux ou polluants</li> <li>- restauration de la visibilité du corps de digue</li> </ul>
Déformation superficielle de la crête, franchissement par l'eau	<p>La crête de digue a subi un tassement, un affaissement ou une dégradation superficielle qui permet localement le passage des plus hautes eaux.</p> <p>Le risque d'une évolution rapide vers une brèche est élevé (<i>Cf. illustrations 15 et 16 ci-contre</i>).</p> <p>L'agent moteur du désordre peut être une déformation du corps de digue ou du terrain sous-jacent, le départ local de matériaux (passages, chute d'arbres).</p> <p>Un examen du contexte des désordres est souhaitable.</p>	<p>→ Réparation nécessaire</p> <p>→ Surveillance nécessaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- déplacements verticaux</li> <li>- début de dégradation du corps de digue</li> </ul> <p>→ Diagnostic de contexte :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- historique de la déformation</li> <li>- évolution de la berge, du lit ou des ouvrages voisins</li> </ul>





## **2 - NOMENCLATURE DES TRAITEMENTS OPÉRÉS SUITE À DES DÉGRADATIONS**

Huit catégories de traitement ont été identifiées. La distinction ne porte pas sur la nature précise de l'opération mais sur certaines de ses orientations. Il s'agit notamment de distinguer les interventions qui se répètent au cours de temps et qui révèlent le caractère chronique du désordre ou un défaut de traitement définitif. Dans ce dernier cas, un choix doit être fait entre la répétition de la remise en ordre ou une modification radicale de l'endiguement (recul, modification substantielle de la résistance à l'enrochement, réduction du niveau de protection). Les critères justifiant ce choix ne sont pas que techniques, certains d'entre eux seront de nature économique, environnementale ou paysagère. Ils constitueront dans leur ensemble une démarche stratégique portée par le gestionnaire, des milieux aquatiques concernés et du patrimoine d'ouvrages de prévention des inondations.

Une distinction a également conduit à séparer les opérations traitant la digue elle-même des opérations traitant la berge. Ces dernières peuvent, en effet, remédier préventivement et/ou durablement à des désordres qui affectent ou menacent la digue elle-même. Le dernier critère de distinction concerne le niveau de préparation et la forme de l'insertion de l'ouvrage dans son environnement (opposant ainsi, par exemple, des matériaux meubles à des constructions de génie civil visant une stricte rigidité de l'ouvrage réparé).

Les catégories sont ici aussi présentées dans un tableau qui comprend l'intitulé de la catégorie de traitement, un texte descriptif, une ou quelques photos d'illustration et un ensemble de points demandant une attention plus particulière pour chaque cas.

Les points particuliers mentionnés selon chaque situation, sont les suivants (à ceux-ci s'ajoute la nécessaire étude de l'adéquation entre le désordre et le traitement) :

- **niveau de pérennité** : associé aux résultats d'éventuels travaux
- **surveillance nécessaire** : la remise en ordre est provisoire ou son efficacité est susceptible de diminuer dans le temps, des observations répétées doivent être effectuées pour évaluer le sens et la lenteur de l'évolution. Après une périodicité annuelle de préférence, les observations peuvent s'espacer dans le temps si l'évolution est lente
- **diagnostic expérimental** : l'observation visuelle est insuffisante pour évaluer l'effet et la robustesse du confortement. Des mesures physiques doivent être pratiquées (vérification de l'absence d'eau, stabilité de pente, géométrie de l'ouvrage)
- **interaction avec le voisinage de la partie d'ouvrage modifiée** : l'ouvrage modifié présente localement des caractéristiques pouvant différer sensiblement de celles du voisinage. Des prestations et des dégradations connexes (affouillement, création de nouvelles circulations d'eaux) peuvent apparaître. Il est nécessaire de s'assurer qu'elles sont prises en compte. A l'inverse, c'est l'environnement de l'ouvrage qui peut interagir avec ce dernier dans un sens défavorable à sa durabilité
- **retour d'expérience nécessaire** : la solution mise en œuvre, par des modifications sensibles du contexte qu'elle induit dans certains cas, peut nécessiter de porter à connaissance d'autres gestionnaires d'ouvrages du secteur, des bureaux d'étude ou des entreprises, les conséquences du confortement constatées au fil du temps.



Illustration 1



Illustration 2



Illustration 3



Illustration 4



Illustration 5



Illustration 6

INTITULÉ	DESCRIPTION	POINTS PARTICULIERS
<p>1 - Intervention répétitive ou partiellement durable</p> <p>→ reconstitution d'un profil (terre, enrochements) → réparation de brèches de petite taille mais répétitives → remplacement de pieux</p>	<p>Catégorie d'intervention pour laquelle des traitements sont opérés plusieurs fois à l'identique ou dans des conditions similaires. La raison de cette répétition est le renouvellement du désordre. Cela traduit le caractère chronique d'une dégradation ou l'insuffisante robustesse d'un confortement au regard de l'intensité des facteurs de dégradations (cette insuffisance peut être temporaire, notamment après travaux). Toutefois, la répétition des désordres et de confortements modérés peut être une alternative à la prévention lourde face à un désordre plus important (<i>Cf. illustrations 1 et 2 ci-contre</i>).</p> <p>Le recours à ce type de solution doit s'inscrire dans une analyse plus globale de la gestion a posteriori.</p>	<p>→ Travaux aux résultats non pérennes, gestion à long terme à analyser → Surveillance nécessaire → Diagnostic expérimental → Retour d'expérience nécessaire</p>
<p>2 - Intervention provisoire à partir de matériaux préparés</p> <p>→ pose de sacs de matériaux → rehausse au moyen de planches ou sacs de matériaux → barrages ou batardeaux provisoires</p>	<p>Intervention permettant de remédier à un désordre ou de prévenir celui-ci pendant une courte période. Elle est réalisée à partir de matériaux préparés à l'avance. En revanche, ils induisent une sensibilité particulière à bon nombre de facteurs durant la période de prise de la végétation notamment.</p> <p>Les facteurs à considérer sont : la stabilité des sols supports, le retrait des argiles, l'érosion de surface, l'érosion interne.</p> <p>Les matériaux meubles peuvent être empruntés sur place et, si cela est efficace et pertinent, être traités pour améliorer leurs caractéristiques (résistance mécanique, résistance à l'érosion de surface, étanchéité).</p> <p>Les conditions de jonction avec les portions d'ouvrage non réparées sont considérées avec attention (<i>Cf. illustrations 3 et 4 ci-contre</i>).</p>	<p>→ Travaux aux résultats non pérennes, opportunité d'un confortement complémentaire pérenne à moyen terme à examiner → Surveillance nécessaire → Retour d'expériences nécessaire</p>
<p>3 - Emploi impromptu de matériaux</p> <p>→ balle de paille → sac plastique → ...</p>	<p>Intervention d'urgence permettant de stopper ou d'atténuer rapidement un désordre mais ne constituant pas un traitement.</p> <p>Une surveillance du site et un traitement ultérieur sont nécessaires (<i>Cf. illustrations 5 et 6 ci-contre</i>).</p>	<p>→ Travaux aux résultats non pérennes, opportunité d'un confortement complémentaire pérenne à moyen terme à examiner → Surveillance nécessaire → Retour d'expériences nécessaire</p>



*Illustration 7*



*Illustration 8*



*Illustration 9*



*Illustration 10*

INTITULÉ	DESCRIPTION	POINTS PARTICULIERS
<p>4 - Intervention mettant en œuvre des matériaux meubles</p> <p>→ sable, limon, argile, grave</p>	<p>Réparation ou confortement réalisé en employant des matériaux meubles (sable, limon, argiles, graves) en vrac pour reconstituer une part importante de l'ouvrage (en général le corps de digue mais la berge peut être concernée) (Cf. <i>illustrations 7 et 8</i>).</p> <p>Ces matériaux ne sont pas obligatoirement exclusifs. En cas d'emploi de matériaux du site, il est nécessaire de s'assurer de leur qualité au regard des fonctions attendues. Il s'agit également de ne pas déséquilibrer le voisinage de la zone d'emprunt.</p> <p>Un traitement durable du désordre doit être effectué rapidement pendant ou après l'emploi de telles solutions. Il est nécessaire de veiller à l'étanchéité en cas de reconstitution d'un corps de digue. La revégétalisation et la tenue du matériau (maîtrise du ravinement de la fissuration) doivent faire l'objet d'une attention particulière.</p>	<p>→ Travaux aux résultats pérennes en cas d'évolution favorable de l'environnement (berges stables, maintien de la qualité des matériaux, maintien de la géométrie de l'ouvrage)</p> <p>→ Surveillance nécessaire (après travaux)</p> <p>→ Interaction avec le voisinage de la partie réparée</p>
<p>5 - Intervention incluant des matériaux de génie civil mobiles</p>	<p>Réparation ou confortement réalisé en employant des matériaux de génie civil (blocs, géosynthétiques, métal, gabions), seuls ou en complément de matériaux meubles pour constituer une part importante de l'ouvrage (en général le corps de digue mais la berge peut être concernée).</p> <p>Ils peuvent réduire la sensibilité qui touche le matériau meuble seul (érosion, instabilité, fissuration ou brèche) mais ne confèrent pas de parfaite rigidité à la partie réparée (Cf. <i>illustrations 9 et 10</i>).</p> <p>Les conditions de jonction avec les portions d'ouvrages non réparées sont à considérer avec attention. Elles peuvent être améliorées compte tenu de la mobilité des matériaux associés.</p> <p>La mobilité des matériaux peut induire une nécessité de rechargement régulier après les travaux.</p>	<p>→ Travaux aux résultats pérennes</p> <p>→ Surveillance nécessaire</p>

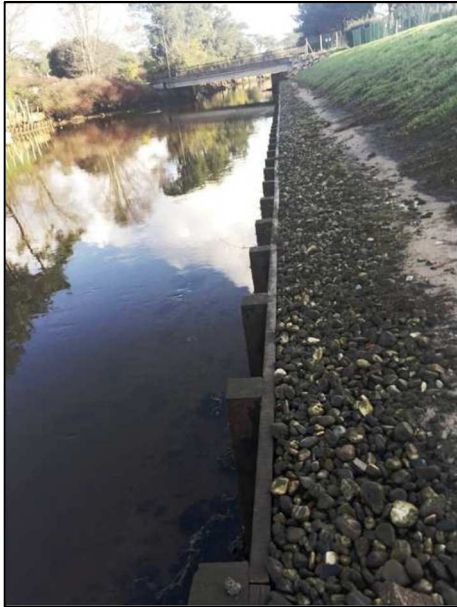


Illustration 11



Illustration 12



Illustration 13



Illustration 14



Illustration 15



Illustration 16

INTITULÉ	DESCRIPTION	POINTS PARTICULIERS
6 - Intervention mettant en œuvre de génie civil fixés	<p>Réparation ou confortement réalisé en employant des matériaux de génie civil fixés (maçonneries, palplanches) destinés à fixer la partie d'ouvrage traitée par ailleurs (matériaux meubles et/ou matériaux de génie civil mobiles), en particulier en ancrant ses fondations.</p> <p>Ces matériaux peuvent fixer en retenant la berge ou en soutenant la digue (<i>Cf. illustrations 11 et 12</i>).</p> <p>D'une durabilité accrue par son ancrage, la réparation peut toutefois se trouver très différenciée de son voisinage et occasionner des dommages de bordure. L'examen d'une alternative dont les fondations seraient construites avec des matériaux mobiles, est souhaitable.</p>	<p>→ Travaux aux résultats pérennes</p> <p>→ Interaction avec le voisinage de la partie réparée à examiner</p>
7 - Travaux touchant la digue	<p>Intervention portant sur l'ouvrage lui-même comprenant le corps de digue, un ancrage éventuel, la crête et les talus.</p> <p>Elle peut, le cas échéant, porter sur des organes hydrauliques inclus dans la digue ou inclure des dispositifs de maîtrise de passage des eaux de nappe continentales vers la berge (<i>Cf. illustrations 13 et 14</i>).</p> <p>Cette intervention peut être effectuée seule (déplacement ou étanchéification par exemple) ou être combinée avec une intervention sur berge.</p>	<p>→ Niveau de pérennité dépendant de la nature des travaux</p> <p>→ Diagnostic expérimental éventuel</p>
8 - Travaux touchant la berge	<p>Intervention portant sur toute partie de la berge (directement sur celle-ci ou à son contact) supportant l'ouvrage défaillant ou menacé (<i>Cf. illustrations 15 et 16</i>).</p> <p>Cette intervention en général au contact de l'écoulement de l'eau et de l'agitation de la surface, doit être efficace et durable vis-à-vis de ces facteurs très contraignants. La partie du lit, au contact du confortement, peut être très mal connue. A ce titre, des actions complémentaires de mesures de ces contraintes (hydrodynamique et bathymétrie) sont souvent souhaitables.</p> <p>Cette intervention peut être ou non combinée avec une intervention sur la digue.</p>	<p>→ Niveau de pérennité dépendant de la nature des travaux</p> <p>→ Surveillance nécessaire</p>

**QUESTIONNEMENT SUITE À DES DÉSORDRES POUR L'ORGANISATION D'UN SUIVI, LA RÉDACTION D'UNE FICHE EISH ET LA CONSTITUTION D'UN DOSSIER DE TRAVAUX**

	PROTECTION	DÉFAILLANCE	CHOIX DE GESTION
<b>PROJET</b>	<p><b>1</b> Les facteurs d'exposition sont-ils bien présentés pour identifier des effets liés à leur caractère répétitifs ?</p>	<p><b>2</b> Le niveau de sûreté est-il bien rattaché à toutes les familles de dommages ?</p> <p><b>3</b> Le niveau de sûreté est-il constant au fil du temps ?</p> <p><b>4</b> Des désordres ont été observés : cela remet-il en cause le rôle de protection ?</p>	<p><b>5</b> La protection doit-elle être durable au regard de situations évolutives : changement du niveau marin, modifications climatiques, recul du rivage ou du trait de côte ?</p> <p><b>6</b> D'autres enjeux et acteurs sont-ils concernés par les mécanismes associés aux causes de dommages ?</p>
<b>VIE DE L'OUVRAGE</b>	<p><b>7</b> Comment mon ouvrage protège-t-il contre les inondations ?</p>	<p><b>8</b> Des désordres sont-ils répétés ou corrigés sans affecter immédiatement l'ouvrage ?</p> <p><b>9</b> Une défaillance observée a-t-elle été précédée de désordres ?</p> <p><b>10</b> Des désordres similaires à ceux rencontrés sont-ils observés sur d'autres berges proches ?</p> <p><b>11</b> La dégradation observée peut-elle être associée à un phénomène régressif ?</p> <p><b>12</b> Peut-on distinguer un désordre sur la digue d'un désordre sur la berge ?</p>	<p><b>13</b> Faut-il réhabiliter l'ouvrage ?</p> <p><b>14</b> Que faut-il surveiller : l'ouvrage, la berge, son environnement ?</p> <p><b>15</b> Le maintien à niveau d'un ouvrage est-il le garant de sa stabilité ?</p> <p><b>16</b> Que faut-il faire à titre préventif ? Pourquoi ?</p>
<b>NOUVEAU CONTEXTE</b>			<p><b>17</b> Faut-il décider de reconverter l'espace protégé ?</p> <p><b>18</b> Y-a-t-il un intérêt à modifier l'objectif de protection ?</p>



Les différents désordres chroniques décrits dans la première partie sont mis en relation avec les traitements listés dans la deuxième partie. Cette mise en relation prend la forme d'un canevas prenant en considération les contraintes du site et de son environnement, la place du cycle de dégradations chroniques dans la vie de l'ouvrage et les démarches du gestionnaire. Ce canevas de réflexion est présenté dans la partie suivante. Il prend la forme d'un ensemble de 18 questions à aborder au cours de la vie de l'ouvrage. Cela concerne tant la conception de ce dernier que d'éventuelles perspectives de réorientation de la protection (actions sur les défenses ou sur les enjeux).

### **3 - CANEVAS DE RÉFLEXION POUR LE TRAITEMENT DES DÉGRADATIONS CHRONIQUES**

La grande diversité des situations présentées au travers des deux parties qui précèdent dans un contexte de désordres chroniques, montre la difficulté de mettre en avant une ligne de conduite unique garantissant la conservation de l'intégrité d'un ouvrage au fil du temps, un niveau de protection durablement adapté aux enjeux du territoire défendu et pouvant s'adapter à des évolutions sensibles des mécanismes environnementaux.

Il est cependant souhaitable que le gestionnaire aborde un certain nombre de questions, à différents stades de la vie de l'ouvrage, de manière à se donner les moyens de limiter les conséquences dommageables liées à des dégradations chroniques. L'ensemble de ces questions, qui font chacune l'objet d'éléments de réflexion et de pistes d'action, est porté sur le tableau ci-contre. Les lignes du tableau représentent la chronologie de la vie de l'ouvrage. Les colonnes distinguent plutôt les finalités visées lors de la réflexion.

Le stade qualifié de projet est ponctuel dans le temps mais décisif pour la vie de l'ouvrage, désigne la mise au point d'un système de protection au sein duquel sera créé l'ouvrage neuf, mais aussi la formalisation du rôle de défense envisagé ou instauré, pour un ouvrage ancien (principalement à l'occasion de travaux).

Le stade qualifié de vie de l'ouvrage intègre l'essentiel de l'approche chronologique dans la période où le système de défense est présent, y compris sans que son rôle de protection soit activé.

Un stade qualifié de nouveau contexte traduit une évolution du territoire impactant la protection elle-même, pour des motifs divers. Il peut être illustré par l'exemple du déplacement des activités et des biens en réponse au recul du trait de côte le long des façades maritimes, en substitution d'une protection de ces biens.

Les colonnes du tableau introduisent une distinction entre la finalité des ouvrages, à savoir la protection contre les submersions ou inondations, leur défaillance possible qui résulte de phénomènes environnementaux plus ou moins maîtrisables et les choix de gestion à faire au fil du temps.

Les questions et les éléments de réponse proposés sont abordés, dans la suite, selon le rang de classement porté sur le tableau.



### **Question 1**

En visant un objectif de protection pour un projet de système d'endiguement (travaux neufs), les facteurs d'exposition sont-ils bien présentés pour identifier des effets liés à leur caractère répétitif ?

Pour prévenir d'inondations ou de submersions marines, la capacité de protection est évaluée au regard des niveaux extrêmes, que ceux-ci soient atteints en raison de crues, de fortes marées ou d'agitations importantes du plan d'eau. Des sollicitations moins intenses mais répétées tout au long de la vie des ouvrages comme on peut en rencontrer dans les estuaires ou secteurs sous influence marine, peuvent pourtant influencer sensiblement la capacité de protection (Cf. lieux concernés sur la carte de situation) :

- en modifiant de manière graduelle les caractéristiques des sols supportant les ouvrages
- en soumettant les corps de digues ou les sols supports à des contraintes hydrostatiques ou ondulatoires à l'origine d'érosion ou de déstabilisation (marnage, mascaret)
- en soumettant les corps de digues ou les sols supports à des courants d'intensité et de direction très variables dans le temps, propices à l'affouillement ou à la mobilité des fonds.

**Il est essentiel que le caractère répétitif des sollicitations des ouvrages par leur environnement soit examiné de manière à identifier des effets spécifiques et à prendre en compte ces effets dans la définition de la protection (étude de dangers) et dans la justification des digues. Les cahiers des charges (EDD, diagnostic géotechnique, document de projet) devront notamment mettre l'accent sur cet examen (Cf. bibliographie). Un retour d'expérience sur le comportement des ouvrages proches du secteur du projet aidera à faire apparaître les contraintes prévisibles en matière de gestion et de désordres possibles.**



*Estran de la Dordogne à ARVEYRES*



## **Question 2**

Le niveau de sûreté défini dans l'étude de dangers est-il bien rattaché à toutes les familles de dommages ?

Le niveau de protection d'un système d'endiguement est défini réglementairement et associé à un évènement de crue ou de très hautes eaux pendant lequel les ouvrages assurent leur rôle d'obstacle à l'inondation. Il est naturel de considérer qu'au-delà des niveaux d'eau atteints lors de l'évènement, les ouvrages maintenus dans un état fonctionnel correct, risquent fortement d'être défaillants dès lors qu'est atteint un niveau dit de sûreté. Cependant, en raison de dommages causés par des sollicitations répétitives, la sûreté du système d'endiguement peut être compromise lors d'évènements de moindre intensité.

Si la probabilité de rupture est évoquée, voire estimée dans l'étude des dangers sous la forme d'une revue des dommages possibles, des dégradations chroniques, mineures mais répétées (tassements, fissures, faible érosion, ...) et / ou persistantes, peuvent se transformer en véritables atteintes à la sûreté des ouvrages.

**Parce que le comportement attendu du système doit être décrit en toutes circonstances et pour intégrer une vigilance suffisante vis-à-vis de ces dommages, il est souhaitable d'intégrer leur mention au même titre que l'évènement de crue de référence pour ce niveau de sûreté. En revanche, une quantification de ce niveau n'est pas toujours possible lorsque la dégradation a un caractère très graduel ou progressif.**



*Disparition progressive d'éléments de stabilisation d'un mur de protection côtière*



### Question 3

Le niveau de sûreté est-il constant au fil du temps ?

L'étape principale au cours de laquelle est évalué le niveau de sûreté du système d'endiguement, est la réalisation de l'étude de dangers. Cette étude fait notamment ressortir des éléments particuliers de l'environnement des ouvrages susceptibles de contribuer au risque de défaillance.

Parmi ces éléments particuliers, les sollicitations répétées du milieu estuarien et les altérations chroniques qu'elles peuvent causer, tant à l'ouvrage qu'à son environnement notamment les berges, ont dans le contexte abordé par cette étude, un poids important. Il est ainsi nécessaire de les mentionner dans l'exposé des probabilités de défaillance, au même titre que les crues ou événements extrêmes, généralement au cœur de cet exposé.

En outre, la contribution au risque de défaillance peut évoluer au cours du temps, selon que les dégradations chroniques sont traitées en continu ou non. Dans le premier cas, l'état de vulnérabilité induit par les sollicitations répétées, est réel mais stable dans le temps. Dans le deuxième cas, il peut s'aggraver au fil des saisons.

**Il est donc souhaitable de pouvoir suivre l'état des ouvrages et de leur environnement, influencés par les sollicitations répétées, dès lors que le niveau de sûreté est potentiellement impacté (exemples donnés dans la nomenclature qui précède). Ce suivi peut être systématisé à travers les étapes règlementairement associées à la vie des ouvrages (visites de surveillance périodiques tracées sur le registre prévu pour les systèmes d'endiguement, par le décret digues du 12 mai 2015, visites techniques, EISH) ou mené de manière plus informelle en traçant notamment les interventions de confortement réalisées et les évolutions repérées visuellement.**

**Dans les environnements à lit évolutif, des mesures bathymétriques régulières sont également utiles au repérage de la diminution du niveau de sûreté.**



*Recul ponctuel de berge contenu par apport régulier de matériaux (2014, 2015, 2016)*





#### **Question 4**

Des désordres ont été observés : cela remet-il en cause le rôle de protection ?

Cette question doit être posée très systématiquement dans le contexte abordé ici. Dans le cas de sollicitations répétitives et en dehors d'un événement hydro-climatique d'intensité exceptionnelle, l'observation de désordres est fréquemment elle-même renouvelée au fil du temps. Il est nécessaire dès lors de tenir compte de ces observations, qu'elles touchent les ouvrages concernés ou les ouvrages d'un secteur proche géographiquement ou dans ses caractéristiques hydro-morphologiques.

**La rédaction de l'étude des dangers doit comprendre un retour d'expérience sur le comportement du système d'endiguement et, à ce titre, mentionner les désordres observés et en tenir compte.**

Le retour d'expérience concerne notamment le fonctionnement de l'environnement des ouvrages décrit dans l'étude des dangers. Cela concerne tout particulièrement les reculs de berge ou du rivage. Des phénomènes sont ainsi en apparence déconnectés de la robustesse et de la stabilité des digues du système, qui par construction, sont les garanties de leur contribution à la protection. Mais ils peuvent en réalité menacer à terme cette contribution.

**Généralement prise en compte dans le cas des rivages maritimes affectés par le recul du trait de côte, la question devrait être abordée tout aussi systématiquement sur les rivages estuariens ou lagunaires.**



*Digue restaurée en retrait par rapport à des berges en régression*



### **Question 5**

La protection doit-elle être durable au regard de situations évolutives, changement de niveau marin, modifications climatiques, recul du rivage ou du trait de côte ?

Les modifications à venir du niveau marin sont prévisibles et une estimation en a été faite à partir de différents scénarios climatiques. Ces modifications impactent les mécanismes hydro-morphologiques à l'œuvre dans les secteurs concernés par cette étude. Elles touchent les niveaux d'eau libre mais aussi la vitesse et la direction des courants. En effet, le marnage force le déplacement des volumes d'eau confinés entre les rives, qui peuvent être entraînés plus ou moins rapidement et suivant des cheminements modifiés. Les niveaux des nappes souterraines riveraines oscillant autour d'un niveau moyen au voisinage des berges, se trouvent décalés vers des valeurs différentes. La circulation souterraine des eaux s'en trouve également modifiée.

Ces modifications de l'environnement du système de défense peuvent altérer l'évaluation du niveau de protection. Cette évaluation dans les études de dangers comprend une anticipation de la montée des eaux marines. Pour que la protection soit durable, il faut cependant envisager d'autres modifications possibles, bien que leur quantification soit actuellement difficile.

**Une surveillance est au minimum souhaitable sur :**

- **les parties de berges touchées par le marnage (relevés visuels, pose de repères)**
- **les courants les plus intenses (localisation de signes de turbulence, vitesse d'objets flottants, ...)**
- **les durées respectives de la montée et de la descente des eaux (relevés des hautes et basses eaux, espacés de quelques mois).**



*Illustration de remous et courants contrastés longeant une berge vulnérable*



### **Question 6**

D'autres enjeux et acteurs sont-ils concernés par les mécanismes associés aux causes des dommages ?

Les divers cas de figure rencontrés sur le terrain montrent que des ouvrages peuvent être touchés par des dégradations légères mais chroniques, occasionnées par des activités ou des constructions tierces. Les exemples constatés à l'occasion de passages sur site pour réaliser cette étude, sont :

- des constructions de génie civil qui perturbent les courants (piles de pont notamment)
- le batillage causé par la navigation fluviale, très active sur certaines portions de cours d'eau
- des dragages anciens ont également été évoqués. Si l'extraction en lit mineur n'a plus cours, des opérations de dragages peuvent être effectuées pour la sécurité de la navigation ou l'activité portuaire
- des exemples montrent que les déchets flottants, en s'accumulant, peuvent modifier profondément la structure des ouvrages (géométrie, étanchéité, cohésion des matériaux)
- des constructions ou passages à usage non professionnel (cabane de pêche, parcours de promenade ou de chasse, ...) qui touchent le corps de digue ou la berge à proximité immédiate. Des sollicitations hydrauliques faibles mais répétées peuvent rendre ces points plus sensibles que dans le cas des digues confrontées aux seules fortes crues.

La réglementation a évolué (décret digues du 12 mai 2015 et décret du 26 janvier 2017 relatif à l'autorisation environnementale) pour classer comme réseaux sensibles les systèmes d'endiguement. A ce titre, les travaux effectués sur ou à proximité des digues se trouvent formellement reliés à la sécurité de l'ouvrage.

**Une attention particulière est souhaitable vis-à-vis des constructions, travaux ou activités ayant une incidence sur les sollicitations répétées, cause d'érosion ou d'usure pour les ouvrages (escaliers, emprise d'édifices employés pour la chasse ou la pêche, passage de canalisations de pompage, y compris par-dessus la digue, ...).**



*Cheminement tenu expressément à l'écart de la digue*



### **Question 7**

Comment mon ouvrage protège-t-il contre les inondations ?

Cette question essentielle pour tout ouvrage de protection, est un peu plus difficile à traiter en contexte estuarien et de terres basses qu'en bord de rivière subissant des crues ponctuelles très directement liées aux fortes pluies. Le système d'endiguement doit répondre à la conjugaison des aléas maritime et fluvial ainsi qu'à une plus forte probabilité de contournement par des eaux dont la montée peut suivre un cheminement complexe. Il n'est pas possible de donner ici une méthode de connaissance des mécanismes hydrauliques en question, mais il est nécessaire de faire du besoin de cette connaissance, en mettant éventuellement en avant, des lacunes techniques ou scientifiques.

**Des éléments de réponse peuvent en tout cas être apportés par des documents méthodologiques, comme l'étude des systèmes de protection contre les submersions marines (Cf. bibliographie) ou des retours d'expériences en environnement soumis aux effets conjugués de crues et de la marée. Compte tenu de l'effet attendu de l'élévation du niveau des océans, les réflexions et recherches internationales à partir de ces retours d'expériences et des modèles hydrauliques actuellement disponibles, sont actuellement très actives.**



*Revêtement de chaussée arraché par un débordement localisé*





### **Question 8**

Des désordres sont-ils répétés ou corrigés sans affecter immédiatement l'ouvrage ?

Le gestionnaire d'un système d'endiguement susceptible de subir des sollicitations chroniques, doit se poser cette question au même titre qu'il inspecte ou fait inspecter régulièrement l'état des ouvrages qui le constituent. Cela permet en particulier de se protéger contre deux évolutions préjudiciables à la durabilité de l'ouvrage mais qui échappent à l'inspection périodique :

- une accumulation de petits désordres sans remède apporté peut conduire à un dommage plus important en affaiblissant la structure en deçà de ses capacités attendues pour résister à des niveaux d'eaux élevés
- des réparations mineures mais répétées masquent, lors d'un examen ponctuel, une dégradation prenant de l'importance. Un arrêt des réparations pour un motif quelconque, technique ou économique, peut en outre être le point de départ de dommages plus sérieux

**Il est souhaitable que ce questionnement soit permanent et s'accompagne d'une vigilance continue et de la conservation de traces des désordres mineurs répétés. L'EISH répond dans le principe à ce besoin, mais vise des situations rares et extrêmes dans la vie de l'ouvrage. Des modalités similaires (informations de nature comparable), mais d'une gestion grandement facilitée (simple conservation en complément des inspections périodiques ou inscriptions dans le registre de suivi prévu par le décret digues du 12 mai 2015), peuvent aider à cela.**



*Succession de fissures et réparations touchant une chaussée en remblai sur berge*



**Question 9**

Une défaillance observée a-t-elle été précédée des désordres ?

Une défaillance (intrusion massive d'eau dans la zone protégée, brèche) survient en général à l'occasion d'un évènement extrême. Le contexte estuarien ou sujet à sollicitations répétées, conduit pourtant également à des défaillances lors de situations plus fréquentes (marées à fort coefficient, fortes précipitations mais crue modérée, ...). Cette question est très liée à la question 8 qui précède : une succession de désordres (fissures, passage d'eau très localisé, tassements modérés, ...), doit alerter et au minimum, conduire à renforcer la vigilance.

De la même façon, il faut être en mesure de retrouver d'éventuels désordres précurseurs en cas de défaillance grave et ainsi alimenter l'expérience nécessaire pour évaluer la sûreté du système d'endiguement. Les probabilités de déformations de brèches portées dans les études de dangers sont conditionnées par l'historique des sollicitations ayant altéré un ou des ouvrages.

**Il est souhaitable de recourir à un traçage aussi systématique que possible, même sous une forme simple et sans remède immédiat, des désordres chroniques (passer, par exemple, par le registre de suivi prévu par le décret digues du 12 mai 2015).**



*Muret et vanne stables mais désolidarisés du corps de digue*



### **Question 10**

Des désordres similaires à ceux rencontrés sont-ils observés sur d'autres berges proches ?

Les situations observées montrent que les désordres touchent des portions de cours d'eau ou d'estuaire sur une certaine étendue. Les confinements doivent correspondre à une implantation d'ouvrage donnée, mais les retours d'expérience tirés de situations similaires sont utiles au choix de solutions adaptées. La mention de ces retours d'expérience est attendue au niveau des études de dangers (Cf. les documents sur ce sujet cités dans la bibliographie). Un état des lieux peut également être tiré de ces retours d'expérience au cours de la vie de l'ouvrage car de nouvelles pratiques peuvent apparaître ou des évolutions se confirmer, tant positives (solutions se révélant bonnes) que négatives (dysfonctionnement ou désordre inattendu).

La bibliographie internationale permet également de retrouver des cas de figure sensiblement comparables à ceux auxquels le gestionnaire se trouve conforté.

**Une analyse bibliographique dédiée à la prévention de dégradations chroniques peut être utile dans le cas d'un grand nombre de désordres similaires manifestement liés à un environnement spécifique (formation hydromorphologique particulière, mascaret, influence d'une infrastructure, ...). Cette analyse peut être complétée par des expériences rencontrées sur des ouvrages proches.**



*Exemples de désordres similaires observés sur deux portions de berges, distants de quelques centaines de mètres*



### **Question 11**

La dégradation observée peut-elle être associée à un phénomène régressif ? (recul de berge ou disparition de l'aubarède, mouvement du fond, ...)

La stabilité des digues est généralement étudiée sous la forme d'un équilibre des matériaux constitutifs des sols supports et des soutènements ou confortements en place et d'un niveau d'eau qui peut être variable. En milieu estuarien, en particulier en présence de sédiments sableux ou sablo-argileux compacts, des phénomènes régressifs peuvent causer la disparition de parties du lit et de berges. Ceux-ci sont érodés par le départ progressif du sédiment sur un front vertical pouvant atteindre sous l'eau plusieurs mètres de hauteur. Le front mobile remonte la pente du lit (ce qui amène à qualifier le mécanisme de régressif). Selon la forme du lit, le phénomène peut entraîner une partie émergée de la berge et emporter avec lui des portions de digues.

L'agitation de surface (houle, batillage lié à la navigation, mascaret) peut également engendrer un recul du rivage, en agissant directement sur celui-ci, contrairement aux mouvements des fonds.

**L'examen de la possibilité de déclenchement de tels phénomènes est souhaitable dans les environnements présentant :**

- **une flèche ou un banc sableux mobile**
- **des fonds dragués ou ayant été dragués dans le passé**
- **des fonds qui s'abaissent continument sous l'effet des courants.**

**Dans cet environnement, des études bathymétriques sont à recommander. Il faut notamment veiller à ce que leur portée, leur précision et leur éventuelle répétition dans le temps, permettent de déceler le risque de phénomène régressif.**



*Exemple de digue emportée par un glissement sub-aquatique régressif*  
(La Nouvelle Orléans, source USACE)





### **Question 12**

Peut-on distinguer un désordre sur la digue d'un désordre sur la berge ?

La question des instabilités de berges, comme celles des mouvements des rivages côtiers (accrétion, érosion), porte sur l'évolution dans le temps de terrains qui peuvent être employés à des activités. Les ouvrages de défense appuyés sur ces terrains sont assujettis à leurs évolutions. Il est important de suivre les désordres affectant la berge ou le rivage (effondrements, dépôts de sédiments ou de matériaux flottants, érosion ou glissement régressif) en tant qu'indicateurs d'éventuelles menaces sur la sûreté des ouvrages.

**En particulier, prévenir de dommages aux ouvrages qui seraient causés par une dégradation des berges peut être visé en :**

- **remédiant aux instabilités des berges**
- **adaptant les ouvrages à l'érosion des terrains (apport répété de matériaux, substitution de la berge évolutive par des matériaux fixés)**
- **éloignant les digues de la berge ou du rivage évolutif.**



*Glissement sub-aquatique régressif ayant emporté un ouvrage en enrochement*  
*(à gauche, état en 2011 et à droite, état en 2019)*



### **Question 13**

Faut-il réhabiliter l'ouvrage ?

Un ouvrage sujet à dégradations chroniques doit être, à un moment de sa vie, au cœur d'un questionnement sur sa rénovation. La rénovation désigne ici une modification substantielle (soumise à autorisation préfectorale) de la structure de l'ouvrage altéré : retour à une géométrie d'origine ou modification de géométrie sur une grande longueur, changement de matériaux, voire recul de l'ouvrage ou changement de technologie de protection. Au moment où se pose cette question de la rénovation, une période d'observation préliminaire doit avoir préparé le choix, en apportant :

- des indications précises sur la fréquence des dégradations (dans le temps et l'espace) et la pérennité des réparations (Cf. questions 8 et 9)
- un éventuel retour d'expérience sur des nuisances liées au caractère localisé des réparations déjà pratiquées (influence à distance sur des portions d'ouvrage non modifiées, effets de bord)
- des indications sur les modifications de l'environnement de l'ouvrage - mécanismes hydrauliques, activités ou travaux, évolution de la végétation rivulaire ou de l'aubarède - Cf. question 6.

**Au-delà d'un critère économique comparant le coût d'une réhabilitation au cumul des réparations ayant été effectuées, sur le ou les ouvrages concernés, une analyse au cas par cas (en fonction de l'environnement et du type de système d'endiguement), doit porter sur les résultats de l'observation évoquée précédemment et rentrer dans une stratégie de gestion du système de protection.**

**Les Programmes d'Actions pour la Prévention des Inondations (PAPI notamment), intègrent une telle forme de stratégie. A l'opposé d'une démarche curative telle que celle-ci, la stratégie peut cependant envisager une démarche de prévention (Cf. question 16).**



*Stades d'une modification pour travaux de voirie et d'une réparation ponctuelle aboutissant, entre 2015 et 2018, à un ouvrage rénové*



**Question 14**

Que faut-il surveiller ? L'ouvrage, la berge, son environnement ?

Dans l'ensemble des situations rencontrées dans le cadre de cette étude et ayant apporté de la matière aux nomenclatures présentées précédemment, il apparaît que l'examen de l'état d'un ouvrage, même renouvelé dans le temps, est souvent insuffisant pour déceler tous les facteurs contribuant à sa dégradation.

**Lorsqu'une surveillance est indiquée, celle-ci doit, autant que possible, inclure une attention portée à l'évolution des berges et à l'environnement de l'ouvrage. Certaines rubriques de la nomenclature en deuxième partie, sont orientées vers ces points (2, 4, 5 et 6).**



*Ouvrage réparé mais situé, en outre dans un environnement particulièrement évolutif (érosion, accumulation de flottants) et à surveiller*



### **Question 15**

Le maintien à niveau (c'est-à-dire en état d'assurer la protection prévue) d'un ouvrage est-t-il le garant de sa stabilité ?

Une intervention rapide et systématique sur un ouvrage, dès lors qu'un désordre l'affecte, permet la continuité dans le temps de la fonction de protection.

**Si le désordre est la manifestation d'une instabilité, au sens géotechnique ou mécanique du terme, il convient de donner pour objectif, à l'étude de la réparation, l'établissement d'une situation stable. Cet objectif concerne aussi l'exécution de cette réparation. Une étude appropriée, mais débouchant sur des préconisations coûteuses hors de portée du gestionnaire de l'ouvrage : création de fondations par exemple ou renforcement conjoint de la berge (selon le classement de l'ouvrage ou l'absence de classement, les moyens sont très divers), peut être suivie d'une exécution ne suivant pas ces préconisations.**

Un ouvrage peut également être stable en lui-même, mais être vulnérable vis-à-vis de modifications graduelles qui menacent son équilibre. Cela concerne notamment l'évolution des fonds, les phénomènes régressifs et les mouvements de blocs.

**La gravité de la situation de déséquilibre doit être évaluée, deux options de présentant au gestionnaire : le déséquilibre constitue une possibilité de ruine de l'ouvrage et une réhabilitation est nécessaire ou bien, le déséquilibre peut être pallié, du point de vue de la protection qu'il assure, par un maintien continu en état (remise en place de blocs, terrassement).**



*Illustration (protection de berge et quai portuaire hors secteurs étudiés) de désorganisation et mise en mouvement de moellons constitutifs d'un ouvrage exposé à la marée*





### **Question 16**

Que faut-il faire à titre préventif ? Pourquoi ?

De la même manière qu'un questionnement sur la réhabilitation d'un ouvrage est pertinent dans le contexte de dégradations chroniques (Cf. question 13), une démarche préventive peut tout à fait être envisagée. Le panorama des possibilités est très vaste. Il dépasse par nature le cadre des réparations dans lequel se situe cette étude. On peut toutefois indiquer que les stratégies prévues dans le dispositif des Programmes d'Actions pour la Prévention des Inondations (PAPI) constitueront le support approprié pour des mesures de prévention visant plus particulièrement des dommages chroniques aux ouvrages.

**On pourra s'inspirer des démarches préventives vis-à-vis des dommages aux défenses contre la mer, engagées en matière de gestion du trait de côte (par exemple, des dispositifs de gestion des mouvements sédimentaires comme des épis, un accompagnement de processus naturels comme la gestion de la végétation). Les instabilités de berges estuariennes sont en effet très similaires au recul des rivages océaniques, tant sableux que rocheux. Les démarches seront toutefois à adapter.**



*Exemple d'épis implantés dans le lit de la Dordogne (vue panoramique, les épis entourés sont parallèles entre eux). Le dispositif, non maintenu, est aujourd'hui à l'état de ruine*



**Question 17**

Faut-il décider de reconverter l'espace protégé ?

Les éléments de réponse à cette question s'inscrivent dans un cadre qui dépasse largement le contexte de cette étude. Il apparaît, cependant ici, à travers les cas rencontrés sur le terrain, que l'espace protégé est souvent particulièrement rural, les constructions ou installations vulnérables y sont très éparses. On observe également, dans ce même contexte, un lien souvent très étroit entre la technique de construction ou d'entretien des digues lorsqu'elles sont en terre, les caractéristiques des sols supportant ou environnant les ouvrages (sols médiocres de terres basses utilisés sur place pour les ouvrages, terrains sujets à érosion) et les activités sur les terres protégées (cultures, vignes, chasse, pêche, ...) accompagnées d'un assainissement des terres ou des constructions dédiées.

**Les ouvrages soumis à dégradations chroniques méritent donc tout particulièrement que soient examinés l'usage et les enjeux du territoire protégé. Cet examen permet notamment d'orienter la gestion de dispositifs de protection qui doivent être régulièrement réparés.**



*Vigne à l'abandon submergée (2015), aujourd'hui mise en culture*



### **Question 18**

Y-a-t-il un intérêt à modifier l'objectif de protection ?

Les éléments de réponse à cette question s'inscrivent dans un cadre qui dépasse largement le contexte de cette étude. Ce contexte concerne cependant des sollicitations récurrentes susceptibles d'évoluer, à moyen terme, en raison de la modification du niveau marin notamment. Ces évolutions peuvent ne pas impacter la réflexion sur la protection contre des événements extrêmes, très présents dans la gestion et la culture du risque. Il est important, cependant, de les intégrer à la réflexion sur la protection en général, qui peut être progressivement altérée (zone de mariage mouvante par exemple). Cela peut permettre de faire face à des travaux de confortement ou de réhabilitation devenus trop lourds en raison des dégradations chroniques.

**D'un point de vue plus stratégique et administratif, il s'agira pour le gestionnaire (GEMAPI) de choisir un abaissement du niveau de protection et de faire accepter à la population qu'elle sera moins protégée pour des crues importantes. Dans ce cas, le déclenchement du PCS sera plus fréquent engendrant des évacuations régulières, par exemple.**

**D'autres actions peuvent être menées au titre du PAPI (intégration du risque dans le territoire). Des dispositifs techniques (déversoirs par exemple) peuvent être mis en place également pour diriger les eaux vers des zones moins vulnérables. Mais toute modification du niveau de protection doit être portée à la connaissance du Préfet qui pourra fixer de nouvelles prescriptions ou demander une nouvelle démarche d'autorisation à l'EPCI.**



*Niveaux de crues extrêmes rappelés au public*



## **CONCLUSION**

Cette synthèse d'observations et les propositions de réflexion en matière de gestion d'ouvrages exposés à des dégradations chroniques, apportent des compléments de méthodes aux éléments dont disposent les gestionnaires en charge de la GEMAPI. Des ouvrages sont créés, puis évoluent dans un environnement complexe tenant à la fois du danger saisonnier des cours d'eau assujettis aux aléas climatiques et de l'énergie opposée par les éléments marins aux territoires côtiers dont l'intégrité est continuellement menacée. La relation entre l'ouvrage et son environnement réclame ici une vigilance toute particulière. La capitalisation des retours d'expérience est essentielle et des moyens doivent être consacrés à cela : dispositifs de suivi, conservation de l'information (notamment dans le registre de l'ouvrage prévu par le décret digue du 12 mai 2015), observation attentive d'environnements et de structures similaires.

A partir des exemples donnés, des ressources documentaires proposés et des éléments de réflexion apportés, une attention toute particulière pourra ainsi être apportée à des systèmes de défense singuliers en matière de complexité et d'exposition aux évolutions environnementales et climatiques.





## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- AUBEL, P., 2002. *Surveillance, auscultation et entretien des ouvrages maritimes : digues à talus et ouvrages mixtes*. Cerema. 69 p.
- BRANDON, E. et RIVAL, F., 2011. L'apport de l'analyse des évènements importants pour la sûreté hydraulique (EISH) dans les études de dangers (EDD) de barrages. In : *Pratique des études de danger des barrages*. 28 novembre 2011. p. 20.
- Cerema, 2016. *Étude des systèmes de protection contre les submersions marines - Méthodologie et études de cas issues du retour d'expérience Xynthia*. Rapport d'étude. Cerema. Références. 446 p.
- CFBR, 2015. *Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai*. Guide de pratiques. Comité Français des Barrages et Réservoirs. 95 p.
- CIRIA, CUR, CETMEF, 2009. *Guide enrochement. L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques. Version française du Rock Manual*. CETMEF. 1271 p.
- DENIAUD, Y. et LEDOUX, P., 2018. *Étude de dangers de systèmes d'endiguements - Concepts et principes de réalisation des études*. Cerema. 62 p.
- DENIAUD, Y. et LEDOUX, P., 2019. *Réalisation d'une EDD de système d'endiguement - Propositions pour un cahier des clauses techniques particulières*. Cerema. 53 p.
- FEUILLET, J., COEFFÉ, Y., BERNIER, J. et CHALOIN, B., 1987. *Le dimensionnement des digues à talus*. Eyrolles. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, 64 p.
- GIP Littoral Aquitain, 2012. *Stratégie régionale gestion de la bande côtière. Guide de l'action locale*, 110 p.
- MERIAUX, P., ROYET, P. et FOLTON, C., 2004. *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations - Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires*. Cemagref Editions. 134 p.
- POULAIN, D. et TOURMENT, R., 2015. *Référentiel technique digues maritimes et fluviales*. Rapport général. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, service technique de l'énergie électrique, des grands barrages et de l'hydraulique. 191 p.
- ROUXEL, N., THAUVIN, B., JEZEQUEL, J.F., LA PRAIRIE, X., BRU, J.P., LEVILLAIN, J.P. et CHUBILEAU, P., 2012. *Auscultation, surveillance et entretien des ouvrages maritimes : Les ouvrages en maçonnerie*. Cerema. 133 p.
- TOURMENT, R. et BEULLAC, B., 2019. *Inondations - Analyse de risque des systèmes de protection - Application aux études de dangers*. Editions Lavoisier. 333 p.
- VAN HEMERT, H., IGIGABEL, M., POHL, R., SHARP, M., SIMM, J., TOURMENT, R. et WALLIS, M. (éd.), 2013. *The International Levee Handbook*. Ciria. 1350 p. (*Guide international sur les digues 2019*, traduction en français)
- VENNETIER, M., MERIAUX, P. et ZANETTI, C., 2015. *Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai*. Irstea. 209 p.