



HAL
open science

Étude de dangers de systèmes d'endiguement Concepts et principes de réalisation des études

Y. Deniaux, Patricia Ledoux, Bernard Colin, B. Beullac, R. Tourment, Y.
Deniaux, Patricia Ledoux

► To cite this version:

Y. Deniaux, Patricia Ledoux, Bernard Colin, B. Beullac, R. Tourment, et al.. Étude de dangers de systèmes d'endiguement Concepts et principes de réalisation des études. CEREMA, pp.62, 2018. hal-02609196

HAL Id: hal-02609196

<https://hal.inrae.fr/hal-02609196>

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Étude de dangers de systèmes d'endiguement

Concepts et principes de réalisation des études

Juin 2018

Partenaire(s) de l'étude



Étude de dangers de systèmes d'endiguement

Concepts et principes de réalisation des études

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
V0	27/03/17	Version initiale
V1	03/07/17	Prise en compte des observations de Bruno Beullac et Rémy Tourment
V2	20/11/17	Prise en compte des observations de Karine Bizard
V3	14/02/18	Prise en compte de relectures multiples
V4	19/02/18	Prise en compte relecture DGPR/STEEGBH
V5	05/04/18	Prise en compte des observations de la réunion du 27/02/2018
V6	16/04/18	Prise en compte des observations de la réunion du 16/04/2018
V7	07/06/18	Prise en compte des observations de la réunion du 30/05/2018

Affaire suivie par

Yann DENIAUD Cerema Eau, mer et fleuve Département Environnement et Risques Division Risques Hydrauliques et Aménagements	Patrick LEDOUX Cerema Méditerranée Service Risques Inondations Littoraux et Hydrauliques
<i>Tél. : 02 98 05 76 23</i>	<i>Tél : +33 (0)4 42 24 76 98</i>
<i>Courriel : yann.deniaud@cerema.fr</i>	<i>Courriel : patrick.ledoux@cerema.fr</i>
Site de Plouzané : Cerema Eau, mer et fleuves – Technopôle Brest Iroise, 155 rue Pierre Bouguer, BP 5, 29280 Plouzané	Pôle d'activités Les Milles 30 avenue Albert Einstein CS 70499 13593 Aix en Provence CEDEX 03

Références

n° d'affaire : C17BR0016

maître d'ouvrage : DGPR/STEEGBH (M. Jean-Marc KAHAN)

Rapport	Nom	Date	Visa
Établi par	Yann DENIAUD Patrick LEDOUX	05/06/2018	
Avec la participation de	Benoît COLIN Bruno BEULLAC Rémy TOURMENT		
Contrôlé par	Joël L'HER	07/06/2018	
Validé par	Katy NARCY Jean-Marc KAHAN Gilles RAT	07/06/2018	

Résumé du document :

Les systèmes d'endiguement font l'objet d'une réglementation spécifique en raison des risques qu'ils génèrent, notamment pour la sécurité des riverains, de leurs effets potentiellement indésirables sur l'environnement et de la nécessaire justification de la protection qu'ils doivent apporter contre les inondations. Ils sont ainsi soumis à des dispositions réglementaires particulières dont la réalisation d'études de dangers.

Ce document traite du contenu et de l'élaboration des études de dangers appliquées aux systèmes d'endiguement ayant une vocation de défense contre les inondations fluviales et maritimes. Il a pour objectifs de présenter aux gestionnaires de système d'endiguement :

- le cadre conceptuel, réglementaire et technique de ces études ;
- leurs principes et modalités de réalisation ;
- les outils disponibles et mobilisables pour leur élaboration ;
- enfin les produits générés par la réalisation de telles études.

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION.....	7
1.1 Le contexte.....	7
1.2 Les objectifs du document.....	8
1.3 Avertissements.....	9
2 QU'EST-CE QU'UNE ÉTUDE DE DANGERS D'UN SYSTÈME D'ENDIGUEMENT ET À QUOI SERT-ELLE ?.....	10
2.1 Les concepts de l'étude de dangers – exemple des installations classées pour la protection de l'environnement.....	10
2.2 L'application aux systèmes d'endiguement.....	10
2.3 Les objectifs de l'étude de dangers d'un système d'endiguement.....	13
2.4 Les bénéfices d'une étude de dangers.....	15
2.4.1 Bénéfices pour le gestionnaire du système d'endiguement.....	15
2.4.2 Bénéfices pour les responsables locaux intéressés par la sécurité civile.....	16
2.4.3 Bénéfices pour les populations protégées.....	17
3 COMMENT RÉALISER L'ÉTUDE DE DANGERS D'UN SYSTÈME D'ENDIGUEMENT.....	18
3.1 Une démarche de connaissance à organiser.....	18
3.1.1 Une évaluation des performances par l'analyse des risques.....	18
3.1.2 La portée et la précision des études à mener.....	19
3.1.3 La qualité des études.....	21
3.2 Des étapes incontournables.....	21
3.2.1 La définition du périmètre d'étude.....	22
3.2.2 La recherche et l'analyse des connaissances existantes.....	23
3.2.3 L'appropriation des connaissances existantes et les investigations complémentaires.....	25
3.2.4 L'exploitation des données.....	25
3.2.5 L'estimation de la performance du système d'endiguement.....	35
3.3 Des outils à utiliser de manière proportionnée.....	44
3.3.1 Les données et les analyses topographiques.....	44
3.3.2 Les études et modélisations hydrauliques.....	46
3.3.3 Les études et modélisations mécaniques et géotechniques.....	53
4 LES PRODUITS D'UNE ÉTUDE DE DANGERS : UN DOSSIER RÉGLEMENTAIRE MAIS PAS SEULEMENT.....	54
4.1 Le dossier réglementaire.....	54

4.2 Un outil pour aider à la définition de mesures complémentaires de gestion des risques....	55
4.3 Un outil pour aider à la préparation d'un plan de gestion en période de crise.....	55
5 ANNEXES.....	57
5.1 Glossaire.....	57
5.1.1 Abréviations.....	57
5.1.2 Définitions.....	57
5.2 Références bibliographiques.....	59
5.2.1 Références citées.....	59
5.2.2 Références bibliographiques complémentaires.....	59

1 Introduction

1.1 Le contexte

Pour mettre en place, définir les performances et gérer au quotidien un système d'endiguement ayant une vocation de défense contre les inondations et les submersions, la réglementation impose la réalisation d'une **étude de dangers (décret n° 2015-526 du 12 mai 2015)**. Cette étude se place au **centre de la connaissance du système d'endiguement et de son environnement**. Elle doit **présenter et justifier le fonctionnement et les performances attendues du système d'endiguement en toutes circonstances, à partir d'une démarche d'analyse de risque s'appuyant sur la collecte, l'organisation, l'étude et la confrontation de toutes les informations et données pertinentes pour cet objectif**. Les contenus détaillés attendus de cette étude ont été fixés par l'arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers des digues organisées en système d'endiguement et des autres ouvrages conçus ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions.

La réglementation confie la responsabilité de la réalisation de l'étude de dangers au gestionnaire du système d'endiguement ayant une vocation de défense contre les inondations fluviales et maritimes.

La mission de défense contre les inondations et contre la mer relève aujourd'hui de la compétence obligatoire de gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations (GEMAPI) instaurée par la loi n° 2014-58 du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles (loi MAPTAM). Elle est confiée exclusivement à la commune, avec transfert à un établissement public de coopération intercommunale à fiscalité propre (EPCI) depuis le 1er janvier 2018.

Les modalités pratiques d'exercice de la compétence GEMAPI sont potentiellement assez diverses et pour les besoins de la gestion des digues, réorganisées en systèmes d'endiguement conformément aux règles issues du décret n° 2015-526 du 12 mai 2015, le gestionnaire pourra être, selon les cas :

- la commune îlienne isolée qui ne serait rattachée à aucun EPCI à fiscalité propre ;
- l'EPCI à fiscalité propre ayant conservé la compétence GEMAPI ou ayant conservé au moins son élément de mission 5° (défense contre les inondations et contre la mer) dans le cas où il aurait transféré les autres missions ;
- un syndicat mixte fermé regroupant plusieurs EPCI à fiscalité propre tels que visés au point précédant ;
- le département ou la région historiquement impliquée, la date du 1er janvier 2018 servant de référence, effectuant cette gestion des digues en régie pendant la période de transition prenant fin le 1er janvier 2020. Au-delà de cette date, l'article 59 de la loi MAPTAM prévoit que la gestion peut se poursuivre par dérogation sous réserve de la conclusion d'une convention avec les EPCI à fiscalité propre concernés ;

- un syndicat mixte ouvert regroupant les EPCI à fiscalité propre compétents pour la GEMAPI (au moins au titre de la mission 5°) le cas échéant aux côtés du département ou de la région historiquement impliquée. Le maintien ou l'adhésion au-delà du 1er janvier 2020 du département ou de la région historiquement impliquée signifierait le recours à la dérogation mentionnée au point précédent ;
- à titre transitoire jusqu'au 28 janvier 2024, l'État ou un de ses établissements publics, pour le compte de l'EPCI à fiscalité propre concerné, si la convention qui le lie à ce dernier le prévoit, conformément au IV de l'article 59 de la loi MAPTAM.

Les syndicats mixtes visés aux troisième et cinquième points peuvent être de type EPAGE ou EPTB. Dans cette éventualité, en matière de GEMAPI :

- un EPAGE peut agir pour ses EPCI à fiscalité propre membres par le mécanisme du transfert ou de la délégation de compétence conformément aux dispositions du V de l'article L.213-12 du code de l'environnement ;
- un EPTB peut également agir par ce même mécanisme de la délégation de compétence pour les EPCI à fiscalité propre membres mais aussi pour les EPCI à fiscalité propre non membres mais inclus dans le périmètre d'intervention de l'EPTB.

Pour la suite du document, conformément à l'article R.562-12 du code de l'environnement et sans détailler tous les cas de gouvernance possible, nous appellerons « **gestionnaire du système d'endiguement** » au sens de l'article L.562-8-1 du code de l'environnement, l'autorité compétente pour la prévention des inondations, qui assure la gestion d'au moins un système d'endiguement dans le cadre de l'exercice de sa compétence GEMAPI.

Ce gestionnaire d'ouvrages hydrauliques de protection contre les inondations a un intérêt majeur à comprendre, connaître et maîtriser le contenu, le déroulement et les outils nécessaires à l'élaboration des études de dangers qui, au-delà de leur caractère réglementaire, constituent une source de connaissance indispensable à une gestion pérenne et optimisée de ces ouvrages intéressant la sécurité publique.

1.2 Les objectifs du document

Ce document traite du contenu et de l'élaboration des études de dangers (EDD) appliquées aux systèmes d'endiguement ayant une vocation de défense contre les inondations fluviales ou maritimes. Il a pour objectifs de présenter aux gestionnaires de système d'endiguement :

- le cadre conceptuel, réglementaire et technique de ces études ;
- leurs principes et modalités de réalisation ;
- les outils disponibles et mobilisables pour leur élaboration ;
- enfin les produits générés par la réalisation de telles études.

Les systèmes d'endiguement ne sont pas l'unique moyen pour la défense contre les inondations fluviales ou maritimes. Les aménagements hydrauliques constituent la seconde famille créée par le décret du 12 mai 2015. Leurs fonctions sont de stocker provisoirement des écoulements provenant d'un ou plusieurs bassins versants afin d'éviter des débordements de cours d'eau en crue sur le territoire devant être protégé, ou de permettre, en matière de protection contre les

submersions, le ressuyage de venues d'eau en provenance de la mer. Il est naturellement possible pour protéger un territoire de coupler les deux types d'ouvrages : système d'endiguement et aménagement hydraulique.

1.3 Avertissements

Ce document s'attache uniquement à la réalisation des études de dangers spécifiques aux systèmes d'endiguement prévue à l'annexe 1 de l'arrêté du 7 avril 2017 en dehors des cas où les dispositions de son article 12 (territoire protégé à la fois par un système d'endiguement et par un aménagement hydraulique qui dépendent du même gestionnaire) ou de son article 13 (territoire sous l'influence hydraulique d'un aménagement hydraulique dépendant d'un autre gestionnaire que celui du système d'endiguement) s'appliqueraient.

Ce document contient des termes explicitement définis par la réglementation tels que le « niveau de protection » du système d'endiguement et la « zone protégée » par ce dernier. Il s'appuie également sur d'autres vocables à portée technique dont la définition est communément admise par la profession. Ces appellations techniques recouvrent des notions et caractéristiques dont la connaissance constitue une étape nécessaire à la détermination des termes définis réglementairement. Les définitions des principaux termes utilisés sont reprises dans un glossaire présenté en annexe.

2 Qu'est-ce qu'une étude de dangers d'un système d'endiguement et à quoi sert-elle ?

2.1 Les concepts de l'étude de dangers – exemple des installations classées pour la protection de l'environnement

Le concept de l'étude de dangers est appliqué dans différents domaines d'activité industriels. Elle est la clé de voûte de toute démarche de sécurité.

Réalisée par le responsable de l'ouvrage sous le contrôle de l'inspection des installations classées, l'étude de dangers s'articule autour de l'analyse des fonctions de l'ensemble des éléments constitutifs du système de production industrielle, des défaillances possibles de ces fonctions, du recensement des phénomènes dangereux possibles, de l'évaluation de leurs conséquences, de leur probabilité d'occurrence, de leur cinétique ainsi que de leur prévention et des moyens de secours adaptés à la gestion de leurs effets.

L'étude de dangers doit donner une description des installations et de leur environnement ainsi que des produits utilisés, identifier les sources de risques internes et externes et justifier les moyens prévus pour en limiter la probabilité et les effets, notamment en proposant des mesures concrètes en vue d'améliorer la sûreté.

2.2 L'application aux systèmes d'endiguement

La notion de système d'endiguement a été introduite par le décret n° 2015 526 du 12 mai 2015.

Les systèmes d'endiguement font l'objet d'une réglementation spécifique, au même titre que les installations classées, en raison des risques qu'ils créent, notamment pour la sécurité des riverains, de leurs effets potentiellement indésirables sur l'environnement et de la nécessaire justification de la protection qu'ils doivent apporter contre les inondations. Comme les activités industrielles ou agricoles, ils sont soumis à des prescriptions fixées par la réglementation (issue du décret n° 2015 526 du 12 mai 2015) et par des arrêtés préfectoraux individuels d'autorisation.

Parmi ces dispositions figure la réalisation d'**une étude de dangers**, telle que prévue par l'article R.214-115 du code de l'environnement. Cette étude de dangers doit être nécessairement **produite par le gestionnaire du système d'endiguement et réalisée par un organisme agréé** (article R. 214-116-I du code de l'environnement).

La finalité d'un système d'endiguement est la protection d'un territoire, appelé « **zone protégée** », contre les inondations provenant d'un cours d'eau endigué ou de la mer, et cela jusqu'à un certain niveau d'événement, appelé « **niveau de protection**¹ ».

1 Le niveau de protection est défini par l'article R. 214-119-1 du code de l'environnement. C'est la hauteur maximale définie par le gestionnaire que peut atteindre l'eau sans que la zone protégée soit inondée en raison du débordement, du contournement, ou de la rupture des ouvrages de protection quand l'inondation provient directement du cours d'eau ou de la mer. Le niveau de protection est apprécié au regard, soit d'un débit du cours d'eau en crue ou d'une cote de niveau atteinte par celui-ci, soit d'un niveau marin pour le risque de submersion marine.

La finalité du système d'endiguement converge ainsi avec les objectifs de sûreté des ouvrages qui le constitue. Un système d'endiguement se doit de présenter un niveau de protection inférieur ou égal au niveau maximal de sollicitation pour lequel le gestionnaire considère que la probabilité de rupture des ouvrages du système d'endiguement est acceptable. L'arrêté du 7 avril 2017 fixe un plafond de 5 % à la probabilité conditionnelle de rupture considérée comme acceptable.

La réglementation (décret du 12 mai 2015 et arrêté du 7 avril 2017) n'impose pas formellement que soit déterminé ce niveau maximal de sollicitation, appelé niveau de sûreté. Cette détermination est néanmoins incontournable, car à l'instar des études de dangers des installations industrielles, le gestionnaire d'un système d'endiguement doit définir les dispositions prises pour limiter le risque de défaillance et évaluer leurs effets au regard de la sûreté du système d'endiguement. Le niveau de protection qu'il retiendra devra alors respecter l'inégalité :

$$\text{Niveau de protection} \leq \text{Niveau de sûreté} \quad (1)$$

La sûreté des ouvrages constituant le système d'endiguement n'est cependant pas suffisante pour garantir l'absence d'inondation dans la zone à protéger si celui-ci n'a pas, peu ou plus d'influence, sur les mécanismes de l'inondation. En effet, le système d'endiguement peut être contourné ou dépassé dans ses capacités du fait de ses seules caractéristiques géométriques. Le niveau de protection est ainsi limité par le niveau d'eau amenant les premiers écoulements dans la zone protégée, dans une configuration géométrique de l'ouvrage non altérée par des détériorations. Ce niveau d'eau peut être appelé **niveau de protection apparent**. Le terme « apparent » traduit l'absence de prise en compte d'une défaillance structurelle du système d'endiguement.

Il s'agira par exemple d'une crue pour laquelle le niveau d'eau atteint, selon les cas :

- la crête d'une digue en terre ;
- le seuil d'un déversoir ;
- un seuil de contournement du système d'endiguement provoquant les premières venues d'eau sur les terrains situés en arrière de l'endiguement.

Le niveau de protection devra alors respecter l'inégalité :

$$\text{Niveau de protection} \leq \text{Niveau de protection apparent} \quad (2)$$

Ainsi la valeur maximale du niveau de protection qui peut être attribuée à un système d'endiguement est bornée par les inéquations (1) et (2). Il s'agit de la valeur minimale entre le niveau de sûreté et le niveau de protection apparent du système (figure 1).

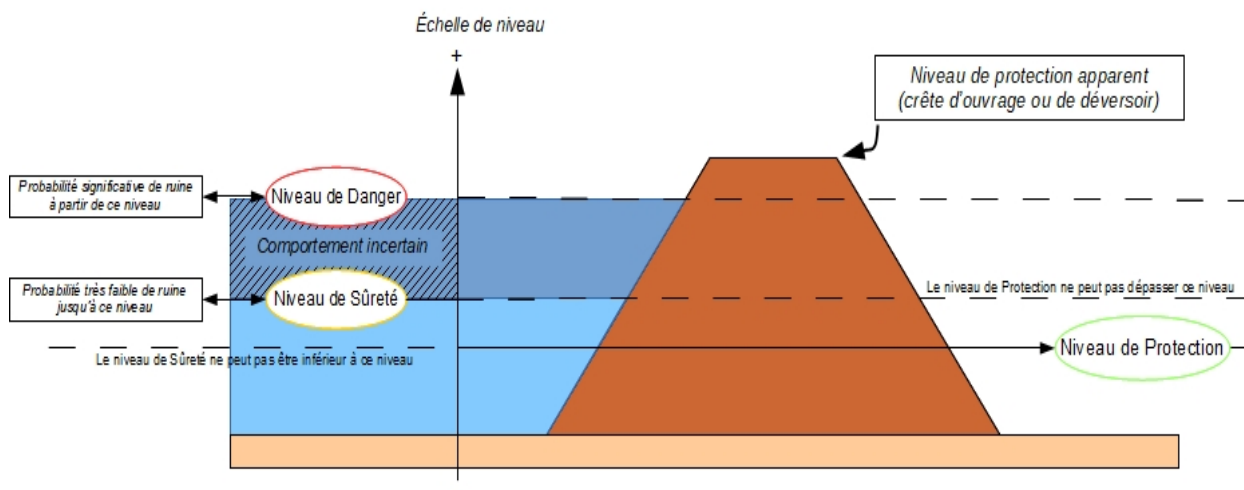


Figure 1: Les différents niveaux caractéristiques d'un segment de digue (Y. Deniaud, Cerema)

Par ailleurs, la détermination du niveau de protection d'un système d'endiguement défini par l'article R. 214-119-1 du code de l'environnement est un élément clef de la sécurité juridique du gestionnaire, puisque selon l'article L. 562-8-1 de ce même code de l'environnement, « *la responsabilité du gestionnaire de l'ouvrage ne peut être engagée à raison des dommages que l'ouvrage n'a pas permis de prévenir dès lors qu'il a été conçu, exploité et entretenu dans les règles de l'art et conformément aux obligations légales et réglementaires* ». Ainsi, à titre d'exemple, si le niveau de protection d'un système d'endiguement est défini par un niveau de crue de 5 m, la responsabilité du gestionnaire qui respecte ses obligations techniques (conception et exploitation dans le respect de règles de l'art) ou réglementaires (obligations légales), ne pourra pas être engagée pour les dommages causés par une crue de 7 m.

Les différentes situations dans lesquelles un même système d'endiguement sera autorisé ou fera l'objet d'une autorisation complémentaire, et pour lesquelles une étude de dangers du système d'endiguement est à réaliser ou à mettre à jour en conformité à l'article R. 214-116 du code de l'environnement et aux dispositions de l'arrêté du 7 avril 2017, sont :

- la demande d'autorisation initiale pour laquelle plusieurs cas sont possibles et peuvent se combiner :
 - la régularisation de digues existantes précédemment autorisées ;
 - la régularisation d'ouvrages existants de protection contre les inondations dépourvus d'autorisation préalable ;
 - le réemploi d'ouvrages existants, éventuellement réhabilités ou modifiés, dont la vocation principale n'est pas la prévention des inondations, mais qui peuvent y contribuer (ex.:remblais routiers...) ;
 - la création ex nihilo ;
- la modification physique du système d'endiguement après son autorisation initiale ;
- la prise en compte d'une modification importante du niveau de performance ;
- la modification de la gestion du système d'endiguement.

2.3 Les objectifs de l'étude de dangers d'un système d'endiguement

La réalisation d'une étude de dangers vise à évaluer les performances d'un système d'endiguement étayées par des connaissances objectives concernant son environnement et les ouvrages qui le composent. Elle conduit à déterminer, afficher et justifier pour un système d'endiguement précisément défini et délimité, *a minima* en niveau d'eau ou débit : **le niveau de protection du système d'endiguement**.

Le décret du 12 mai 2015 confie au gestionnaire du système d'endiguement la détermination et le choix du contour de la zone protégée et du niveau de protection. Ce choix, nécessairement compatible avec les orientations du plan de gestion du risque inondation lorsque ce document existe, sera naturellement guidé par :

- les orientations existantes des stratégies locales de gestion du risque inondation (SLGRI) et des plans d'action pour la prévention du risque d'inondation (PAPI) ;
- les enjeux que le gestionnaire souhaite protéger des inondations fluviales ou maritimes par le moyen du système d'endiguement ;
- l'état des ouvrages qui composent le système d'endiguement chargé d'assurer cette protection ;
- le cas échéant, le comportement des éléments naturels auxquels le système d'endiguement se rattache ;
- le contexte hydraulique et morphodynamique (fluvial, maritime, torrentiel), dont dépendent également les dynamiques d'inondation et donc les limites d'extension maximale de la zone protégée ;
- les capacités de surveillance et de maintenance du gestionnaire du système d'endiguement et donc l'organisation et les moyens de ce dernier.

La zone protégée pourra être partitionnée en différents territoires où le niveau de protection sera plus ou moins élevé.

Le système d'endiguement peut être constitué d'une ligne de défense principale en premier rang complétée par des ouvrages de protection de second rang situés à l'intérieur de la zone protégée. Le système d'endiguement peut aussi comprendre une première ligne de défense avec un niveau de protection relativement faible derrière laquelle les enjeux sont limités et une seconde ligne de défense située à proximité d'une zone plus densément urbanisée.

Afin de bien clarifier la protection apportée par le système d'endiguement, le gestionnaire doit pouvoir justifier, par l'étude de dangers, d'une estimation de la probabilité d'occurrence dans l'année de la crue ou de la tempête correspondant au niveau de protection de chaque partie de la zone protégée.

Le document produit par le gestionnaire à l'issue de la réalisation de l'étude de dangers est donc le moyen d'exposer et de justifier les conditions et les limites de la protection apportée par le système d'endiguement :

- sources d'inondation contre lesquelles le système d'endiguement a une action, et sources ou mécanismes d'inondation non pris en compte par celui-ci (inondation par un affluent, remontée de nappe, ruissellement pluvial...) ;

- intensité d'événement en deçà de laquelle le fonctionnement nominal du système d'endiguement, qui tient compte d'une probabilité de rupture résiduelle limitée à un maximum de 5 %, permet l'absence d'inondation de la zone protégée (par surverse, contournement, rupture...);
- territoire protégé et non protégé, en fonction d'un ou éventuellement de plusieurs niveaux de protection;
- obstacle à l'écoulement non intégré dans le système d'endiguement pour des raisons propres au gestionnaire du système d'endiguement, notamment leur faible niveau de fiabilité ou d'utilité pour la protection des territoires.

C'est également un document essentiel pour l'évaluation des performances du système d'endiguement en toutes circonstances. Il fournit en effet au gestionnaire les bases de connaissances indispensables à la réalisation des missions qui lui reviennent concernant :

- la surveillance des phénomènes naturels (crues, tempêtes...) et du comportement qu'ils induisent sur son système de protection;
- l'alerte des autorités en cas de défaillance ou de dépassement des capacités de ce dernier.

La gestion des risques au-delà des limites de fonctionnement du système d'endiguement, ainsi identifiées par l'étude de dangers, s'appuie sur un cadre global de prévention des inondations comprenant notamment :

- l'aménagement de la zone inondable, notamment son urbanisation et la vulnérabilité aux inondations des habitations et des équipements (PPRI et PLU);
- les actions de sensibilisation au risque d'inondation à l'attention des usagers de la zone inondable (DICRIM);
- la prévision des crues ou des submersions marines;
- les plans d'urgence (PCS, Plan ORSEC).

Ces actions dépassent bien souvent les compétences propres du gestionnaire de système d'endiguement. Celui-ci est cependant un acteur essentiel à la mise en œuvre et à l'adaptation de ces démarches par les éléments de connaissance qu'il peut apporter sur les performances, le comportement et la gestion en toutes circonstances du système dont il a la charge. La réalisation et la diffusion de l'étude de dangers ainsi que la mise en place de circuits adaptés d'échange d'informations constituent ainsi des contributions du gestionnaire indispensables à la démarche globale de prévention des inondations.

2.4 Les bénéfiques d'une étude de dangers

2.4.1 Bénéfices pour le gestionnaire du système d'endiguement

Le gestionnaire du système d'endiguement est le premier bénéficiaire de l'étude de dangers. Celle-ci forme un document complet et détaillé sur le système d'endiguement. Elle comporte des éléments d'information synthétiques et apporte des bénéfiques de diverses natures :

- **Une connaissance du niveau de sûreté du système d'endiguement** grâce à un diagnostic approfondi de l'état des ouvrages qui le composent et une évaluation du comportement des éléments naturels sur lesquels il s'appuie, soit :
 - les digues, c'est-à-dire tous les ouvrages conçus en vue de la défense contre les inondations ;
 - les éventuels ouvrages qui sont mis à sa disposition afin de compléter la défense, notamment les remblais d'infrastructures ;
 - les dispositifs de régulation des écoulements hydrauliques ;
 - les éléments naturels qui contribuent à la fermeture du système d'endiguement (dunes, éléments du relief,...).
- **Une base objective pour :**
 - **situer le rôle du système d'endiguement** dans la politique locale de prévention des risques d'inondation (stratégie locale, réduction de la vulnérabilité...)
 - **définir et mettre en œuvre des mesures d'amélioration continue** de sa politique de réhabilitation, d'entretien et de surveillance. Le gestionnaire dispose en effet dans le cadre de l'étude de danger d'un ensemble de préconisations² en vue d'optimiser à moyen ou à long terme le maintien du niveau de protection de son système d'endiguement et la gestion patrimoniale des ouvrages qui le compose.
- **Des éléments d'information sur les performances du système d'endiguement et ses limites**, leur connaissance et leur diffusion pouvant intéresser l'administration de l'État (le Préfet et les services intéressés à la gestion des inondations, à la gestion de crise et à la sécurité publique), des collectivités territoriales (maires, élus et agents des EPCI, communes... dont les compétences portent également sur la gestion des inondations et de la sécurité publique), et la population :
 - présentation de la zone protégée sous forme cartographique ;
 - définition des crues ou des submersions marines contre lesquelles le système d'endiguement apporte une protection (niveau de protection) ;
 - justification de l'adéquation entre l'organisation et les moyens mis en œuvre pour entretenir et surveiller le système d'endiguement d'une part et le niveau de protection affiché d'autre part ;
 - présentation et affichage des dangers en cas de crues ou de submersions dépassant le niveau de protection et indication des moyens du gestionnaire pour anticiper ces

² Chapitre 9bis du Plan et contenu de l'étude de dangers d'un système d'endiguement, arrêté du 7 avril 2017

événements, pour alerter les autorités compétentes pour la sécurité des populations et contribuer ainsi à leur efficacité ;

- présentation et affichage des limites de la protection :
 - le niveau de protection ;
 - la ou les zone(s) protégée(s) ;
 - les aléas naturels non pris en compte (inondation par un cours d'eau secondaire, remontée de nappe, ruissellement, laves torrentielles...) ;
 - les ouvrages qui, bien que faisant obstacle aux écoulements, ne sont pas pris en compte au titre du système d'endiguement. Pour ces ouvrages qui « perdent leur fonction de digue de protection contre les inondations » d'intérêt général, la responsabilité civile est celle du droit commun et revient à leurs propriétaires³. Les éventuels enjeux situés à leur aval doivent alors faire l'objet d'une gestion des risques particulière, voir chapitre 2.3.
- **Une sécurité juridique** : le gestionnaire ayant bien défini le domaine de fonctionnement du système d'endiguement et clairement identifié les limites de protection évoquées au chapitre précédent, il aura la possibilité de se défendre lors de l'occurrence d'un événement sortant de ce domaine de fonctionnement, en évoquant l'article L.562-8-I : « *La responsabilité d'un gestionnaire d'ouvrages ne peut être engagée à raison des dommages que ces ouvrages n'ont pas permis de prévenir dès lors que les obligations légales et réglementaires applicables à leur conception, leur exploitation et leur entretien ont été respectées* ».

2.4.2 Bénéfices pour les responsables locaux intéressés par la sécurité civile

L'article L2212-2 du code des Collectivités Territoriales dispose que la police municipale a pour objet le bon ordre, la sûreté, la sécurité et la salubrité publique. C'est donc au maire que revient en premier lieu, le soin de prévenir et de faire cesser par la distribution des secours nécessaires, les accidents, parmi lesquels sont explicitement citées les ruptures de digues.

En cas d'accident, sinistre ou catastrophe dont les conséquences peuvent dépasser les limites ou les capacités d'une commune, le représentant de l'État dans le département mobilise les moyens de secours relevant de l'État, des collectivités territoriales et des établissements publics.

Pour faire face à leurs responsabilités, ces acteurs doivent recenser les éléments pouvant influencer sur le déroulement des inondations. Les études de dangers sont ainsi des sources incontournables d'information concernant :

- les comportements attendus des systèmes d'endiguement ;
- les gestionnaires, leurs actions et moyens disponibles et mobilisés en période de crise ;
- les zones protégées (et donc celles qui ne le sont pas) et les limites des protections.

³ Article 1384 du code civil : « **On est responsable** non seulement du dommage que l'on cause par son propre fait, mais encore de celui qui est causé par le fait des personnes dont on doit répondre, ou **des choses que l'on a sous sa garde**. »

Dans le cas de zones protégées étendues, les zones inondables pourront être découpées en secteurs avec des stratégies de réponse différentes justifiées par le niveau de risque :

- sécurisation des enjeux sans évacuation ;
- évacuation limitée aux enjeux sensibles ;
- évacuation totale.

Au titre de l'accompagnement des communes concernées, le gestionnaire du système d'endiguement est invité à informer les communes intéressées par le périmètre et les conclusions de l'étude de dangers. Le résumé non technique, accompagné de la cartographie appropriée, sera notamment un support utile et à privilégier pour accompagner les maires dans la réalisation ou la mise à jour de leur plan communal de sauvegarde (PCS).

La délimitation d'un territoire qui, bien que restant situé en zone inondable, présente certaines garanties de non-inondation est une information intéressante à intégrer dans le recensement des enjeux humains, stratégiques et économiques. La stratégie d'action de la commune peut s'en trouver modifiée en priorisant ses actions sur les territoires situés en zone inondable non protégée, tout en veillant aux conditions d'accès au territoire protégé.

La cartographie des scénarios de venues d'eau dans et en dehors de la zone protégée utilisant un code couleur en fonction du niveau de dangers peut également alimenter la stratégie de mise en sécurité du territoire communal.

En termes d'organisation communale, la connaissance du niveau de protection afférent à un territoire bien délimité permet d'adapter les moyens de la commune à l'intensité et la durée prévisibles de l'événement.

2.4.3 Bénéfices pour les populations protégées

L'étude de dangers contribue à donner aux personnes présentes dans la zone protégée une information sur les risques d'inondation associés aux comportements de l'ouvrage, qu'ils soient normaux ou défaillants.

Le résumé non technique et les cartographies qui l'accompagnent fournissent ainsi aux élus des informations utiles pour déployer une communication favorisant la prise de conscience par les populations des conditions de la protection apportée par le système d'endiguement. Ils sont un support essentiel à la diffusion d'une explication pédagogique et argumentée :

- de la performance du système d'endiguement, traduite par un niveau de protection qui est bien souvent inférieur à la crête des ouvrages ;
- des limites de la protection apportée, en rappelant notamment que les digues de protection, même bien conçues, correctement entretenues et surveillées, ne protègent pas contre tous les événements hydrométéorologiques ;
- des conséquences des défaillances possibles du système d'endiguement.

3 Comment réaliser l'étude de dangers d'un système d'endiguement

3.1 Une démarche de connaissance à organiser

3.1.1 Une évaluation des performances par l'analyse des risques

L'évaluation des performances d'un système d'endiguement repose sur la mise en œuvre successive de différentes analyses :

- L'analyse fonctionnelle du système d'endiguement qui évalue le fonctionnement global du système en lien avec les fonctions exercées par chaque composante du système. Cette analyse s'effectue à différentes échelles permettant de descendre des mécanismes globaux aux mécanismes locaux de la gestion hydraulique en lien avec la sûreté structurelle des ouvrages.
- L'analyse des défaillances du système d'endiguement qui vise à caractériser les conditions et scénarios dans lesquels la fonction du système d'endiguement se dégrade et conduit à l'inondation.
- L'analyse quantitative des scénarios de défaillance qui évalue leurs probabilités d'occurrence et permet de cartographier les venues d'eau dangereuses associées à une gamme représentative de crues ou de tempêtes.

La conduite de l'étude de dangers est ainsi une démarche d'analyse de risques qui s'appuie sur une identification puis une évaluation des événements susceptibles d'affecter le système d'endiguement et de provoquer l'inondation de la zone protégée.

Cette démarche repose sur :

- une recherche en accidentologie, s'appuyant sur des événements passés affectant des systèmes d'endiguement de nature similaire, qui permet l'identification des risques, c'est-à-dire la recherche de l'ensemble des facteurs de risque susceptibles d'influencer le risque d'inondation dans les zones protégées ;
- la caractérisation des événements hydrauliques susceptibles de se produire dans le cours d'eau ou la mer et l'estimation de leur probabilité d'occurrence ;
- le diagnostic approfondi du système d'endiguement permettant la caractérisation des événements de défaillance du système d'endiguement et l'estimation de leur probabilité d'occurrence ;
- l'identification et l'évaluation des contrôles ou barrières de sécurité, liées notamment à l'organisation et à la politique de surveillance et d'entretien du gestionnaire ;
- la caractérisation, en termes de probabilité, d'intensité et de cinétique, des inondations de la zone protégée pouvant résulter de ces défaillances ou du dépassement du niveau de

protection sans défaillance (notamment dans le cas d'inondation par un déversoir conçu à cet effet) ;

- l'estimation de la performance du système d'endiguement (niveau de protection et zone protégée) et de la dangerosité des venues d'eau (zones de venues d'eau dangereuses et niveaux de sécurités associés) ;
- et *in fine*, la délimitation réglementaire de la zone protégée et la fixation du niveau de protection qui lui correspond, après que le gestionnaire aura choisi, en lien avec les éléments d'analyses fournies par le bureau d'étude agréé, le risque résiduel de rupture⁴ du système, lorsque le niveau d'eau atteint ce niveau de protection.

La réglementation définit par ailleurs des scénarios de référence dont l'étude doit être systématiquement incluse dans toute étude de dangers (cf 3.4.2.)

Cette démarche est illustrée par le schéma de la figure 2.

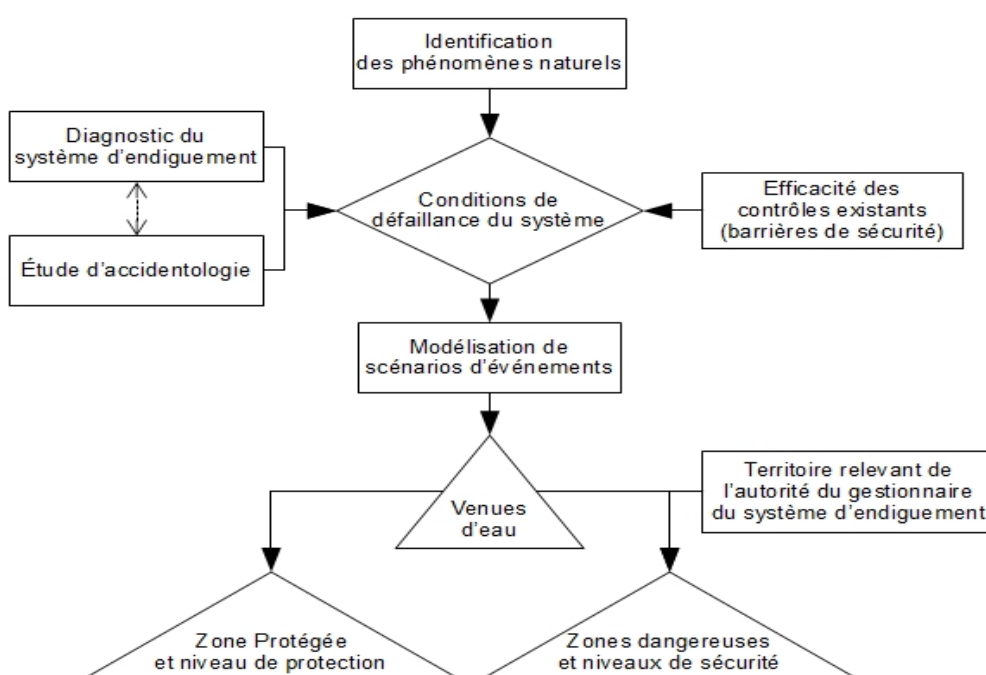


Figure 2: Démarche générale d'analyse pour la réalisation de l'étude de dangers (Y. Deniaud, Cerema)

3.1.2 La portée et la précision des études à mener

Si chaque organisme agréé dispose d'une méthode propre pour conduire l'analyse de risque nécessaire à la réalisation des études de dangers qui lui sont confiées, les connaissances nécessaires à la mise en œuvre de cette démarche doivent permettre d'appréhender avec suffisamment de précision l'ensemble des facteurs de risques liés à l'environnement et aux ouvrages qui composent le système d'endiguement. Ces connaissances proviennent ainsi de la réalisation spécifique ou des résultats existants de différentes études thématiques.

⁴ l'arrêté du 7 avril 2017, chapitre 8 de l'annexe 1, fixe la valeur plafond de 5 % pour le risque résiduel de rupture.

Ces dernières concerneront notamment :

- la topographie de l'ensemble constitué par le milieu environnant, le système d'endiguement et la zone inondable ;
- l'hydrologie du bassin versant ou l'étude des niveaux marins ;
- l'hydraulique du cours d'eau ou du domaine maritime ;
- la morphodynamique de l'environnement fluvial ou maritime ;
- la géologie et l'hydrogéologie du site ;
- la structure et la géotechnique des ouvrages et de leur fondation ;
- les équipements et organes mobiles des ouvrages (vannes, batardeaux, pompes...) ;
- l'état général des ouvrages composant le système d'endiguement ;
- le bilan des désordres et facteurs aggravants vis-à-vis de la sûreté des ouvrages : végétation ligneuse, canalisations traversantes, galeries d'animaux fouisseurs, détériorations des ouvrages, etc. ;
- l'organisation du gestionnaire (procédures écrites existantes pour la surveillance, l'entretien, procédures effectivement mises en œuvre, moyens humains et matériels à disposition, formation des agents, relations avec les autorités préfectorales...) ;
- la description de la zone inondable et de ses caractéristiques topographiques, environnementales et urbanistiques majeures.

Les résultats produits dans ces différentes études thématiques seront à utiliser pour l'élaboration et la rédaction des différents chapitres du plan réglementaire de l'étude de dangers. Ils seront exploités pour la caractérisation de la performance et du niveau de protection du système d'endiguement. Pour les systèmes d'endiguement à faibles enjeux de protection, leur manque de précision, et donc celui de l'évaluation des performances du système d'endiguement (en particulier sur la probabilité de défaillance du système d'endiguement pour un niveau d'aléa donné), pourra contraindre le gestionnaire à fixer un niveau de protection prudent qui se traduira par le déclenchement plus précoce de mesures de mise en sécurité de la population.

Lorsque certaines données sont communes à plusieurs systèmes d'endiguement, il est également possible, afin de diminuer les coûts globaux, de mutualiser la réalisation de certaines études, telles que par exemple :

- l'étude hydrologique d'un bassin hydrographique ;
- l'étude du comportement des cellules hydrosédimentaires susceptibles d'influencer les systèmes d'endiguements ;
- l'étude hydraulique de propagation des crues du cours d'eau endigué et de ses affluents⁵ endigués ou non ;
- l'étude des niveaux marins, des états de mer au large et de leur propagation en proche côtier ;

⁵ La prise en compte des inondations provenant d'un affluent n'est pas imposée par la réglementation. En effet, l'article 10 de l'arrêté du 7 avril 2017 précise que lorsque le risque d'inondation résulte de l'**existence de plusieurs cours d'eau**, l'étude de dangers précise la finalité du système étudié et rappelle ceux de ces aléas qui ne sont pas pris en compte.

- l'étude morphodynamique d'ensemble ;
- les recherches historiques, notamment concernant les brèches et les inondations importantes sur le secteur d'étude ou pour des ouvrages de constitution similaire.

Dans tous les cas le phasage des études doit permettre de proportionner les moyens d'investigation et le développement de la connaissance, à la précision des résultats, souhaitable et atteignable dans le contexte particulier du système d'endiguement et du territoire à protéger.

3.1.3 La qualité des études

L'étude de dangers est à réaliser par un bureau d'étude agréé (article R214-116-I du code de l'environnement). Si le gestionnaire du système d'endiguement ne dispose pas de son propre agrément pour la réalisation de l'étude de danger, il est le maître d'ouvrage de l'étude. Afin de garantir la qualité des études réalisées à son profit, il est donc indispensable qu'il dispose de compétences techniques minimales pour être en mesure d'en établir les cahiers des charges techniques et pour contrôler la qualité des documents produits par le bureau d'étude qu'il aura missionné. Au besoin, il pourra utilement recourir aux conseils d'une assistance à maîtrise d'ouvrage (AMO) disposant de compétences spécifiques dédiées aux ouvrages hydrauliques et couvrant les champs thématiques de l'hydrologie, de l'hydraulique, de la morphodynamique, de la géotechnique et toute autre thématique imposée par la spécificité des éléments composant le système de protection et par les caractéristiques de la zone d'étude. La compréhension puis l'appropriation par le gestionnaire du système d'endiguement des travaux menés et des résultats obtenus par l'organisme agréé est la première étape indispensable d'une démarche progressive d'amélioration de la connaissance du système d'endiguement et d'optimisation de sa gestion, particulièrement lorsque l'étude concerne un système d'endiguement complexe et que les enjeux de protection sont forts.

3.2 Des étapes incontournables

L'étude de dangers s'appuie sur une structuration et une exploitation d'un ensemble varié d'informations et de données ayant trait à l'environnement et aux ouvrages composant le système d'endiguement, ainsi qu'à leur gestion. Celles-ci peuvent être déjà disponibles ou indispensables à collecter ou à produire pour la bonne réalisation de l'étude. L'optimisation du déroulement et de l'économie générale de l'étude de dangers conduit donc à définir quelques étapes incontournables permettant de qualifier, compléter et exploiter l'ensemble des données. Ces étapes comprennent :

- la définition du périmètre d'étude ;
- la recherche et l'analyse des connaissances existantes ;
- la réalisation d'investigations complémentaires (concernant la structure des ouvrages, la géotechnique, l'hydrologie, l'hydraulique, la topographie, la bathymétrie...) ;
- le traitement et l'analyse des données permettant :
 - la caractérisation des effets des milieux environnants sur les processus d'inondations ;
 - la description et le diagnostic du système de protection et d'endiguement ;

- l'analyse de l'organisation du gestionnaire en vue de garantir et maintenir les performances du système d'endiguement, incluant les modalités de gestion des ouvrages en situation de crue ou de tempête ;
- l'analyse fonctionnelle et l'analyse des défaillances du système d'endiguement ;
- l'estimation du risque de venues d'eau et en particulier de celles qui seront dangereuses ;
- la définition du système d'endiguement, de la ou des zone(s) protégée(s) et du ou des niveau(x) de protection associé(s).

Il convient donc que le gestionnaire établisse un planning général du déroulement des étapes nécessaires à la réalisation de l'étude de dangers.

3.2.1 La définition du périmètre d'étude

L'étude de dangers a vocation à définir et à analyser les conséquences attendues des sollicitations apportées par le milieu environnant sur la zone potentiellement protégée, en fonction du comportement d'un ou de plusieurs systèmes de protection. Le périmètre de l'étude à mener revêt ainsi deux dimensions principales :

- Le **système de protection** (figure 3) :
Il est constitué par l'ensemble des ouvrages⁶, des dispositifs de régulation des écoulements (fossés de drainage, pompes...), des organes de manœuvre et des éléments du relief qui concourent à la protection. Il comprend donc le système d'endiguement au sens réglementaire et les éléments naturels (cordons dunaires, éléments du relief...) concourant à la protection d'un secteur géographique donné. Il présente une continuité topographique permettant aux ouvrages de remplir leur fonction, en vue d'assurer l'objectif de protection des enjeux qui lui est assigné (Référentiel technique digues maritimes et fluviales, 2015).
- Les **milieux environnants** (figure 3) comprenant les deux parties situées de part et d'autre du système de protection et en interaction avec celui-ci :
 - le **milieu « eau »** (cours d'eau, mer) est à l'origine des sollicitations hydrauliques sur les ouvrages du système de protection ;
 - le **milieu « zone potentiellement protégée »** est le lieu récepteur en cas de défaillance du système de protection. La **zone protégée** au sens **réglementaire** correspondra à tout ou partie de cette zone suivant le choix du gestionnaire.

Le périmètre géographique des études doit ainsi être adapté à chacune des dimensions susceptibles d'influer sur le risque d'inondation dans la zone potentiellement protégée.

⁶ Les ouvrages comprennent les digues et les divers ouvrages contributifs à la protection des inondations intégrés au système d'endiguement.

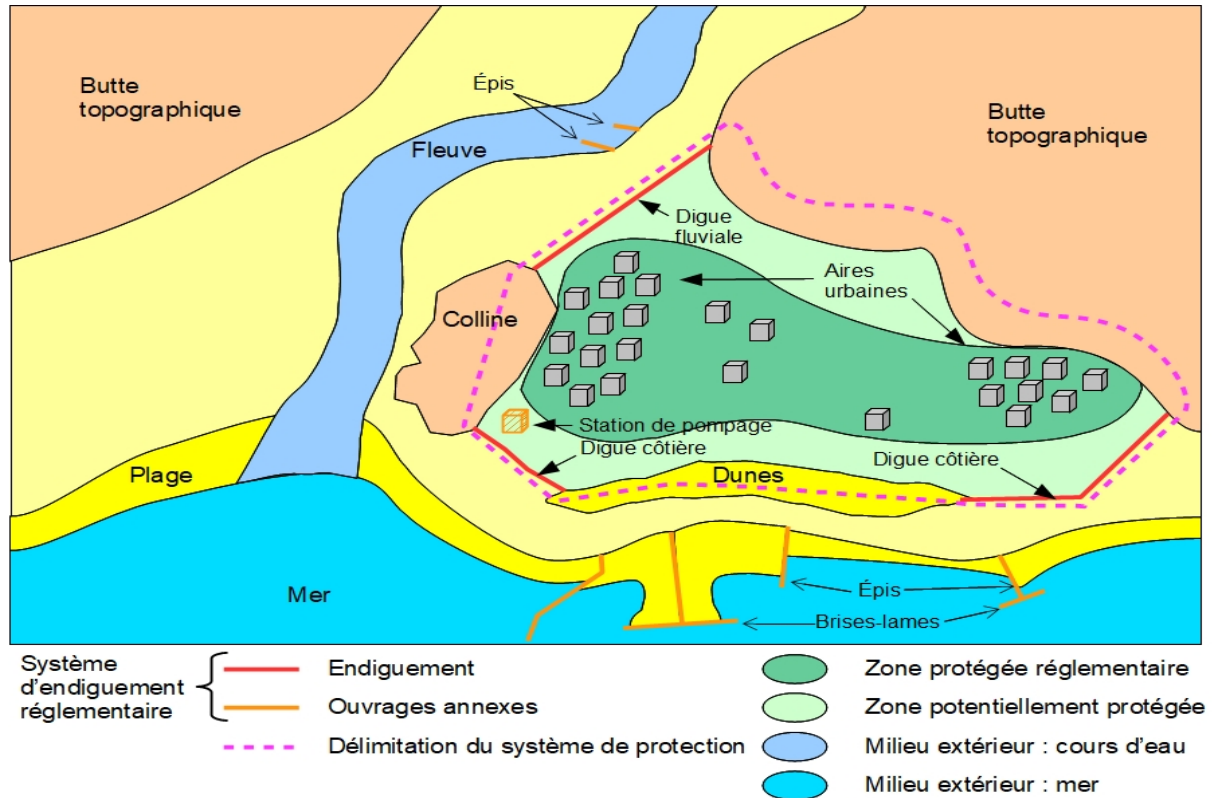


Figure 3: Notion de système d'endiguement, système de protection, zone protégée et milieux (Y. Deniaud, Cerema)

Cette étape est essentielle lorsque le tracé du système d'endiguement présente plusieurs alternatives. Il s'agit alors de définir les lignes de défense principales possibles, les éléments de protection secondaires, d'intégrer dans le périmètre d'études les ouvrages qui n'ont pas été *a priori* conçus comme des ouvrages hydrauliques (remblais, dispositifs de régulation des écoulements) et situés dans l'environnement du système de protection. La description finale du système de protection et du système d'endiguement ne pourra être arrêtée, et ce dernier évalué en termes de performance, qu'à l'issue des études, lorsque celles-ci auront permis au gestionnaire de choisir le dispositif en adéquation avec ses objectifs et ses capacités.

3.2.2 La recherche et l'analyse des connaissances existantes

Cette étape consiste à recenser les éléments de connaissance disponibles concernant le système d'endiguement étudié et son environnement et à en évaluer la pertinence technique pour l'analyse de risque et la rédaction de l'étude de dangers du système d'endiguement.

Le recensement des études et données existantes ne nécessite pas d'agrément particulier. Il peut ainsi être réalisé par toute personne compétente en préalable au démarrage de l'étude de dangers proprement dite.

3.2.2.1 Quelles sont les études thématiques à explorer ?

La réglementation en vigueur précise que la réalisation de l'étude de dangers doit s'appuyer notamment sur un diagnostic approfondi de l'état des ouvrages et prendre en compte le comportement des éléments naturels situés entre des tronçons de digues ou à l'extrémité d'une digue ou d'un ouvrage composant le système d'endiguement (article R. 214-116-III du code de l'environnement).

Les études thématiques à explorer dépendront donc de l'environnement dans lequel s'inscrit le système d'endiguement, mais elles couvriront *a minima* celles évoquées au paragraphe 3.1.2.

3.2.2.2 Comment mettre à disposition et ordonner les connaissances existantes ?

Le travail de recensement et d'analyse des connaissances existantes vise à maximiser la valorisation des données et informations déjà disponibles au profit des travaux de l'étude de dangers du système d'endiguement. La conclusion de ce travail devrait déboucher sur :

- Une documentation et une liste bibliographique la plus complète possible concernant les éléments de connaissance disponibles.

La recherche documentaire est à mener notamment auprès des services déconcentrés de l'État, des collectivités locales et de leurs syndicats, des organismes publics et des associations impliquées dans la gestion de l'eau et des milieux aquatiques, la prévision des crues ou les travaux d'aménagement hydrauliques. Elle peut être complétée par des recherches ciblées en archives. Elle constitue un moyen d'accéder aux principales études structurantes et d'identifier les documents et données de référence éventuellement mobilisables pour les besoins de l'étude de dangers (dossiers des ouvrages, études et dossiers de travaux sur les ouvrages existants, études hydrologiques et hydrauliques de portées régionales, étude de Plan de prévention des inondations, étude d'aménagement hydrauliques particulier, données topobathymétriques publiques, données hydrauliques...).

- Une synthèse documentaire et technique portant sur la pertinence des éléments recueillis, en vue de leur exploitation pour la production de l'étude de dangers et sur l'identification des lacunes à combler.

L'exploitation des informations disponibles dans le cadre de l'étude de dangers est à analyser au regard des incertitudes qu'elles sont susceptibles de propager dans les résultats de l'évaluation des performances du système d'endiguement. La synthèse documentaire et technique a ainsi pour finalité d'effectuer un tri dans les études et données recueillies pour identifier :

- les informations directement exploitables et l'ordre de grandeur de leurs incertitudes ;
- les informations qui sont devenues obsolètes ou dont la précision est susceptible de générer des incertitudes trop élevées sur l'évaluation des performances du système d'endiguement ;
- Les informations ou thématiques manquantes et qui seraient indispensables à la connaissance et la juste évaluation des performances du système d'endiguement.

3.2.3 L'appropriation des connaissances existantes et les investigations complémentaires

L'analyse critique des informations existantes et recensées pour la production de l'étude de dangers est une étape essentielle à l'appropriation de la connaissance disponible. Elle vise à asseoir la justification des performances du système d'endiguement sur des données pertinentes et fiables, et permet d'identifier au plus tôt les éventuelles investigations supplémentaires à conduire pour les besoins de l'étude de dangers. Cette analyse critique doit donc être produite par le bureau d'étude agréé en lien avec le gestionnaire du système d'endiguement, lequel à tout intérêt à s'y impliquer fortement en raison de ses répercussions sur le déroulement de l'étude et sur la définition des performances du système sur lesquels il devra s'engager.

Sur la base de cette analyse des données existantes, des objectifs du gestionnaire et des besoins indispensables à la réalisation de l'étude de dangers, l'organisme agréé peut juger nécessaire l'engagement d'investigations complémentaires afin de disposer des paramètres incontournables à la justification de l'analyse fonctionnelle du système d'endiguement et à l'estimation du risque d'inondation. Ces compléments porteront notamment sur tout ou partie des champs thématiques évoqués au paragraphe 3.1.2.

L'engagement conjoint du gestionnaire et du bureau d'étude agréé dans la définition et le contrôle de la qualité de réalisation des investigations complémentaires est un élément essentiel de leur bonne adéquation aux besoins identifiés et à un usage ultérieur des résultats dans la production de l'étude de dangers.

3.2.4 L'exploitation des données

Cette étape vise à utiliser les données précédemment collectées pour réaliser l'analyse fonctionnelle du système d'endiguement et celle de ses conditions de défaillance, évaluer et quantifier les risques d'inondation et justifier finalement de la performance du système d'endiguement en termes de niveau(x) de protection et de zone(s) protégée(s).

Le risque d'inondation associé à un système d'endiguement résulte d'un événement naturel (une crue, une tempête ou tout événement naturel d'origine hydraulique contre lequel le système a vocation à apporter une protection) éventuellement combiné à un événement technologique (la rupture ou la défaillance affectant un des ouvrages constituant le système d'endiguement). La mobilisation des données acquises se structure ainsi autour de la connaissance et de l'analyse approfondie des relations entre les trois termes du modèle conceptuel Source-Transfert-Cible appliqués à l'analyse du risque inondation (ILH 2013, figure 4) :

- le milieu naturel environnant à la source des sollicitations hydrauliques,
- le système de protection jouant le rôle d'interface par son comportement,
- et le milieu cible ou récepteur où se propagera l'inondation, et où in fine l'efficacité du système sera évaluée.

Elle prend également en considération les effets de l'organisation mise en place par le gestionnaire pour garantir et maintenir les performances du système d'endiguement.

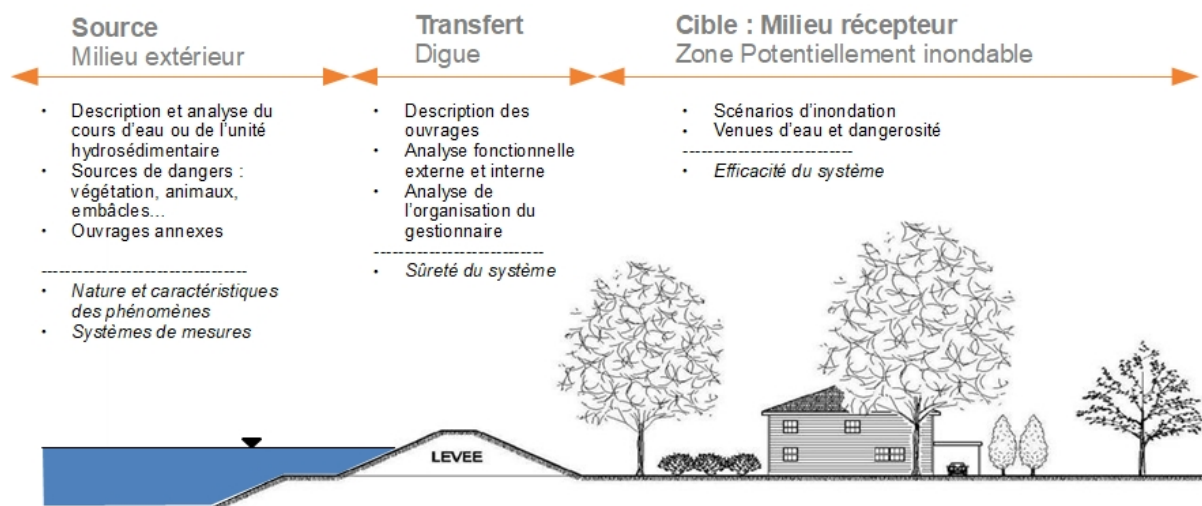


Figure 4: Utilisation du modèle source-transfert-cible appliqué aux études de dangers des systèmes d'endiguement (modifié d'après ILH, 2013)

3.2.4.1 La caractérisation des milieux environnants

La caractérisation des milieux environnants vise à déterminer leurs effets dans le processus d'inondation. Elle s'intéresse à chaque élément susceptible d'influer sur le risque d'inondation dans la zone potentiellement protégée. Elle porte ainsi notamment sur :

- le (ou les) cours d'eau ou l'unité hydrosédimentaire en maritime ;

Le système d'endiguement, objet de l'étude de dangers, est limité dans l'espace. Il s'insère dans un bassin versant ou une portion du littoral correspondant à une ou plusieurs cellules ou unités hydrosédimentaires identifiables dont le fonctionnement d'ensemble et les interactions avec le système d'endiguement influencent directement les processus d'inondation.

- les autres sources de dangers : végétation, animaux fouisseurs, séismes, karsts, précipitations, embâcles, débâcles de glace, avalanches, glissements de terrain...

Ces autres sources de dangers peuvent être des facteurs initiateurs ou aggravants des processus d'inondations.

- les ouvrages annexes occupant le corps des digues ou leur fondation, et n'ayant pas de fonction de protection contre les écoulements ou de régulation de ceux-ci, mais constituant des facteurs aggravants, tels que les réseaux divers, les bâtiments...

Digues et réseaux

Les digues sont désormais des ouvrages reconnus comme réseau et inscrits comme ouvrages sensibles pour la sécurité (article L562-8-1 du code de l'environnement). Tout travail ou intervention à proximité d'un système d'endiguement est donc soumis à une procédure de vérification de l'existence de digue auprès du guichet unique de l'Ineris et à une autorisation de son gestionnaire. Celui-ci peut s'opposer à une intervention ou exiger une proposition alternative n'impactant pas ses ouvrages si les travaux étaient jugés incompatibles avec la fonction de l'ouvrage ou s'ils étaient de nature à augmenter les charges d'exploitation.

Les données à mobiliser pour la caractérisation des milieux proviennent principalement des études ayant trait à :

- l'hydrologie (débits et lignes d'eau en domaine fluvial, niveaux marins et états de mer en domaine maritime) ;
- l'hydraulique (incluant les secteurs amont et aval ayant une influence locale en domaine fluvial et incluant l'ensemble de la cellule hydrosédimentaire représentative en domaine maritime) ;
- la morphodynamique (évolution topo-bathymétrique des fonds, des berges et des lits de rivière en domaine fluvial, évolution du système avant-plage, plages, dunes ou cordons bordiers et évolution des zones rétro-littorales en domaine maritime) ;
- la géologie (karst, glissement de terrains...) ;
- l'occupation des sols (faune, flore,..).

Ces études vont permettre de préciser à différentes échelles de temps et d'espace :

- la nature des phénomènes et événements naturels susceptibles de se produire ;
- l'intensité, la fréquence et les conditions d'évolution de ces événements ;
- les systèmes de mesures des phénomènes naturels existants et leur localisation ;
- les sollicitations induites susceptibles de s'exercer sur le système d'endiguement ;
- les mécanismes hydrauliques et les conditions de propagation des inondations dans la zone potentiellement inondable.

Un élément particulier mais essentiel de cette caractérisation des milieux est l'identification du point de mesure de référence au regard duquel pourra être défini le niveau de protection du système d'endiguement. C'est en ce lieu que devra être mesuré ou estimé le niveau des eaux ou le débit pour un système d'endiguement fluvial et le niveau marin pour un système d'endiguement marin. Le point de mesure et le système d'endiguement n'étant pas nécessairement proches, l'étude de dangers devra démontrer la pertinence de la référence choisie au regard de la zone exposée au risque d'inondation ou de submersion marine. La marge de sécurité prise sur le niveau de protection sera ainsi fonction de la précision et de la fiabilité des informations données par ce lieu de référence, ainsi que de l'éventuelle transformation du niveau des eaux ou du débit entre le lieu de référence et le système d'endiguement.

La recherche des événements passés ayant intéressé l'endiguement, la zone protégée ou leurs environs, est en général grandement utile pour appuyer la caractérisation des milieux.

3.2.4.2 La description du système de protection

La description du système de protection⁷ s'attache à présenter la nature, l'état et le mode de fonctionnement de l'ensemble des éléments naturels et des ouvrages concourant à la protection contre les inondations.

⁷ On rappelle que la notion de système de protection se distingue de celle de système d'endiguement par l'intégration d'éléments naturels, voir 3.2.1

Peuvent être distinguées :

- une ligne de défense principale ;
- éventuellement des éléments secondaires situés côté zone protégée qui assurent une protection contre les inondations en complément de l'action de la ligne de défense principale ou en influençant la propagation dans la zone protégée ;
- éventuellement des éléments de protection indirecte situés côté eau ayant pour effet de diminuer les sollicitations sur la ligne de défense principale.

La description du mode de fonctionnement des éléments et ouvrages contribuant au système d'endiguement s'effectue à deux niveaux d'échelle :

- les ouvrages fonctionnellement homogènes :
 - les digues,
 - les remblais linéaires ayant d'autres fonctions que la protection contre les inondations ou les submersions,
 - les tronçons particuliers, tels que les déversoirs, les bâtiments se substituant localement aux ouvrages de protection, les secteurs naturels...
 - les équipements tels que les batardeaux, les vannes,
 - les servitudes utiles pour le fonctionnement du système d'endiguement, telles que les pistes d'entretien et leurs voies d'accès ;
- les composants structurels des ouvrages fonctionnellement homogènes : corps de digues, organe de protection contre l'érosion, filtre, drain...

Le rôle de chaque ouvrage fonctionnellement homogène et de chaque composant structurel est à préciser. La description est généralement effectuée par la production de fiches descriptives par secteurs homogènes du système d'endiguement appuyées par des documents cartographiques de synthèse ou spécifiques à chaque secteur :

- plan général présentant les ouvrages et leurs fonctions ;
- profil en long de la ligne de défense principale comportant :
 - la cote de la crête, y compris des déversoirs ;
 - les batardeaux (base et crête) ;
 - le pied de digue côté zone protégée ;
 - les ouvrages de transparence ou de ressuyage ;
 - les lignes d'eau ou les niveaux marins provenant de l'étude des milieux environnants et caractéristiques du fonctionnement et de la performance de l'ouvrage ;
- profils en travers type pour chaque section homogène du système d'endiguement, identifiant la nature et la géométrie des différents composants structurels constitutifs ainsi que les sols de fondation et les points d'appui des structures, et se prolongeant au-delà du pied des ouvrages par la topographie de la zone protégée et la topo-bathymétrie du milieu eau adjacent (fluvial ou maritime) ; à défaut, les profils critiques (c'est-à-dire les profils les plus défavorables pour la performance) représentatifs d'une section considérée comme homogène ;

- coupes des éléments structurels particuliers ayant un rôle de protection ou de régulation de l'inondation : vannes, batardeaux, ouvrage de transparence...

Pour ces derniers, les conditions et moyens de gestion nécessaires à leur fonctionnement sont également à préciser : manœuvres, télécommande...

En revanche, les éléments occupant l'ouvrage, qui n'ont ni rôle de protection ni rôle de régulation, doivent de préférence être distingués du système de protection et être présentés dans le chapitre « 3.2.4.1 La caractérisation des milieux environnants ». Si toutefois le gestionnaire du système d'endiguement et son bureau d'étude agréé optent pour une présentation au sein du système d'endiguement, il importe que ces éléments soient bien identifiés comme source potentielle de désordres ou de contraintes pour l'exploitation de l'endiguement.

Origines possibles d'une défaillance hydraulique (source : *Référentiel technique digue maritimes et fluviales, 2015*) :

- *changement dans l'environnement du système d'endiguement (incision du lit, végétalisation du lit, ...)*
- *conception erronée (hypothèse de dimensionnement inappropriée, erreur de calcul, ...)*
- *dysfonctionnement d'un organe hydraulique (vanne non fermée, batardeau mal monté, ...)*
- *défaillance structurelle d'un tronçon à un stade suffisant pour entraîner la défaillance hydraulique.*

Modes d'endommagement et de rupture des digues en remblais généralement rencontrés :

- *érosion externe :*
 - *du talus côté eau et affouillement du pied de talus,*
 - *du talus côté zone protégée et de la crête (surverse) ;*
- *érosion interne :*
 - *érosion régressive,*
 - *érosion de conduit,*
 - *érosion de contact,*
 - *suffusion ;*
- *instabilité :*
 - *glissement superficiel,*
 - *glissement rotationnel ou translationnel,*
 - *tassement,*
 - *liquéfaction,*
 - *effondrement.*

3.2.4.3 La description et l'analyse de l'organisation du gestionnaire du système d'endiguement

Une analyse critique de l'organisation du gestionnaire est à mener dans le cadre de l'étude de dangers. Cette analyse vise à s'assurer de l'adéquation des modalités de gestion du système d'endiguement au regard des objectifs de protection qu'il doit remplir.

Ce travail critique présuppose une description précise du système de gestion de la sécurité mise en œuvre de façon concrète par le gestionnaire (description et analyse des procédures écrites, des moyens disponibles ou à mobiliser...). L'analyse de l'organisation du gestionnaire se nourrit généralement des documents et procédures internes mis en place par ce dernier. Cependant, cette analyse doit faire état de la situation réelle du gestionnaire. L'écueil à éviter est donc de présenter et d'analyser un système d'organisation théorique ne correspondant pas à la situation réelle du gestionnaire.

Il convient ainsi d'évaluer notamment :

- la capacité du gestionnaire à assurer en toutes circonstances la surveillance et l'entretien de l'ensemble des ouvrages du système d'endiguement placés sous sa garde (en incluant les ouvrages contributifs et les ouvrages annexes) ;
- la compatibilité des dispositions de gestion (surveillance, entretien, opérations en situation de crues) avec le fonctionnement attendu des ouvrages pour atteindre les objectifs de protection fixés (maintien du niveau de protection).

Un intérêt particulier est à porter :

- aux rôles des éventuelles autres entités impliquées, sous la responsabilité du gestionnaire, dans l'exploitation et la surveillance du système d'endiguement (par exemple un maître d'ouvrage de remblai routier inclus dans un système d'endiguement ou des services techniques communaux réalisant certaines interventions pour le compte du gestionnaire) ;
- aux servitudes et conventions nécessaires à la bonne exploitation des ouvrages du système d'endiguement sous la responsabilité du gestionnaire (notamment avec les maîtres d'ouvrages impliquées dans l'exploitation et la surveillance d'ouvrages contributifs du système d'endiguement) ;
- aux conditions de surveillance des éléments naturels (par exemples les cordons dunaires littoraux) dont le comportement est susceptible d'influencer les venues d'eau notamment dangereuses, à l'intérieur du système endigué ;
- aux situations de crises multiples mobilisant de manière simultanée les moyens du gestionnaire pour des actions différentes ;
- aux conditions d'alerte des autorités compétentes pour la gestion de crise en cas de fonctionnement anormal du système d'endiguement et d'événements susceptibles de générer des venues d'eau dangereuses.

Des guides peuvent être consultés pour de plus amples précisions sur les modalités et l'organisation à mettre en place pour une surveillance et un entretien adapté des systèmes d'endiguement :

- (a) Le « Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires – Surveillance, Entretien et diagnostic des Dignes de protection contre les inondations » (Cemagref éditions - 2001) dont l'ambition est de justifier et décrire l'ensemble des actions à entreprendre pour assurer sur le long terme la pérennité et la sécurité des ouvrages ;
- (b) Le référentiel technique « Dignes maritimes et fluviales » du ministère en charge de l'écologie, 2015, qui constitue une base technique commune pour les acteurs du domaine des digues de protection contre les inondations et les submersions ;

- (c) « Les ouvrages de protection contre les inondations » (CEPRI – 2017) qui propose un cadre méthodologique pour aider les collectivités à mettre en œuvre le volet prévention des inondations de la GEMAPI dont un chapitre traite de l'organisation de la gestion des ouvrages.

Les paragraphes suivants abordent les principaux éléments permettant d'évaluer la garantie apportée au maintien d'un haut niveau de sûreté des ouvrages et des systèmes d'endiguements par l'organisation du gestionnaire.

A/ Les moyens humains

Le gestionnaire doit disposer des moyens humains suffisants, que ce soit en termes d'effectifs mais également en termes de compétences, pour réaliser les différentes missions de surveillance et d'entretien, visant à garantir les performances du système d'endiguement.

Les effectifs pour réaliser la surveillance et l'entretien dépendent évidemment du type, du nombre et de la longueur des ouvrages, des conditions d'accès aux ouvrages concernés, etc. De façon générale, la surveillance routinière périodique n'est pas l'action qui mobilise le plus d'effectifs pour le gestionnaire. En effet, ces actions, généralement effectuées en binômes, peuvent être planifiées à long terme. En revanche, la surveillance en situation de crue nécessite une grande disponibilité et une forte réactivité du gestionnaire.

Lors de l'analyse de l'organisation du gestionnaire menée dans le cadre de l'EDD, il est recommandé de s'attacher à examiner particulièrement :

- la pertinence des protocoles au regard de la nature des ouvrages et des conditions de site ;
- l'adéquation entre les protocoles et les moyens susceptibles d'être mis en œuvre ;
- les conditions de mise en œuvre des moyens et protocoles décrits.

B/ Les compétences techniques du gestionnaire

Le gestionnaire se doit de disposer de connaissances sur le fonctionnement d'un ouvrage de protection, ses défaillances et les moyens de les prévenir et de les réparer. Le niveau de compétence et de connaissance de l'ouvrage est à adapter à la fonction de l'agent, à son rôle dans la structure du gestionnaire et à son positionnement hiérarchique. Les fonctions suivantes et leurs caractéristiques peuvent par exemple être identifiées :

- Les agents en charge de la surveillance et de l'entretien des ouvrages :
Ces agents ont une parfaite connaissance des ouvrages et notamment de leur état et de leur comportement au cours de l'année, des saisons et des événements. Ils sont sensibilisés aux mécanismes de dégradation des ouvrages hydrauliques et aux contraintes d'interventions du milieu, afin d'être en mesure de réaliser une surveillance et un entretien adaptés aux ouvrages et à leurs propres conditions de sécurité. Enfin, ils disposent des connaissances ou des consignes d'observation permettant de repérer les évolutions dégradant les performances des ouvrages, afin de les signaler dans les meilleurs délais à l'autorité décisionnaire de la gestion.
- Les agents en charge de l'ingénierie des travaux

Ces agents disposent de connaissances de base dans les différents domaines de l'ingénierie des ouvrages hydrauliques et ont une bonne maîtrise de la réglementation applicable à la sécurité des ouvrages hydrauliques et aux autres opérations soumises à la loi sur l'eau. Ils sont en mesure de déceler le caractère inquiétant d'une dégradation ou d'une évolution, afin de solliciter le cas échéant une expertise par un organisme compétent disposant des agréments nécessaires à la réalisation des études, travaux ou maîtrise d'œuvre de travaux intéressant la sécurité des ouvrages hydrauliques.

C/ Les moyens matériels pour réaliser la surveillance

Le gestionnaire doit disposer ou avoir accès à des moyens matériels suffisants et adaptés aux contextes des ouvrages et de leur environnement, en vue de la réalisation des différentes missions de surveillance en toutes circonstances du/des ouvrages et du milieu eau contre lequel le système protégé. L'adéquation des moyens doit ainsi pouvoir s'apprécier au regard :

- des règles de l'art de la surveillance applicable aux différents types d'ouvrages, d'organes et de milieux ;
- des conditions d'emploi des matériels mobilisés ;
- des conditions de réalisation des missions présentées dans les documents d'organisation du gestionnaire.

D/ Les travaux d'entretien

Les travaux d'entretien sont à adapter à la nature des ouvrages et des organes, notamment mobiles, et à réaliser régulièrement. À titre d'exemple, il est préférable que la végétation sur un talus en remblai soit entretenue pour être rase, afin notamment de permettre une surveillance pertinente et d'éviter le développement d'un habitat favorable à la venue et l'installation d'animaux fouisseurs. De même, si l'ouvrage comporte des organes de manœuvre (vannes...), les mécanismes doivent être graissés régulièrement et non corrodés.

Il est généralement souhaitable que le gestionnaire dispose du matériel adéquat et du personnel en nombre suffisant pour satisfaire aux opérations d'entretien les plus courantes. Le recours à un prestataire externe peut cependant être envisagé pour tout ou partie des entretiens. Il reste toutefois de la responsabilité du gestionnaire de s'assurer que ces derniers sont :

- réalisés dans des délais et selon des modalités compatibles avec la non-dégradation et la non-détérioration des ouvrages ;
- effectués en conformité avec les règles de l'art pour la sécurité des ouvrages ;
- prévus et décrits dans leurs principes dans le document décrivant l'organisation du gestionnaire ;
- reportés dans le registre de la digue et décrits de manière synthétique dans le rapport de surveillance.

E/ La gestion de crise et les situations d'urgence

Les conditions de la gestion des ouvrages en période de crise et de la gestion des situations d'urgence sont des éléments essentiels de l'organisation du gestionnaire pour garantir la sécurité. Les moyens humains et matériels mobilisables par le gestionnaire en situation d'urgence ainsi que leurs conditions d'emploi doivent donc faire l'objet d'une attention particulière. La description du traitement des situations d'urgence doit notamment s'accorder avec les conditions réelles d'intervention susceptibles de se produire. L'analyse de l'organisation du gestionnaire doit ainsi s'attacher notamment à vérifier, pour chaque intervention d'urgence identifiée, de l'adéquation des conditions :

- de mobilisation des moyens humains et matériels (ressources disponibles mobilisables car non affectées à d'autres tâches de la gestion de crise, délais d'intervention...)

Durant la période de crue ou de tempête, une surveillance attentive et très rapprochée des ouvrages est à réaliser, incluant le cas échéant une surveillance de nuit. Il est ainsi essentiel que la stratégie et l'organisation de la surveillance en situation de crue aient rigoureusement été mises au point et formalisées. Il est recommandé que celle-ci soit effectuée par des équipes constituées d'au moins deux agents encadrés par un agent participant généralement à la surveillance régulière et disposant ainsi d'une bonne connaissance des ouvrages à inspecter et de leur fonctionnement.

- d'emploi des moyens eu égard aux conditions de site et de sécurité, tant pour les moyens à mettre en œuvre que pour le comportement des ouvrages nécessitant ces interventions d'urgences.
- d'information et de sollicitation des différentes parties prenantes lorsque la situation le nécessite.

Le gestionnaire doit avoir identifié les acteurs à contacter (services de l'État, autorités locales...) et avoir défini les modalités de leur information (nature, forme et conditions de diffusion des bulletins d'alerte sur les performances de son système d'endiguement c'est-à-dire sur le comportement constaté et attendu de ce dernier en fonction des conditions et prévisions hydro-météorologiques). Des relations entretenues avant les situations de crise, par exemple au travers de rencontres périodiques, d'exercices préparatoires où est notamment testée la cohérence des documents d'organisation des différents acteurs, sont des démarches qui ne peuvent que limiter les risques de dysfonctionnement lorsque la crise survient.

3.2.4.4 L'analyse fonctionnelle et l'analyse des défaillances du système de protection et d'endiguement

L'analyse fonctionnelle a pour objet la caractérisation du fonctionnement du système de protection (et donc du système d'endiguement) à partir d'une décomposition en différents systèmes et sous-systèmes autonomes dont les interactions sont décrites à des échelles différentes mais pertinentes pour chaque élément particulier identifié. Le fonctionnement du système de protection doit d'abord être analysé au regard des interactions physiques (milieux extérieurs : milieux eau, zones protégées) et des contraintes exogènes (réglementation, état de l'art, usages secondaires...) que lui impose les conditions de son environnement ; et compte tenu des éléments qui lui sont constitutifs (les digues et autres ouvrages et leurs composants, les éventuels

éléments naturels). Sa caractérisation s'effectue au travers de l'identification de l'ensemble des relations fonctionnelles qui prennent place à l'extérieur du système de protection (entre le système de protection et les éléments de son environnement) et à l'intérieur du système de protection (entre ses éléments et entre leurs composants, compte tenu des relations fonctionnelles externes précédemment identifiées).

L'analyse fonctionnelle consiste donc d'abord en une analyse fonctionnelle externe, identifiant l'ensemble des fonctions principales et des contraintes pesant sur le système de protection (contraintes imposées notamment par les conditions environnementales et le contexte réglementaire).

Exemples de fonctions externes :

- *protéger un territoire des inondations venant d'un cours d'eau ou de submersion par la mer ;*
- *empêcher la divagation du lit d'un cours d'eau ;*
- *favoriser la navigation sur un cours d'eau ;*
- *fixer le trait de cote ;*
- *assèchement d'une zone marécageuse.*

Elle consiste ensuite en une analyse fonctionnelle interne, identifiant l'ensemble des fonctions techniques hydrauliques (traduisant le fonctionnement hydraulique des éléments du système et son niveau de protection apparent) et structurelles (traduisant le fonctionnement structurel des composants du système) du système de protection, ces fonctions techniques permettent la réalisation des fonctions principales du système en répondant aux contraintes externes qui s'imposent à lui.

L'analyse des fonctions techniques permet de définir le fonctionnement nominal du système de protection.

Exemple d'analyse fonctionnelle externe :

- le système d'endiguement est composé :
 - des tronçons de digues A et B dont la crête est calée à fonction + X de la crue de débit Q
 - d'un déversoir empêchant l'inondation de la zone protégée jusqu'à la crue de débit Q' et contrôlant l'inondation dans la zone protégée jusqu'à la crue de débit Q ;
 - d'un passage à batardeau empêchant l'entrée d'eau dans la zone protégée jusqu'à la crue de débit Q_{ouv} lorsque le passage est libre et jusqu'à la crue de débit Q_{fer} lorsque le batardeau est installé.

Exemple d'analyse fonctionnelle interne :

- le tronçon A est composé :
 - d'un corps de digue en remblai homogène dont les fonctions sont la stabilité mécanique, l'étanchéité et l'auto-filtration ;
 - d'un perré en béton dont les fonctions sont la résistance à l'érosion externe et la résistance aux agressions externes intrusives ;
 - d'une fondation dans un sol imperméable dont les fonctions sont les mêmes que celles du corps de digue.

Le référentiel technique « Digues maritimes et fluviales » (2015) apporte des précisions sur les diverses fonctions et sur la typologie des ouvrages hydrauliques.

L'analyse fonctionnelle constitue la base sur laquelle est ensuite construite l'analyse des défaillances du système de protection. Une cohérence totale doit donc exister entre l'analyse fonctionnelle et l'analyse des défaillances. L'analyse fonctionnelle ne doit pas se limiter à une simple description du système et de ses composants, mais doit constituer une analyse structurée de l'ensemble considéré, défini par ses caractéristiques propres, avec un formalisme facilitant le passage à l'étape d'analyse des défaillances. Chaque analyse fonctionnelle est donc spécifique au système étudié.

L'objectif de l'analyse des défaillances du système de protection (et donc du système d'endiguement) est d'étudier les possibilités de défaillance des fonctions techniques hydrauliques des éléments qui composent le système de protection. Elle comprend l'étude de la défaillance structurelle des composants qui constituent les éléments du système. Cette analyse doit ainsi aboutir à l'identification et à la description des différents scénarios de défaillance envisageables à l'échelle :

- du système de protection : les scénarios d'inondations pouvant résulter de scénarios de défaillances hydrauliques des éléments du système ;
- des différents tronçons de digues ou autres ouvrages et éléments naturels (par exemple des cordons dunaires littoraux) qui constituent le système de protection : les scénarios de brèches pouvant résulter de scénarios de défaillances structurelles affectant chacun des composants les constituant.

3.2.5 L'estimation de la performance du système d'endiguement

La définition du système d'endiguement, de la (des) zone(s) protégée(s) et du (des) niveau(x) de protection associé(s) ne peut s'effectuer qu'à l'issue de l'analyse de risque à partir notamment de la probabilité des scénarios de défaillance, de l'intensité et de la cinétique d'inondation et de la gravité des conséquences. C'est en effet sur la base de ces éléments, que le gestionnaire peut définir les performances et donc arrêter définitivement le périmètre final du système d'endiguement, son(ses) niveau(x) de protection et la(les) zone(s) protégée(s). Cette décision est le fruit d'une réflexion du gestionnaire du système d'endiguement menée avec l'appui de son bureau d'étude agréé.

L'estimation de la performance du système d'endiguement s'appuie sur :

- une estimation de la sûreté de fonctionnement des ouvrages composant le système d'endiguement, au regard de l'analyse des mécanismes de défaillance susceptible de les affecter ;
- une estimation de l'efficacité du système d'endiguement appréhendée au moyen de la dangerosité des venues d'eau pour différents scénarios d'événements dont certains sont susceptibles d'affecter la zone protégée.

3.2.5.1 Estimation de la sûreté du système d'endiguement : niveau de sûreté et niveau de danger des ouvrages

L'analyse des mécanismes de défaillance du système d'endiguement permet de déterminer les caractéristiques fonctionnelles hydrauliques et structurelles du système d'endiguement et sert de base à l'estimation de la probabilité des scénarios de défaillances susceptibles de l'affecter. Elle est la base du choix des scénarios d'événements à étudier pour appréhender l'efficacité du système d'endiguement par la cartographie des venues d'eau dangereuses, conformément au chapitre 8 de l'annexe 1 de l'arrêté du 7 avril 2017.

L'estimation de la probabilité des scénarios de défaillance s'effectue nécessairement par tronçons homogènes ou ouvrages du système d'endiguement. Elle s'appuie sur un panel d'événements choisis entre le début de sollicitation du tronçon considéré et un événement pour lequel le risque de rupture peut être qualifié de très probable (niveau de danger pour l'ouvrage). À chaque scénario de défaillance ou aléa de rupture d'un tronçon singulier homogène ou d'un ouvrage du système d'endiguement, l'organisme agréé en charge de l'étude de danger affecte une estimation de probabilité d'occurrence (cf tableau 1 encart ci-après) dont la valeur est à argumenter techniquement sur la base d'une méthode explicite (modèles mathématiques, physiques ou empirique, méthode à base d'indicateurs, analyses expertes) dont les choix et hypothèses sont clairement présentés.

Le niveau de sûreté, respectivement le niveau de danger du système d'endiguement est le plus faible des niveaux de sûreté, respectivement des niveaux de dangers, de tous les tronçons ou ouvrages composant le système d'endiguement.

Exemple de présentation en tableau des estimations de la probabilité des scénarios de défaillances d'un système d'endiguement

	Mécanisme 1	Mécanisme 2	Mécanisme 3	Mécanisme 4	
Crue 1	$Al_{conditionnel}(m1, c1)$	$Al_{conditionnel}(m2, c1)$	$Al_{conditionnel}(m3, c1)$	$Al_{conditionnel}(m4, c1)$	$Al_{rupture}(c1)$
Crue 2	$Al_{conditionnel}(m1, c2)$	$Al_{conditionnel}(m2, c2)$	$Al_{conditionnel}(m3, c2)$	$Al_{conditionnel}(m4, c2)$	$Al_{rupture}(c2)$
Crue 3	$Al_{conditionnel}(m1, c3)$	$Al_{conditionnel}(m2, c3)$	$Al_{conditionnel}(m3, c3)$	$Al_{conditionnel}(m4, c3)$	$Al_{rupture}(c3)$
Crue 4	$Al_{conditionnel}(m1, c4)$	$Al_{conditionnel}(m2, c4)$	$Al_{conditionnel}(m3, c4)$	$Al_{conditionnel}(m4, c4)$	$Al_{rupture}(c4)$
	$Al_{rupture}(m1)$	$Al_{rupture}(m2)$	$Al_{rupture}(m3)$	$Al_{rupture}(m4)$	$Al_{rupture}(tronçon)$

Tableau 1: Principe d'agrégation de l'aléa de rupture pour un tronçon de digue (référentiel technique digues maritimes et fluviales, 2015).

Dans ce tableau, sont présentées les probabilités conditionnelles de défaillance d'un tronçon pour chacun des 4 mécanismes (m1 à m4) soumis à 4 conditions de crues (c1 à c4). Les valeurs agrégées de rupture par mécanisme ou par crue correspondent à la probabilité la plus forte identifiant les conditions d'aléa les plus probables.

Ce tableau permet de :

- justifier le niveau de sûreté du tronçon considéré : crue « c » pour laquelle l'aléa de rupture agrégé ($Al_{rupture}(\ll c \gg)$) est inférieur à une certaine valeur fixée par le maître d'ouvrage. La lecture se fait dans la colonne de droite ;
- justifier le niveau de danger du tronçon considéré : crue « c » pour laquelle l'aléa de rupture agrégé ($Al_{rupture}(\ll c \gg)$) devient très probable, par exemple de l'ordre de 50 %. La lecture se fait également dans la colonne de droite ;
- quantifier la sensibilité d'un tronçon aux différents mécanismes envisagés ($Al_{rupture}(\ll m \gg)$) mettant ainsi en évidence les mécanismes de défaillance pour lesquels des mesures de confortement pourraient être mises en œuvre en priorité. La lecture se fait dans la dernière ligne ;
- comparer la sûreté des différents tronçons entre eux à l'aide du terme $Al_{rupture}(tronçon)$ et de pouvoir prioriser les tronçons à surveiller ou éventuellement conforter.

3.2.5.2 Estimation de l'efficacité du système d'endiguement : niveau de protection et niveau de sécurité

Deux niveaux traduisent l'efficacité d'un système d'endiguement vis-à-vis des venues d'eau et de leur dangerosité :

- le niveau de protection pour lequel est garantie une absence d'eau dans la zone protégée pour le(s) type(s) d'événement(s) pour lesquels le système est conçu ;
- le niveau de sécurité ou d'alerte à partir duquel la sécurité des populations est susceptible d'être compromise par des venues d'eau potentiellement dangereuses, et déterminé pour chacun des scénarios d'inondation étudié.

A/ Caractérisation du niveau de protection

La caractérisation du niveau de protection s'appuie sur la démonstration de la très faible probabilité d'une entrée d'eau dans la zone protégée pour ce niveau d'aléa et en raison de la présence du système d'endiguement.

Dans un premier temps, le scénario de dépassement hydraulique (contournement ou surverse) du système d'endiguement est étudié. Les éventuels contournements du système d'endiguement sont identifiés et la ligne de crête du système d'endiguement est comparée avec les lignes d'eau des crues ou les niveaux marins des tempêtes caractéristiques, en considérant une marge de sécurité pour tenir compte des incertitudes, tant sur la topographie de l'ouvrage que sur les modélisations hydrauliques. Le phénomène naturel maximal contenu ou géré par le système en l'absence de brèche, donc indépendamment du niveau de sûreté du système d'endiguement, est alors évalué. Il est exprimé en débit de crue ou niveau d'eau ou niveau marin, potentiellement associé à un temps de retour (ou une fréquence annuelle de dépassement) et dénommé « niveau de protection apparent ».

Dans un second temps, le niveau de protection est arrêté en retenant un phénomène naturel d'intensité et de période de retour inférieure à celle du niveau de protection apparent et à celle du niveau de sûreté, soit :

Niveau de protection \leq Niveau de protection apparent

Niveau de protection \leq Niveau de sûreté

Par construction, le risque résiduel de rupture lors d'un phénomène naturel correspondant au niveau de protection sera alors nécessairement inférieur à celui déterminé pour le niveau de sûreté par le gestionnaire du système d'endiguement. L'annexe 1 de l'arrêté du 7 avril 2017 précise concernant le niveau de protection que : « (...) *cette montée maximale du niveau de l'eau peut générer un **risque résiduel de rupture d'ouvrage de 5 % au plus*** ». En fixant le niveau de sûreté à un événement pour lequel l'étude de dangers démontre que le risque de rupture est de moins de 5 %, il sera ainsi démontré que pour le niveau de protection, qui lui est inférieur, le risque résiduel de rupture est également inférieur à 5 %.

La définition finale du système d'endiguement est nécessairement liée au choix du niveau de protection et du périmètre des zones protégées. Il découle notamment :

- de la performance intrinsèque de tous les composants du système d'endiguement (digues et ouvrages assimilés, dispositifs de régulation des écoulements hydrauliques tels que vannes et stations de pompage) évaluée par un diagnostic approfondi. C'est en effet la performance de la section fonctionnelle la plus faible qui conditionne la performance de l'ensemble du système d'endiguement ;
- des capacités du gestionnaire à exploiter ces ouvrages, soit de :
 - maintenir dans le temps les performances du système d'endiguement ;
 - anticiper les événements hydrométéorologiques et savoir estimer leurs puissances au droit du système d'endiguement et des éventuels aménagements hydrauliques ;
 - surveiller le comportement du système d'endiguement soumis aux sollicitations particulières durant ces épisodes et éventuellement diligenter les interventions nécessaires pour empêcher ou retarder sa défaillance ;

- alerter les autorités en cas de potentialité de dépassement du niveau de protection ou en cas de défaillance du système d'endiguement.

Naturellement, la détermination et le choix du niveau de protection sont également influencés par les enjeux présents dans la zone protégée. Plus ces enjeux seront importants (systèmes d'endiguement de classe A ou B par exemple), plus les sources d'incertitudes devront être réduites et les marges de sécurité affinées afin d'assurer la sécurité des populations sans conduire à des évacuations préventives fréquentes de la zone protégée. La répétition de ces mises en sécurité en raison d'événements finalement sans venues d'eau majeures et dangereuses est en effet néfaste tant pour l'activité du territoire que pour la bonne appréhension du risque par les populations.

B/ Caractérisation des niveaux de sécurité ou d'alerte

La caractérisation des niveaux de sécurité ou d'alerte, à partir desquels la sécurité des populations est susceptible d'être compromise, repose sur la cartographie des venues d'eau potentiellement dangereuses telle qu'elle est prévue au chapitre 10.2 de l'arrêté du 7 avril 2017.

Les estimations de la dangerosité des venues d'eau et la caractérisation des niveaux de sécurité ou d'alerte peuvent être menées lorsque :

- la sûreté du système a été étudiée et s'est traduite par l'estimation de la probabilité de rupture de chaque tronçon pour le panel des aléas étudiés (voir chapitre 3.2.5.1) ;
- l'analyse des possibilités de contournement ou de débordement a été menée (voir chapitre 3.2.5.2.A) et s'est traduite par l'estimation du niveau de protection apparent ;
- le niveau de protection a été déterminé.

La caractérisation de la dangerosité des venues d'eau et la caractérisation des niveaux de sécurité ou d'alerte s'effectuent alors selon les étapes suivantes :

- ***Le choix et la modélisation des scénarios d'inondation***

L'article R214-116-III du code de l'environnement précise que l'étude de dangers « *indique les dangers encourus par les personnes en cas de crues ou submersions dépassant le niveau de protection assuré ainsi que les moyens du gestionnaire pour anticiper ces événements et, lorsque ceux-ci surviennent, alerter les autorités compétentes pour intervenir et les informer pour contribuer à l'efficacité de leur intervention* ». Le gestionnaire du système d'endiguement et son bureau d'étude agréé doivent donc sélectionner les scénarios d'inondation ayant un intérêt pour :

- la connaissance de la zone potentiellement inondable ;
- la définition précise de la zone protégée ;
- la définition des zones de venues d'eau potentiellement dangereuses et des seuils associés à l'alerte des autorités compétentes pour la mise en sécurité des populations en cas d'événements affectant le système d'endiguement ou dépassant ses capacités de performance.

Généralement ces études d'inondations sont faites à l'aide de modélisation. Nous invitons le lecteur à se reporter au chapitre 3.3.2.

Le chapitre 8 de l'annexe 1 de l'arrêté du 7 avril 2017 indique que les études sont effectuées pour une gamme d'aléas représentatifs des crues et des tempêtes susceptibles d'affecter les territoires relevant de la responsabilité du gestionnaire du système d'endiguement. Ces études doivent porter sur les scénarios (S1 à S3), auquel s'ajoute un quatrième scénario (S4) en l'existence d'un Plan de Prévention des Risques naturels Inondation ou Submersion :

- S1 : fonctionnement nominal correspondant au niveau de protection ;
- S2 : défaillance fonctionnelle du système d'endiguement ;
- S3 : défaillance structurelle du système d'endiguement ;
- S4 : aléa de référence du plan de prévention des risques naturels.

Le tableau suivant rappelle pour les scénarios considérés la qualification du niveau d'eau mesuré au lieu de référence, tel que le demande l'article 11 de l'arrêté du 7 avril 2017, la nature de l'éventuelle défaillance et l'amplitude du risque résiduel de rupture de l'ouvrage pour le scénario considéré.

Scénarios	Niveau de l'eau au lieu de référence	Défaillance	Risque résiduel de rupture
S1	Niveau de protection	Non	Choix du maître d'ouvrage dans la limite maximale de 5 %
S2	Niveau de protection	Fonctionnelle uniquement (dispositif de régulation)	
S3	Niveau de danger	Structurelle (brèche)	De l'ordre de 50 %
S4	Aléa de référence du PPRI(L)	Seulement si l'aléa de référence du PPRI(L) > Niveau de protection	À déterminer par le bureau d'étude

Le scénario S1 permet de montrer l'efficacité et les limites géographiques de la protection dans les hypothèses optimales d'un fonctionnement sans défaillance du système d'endiguement et d'un événement naturel correspondant à la définition du niveau de protection. Une cartographie des venues d'eau dangereuses possibles sur le territoire du gestionnaire, en dehors de la zone protégée, est à produire.

Hormis le cas simple d'un endiguement continu se refermant sur le versant, ce scénario est notamment instructif :

- lorsqu'une partie des ouvrages susceptibles d'apporter une protection n'a pas été retenue dans le système d'endiguement, mais dont les effets sur les écoulements doivent néanmoins être appréhendés ;
- lorsque le système d'endiguement est ouvert et qu'une inondation généralement par remous est possible à partir d'une certaine intensité de crue ;
- lorsque le système comporte un ou plusieurs déversoirs et qu'il s'avère donc nécessaire d'étudier l'inondation induite par le fonctionnement normal de cet ou ces ouvrages ;

- lorsque les effets hydrauliques induits dépassent les limites administratives de l'autorité compétente⁸ ;
- pour une comparaison avec l'inondation en l'absence de système d'endiguement, ce qui implique alors la simulation d'une crue équivalente au niveau de protection dans le cadre d'un scénario sans endiguement ;
- lorsque la zone protégée est partitionnée et comporte plusieurs niveaux de protection. Dans ce dernier cas, une cartographie des venues d'eau potentiellement dangereuses est à produire pour chaque événement naturel définissant un niveau de protection, ce qui conduira à simuler autant de scénario de type S1 qu'il y a de niveaux de protection.

Les scénarios S2 et S3 posent au préalable la question du choix des défaillances à simuler. Ces choix doivent être justifiés sur la base :

- de la probabilité de survenue des défaillances considérées ;
- des éventuelles capacités du gestionnaire à intervenir rapidement pour empêcher ou retarder la rupture complète, voire mettre fin à la défaillance constatée (scénario S2) ;
- de la dangerosité pressentie des venues d'eau induites.

Le **scénario S2** traite des défaillances des dispositifs de régulation des écoulements (batardeaux, vannes, stations de pompage...) en l'absence de défaillance structurelle des ouvrages. La sollicitation à considérer est celle du niveau de protection. Plusieurs simulations peuvent être nécessaires, en fonction de la complexité et des dispositifs de régulation intervenant dans le fonctionnement normal du système d'endiguement, afin de caractériser les venues d'eau dangereuses induites par les comportements anormaux de ces dispositifs.

Le **scénario S3** s'attache aux défaillances structurelles des ouvrages composant le système d'endiguement. Les sollicitations à considérer correspondent a minima à celles du niveau de danger des ouvrages afin de caractériser un aléa élevé de rupture du système d'endiguement d'une probabilité d'au moins 50 %. En raison de la complexité du système de protection et des caractéristiques de propagation des écoulements dans la zone potentiellement protégée, plusieurs simulations peuvent s'avérer nécessaires pour caractériser les venues d'eau dangereuses provenant des défaillances des différents ouvrages composant le système d'endiguement. Un ouvrage de grande longueur ou de structure complexe peut également nécessiter la réalisation de plusieurs simulations de défaillance.

Le scénario S4 peut être voisin des scénarios S1 ou S3. En effet, le niveau de sollicitation étant prédéterminé par le PPRN :

⁸ Par principe, la zone protégée est nécessairement comprise dans l'aire administrative de compétence du gestionnaire du système d'endiguement. Cependant, la cartographie peut montrer des effets hydrauliques induit par le système d'endiguement au-delà de la limite administrative.

- soit le niveau de protection choisi est plus faible que l'événement retenu pour le PPRN, alors la rupture de l'endiguement est à considérer et une modélisation S4 se justifie si elle diffère sensiblement de celle faite pour le scénario S3 ;
 - soit le niveau de protection choisi est supérieur à l'événement retenu pour le PPRN, alors l'endiguement est considéré sûr (probabilité de rupture < 5%) et une modélisation supplémentaire ne devrait pas apporter plus d'enseignements que ceux qui sont tirés du scénario S1.
- **L'évaluation de la dangerosité des venues d'eau des différents scénarios d'inondation**

L'arrêté du 7 avril 2017 demande d'évaluer la dangerosité des venues d'eau dans et en dehors de la zone protégée, a minima pour les scénarios d'inondation relevant du chapitre 8 de son annexe 1.

Cette dangerosité peut se caractériser de différentes manières. L'arrêté précité précise les seuils de hauteur d'eau et de courant réputés dangereux⁹. Les seuils définissant les venues d'eau particulièrement dangereuses sont cependant laissés à l'appréciation du gestionnaire et de du bureau d'étude.

La cinétique de l'inondation peut également être une information intéressante, notamment lorsque la zone protégée est vaste ou que le système est composé de plusieurs barrières. Elle se traduit en temps d'arrivée de l'eau, soit au droit des enjeux pré-identifiés (information discrète), soit par des isochrones (information globale), le temps étant généralement calculé entre l'ouverture de la brèche et l'atteinte d'un certain niveau d'eau, voire de plusieurs niveaux d'eau ce qui permet d'apprécier la vitesse de montée des eaux.

Pour des petites zones protégées, si le commanditaire s'intéresse à la cinétique d'inondation, ce sera sous l'angle « vitesse de montée des eaux » dont l'information est utile pour la gestion de la crise.

La dangerosité pourra ainsi être traduite par le croisement de classes définies par des valeurs seuils de plusieurs paramètres dont la hauteur d'eau et la vitesse du courant. Les seuils retenus devront être argumentés et pourront être présentés dans une matrice expliquant le croisement des paramètres.

La dangerosité sera illustrée par des cartes représentant les limites administratives du territoire de compétence du gestionnaire du système d'endiguement et les limites de la zone protégée. Ces cartes représenteront l'intensité de l'inondation selon un code couleur approprié suivant les prescriptions de chapitre 10.2 de l'annexe 1 de l'arrêté du 7 avril 2017.

- **la caractérisation de niveaux de sécurité ou d'alerte**

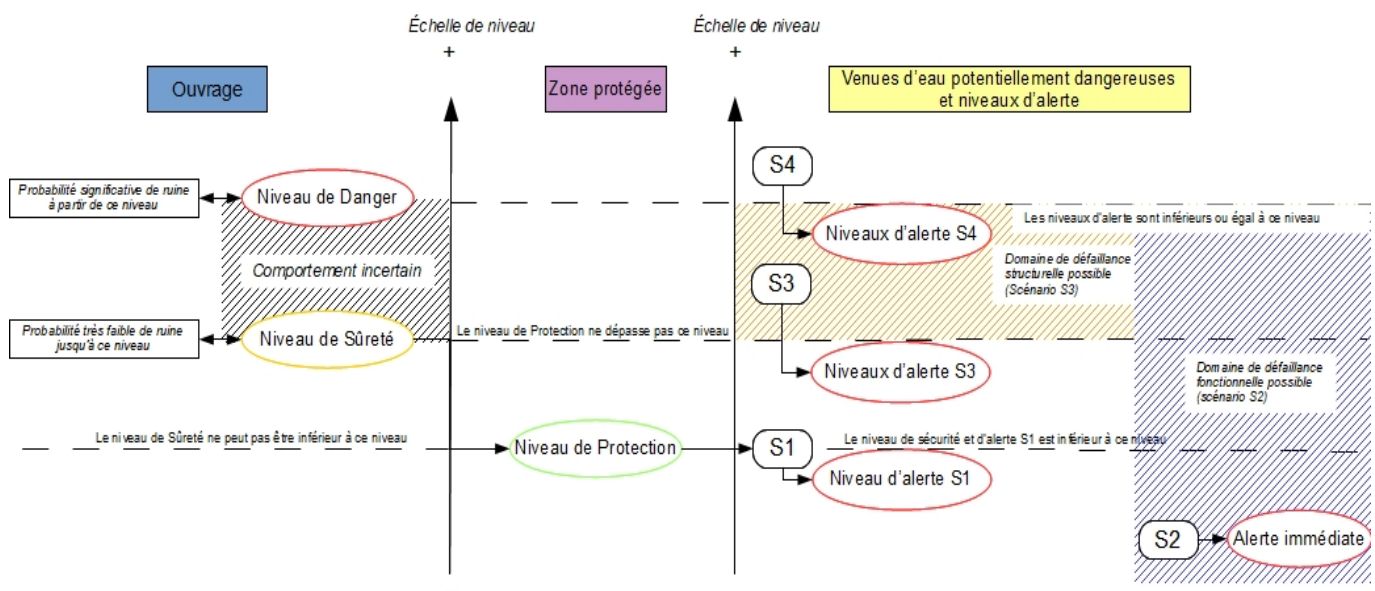
L'article R214-116-III du code de l'environnement précise que l'étude de dangers « *indique les dangers encourus par les personnes en cas de crues ou submersions dépassant le niveau de protection assuré ainsi que les moyens du gestionnaire pour anticiper ces*

⁹ Arrêté du 7 avril 2017, chapitres 10,2 de l'annexe 1 et 4,2 de l'annexe 2 : « *sont réputées dangereuses les venues d'eau telles que la hauteur atteint au moins 1 m ou le courant au moins 0,5 m/s* »

événements et, lorsque ceux-ci surviennent, alerter les autorités compétentes pour intervenir et les informer pour contribuer à l'efficacité de leur intervention ».

Les cartographies des venues d'eau dangereuses réalisées dans et en dehors de la zone protégée, sur le territoire de compétence du gestionnaire et pour les différents scénarios d'inondation étudiés, permettent de caractériser les dangers encourus par les personnes en cas de crues ou de submersions. Des niveaux de sécurité ou d'alerte peuvent ainsi être définis pour chacun des scénarios caractérisés afin de prévenir les populations et les autorités de l'imminence du danger. Comme le niveau de protection, ces niveaux sont exprimés en fonction des caractéristiques des phénomènes naturels (niveau d'eau, débits...). Ils peuvent être abaissés pour tenir compte d'un éventuel délai de prévenance ou de mise en œuvre des secours, déterminé en accord avec les autorités compétentes pour la gestion des secours aux populations.

La figure 5 ci-dessous présente un schéma général des différents niveaux dont la détermination est utile aux études de dangers des systèmes d'endiguement.



- NB :**
- Le niveau de Protection est nécessairement inférieur ou égal au niveau de Sûreté
 - Le niveau d'alerte du scénario S1 (fonctionnement nominal) est inférieur ou égal au niveau de protection
 - L'alerte du scénario S2 (défaillance fonctionnelle) doit être immédiate
 - Le niveau d'alerte du scénario S3 (défaillance structurelle) est inférieur ou égal au niveau de sûreté (défaillance structurelle possible)
 - Le niveau d'alerte du scénario S4 (aléa maximal) est inférieur ou égal au niveau de danger (défaillance structurelle quasi-certaine)

Figure 5: Schéma général des différents niveaux utiles aux études de dangers des systèmes d'endiguement

(Y. Deniaud, Cerema)

3.3 Des outils à utiliser de manière proportionnée

3.3.1 Les données et les analyses topographiques

Les données topographiques sont des données incontournables. Elles ont pour objectif principal de connaître la géométrie du périmètre d'étude, lequel peut se découper en deux parties :

- les ouvrages composant le système d'endiguement ;
- l'environnement du système d'endiguement qui lui-même peut être subdivisé en milieu eau et zone protégée.

3.3.1.1 Topographie des ouvrages composant le système d'endiguement

Il importe de connaître la géométrie précise du système d'endiguement. Les données utiles sont :

- le profil en long de la crête de digue afin de le comparer avec les lignes d'eau issues de l'étude hydraulique et d'évaluer l'aléa de surverse ;
- les profils en long des pieds de digues afin de les comparer avec les lignes d'eau et d'évaluer la charge hydraulique ;
- les profils en travers utiles pour apprécier l'aléa géotechnique : calcul de stabilité, d'érosion interne ;
- un plan de la digue à une échelle adaptée permettant le report des observations visuelles et des ouvrages englobés dans le corps de digue ou ses fondations ;
- les coupes représentant les singularités : traversée hydraulique, batardeau, pont ...

Le géo-référencement de ces levés est utile au gestionnaire pour respecter ses obligations relatives aux ouvrages sensibles pour la sécurité au titre des articles R554-1 et suivants du code de l'environnement.

3.3.1.2 Topographie et bathymétrie du milieu eau

La connaissance du relief du milieu eau sert :

- aux études hydrauliques en vue de définir les lignes d'eau des crues caractéristiques et les vitesses au contact de l'endiguement en fluvial et les courants, les niveaux marins et les vagues en maritime ;
- aux études morphodynamiques en vue de connaître l'évolution morphologique du cours d'eau ou de la zone littorale, en profil en long et en plan ;
- à l'identification et la caractérisation d'éventuels facteurs aggravant les potentiels de risque comme la végétation, les sources d'embâcles et les activités à proximité de l'endiguement (irrigation, gravière).

Les données topographiques nécessaires pour les calculs hydrauliques sont avant tout des données altimétriques. La précision des résultats de calculs hydrauliques en termes de niveaux

d'eau ne pourra jamais être meilleure que la précision des altitudes fournies par les données topographiques. De même, il faut savoir critiquer la validité des données dans le contexte topographique actuel. La densité des données altimétriques est également un critère à prendre en compte.

Les problématiques des fonds mobiles de rivières et des côtes sableuses en milieu maritime sont à prendre en compte. Dans ces cas particuliers, il est souhaitable de prévoir une vérification régulière de la topographie et de la bathymétrie et une vérification ponctuelle après les crues et les tempêtes d'importance. Une réflexion approfondie est alors à mener concernant les liens entre la topographie et la performance du système d'endiguement, ainsi que les moyens de surveillance et d'entretien de la morphologie naturelle pour assurer le maintien de cette performance attendue.

3.3.1.3 Topographie de la zone protégée

La connaissance du relief de la zone protégée sert :

- à la caractérisation de l'intensité et de la cinétique de l'inondation dans la zone protégée pour chaque scénario retenu à la suite de l'analyse des défaillances ;
- à la caractérisation de la gravité des conséquences des scénarios d'inondation par croisement de l'intensité de l'inondation et de la vulnérabilité des enjeux aux inondations.

Il est à noter qu'une analyse topographique doublée d'une analyse sur photographies aériennes anciennes peut se substituer à une modélisation de l'inondation pour l'appréciation à dire d'expert de la dangerosité de l'inondation des territoires exposés à l'inondation.

Les zones de dangers dans la zone protégée seront identifiées par la connaissance des chenaux historiques, où l'écoulement en cas de rupture de digue sera plus rapide, et par le repérage de zones basses. Le cas typique des lits endigués en toit où la rivière est perchée par rapport aux enjeux peut également être traité. Les remblais traversant les lits majeurs peuvent aussi constituer un sur-danger : bénéfiques dans un premier temps pour les enjeux situés à leur aval, ils forment une rétention à l'amont de l'écoulement et sont susceptibles de rompre dans un second temps causant ainsi une nouvelle inondation. Enfin, il n'est pas nécessaire de disposer d'une modélisation pour définir une bande de fort danger à l'aval immédiat des digues.

3.3.1.4 Utilisation de modèle numérique de terrain

La construction des modèles numériques de terrain s'appuie le plus souvent sur des méthodes de levés aéroportés à grand rendement (système laser LIDAR par exemple).

Un modèle numérique de terrain (MNT) est construit à l'aide d'un maillage généralement triangulaire quelconque, car la technique de sélection des points caractéristiques du terrain ne garantit pas leur répartition régulière dans un plan (x, y). En termes de précision du rendu, il y a lieu d'apprécier la part liée à la précision du levé dépendante de l'altitude de vol et la part liée à la construction du MNT qui est fonction de la qualité des corrections apportées pour prendre en compte les discontinuités topographiques, le couvert végétal, les bâtiments et les ouvrages.

C'est pourquoi, il peut être utile de compléter le levé aéroporté par un levé terrestre, notamment dans les parties où la précision altimétrique est particulièrement recherchée.

De la même manière des compléments bathymétriques aux levés Lidar, peuvent être réalisées dans les secteurs où la pénétration est réduite du fait de la turbidité ou de la profondeur des eaux, voire d'autres caractéristiques défavorables de l'environnement. Ces compléments sont généralement effectués au moyen de dispositifs embarqués.

3.3.2 Les études et modélisations hydrauliques

Les études et modélisations hydrauliques sont des éléments incontournables de la réalisation d'une étude de dangers. Elles servent à appréhender, caractériser et illustrer le fonctionnement hydraulique et la propagation de l'inondation en fonction des conditions de performances du système d'endiguement (fonctionnement nominal normal, fonctionnement défaillant, dépassement des capacités).

3.3.2.1 Précautions relatives à l'usage de la modélisation

La modélisation, aussi fine soit-elle, reste une représentation schématique de la réalité, basées sur des données d'entrée plus ou moins fiables ou ayant pu évoluer, entachée d'incertitudes. Il est donc important de garder un regard critique sur les résultats qui peuvent être très sensibles aux données d'entrée et aux méthodes utilisées. La qualité et la densité des données topographiques, les évolutions morphologiques et l'importance de la végétalisation sont de nature à modifier considérablement les résultats hydrauliques. Il importe donc que le commanditaire de l'étude de dangers exige une analyse critique et une estimation des incertitudes des résultats des études antérieures avant leur utilisation.

Une attention particulière est à porter aux conditions de la modélisation. Les données disponibles et utilisées au moment de l'étude sont à comparer aux évolutions constatées depuis, particulièrement concernant :

- la topographie ;
- les coefficients de rugosité considérés pour le calage du modèle ;
- les possibilités d'embâcles ;
- les obstacles à l'écoulement, notamment le bâti ;
- les conditions de drainage et de ressuyage ;
- la localisation des enjeux majeurs.

Il convient ainsi d'être très prudent dans la possibilité de réutiliser des résultats issus d'une modélisation mise en œuvre pour un objectif différent de l'étude de dangers à mener. C'est notamment le cas lorsqu'on veut comparer les cartographies d'inondation issues d'une EDD et les cartographies d'inondation réalisées dans le cadre d'un PPRI. Dans le premier cas, est recherchée la représentation des conséquences d'un ou plusieurs scénarios parmi d'autres, tandis que le second vise à représenter l'extension géographique et les caractéristiques majeures des inondations potentielles résultant d'un événement naturel de caractéristiques données, sans forcément s'attacher à l'étude complète et détaillée des causes possibles de défaillance du système de protection (défiance ou dépassement).

Par ailleurs, le recours à une modélisation demande généralement des moyens importants. C'est pourquoi, le commanditaire de l'étude doit adapter les exigences des modèles à mettre en œuvre à la complexité du système d'endiguement, aux enjeux, et à la précision des résultats attendus. Pour des configurations simples ou des systèmes d'endiguement avec peu d'enjeux, les bénéfices escomptés par une modélisation doivent être mis en regard des coûts engendrés par ce type d'étude. Une analyse experte basée sur une topographie de qualité peut dans certains cas simples s'avérer suffisante pour donner une approximation des conséquences d'une défaillance du système d'endiguement et permettre d'identifier les zones de dangers dans la zone protégée.

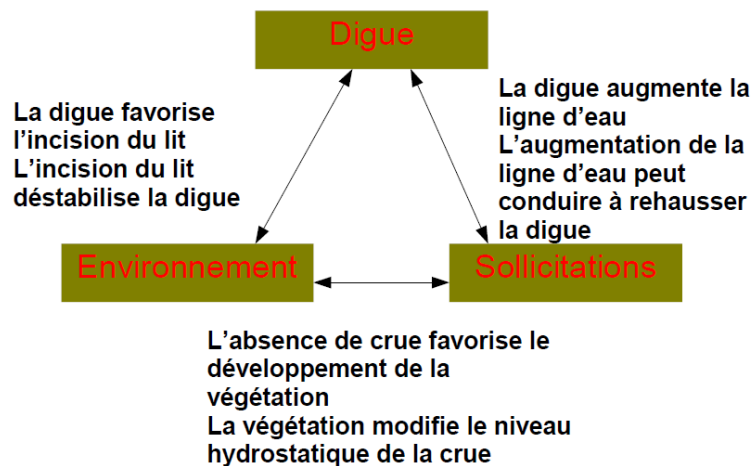


Figure 6: Exemples d'interactions entre digues, environnement et sollicitations

Enfin, il faut veiller aux interactions entre l'endiguement, son environnement et les sollicitations qui s'appliquent sur l'endiguement (figure 6). Avant toute modélisation, il faut s'interroger sur la portée de ces interactions et sur la validité des résultats de la modélisation qui en découlera.

3.3.2.2 La caractérisation des sollicitations hydrauliques sur le système d'endiguement

Les études hydrologique et hydraulique sont généralement conduites en deux étapes :

- une étude générale de grande emprise utilisant des outils de modélisation simplifiés (généralement 1D : les écoulements dans la rivière sont décrits à l'aide de profils en travers centrés sur un axe prédéfinis par le modélisateur) ;
- une ou des études spécifiques locales propres à chaque système d'endiguement utilisant des outils de modélisation plus fins soit 1D avec densification des profils en travers, soit 2D).

La caractérisation de la sollicitation hydraulique sur le système d'endiguement s'appuie généralement sur une ou des études hydrauliques existantes après une analyse critique de la part du bureau d'étude chargé de la réalisation de l'étude de dangers. Les points de vigilance sont :

- la comparaison de la topographie et de la bathymétrie utilisées et leur pertinence au regard des éventuelles évolutions depuis la réalisation de l'étude ;

- la cohérence de l'emprise du modèle utilisé avec l'étendue de l'inondation causée par les événements étudiés ;
- une rugosité adaptée à l'occupation du lit ;
- pour un modèle 1D, la pertinence de l'axe d'écoulement et des profils de calcul prédéfinis par le modélisateur, la prise en compte des singularités hydrauliques : ponts, seuils, rétrécissement et élargissement du lit ...
- pour un modèle 2D, la stratégie du maillage incluant une densité appropriée au droit des remblais et des ruptures du relief.

Cependant en fonction du niveau de précision de ces études dont le périmètre est souvent différent de celui attendu pour le système d'endiguement, il peut être nécessaire de réaliser une modélisation locale qui permettra une caractérisation plus fine de la sollicitation au droit de l'endiguement. Les conditions limites amont et aval de cette modélisation seront alors issues des résultats des études générales existantes ou mises à jour.

La caractérisation de la sollicitation hydraulique pourra revêtir plusieurs composantes :

1. Le niveau hydrostatique ;
2. Les variations du niveau hydrostatique pendant l'événement (crue / tempête) ;
3. La composante dynamique et ses effets mécaniques (vagues) ;
4. La composante longitudinale à l'ouvrage (courant).

Il convient de noter que les sollicitations peuvent aussi venir du côté de la zone protégée, notamment en présence d'affluents, de fossés de drainage, de déversoir, d'une rupture d'un ouvrage en amont...

3.3.2.3 périmètre du système d'endiguement et caractérisation des écoulements à travers le système d'endiguement

La définition d'un système d'endiguement nécessite d'identifier un contour qui sépare l'intérieur du système du milieu extérieur. Ce contour doit être continu et fermé, au sens géographique mais peut être ouvert sur le plan hydraulique, car des échanges d'eau restent possibles au travers des limites du système à partir d'un certain niveau d'aléa.

La caractérisation par la modélisation des comportements hydrauliques liés au système d'endiguement peut s'intéresser :

- aux phénomènes hydrauliques sans défaillance du système d'endiguement :
 - contournement du système d'endiguement ;
 - franchissements ;
 - surverse ;
- aux phénomènes hydrauliques avec défaillance du système d'endiguement :
 - formation des brèches ;
 - dysfonctionnements d'organes, mobiles ou traversants.

Pour tous ces phénomènes, le choix de l'hydrogramme d'entrée d'eau dans la zone potentiellement protégée a une importance cruciale. Pour les digues fluviales, on notera qu'une brèche se produisant lors d'une crue intense mais courte pourra être moins conséquente que si elle se produit lors d'une crue longue et moins intense.

A/ Contournement

Il s'agit d'étudier les possibilités de contournement par les eaux de crues ou de la mer alors que le système d'endiguement ne connaît aucune défaillance notable.

Pour un système d'endiguement fermé, ce sont les raccordements amont et aval au versant qu'il convient de lever.

Pour un système d'endiguement ancré sur un ou des éléments naturels situés à son extrémité ou entre tronçons de digue, c'est là aussi la topographie du ou des raccordements qu'il convient de préciser.

Pour un système d'endiguement ouvert comme dans le cas de la plaine de Pierrelatte (figure 7), les crues contournent progressivement l'endiguement. Le dispositif permet ainsi la limitation de l'inondation due aux crues de faible ampleur et, pour les crues les plus importantes, une inondation progressive des zones protégées, par un effet de remous à l'aval de chaque tronçon d'ouvrage du système d'endiguement. Le gestionnaire est alors libre de définir l'extension de la « zone protégée » réglementaire en fonction des enjeux du territoire et au regard d'un niveau de crue de son choix, en excluant les territoires à faibles enjeux, inondés dès les faibles crues.

Il convient cependant que la dangerosité des venues d'eau soit caractérisée sur les secteurs du périmètre d'étude situés hors zone protégée, mais à l'intérieur des limites administratives de l'autorité compétente pour la GEMAPI gestionnaire du système d'endiguement.

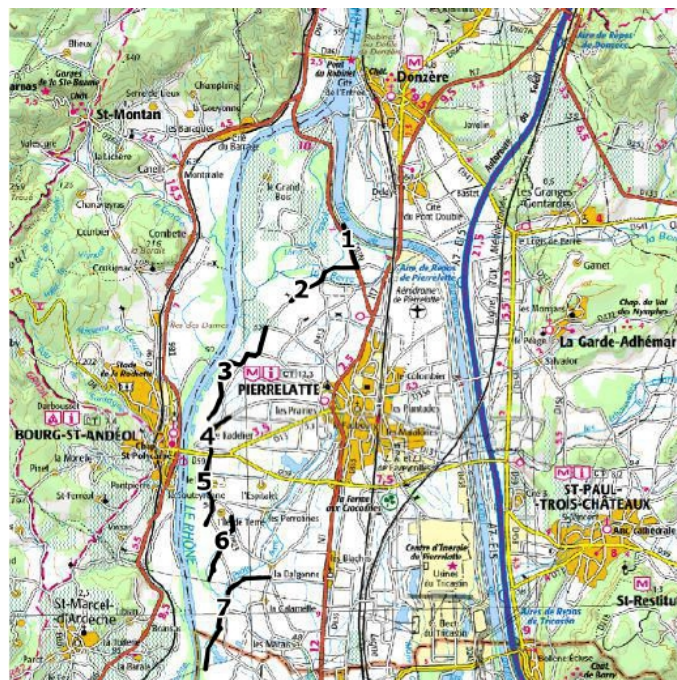


Figure 7: Système d'endiguement ouvert composé de 7 tronçons discontinus (numéroté 1 à 7). L'endiguement autorise en cas de crue du Rhône une inondation lente de la plaine.

B/ L'étude des franchissements

Les franchissements sont particulièrement sensibles pour les digues littorales ou estuariennes. Une digue permet de se prémunir des submersions pour un certain niveau moyen de la mer, mais des vagues peuvent provoquer des inondations par franchissement. Ces franchissements sont tolérés, au sens qu'ils ne mettent pas en défaut le niveau de protection tant qu'ils ne conduisent pas à des accumulations d'eau dépassant les capacités du réseau d'eau pluviale.

L'étude caractérisera ces inondations par franchissement et permettra d'attester l'absence de danger dans la zone protégée pour tout niveau marin ne dépassant pas le niveau de protection. Les franchissements présentent naturellement un danger dans la zone soumise aux projections particulièrement dynamiques. C'est pourquoi, il est recommandé de délimiter la zone protégée au-delà des secteurs soumis à ces projections.

C/ L'étude des phénomènes de surverse

Il s'agit ici d'identifier d'éventuels points bas dans la ligne de défense. Certains sont aménagés avec des dispositifs amovibles qui sont mis en place en période de hautes eaux. Le niveau de protection tient compte de ces protections, à condition toutefois que le rédacteur de l'étude de dangers démontre que l'organisation et les moyens du gestionnaire chargé de leur mise en place sont convenables.

D'autres points bas, plus sournois, peuvent venir d'une crête irrégulière ou de zones de transition entre tronçons mal gérées. Même si ces écoulements sont généralement peu conséquents en raison de leur faible débit, il convient de veiller qu'ils ne sont pas agressifs pour l'endiguement, notamment si le tronçon concerné n'est pas conçu pour résister à l'érosion superficielle.

D/ L'étude de la modélisation des brèches

Il n'existe pas de normalisation des conditions d'ouverture des brèches dans les ouvrages hydrauliques. Le modèle utilisé et les paramètres caractérisant l'ouverture peuvent avoir une influence forte sur les résultats. Le commanditaire de l'étude a tout intérêt à demander une étude de sensibilité dont les attendus sont :

- de démontrer que les incertitudes sur certaines données d'entrée n'ont pas ou peu d'impact sur la précision des résultats ;
- de chiffrer la précision des résultats.

Comme pour toute modélisation, il est souhaitable d'effectuer un calage et une validation du modèle par la simulation d'événements historiques bien documentés et la comparaison des résultats du modèle aux observations de terrain. Cependant, en matière de rupture de digue, ce cas se présente rarement. Le bureau d'étude pourra alors justifier ses hypothèses par analogie : cours d'eau et endiguement de même type et de même nature.

Les données d'entrée caractérisant l'ouverture sont :

- a) le limnigramme ou l'hydrogramme en amont de la brèche, issu de la caractérisation de la sollicitation hydraulique ;
- b) la forme de la brèche et plus particulièrement sa largeur finale ;

Certaines modélisations intègrent le calcul de la cinétique d'ouverture de la brèche. La largeur finale de la brèche devient alors un résultat de la modélisation. Il est à noter que la création d'une fosse à l'aval de la brèche augmente de façon notable le débit passant à travers la brèche. Or l'ouverture d'une telle fosse est rarement prise en compte par les logiciels utilisés par les bureaux d'études.

- c) la cinétique d'ouverture ;
- d) le moment choisi pour l'amorce de l'ouverture ;
- e) la localisation de la brèche.

Cette dernière s'appuie sur le diagnostic des ouvrages qui permet de localiser les secteurs structurellement faibles, sur la topographie de la zone protégée qui conditionne la propagation des écoulements, et sur la proximité des enjeux qui influence la sévérité des impacts potentiels.

E/ L'étude des dysfonctionnements d'organes mobiles et des ouvrages traversants

Il convient que l'autorité portant la responsabilité du système d'endiguement et de la protection contre les inondations dans la zone protégée, s'assure de l'entretien des parties d'ouvrages dont elle n'a pas la gestion complète. Cela se formalise par une convention avec le gestionnaire concerné comprenant des consignes de gestion en toutes circonstances.

Les organes mobiles et les ouvrages traversants sont des points particulièrement sensibles. Même si l'organisation et les moyens du gestionnaire sont considérés comme suffisants par le rédacteur de l'étude, le risque de défaillance humaine ou matérielle, qui conduirait à une inondation de la zone protégée avant l'atteinte du niveau de protection, ne peut pas être écarté. C'est notamment l'objet d'étude des scénarios S2 et de la cartographie associée des venues d'eau dangereuses, prévus par la réglementation de l'étude de dangers.

Leur recensement et la comparaison topographique des points bas de ces dispositifs par rapport aux lignes d'eau doivent être formalisés dans l'étude de dangers et les consignes d'exploitation de l'ouvrage. Il importe que l'étude détermine les débits maximaux pouvant les traverser sans entraîner de désordres suffisamment importants pour conduire à une défaillance structurelle de l'endiguement.

3.3.2.4 Propagation de l'inondation dans la zone protégée

L'arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers des digues organisées en systèmes d'endiguement impose, comme l'un des principaux résultats d'une étude de dangers, la présentation du fonctionnement du système d'endiguement à l'occasion de différents scénarios de montée des eaux sous l'effet d'événements (crue, tempête) d'intensités variées.

A/ Objectifs de l'étude

Les objectifs de l'étude seront de :

- caractériser les écoulements dans la zone protégée issus d'un scénario avec ou sans défaillance, tel que présenté au chapitre précédent ;

- cartographier la zone protégée en indiquant les zones plus ou moins dangereuses ;
- préciser la gravité de l'inondation au droit des enjeux particulièrement sensibles ou remarquables ;
- préciser les sollicitations sur les remblais linéaires à l'intérieur de la zone protégée qui peuvent conduire à un sur-aléa :
 - par accumulation d'eau en amont occasionnant une hauteur de submersion dangereuse à l'amont ;
 - par rupture du remblai occasionnant une submersion énergétique à l'aval ;
- caractériser les conditions de ressuyage de la zone protégée.

B/ Calage du modèle

Sauf dans des cas particulièrement simples, les écoulements sont caractérisés à l'aide d'une modélisation 2D.

La question du calage est cruciale lorsque l'on évoque un modèle hydraulique. Cette étape consiste à optimiser les paramètres inconnus de manière à ce que les simulations reproduisent au mieux les observations. Cependant, il est rare que le rédacteur de l'étude de dangers ait à sa disposition un retour d'expérience pour effectuer ce calage. Les paramètres sont estimés à partir de valeurs obtenues dans des configurations analogues. Il est alors indispensable de mener une étude de sensibilité sur les paramètres estimés, notamment :

- la rugosité du lit qui dépend de l'occupation du sol et de la lame d'eau de la crue étudiée (la rugosité diminue lorsque la lame d'eau croît) ;
- les pertes de charge singulières dues aux remblais, aux traversées hydrauliques, aux ponts ...

Le cas des écoulements en zone urbaine est particulièrement complexe. L'analyse critique devra s'intéresser aux hypothèses prises pour caractériser les écoulements : simplification éventuelle en ne tenant compte que des rues ou ajout des parcelles,...

C/ L'identification des zones de dangers

L'arrêté du 7 avril 2017 précise que la cartographie des venues d'eau doit représenter selon un code couleur approprié les parties du territoire plus ou moins dangereuses. Il précise que « sont réputées dangereuses les venues d'eau telles que la hauteur d'eau atteint au moins 1 m ou le courant au moins 0,5 m/s ».

Au-delà de ces exigences réglementaires, le gestionnaire peut (en fonction de l'étendue de la zone protégée, de son éloignement par rapport à l'endiguement, des particularités du fonctionnement hydraulique, de l'importance des enjeux...) demander à son prestataire de caractériser l'intensité et la gravité des venues d'eau par d'autres critères hydrauliques, tels que :

- temps d'arrivée de l'eau, soit le délai mis par les écoulements entre le début de la brèche, de la surverse ou du contournement et une certaine hauteur de submersion à l'endroit considéré ;

- vitesse de montée des eaux à l'endroit de la submersion ;
- durée de la submersion à l'endroit de la submersion.

Ces éléments d'informations complémentaires pourront lui permettre d'affiner l'organisation de son dispositif de surveillance, d'intervention et d'alerte des autorités en cas de crise.

3.3.3 Les études et modélisations mécaniques et géotechniques

La modélisation mécanique et géotechnique intervient dans l'évaluation du comportement structurel des ouvrages et de leur fondation, particulièrement pour le cas des ouvrages en terre, mais également pour les autres types d'ouvrages, vis-à-vis des sollicitations qu'ils subissent, et en particulier des sollicitations hydrauliques (« niveaux d'eau » vis-à-vis des processus d'érosion interne, de glissement, « courant » vis-à-vis des processus d'érosion externe, par exemple). Comme la modélisation hydraulique, elle repose sur une schématisation de la réalité permettant d'évaluer par le calcul les conditions de stabilité des matériaux vis-à-vis des contraintes de mouvement ou d'arrachement des particules ou des masses de sols. La pertinence et la fiabilité des modélisations mécaniques et géotechniques reposent notamment sur :

- l'identification de la nature, des caractéristiques et de la structure de l'ouvrage dans le cas de digues n'étant pas des ouvrages en remblai ;
- l'identification de la nature, de l'état et des caractéristiques mécaniques et hydrauliques des sols (constitutifs du remblai dans le cas de digues en terre, et des terrains de fondations) ;
- le regroupement des sols en unités géotechniques de géométrie et de caractéristiques définies ;
- la définition des sollicitations externes qui s'appliquent sur l'ouvrage ;
- la définition des conditions hydrauliques dans les sols ;
- le choix et l'utilisation de modèles de comportements adaptés à la nature et aux caractéristiques des matériaux présents.

Les recommandations du CFBR offrent désormais un cadre partagé par la profession pour l'analyse et la justification de la stabilité des digues en remblai (CFBR, 2015). La réalisation d'investigations au moyen de sondages et d'essais ou reconnaissance *in situ*, de prélèvements et d'analyses en laboratoire, dans le cadre d'un programme de reconnaissances géotechniques adaptées aux contextes des ouvrages, restent cependant un élément essentiel et indispensable à toute étude et modélisation géotechnique du comportement des ouvrages et des sols de fondations. L'ampleur et la nature de ces investigations seront directement dépendantes de la complexité des sites et des ouvrages. Dans certains cas, elles peuvent conduire à la mise en place d'une instrumentation pérenne pour le suivi ultérieur du comportement de l'ouvrage (piézomètres, sondes thermiques...).

Le bureau d'étude agréé en charge de la réalisation de l'étude de dangers dispose des compétences nécessaires pour la définition et l'exploitation de ces reconnaissances. L'utilisation des services d'une assistance à maîtrise d'ouvrage à compétence géotechnique appliquée aux ouvrages hydrauliques, peut toutefois concourir à un meilleur dialogue et une optimisation des

reconnaisances et études géotechniques, avec les prestataires de services en géotechniques ou géophysique à mobiliser.

4 Les produits d'une étude de dangers : un dossier réglementaire mais pas seulement...

4.1 Le dossier réglementaire

L'**arrêté ministériel du 7 avril 2017** précise le plan de l'étude de dangers qui leur est applicable. Il se présente sous la forme d'un rapport en trois parties accompagnées de documents cartographiques au format électronique :

- *« le résumé non technique, dont la fonction est de présenter simplement les conclusions de l'étude de dangers en termes de niveau de protection, de délimitation du territoire protégé et de scénarios de risques de venues d'eau en fonctionnement normal et lorsque se produit un évènement (crue, tempête) provoquant une montée des eaux excédant le niveau de protection. Le résumé non technique précise le cas échéant si cette performance du système d'endiguement tient compte ou non de l'existence d'un ou plusieurs aménagements hydrauliques, au sens de l'article R.562-18, qui viendraient compléter la protection du territoire considéré ;*
- *le document A, dont la fonction est de présenter, en synthèse des éléments techniques détaillés et des justifications techniques fournies dans le document B, le niveau de protection, la zone protégée et le système d'endiguement qui lui est associé. Il présente également l'organisation mise en œuvre par le gestionnaire du système d'endiguement pour surveiller, entretenir le système d'endiguement et le surveiller lors des épisodes de crue ou de tempête et informer les autorités chargées de l'organisation des secours en cas de risque de dépassement des performances du système d'endiguement ;*
- *le document B détaille les analyses techniques et scientifiques qui permettent d'établir les performances du système d'endiguement, associé le cas échéant à un ou plusieurs aménagements hydrauliques, et de les justifier. »*

Les études techniques qui apportent des éléments de connaissance pour la production de l'étude de dangers constituent des documents annexes qui peuvent être joints au dossier ou fournis à la demande des services de contrôle. Cependant la formulation du dossier réglementaire, si elle s'appuie sur leurs contenus techniques, doit en articuler les éléments pour répondre aux objectifs des documents à produire.

Par ailleurs, lorsqu'une étude de dangers a déjà été établie pour les digues composant ce système conformément à l'**arrêté du 12 juin 2008**, l'article 14 de l'arrêté du 7 avril 2017 prévoit que l'étude sera réputée régulière après une mise à jour et un complément permettant d'intégrer les informations concernant tous les ouvrages dans un fonctionnement global du système d'endiguement. Les éléments à fournir comprennent :

- le niveau de protection du système d'endiguement ;
- l'identification de la (ou des) zone(s) protégée(s) ;
- un diagnostic approfondi de tous les ouvrages composant le système ;

- la cartographie des venues d'eau ;
- l'analyse de l'organisation mise en place par le gestionnaire du système d'endiguement concernant : la prévision des crues et des tempêtes, l'entretien et la surveillance des ouvrages, et les conditions d'information et d'alerte des autorités compétentes pour la mise en sécurité préventive des personnes en période de crise.

4.2 Un outil pour aider à la définition de mesures complémentaires de gestion des risques

Le plan réglementaire de l'étude de dangers (article 9bis de l'annexe 1 de l'arrêté du 7 avril 2017) prévoit l'établissement de recommandations du bureau d'étude en vue d'éclairer le gestionnaire et maître d'ouvrage sur la gestion patrimoniale et les performances de son système d'endiguement à moyen ou à long terme.

Ces recommandations peuvent concerner notamment :

- L'optimisation des conditions d'exploitation du système d'endiguement.

Des préconisations peuvent ainsi être émises concernant :

- le choix, l'implantation, la mise en œuvre ou le développement de dispositifs de mesures ;
- la mise en place de dispositifs ou procédures complémentaires ou alternatifs pour identifier les conditions de défaillance du système d'endiguement, anticiper et gérer un dépassement de son niveau de protection ou de ses niveaux de sécurité ;
- L'optimisation de l'évaluation et la réduction des incertitudes concernant les performances à long terme du système d'endiguement.

Ces préconisations peuvent notamment porter sur :

- la réalisation d'études particulières concernant la connaissance des phénomènes spécifiques à l'environnement ou aux comportements des ouvrages qui pourraient conduire le gestionnaire à réévaluer favorablement la performance attendue du système d'endiguement ;
- l'identification d'un programme d'investissements structurels visant à optimiser sur le long terme la gestion patrimoniale des ouvrages constituant le système d'endiguement.

Les recommandations émises par le bureau d'étude agréé sont à sa libre initiative et ne portent pas engagement pour le gestionnaire du système d'endiguement, lequel reste décisionnaire de sa politique patrimoniale en vue d'assurer ses missions de défense contre les inondations.

4.3 Un outil pour aider à la préparation d'un plan de gestion en période de crise

L'étude de dangers est aussi un outil mettant à disposition du gestionnaire une base de connaissance organisée et structurée lui permettant d'adapter son organisation en période de crues ou de tempêtes. En s'appuyant sur les moyens dont il dispose en propre ou mobilisables

dans le cadre de prestations définies en avance, le gestionnaire qui maîtrise la connaissance des performances de son système est en mesure d'optimiser et de proportionner son dispositif de surveillance et d'intervention d'urgence dans un véritable plan de gestion en période de crise (Cerema, 2017).

À l'instar des pratiques de certains gestionnaires, il est possible de prévoir dans ce cadre :

- une surveillance particulière des secteurs identifiés comme particulièrement sensibles pour la performance du système d'endiguements, tels que :
 - les points bas,
 - les zones de fragilité et de transition entre structures,
 - les vannages et ouvrages de manœuvres.
- une graduation des états de vigilance en fonction de l'intensité de l'événement hydrométéorologique prévu, qui peut prévoir par exemple, dans un ordre croissant d'activation :
 - un état de pré-alerte qui correspond à une simple vérification du caractère opérationnel des moyens et d'une veille de l'évolution de l'événement hydrométéorologique ;
 - un premier état d'alerte limitée à une surveillance visuelle diurne des ouvrages ;
 - un second état d'alerte faisant appel à moyens extérieurs permettant une surveillance continue des ouvrages ;
 - un troisième état d'alerte lorsque le niveau de protection est ou va être dépassé et qu'il est nécessaire d'alerter les communes et la préfecture ;
 - enfin un quatrième état d'alerte lorsque le niveau de sûreté des ouvrages est dépassé et que des mesures de sauvegarde ou de secours des populations sont indispensables.
- une activation proportionnée de prestataires en réponse aux conditions de crise à gérer :
 - agents de surveillance des ouvrages ;
 - bureaux d'étude pour l'assistance technique du gestionnaire ;
 - entreprises pour des interventions d'urgence en cas de détection de désordres dans les ouvrages ;

5 Annexes

5.1 Glossaire

5.1.1 Abréviations

DICRIM	Dossier d'information communal sur les risques majeurs
EPCI	Établissement Public de Coopération Intercommunal
GEMAPI	Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations
PCS	Plan communal de sauvegarde
PPRN	Plan de prévention des risques naturels
PPRI	Plan de prévention des risques inondations
PPRL	Plan de prévention des risques littoraux
EDD	Étude de dangers
STC	Source-Transfert-Cible

5.1.2 Définitions

Gestionnaire du système d'endiguement : entité en charge de la « défense contre les inondations et les submersions d'un territoire qui gère au moins un système d'endiguement. À ce titre, il a pour mission :

- la réalisation d'études de dangers ;
- l'entretien et la surveillance des ouvrages composant le système d'endiguement ;
- la déclaration et le maintien des performances du système d'endiguement sur un territoire que le gestionnaire détermine ;
- la réalisation de tous travaux nécessaires au maintien de ces performances.

Niveau de danger : Le niveau de danger correspond au niveau d'eau, mesuré au lieu de référence, à partir duquel la probabilité de défaillance du système d'endiguement est très élevée à certaine pour les différents modes de rupture auxquels il est potentiellement exposé. C'est par exemple le moment où la hauteur d'eau et/ou les vagues crée(nt) une surverse ou des franchissements sur un tronçon de digue non prévu pour résister à cet effet.

Niveau de protection¹⁰ : Pour un système d'endiguement, le niveau de protection d'une zone exposée au risque d'inondation ou de submersion marine est la hauteur maximale que peut atteindre le niveau d'eau mesurée au lieu de référence, tel que :

¹⁰ Définition donnée par l'article R.214-119-1

- la probabilité de rupture des ouvrages qui le constitue le système d'endiguement soit inférieure à une valeur jugée acceptable par le gestionnaire, mais qui ne peut dépasser réglementairement 5 %;
- la zone protégée soit préservée de l'inondation provenant du cours d'eau ou de la mer par débordement ou contournement des ouvrages de protection.

Niveau de protection apparent : le niveau de protection apparent d'une zone exposée au risque d'inondation ou de submersion marine assuré par un système d'endiguement ou par un aménagement hydraulique est la hauteur maximale que peut atteindre l'eau sans que cette zone soit inondée en raison du débordement ou du contournement des ouvrages de protection quand l'inondation provient directement du cours d'eau ou de la mer.

Niveau de sécurité : le niveau de sécurité d'une zone exposée au risque d'inondation ou de submersion marine assuré par un système d'endiguement ou par un aménagement hydraulique est la hauteur maximale, mesurée au lieu de référence, déterminant l'apparition des premières venues d'eau dangereuses et déterminant les conditions d'alerte des autorités compétentes pour la gestion de crise.

Niveau de sûreté : le niveau de sûreté correspond à la hauteur maximale, mesurée au lieu de référence, que peut atteindre l'eau pour laquelle le système d'endiguement est considéré comme sûr. Il appartient au gestionnaire de digue de fixer le seuil d'acceptabilité du risque, c'est-à-dire le seuil maximal de probabilité de rupture des ouvrages permettant de considérer son système comme sûr.

Système d'endiguement : Ensemble des digues et des remblais ou murs qui isolent un territoire des inondations venant d'un cours d'eau, d'une mer ou d'un lac et ce jusqu'à un certain niveau d'événement, ainsi que tous les ouvrages nécessaires au bon fonctionnement de la protection du territoire (vannes, stations de pompage...). Les ouvrages composant le système d'endiguement sont définis par le gestionnaire en fonction de ses objectifs de protection : la zone protégée et le niveau de protection.

Système de protection contre les inondations : Un système de protection contre les inondations peut être défini comme l'ensemble d'ouvrages et parfois d'autres éléments de l'environnement ayant pour but ou pour effet de protéger un territoire naturellement inondable, contre les crues ou submersions issues d'une ou plusieurs « étendues » d'eau (mer, fleuves, rivières, torrents, lacs, ...).

Zone inondable : secteur topographique inondé en l'absence d'ouvrage pour un événement ou phénomène naturel d'occurrence donnée.

Zone potentiellement protégée : secteur topographique mis hors d'eau du fait de la présence et du fonctionnement normal de l'ouvrage, pour un événement ou phénomène naturel d'occurrence donnée.

Zone protégée : secteur géographique que souhaite protéger le gestionnaire et pour lequel est fixé l'objectif de protection du système d'endiguement. Pour le niveau de protection défini, cette zone doit être hors d'eau, à l'exception de franchissements non dangereux et pouvant faire l'objet d'un ressuyage rapide. Son extension maximale possible correspond ainsi à l'enveloppe des zones soustraites à l'inondation par un fonctionnement nominal du système d'endiguement et pour un phénomène naturel correspondant à son objectif de protection. Le gestionnaire est libre de ne considérer qu'une zone plus restreinte à l'intérieur de cette enveloppe.

5.2 Références bibliographiques

5.2.1 Références citées

CEPRI. 2017. Les ouvrages de protection contre les inondations – S’organiser pour exercer la compétence GEMAPI et répondre aux exigences de la réglementation issue du décret du 12 mai 2015. 100 p.

Cemagref, 2001. Guide pratique à l’usage des propriétaires et des gestionnaires – Surveillance, Entretien et diagnostic des Dignes de protection contre les inondations. Cemagref Editions

Cerema, 2017. Interventions d’urgence sur les dispositifs de protection contre les submersions marines. Cerema, Bron, Collection Références, 97 p.

Cerema, 2016. Étude des systèmes de protection contre les submersions marines. Cerema, Bron, Collection Références, 446 p.

CIRIA. 2013. The International Levee Handbook. CIRIA. C731. London.

Ledoux, Patrick, Yann Deniaud, David Salmon, Daniel Loudière, et Rémy Tourment. 2016. Contribution des études de dangers à la sûreté des systèmes d’endiguement. Colloque Sûreté des barrages et enjeux, Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR), 23 & 24 novembre 2016, Chambéry, France. https://doi.org/10.24346/cfbr_colloque2016_b02.

MEDDE. 2015. Référentiel technique digues maritimes et fluviales. Direction Générale de la Prévention des Risques, MEDDE. 191 p.

5.2.2 Références bibliographiques complémentaires

Cerema, 2018. Études hydrauliques maritimes. Cerema, Bron, Collection Références, 156 p.

Cerema, 2015. Étude des aléas littoraux dans le cadre d’une analyse coûts-bénéfices (ACB). Cerema, Bron, Collection Références, 52 p.

Cerema, 2015. Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral – Cahier technique. Cerema, Bron, Collection Connaissances, 76 p.

CETMEF, 2013. Analyse des surcots extrêmes le long des côtes métropolitaines. Outils, Côtier, Rapport méthodologique C13-02, Compiègne, 131 p.

CETMEF (X. Kergadallan), 2013. Analyse statistique des niveaux d’eau extrêmes – environnements maritime et estuarien. Collection Etat de l’art, Aménagement Côtiers, Rapport méthodologique C13-01, Compiègne, 182 p..

CETMEF, 2011. Préconisation pour le recensement des ouvrages et structures de défense contre les aléas côtiers – Notice méthodologique. Collection Outils, Côtier. CETMEF, 60 p.

CETMEF, 1998. Recommandations pour la conception et la réalisation des aménagements de défense du littoral contre l'action de la mer. Collection État de l'art, Aménagement Côtiers, référence ER PM 98.01, Compiègne, 541 p.

CIRIA, 2013. The international Levee Handbook. London, CIRIA.

CIRIA, CUR, CETMEF, 2009. Guide Enrochement – L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques – Version française du Rock Manual (2e édition). Cetmef, Compiègne.

CIRIA, CUR, CETMEF, 2007. The Rock Manual: The Use of Rock in Hydraulic Engineering. CIRIA, London, 2nd ed.

IRSN, 2013. L'aléa inondation - État de l'art préalable à l'élaboration du guide inondation pour les installations nucléaires. 291 p.

MEDDE/DGPR/SRNH, 2015. Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux. MEDDE, Paris, 169 p.

SHOM, CETMEF, 2012. Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique). Document X005HYI, SHOM, 160 p.

Tourment R., Beullac B. 2018. Inondations – Analyse de risque des systèmes de protection - application aux études de dangers, Éditions Lavoisier (édition en cours).

USACE, 2002. Engineer Manual 1110-2-1100 – Coastal Engineering Manual, version 2002.

Van der Meer et al., 2016. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Second Edition (2016), (available at www.overtopping-manual.com).



Logo ISO
si certifié

Cerema Eau, mer et fleuves

Technopôle Brest Iroise - BP 5 - 155, rue Pierre Bouguer - 29280 Plouzané
Tél : +33(0)2 98 05 67 50 - mel : dtecmf@cerema.fr

www.cerema.fr