

RÉMY TOURMENT & BRUNO BEULLAC

# Inondations

## Analyse de risque des systèmes de protection

Application aux études de dangers



*Lavoisier*  
TEC & DOC



# Inondations – Analyse de risque des systèmes de protection

Application aux études de dangers

## Chez le même éditeur

*Diagnostic, aménagement et gestion des rivières, Hydraulique et morphologie fluviales appliquées* (2<sup>e</sup> éd.), par G. Degoutte

*Écologie des zones humides. Concepts, méthodes et démarches*, par J.-B. Bouzillé

*Droit de l'environnement. Comprendre et appliquer la réglementation* (6<sup>e</sup> Éd.), Coll. « Environnement », par P. Malingrey

*Réduire la vulnérabilité de l'habitat individuel face à l'inondation*, Coll. « Sciences du risque et du danger », par A. Aviotti

*Les milieux estuariens et littoraux. Une approche scientifique pour les préserver et les exploiter durablement*, Coll. « Environnement », par J.-P. Ducrotoy

*Dictionnaire Collectivités territoriales et Développement Durable*, Coll. « Environnement », par J.-L. Pissaloux

Pour plus d'informations sur nos publications :



[newsletters.lavoisier.fr/9782743023652](https://newsletters.lavoisier.fr/9782743023652)



RÉMY **TOURMENT** ET BRUNO **BEULLAC**  
IRSTEA, UR RECOVER, AIX-EN-PROVENCE

*Avec la collaboration de*  
Emmanuelle Berthelier (Artelia), Arnaud Boulay (DDT du Loiret),  
Jean Maurin (DREAL Centre – Val-de-Loire),  
Yann Quefféléan (ONF – RTM),  
en partenariat avec la DREAL Centre – Val-de-Loire

# Inondations – Analyse de risque des systèmes de protection

Application aux études de dangers

---

*Direction éditoriale* : Jean-Marc Bocabeille  
*Édition et fabrication* : Solène Le Gabellec  
*Couverture et composition* : Nord Compo, Villeneuve-d'Ascq  
*Illustration de couverture* : Vue aérienne du système de protection  
contre les crues de l'Isère, en amont de Grenoble au niveau de la boucle de Gières.  
Avec l'aimable autorisation de l'Institut des risques majeurs, Grenoble.

DOI : <http://dx.doi.org/10.3166/TD-2018-2365-000>

Ce document a fait l'objet de multiples relectures, totales ou partielles, et à différents stades d'avancement du document, par des spécialistes français du domaine des ouvrages hydrauliques et de la gestion du risque d'inondation : Nicolas Bauduceau (Cepri), Fara Carra Ranaivoarison (Département de Seine-Maritime), Gérard Degoutte (CTPBOH), Yann Deniaud (CEREMA), Patrick Ledoux (CEREMA), Loïc Le Louargant (Département de Seine-Maritime), Patrice Mériaux (Irstea), Thanh-Son Nguyen (Établissement public Loire), Sébastien Patouillard (DREAL Centre – Val-de-Loire), Daniel Poulain (Irstea), Yann Quefféléan (ONF – RTM), Emmanuelle Souyris (Communauté de communes de l'Île d'Oléron), Guillaume Veylon (Irstea).

# SOMMAIRE

---

Préface .....	IX
Avant-propos .....	XI
Introduction .....	1

## Partie I Systèmes de protection contre les inondations

### CHAPITRE 1

<b>Problématique des inondations et des digues en France</b> .....	7
1. Inondations .....	7
2. Dignes et autres ouvrages de protection contre les inondations .....	8
3. Inondations sans défaillance en présence de digues .....	9
4. Nécessité d'une bonne gestion des digues .....	9

### CHAPITRE 2

<b>Caractéristiques des systèmes de protection contre les inondations</b> .....	11
1. Définitions .....	11
2. Contextes environnementaux, actions et mécanismes de détérioration associés .....	17
3. Généralités sur les fonctions des systèmes de protection et de leurs éléments constitutifs .....	37
4. Typologie des systèmes de protection .....	41
5. Typologie des digues .....	65
6. Système de gestion de la sécurité .....	90

### CHAPITRE 3

<b>Niveaux et objectifs liés à la protection contre les inondations et à la sûreté des ouvrages</b> .....	93
1. La notion de niveaux relatifs aux digues et systèmes de protection contre les inondations .....	93
2. Difficultés associées .....	94
3. Les différents niveaux de la gestion des systèmes de protection .....	95
4. Niveaux et milieux eau .....	100

## Partie II Analyse de risque des systèmes de protection contre les inondations

### CHAPITRE 4

<b>Généralités et spécificités de l'analyse de risque des systèmes de protection contre les inondations</b> .....	113
1. Généralité sur le principe d'analyse de risque .....	113
2. Spécificités de l'application de l'analyse de risque aux systèmes de protection contre les inondations .....	114
3. Étude accidentologique .....	120
4. Identification du risque .....	121

5. Estimation de la probabilité et de l'intensité de l'événement hydraulique .....	122
6. Probabilité de défaillance du système de protection .....	123
7. Modélisation de l'inondation .....	125
8. Analyse des conséquences .....	128
9. Efficacité des contrôles existants .....	131
10. Estimation du niveau de risque, attribution des risques .....	134
11. Évaluation des lacunes dans les connaissances .....	135
12. Utilisation des résultats de l'analyse de risque .....	136

## CHAPITRE 5

<b>Réalisation de l'analyse de risque de système de protection</b> .....	139
1. Fonctions et terminologie .....	139
2. Proposition d'une méthode de réalisation de l'analyse de risque des systèmes de protection .....	142
3. Description des études élémentaires de réalisation de l'analyse de risque des systèmes de protection .....	146

## CHAPITRE 6

<b>Évaluation du risque</b> .....	223
1. Définition de l'acceptabilité du risque .....	223
2. Détermination de la criticité du risque d'inondation .....	224

## CHAPITRE 7

<b>Définition des mesures de maîtrise ou réduction du risque</b> .....	227
1. Mesures appliquées au système de protection .....	229
2. Mesures sur les milieux eau .....	234
3. Mesures sur la zone protégée .....	235
4. Lacunes liées aux connaissances et méthodes .....	236

## CHAPITRE 8

<b>Sources de données, gestion des données</b> .....	239
1. Généralités sur les différentes natures et types de données .....	239
2. Provenance des données nécessaires à la réalisation des études élémentaires .....	240
3. Archivage et conservation des données .....	246

## CHAPITRE 9

<b>Analyse fonctionnelle et analyse de la défaillance des systèmes de protection contre les inondations</b> .....	249
1. Proposition de méthodologie d'analyse fonctionnelle .....	251
2. Proposition de méthodologie pour l'analyse de la défaillance .....	260
3. Méthodes de représentation des scénarios de défaillance sous la forme d'arbres .....	277

## CHAPITRE 10

<b>Diagnostic des digues et des systèmes de protection</b> .....	283
1. Introduction .....	283
2. Étapes d'un diagnostic de digues .....	286
3. Données, recueil et traitement .....	286

## Partie III

### Études de dangers des systèmes d'endiguement

#### Utilisation de l'analyse de risque

#### CHAPITRE 11

<b>Du concept d'EdD à son application aux systèmes de protection</b> .....	301
1. Cadre réglementaire .....	302
2. Objectifs de l'EdD de digues ou de système d'endiguement .....	306
3. Complexité de réalisation de l'EdD de digues ou de système d'endiguement .....	307

#### CHAPITRE 12

<b>Intérêt des études de dangers de digues ou de systèmes d'endiguement</b> .....	309
1. Intérêt pour les gestionnaires de digues .....	309
2. Intérêt pour les acteurs du territoire et de la gestion des risques .....	310
3. Rôle du service de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques .....	311

#### CHAPITRE 13

<b>Les différents types d'études de dangers de digues ou de systèmes d'endiguement</b> ..	313
1. EdD « constat » .....	313
2. EdD « projet » ou « programme » de travaux .....	315

#### CHAPITRE 14

<b>Utilisation de l'analyse de risque pour l'aide à la décision relative aux systèmes d'endiguement</b> .....	317
1. Analyse de risque et aide à la décision .....	317
2. Détermination de nouvelles mesures de réduction du risque .....	317
3. Évaluation de mesures de réduction du risque .....	318

#### CHAPITRE 15

<b>Réalisation d'une étude de dangers</b> .....	319
1. Application de la méthode d'analyse de risque proposée par l'Irstea .....	319
2. Cahier des charges et conduite de l'EdD .....	320
3. Rédaction du rapport de l'étude .....	324

<b>Conclusion</b> .....	325
-------------------------	-----

<b>Liste des abréviations</b> .....	327
-------------------------------------	-----

<b>Bibliographie</b> .....	331
----------------------------	-----

<b>Glossaire</b> .....	335
------------------------	-----

<b>Annexes</b> .....	357
----------------------	-----

Pour accéder aux annexes, disponibles en ligne, scannez le code ci-dessous :



ou rendez-vous à l'adresse suivante :  
[inondations.lavoisier.fr](http://inondations.lavoisier.fr)



## PRÉFACE

---

Couvrant 1/5<sup>e</sup> de la France métropolitaine, le bassin de la Loire et ses affluents s'étend sur plus de 117 000 km<sup>2</sup>. Le fleuve « royal », plus long fleuve français, prend sa source au mont Gerbier-de-Jonc, en Ardèche, pour aller se jeter dans l'océan, en Loire-Atlantique. Son débit moyen étant très irrégulier, celui-ci est ponctuellement régulé par les barrages de Naussac en Lozère et de Villerest dans la Loire, propriétés de l'Établissement public Loire qui en assure la gestion, aux fins de soutien d'étiage et d'écrêtement des crues. Étant aussitôt rappelé que ces dernières sont connues de longue date, motivant ainsi la construction, par Henri II Plantagenêt, de digues dès le XIII<sup>e</sup> siècle, étendue par Louis XI à l'Orléanais et à la Touraine, avec pour objectif notamment de protéger le développement des villes ainsi que les activités dans ces vals fertiles. Avec qui plus est, au gré des inondations qui ont pu affecter les territoires, des décisions prises de surélever les protections pour atteindre les niveaux de digues que nous connaissons aujourd'hui.

Il n'aura donc échappé à personne, depuis très longtemps, que le « Territoire à risque important national de la Loire » présente de forts enjeux humains, économiques, environnementaux et culturels. Et effectivement, une crue majeure du type de celles du XIX<sup>e</sup> siècle aurait aujourd'hui un impact considérable, ce que n'a pas manqué de souligner l'Organisation de coopération et de développement économiques dans son étude de 2010 portant sur la gestion des risques d'inondation sur le bassin de la Loire. La simple mesure de l'ampleur des dommages prévisibles devrait donc inciter à redoubler d'efforts, dans une double logique de réduction de la vulnérabilité et de développement de la résilience. En s'affranchissant, en tant que de besoin, des « frontières » administratives comme des réponses exclusives les unes des autres, pour privilégier l'intégration de la diversité de moyens disponibles, via une approche stratégique cohérente à l'échelle du territoire fonctionnel de référence, à savoir l'ensemble du bassin fluvial.

Avec un cadre d'intervention en restructuration (s'agissant de l'organisation territoriale et de celle de politiques publiques telles que la gestion de l'eau et des risques naturels associés), dans un contexte marqué de surcroît par de fortes incertitudes (ne serait-ce que pour l'appréciation des impacts des changements climatiques en termes d'inondations comme de sécheresses), l'Établissement a pris l'initiative en octobre 2015 d'une analyse d'opportunité et de faisabilité d'un projet d'aménagement d'intérêt commun (PAIC) pour les infrastructures de protection contre les inondations à l'échelle du bassin de la Loire et ses affluents. Ce travail, conduit en partenariat technique avec la DREAL Centre – Val-de-Loire, l'IRSTEA et le CEREMA, a débouché depuis 2017 sur la co-construction du PAIC, en lien étroit avec la soixantaine d'EPCI-FP plus particulièrement concernés. Ceci, dans la perspective d'une délégation progressive à l'Établissement de la gestion de systèmes d'endiguements, s'appuyant sur une structure garante d'un dialogue de gestion entre collectivités décentralisées, et visant à assurer, sur un périmètre de gestion cohérent, une homogénéité de traitement ainsi que la mutualisation et l'optimisation des moyens techniques comme financiers.

Une telle approche intègre pleinement le fait que la présence de digues, perçue comme protectrice, a pu contribuer à alimenter un faux sentiment de sécurité « à toute épreuve », débouchant parfois sur l'implantation accrue d'enjeux sur certains territoires qui restent pourtant soumis au risque. Aujourd'hui, avec les retours d'expériences des inondations catastrophiques des 30 dernières années, les populations comme les pouvoirs publics ont pris conscience que les ouvrages de protection ne garantissent pas une sécurité sans faille et qu'ils peuvent même être à l'origine d'une amplification des conséquences en cas de



défaillance. Afin de s'assurer de leur efficacité, chaque gestionnaire doit donc commencer par consolider sa connaissance de l'état et du comportement de ses ouvrages, les évaluer en continu au regard du niveau de sécurité effective qu'il est attendu d'eux. Il s'agit là d'une considération essentielle, relevant de l'ordre du besoin fondamental à satisfaire. Les études de dangers, dans la panoplie de toutes celles imposées par la réglementation, constituent l'une des voies privilégiées pour apporter des éléments de réponse utiles.

À n'en pas douter, le présent guide élaboré par l'IRSTEA constitue un référentiel précieux, de nature à faciliter la compréhension par chacun des mécanismes de fonctionnement des ouvrages de protection (pas toujours aussi simple, ni intuitif qu'il y paraît à première vue), ainsi que l'échange d'informations et d'expériences entre tous, à commencer par ceux convaincus de la nécessité de progresser toujours dans la voie de la fiabilisation de tels dispositifs (en pleine connaissance de leurs limites objectives bien entendu). Au croisement de plusieurs disciplines (hydraulique, génie civil, géotechnique, etc.), il offre en partage aux gestionnaires de digues, et plus largement à l'ensemble des intervenants dans ce domaine, une grille de lecture pédagogique de l'analyse de risques des systèmes de protection contre les inondations.

En ce sens, le caractère technique de la contribution de l'IRSTEA ne dissuade en aucune façon d'éventuels « non spécialistes » d'accéder aux éléments clés qui leur sont indispensables pour se prononcer en connaissance de cause, qu'ils soient décideurs ou pas d'ailleurs. Ce n'est pas le moindre de ses mérites, surtout lorsque l'on veut bien considérer que ce dont il s'agit, in fine, c'est de faire les bons choix – pour du long terme et dans un cadre financier contraint – afin de préserver des vies humaines, des biens irremplaçables et des activités essentielles pour le développement durable de territoires.

Jean-Claude EUDE  
Directeur général des services de l'Établissement public Loire

## AVANT-PROPOS

---

La réglementation française oblige le gestionnaire d'une digue à réaliser une étude de dangers de son système d'endiguement. Mais l'étude de dangers doit être pour lui bien plus qu'une simple obligation réglementaire ; c'est l'occasion de faire un point initial puis régulier sur l'état de sa digue, les améliorations à y apporter aussi bien d'ordre structurel, que d'entretien ou de gestion. C'est aussi l'opportunité de communiquer sur son ouvrage auprès du grand public et des institutions locales pour garder la conscience du risque que représente un système d'endiguement sur la zone qu'il protège.

La réglementation précise bien ce que doit être une étude de dangers, dans sa forme et dans ses objectifs. L'étude doit reposer sur une analyse de risque du système d'endiguement qui peut s'avérer très difficile à réaliser compte tenu de la complexité des ouvrages et de leur environnement. Un système d'endiguement peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres de long. La ligne d'eau devant les ouvrages peut varier sur tout le linéaire. La zone protégée peut s'étendre à des terrains très éloignés du cours d'eau et des digues. Les enjeux qui s'y trouvent sont parfois très importants et généralement mal répartis au regard des dangers liés à la digue. Les ouvrages eux-mêmes sont souvent très hétérogènes, âgés pour certains de plusieurs siècles, construits par élévations successives et généralement remaniés. Enfin, ils ne se trouvent que très rarement dans leur état de service et leur mise en charge se fait de manière brutale et non contrôlée.

Ainsi, tous ces caractères en font des ouvrages très complexes à analyser, encore plus que les barrages qui sont souvent en eau et qui peuvent être auscultés à longueur d'année.

Les méthodes d'analyse de risque des systèmes d'endiguement découlent bien sûr de celles des barrages et plus généralement des sites industriels, mais la spécificité de ces systèmes nécessite de nombreuses attentions particulières voire adaptatives.

Le présent guide, réalisé par l'Irstea, donnera des bases théoriques, techniques et pratiques solides pour la réalisation des études de dangers de systèmes d'endiguement. Celles-ci aideront le gestionnaire d'ouvrages dans la rédaction de son cahier des charges et dans le suivi du déroulement de l'étude, et le bureau d'études dans la mise en œuvre d'une démarche d'analyse de risque cohérente et intégratrice.

Jean MAURIN  
Expert individuel,  
Ancien référent digues national du ministère de l'Environnement



# Introduction

La réglementation sur la sécurité des ouvrages hydrauliques impose depuis le décret de décembre 2007 la réalisation d'**études de dangers**, entre autres pour les digues de protection contre les inondations. Une étude de dangers consiste de fait en une **analyse de risque** dans un format bien particulier, imposé par la réglementation (française) – si étude de dangers (EdD) et analyse de risque sont très proches, on distingue l'étude de dangers, qui a une définition réglementaire (française), de l'analyse de risque qui est une méthode/une discipline/une activité connue au plan international –, et complétée dans sa version définie par l'arrêté du 12 juin 2008 par une évaluation du risque et la proposition de mesures de réduction du risque. Le décret du 12 mai 2015 s'applique aux ouvrages de protection contre les inondations gérées par les collectivités compétentes en matière de gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations (GEMAPI). L'arrêté du 7 avril 2017 précise le contenu des études de dangers, celui-ci restant clairement centré sur une démarche d'analyse de risque et n'incluant plus l'obligation d'évaluation du risque ni de mesures de réduction du risque.

L'application de la démarche d'analyse de risque aux ouvrages hydrauliques, depuis son domaine initial de l'industrie, a requis un certain nombre d'adaptations en l'absence de toute méthodologie préexistante, tant au niveau national qu'international. Pour les digues et les systèmes de protection contre les inondations, ces adaptations ont nécessité des réflexions spécifiques, plus encore que pour les barrages, compte tenu de spécificités qui sont présentées dans le [Chapitre 4](#) de ce guide. Néanmoins, malgré cette absence de méthodologie initiale, l'ensemble de la profession, maîtres d'ouvrage et gestionnaires de digues, bureaux d'études spécialisés, services de l'État et organismes de recherche, s'est approprié cette question et reconnaît désormais, au-delà de la simple obligation réglementaire, une utilité forte et incontestable à la démarche :

- utilité d'abord pour mieux connaître et comprendre les ouvrages existants, la protection qu'ils apportent et la limite de celle-ci ;
- utilité ensuite comme un outil d'aide à la décision pour la gestion et l'amélioration de la prévention des inondations.

On peut même considérer qu'il s'agit de l'outil le plus riche, car le plus intégrateur des différentes composantes du risque :

- l'aléa naturel et ce qui peut le modifier ;
- la performance, les limites et les scénarios de défaillance du système de protection ;
- l'occupation de la zone protégée et sa vulnérabilité aux inondations ;
- et enfin les barrières de sécurité et les mesures de réduction du risque pouvant s'appliquer à ces différents niveaux.

Cette introduction présente maintenant les objectifs, le contenu et le contexte de réalisation de ce guide.

## Objectifs et contenu du guide

Ce guide a vocation à constituer un support aux différents types de missions relatives à l'analyse du risque d'inondation lié à un système endigué (*voir* définition de ce terme [Chapitre 2 : paragraphe 1.](#)) : la réalisation des études menées pour les gestionnaires de digues par les bureaux d'études spécialisés, l'analyse par les services de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques. Il peut également servir de base de réflexion aux autres organismes et particuliers en charge de la gestion du risque inondation, pour leur apporter des éléments de réflexions sur la spécificité de cette analyse dans un territoire où des digues existent ou sont envisagées. En effet, l'analyse de risque d'un système de protection contre les inondations prend en compte non seulement les ouvrages de protection, mais également l'ensemble de son environnement, côté eau (les aléas naturels

contre lesquels on veut se protéger et les éléments pouvant les modifier) et côté zone protégée (les enjeux protégés et leur vulnérabilité).

Son contenu vise :

- pour la [Partie I](#) :
  - à présenter les généralités et les concepts particuliers sur les systèmes de protection, qu'il est nécessaire de maîtriser pour pouvoir effectuer l'analyse de risque de ces systèmes,
  - à proposer une terminologie cohérente appliquée aux systèmes de protection, à leur environnement, aux interactions entre systèmes et environnement, et à l'étude du risque d'inondation associé ;
- pour la [Partie II](#) :
  - à expliciter les principes et les méthodes relatifs à l'analyse de risque des systèmes de protection,
  - à présenter et décrire l'ensemble des étapes permettant de mener à bien une analyse de risque de système de protection ainsi que les données d'entrée et de sortie et une ou plusieurs méthodes associées à ces différentes études élémentaires,
  - à présenter des principes adaptables à l'ensemble des configurations et contextes (fluvial, maritime, estuarien, torrentiel, etc.) de systèmes de protection contre les inondations ;
- pour la [Partie III](#) :
  - à faire le lien entre analyse de risque des systèmes de protection et étude de dangers réglementaire des digues,
  - à présenter l'intérêt de l'analyse de risque et des études de dangers pour l'aide à la décision relative aux systèmes d'endiguement,
  - à expliquer les spécificités liées aux études de dangers de digues ou de systèmes d'endiguement réglementaires et à leur réalisation (cahier des charges, rédaction), sur la base des principes présentés sur l'analyse de risque.

Cette première version du guide a vocation à être complétée et enrichie ultérieurement, entre autres en ce qui concerne :

- les exemples de méthodes utilisables pour la réalisation de certaines études élémentaires (*voir* [Chapitre 5 : paragraphe 3.](#)) ;
- la présentation de spécificités liées aux différents types de milieu et principalement le milieu marin.

## Contexte de la réalisation du guide

Le projet de réalisation d'un guide décrivant une méthodologie de réalisation des analyses de risque des systèmes de protection est né de la volonté commune de l'Irstea et de la DREAL Centre – Val-de-Loire de faciliter et de guider le travail des gestionnaires de digues et des bureaux d'études dans la réalisation des études de dangers de digues imposées depuis 2007 par la réglementation française sur la sécurité des ouvrages hydrauliques. Ce guide devrait également permettre aux services de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques de mieux pouvoir apprécier la pertinence des études de dangers qui leur sont soumises.

En effet, une étude de dangers réglementaire de digue – définie dans l'arrêté du 12 juin 2008 pour les digues classées au titre du décret du 11 décembre 2007, et en attente de définition pour celles qui seront réalisées par les collectivités compétentes GEMAPI – est une analyse de risque dans un format particulier et, antérieurement à la rédaction du présent guide, il n'existe pas de méthodologie complète de réalisation d'une telle étude, le « Guide de lecture d'une étude de dangers de digues » (en annexe de la circulaire du 16 avril 2010) définissant des attendus mais pas de mode de réalisation. Par ailleurs, les principes de l'analyse de risque appliqués tout d'abord dans le domaine

industriel et, depuis, transposés aux barrages sont difficilement applicables tels quels aux systèmes de protection, principalement à cause de la complexité de ces systèmes (fortes interactions entre les ouvrages et leurs environnements côté eau et côté zone protégée) et du caractère de long linéaire, le plus souvent fortement hétérogène, de l'objet digue.

L'équipe d'ingénieurs-chercheurs spécialisés en ouvrages hydrauliques de l'Irstea à Aix-en-Provence (unité de recherche RECOVER) conduit depuis de nombreuses années des recherches scientifiques et techniques liées aux barrages et aux digues. Elle produit entre autres des guides méthodologiques destinés à la profession [13, 16, 31, 48] et travaille en lien direct avec les maîtres d'ouvrage, l'administration centrale et les services déconcentrés de l'État et l'ingénierie.

La DREAL Centre – Val-de-Loire assure plusieurs rôles en lien avec les digues de protection contre les inondations : contrôle (service de l'environnement industriel et des risques – SEIR), coordination des services gestionnaires des digues appartenant à l'État (directions départementales des territoires – DDT) au niveau du Plan Loire et de la programmation des financements (service Loire et Bassin Loire-Bretagne – SLBLB) et appui aux DDT en expertise et assistance à maîtrise d'ouvrage (département des études et travaux de Loire – DETL).

La rédaction de ce guide s'inscrit dans le cadre d'une collaboration étroite entre ces deux acteurs, et représente l'aboutissement de plusieurs années de travaux.

La première phase du travail a consisté en la réalisation (échelonnée entre 2009 et 2013) des études de dangers des trois systèmes endigués (localement dénommés « vals » sur la Loire) de classe A : Orléans, Tours et Authion. Cette réalisation s'est accompagnée à l'avancement de développements méthodologiques. Ces études ont associé comme autre partenaire principal le Laboratoire régional des ponts et chaussées (LRPC) de Blois (partie du CETE Normandie Centre, aujourd'hui CEREMA) et plusieurs autres intervenants plus ponctuels, experts individuels ou bureaux d'études. La DREAL Centre – Val-de-Loire était à la fois maître d'ouvrage des études pour le compte des différentes DDT gestionnaires locaux, et bureau d'études agréé pour la production des EdD ; l'Irstea était responsable du pilotage de l'ensemble des aspects méthodologiques et le LRPC de Blois était en charge de différents aspects techniques relatifs à l'hydraulique, la géotechnique et la morphodynamique. Depuis septembre 2012, l'Irstea a continué d'apporter un appui méthodologique à la DREAL Centre – Val-de-Loire pour la réalisation de l'ensemble des 43 EdD de classes B et C de la Loire moyenne pour lesquelles la DREAL joue un rôle d'assistance à maîtrise d'ouvrage ou de maître d'ouvrage délégué vis-à-vis des DDT, maîtres d'ouvrage et gestionnaires locaux, qui sont aujourd'hui toutes achevées.

Le présent guide méthodologique a été rédigé dans le cadre de cette collaboration Irstea/DREAL Centre – Val-de-Loire sur les EdD de digues, de sa valorisation en matière de méthodologie et de sa diffusion. Il est largement fondé sur la base du travail initial accompli lors de la réalisation des études de dangers des systèmes de protection de Loire. Le DETL de la DREAL Centre – Val-de-Loire a également participé à l'écriture de certaines parties du guide et à la relecture d'ensemble.

Le guide est également fondé sur la participation des auteurs à différents projets récents centrés sur la thématique de la gestion des digues et du risque d'inondation, et en particulier avec l'International Levee Handbook (ILH) [9], le projet de recherche européen FP7 FloodproBE [18], le Référentiel technique digues maritimes et fluviales [40], et les travaux de deux groupes de travail sur l'évolution de la réglementation sur les EdD de digues pilotés par le ministère en charge de l'environnement.

Par ailleurs, pendant la phase de rédaction, l'Irstea a également participé, en collaboration avec leurs maîtres d'ouvrage, au pilotage et au suivi méthodologique d'EdD de plusieurs autres systèmes de protection en milieu fluvial, marin ou torrentiel.



# Partie I

## Systemes de protection contre les inondations

Cette partie du guide s'attache à définir la notion de système de protection, notamment du point de vue de sa gestion, de son contexte géographique, de sa constitution, ou encore de ses objectifs. Ce travail terminologique et conceptuel vise à faciliter et à structurer la démarche d'analyse de risque présentée en Partie II, cette dernière se devant d'être la plus rigoureuse possible.

Il existe environ 9 000 km de digues d'après les dernières estimations sur la base du recensement national, le long des cours d'eau et des littoraux français. Ces ouvrages, conçus et réalisés pour lutter contre le risque inondation, ne font en fait que le transformer : d'une part ils ne protègent pas contre tous les événements (limite à la protection), d'autre part ils sont susceptibles de dysfonctionner ou de rompre et souvent même, dans ce cas, d'aggraver le risque. Le risque dit naturel est donc en fait une combinaison de risque naturel et de risque technologique (rupture ou défaillance d'ouvrage).

Ces ouvrages s'organisent en systèmes de protection, assemblages d'ouvrages et d'autres éléments fonctionnant de manière conjointe pour défendre un territoire contre l'inondation. L'analyse du risque d'inondation lié aux digues doit donc s'effectuer à l'échelle de ces systèmes. Cette analyse a pour objet de caractériser les risques résiduels d'inondation dans la zone protégée compte tenu de la présence des digues.

# CHAPITRE 1

## Problématique des inondations et des digues en France

### 1. Inondations

Les inondations sont des phénomènes plus ou moins exceptionnels qui se caractérisent par la submersion temporaire de terrains.

Cette submersion peut avoir différentes causes :

- les précipitations ;
- les crues fluviales et torrentielles ;
- les phénomènes météo-marins (surcotes, tempêtes) ;
- les aléas technologiques (rupture de barrage) ;
- les remontées de nappe ;
- les séismes ou éboulements (causes de tsunamis en mer ou en milieu lacustre), etc.

Cette submersion peut causer différents types d'inondations :

- inondation par débordement de fleuve ou rivière ;
- inondation par remontée de nappe ;
- inondation par ruissellement ;
- inondation par débordement ou franchissement marin.

#### Remarque

Les deux termes « inondation » et « submersion » sont des synonymes ou quasi-synonymes, comme le montre la définition suivante extraite du « Grand dictionnaire » de l'Office québécois de la langue française : « *Inondation* : *Submersion par l'eau débordant du lit d'un cours d'eau ou d'autres étendues d'eau, ou accumulation d'eau provenant de drainages sur des régions qui ne sont pas normalement submergées* ». Certains emploient « submersion » pour les phénomènes d'origine marine et « inondation » pour les phénomènes d'origine fluviale, ce qui introduit une ambiguïté entre la cause et l'effet. Le Tableau 1-I présente le vocabulaire lié au constat d'une inondation ou submersion et sa cause naturelle, en milieu marin, fluvial ou torrentiel.

**Tableau 1-I.** Terminologie liée au phénomène d'inondation.

Phénomène	Fluvial ou torrentiel	Maritime	Autres causes
Événement naturel	Crues	Tempêtes, surcotes, tsunamis, etc.	Remontée de nappe, etc.
Impact sur les lieux habités ou occupés par l'homme	Inondation (parfois submersion)	Submersion (parfois inondation)	Inondation

Nous proposons donc d'utiliser le mot inondation dans tous les cas, quelle que soit l'origine de la submersion des terrains. Ainsi, la fonction de tous les types de digues peut être regroupée sous le vocable de « digue de protection contre les inondations », ce qui évite la distinction souvent employée auparavant entre digue de protection contre les inondations (fluviales) et digue de protection contre les submersions (marines).

## 2. Dignes et autres ouvrages de protection contre les inondations

Pour diminuer la fréquence et/ou l'intensité des phénomènes hydrauliques rares et exceptionnels et ainsi protéger leurs activités et leurs biens, les hommes ont aménagé, en France parfois dès le Moyen Âge, des ouvrages en élévation par rapport au terrain naturel le long de nombreux cours d'eau, torrents et littoraux.

D'autres ouvrages ayant in fine une fonction de protection contre les inondations ont été établis pour un autre but principal, comme le transport (routes, voies ferrées, canaux), la lutte contre l'érosion, ou encore la poldérisation. Comme il sera détaillé par ailleurs dans le guide, les fonctions de protection contre l'inondation et contre l'érosion sont généralement complémentaires, les deux phénomènes naturels étant liés aux actions de l'eau et en interrelation. Pour autant, il est important de bien les distinguer.

Les digues de protection sont des ouvrages, dont la longueur est grande devant les autres dimensions, surélevés par rapport au terrain naturel et destinés à faire obstacle au passage de l'eau. Avec les barrages écrêteurs de crues et les aménagements liés au ralentissement dynamique, ils sont les principaux aménagements de la protection contre les inondations. La protection est l'une des activités qui constituent la politique nationale de prévention contre les inondations et plus généralement contre les risques naturels :

1. connaissance des aléas et des enjeux ;
2. surveillance, prévision, vigilance et alerte ;
3. préparation aux situations d'urgence ;
4. éducation et information préventive des citoyens ;
5. réglementation et plan de prévention des risques (PPR) ;
6. réduction de la vulnérabilité ;
7. **protection** (systèmes de protection, barrages écrêteurs et autres ouvrages dans le cas des inondations) ;
8. résilience et mise en sûreté ;
9. mémoire et retour d'expérience ;
10. adaptation aux impacts attendus du changement climatique.

La construction d'ouvrages de protection contre les inondations modifie grandement la dynamique des milieux naturels dans lesquels ils sont implantés. En effet, sur les cours d'eau, les endiguements concentrent les écoulements dans la partie du lit majeur non protégée, ce qui accroît localement les vitesses, peut augmenter les niveaux sur une rive opposée et/ou, en amont, diminue l'écrêtement et donc augmente les débits en aval et accélère la propagation des pointes de crues. Sur les littoraux, les digues marquent parfois une opposition forte à la tendance de la mer de gagner sur la côte, voire ont été établies pour gagner sur la mer (poldérisation). Les digues sont donc soumises à de fortes actions hydrauliques dont l'intensité est la réponse même à l'opposition qu'elles offrent face à la mer ou aux cours d'eau.

Il résulte de cette situation que les phénomènes hydrauliques issus des éventuelles ruptures des digues sont généralement de plus fortes intensités que les inondations

auxquelles les zones protégées par les digues auraient été exposées à l'état naturel, en l'absence de ces dernières. Cette plus forte intensité résulte :

- du caractère catastrophique de la rupture de l'ouvrage qui libère d'un seul coup l'énergie jusque-là contenue par celui-ci ;
- de la difficulté du ressuyage de la zone protégée liée à l'existence, même en état dégradé, de l'ouvrage.

En parallèle, la présence de digues peut engendrer un sentiment de sécurité pas toujours fondé ou même une méconnaissance du risque. À long terme, les digues peuvent faire oublier jusqu'à l'existence du risque et même leur existence propre. Cela a été démontré lors des premières inondations « modernes » mettant en jeu des digues (inondations de Camargue de l'hiver 1993-1994), où les responsables ont « redécouvert » les digues à l'occasion de leurs défaillances. Du fait de ce sentiment de (fausse) sécurité, ou par choix délibéré d'aménageurs du territoire, la présence de digues peut encourager la concentration des populations et des activités humaines dans les zones protégées, celles-ci étant alors improprement supposées non inondables. Dans cette situation, la potentialité de rupture ou même de simple dépassement des digues peut alors représenter un risque important pour les enjeux présents dans les zones protégées. Tout le monde a en mémoire les victimes de La Faute-sur-Mer lors de la tempête Xynthia de février 2010, noyées dans leurs habitations, pourtant protégées par une digue qui a été dépassée sans rompre.

La présence de digues présente donc un fort vecteur de risque pour les populations et leurs activités, mais celui-ci est encore mal apprécié dans l'inconscient collectif.

### 3. Inondations sans défaillance en présence de digues

Même en l'absence de défaillance d'un système de protection, il est possible que des inondations se produisent. Ces inondations, qui correspondent à un fonctionnement « normal » du système, vont généralement se produire par :

- *surverse* de l'étendue d'eau contre laquelle le système a été conçu (écoulement au-dessus d'une partie de l'ouvrage, avec une charge permanente) ;
- *franchissement* de l'étendue d'eau contre laquelle le système a été conçu (passage d'eau intermittent au-dessus de l'ouvrage, lié à l'action de vagues) ;
- *contournement* de l'étendue d'eau contre laquelle le système a été conçu (inondation de la zone protégée par un secteur non muni d'ouvrage, par exemple à l'aval d'un système de protection non fermé) ;
- d'autres eaux que celles de l'étendue d'eau contre laquelle le système a été conçu (ruissellement du bassin-versant de la zone protégée, remontée de nappe, etc.).

### 4. Nécessité d'une bonne gestion des digues

Le recensement et la connaissance des différentes digues de protection contre les inondations ne vont pas sans difficultés. En effet, pouvant être très anciens et avoir connu de multiples évolutions et modifications, ces ouvrages à longs linéaires sont généralement mal connus du point de vue de leur conception et de leur réalisation. Ils présentent souvent de grandes hétérogénéités dans leurs compositions structurelles, peuvent être mal conçus ou construits, ce qui les rend parfois défaillants du point de vue de la protection qu'ils sont censés offrir contre les inondations.

De plus, l'identification des propriétaires et surtout l'émergence de gestionnaires de ces ouvrages se sont souvent avérées difficiles, depuis la circulaire d'août 2003 sur le contrôle par l'État des digues de protection. En effet, les propriétaires des digues étant par défaut ceux des parcelles sur lesquelles elles sont implantées, il existe un très grand nombre de propriétaires de tronçons de digues en France. Si dans certains contextes, ceux-ci ont eu la volonté de s'associer pour organiser une gestion cohérente et concertée de leurs ouvrages à l'échelle d'une portion de cours d'eau ou de littoral, plus rarement de « système » au sens de cohérence de fonction hydraulique, et même si ce rôle a parfois été joué par l'État ou une collectivité locale, dans bien des cas, ces propriétaires sont encore esseulés et leurs digues laissées à l'abandon, ou à peine « gérées » par une structure mal adaptée sur le plan des moyens et donc des compétences.

La nouvelle compétence de gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations (GEMAPI) confiée aux communes et à leurs établissements publics de coopération intercommunale à fiscalité propre doit à terme remédier à cette situation, après une période de transition et de transfert de responsabilité des ouvrages (*voir* [6] pour plus d'informations sur la prise en compte des ouvrages de protection dans l'exercice de la compétence GEMAPI).

De nombreuses digues de protection contre les inondations du territoire français sont ainsi encore peu ou pas suivies et entretenues et, donc, aujourd'hui en mauvais état, ou au mieux dans un état inconnu. Le risque de rupture de ces ouvrages, lors d'événements hydrauliques rares et exceptionnels tels que des crues, des tempêtes ou encore des tsunamis, toujours existant même pour des ouvrages neufs ou bien entretenus, en est alors d'autant plus important, y compris pour des événements de plus faible amplitude. Dans ces conditions, l'organisation d'une gestion efficace des digues s'avère indispensable. Celle-ci passe par la mise en place de structures de gestion pérenne de ces ouvrages.

Afin de généraliser la bonne gestion de ces ouvrages et la diminution du risque qu'ils impliquent, les évolutions réglementaires, et notamment les études de dangers, imposent désormais aux gestionnaires de digues la réalisation d'études visant à identifier et caractériser la sûreté des digues et à évaluer le risque associé, dans le but d'orienter les activités de gestion. Les méthodes de diagnostic et d'analyse de risque constituent alors des outils d'aide à la décision incontournables pour les gestionnaires.

## CHAPITRE 2

# Caractéristiques des systèmes de protection contre les inondations

Les digues sont associées, de fait, au sein de systèmes de protection. Le présent chapitre expose et détaille les concepts liés à ces systèmes.

### 1. Définitions

Le système de protection contre les inondations et l'étude des risques associés constitue l'objet du présent guide. Cette section vise à définir cette notion de système de protection et celles que nous avons choisi d'introduire pour l'analyser dans le cadre de la démarche d'analyse de risque que l'on se propose d'exposer.

Un *système de protection* correspond à l'ensemble d'ouvrages<sup>1</sup> et parfois d'autres éléments de l'environnement<sup>2</sup> ayant pour but ou pour effet de protéger un territoire naturellement inondable **contre les inondations issues d'une ou plusieurs étendues d'eau** (mer, cours d'eau, lacs, etc.).

#### Remarques

Le système de protection correspond aux éléments en élévation par rapport au terrain naturel dont la présence empêche la propagation des eaux d'inondation sur une partie de la zone naturellement inondable. Ses extrémités correspondent :

- soit à des éléments du relief naturel ou à des remblais de taille suffisamment importante pour ne pas risquer la rupture (coteaux, éperons rocheux, tertres naturels ou anthropiques, etc.) ;
- soit à des territoires non protégés, où l'inondation se produit en priorité (cas notamment des systèmes ouverts en aval).

La *protection contre les inondations*, par des opérations ou dispositifs, peut s'envisager soit comme **absolue** (absence d'inondation jusqu'à un niveau d'événement hydraulique défini), soit de manière **relative**, comme une diminution de l'aléa d'inondation en matière de probabilité, d'intensité, de durée et/ou de temps d'arrivée (également jusqu'à un niveau d'événement défini). Cette diminution est rarement homogène sur le territoire protégé.

1. Digues et systèmes de protection, mais aussi barrages écrêteurs de crues. Ces derniers ne sont pas l'objet du présent document.

2. On trouvera aux [paragraphe 5. \(5.2. à 5.4.\)](#) une typologie des éléments pouvant composer un système de protection.



### Remarque

La notion **réglementaire** de la protection (décret du 12 mai 2015<sup>3</sup>) est généralement interprétée comme une protection absolue (garantie jusqu'au niveau de protection) contre le cours d'eau et/ou la mer vis-à-vis desquels le système de protection protège des inondations à l'exception toutefois des franchissements dès lors qu'ils sont sans dangers.

Un système de protection prend place au sein d'un système hydrographique ou littoral pour en modifier localement le comportement hydraulique lors d'événements plus ou moins rares, dans l'intérêt d'une zone du territoire naturellement inondable qui se trouve alors protégée contre les inondations (issues d'une ou plusieurs étendues d'eau : mer, fleuves, rivières, torrents, lacs, etc.), jusqu'aux différents niveaux de protection (voir Chapitre 3 : paragraphe 3.1.) qui caractérisent le système. Nous appelons cette zone la **zone protégée** (ZP). La limite de protection complète (absence de venues d'eau) est généralement associée à des probabilités d'événements naturels de l'ordre de  $10^{-2}$  (variables entre  $10^{-1}$  et  $5 \cdot 10^{-3}$ , plus rarement  $10^{-3}$ ) ; cet ordre de grandeur des niveaux de protection est quasi général dans le monde, à l'exclusion des digues de polders les plus importantes aux Pays-Bas :  $P = 10^{-4}$  voire  $10^{-5}$ .

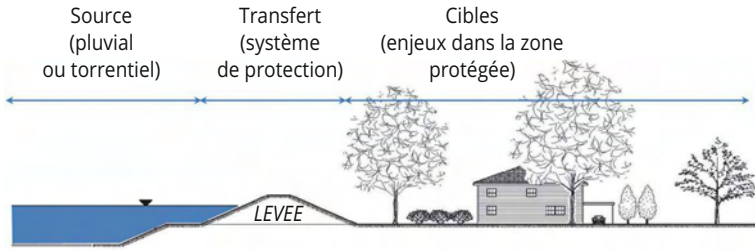
### Remarques

- D'un point de vue **technique**, le périmètre d'une zone protégée dépend directement de la localisation du linéaire de premier rang du système de protection, du niveau de protection (voir Chapitre 3 : paragraphe 3.1.), ainsi que de la topographie du territoire naturellement inondable dans lequel la zone protégée s'inscrit :
  - une zone protégée peut se trouver subdivisée en différentes sous-zones protégées séparées sur le plan hydraulique par des éléments naturels ou artificiels (susceptibles de rompre ou de défaillir et de laisser se propager les eaux d'inondation dans d'autres parties de la zone protégée). Cette zone ne forme néanmoins qu'une seule zone protégée ;
  - pour un système de protection ouvert et dans le cas d'une protection absolue, l'amont de la zone de remous pour un aléa de crue correspondant au niveau de protection (voir Chapitre 3 : paragraphe 3.1.) dessine une limite de la zone protégée.
- D'un point de vue **réglementaire**, le décret du 12 mai 2015 permet à la structure en charge de la compétence GEMAPI de décider des limites du territoire que ses ouvrages protègent. Elle peut donc décider d'écarter une partie de la zone qui serait considérée comme protégée d'un point de vue **technique**.

Dans l'International levee handbook (ILH) [9], et à la suite du projet Floodsite [20], on parle pour l'analyse intégrée du risque inondation, de structuration de type **SPR** (*source, pathway, receptors*), modèle utilisé dans d'autres domaines (tels que le risque sanitaire ou de pollution). Dans l'application de ce modèle au risque d'inondation des systèmes endigués, le « pathway » correspond au système de protection. Il est intercalé entre la « source », correspondant aux étendues d'eau à son contact, et les « receptors », correspondant à la zone protégée et aux enjeux qui la composent. La Figure 2-1 illustre ce principe, avec lequel notre approche (milieu eau/système de protection/zone protégée) [17] est donc cohérente, qui facilite les analyses ultérieures.

Dans notre démarche d'analyse, nous appelons **système endigué** le système formé par l'addition d'un système de protection et de la zone qu'il protège des inondations.

3. Décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques.



**Figure 2-1.** Le modèle *source, pathway, receptors* (source, transfert, cibles) (Source : USACE [9]).

Le décret du 12 mai 2015 définit pour sa part un *système d'endiguement* comme étant composé d'ouvrages uniquement, à l'exclusion de tout élément naturel, ce qui n'est pas contradictoire. L'article R. 214-116-III du même décret précise également que « pour un système d'endiguement [...], l'étude de dangers porte sur la totalité des ouvrages qui le composent [...], comprend un diagnostic approfondi de l'état des ouvrages et prend 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 ». Ce texte précise donc bien que la protection apportée par un système d'endiguement doit être analysée en intégrant le rôle des éventuels éléments naturels qui composent le système de protection.

### Remarque

Depuis la loi MAPTAM du 27 janvier 2014 (article L. 566-12-1-II), les ouvrages ayant une autre vocation que la protection contre les inondations, mais qui y contribuent, ne sont plus exclus du périmètre du système d'endiguement.

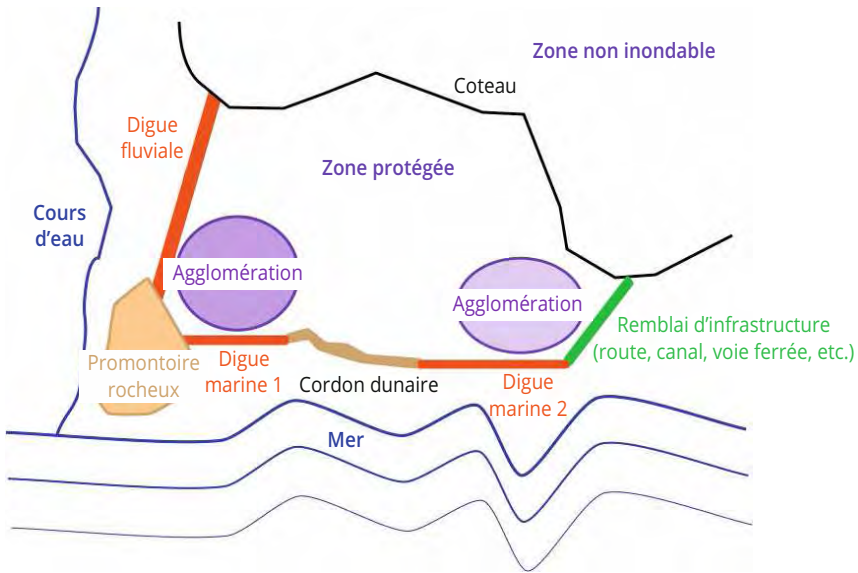
Donc un système de protection est constitué d'un système d'endiguement au sens de la réglementation, auquel peuvent s'ajouter des éléments naturels, comme le montre le système (fictif) représenté en Figure 2-2. Les éventuels ouvrages à vocation autre que la protection mais qui y participent néanmoins sont destinés à être intégrés au parc d'ouvrages géré dans ce but par l'EPCI (établissement public de coopération intercommunale) à compétence GEMAPI.

Nous appelons *milieux eau* les différentes sous-parties du système hydrographique en contact avec le système de protection étudié (fluviaux, marins, estuariens, torrentiels, etc.). Les milieux « eau » et la « zone protégée » constituent les principales composantes de l'*environnement du système de protection*. L'environnement du système intègre toutefois l'ensemble des éléments qui se trouvent en interaction avec le système, ces éléments constituant des sources potentielles d'actions sur celui-ci (paragraphe 2.).

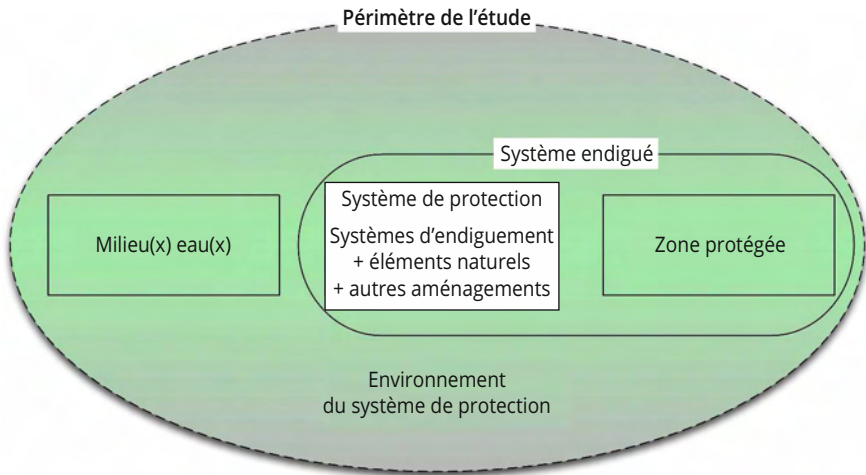
La Figure 2-3 illustre les différents concepts présentés, en les replaçant dans le périmètre de l'analyse du risque d'un système de protection.

L'analyse du risque d'inondation d'un système endigué correspond à l'analyse du risque d'inondation, par les milieux eaux considérés, de la zone protégée, en tenant compte de la protection apportée par le système de protection, de ses limites et de ses éventuelles défaillances ; les inondations ayant d'autres sources (ruissellement, remontée de nappe, affluents, accidents divers dont ruptures de barrage, etc.) ne sont a priori pas étudiées dans cette analyse.

Le périmètre de l'analyse du risque d'inondation d'un système endigué comprend a minima la zone protégée, le système de protection et le milieu eau contre lequel l'endiguement protège.



**Figure 2-2.** Système de protection composé de digues, d'un ouvrage ayant une autre vocation que la protection et d'éléments naturels (Source : R. Tourment)



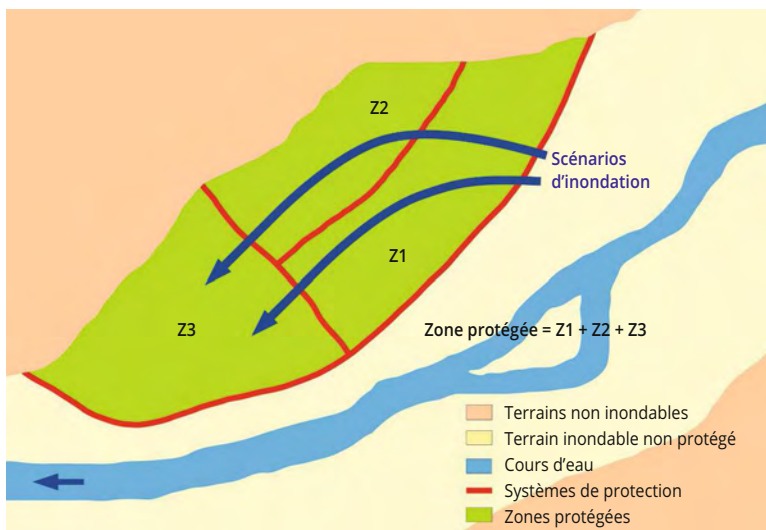
**Figure 2-3.** Le périmètre de l'analyse de risque intègre le système endigué ainsi que l'ensemble de l'environnement du système de protection (en vert) (Source : R. Tourment).

Un système endigué est souvent au contact d'un milieu eau unique (fluvial, marin, estuarien, torrentiel, etc.) mais peut également se trouver au contact de plusieurs milieux eau de même nature (par exemple, deux cours d'eau différents) ou de différente nature (par exemple, un cours d'eau et un milieu marin).

De la même manière, il peut y avoir des éléments hydrographiques (affluents notamment du milieu eau) dans la zone protégée, contre lesquels le système de protection ne joue pas de rôle de protection (voir Figure 2-44).

La notion de *périmètre hydrauliquement cohérent*, vis-à-vis de l'analyse de la protection contre les inondations, est centrale pour la détermination du périmètre d'un système de protection et des limites de la zone protégée qu'il dessine.

Le périmètre d'un système de protection est considéré hydrauliquement cohérent lorsqu'il intègre l'ensemble de la zone effectivement protégée (au regard de la topographie et du contexte hydraulique : fluvial, marin, torrentiel, estuarien) et qu'il permet l'analyse complète (remontant jusqu'aux initiations) de l'intégralité des scénarios d'inondation susceptibles d'impacter cette zone (Figure 2-4).



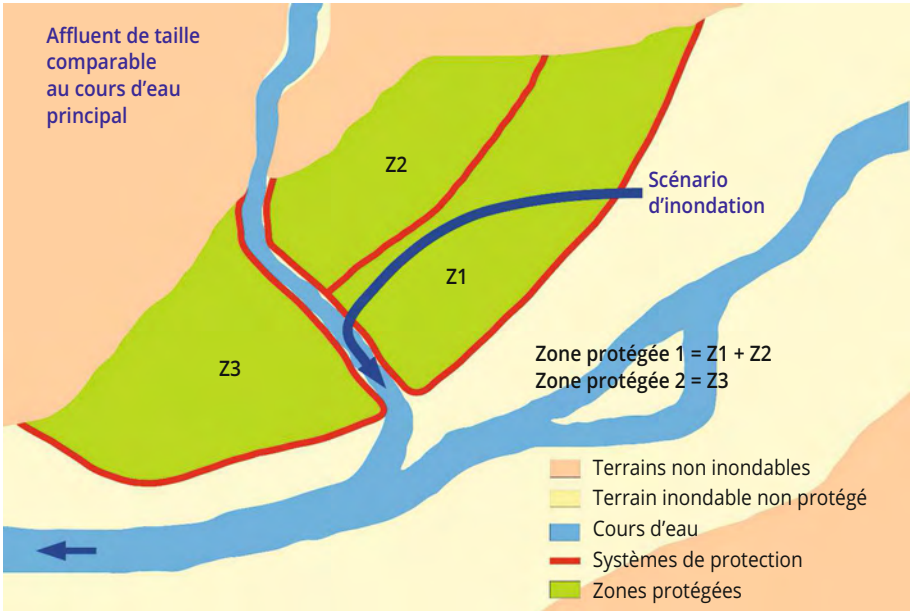
**Figure 2-4.** L'inondation des zones 2 et 3 dépend en partie de l'inondation de la zone 1. Les zones 1, 2 et 3 ne forment donc qu'une seule zone protégée par un unique système de protection hydrauliquement cohérent (Source : B. Beullac).

De ce point de vue, le système endigué élémentaire (une zone protégée unitaire et son système de protection) correspond à l'échelle minimale pour mener des analyses hydrauliquement cohérentes des aménagements de protection contre les inondations (analyses fonctionnelles, analyses de la défaillance, analyses de risque, diagnostics, etc.). En effet, l'analyse de la protection devient incohérente à l'échelle de parties de systèmes endigués (et/ou de portions de systèmes de protection), puisqu'elle empêche l'analyse complète de certains scénarios d'inondation envisageables. À l'inverse, l'analyse de la protection à des échelles plus globales (par exemple, à l'échelle de plusieurs systèmes endigués élémentaires, un « système de systèmes ») peut rester tout à fait cohérente, mais devient particulièrement complexe du fait des nombreux scénarios d'inondations envisageables qu'elle implique.

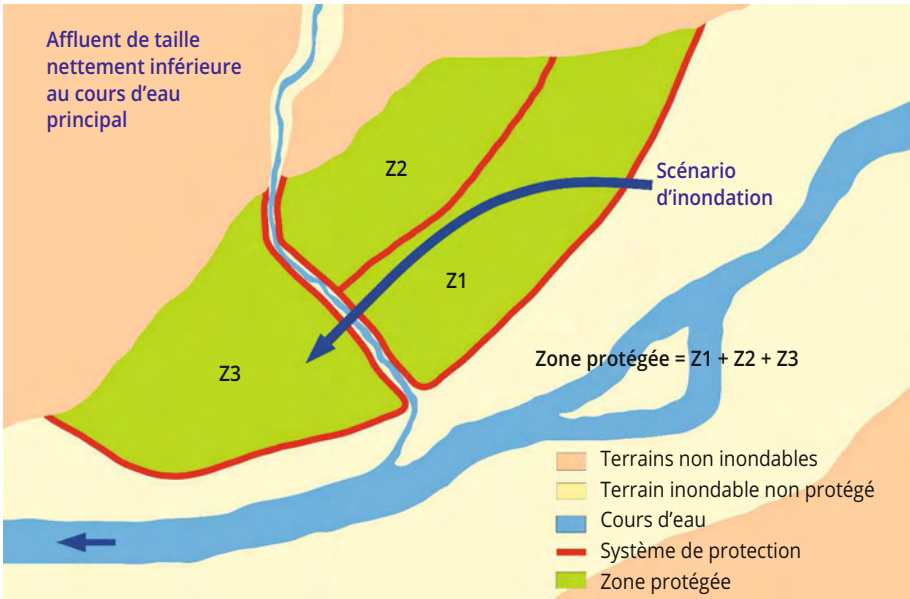
Dans le présent guide, les notions de « système de protection » et de « zone protégée » sont employées du point de vue du système endigué élémentaire.

### Cas particulier

Un cours d'eau secondaire endigué traversant une zone naturellement inondable protégée contre les inondations peut conduire à définir deux systèmes de protection élémentaires et deux zones protégées associées (Figure 2-5). Mais suivant la taille relative de ce cours d'eau secondaire par rapport au cours d'eau principal, et en particulier si cette taille est nettement inférieure (en termes de dimensions et de débit), il peut être cohérent de n'identifier qu'un seul système de protection élémentaire (Figure 2-6). De la même manière, un fleuve côtier important délimitera sur ses deux rives des systèmes indépendants, alors qu'un fleuve côtier de faible importance (ramenée à la taille des zones inondables) ne sera qu'un des éléments d'un système de protection englobant ses deux rives.



**Figure 2-5.** Un cours d'eau secondaire endigué traversant une zone naturellement inondable protégée conduit généralement à l'identification de deux systèmes de protection élémentaires juxtaposés (Source : B. Beullac).



**Figure 2-6.** Un cours d'eau secondaire endigué de faible importance relative au cours d'eau principal traversant une zone naturellement inondable protégée conduit à l'identification d'un seul système de protection élémentaire (Source : B. Beullac).

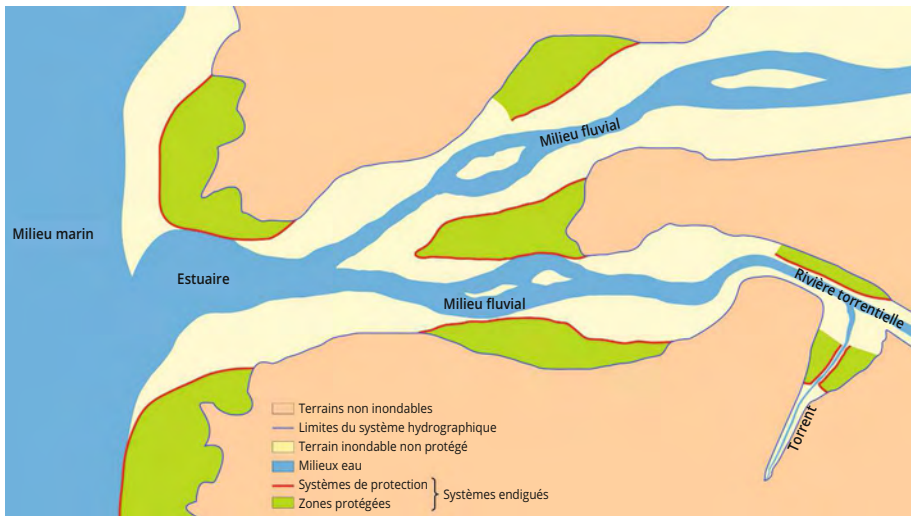
## 2. Contextes environnementaux, actions et mécanismes de détérioration associés

### 2.1. Généralités sur les contextes environnementaux

L'environnement d'un système de protection se compose des milieux eau pouvant l'impacter, de la zone protégée qu'il définit (*voir* paragraphe 1.) et des autres milieux avec lesquels il se trouve en contact.

#### 2.1.1. Milieux « eau »

Comme le montre la *Figure 2-7*, au sein du système hydrographique, un système de protection peut se trouver au contact de différents types de milieux eau et parfois au contact de plusieurs milieux eau. La *Figure 2-7* illustre le cas de huit systèmes de protection situés dans des milieux marin, estuarien, fluvial et torrentiel.



**Figure 2-7.** Des systèmes endigués aux milieux eau variés (Source : B. Beullac).

Dans ces différents contextes, de manière générale, les fonctions principales (*voir* Chapitre 5 : paragraphe 1.2.1.) d'un système de protection sont :

- la protection contre les inondations ;
- la maîtrise de la morphologie du milieu eau en interaction avec ce système.

La première est prépondérante dans le cadre de l'analyse de risque des systèmes de protection contre les inondations, car ce type d'étude vise la caractérisation du risque d'inondation par insuffisance ou défaillance du système de protection. Néanmoins, concernant le risque associé aux ouvrages, la seconde peut revêtir une importance égale voire supérieure à la première dans des environnements morphologiquement très actifs (torrents, mer principalement).

Les différents milieux eau sont principalement caractérisés par leurs spécificités hydrauliques et morphodynamiques mais aussi par la nature des éventuelles activités humaines (navigation, extraction de granulats, agriculture, etc.) et de la vie végétale et animale (végétation ligneuse, animaux fouisseurs, etc.) qui y prennent place.



Les principales familles de milieux eau dans lesquels sont implantés des systèmes de protection et ayant des caractéristiques propres sont :

- les milieux torrentiels ;
- les milieux fluviaux ;
- les milieux marins.

L'ensemble des caractéristiques de ces contextes définit la majeure partie des actions qui sont envisageables sur les systèmes de protection (*voir paragraphe 2.2.*).

Des milieux que l'on peut qualifier de « mixtes » combinent des influences ou des caractéristiques de plusieurs des types précédents :

- les milieux estuariens, combinant des influences marines et fluviales ;
- les milieux lacustres, pouvant combiner des caractéristiques fluviales (par exemple, les crues) et marines (par exemple, les tempêtes) ;
- les rivières torrentielles, combinant des caractéristiques de type fluvial et torrentiel.

Cette typologie est bien sûr indicative, et la caractérisation précise du ou des milieux eaux liés à un système donné doit être réfléchiée et analysée au cas par cas.

La [Figure 2-7](#) permet également de constater que d'autres systèmes endigués peuvent se trouver implantés dans les milieux « eau » au contact d'un système de protection étudié. Ces systèmes endigués ont un impact sur la nature des actions hydrauliques et morphodynamiques qui s'appliquent sur le système de protection étudié.

### 2.1.2. Milieux « zone protégée »

Les systèmes de protection sont également au contact des zones qu'ils protègent. Les principales actions qui en sont issues sont liées aux activités humaines (voies de transport, activités de loisir telles que le cyclisme, la randonnée pédestre, la pêche, les sports mécaniques, etc., implantation d'ouvrages, etc.) et au milieu naturel (végétation ligneuse, animaux fouisseurs, etc.) qui y prennent place, et qui peuvent déborder sur les systèmes de protection. Leurs caractéristiques peuvent être source d'actions significatives sur le système de protection et causer sa détérioration.

### 2.1.3. Autres milieux en contact

Enfin, l'environnement d'un système de protection peut également se définir au travers du milieu souterrain (aspects géologiques, hydrogéologiques, sismologiques), du milieu atmosphérique (aspects climatiques : précipitations, températures, vents, etc.) et des milieux terrestres non inondables (aspects phénomènes gravitaires notamment : chute de blocs, avalanches, etc., pouvant impacter le système de protection) avec lesquels il se trouve interfacé. Leurs caractéristiques peuvent être source d'actions significatives sur le système de protection et causer sa détérioration.

La [Figure 2-8](#) illustre par exemple le cas d'un système de protection torrentiel de montagne, un contexte dans lequel le milieu atmosphérique et le milieu terrestre non inondable sollicitent particulièrement les ouvrages (forte amplitude thermique, phénomènes gravitaires, etc.).

## 2.2. Actions appliquées sur les digues

Les **actions** correspondent aux phénomènes pouvant s'appliquer à un ouvrage et provoquer des mouvements ou des déformations ou des érosions sur ou dans un ouvrage, ou encore des effets sur l'hydraulique interne.



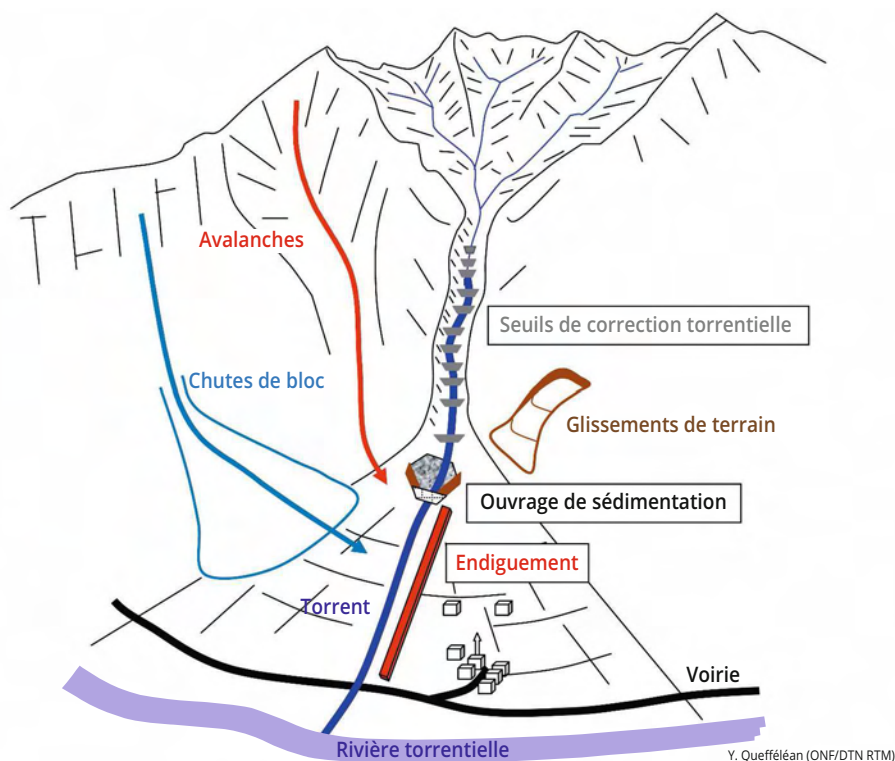


Figure 2-8. Exemple de système de protection en milieu torrentiel (Source : Y. Quefféléan, ONF-RTM).

En matière de digues et plus généralement d'ouvrages hydrauliques, le terme **sollicitation** est très fréquemment utilisé pour désigner les actions et les effets d'actions sur les ouvrages. Par souci de cohérence avec la terminologie de référence du domaine du génie civil exposée plus bas, seul le terme « action » est utilisé dans le présent guide. Nous conservons néanmoins la terminologie « événement de sollicitation », ne prêtant pas à ambiguïté.

Selon l'Eurocode 1 « bases de calcul et actions sur les structures » [1], le terme action désigne :

- l'ensemble de forces (charges) appliquées à l'objet considéré (action directe) ;
- l'ensemble de déformations ou accélérations imposées, résultant par exemple de changements de température, de variations du taux d'humidité, de tassements différentiels ou de tremblements de terre (action indirecte).

Les **effets des actions** correspondent par exemple aux efforts internes, moments, contraintes ou déformations, qui peuvent s'appliquer à l'ensemble ou à des parties de l'ouvrage considéré.

Au-delà de certains seuils de résistance (en fonction des matériaux), les effets des actions peuvent engendrer des **mécanismes** de détérioration des matériaux constituant l'ouvrage.

La présente section définit les différents types d'actions pouvant se produire sur et dans les digues. Ces actions sont notamment décrites du point de vue des mécanismes de détérioration qui peuvent en résulter. La description de ces divers mécanismes de détérioration fait l'objet du [paragraphe 2.3](#).

**Remarque**

Il faut bien faire la distinction entre les *actions* (définies ci-dessus) et les *situations* qui concernent les conditions dans lesquelles se réalisent les actions. Les situations peuvent évoluer du fait de l'effet des actions. Par exemple, pour un système de protection, la morphologie du milieu eau constitue un paramètre de situation. Celui-ci conditionne en partie la nature des actions hydrauliques sur l'ouvrage et le milieu eau, et peut évoluer du fait des phénomènes morphodynamiques.

**2.2.1. Actions liées au comportement hydraulique des milieux eau**

Les différentes actions hydrauliques envisageables sur les ouvrages résultent principalement du contact du système de protection avec le milieu eau. Elles peuvent avoir divers types d'effets conduisant à des mécanismes de détérioration (Tableau 2-I).

**Tableau 2-I.** Exemple de classification des différents types d'actions hydrauliques sur les digues, leurs effets et les mécanismes de détérioration associés.

Actions	Effets des actions	Mécanismes de détérioration
Niveau d'eau (ou charge hydrostatique)	Pressions interstitielles	Glissements (par exemple, superficiels/rotationnels)
	Circulations internes d'eau et contraintes associées	Érosion interne
	Contraintes de cisaillement	Glissements translationnels
Courants ou écoulements côté eau	Contraintes d'arrachement	Érosion externe du parement
		Affouillement
Courants ou écoulements de surverse	Contraintes d'arrachement	Érosion externe par surverse (du pied de l'ouvrage côté ZP, du talus et/ou de la crête)
Vagues (y/c effets du franchissement)	Contraintes d'impact	Éclatement
	Contraintes d'arrachement	Érosion externe

Ces actions sont :

- le niveau d'eau (ou charge hydrostatique) : selon le contexte, il peut être permanent (par exemple, plans d'eau, régime moyen pour un cours d'eau), variable (par exemple, marées), ou « rare ou accidentel » (par exemple, crues, décrues, tempêtes) ;
- les courants ou écoulements côté eau : ils varient selon le contexte et peuvent être permanents (par exemple, régime moyen pour un cours d'eau), variables (par exemple, courants de marées en zone estuarienne ou localement en milieu marin), ou « rares ou accidentels » (par exemple, crues, tempêtes) ;
- les courants ou écoulements de surverse : ils sont généralement « accidentels » (par exemple, crues ou tempêtes) ;
- les vagues : selon le contexte, elles peuvent être variables (par exemple, à marée haute, liées au passage de bateaux), ou « rares ou accidentelles » (par exemple, lors de tempêtes, de tsunamis).

**2.2.2. Prépondérance des actions hydrauliques selon les types de milieu eau**

Les différents types d'actions hydrauliques sur le système de protection sont plus ou moins prépondérants selon la nature des milieux eau. Le Tableau 2-II propose un point

de vue sur cette prépondérance, valable de manière moyenne et générale seulement. La quantification précise devra nécessairement être faite sur la base d'études spécifiques au système de protection considéré.

**Tableau 2-II.** Prépondérance des types d'actions hydrauliques selon les milieux eau.

	Niveau d'eau (ou charge hydrostatique)	Courants ou écoulements côté eau	Courants ou écoulements de surverse	Vagues
Milieu fluvial	+++	+++	+++	+ / ++
Milieu marin (à marée)	++	+ / ++	++	+++
Milieu marin (sans marée)	++ / +++	+	++ / +++	+++
Milieu estuarien	++	++	+++	++
Milieu torrentiel	+ / ++	+++	++	+ / ++
Milieu lacustre	+++	+	+	++

### 2.2.3. Actions autres qu'hydrauliques

Au-delà des actions hydrauliques précédemment décrites, d'autres actions peuvent impacter les systèmes de protection. Ces actions autres qu'hydrauliques dépendent du contexte anthropique et naturel de chaque ouvrage.

Ce sont notamment les actions dues :

- aux éléments transportés par les écoulements côté eau : sédiments (transport solide), glace, bois, bateaux, etc. ;
- aux activités humaines sur les ouvrages : circulation de véhicules, activités de loisir, actes de malveillance, bâtis, canalisations, etc. ;
- aux phénomènes naturels gravitaires : chutes de blocs, avalanches, glissements de terrains, etc. ;
- à l'activité sismique ;
- à l'activité souterraine : phénomènes karstiques, circulations d'eaux souterraines, etc. ;
- au développement de végétation ligneuse : racines, risque de basculement, etc. ;
- à l'activité des animaux fouisseurs : blaireaux, lapins, etc. ;
- aux phénomènes climatiques et météorologiques : précipitations, gel/dégel, sécheresse, etc. ;
- etc.

Des exemples de causes et d'effets associés à ces actions sont exposés dans le [Tableau 2-III](#).

**Tableau 2-III.** Exemple non exhaustif d'effets et de mécanismes associés pour des actions autres qu'hydrauliques.

Actions	Effets des actions	Mécanismes de détérioration
Éléments transportés par les écoulements côté eau	Contraintes d'impact	Éclatement
	Contraintes d'arrachement	Érosion externe
Activités humaines sur l'ouvrage	Charge verticale	Tassement
	Contraintes d'arrachement	Érosion externe

**Tableau 2-III.** (Suite).

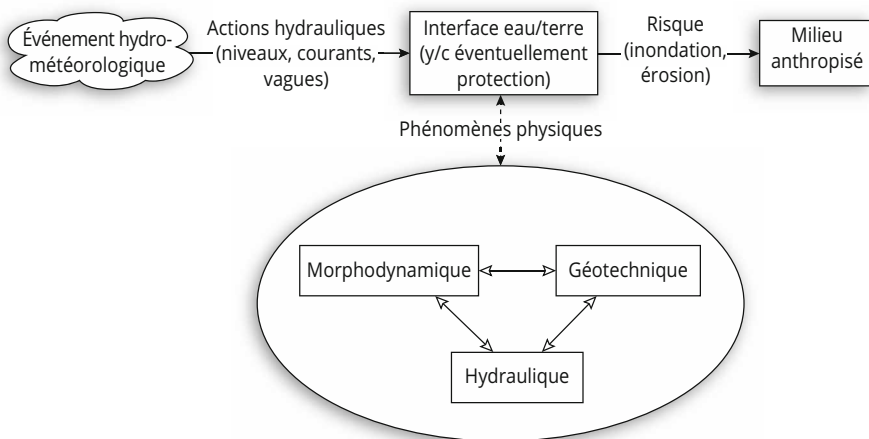
Actions	Effets des actions	Mécanismes de détérioration
Phénomènes naturels gravitaires	Contraintes de cisaillement	Glissements translationnels
	Contraintes d'arrachement	Érosion externe
Activité sismique	Contraintes de cisaillement	Glissements superficiels/rotationnels, liquéfaction
Activité souterraine	Contraintes de cisaillement	Effondrements
	Circulations internes d'eau et contraintes associées	Érosion interne
Activité des animaux fouisseurs	Contraintes d'arrachement	Érosion externe et interne
Développement de végétation ligneuse	Développement des racines et contraintes associées	Déstructurations et érosion interne
	Contraintes de cisaillement dues au porte-à-faux de l'arbre	Arrachements généralisés et érosion interne
Phénomènes climatiques et météorologiques	Circulations internes d'eau et contraintes associées	Érosion interne
	Gel/dégel et contraintes associées	Éclatement

### 2.2.4. Évolutions de la morphologie de l'interface eau/terre (morphodynamique)

Comme il a déjà été dit plus haut, dans cette approche situation/action/sollicitation, la morphologie est considérée comme une situation imposée, elle n'est donc pas prise en compte dans les actions. Nous insistons néanmoins sur la prépondérance de l'analyse des phénomènes morphodynamiques vis-à-vis de la fiabilité des digues, que ce soit en termes de résistance structurelle ou même de fonctionnement hydraulique. Ces phénomènes ont un effet sur les actions, bien qu'ils n'en soient pas eux-mêmes.

L'intérêt de la prise en compte de ces phénomènes est par ailleurs largement détaillé dans la **Partie II** de ce guide.

La **Figure 2-9** illustre le lien entre les actions hydrauliques (résultant d'un événement hydrométéorologique) sur un territoire inondable éventuellement protégé et les risques



**Figure 2-9.** Lien entre actions et risques en relation avec l'analyse des phénomènes physiques (Source : R. Tourment).

d'inondation et d'érosion qui en résultent pour le milieu anthropisé. Elle montre également que les phénomènes physiques qui prennent place à l'interface entre le milieu eau et le territoire inondable doivent être analysés sur les plans géotechniques, hydrauliques et morphodynamiques, ces analyses étant interdépendantes. Les actions hydrauliques régulières des milieux eau (hors événement hydrométéorologique) ont également le même type d'effets, avec des intensités différentes.

### 2.3. Mécanismes de détérioration des digues rigides

Les digues de protection contre les inondations sont principalement des ouvrages en remblai, néanmoins on rencontre également des ouvrages rigides (*voir* [paragraphe 5.1.](#)). Il peut s'agir d'ouvrages poids (en béton, maçonnerie, pierres sèches, etc.), d'ouvrages encastrés (rideaux de palplanches, murs bétons en I, etc.), d'ouvrages autostables (murs béton en L, en T, etc.). Des ouvrages amovibles (portes, batardeaux, rehausses mobiles, etc.) sont également souvent des ouvrages rigides.

Les mécanismes de dégradation et de rupture des ouvrages rigides sont :

- le glissement d'ensemble de l'ouvrage sur sa fondation ;
- le basculement de l'ouvrage ;
- le glissement ou le basculement d'une partie supérieure de l'ouvrage, induit par une fissuration ;
- l'abrasion externe de la structure sous l'effet des courants et/ou des vagues et du transport solide (sable, galets). Selon la nature de la structure (béton, maçonnerie, pierres sèches), cette abrasion peut concerner la totalité de la structure (béton, pierres sèches) ou une partie préférentiellement (pierres ou liant) ;
- les phénomènes chimiques affectant les bétons (alcali-réaction, etc.) ou les armatures (oxydation).

Le sous-cavage de la structure (érosion de sa fondation) peut également être à l'origine de sa ruine (glissement, basculement, effondrement partiel, rupture) ([Figure 2-10](#)).



**Figure 2-10.** Effondrement partiel de la digue en béton en rive gauche du Gave de Cauterets à Souлом (65) à la suite du sous-cavage de sa fondation (Source : D. Sabatier, ONF - RTM 65 - novembre 2013).

## 2.4. Mécanismes de détérioration des digues en remblai

Les mécanismes élémentaires de détérioration des digues en remblai peuvent être regroupés en différents termes génériques. Ceux-ci sont décrits dans la présente section.

Dans la grande majorité des cas, le processus de détérioration d'un tronçon de digue pouvant conduire jusqu'à la brèche combine différents mécanismes élémentaires qui s'enchaînent dans un scénario (Figure 2-11) [44, 47]. Ces derniers dépendent alors de la nature des composants, des caractéristiques de l'environnement et des actions qui affectent le tronçon de digue. Il existe donc une relation très forte entre les formes, les fonctions et les modes d'endommagements et de ruptures des digues [40, 46].

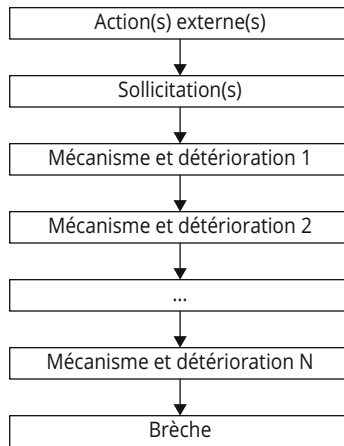


Figure 2-11. Les mécanismes s'enchaînent et forment des scénarios de brèche (Source : B. Beullac).

Les mécanismes peuvent se regrouper en trois familles principales : l'érosion externe, l'érosion interne et les instabilités.

### 2.4.1. Érosion externe

L'érosion externe [4] regroupe tous les mécanismes qui provoquent des départs de matériaux sous l'effet des actions (*voir* paragraphe 2.2.) qui s'appliquent à la surface extérieure de la digue. Elle a lieu lorsque les matériaux de surface de la digue ne sont pas suffisamment résistants pour faire face aux agressions issues de l'environnement. Ces départs de matériaux au long de la vie de l'ouvrage peuvent induire une diminution de la section de la digue, un raidissement des talus et contribuent à saper sa résistance.

Les principales causes d'érosion externe sont les mouvements d'eau directement au contact des digues. Les actions de l'eau liées au courant, aux vagues et, en moindre mesure, aux marées sont donc les principaux facteurs d'initiation ou d'aggravation de l'érosion externe.

Toutefois, le vent, les précipitations, la végétation ligneuse ou encore l'activité animale et humaine peuvent jouer un rôle majeur dans l'apparition du mécanisme d'érosion externe.

On identifie trois types d'érosion externe.

#### 2.4.1.1. Érosion par surverse

Lorsque la surverse (*voir* définition Chapitre 1 : paragraphe 3.) se produit sur une section non prévue à cet effet, elle est un des facteurs d'érosion externe les plus importants et les plus dévastateurs. Ce mécanisme constitue, avec l'érosion interne, une des causes principales des ruptures des digues en remblai. Le débordement d'eau par-dessus

la crête de la digue conduit à des écoulements à forte vitesse sur la crête, le versant aval de la digue (côté zone protégée : val ou terre) et le terrain naturel en pied de digue du même côté. Cet écoulement incontrôlé génère une érosion régressive du talus pouvant rapidement conduire à la brèche. À partir du moment où la crête est érodée sur toute la largeur, le phénomène devient de plus auto-accélération (Figure 2-12).

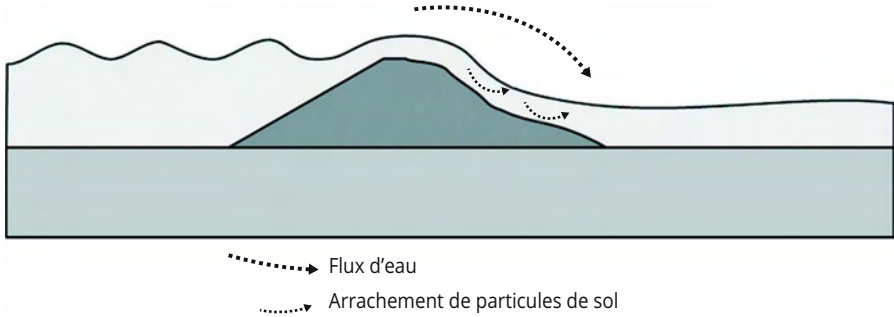


Figure 2-12. Principe de l'érosion par surverse (Adapté de Yann Deniaud [9]).

Les franchissements (voir définition Chapitre 1 : paragraphe 3.) d'une digue par des vagues (que ce soit en milieu fluvial ou marin) conduisent également au même type de résultat, avec un mécanisme plus complexe à analyser, à cause de son intermittence et aussi de phénomènes liés à l'impact et à la turbulence.

#### 2.4.1.2. Érosion côté eau

Elle peut résulter des actions liées aux vagues, aux courants, aux divagations et aux turbulences localisées. Ces actions externes peuvent être frontales ou obliques à l'ouvrage (vagues, houles, érosion de méandres) mais également longitudinales (courant d'une rivière, dérive littorale). L'érosion forme soit des affouillements (Figure 2-13) qui sapent la base des ouvrages et créent ensuite des instabilités, soit le démantèlement de la protection puis l'altération directe du corps des ouvrages (Figure 2-14).

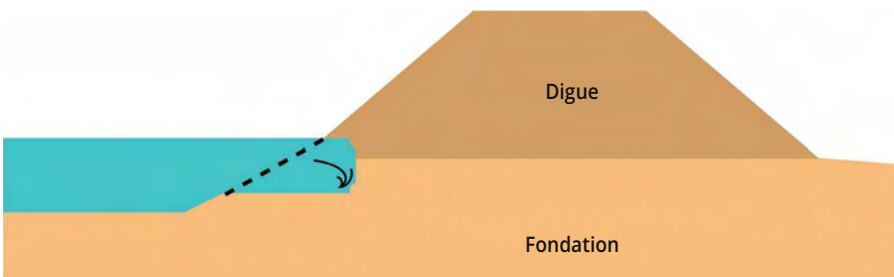


Figure 2-13. Érosion externe de la fondation d'une digue en terre (affouillements) côté eau (Source : R. Tourment).

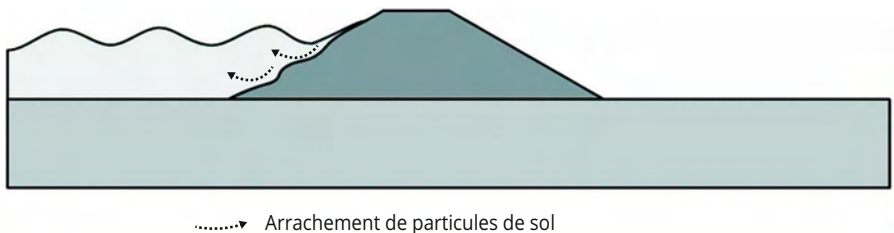


Figure 2-14. Érosion externe du corps du remblai côté eau (Adapté de l'ILH [9]).



Les dommages liés aux affouillements sont souvent associés à l'évolution morphodynamique de la rivière ou du secteur de côte dans lequel s'insère l'ouvrage. Ils peuvent se produire en toute période, et pas seulement pendant un événement mettant en jeu la fonction de protection.

À l'inverse, les érosions du talus de la digue ne peuvent bien entendu se produire qu'en période de sollicitation de l'ouvrage par un événement.

#### 2.4.1.3. Érosion côté zone protégée

Elle se développe sous l'effet des actions issues de la zone protégée : agressions météoriques (pluie, gel, ruissellement), présence d'animaux fouisseurs, déambulation d'animaux d'élevage, activités humaines (passage d'engins motorisés, équitation, etc.), qui peuvent générer d'importants départs de matériaux et l'apparition d'érosion de surface. Leur répétition et leur effet cumulatif peuvent être à terme préjudiciables pour l'intégrité de l'ouvrage.

### 2.4.2. Érosion interne

Lorsque la digue est en eau (crue, marée haute), il peut se produire des écoulements d'eau au travers du corps de l'ouvrage en remblai, ou dans les sols de fondations (Figure 2-15).

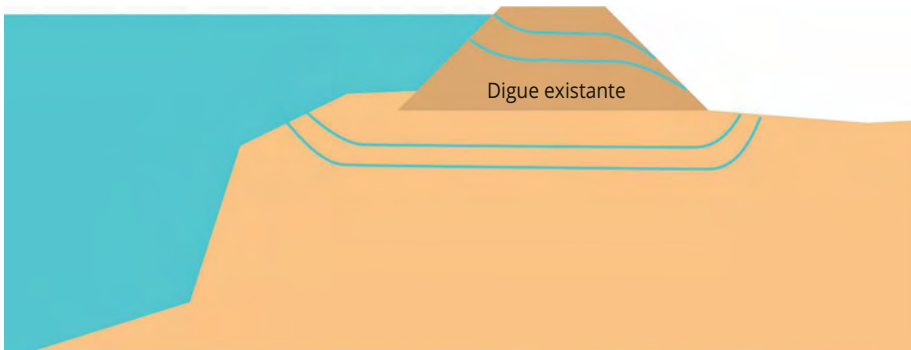


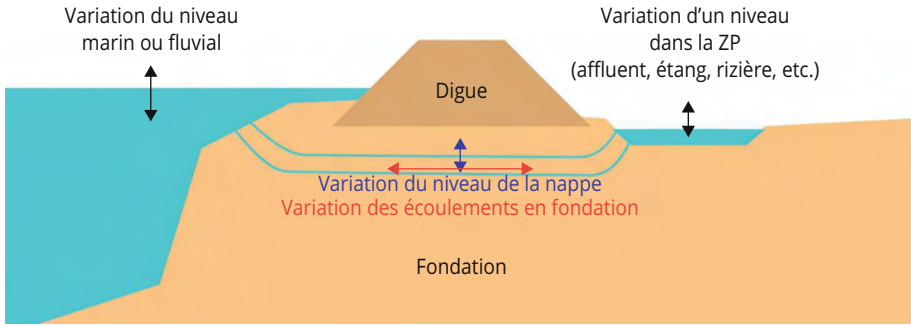
Figure 2-15. Écoulements dans l'ouvrage et dans sa fondation lors d'une mise en charge (Source : R. Tourment).

Ces écoulements peuvent être à l'origine de phénomènes d'érosion interne [2, 4, 18], c'est-à-dire de migrations ou de départs de matériaux lorsque le gradient hydraulique atteint un seuil appelé gradient critique des matériaux constituant la digue ou sa fondation, à l'échelle d'un matériau ou d'une interface. Ces phénomènes sont particulièrement sensibles aux hétérogénéités, les secteurs les plus perméables concentrant les flux et accroissant les contraintes liées aux écoulements. L'érosion interne constitue, avec l'érosion par surverse, une des causes principales des ruptures des digues en remblai.

Le terme d'érosion interne regroupe différents phénomènes d'entraînements de particules liés aux écoulements à l'intérieur d'un massif de sol : suffusion, érosion de contact, érosion régressive, érosion concentrée ou de conduit.

L'érosion interne peut également concerner les sols de fondation, y compris hors période de crue, lorsqu'il existe un écoulement dû à une différence de niveau piézométrique entre les deux côtés de la digue. Ces écoulements peuvent être éminemment variables dans le temps (Figure 2-16), voire avoir un sens qui s'inverse.





**Figure 2-16.** Variation des écoulements en fondation (Source : R. Tourment).

L'érosion interne nécessite trois conditions : une condition d'entraînement, une condition hydraulique de transport et une condition géométrique de transport du grain érodé [15].

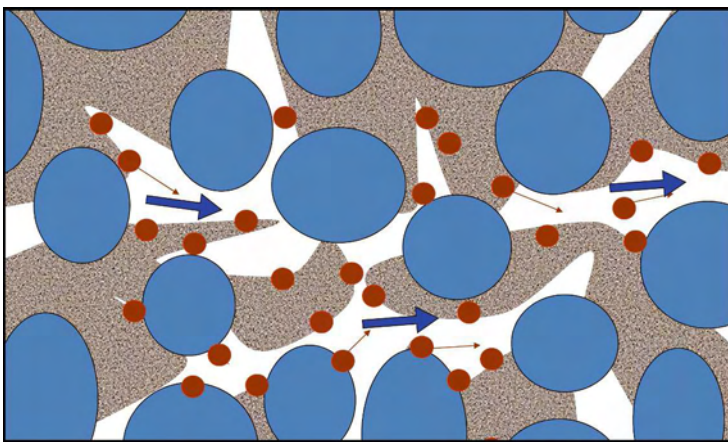
Les facteurs de déclenchement des phénomènes d'érosion interne dans les digues sont donc :

- les circulations d'eau et le gradient hydraulique ;
- la nature du et/ou des matériaux (perméabilité, granulométrie, cohésion, à défaut de caractérisation spécifique de la résistance aux différents mécanismes d'érosion interne).

Les principaux facteurs d'aggravation du risque d'érosion interne dans les digues sont la présence de :

- fissures ;
- racines ;
- galeries d'animaux ;
- interfaces entre matériaux différents ;
- ouvrages inclus (canalisations, etc.).

#### 2.4.2.1. Suffusion (Figure 2-17)



**Figure 2-17.** Principe de la suffusion (Source : R. Béguin).

C'est un phénomène affectant certains types de sols instables où les particules les plus fines sont entraînées au sein du squelette du sol que constituent les matériaux les plus grossiers. Selon la limite aval de la couche de sol concernée (filtre, extérieur, etc.)

les conséquences peuvent être variables (colmatage, entraînement de matériaux à l'extérieur de l'ouvrage) mais, dans tous les cas, la couche de sol voit sa densité réduite et sa perméabilité accrue. Ce mécanisme peut en entraîner plusieurs autres (tassements, érosion régressive du squelette grossier après disparition des fines, glissement par saturation du remblai à la suite du colmatage d'un filtre aval, etc.).

#### 2.4.2.2. Érosion de contact (Figure 2-18) [2]

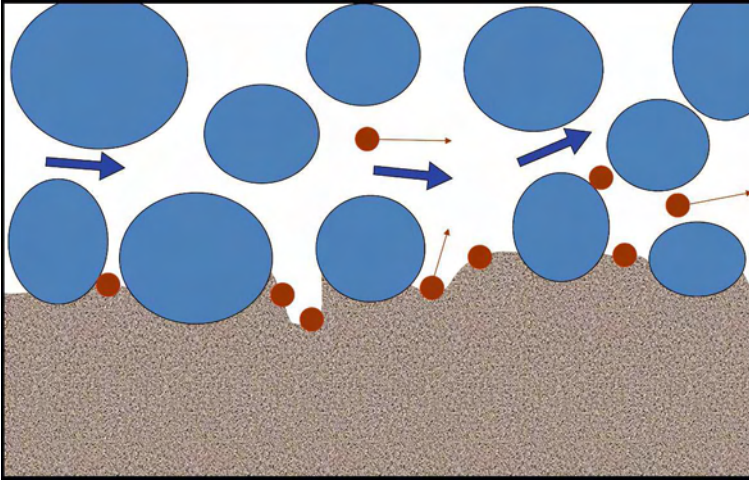


Figure 2-18. Principe de l'érosion de contact (Source : R. Béguin).

Ce type d'érosion se développe à une interface horizontale entre deux matériaux granulaires ou entre un matériau granulaire et un matériau fissuré. Les particules les plus fines sont entraînées par l'écoulement dans l'espace poreux de la couche de matériaux grossiers ou dans les fissures ouvertes du matériau fissuré. Ce mécanisme peut ensuite être suivi d'une érosion de conduit à la limite entre les couches après disparition de suffisamment de matériau fin.

#### 2.4.2.3. Érosion régressive (Figure 2-19)

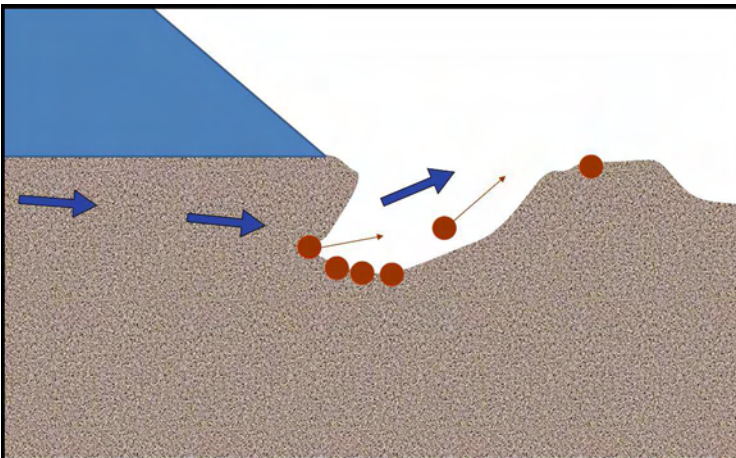


Figure 2-19. Principe de l'érosion régressive (Source : R. Béguin).

Les matériaux sont arrachés en sortie du réseau d'écoulement lorsque le gradient d'écoulement excède le gradient critique de flottabilité du sol. Un conduit se crée progressivement de l'aval vers l'amont, amplifiant au cours du temps le gradient (par diminution de la longueur) et les vitesses d'écoulement. Ce mécanisme auto-accélérateur concerne principalement des matériaux non cohésifs. Il est éventuellement précédé par la suffusion et/ou l'érosion de contact.

#### 2.4.2.4. Érosion concentrée ou de conduit (Figure 2-20)

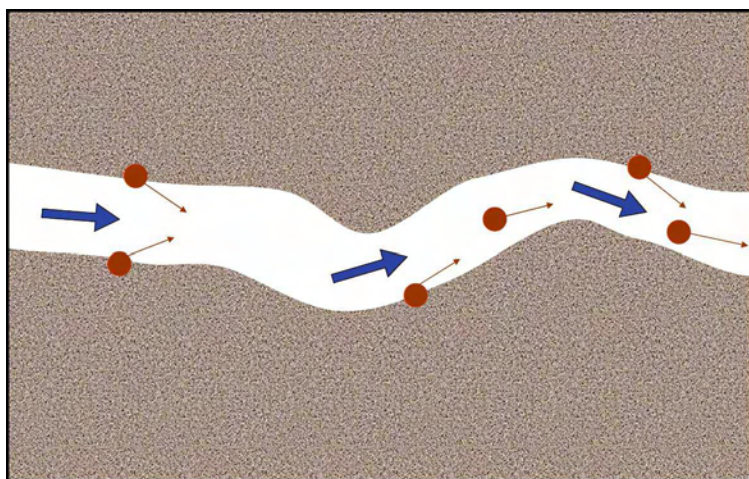


Figure 2-20. Principe de l'érosion concentrée (Source : R. Béguin).

Les départs de matériaux se produisent le long des bords d'une fissure ouverte ou de vides interconnectés lorsque les forces de cisaillements induites par le courant sont supérieures à une valeur critique liée aux caractéristiques des matériaux. Ce type d'érosion peut particulièrement se développer le long de structures associées telles que des conduites enterrées ou des murs. Il peut aussi se développer le long d'un conduit initié par l'un ou l'autre des autres mécanismes, principalement l'érosion régressive. Il s'agit généralement du mécanisme final dans un scénario pouvant enchaîner plusieurs des mécanismes d'érosion interne. C'est également un mécanisme auto-accélérateur car l'élargissement du conduit entraîne une plus grande vitesse d'écoulement.

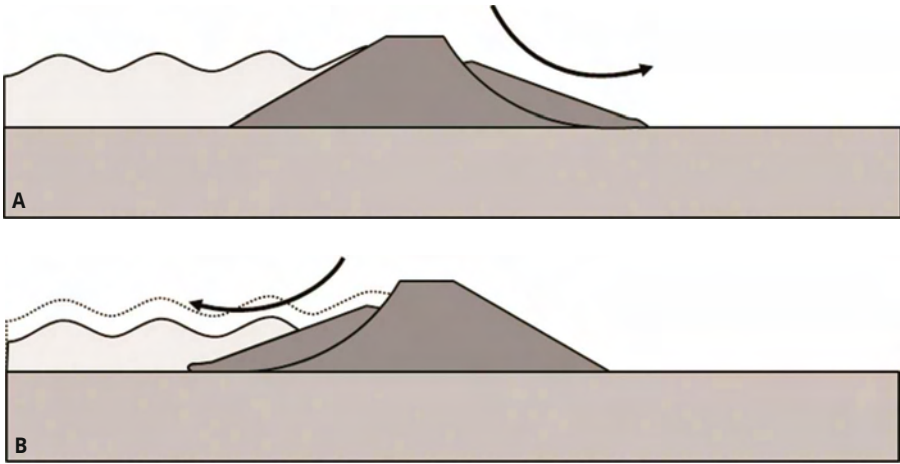
### 2.4.3. Instabilités des digues en remblai

On distingue deux types d'instabilités : les instabilités localisées (comme le glissement ou l'effondrement) et les instabilités de masse conduisant à une rupture diffuse (comme la liquéfaction).

Les principaux mécanismes d'instabilité des ouvrages en terre sont présentés plus loin.

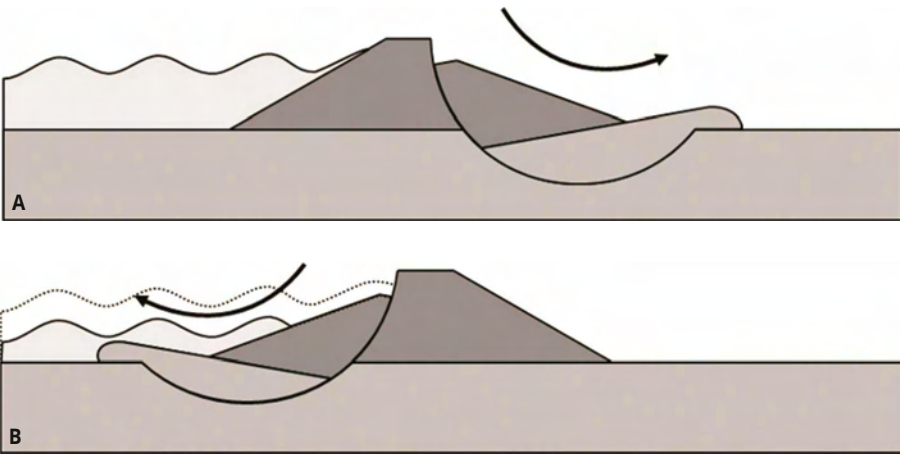
#### 2.4.3.1. Glissements superficiels

Sous l'effet des agents météoriques, les caractéristiques mécaniques des matériaux situés en surface du corps de digue peuvent se dégrader. Des glissements superficiels intéressant les matériaux altérés du corps de digue peuvent alors apparaître lorsque la résistance au cisaillement de ces matériaux sera insuffisante à leur tenue dans la configuration géométrique initiale de l'ouvrage (Figure 2-21).



**Figure 2-21.** Glissements superficiels affectant un corps de digue en terre, côté zone protégée (A) et côté eau (B) (Source : Yann Deniaud [9]).

2.4.3.2. Glissements rotationnels (Figure 2-22)



**Figure 2-22.** Glissement rotationnel profond affectant un corps de digue en terre et sa fondation, côté zone protégée (A) et côté eau (B) (Source : Yann Deniaud [9]).

Les mouvements rotationnels apparaissent ainsi lorsque les résistances au cisaillement des matériaux constitutifs du corps de digue et/ou de certains horizons argileux du sol de fondation sont inférieures aux charges motrices appliquées par le poids des matériaux, les forces hydrauliques et les surcharges de service.

La stabilité des talus des ouvrages doit normalement être assurée par une conception et un dimensionnement respectant les règles de l'art géotechnique de la construction des ouvrages en terre (contre-exemple Figure 2-23). Cependant, la détérioration de l'ouvrage au cours du temps ou la saturation non prévue de ses talus peuvent conduire à des instabilités de ce talus.





**Figure 2-23.** Glissement rotationnel d'un corps de digue en terre à la suite d'une mise en œuvre à une teneur en eau excessive (Source : R. Tourment).

Noter également les fissures de dessiccation en crête dues à cette mise en œuvre de matériau proche de la saturation.

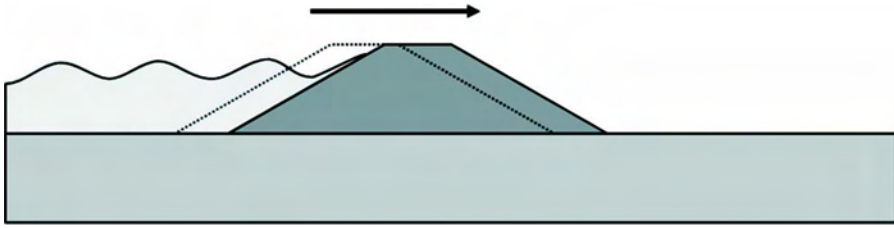
De manière générale, les instabilités de talus peuvent être liées à :

- l'accroissement des pentes de talus sous l'action de phénomènes d'érosion externe (suppression de la butée de pied) ;
- l'augmentation des pressions hydrauliques au sein de l'ouvrage par suite de défauts de drainage et/ou à la présence de couches hétérogènes à comportements hydrauliques contrastés ;
- l'augmentation des charges sur l'ouvrage ou les sols de fondation (nouvelle construction, rehausse, élargissement, etc.) ;
- l'évolution défavorable des caractéristiques des matériaux de constitution ou de fondations des ouvrages au cours du temps (cycle de dessiccation – imbibition, fluage, liquéfaction, colmatage des matériaux aval par suffusion, etc.).

#### 2.4.3.3. Glissements translationnels

Les mouvements translationnels de blocs sont susceptibles de se produire lorsque la résistance au cisaillement d'un horizon de sol de fondation est insuffisante devant les efforts apportés par les forces hydrauliques appliquées sur le corps de digue (Figure 2-24). Ces mouvements translationnels peuvent également affecter le corps d'un ouvrage, en particulier lorsque celui-ci présente une stratification marquée de ses caractéristiques mécaniques ou une surface horizontale singulière (limite de reprise d'ouvrage, crête d'un ancien ouvrage rehaussé, etc.). Ces phénomènes sont relativement rares sur les ouvrages

en remblai, sauf cas particulier, entre autres des ouvrages déjà fortement dégradés par d'autres mécanismes, ou des fondations de qualité plus que médiocre (Figure 2-25).



**Figure 2-24.** Glissement translationnel affectant un corps de digue en terre (Source : Yann Deniaud [9]).



**Figure 2-25.** Glissement translationnel ayant affecté un corps de digue en terre sur fondation vasarde (Source : STOWA [9]).

#### 2.4.3.4. Effondrements

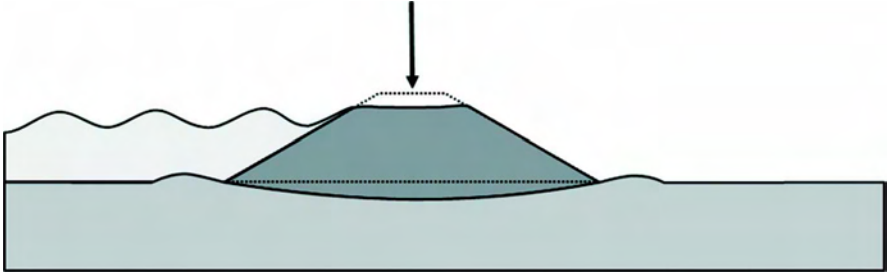
La présence de cavités dans le substratum de fondation (karsts par exemple) ou le corps des ouvrages (affouillements en pied par exemple) peut conduire à la rupture et à l'effondrement, souvent brutal, sous l'effet de leur poids propre, des matériaux situés au-dessus (fontis).

#### 2.4.3.5. Liquéfaction

Dans certaines conditions d'actions, notamment cycliques (séismes, houles, etc.) ou de turbulence, certains matériaux particuliers peuvent voir leurs caractéristiques mécaniques de résistance au cisaillement se dégrader brutalement. La liquéfaction de certains sols supports de fondations sous l'effet de telles actions peut ainsi conduire à l'effondrement des corps de digue qui les surmontent, par un effet de sappe ou de sous-minage.

#### 2.4.3.6. Tassements

L'apparition de tassements, qui se caractérise par l'abaissement de la topographie de la crête, peut être liée à de mauvais compactages des matériaux mis en œuvre lors de la réalisation du corps de digue ou à la présence de niveaux compressibles dans les sols de fondation de l'ouvrage ; l'érosion interne peut également être à l'origine de tassements observables en crête (Figure 2-26).



**Figure 2-26.** Tassement affectant un corps de digue en terre (Source : Yann Deniaud [9]).

Des tassements différentiels le long d'un ouvrage de long linéaire, dus par exemple à des caractéristiques de fondation variables, peuvent conduire à de la fissuration. Les tassements peuvent être à l'origine de phénomènes de surverse localisée pouvant entraîner une érosion par surverse et une brèche.

#### 2.4.3.7. Fissuration

L'apparition de fissures en surface d'un remblai, sur la crête ou sur un des talus, peut avoir différentes causes : un glissement (*voir* plus haut), des tassements différentiels (*voir* également ci-dessus), mais également une forte variation de teneur en eau et l'apparition de fissures de retrait.

La fissuration en profondeur (Figure 2-27), surtout lorsque les fissures communiquent entre elles, peut conduire à l'apparition prématurée d'autres mécanismes, tels que l'érosion externe ou interne. On peut considérer qu'une digue en remblai voit sa section réduite à la partie non fissurée.



**Figure 2-27.** Sol fissuré en profondeur (Source : R. Tourment).

### 2.4.4. Phénomènes liés aux transitions

Les singularités dans les ouvrages ou leur environnement immédiat sont souvent à l'origine de désordres liés aux mécanismes précédemment exposés.

Le projet de recherche européen FloodProBE [18] a proposé une typologie des différents types de transition, des mécanismes de dégradation ou de rupture associés, et des solutions techniques appropriées.

Les principaux types de transition (Figure 2-28) sont liés soit à des structures, soit à des changements de forme ou de constitution des digues :

- structures enterrées :
  - canalisations (métal, plastique, béton, maçonnerie, etc.),
  - câbles ;
- structures partiellement enterrées :
  - puits,
  - vannes,
  - bâtiments (maisons, stations de pompage, etc.),
  - escaliers,
  - regards (probablement associés avec une structure ou réseau enterré) ;
- structures externes :
  - revêtements de protection,
  - routes ;
- changement dans le type de digue :
  - contact (latéral ou vertical) entre digue en remblai et digue rigide, poids, mur, etc.,
  - contact entre différentes sections de digue (interne, géométrie externe, nature de revêtement, etc.),
  - contact entre la digue et le terrain naturel.

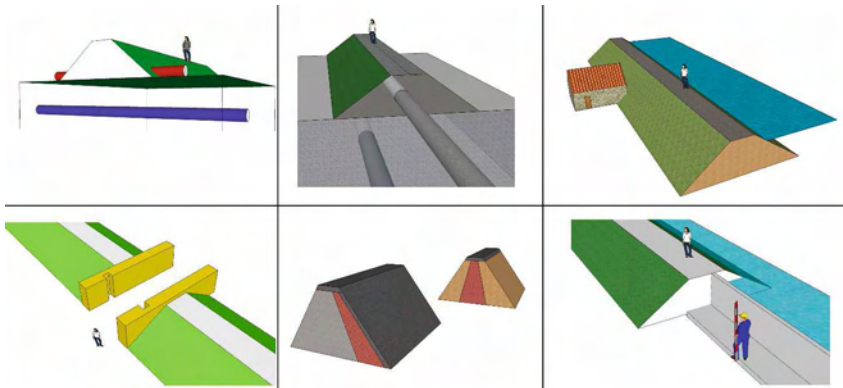


Figure 2-28. Exemples schématiques de différents types de transition (Source : FloodProBE, R. Tourment).

Des phénomènes localisés peuvent être provoqués par la présence de transitions : fuites (depuis ou vers une canalisation), turbulences (géométrie), concentration de contraintes hydrauliques (éléments externes).

Les principaux mécanismes associés aux transitions sont, dans l'ordre d'importance :

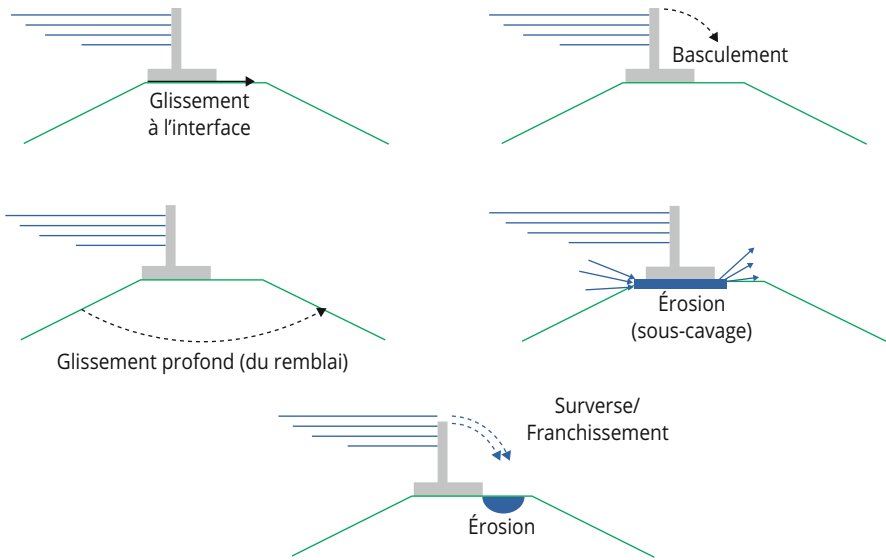
- l'érosion interne (sous ses différentes formes : érosion de trou, suffusion, érosion régressive, érosion de contact sol-sol, érosion de contact sol/structure) ;
- l'érosion externe (y/c surverse) ;
- la stabilité (remblai et/ou structure rigide).

Cette typologie est résumée et représentée sous la forme d'un logigramme (Figure 2-29).

En guise d'exemple des phénomènes plus ou moins spécifiques liés aux transitions, le cas particulier fréquent d'une digue rehaussée par un mur rigide (ici en T) est représenté en Figure 2-30.

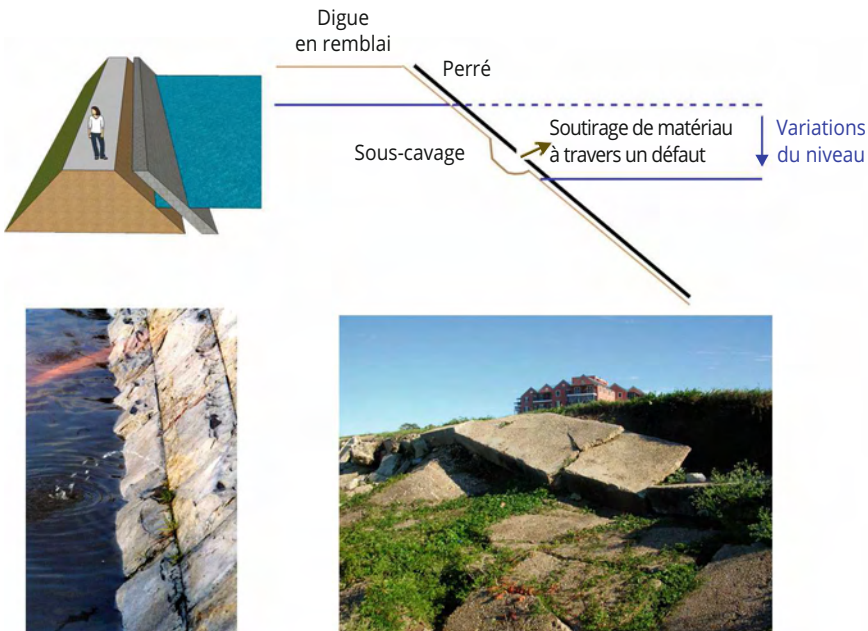






**Figure 2-30.** Illustration des différents modes de rupture associés à un mur posé sur une digue en remblai (Source : R. Tourment).

Les transitions entre un ouvrage en remblai et son revêtement de protection rigide côté eau sont également sources d'un problème spécifique. En cas de fissuration ou de dégradation des joints du revêtement, et en l'absence de filtre entre le revêtement et le remblai, faisant suite à des variations du niveau d'eau, les matériaux du remblai peuvent être soutirés, évoluer en une cavité importante et, à terme, provoquer l'effondrement du revêtement de protection (Figure 2-31).



**Figure 2-31.** Problématique des érosions d'un remblai sous son revêtement de protection rigide (Source : R. Tourment).

## 2.5. Brèches

La brèche est une ouverture dans la digue entre le côté eau et le côté zone protégée qui, de ce fait, provoque l'inondation de la zone protégée avant l'atteinte du niveau de protection. Une brèche peut être totale (disparition de la digue sur toute sa hauteur) ou partielle (disparition d'une partie seulement de la digue) ; une brèche totale est souvent associée à une fosse d'érosion. Celle-ci se dessine généralement dans le terrain naturel côté zone protégée et sous la digue, et remonte parfois du côté du milieu eau. Le processus (ou scénario) conduisant à une brèche dans une digue associe souvent plusieurs mécanismes de détérioration, appliqués éventuellement à différentes parties (ou composants) de la digue et de sa fondation (*voir paragraphes 2.3. et 2.4.*). On distingue généralement trois phases dans le processus d'ouverture d'une brèche : l'initialisation, la formation et l'élargissement ; cette dernière phase comprend éventuellement l'approfondissement dans le terrain naturel et la création d'une fosse d'érosion.

Les principaux paramètres influençant la taille et la cinématique des brèches sont :

- les caractéristiques hydrauliques de l'événement sollicitant la digue ;
- le moment où la brèche s'initie (par rapport au limnigramme de l'événement) ;
- la structure et les caractéristiques mécaniques de la digue elle-même, de sa fondation et des terrains environnants ;
- la hauteur de la digue, la pente de son talus côté zone protégée, la largeur de sa crête ;
- la topographie et la bathymétrie côté eau, la topographie côté zone protégée, qui vont influencer les écoulements en amont et en aval de la brèche. Par exemple, l'existence d'un franc-bord important conduit à un débit dans la brèche plus faible par rapport à une digue en contact avec le lit mineur.

Il a été avancé, sur la base de retours d'expériences que, dans un environnement fluvial, à titre d'ordre de grandeur et en l'absence de données ou de modélisation plus spécifique, la largeur d'ouverture d'une brèche dans une digue peut être proche de la largeur du lit mineur du cours d'eau et que le débit dérivé à travers la brèche peut, dans certains cas, être comparable à la moitié du débit de la crue. Notons que dans certains contextes défavorables (en matière de topographie de la zone protégée et de nature des matériaux, souvent dus à des évolutions morphologiques anciennes), il est possible que la quasi-totalité du débit de crue soit dérivée à travers une brèche et qu'après la crue, le cours d'eau se trouve alors « capturé » par un nouveau tracé.

## 3. Généralités sur les fonctions des systèmes de protection et de leurs éléments constitutifs

Comme il est expliqué au [paragraphe 1.](#), la fonction principale d'un système de protection est le plus souvent de protéger un territoire naturellement inondable contre les inondations d'origine extérieure (c'est-à-dire hors remontée de nappe, ruissellement, etc.) qui le menacent.

La protection contre les érosions est souvent une fonction secondaire, néanmoins importante, d'un système de protection contre les inondations, du fait de ses ouvrages principaux et/ou d'ouvrages associés (protections de berge, épis, seuils, brise-lames, etc.).

Le système a également souvent d'autres fonctions, liées d'une part à sa pérennité en tant que résistance aux divers modes de détérioration ou de rupture, mais aussi à sa maintenance

comme la possibilité de permettre la surveillance et l'entretien des ouvrages et du franc-bord ou de son équivalent maritime.

### Remarque

Les notions de fonction, de vocation et de rôle des éléments qui composent les systèmes de protection sont explicitées au paragraphe 1.

## 3.1. Pour les systèmes de protection en milieu fluvial

En milieu fluvial, un système de protection a généralement pour fonction principale la protection contre les inondations causées par les crues d'un cours d'eau et parfois également par celles d'un ou plusieurs affluents. La dynamique morphologique du cours d'eau peut donc généralement être relativement respectée, en veillant à une implantation des digues en retrait du lit mineur.

Le « contrôle » de la morphologie du cours d'eau, c'est-à-dire la limitation de la divagation du cours d'eau et du déplacement de son lit, peut dans certains cas être considéré comme une deuxième fonction principale et se traduire par une implantation des digues à proximité du lit mineur. Un tel aménagement peut notamment permettre de « maîtriser » le comportement hydraulique du cours d'eau.

Dans certains contextes, le système de protection peut avoir d'autres fonctions principales, comme celle de favoriser la navigation sur le cours d'eau, en diminuant le chenal d'écoulement afin d'augmenter le niveau d'eau à l'étiage.

## 3.2. Pour les systèmes de protection en milieu marin

En milieu marin, la vocation des systèmes de protection est souvent le contrôle des effets de l'action du milieu marin sur la morphologie de la frange littorale. Les ouvrages peuvent ainsi avoir pour objet de fixer le trait de côte dans les zones basses littorales à forte mobilité (littoraux sableux, marais maritime, etc.).

Des systèmes de protection se sont également inscrits historiquement dans le cadre d'aménagements de polders permettant par exemple le gain de terres agricoles sur le milieu marin.

De ce fait, la protection contre les inondations n'est pas systématiquement la vocation principale des systèmes de protection maritimes. Elle correspond en revanche très souvent à un rôle joué de fait par le système, rôle qui est la raison même de son classement dans le cadre de la réglementation sur la sécurité des ouvrages hydrauliques. L'analyse de risque du système endigué retient alors ce rôle comme fonction principale.

Cependant, en milieu marin, cette fonction de protection contre les inondations se caractérise essentiellement par l'action de limitation des entrées d'eau dans la zone que l'on souhaite protéger des inondations. La dynamique des phénomènes marins rend en effet très difficile et coûteuse la protection totale contre les entrées d'eau. Les systèmes de protection maritimes acceptent donc généralement des débits franchissant par-dessus les ouvrages. Ces débits étant dépendants de la morphologie devant les ouvrages de protection, la gestion de la problématique de l'érosion (côté mer mais également côté zone protégée pour supporter l'impact des « paquets de mer ») et sa limitation assurent néanmoins un rôle essentiel dans la pérennité de l'ouvrage, de sa fonction de réduction des franchissements et de son rôle de protection contre la submersion.

Par ailleurs, l'élévation du niveau moyen de la mer (NMM) résultant du réchauffement climatique [43] influencera directement la protection apportée par les systèmes de protection maritimes dans les années à venir.

### 3.3. Pour les systèmes de protection en milieu torrentiel

On considère ici que les digues en milieu torrentiel sont les digues qui bordent les torrents sur leur cône de déjection. Certaines spécificités torrentielles décrites par la suite s'appliquent également pour les digues des rivières torrentielles, notamment celles présentant un fort charriage.

La fonction principale des systèmes de protection torrentiels est une fonction de protection de la zone exposée aux crues torrentielles (essentiellement le cône de déjection).

Cette fonction principale de protection de zones du cône de déjection exposées aux crues torrentielles se décline en une fonction technique principale de non-débordement du torrent pour toute crue d'intensité au plus égale à celle de la crue de projet de protection, que nous décrivons de la façon suivante : « la digue doit contenir le torrent dans son lit en tout point du tronçon étudié et sur la rive concernée, pour toute crue torrentielle d'intensité inférieure ou égale à l'événement de projet de protection ». Autrement dit, le tracé en plan du torrent est fixé grâce à son système de protection ce qui limite les divagations du torrent sur son cône pour ces événements [30].

L'objectif est donc tant d'éviter les débordements que d'empêcher les divagations du torrent sur son cône avec leurs conséquences : cheminement aléatoire des débordements, lissage de la topographie avec potentiellement de fortes incisions des zones en remblai ou de forts engravements dans les zones de dépression, effets dynamiques des écoulements, etc.

Sur certains systèmes de protection, seule une des deux rives est endiguée ; dans ce cas, le torrent peut toujours divaguer sur la rive non protégée à condition que la rive opposée ne soit pas constituée du versant.

Un système de protection en milieu torrentiel est généralement un ouvrage linéaire d'un seul tenant venant se raccorder sur le versant à l'apex du cône, ou une succession non continue d'ouvrages linéaires, tronçons de digues pouvant se raccorder en un ou plusieurs points à des éléments topographiques naturels (berge haute, dépôt fossile, etc.). Les tronçons de digues qui le constituent sont généralement de longueur relativement courte (quelques dizaines, voire centaines de mètres selon l'étendue du cône de déjection).

Du fait de la topographie spécifique des cônes de déjection, les systèmes endigués sont parfois perchés sur leur cône, avec un fond de lit du torrent au même niveau, voire plus haut que les terrains à l'arrière des digues (Figures 2-32 et 2-33). Ce sont aussi parfois les aménagements créés par l'homme qui ont abouti à une configuration avec des systèmes de protection très haut perchés : passage au-dessus de canaux, de digues des rivières principales, de fossés d'irrigation, d'infrastructures routières, etc.



Figure 2-32. Lit perché sur son cône – Digue du Doménon (Source : R. Tourment).



**Figure 2-33.** Lit perché - digue du ravin de la Recluse (Castellane, 04) (Source : J.-C. Pin, ONF - RTM 04)

Certaines digues peuvent également présenter de très fortes hauteurs parce qu'elles assurent une « seconde » fonction, parfois la principale, par exemple une fonction paravalanche, pare-blocs ou pour prendre en compte l'existence d'un glissement de terrain (Figure 2-34).



**Figure 2-34.** Digue de la Palud à Courmayeur (Val d'Aoste - Italie) (Source : P. Bouvet, ONF - RTM 05).

### 3.4. Fonctions des éléments des systèmes de protection

Un système de protection contre les inondations est composé de digues, d'autres ouvrages ayant ou non pour fonction principale la protection mais jouant ce rôle, et d'éléments naturels.

On peut décomposer un système de protection en éléments ayant des fonctions hydrauliques plus spécifiques bien identifiées, associées éventuellement à d'autres contraintes ou fonctions secondaires. Ces éléments peuvent être représentés dans un modèle comme des éléments :

- linéaires (principalement des tronçons de digues, résistants ou non à la surverse) ;
- ponctuels (par exemple, les ouvrages traversants) ;
- surfaciques (plages ou francs-bords, zones de stockage, zones d'écoulement, etc.).

Ces fonctions hydrauliques sont liées principalement à la rétention d'eau ou à la maîtrise de son écoulement.

On trouvera au [paragraphe 4.2](#) une liste développée de ces éléments. L'analyse fonctionnelle proprement dite est développée en [Partie II](#), principalement au [Chapitre 5](#) : [paragraphe 1.](#) et [3.13.](#) et au [Chapitre 9](#) : [paragraphe 1.](#)



### 3.5. Fonctions des composants des digues

La capacité du système de protection et de ses différents éléments à remplir leurs fonctions principales respectives sur le long terme dépend de la capacité de ses éléments constitutifs à résister aux actions susceptibles de le solliciter et de l'efficacité des activités d'entretien.

Les éléments constitutifs des tronçons de digues (ou d'autres ouvrages linéaires) doivent ainsi remplir des exigences techniques (fonctions structurelles), par exemple :

- être stables ;
- résister à l'érosion externe (y/c l'érosion par surverse) ;
- résister à l'érosion interne ;
- être étanches ou peu perméables, etc.

Chacune de ces fonctions peut être portée par un ou plusieurs composants et chaque composant peut porter une ou plusieurs fonctions, selon la conception de la section du tronçon considéré.

On trouvera au [paragraphe 5.2.](#) une liste développée de ces composants. L'analyse fonctionnelle proprement dite est développée en [Partie II](#), principalement au [Chapitre 5 : paragraphes 1. et 3.13.](#) et au [Chapitre 9 : paragraphe 1.](#)

### 3.6. Fonctions des composants des autres éléments du système

Les autres éléments du système peuvent également être analysés en termes de composants et de fonctions, qui vont avoir un impact sur leur efficacité.

Par exemple, un ouvrage traversant de ressuyage de la zone protégée peut être composé de :

- ouvrage de soutènement côté ZP ;
- vanne côté ZP ;
- canalisation ;
- enrobage de la canalisation ;
- ouvrage de soutènement côté eau ;
- clapet côté eau.

On peut aussi décomposer des éléments plus complexes, comme une station de pompage, chargée d'évacuer les eaux de la zone protégée hors de celle-ci en période de hautes eaux (lorsque l'évacuation gravitaire n'est pas possible), ou une station de pompage pour du ressuyage (évacuation d'eaux d'inondation après l'événement, pour accélérer le retour à la normale), par exemple :

- bâtiment ;
- pompes ;
- alimentation électrique normale ;
- alimentation électrique de secours (groupe et carburant) ;
- canalisations ;
- vannes ;
- défricheurs, etc.

## 4. Typologie des systèmes de protection

La configuration et la constitution des systèmes de protection diffèrent généralement selon la nature des milieux eau dans lesquels ils sont implantés. En effet, le fonctionnement

hydraulique des milieux eau et les actions sur les systèmes de protection qui en découlent ont une influence directe sur la manière dont doivent être conçus ces aménagements afin de remplir leurs objectifs (protection contre les inondations et/ou maîtrise de la morphodynamique, et pérennité des ouvrages).

Cette configuration et cette constitution peuvent dépendre également du reste de l'environnement de l'ouvrage : localisation de l'ouvrage par rapport à l'interface eau – terre, nature et topographie du milieu terrestre.

## 4.1. Configurations de systèmes de protection

Les systèmes de protection peuvent être très différents du point de vue de leur configuration globale, observable sur une vue en plan. Ces configurations se traduisent au travers de différentes caractéristiques qui peuvent être combinées pour un même système de protection. Les systèmes de protection peuvent :

- être fermés ou ouverts ;
- être ramifiés ou simplement linéaires ;
- former plusieurs casiers hydrauliques ;
- comporter des rangs de protection parallèles et distincts ;
- être associés à des ouvrages de protection indirecte (côté eau) : épis, seuils, brise-lames, etc. ;
- être adossés à un coteau ;
- être soumis à un ou à plusieurs milieux eau ;
- être soumis à un milieu fluvial ;
- être soumis à un milieu marin ;
- être soumis à un milieu torrentiel ;
- être soumis à un milieu eau de transition ;
- incorporer des éléments topographiques naturels (dunes, tertres, promontoires rocheux, etc.) ;
- être situé à proximité immédiate ou au contraire loin du cours d'eau ou de la mer, etc.

La possible combinaison de ces caractéristiques peut aboutir à la constitution de systèmes de protection d'une grande complexité.

La caractérisation de la fonction de protection qui est assurée par un système de protection découle directement de la configuration de ce dernier. À l'échelle globale, seuls les grands principes de la fonction de protection peuvent être décrits. Le détail du fonctionnement de la protection est analysé au travers des éléments qui le composent (tronçons, éléments ponctuels, etc.) (*voir* [paragraphe 4.2.](#)) puis, in fine, des différents scénarios d'inondation « normaux » (au-delà de l'objectif de protection), ou en cas de défaillance, ce qui est un des objets de l'analyse de risque ([Partie II](#)).

## 4.2. Éléments constitutifs des systèmes de protection

Un système de protection peut être composé d'une grande variété de types d'éléments. Ceux-ci dépendent du contexte naturel dans lequel il s'inscrit, de son environnement anthropique et des ouvrages de protection qui le composent.

Ces éléments sont identifiés au travers de l'analyse de la topographie en élévation par rapport au terrain naturel et de celle des contraintes que cette topographie impose à l'écoulement de l'eau. Cette identification est alors complétée par une vision structurelle des différents éléments mis en évidence. Ces éléments sont principalement :



1. des ouvrages à vocation (*voir* Chapitre 5 : paragraphe 1.1.) de protection contre les inondations :
  - digues,
  - murs digues,
  - déversoirs,
  - batardeaux,
  - pompes,
  - ouvrages de vidange,
  - barrières temporaires, etc. ;
2. des ouvrages ayant un rôle (*voir* Chapitre 5 : paragraphe 1.1.) de protection contre les inondations mais dont la vocation est autre :
  - remblais routiers,
  - remblais ferroviaires,
  - canaux,
  - remblais surfaciques (installations industrielles, commerce, etc.),
  - bâtiments, etc. ;
3. des ouvrages à double vocation assumée de protection contre les inondations et autre :
  - ouvrages de protection contre la mobilité du milieu eau (digue et protection de berge en fluvial ou fixation du trait de côte en maritime),
  - remblais digues routiers,
  - remblais digues ferroviaires, etc. ;
4. des ouvrages à vocation autre mais sans rôle direct de protection contre les inondations :
  - épis,
  - brise-lames,
  - enrochement de protection de berge ou du trait de côte, etc. ;
5. des éléments naturels en surélévation ;
  - dunes,
  - tertres (*voir* Figure 2-43),
  - éperons rocheux,
  - anciens dépôts, etc. ;
6. des éléments naturels parfois immergés :
  - plages,
  - francs-bords (ou ségonaux), etc. ;
7. des zones (aménagées ou non) jouant un rôle dans la protection :
  - zones d'expansion de crue,
  - zones de stockage des eaux,
  - zones d'écoulements privilégiés, etc.

Selon leur nature, leur localisation (côté eau ou côté zone protégée), ces différents éléments participent soit :

1. à la ligne de défense ou protection principale : linéaires d'ouvrages et autres éléments naturels assurant en priorité (et/ou en première ligne) la protection de référence du point de vue des gestionnaires du système de protection. Elle constitue dans la grande majorité de cas la limite entre la zone protégée et les milieux eau ;
2. à la protection indirecte : ouvrages et autres éléments naturels, situés côté eau, ayant pour effet de diminuer les actions sur les linéaires de protection directe ;
3. à la protection secondaire : linéaires d'ouvrages et autres éléments naturels, situés côté zone protégée, assurant une protection contre les inondations, en complément de l'action de la ligne de défense principale.

Dans le cadre de l'analyse de risque, et en fonction des objectifs du ou des gestionnaires du système de protection, le choix peut être fait de considérer certains éléments du système de protection comme des éléments des milieux extérieurs, principalement en ce qui concerne la protection indirecte ou secondaire. Il est néanmoins nécessaire

que la ligne de défense principale soit clairement identifiée et fasse intégralement partie du système de protection étudié.

### 4.3. Exemples de systèmes de protection et spécificités selon les milieux eau

#### 4.3.1. En milieu fluvial

##### 4.3.1.1 Système fermé de protection rapprochée, adossée à un flanc de coteau (Figures 2-35 et 2-36)

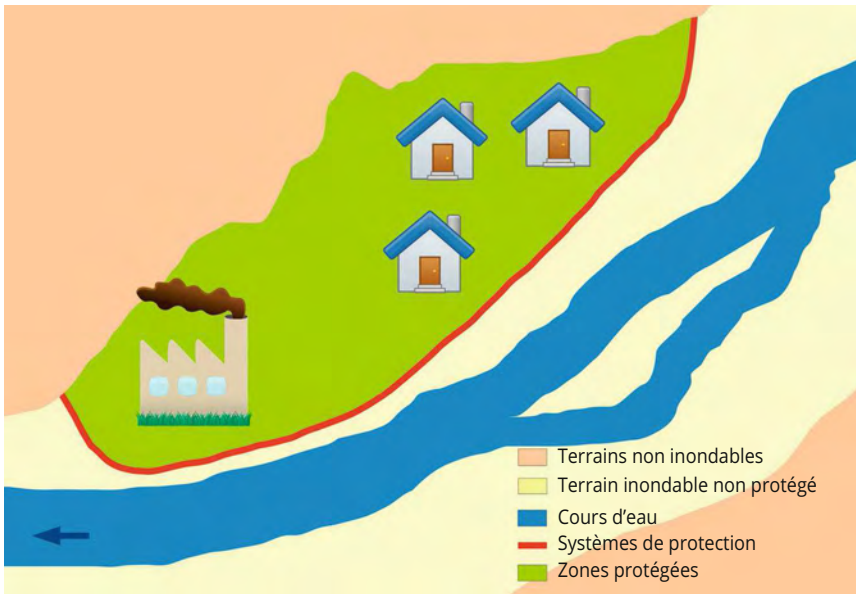


Figure 2-35. Système fermé adossé à un flanc de coteau (Source : B. Beullac).



Figure 2-36. Système de protection rapprochée du village de Usclas-d'Hérault (Extrait des cartes IGN, © IGN – 2018, autorisation n° 80-1812, reproduction interdite).

La fonction de protection de ce type de système consiste à empêcher toute entrée d'eau dans la zone protégée jusqu'à la crête des digues.

Un système de protection rapprochée réduit plus faiblement la largeur du lit actif du cours d'eau et a donc moins d'impact sur les crues pour le reste du lit du cours d'eau.

4.3.1.2 Système fermé de protection rapprochée, type digue de ceinture  
(Figures 2-37 à 2-39)

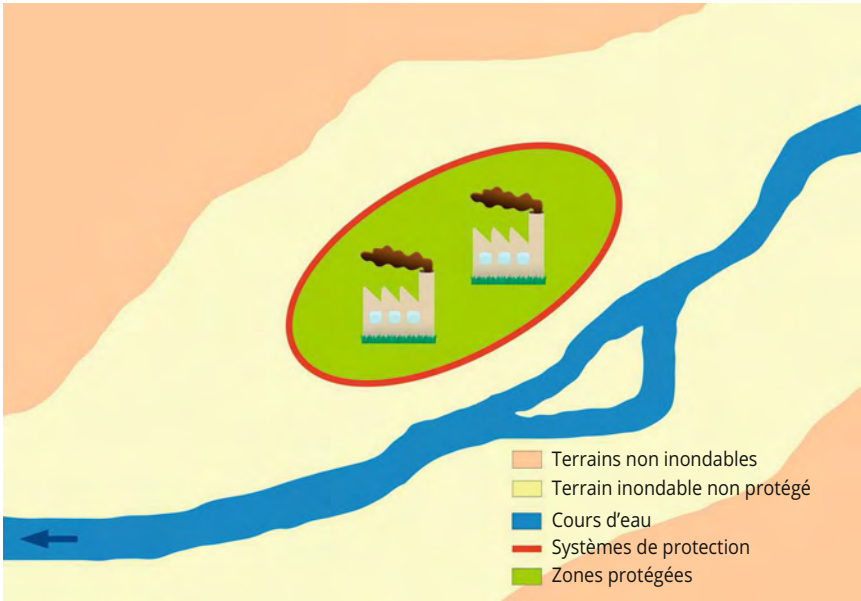


Figure 2-37. Système fermé de type digue de ceinture (Source : B. Beullac).

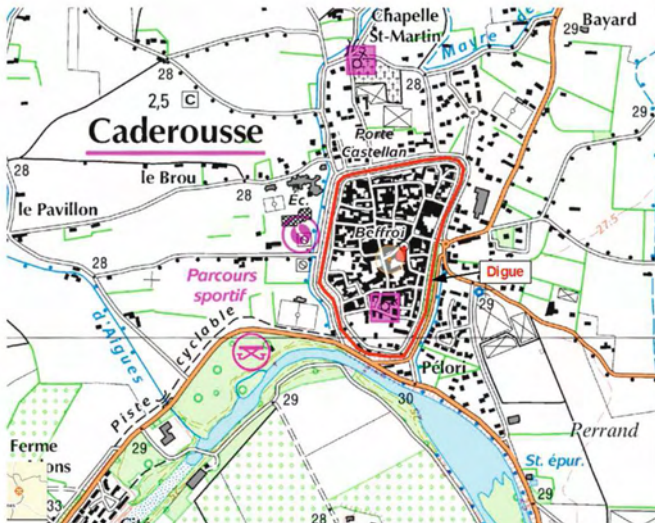


Figure 2-38. Digue de ceinture de Caderousse (84) (Extrait des cartes IGN, © IGN - 2018, autorisation n° 80-1812, reproduction interdite).



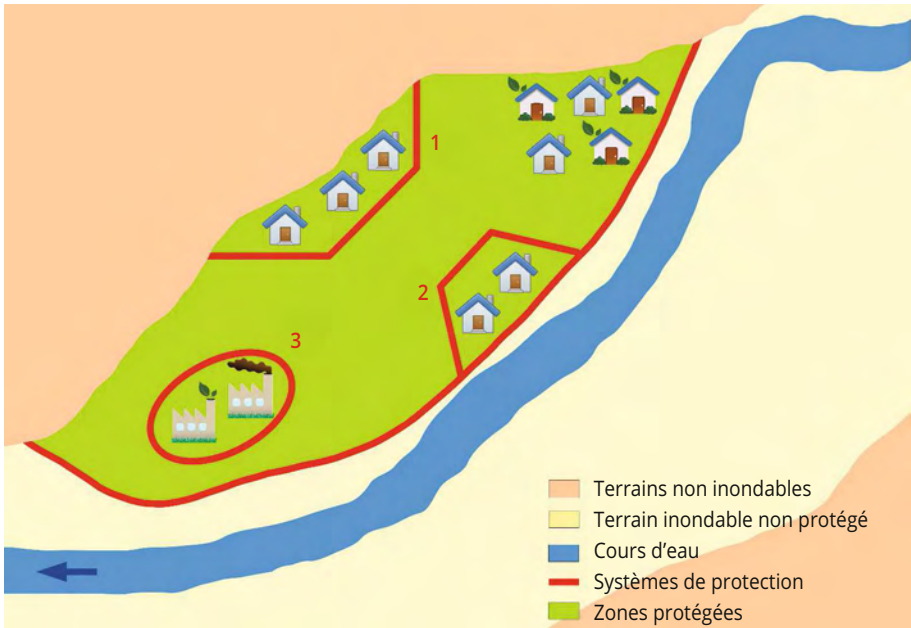
**Figure 2-39.** Digue de protection rapprochée (Source : CEPRI. Les ouvrages de protection contre les inondations, s'organiser pour exercer la compétence GEMAPI et répondre aux exigences de la réglementation issue du décret du 12 mai 2015. CEPRI, février 2017 [6]).

La fonction de protection de ce type de système consiste à empêcher toute entrée d'eau dans la zone protégée jusqu'à la crête des digues.

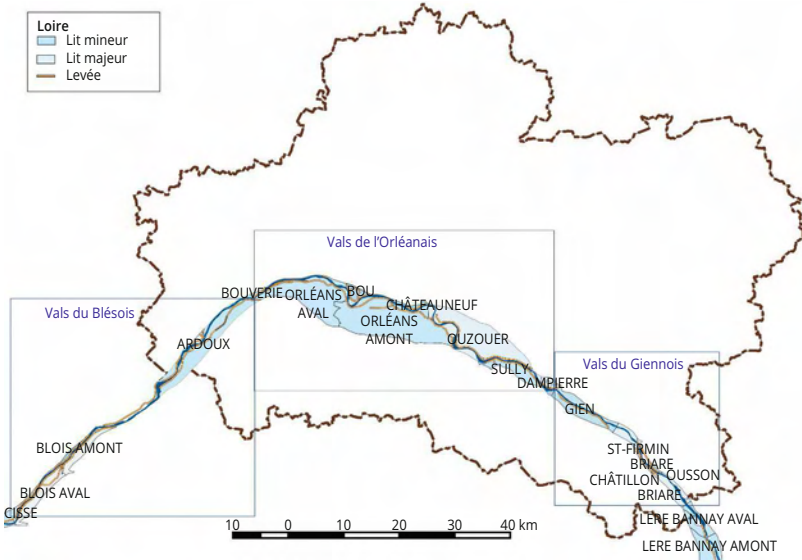
Le système de protection forme une protection rapprochée pour les enjeux situés dans la zone protégée. Le système se ferme sur lui-même et pas sur un coteau.

#### 4.3.1.3 Système de protection généralisée

Un système de protection « généralisé » mobilise tout le lit majeur disponible, souvent entre deux points où le cours d'eau est proche du coteau non inondable (Figures 2-40 et 2-41).



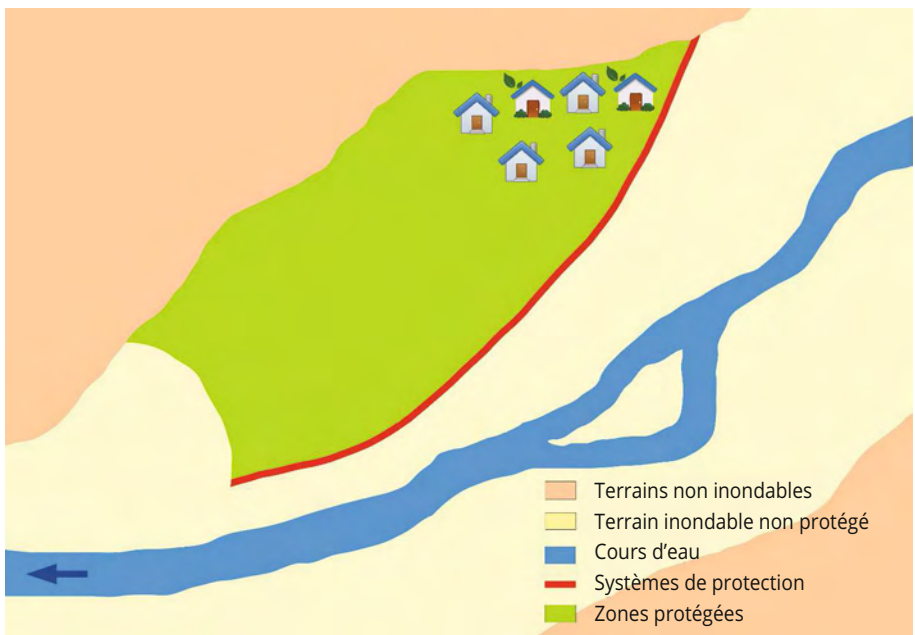
**Figure 2-40.** Système de protection généralisée (Source : B. Beullac). La première ligne de défense est souvent complétée de protections rapprochées de « second rang », soit raccordée au coteau (1), soit de type digue de ceinture (3), soit se raccordant à la digue de premier rang (2).



**Figure 2-41.** Les systèmes de protection des Vals-de-Loire dans le département du Loir-et-Cher (Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:45-ZI-Vals.png>).

Ce type de système a un fort impact sur le fonctionnement hydraulique et morphodynamique du cours d'eau du fait qu'il en est proche et qu'il le contraint sur une grande longueur. Ce type de système de protection est malheureusement très fréquent (Vals-de-Loire, petit Rhône, Vidourle, Aude, etc.), bien que localement des initiatives de « décorsetage » des cours d'eau soient en cours (Vidourle) ou en projet (petit Rhône).

4.3.1.4 Système ouvert à l'aval (Figure 2-42)

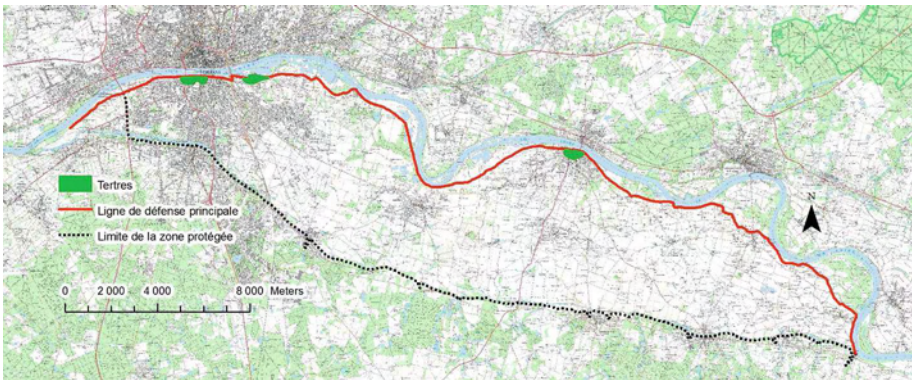


**Figure 2-42.** Système ouvert à l'aval (Source : B. Beullac).



Ce type de système de protection a pour fonction d'empêcher l'entrée d'eau directe dans la zone protégée tout en laissant la possibilité de création d'un remous en partie aval et donc l'entrée d'eau mais avec une intensité bien inférieure à l'inondation naturelle qui aurait lieu sans la présence des digues. Historiquement, ce type de configuration correspond souvent à des zones agricoles dans lesquelles et pour lesquelles les digues avaient pour fonction essentielle de limiter la fréquence des inondations et les vitesses des eaux d'inondation tout en permettant l'alluvionnement. En cas d'inondation par surverse par l'amont, il permet également le retour rapide des eaux d'inondation au cours d'eau.

#### 4.3.1.5 Système de protection ouvert à l'aval du fait d'une confluence (Figure 2-43)

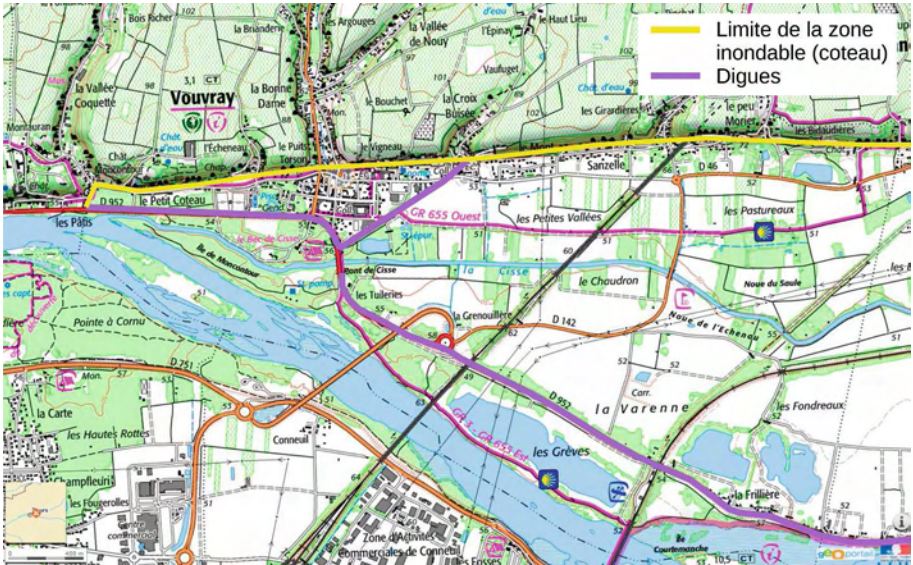


**Figure 2-43.** Système de protection du Val-d'Orléans, ouvert à l'aval pour le passage du Loiret (Extrait des cartes IGN, © IGN – 2018, autorisation n° 80-1812, reproduction interdite).

Ce type de système a pour fonction de protéger contre les inondations d'un cours d'eau principal, mais en revanche pas contre les inondations d'un affluent. Une inondation par remous de l'aval de la zone protégée est donc possible. Cette inondation a néanmoins l'avantage de se produire lentement et avec des vitesses horizontales très faibles. Par ailleurs, plus on s'éloigne de la zone de la confluence vers l'amont, plus les hauteurs d'eau d'inondation sont réduites par rapport à une inondation naturelle (en l'absence de digues).

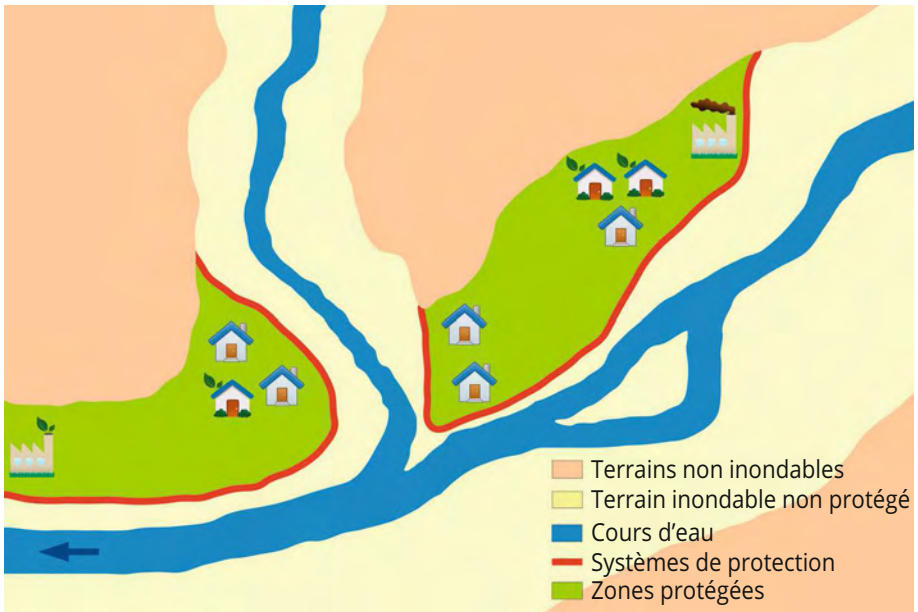
#### 4.3.1.6 Système de protection ouvert à l'aval du fait d'une confluence et protection localisée contre l'inondation par remous

Un système ouvert à l'aval, ne protégeant pas contre les inondations d'un affluent, peut néanmoins être complété par une protection localisée contre l'inondation par remous du cours d'eau principal. Le val de Cisse (Figure 2-44), en Loire moyenne, est ainsi protégé contre les crues de la Loire mais pas de la Cisse. Le système est ouvert en aval, comme pour le Val-d'Orléans (Figure 2-43), et laisse la Cisse se jeter dans la Loire naturellement. Pour prémunir les quartiers bas de Vouvray en rive droite de l'inondation par la Loire, des digues forment un système de protection localisé.



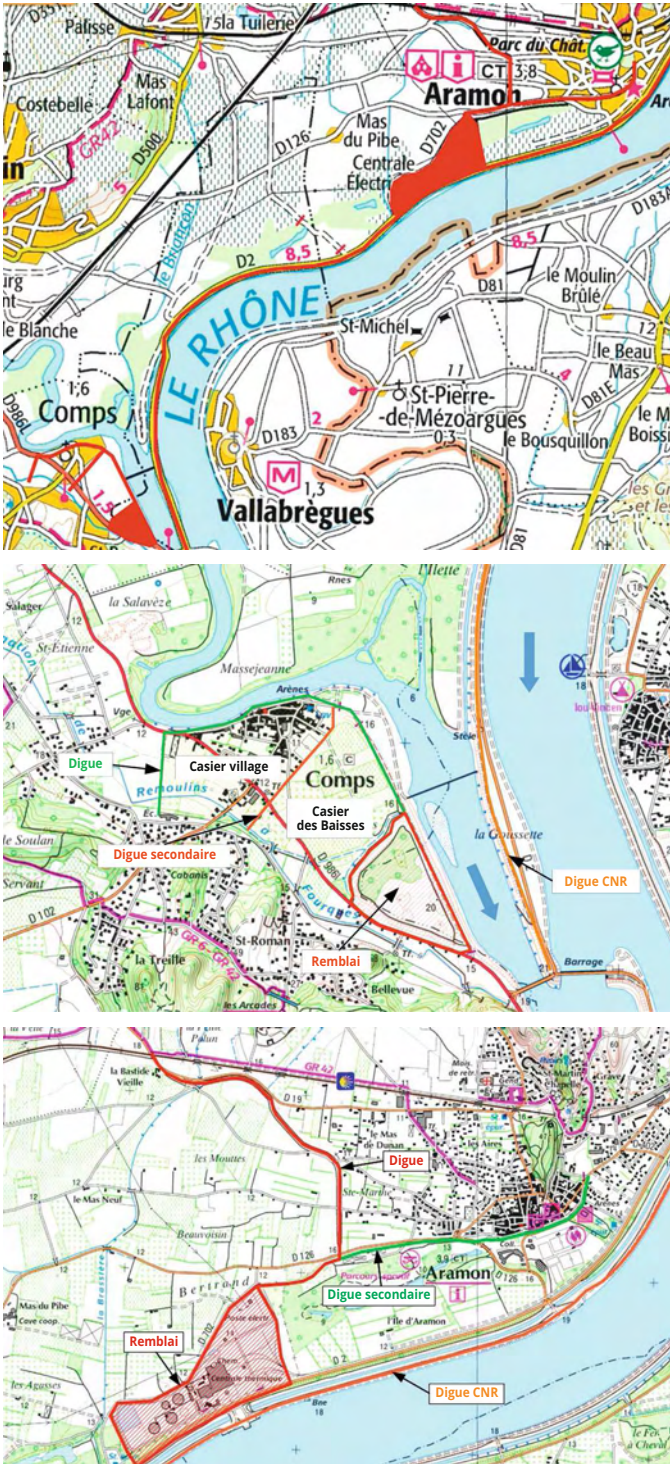
**Figure 2-44.** Aval du système de protection du val de Cisse, ouvert à l'aval pour le passage de la Cisse, et protection localisée de la commune de Vouvray (Extrait des cartes IGN, © IGN – 2018, autorisation n° 80-1812, reproduction interdite).

4.3.1.7 Systèmes de protection en confluence (Figures 2-45, 2-46, 2-47)



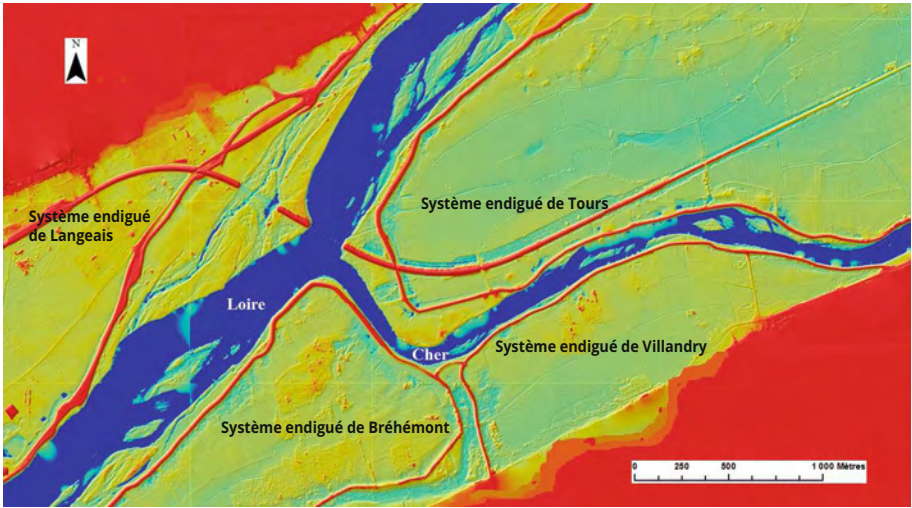
**Figure 2-45.** Systèmes en confluence (Source : B. Beullac).





**Figure 2-46.** Systèmes de protection de Comps (30) et Aramon (30) situés à la confluence du Gardon et du Rhône (Extrait des cartes IGN, © IGN – 2018, autorisation n° 80-1812, reproduction interdite).  
CNR : Compagnie nationale du Rhône.



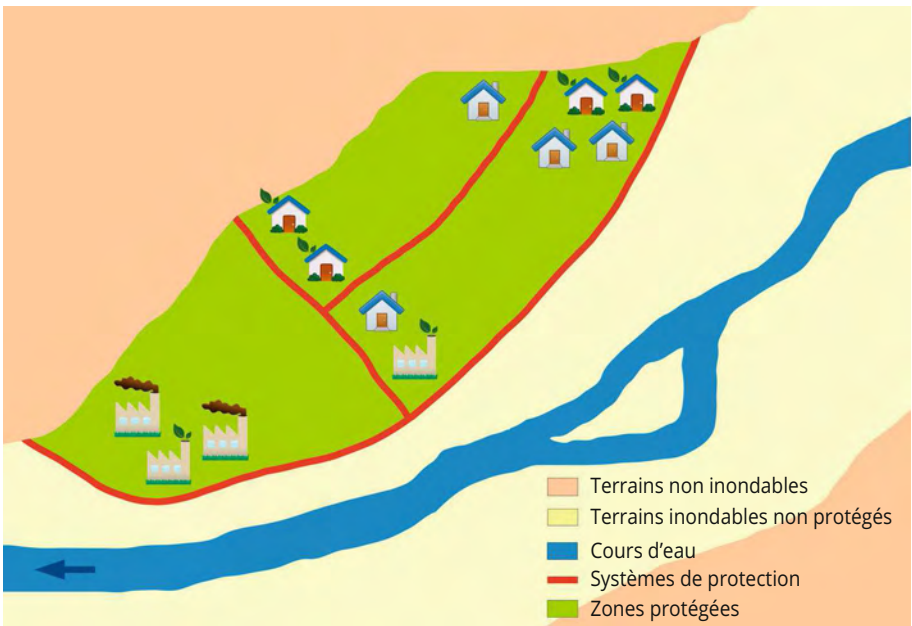


**Figure 2-47.** Systèmes endigués en zone de confluence entre la Loire et le Cher (Source : DREAL Centre - Val-de-Loire).

Les systèmes de protection dans cette configuration ont pour fonction de protéger contre les actions des deux cours d'eau, avec des périodes de retour variable selon le cours d'eau. Les inondations par remous et les possibles concordances d'événements hydrauliques doivent être prises en considération.

Selon leur proximité au lit mineur, ces systèmes de protection peuvent réduire la largeur du lit actif des deux cours d'eau jusqu'à certains débits de crue.

#### 4.3.1.8 Système ramifié à casiers (Figure 2-48)



**Figure 2-48.** Système ramifié à casiers (Source : B. Beullac).

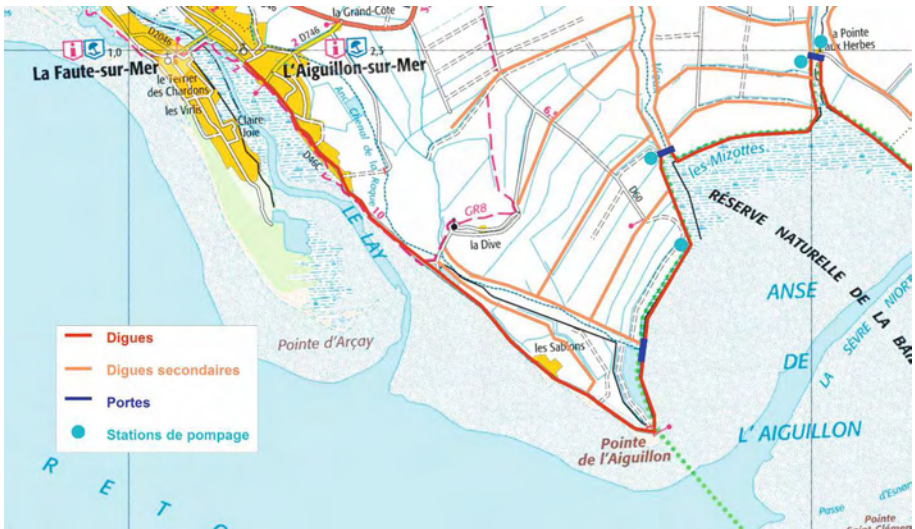
La fonction de protection de ce type de système consiste d'abord à empêcher toute entrée d'eau dans la zone protégée jusqu'à la crête des digues de premier rang. Elle consiste également à définir des casiers hydrauliques dans la zone protégée, dans le but de contrôler la propagation des éventuelles inondations.

### 4.3.2. En milieu marin

Parmi les spécificités des systèmes de protection maritimes, on peut citer :

- une forte importance, pour les ouvrages situés à proximité de la mer, de la protection contre les vagues par rapport aux niveaux, surtout sur les littoraux Atlantique, Manche et mer du Nord ;
- dans certains cas, la présence d'une importante zone non protégée (plage, marais, zones humides), la protection concerne alors plutôt les niveaux que les vagues ;
- la présence fréquente d'ouvrages de protection indirecte (brise-lames, épis) ;
- les zones gagnées sur la mer et ceinturées par des digues (polders) ;
- l'intégration fréquente dans les systèmes d'éléments topographiques linéaires naturels (dunes, cordons de galets) ;
- la présence possible de l'embouchure ou de l'estuaire<sup>4</sup> d'un cours d'eau (voir également plus bas [paragraphe 4.3.4](#) « En milieu de transition ou mixtes »), souvent en zone urbanisée ;
- la présence possible d'ouvrages et de bassins portuaires ainsi que de canaux de navigation ;
- éventuellement présence de barrage mobile anti-mer en lien avec les embouchures ou les ouvrages portuaires et de navigation.

#### 4.3.2.1 Système poldérisé (Figures 2-49 et 2-50)



**Figure 2-49.** Système poldérisé (Extrait des cartes IGN, © IGN – 2018, autorisation n° 80-1812, reproduction interdite).

4. L'estuaire d'un cours d'eau est la partie de son embouchure qui subit l'influence marine (en termes de niveau hydrostatique, de vague ou encore de salinité).

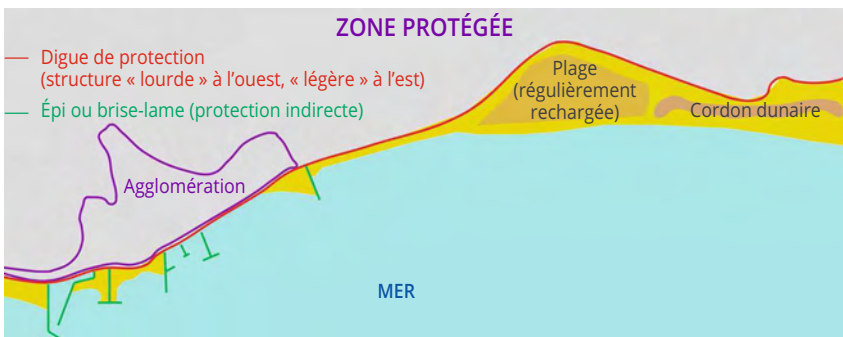


**Figure 2-50.** Baie de l'Authie (Marquenterre) : carte de 1984 du BRGM montrant les diges (royons) construites pour créer des polders (renclotures) (Source : BRGM, 1984 ; disponible à l'adresse suivante : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Royons\\_Marquenterre\\_BRGM.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Royons_Marquenterre_BRGM.jpg)).

Les polders sont des terres gagnées sur la mer, par endiguement et drainage. On y retrouve donc souvent plusieurs rangs de diges, la poldérisation ayant eu lieu en plusieurs étapes successives, ainsi que des canaux de drainage, éventuellement des stations de pompage et/ou des portes permettant l'évacuation gravitaire des eaux drainées. Le niveau des terres dans la zone protégée est proche du niveau de la mer, souvent même inférieure.

**4.3.2.2** Système maritime composé de différents types de protection

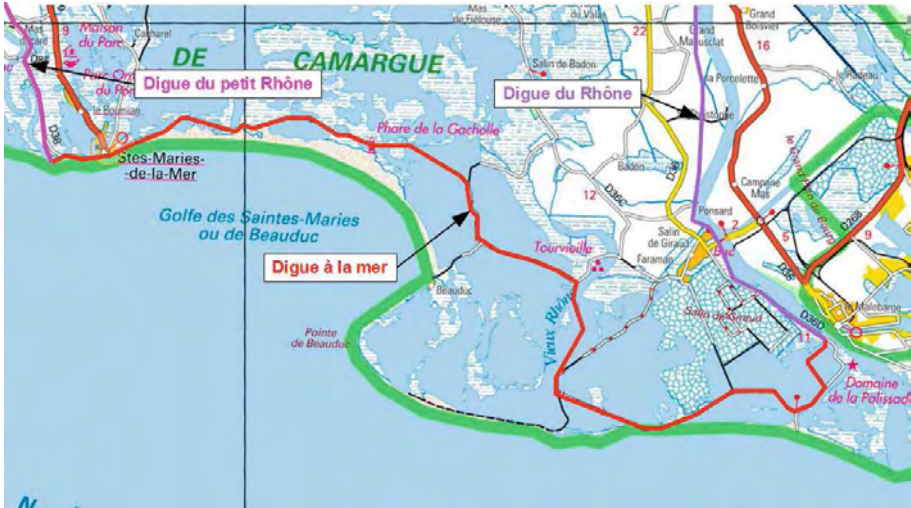
La protection contre les inondations d'origine marine nécessite souvent, en complément de la protection directe (diges), une protection contre l'érosion et/ou une atténuation de la houle (les deux étant liés). Cette protection indirecte peut être assurée par des ouvrages (épis, brise-lames) ou par le maintien d'une plage à l'avant de la digue proprement dite (Figure 2-51).



**Figure 2-51.** Partie d'un système maritime composé de différents types de protection (Source : R. Tourment).



Pour éviter les actions trop importantes de la mer sur les ouvrages, il est souhaitable que ceux-ci soient situés à l'intérieur des terres plutôt qu'au contact direct avec la mer. Sur la [Figure 2-52](#), on observe que ce principe est respecté sur la quasi-totalité de la digue à la mer en Camargue insulaire, sauf à l'extrême sud et au voisinage de l'agglomération des Saintes-Maries-de-la-Mer, où une érosion importante a lieu.



**Figure 2-52.** Tracé en plan de la digue à la mer (Camargue insulaire) (Extrait des cartes IGN, © IGN - 2018, autorisation n° 80-1812, reproduction interdite).

#### 4.3.2.3 Système maritime composé de protection directe et indirecte et associant un port

De nombreux systèmes de protection en domaine maritime associent des ouvrages situés côté mer et un port. C'est le cas par exemple de Saint-Malo (35), comme celui de Saint-Jean-de-Luz (64) ([Figure 2-53](#)). Les ouvrages côté port sont soumis à une houle très atténuée et ont donc une hauteur très inférieure. C'est le cas dans ces deux villes.

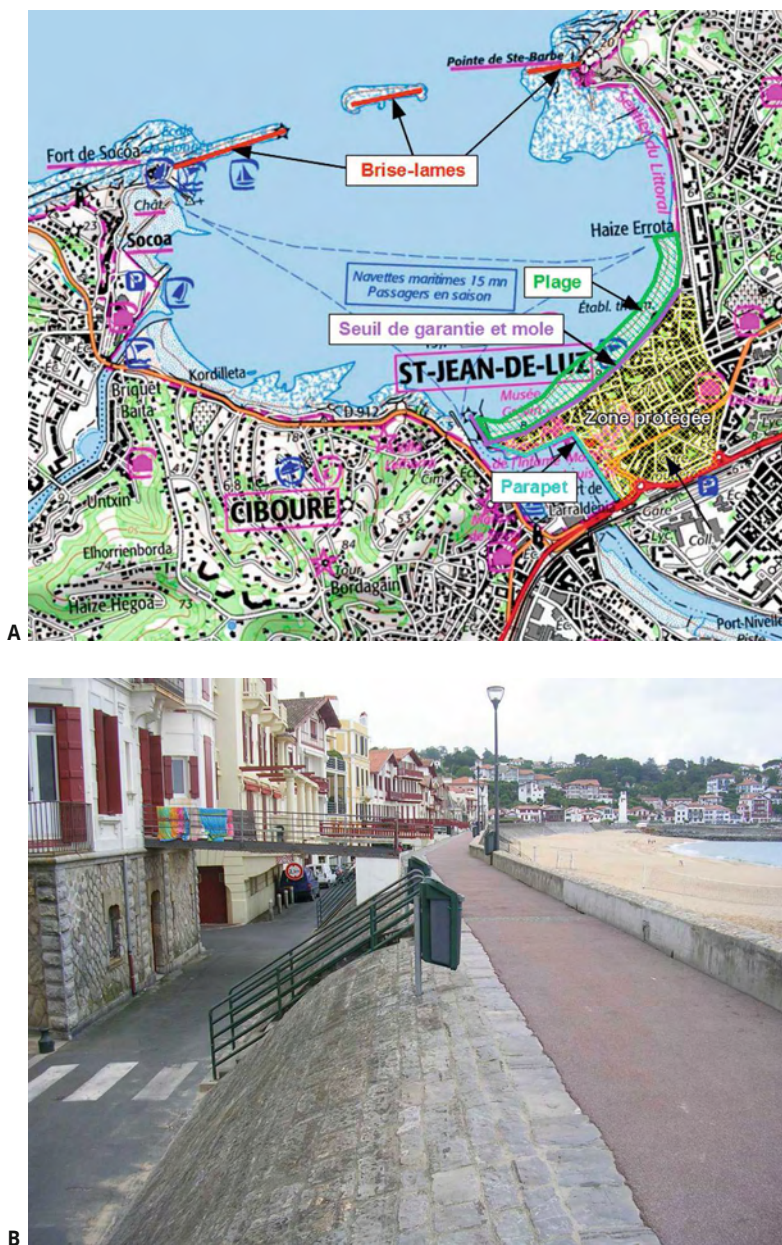
Dans le cas de Saint-Jean-de-Luz, côté port, il s'agit d'un simple parapet, la houle étant complètement atténuée dans le chenal d'accès au port. En revanche, le « seuil de garantie » ([Figure 2-53b](#)) (nom local de la digue frontale entre la plage et le bourg) est un ouvrage en maçonnerie de plusieurs mètres de haut. En complément de ces ouvrages de protection directe, les actions de la mer sur ces ouvrages sont atténuées par la présence de trois brise-lames et de la plage qui est suivie et gérée à cet effet. Historiquement, avant la mise en place du système actuel (1898), de nombreuses catastrophes avaient inondé voire détruit et érodé des quartiers entiers de cette cité, notamment en 1749, 1782 et 1822.

### 4.3.3. En torrentiel

Nous décrivons plusieurs configurations types que l'on peut rencontrer dans un contexte torrentiel, mais il existe une multitude de combinaisons possibles entre ces différentes configurations types.

#### 4.3.3.1 Système de protection étroit (fortement contraint)

Il s'agit d'un endiguement relativement étroit qui protège les deux rives et qui nécessite, étant donné l'étroitesse du chenal, la mise en place de protection complémentaire parafouille (radier, série de seuils, etc.) pour éviter l'incision du lit ou protéger l'ouvrage



**Figure 2-53.** A : Système de protection de Saint-Jean-de-Luz (64) (Extrait des cartes IGN, © IGN – 2018, autorisation n° 80-1812, reproduction interdite).

B : Vue de seuil de garantie de Saint-Jean-de-Luz (Source : Rémy Tourment).

de ses effets (Figure 2-54). Les deux rives sont alors généralement urbanisées alors que l'objectif initial était parfois de protéger des terres agricoles.

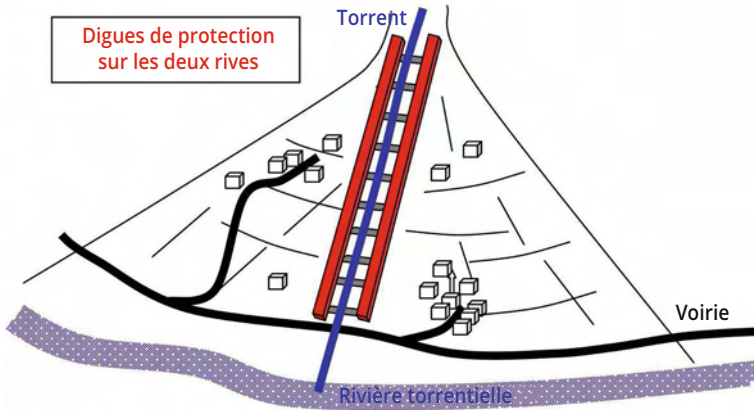


Figure 2-54. Système de protection torrentiel étroit (Source : Y. Quefféléan, ONF - RTM).

En créant un endiguement étroit, on augmente la capacité de transport solide, mais cela ne compense en général pas la tendance naturelle au dépôt en cas (fréquent) de réduction progressive de sa pente.

Cela est d'autant plus vrai dans la zone de confluence où il faudrait conserver un vaste espace pour stocker les matériaux qui ne peuvent être repris par la rivière torrentielle.

### Exemple du système de protection « étroit » du torrent du Fournel à L'Argentière-La-Bessée

Le dispositif est constitué d'un chenal à biefs affouillables, qui comprend une trentaine de seuils de stabilisation du lit.

La partie la plus ancienne de l'endiguement (les deux tiers aval de la rive droite entre les ponts de la RD 104 et RD 604) est antérieure à la crue de 1928. Elle est constituée d'un mur poids en pierres maçonnées.

Le reste des deux berges a été endigué à la suite de la crue de 1928 en créant une digue en remblai protégée par un perré en béton (parement « mince » d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur) et confortée en pied par une poutre parafouille.

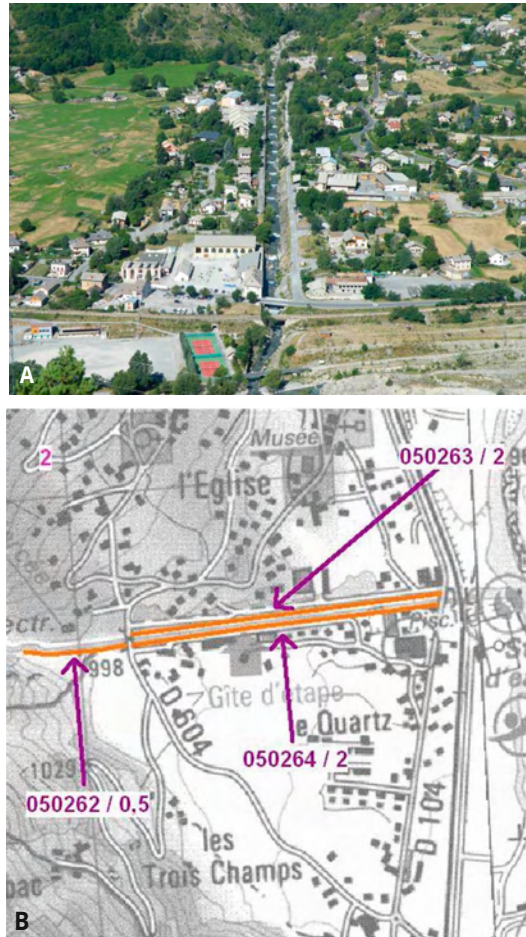
Un mur de protection a été construit plus tard en rive droite à l'aval du pont de la voie ferrée pour protéger les infrastructures sportives (tennis, etc.) qui s'y sont implantées.

Le Fournel est ainsi entièrement endigué sur son cône de déjection.

Plusieurs travaux de confortement et/ou de reprise en sous-œuvre ont été nécessaires par la suite pour remédier à l'apparition de désordres sur les ouvrages (affouillements, etc.).

Les Figures 2-55 à 2-57 illustrent les caractéristiques du système.



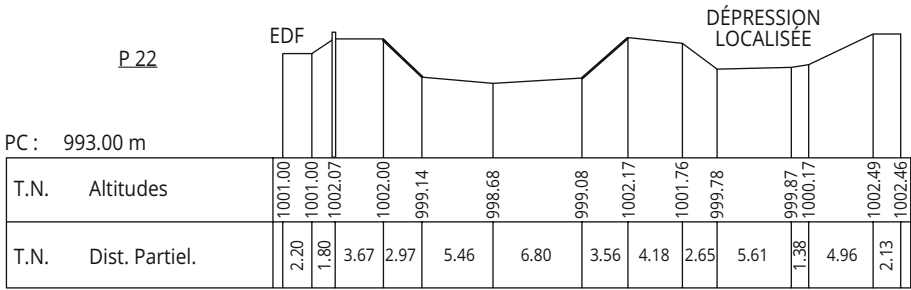


**Figure 2-55.** Exemple de système de protection torrentiel étroit à L'Argentière-La-Bessée. A) Vue aérienne du cône de déjection et du système d'endiguement du Fournel à L'Argentière-La-Bessée (Source : ONF - RTM 05). B) Report des tronçons de digues classées sur fond IGN (Sources : « Bardigues » ; Extrait des cartes IGN, © IGN - 2018, autorisation n° 80-1812, reproduction interdite).



**Figure 2-56.** Typologie des digues du système de protection torrentiel de L'Argentière-La-Bessée (Sources : Y. Quefféléan, ONF - RTM 05; Extrait des cartes IGN, © IGN - 2018, autorisation n° 80-1812, reproduction interdite). Localisation des principaux types de structures existants sur l'endiguement du Fournel.

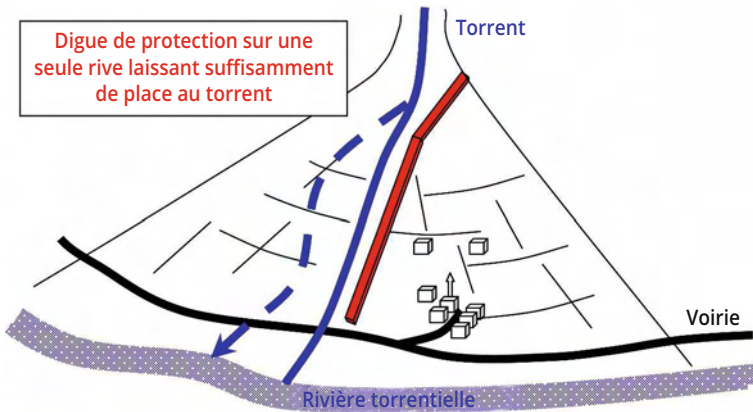




**Figure 2-57.** Profil en travers de configuration n° 2 dans le système de protection torrentiel de L'Argentière-La-Bessée (Source : B. Beullac).

4.3.3.2 Système de protection sur une seule rive « peu contraignant »

Une seule rive est endiguée et l'espace de divagation laissé au torrent sur la rive opposée est suffisant (Figure 2-58).



**Figure 2-58.** Système de protection torrentiel sur une seule rive (Source : Y. Quefféléan, ONF - RTM).

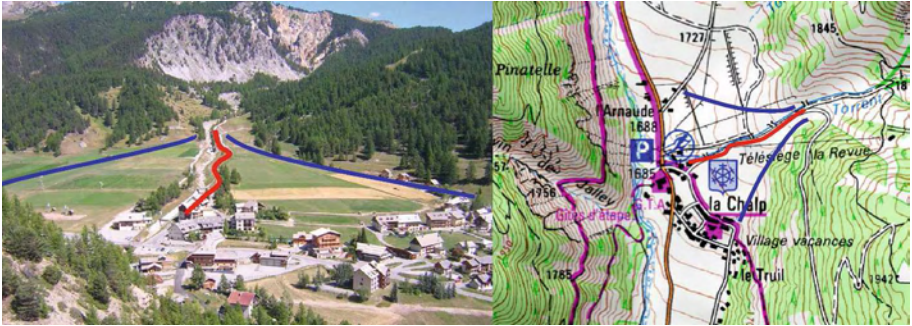
Les enjeux doivent rester limités sur la rive opposée qui reste exposée aux divagations du torrent (changement de lit).

Ce principe d'aménagement des cônes est à privilégier sur les sites où cette solution est acceptable (enjeux limités sur une des deux rives).

**Exemple du système de protection du torrent de Rivet (Arvieux 05)**

Sur le cône de déjection du Rivet, une digue a été créée en rive gauche pour générer une différence de niveau avec la rive droite et favoriser ainsi le débordement sur cette rive (non rehaussée) en cas de dépassement de la capacité du chenal (Figure 2-59).

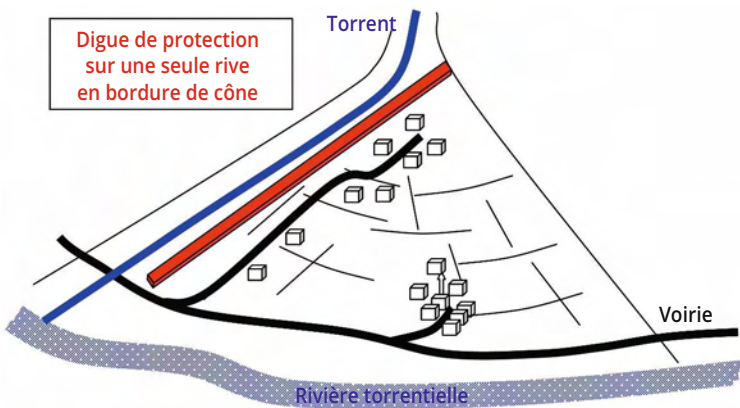
Un aménagement complémentaire (épis déflecteur) a été mis en place en rive droite pour protéger le seul bâtiment implanté sur cette rive.



**Figure 2-59.** Système de protection du Rivet (Sources : ONF – RTM 05 ; Extrait des cartes IGN, © IGN – 2018, autorisation n° 80-1812, reproduction interdite).  
En rouge : la digue, en bleu : la limite du cône de déjection.

**4.3.3.3** Système de protection sur une seule rive en bordure de cône et/ou contre le versant (faiblement à fortement contraignant selon la largeur du lit)

Dans cette configuration, le lit a été dévié ou a creusé naturellement son lit en bordure du cône de déjection (Figure 2-60).



**Figure 2-60.** Système de protection torrentiel sur une seule rive en bordure de cône et/ou contre le versant (Source : Y. Quefféléan, ONF – RTM).

Une grande partie du cône de déjection est alors généralement occupée.

Les possibilités de divagations sont ainsi réduites, d'autant plus si cette bordure du cône est en contact avec le versant ou une berge plus haute et insubmersible.

Ce système de protection contraint plus ou moins le torrent selon la largeur laissée au lit.

### Exemple du système de protection du torrent de Vachères (Embrun – Baratier 05) : système de protection peu contraignant

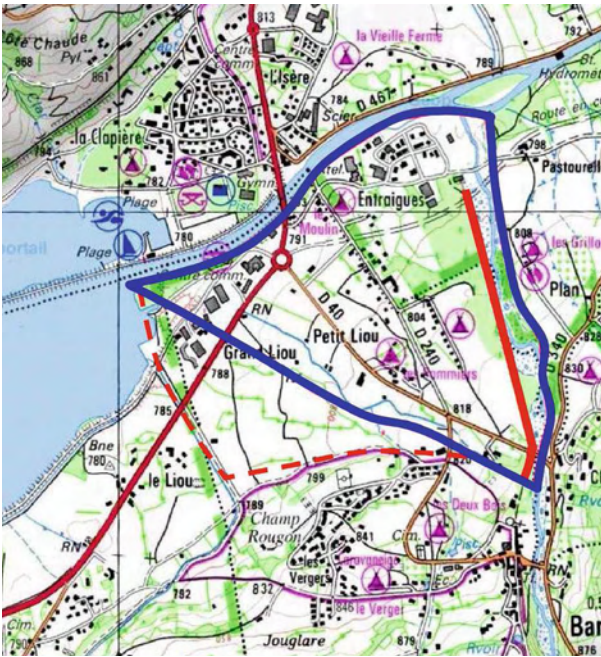
Le torrent du Vachères est un affluent rive gauche de la Durance qui draine un bassin-versant d'un peu moins de 100 km<sup>2</sup>. Il est endigué de longue date (depuis les années 1880-1881) à l'extrémité rive gauche de son cône de déjection, depuis le village de Baratier jusqu'aux abords de la RN 94 (Figures 2-61 et 2-62). La digue est constituée d'un remblai protégé par un perré incliné de qualité en pierres sèches.

L'objectif initial était de protéger le secteur du Liou à vocation principalement agricole (vergers, prés, etc.) et les rares infrastructures présentes sur la rive gauche du cône (moulins, voie royale, etc.) faisant suite aux crues dévastatrices de 1856 et 1879. La crue de 1856 avait notamment apporté une quantité exceptionnelle de matériaux sur le cône.

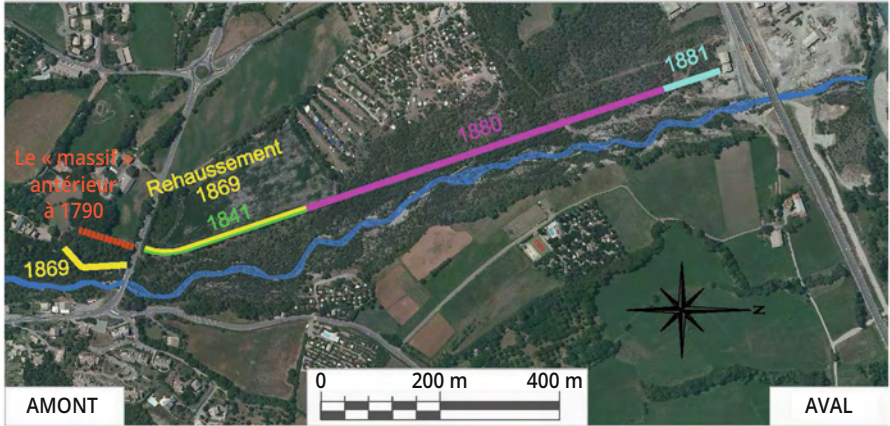
Depuis, la zone s'est fortement développée (trois campings, une cinquantaine de bâtiments d'habitation, zone commerciale de Baratier, zone artisanale d'Entraigues à Embrun, deux voies de communication principales RD 40 et plus récemment RN 94), puisqu'elle était protégée par la digue du Liou.

Pour tenir compte des apports potentiellement importants du Vachères, la digue a été construite en laissant un espace de mobilité relativement large au torrent.

L'impact de l'endiguement sur les évolutions morphologiques du lit est par conséquent réduit.



**Figure 2-61.** Vue d'ensemble du périmètre du système endigué du torrent de Vachères (Sources : ONF - RTM 05 ; Extrait des cartes IGN, © IGN - 2018, autorisation n° 80-1812, reproduction interdite).



**Figure 2-62.** Localisation des différentes étapes de construction de la digue de Vachères (Source : ONF - RTM 05).

### Exemple du système de protection du torrent du Chagnon (Vars 05) : système de protection relativement contraignant

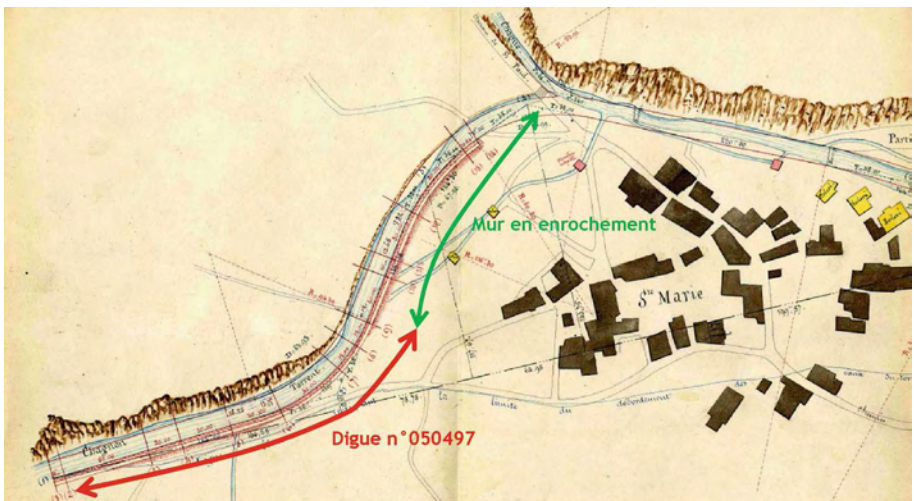
Le village de Sainte-Marie, à Vars, est construit sur le cône de déjection du torrent du Chagnon, qui conflue en amont du village avec le Chagne.

Les apports solides du Chagnon sont considérables et conduisent à des débordements et des engravements massifs lors des fortes crues, comme en 1856 et 1957.

À la suite de la crue de 1856, une digue fut construite sur la rive droite du cône de déjection pour empêcher un débordement du Chagnon sur son cône en direction du village de Sainte-Marie (Figures 2-63 et 2-64).

Cette digue maintient le torrent contre le versant rive gauche avec une largeur de lit parfois réduite à moins de 8 m.

En l'occurrence, il n'y avait pas trop le choix, puisque le village de Sainte-Marie s'était déjà développé sur le cône de déjection du Chagnon.



**Figure 2-63.** Projet de construction de la digue rive droite du Chagnon, décembre 1860 (Source : archives DDT 05).



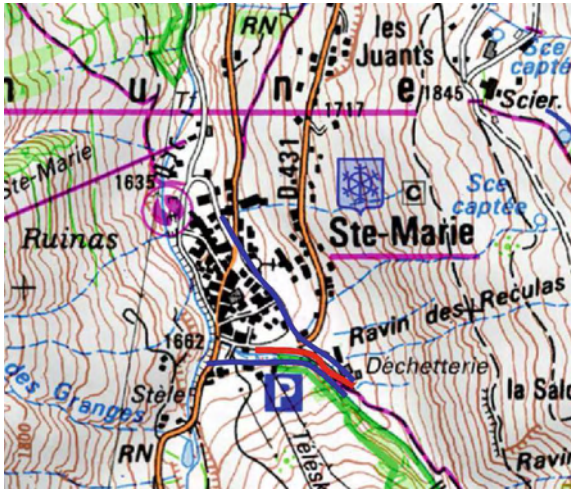


Figure 2-64. Vue d'ensemble du périmètre du système endigué du torrent de Chagnon (Sources : ONF - RTM 05 ; Extrait des cartes IGN, © IGN - 2018, autorisation n° 80-1812, reproduction interdite).

#### 4.3.3.4 Système de protection « discontinu »

Le système de protection est ici constitué d'une succession non continue d'ouvrages linéaires, tronçons de digues pouvant se raccorder en un ou plusieurs points à des éléments topographiques naturels (versant amont, berge haute, dépôt fossile, etc.) (Figure 2-65).

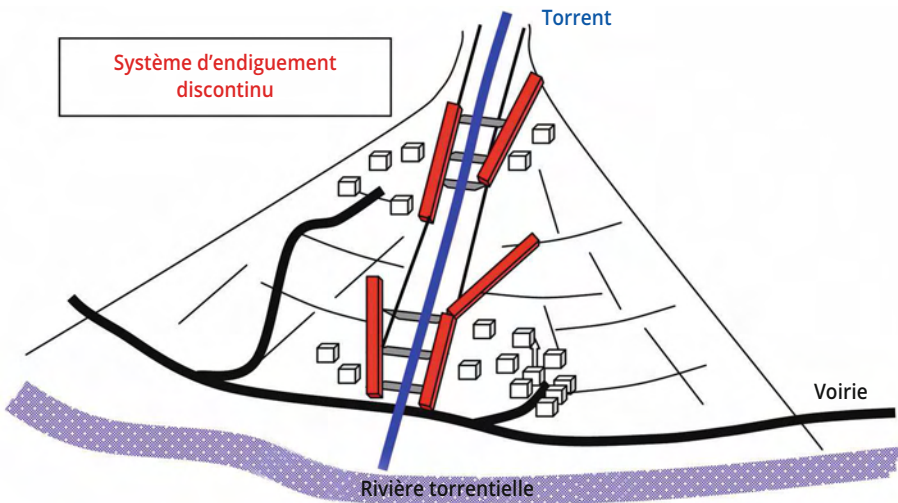


Figure 2-65. Système de protection « discontinu » (Source : Y. Quefféléan, ONF - RTM).

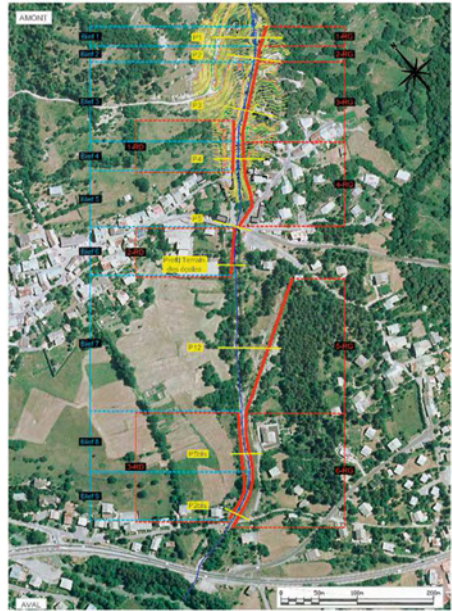
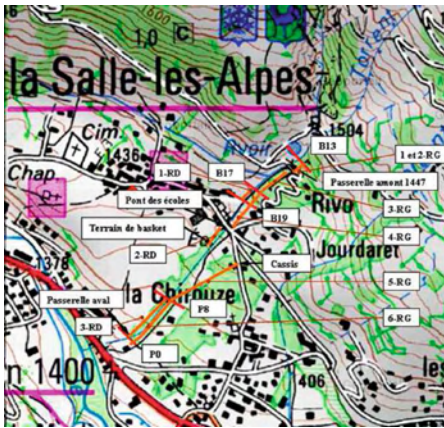
L'intérêt de ce type de configuration est qu'elle permet de dégager des zones de régulation de matériaux entre les tronçons de digue étroites, voire laisse un point de débordement vers une zone de moindres dommages en cas d'apport massif en matériaux.

En réalité, cette situation est souvent héritée d'aménagements successifs au gré du développement du cône de déjection.

### Exemple du système de protection du torrent de La Salle (La Salle-les-Alpes 05)

Les digues ont été construites à partir de 1949 en vue d'empêcher le torrent de déborder sur son cône de déjection (Figure 2-66). Le long d'environ 750 m de cours d'eau, le système de protection, qui relève de la classe C au sens du décret de décembre 2007, englobe aujourd'hui quelque 900 m de digues proprement dites (digues en remblai ou à structure composite intégrant en parement un ouvrage de protection enroché ou en béton), réparties entre rive gauche et rive droite.

En rive gauche, l'endiguement est quasi continu alors qu'en rive droite, il est interrompu par des tronçons de berge dépourvus de digue ou ne comportant que des « digues » de hauteur inférieure à 1 m (cordons de curage ou dépôts torrentiels naturels).

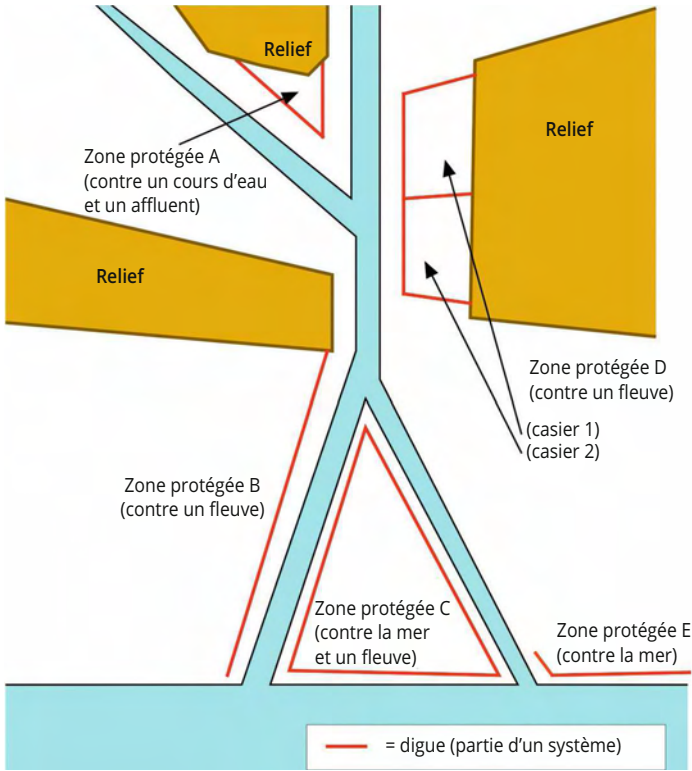


**Figure 2-66.** Système de protection du torrent de La Salle (La Salle-les-Alpes 05) (Source : IRSTEA, ONF – RTM 05 [30]).

#### 4.3.4. En milieu de transition ou mixtes

##### 4.3.4.1 Système mixte en contexte maritime

En zone d'embouchure, les systèmes peuvent protéger de manière indépendante de la mer et/ou du cours d'eau. Sur la Figure 2-67, par exemple, la zone protégée B l'est contre le fleuve seulement, la zone C est protégée contre la mer et le fleuve, et la zone E contre la mer seulement.



**Figure 2-67.** Systèmes de protection en zone estuarienne ou deltaïque (Source : R. Tourment).

Comme pour tous les types de systèmes de protection, en milieu mixte, ils peuvent associer ouvrages et éléments naturels (Figure 2-68).



**Figure 2-68.** Système mixte en embouchure (Sources : R. Tourment, B. Beullac).



En milieu estuarien, une zone de transition combine les influences fluviales et marines en termes d'action (voir paragraphe 2.2.) (Figure 2-69).

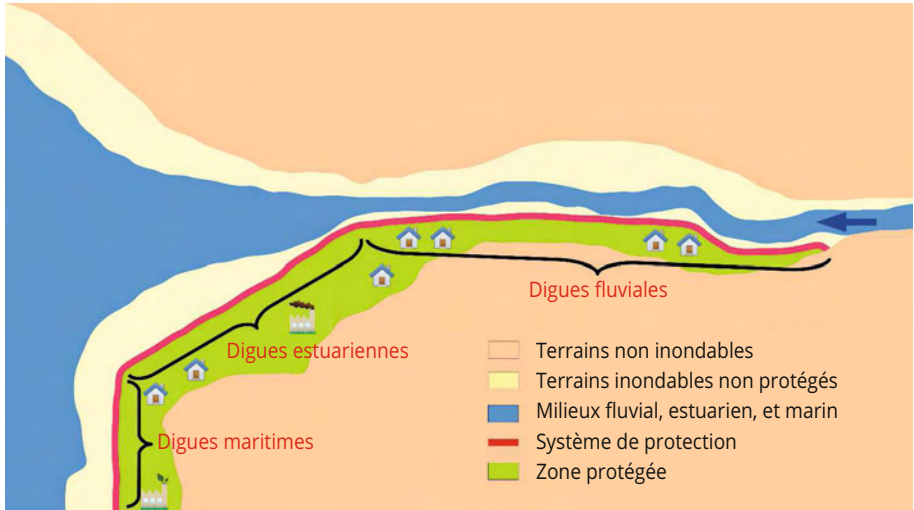


Figure 2-69. Système estuarien (Source : B. Beullac).

#### 4.3.4.2 Système mixte en contexte torrentiel

À la confluence entre un torrent et une rivière torrentielle ou rivière, leurs systèmes de protection peuvent être jointifs (Figure 2-70). Il faut souvent étudier plusieurs scénarios avec concomitances ou non de crues pour bien appréhender les niveaux atteints et donc évaluer les risques à ce niveau, entre autres ceux liés à la surverse.

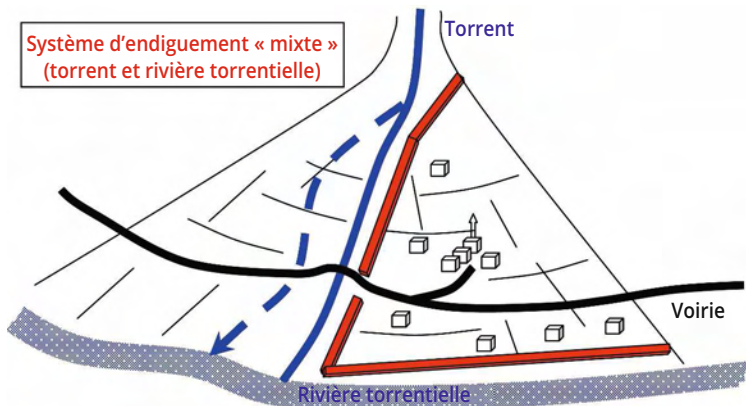


Figure 2-70. Système mixte en confluence de torrent et de rivière torrentielle (Source : Y. Quefféléan, ONF - RTM).

## 5. Typologie des digues

La composition structurelle des digues peut être de nature très variable selon leur ancienneté et le contexte de leur construction. Leur conception peut être très différente en fonction des types d'actions externes auxquelles elles sont soumises, du contexte

géologique de leur implantation, des contraintes foncières et urbanistiques, et de leurs objectifs hydrauliques.

Ces ouvrages de protection sont souvent en remblai, mais peuvent également contenir des éléments rigides ou être totalement rigides (par exemple, des murs).

## 5.1. Principaux types de digues

Une digue peut être un ouvrage en remblai (aussi dénommée levée dans ce cas particulier), ou un ouvrage rigide, de type poids ou mur. Elle peut également être composée pour partie de sol et pour partie de structure rigide. Ces différents types sont détaillés ci-après.

La section suivante est largement inspirée et adaptée du Référentiel technique digues [40] entre autres sources.

La plupart des digues de protection sont des ouvrages en remblai de terre (allant du limon au sable, parfois même au gravier). L'histoire de leur construction et leur position géographique expliquent largement leur constitution. Divers remblais peuvent en outre être amenés à jouer le rôle de digue, sans qu'ils aient été initialement conçus à cet effet [40].

### 5.1.1. Digues en remblai

#### 5.1.1.1 Remblais homogènes

Les digues en terre homogènes sont des digues en remblai compacté (ou consolidé au cours du temps). Le corps du remblai est constitué d'un sol homogène généralement prélevé à proximité (argile ou limon). Il doit être stable et suffisamment imperméable (Figure 2-71) pour limiter les infiltrations et éviter la saturation. La variabilité des matériaux peut être grande, y compris le long d'un même milieu eau (par exemple, sur un cours d'eau : matériau sableux le long du bassin moyen et matériau limoneux en approchant de l'embouchure) ; mais dans une section donnée, il s'agit généralement de remblais homogènes sans zonage et sans dispositifs particuliers de drainage interne. La caractérisation géotechnique de tels matériaux peut être délicate et nécessite des précautions. Du fait de l'absence de moyens lourds de compactage et d'excavation lors de l'édification des digues anciennes, les remblais sont parfois de relativement faible compacité et sans ancrage particulier dans la fondation.

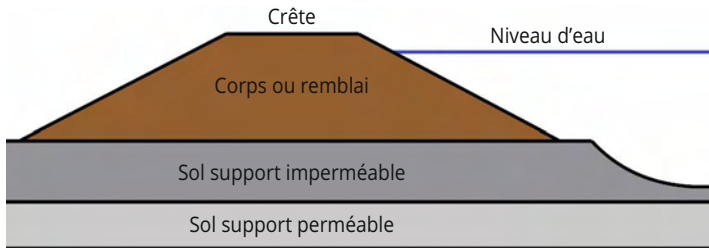
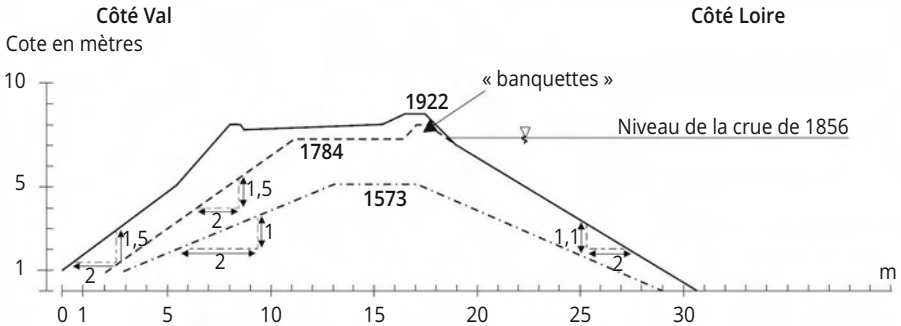


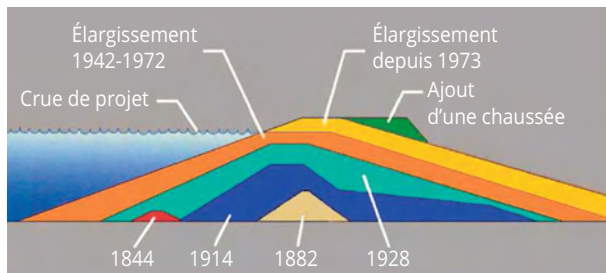
Figure 2-71. Digue homogène sur fondation imperméable (Source : B. Beullac).

### 5.1.1.2 Remblais historiques

Les digues réellement homogènes, même par tronçon, sont (à la différence des barrages) relativement rares. Dans la réalité, on trouve plutôt des digues « *homogènes par leur hétérogénéité* ». Ce sont souvent des ouvrages construits par étapes à plusieurs périodes, en fonction de l'évolution des usages du milieu eau ou des besoins de protection. Plus il y a eu d'étapes dans la construction de la digue et plus celle-ci sera complexe et synonyme de grande hétérogénéité (Figures 2-72 et 2-73).

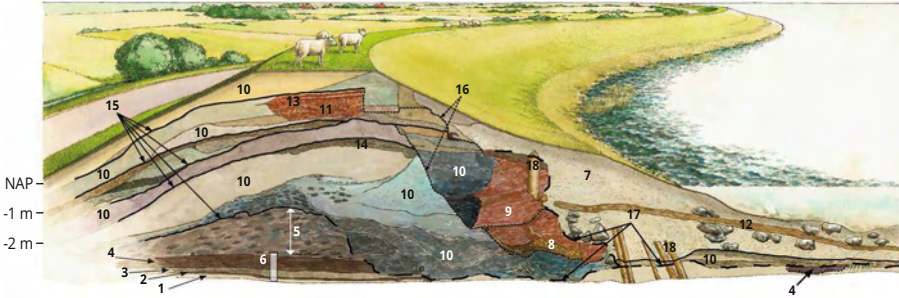


**Figure 2-72.** Coupe type d'une levée de Loire représentative d'une digue historique (Source : Cemagref 2004, d'après Dion, 1927).



**Figure 2-73.** Coupe type de l'évolution des levées du Mississippi (Source : USACE, [9]).

Cette hétérogénéité (Figure 2-74) rend délicate l'analyse du niveau de sûreté de la digue, du fait de la multiplicité des scénarios pouvant conduire à leur rupture et des fortes incertitudes qui les caractérisent. Il est donc souvent difficile de qualifier ces ouvrages et d'identifier leurs zones de fragilité. Il est important pour de tels ouvrages de disposer d'archives de bonne qualité, ce qui facilite la caractérisation et les diagnostics réguliers de l'ouvrage. Sinon, il faut envisager sur le long terme une capitalisation de résultats de reconnaissances.



**Figure 2-74.** Coupe d'une digue maritime aux Pays-Bas près d'Enkhuizen (Source : B. Brobbel, d'après Van Geel et al., [9]).

1. Sous-sol d'argile sablonneuse. 2. Particules de charbon de bois (âge du bronze). 3. Dépôts sédimentaires fins. 4. Dépôts de tourbe. 5. Digue du XIII<sup>e</sup> siècle en tourbe. 6. Prise d'échantillon. 7. Coquilles. 8. Roseaux et brindilles. 9. Algues. 10. Couches d'argile, d'argile sablonneuse et de sables. 11. Décombres. 12. Matelas de saule. 13. Briques. 14. Racines. 15. Ancienne surface. 16. Creusements dans les anciennes strates. 17. Érosion par la mer. 18. Débris de palissades.

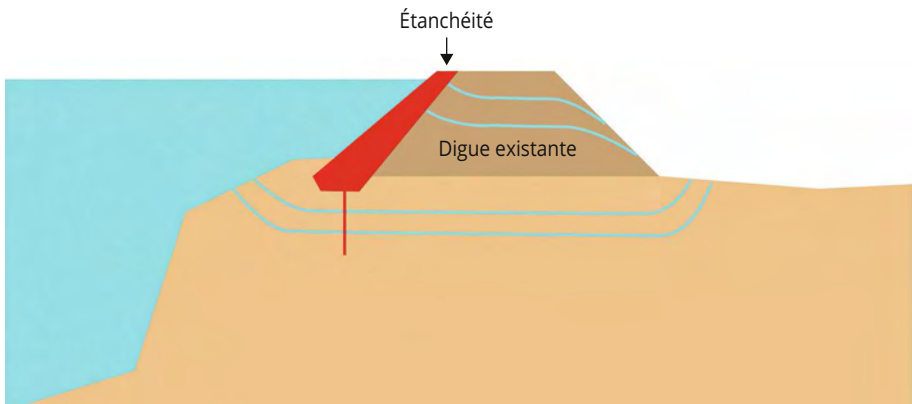
### 5.1.1.3 Remblais zonés

Les digues les plus récentes (depuis une vingtaine d'années) font souvent appel à des conceptions se rapprochant de celles des barrages en terre. On y retrouve alors un zonage des matériaux avec séparation des fonctions d'étanchéité, de drainage, de filtration et de stabilité. L'étanchéité est souvent assurée par un noyau en matériau limoneux ou argileux situé au centre ou côté eau de la digue. Lorsque ce matériau est introuvable sur le site, on peut avoir recours à des matériaux de substitution tels qu'une paroi moulée ou bien une superposition de couches de béton bitumineux ou d'asphalte. Le corps de la digue en matériau plus grossier assurera uniquement la fonction de stabilité. Des organes de drainage permettent de contrôler les écoulements internes et de diminuer les pressions interstitielles et les sous-pressions.

Les digues peuvent également devenir zonées à la suite d'un confortement ou un rehaussement. Dans ce cas, la partie existante est composée de remblai « historique ».

Une digue est souvent confortée par étapes successives. Les ouvrages peuvent avoir été confortés pour améliorer leur stabilité et/ou leur niveau de protection. Le niveau de protection d'une digue peut aussi être modifié au cours de son histoire. On rehausse alors la côte de la crête de l'ouvrage par confortement – rehaussement. De nombreux ouvrages se trouvent ainsi zonés du fait des travaux de confortement successifs :

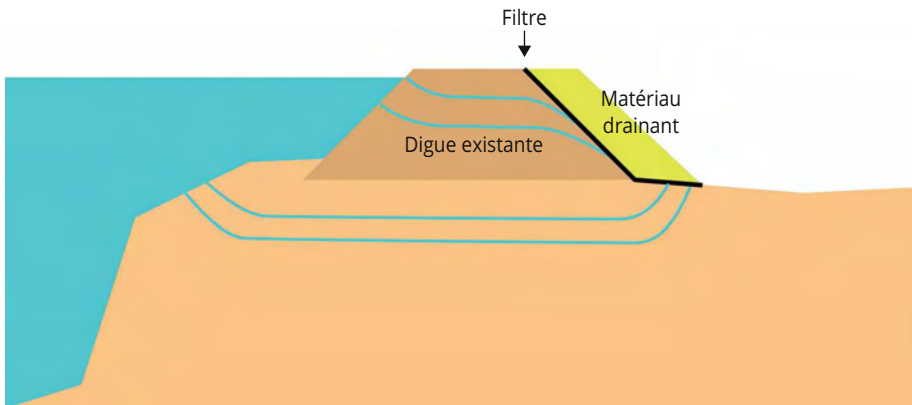
- confortement remblai étanche côté eau (Figures 2-75 et 2-76) ;
- confortement remblai drainant côté zone protégée (Figure 2-77) ;
- remblai rehaussé : par le côté zone protégée, par le côté eau, par la crête (il est souvent nécessaire, pour des raisons de stabilité, d'élargir une digue qui doit être rehaussée ; Figure 2-78).



**Figure 2-75.** Confortement d'une digue par remblai étanche amont, prolongé par une étanchéité mince en fondation (Source : R. Tourment).

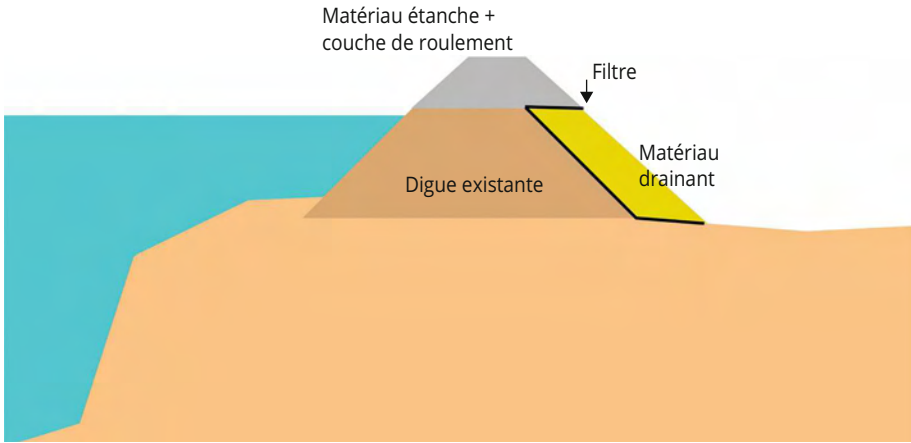


**Figure 2-76.** Pose d'une étanchéité de fondation par palplanche (Source : R. Tourment). Le remblai étanche sera ultérieurement posé et compacté au-dessus (Petit Rhône à Albaron).



**Figure 2-77.** Confortement d'une digue par remblai drainant aval, avec filtre (Source : R. Tourment).





**Figure 2-78.** Rehaussement d'une digue par remblai drainant aval, et rehausse étanche (Source : R. Tourment).

### 5.1.2. Ouvrages rigides

Les systèmes de protection peuvent également inclure des ouvrages rigides répondant différemment des ouvrages en remblai aux actions issues des milieux extérieurs. On citera les ouvrages poids (en béton, maçonnerie [Figure 2-79], pierres sèches, etc. à profil généralement trapézoïdal), les ouvrages rigides encastrés dans leur fondation (rideaux de palplanches – souvent utilisés pour une protection provisoire par exemple pendant une phase de chantier, ou en solution d'attente d'une protection plus classique, ou plus rarement comme solution pérenne –, murs bétons en I, etc.), les ouvrages autostables (murs béton en L ou en T [Figure 2-80], etc.). Les ouvrages amovibles (y/c rehausse mobiles) font aussi partie de ces ouvrages rigides et semi-rigides.



**Figure 2-79.** Digue poids en maçonnerie protégeant le village de Comps (30) des crues du Gardon et de celles du Rhône par remous (Source : R. Tourment).

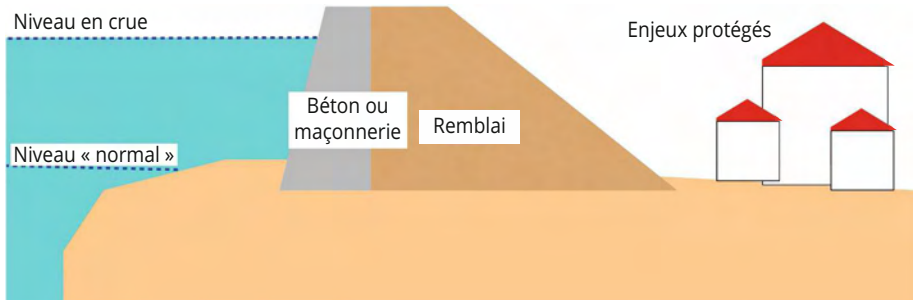


**Figure 2-80.** Mur autostable en T en béton armé et transition avec une digue en remblai, partie du système de défense anti-ouragans de la Nouvelle Orléans (Source : R. Tourment).

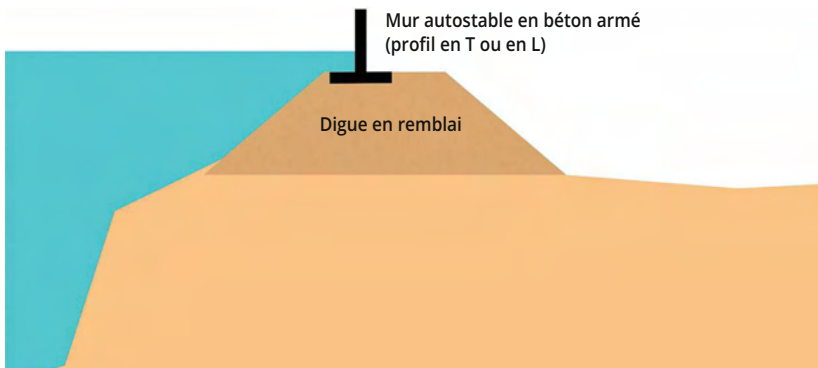
### 5.1.3. Ouvrages composites

Les ouvrages composites ont à la fois une composante géotechnique (matériaux issus du sol répondant aux actions par un comportement « souple ») et une composante structurale (répondant la plupart du temps aux actions par un comportement rigide ou cassant voire semi-rigide). Ce sont par exemple :

- un mur de soutènement (fréquemment situé côté eau, et jouant dans ce cas le rôle de protection contre l'érosion et/ou d'étanchéité) (Figure 2-81) ;
- un ouvrage composite incluant des éléments rigides en crête (éventuellement amovibles) (Figure 2-82) ;
- une digue avec voile étanche rigide interne (béton, palplanches [Figure 2-83], béton plastique, etc.) ;
- une digue en terre caparaçonnée (Figures 2-84 et 2-85).



**Figure 2-81.** Digue mixte mur de soutènement/remblai (Source : R. Tourment).

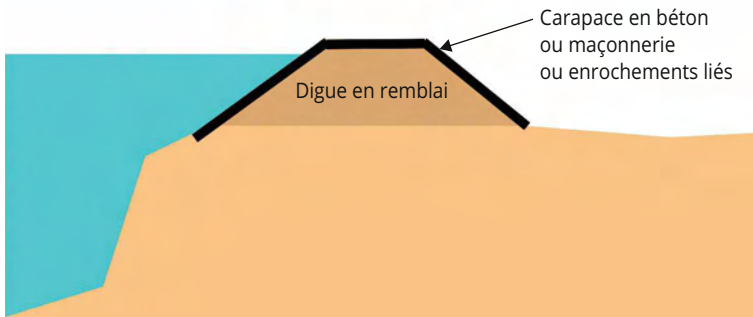


**Figure 2-82.** Digue composite en remblai surmontée d'un mur autostable (Source : R. Tourment).





**Figure 2-83.** Rehausse par mur en T en cours de construction (Source : R. Tourment).  
Noter l'étanchéité par palplanches et les extrémités des pieux de fondation sur la dalle support au premier plan.



**Figure 2-84.** Digue en remblai caparaçonnée (Source : R. Tourment).



**Figure 2-85.** Digue en remblai caparaçonnée sur le Vidourle, en fin de chantier (Source : G. Degoutte).

#### 5.1.4. Tronçon résistant à la surverse/déversoirs

La probabilité de surverse par-dessus les digues de protection contre les inondations est en général loin d'être négligeable. En déversant sur une digue en terre, l'eau acquiert une vitesse élevée et érode le pied, le talus et/ou la crête. Cette érosion se développe ensuite rapidement, et généralement s'ensuit une brèche qui inonde brutalement la zone réputée protégée. Pour qu'un système de protection puisse être résilient à la surverse, il est souhaitable de s'assurer que la surverse peut se produire en des secteurs résistants à ce mécanisme, pour limiter les conséquences du dépassement du niveau de protection du système [13].

Un tronçon de digue, quelle que soit sa typologie, peut être conçu pour résister à la surverse. Dans de tels cas, la digue du côté protégé doit être en mesure de résister aux effets induits par les écoulements de surverse. De la même manière, le pied de l'ouvrage doit être protégé pour éviter l'érosion externe qui serait induite par les vitesses importantes et la présence d'un éventuel ressaut hydraulique. Le côté zone protégée de la digue peut être constitué d'asphalte, d'enrochements mais peut aussi être protégé par enherbement, éventuellement renforcé de géosynthétiques, en fonction des vitesses prévisibles.

Au sein d'un système de protection, les déversoirs peuvent correspondre à de simples zones basses aménagées dans le terrain naturel (système ouvert, voir paragraphe 4.3.), mais il s'agit le plus souvent de seuils déversants avec une carapace en maçonnerie de pierres appareillées ou parfois de gabions (Figures 2-86 et 2-87) recouvrant la partie en remblai. Le profil du seuil se poursuit par un radier aval, faisant office de zone de dissipation de l'énergie de l'eau.



**Figure 2-86.** Déversoir de Comps (30) sur une digue de second rang de type poids, entre un casier non urbanisé et le village (Source : R. Tourment).  
Partie amont protégée par des enrochements liés, partie aval par des gabions.



**Figure 2-87.** Déversoir sur le Vidourle (Source : B. Beullac).  
Ce déversoir, protégé de l'érosion par des gabions, comprend deux niveaux de déversement. Le niveau primaire (au centre de la photo) est en gradins, le niveau secondaire a une pente régulière ; la section de digue non déversante n'est pas visible sur la photo.



Parfois, le seuil en maçonnerie est surmonté d'un merlon en terre (dénommé fusible) (Figure 2-88), calé à une côte légèrement inférieure à la crête de digue ; ce dispositif fusible est censé être rapidement érodé dès le début de la surverse, libérant ainsi une section plus grande pour l'écrêtement de la crue.



**Figure 2-88.** Déversoir de Jargeau (Val-d'Orléans, 45) (Source : R. Tourment).

De gauche à droite : terrain non protégé, fusible, talus aval non érodable du déversoir, zone de dissipation et val protégé.

L'intérêt d'un dispositif fusible est de retarder, autant que faire se peut, l'entrée en fonction du déversoir ; l'inondation de la zone protégée se produit donc moins fréquemment et les capacités de stockage du val restent disponibles pour le plus fort de la crue. De plus, la lame d'eau après effacement du fusible est plus importante, améliorant ainsi la fonction d'écrêtement de la crue. Ce type de tronçon existe uniquement en milieu fluvial.

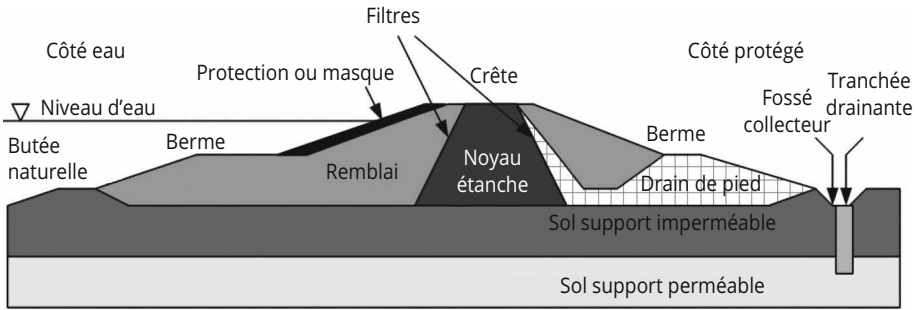
Dans le cas maritime, on considère généralement que l'on ne peut « délester » le système par un tel procédé, la source d'eau étant supposée a priori « infinie ». Toutefois, dans des conditions de baie relativement fermée, il arrive que l'on constate un abaissement de la charge hydraulique lors de l'ouverture de brèches. Par ailleurs, en mer à marée, la source d'eau n'est pas si « infinie » que cela, et le volume mobilisable est limité par le cycle de la marée.

## 5.2. Principaux composants des digues en remblai

La section suivante est largement inspirée et adaptée du Référentiel technique digues [40] entre autres sources.

Différents types de composants de digues peuvent être définis et décrits en termes techniques et fonctionnels (Figure 2-89). Leur identification et leur caractérisation

permettent le découpage du système de protection en tronçons homogènes d'un point de vue structurel (section identique le long du tronçon).



**Figure 2-89.** Exemple fictif présentant l'ensemble des différents types de composants granulaires de digues envisageables (avec l'aimable autorisation de Yann Deniaud [9]).

### 5.2.1. Fondation ou sol support

La fondation est le terrain d'assise du corps de la digue. Elle est composée du substratum de formation ancienne situé à plus ou moins grande profondeur, surmonté de sa zone d'altération et d'une couverture de terrain de formation plus récente. La fondation participe à la stabilité, à l'étanchéité de l'ouvrage et éventuellement à sa résistance à l'érosion externe (par exemple, berge protégée à proximité d'un remblai de digue). Elle est donc déterminante pour se prémunir des mécanismes de déstabilisation géotechnique (glissement, tassement, poinçonnement, rupture circulaire profonde, etc.). La fondation est aussi sujette aux circulations d'eau et aux phénomènes d'érosion interne. La gestion des écoulements et des pressions est déterminante pour éviter d'une part les écoulements trop importants favorisant l'érosion interne et d'autre part les surpressions sous la digue favorisant les glissements translationnels ou rotationnels en pied de digue côté zone protégée.

Aussi, pour les digues comme pour les barrages, la fondation (au moins les couches superficielles sous et à proximité de l'ouvrage) est étudiée et traitée comme les composants de l'ouvrage, en ce qui concerne le diagnostic et la conception (écoulements, étanchéité, drainage, etc.).

### 5.2.2. Corps de digue

Très souvent constitué de matériaux prélevés à proximité immédiate du site (argile, limon, sable, graves, etc.) le corps de digue est un composant incontournable qui mobilise les volumes les plus importants. Reposant sur la fondation, son rôle est d'assurer la stabilité propre de la digue. Les propriétés géotechniques et hydrauliques du matériau constitutif du corps de digue influencent considérablement la conception de la digue et la nature de ses composants. Dans certains cas, quand les matériaux constitutifs sont peu perméables, le corps de digue peut jouer un rôle d'étanchéité. Les matériaux cohésifs (argiles) sont moins perméables et moins sensibles à l'érosion que les matériaux granulaires (sables). Dans le premier cas, la conception sera simple avec un corps de digue en remblai argileux qui sera stable, imperméable et moins sujet à l'érosion (donc plus simple à protéger). Dans le cas de matériaux granulaires, la dissipation des charges hydrauliques étant plus faible (du fait de la plus forte perméabilité des matériaux), l'étanchéité et la stabilité ne peuvent être assurées qu'en « allongeant » le chemin hydraulique. De plus, les matériaux sableux sont plus sensibles à l'érosion et nécessitent une forme de protection supplémentaire.

### 5.2.3. Organe d'étanchéité (noyau/masque)

Contrairement au corps de la digue, le noyau est un élément qui n'est présent que pour certains types de digue. Constitué d'argile compactée ou d'autre matériel de faible perméabilité, il assure l'étanchéité de l'ouvrage. L'utilisation d'un noyau étanche est assez rare pour les digues de protection contre les inondations (cette pratique étant plus fréquente pour les barrages en remblai). Toutefois, en cas d'hétérogénéité du matériau, il est préférable de placer le matériau le moins perméable côté eau. Une pratique très répandue aux Pays-Bas et en Allemagne et sur les digues de canaux est la mise en place d'une couche externe d'argile (masque) pour assurer l'imperméabilité et la protection du corps de digue constitué de sable. Un masque peut également correspondre à une géomembrane, ou à un voile en béton.

### 5.2.4. Protections (mécaniques)

Quel que soit le cas considéré, une digue n'est jamais un remblai hydraulique laissé à nu.

Une digue doit être protégée de l'action défavorable des agents extérieurs. Les protections peuvent être plus ou moins résistantes (de l'herbe jusqu'au caparaçonnage par du béton ou des enrochements liés).

#### 5.2.4.1 Talus côté eau

En cours d'eau, la digue peut être en permanence ou exceptionnellement soumise aux actions de l'eau (statique et surtout dynamique). Les vagues (milieu marin) ou le courant (milieu fluvial) induisent des contraintes sur l'ouvrage. La protection peut être assurée par enherbement ou par un caparaçonnage (en enrochement libre ou lié, maçonnerie, béton, gabions ou avec des sacs géotextiles) parfois caché sous des dépôts de limons et de la végétation. Dans le cas des ouvrages maritimes, la géométrie et la nature de la protection influent sur les actions et le comportement de l'ouvrage.

#### 5.2.4.2 En crête

Généralement en enrobé ou en tout-venant compacté, la crête de l'ouvrage doit également assurer un rôle de protection. Elle est soumise à l'action des agents atmosphériques (pluie) et sollicitée en situation de surverse ou de franchissement pour les ouvrages maritimes. La crête de digue constitue généralement une voie de circulation pour la surveillance et la maintenance, voire un trafic plus intense. Elle est souvent soumise à d'autres usages n'intervenant pas dans la fonction de protection contre les inondations (voirie, aire récréative, etc.).

#### 5.2.4.3 Talus côté zone protégée

Du côté zone protégée, l'ouvrage est soumis aux agents atmosphériques, environnementaux (faune fouisseuse, flore, etc.) et anthropiques (quad, motocross, équitation, etc.). Le talus côté zone protégée est sollicité exceptionnellement et de façon intense en cas de surverse dans le cas des ouvrages fluviaux. Ce phénomène est beaucoup plus courant pour les ouvrages maritimes aptes à subir des franchissements.

Les types de protection retenus sont aussi divers et variés que côté eau. Des digues enherbées et bien entretenues peuvent résister à l'érosion pour des volumes franchissant et surversant parfois importants. Lorsque les digues disposent de déversoirs, les écoulements sont concentrés sur ces dispositifs appropriés (très résistants à l'érosion externe par surverse) et le côté protégé des digues adjacentes n'est pas sollicité. Lorsqu'une digue



est éventuellement sujette à la surverse ou au franchissement, la protection côté zone protégée est un élément déterminant.

### 5.2.5. Organe(s) de filtration

Les phénomènes de dégradation d'une digue sont parfois lents par migration progressive des fines (mécanismes d'érosion interne). Comme leur nom l'indique, les filtres jouent un rôle de filtration des matériaux. Leur but est d'éviter la fuite de matériaux (généralement fins) pour maintenir l'étanchéité et l'intégrité structurale de l'ouvrage. Les filtres sont placés entre les éléments constitutifs d'une digue zonée au contact d'éléments de granulométrie très différente. Les géotextiles sont très largement utilisés en tant que filtre.

### 5.2.6. Organe de drainage

Les digues sont soumises à l'action de l'eau. Sa présence au sein de l'ouvrage peut provoquer des phénomènes de surpression, gonflements-retraits, déstabilisation géotechnique. Le drainage de l'ouvrage permet de contrôler ces phénomènes internes. La fonction drainante est assurée par plusieurs éléments. On trouve parfois des couches drainantes (drains, couches permettant la circulation d'eau, nappes drainantes, etc.) associées à d'autres dispositifs (tranchée drainante, pompage, etc.). Pour ces dispositifs, on parlera de drainage interne ou profond. Aussi, dans le cas d'ouvrages maçonnés, la circulation d'eau est favorisée par des barbacanes pour éviter les déséquilibres de charges hydrauliques. On parle alors de drainage externe ou superficiel.

### 5.2.7. Butée de pied ou parafouille

Présente sur certains ouvrages, la butée de pied contribue à la stabilité et surtout la protection. Elle assure la jonction entre l'ouvrage et son environnement. Dans le cas d'une protection en enrochement, elle stabilise cette dernière. Dans les zones les plus exposées aux affouillements, des protections parafouilles ont parfois été réalisées, constituées le plus souvent de pieux jointifs en bois, ou de palplanches métalliques. Elle permet de se prémunir contre les phénomènes d'affouillement en pieds d'ouvrage. On peut aussi trouver, en pied d'ouvrage, des dispositifs prolongeant l'étanchéité en profondeur (par des palplanches, des tapis d'étanchéité, etc.). Il s'agit parfois d'augmenter le chemin hydraulique à parcourir (et donc d'accroître la dissipation de la charge hydraulique).

Côté zone protégée, la butée de pied contribue à la stabilité mais aussi à la canalisation et au drainage des eaux.

### 5.2.8. Recharges en remblai

Une recharge en remblai peut être initialement un composant de la digue ou être ajoutée pour conforter celle-ci.

- Côté eau, elle peut jouer un rôle de protection (confortement à la suite d'un mécanisme d'érosion externe), un rôle de stabilité (en reprenant les glissements rotationnels profonds ou superficiels) et un rôle d'étanchéité (en augmentant la longueur du chemin hydraulique et/ou diminuant la perméabilité). Dans le cas des ouvrages maritimes, la création de berme en enrochements côté « mer » permet également la réduction des actions hydrodynamique par la diminution de l'énergie des vagues incidentes sur le cœur de l'ouvrage.
- Côté zone protégée, une recharge en remblai peut jouer un rôle de stabilité et un rôle de filtration et drainage. Elle permet aussi de contrôler les phénomènes d'érosion interne du sol support.

Selon sa géométrie, une recharge en remblai peut alors former une risberme (Figure 2-90).



Figure 2-90. Une recharge en remblai peut former une risberme (Source : R. Tourment).

### 5.2.9. Muret de couronnement (pare-vagues et rehausses)

On trouve sur les digues, notamment en domaine maritime, des structures de couronnement. Le couronnement joue un rôle de protection de l'ouvrage en limitant le franchissement des vagues. Il prend souvent la forme d'un mur parapet en maçonnerie ou béton permettant de dissiper ou réfléchir l'énergie des vagues. Le mur de couronnement peut être ancré à la digue pour résister aux glissements et renversements provoqués par l'effort induit par les vagues. De nombreux ouvrages historiques disposent de rehausses qui augmentent la côte de protection de la digue. Ces dispositifs sont présents lorsque l'augmentation de la crête de l'ouvrage se fait sans élargissement de la digue.

Toutefois, les murs de couronnement limitent les franchissements mais sont rarement, voire pas du tout dimensionnés pour résister à un niveau d'eau statique. En général, ils explosent avant ou ne résistent pas à la surverse.

## 5.3. Ouvrages ponctuels et transitions

Les digues sont des ouvrages linéaires relativement longs (par rapport à leur largeur). Cependant, leur homogénéité longitudinale est loin d'être la réalité, même au-delà de la question de l'homogénéité des remblais eux-mêmes. En effet, de nombreux ouvrages singuliers (que l'on peut considérer la plupart du temps comme ponctuels, comparativement à l'échelle du système) y sont implantés. Ces ouvrages soit concourent à la protection contre les inondations, soit relèvent de mesures compensatoires. Il en est ainsi des passages batardables et rampes d'accès entre la zone protégée et le côté eau (Figure 2-91), des traversées par aqueducs, galeries et conduites, équipées ou non de vannes (Figure 2-92) et/ou de clapets (Figure 2-93). Ces ouvrages singuliers parfois particuliers nécessitent une analyse individuelle au cas par cas dans le cadre de l'analyse du système de protection dans son ensemble. Leurs fonctions comme leurs modes de dégradation ou de défaillance sont en effet spécifiques.

On trouve également souvent, dans les systèmes de protection, des stations de pompage (Figure 2-94) permettant le drainage de la zone protégée (évacuation des eaux de ruissellement de la zone protégée pendant les périodes de hautes eaux) ou le ressuyage (évacuation des eaux d'inondation après l'épisode).

De même, les systèmes de protection se composent souvent d'enchaînements de divers tronçons de digues ayant des sections différentes. Ces enchaînements, ainsi que l'inclusion d'ouvrages ponctuels et autres éléments constituent de nombreuses transitions soit entre parties d'ouvrages en remblai, soit entre ouvrages en remblai et ouvrages rigides (voir Figure 2-80), qui peuvent aussi favoriser la détérioration des éléments du système (voir paragraphe 2.4.).



**Figure 2-91.** Passage routier batardable à travers une digue (à droite) et rampe d'accès à la piste de service en crête (à gauche) (Source : R. Tourment).



**Figure 2-92.** Pertuis vanné d'un exutoire de drainage de la zone protégée sous une digue (Source : R. Tourment).





**Figure 2-93.** Clapet en aval (côté eau) d'une canalisation d'évacuation des eaux pluviales de la zone protégée (Source : R. Tourment).



**Figure 2-94.** Station de pompage de l'Authion (Source : R. Tourment).  
A) Amont (rivière Authion). B) Salle des pompes. C) Coupe de la station. D) Ouvrage de restitution aval (côté Loire).

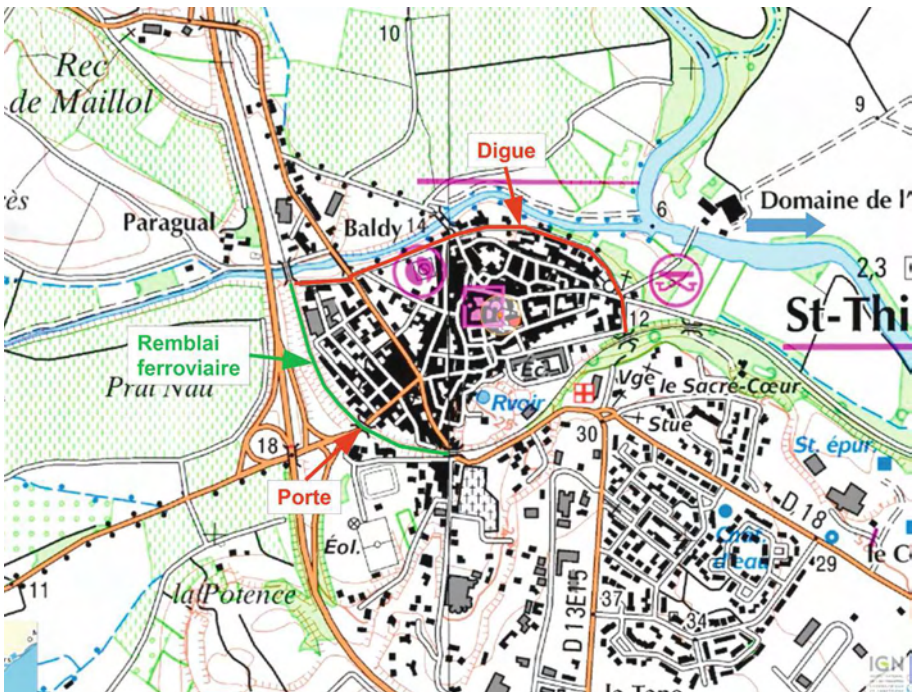
## 5.4. Autres composants d'un système de protection contre les inondations

Au-delà des ouvrages dont la vocation affichée est la protection contre les inondations, présentés dans les sections précédentes, dans de nombreux cas, un système de protection ne peut jouer effectivement son rôle qu'en association avec des autres éléments :

- naturels :
  - dunes,
  - tertres (voir Figure 2-43),
  - coteaux,
  - promontoires rocheux, etc. ;
- ou artificiels :
  - routes,
  - voies ferrées,
  - canaux,
  - autres remblais,
  - bâtiments, etc.

Ces éléments artificiels (ouvrages) peuvent ou non avoir été construits en vue de jouer un rôle de protection contre les inondations. Ils peuvent avoir été intégrés, de fait, à un système postérieurement à leur construction. C'est le cas du remblai ferroviaire de Saint-Thibéry (34) qui a eu un passage inférieur routier muni par la commune d'une porte anti-crues (Figures 2-95 et 2-96).

À Toulouse, l'Hôtel-Dieu joue un rôle de protection contre les inondations dues à la Garonne, dans la continuité de murs d'enceinte également anti-inondations (Figure 2-97).

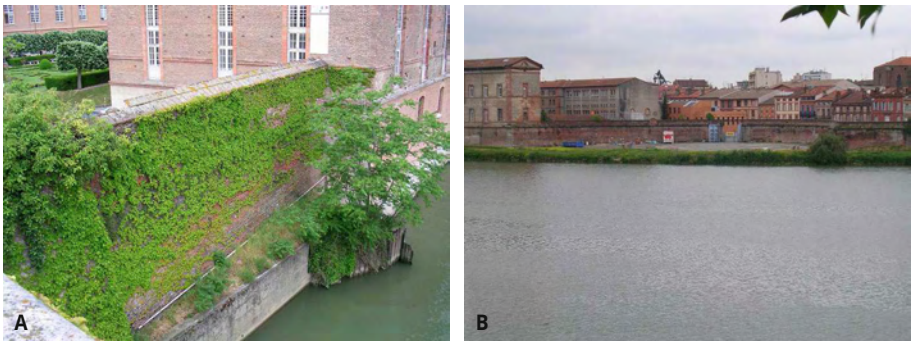


**Figure 2-95.** Système de protection de Saint-Thibéry (34) intégrant une voie ferrée non initialement prévue pour ce rôle (Extrait des cartes IGN, © IGN - 2018, autorisation n° 80-1812, reproduction interdite).





**Figure 2-96.** Passage inférieur dans le remblai ferroviaire de Saint-Thibery (34) équipé d'une double porte anti-crues (Sources : A) Google Street View ; B) P. Ledoux, CEREMA)



**Figure 2-97.** Hôtel-Dieu de Toulouse et continuité avec les murs, protection contre les crues de la Garonne (Source : R. Tourment).  
A) Amont à gauche. B) Aval, y compris une porte.

## 5.5. Exemples et spécificités pour les différents types de milieux eau

Les particularités des digues lors de leurs conception et réalisation sont liées aux principales actions externes qui les affectent selon leur implantation, et à l'historique de leurs modification et réparation.

### 5.5.1. En milieu fluvial

Le plus souvent, les digues fluviales ne sont pas en contact permanent avec l'eau ; elles se trouvent rarement sollicitées en dehors des événements hydrauliques rares ou extrêmes. On distingue en revanche les digues situées à proximité immédiate du lit mineur (en prolongement ou à proximité des berges) de celles construites plus à l'intérieur de la zone protégée ; les premières peuvent subir des agressions (*voir paragraphe 2.4.*) et une mise en danger hors période de crue, par érosion de berge, pouvant entraîner d'autres désordres, principalement des effondrements.

- Les digues fluviales sont souvent des ouvrages anciens, ayant connu des modifications successives et donc hétérogènes dans toutes les directions (*voir plus haut*).
- Ces digues ont généralement été construites avec les matériaux du site, en remblai « homogène », souvent renforcées et parfois alors pourvues d'organes de drainage.



- Elles comportent généralement des protections contre l'érosion externe relativement légères (perré) ou très légères (enherbement) et parfois renforcées de géotextiles ou géosynthétiques.
- Elles comprennent le plus souvent une voie de circulation en crête en tout-venant ou en enrobé, parfois également en pied côté zone protégée et/ou côté cours d'eau.

### 5.5.2. En milieu marin

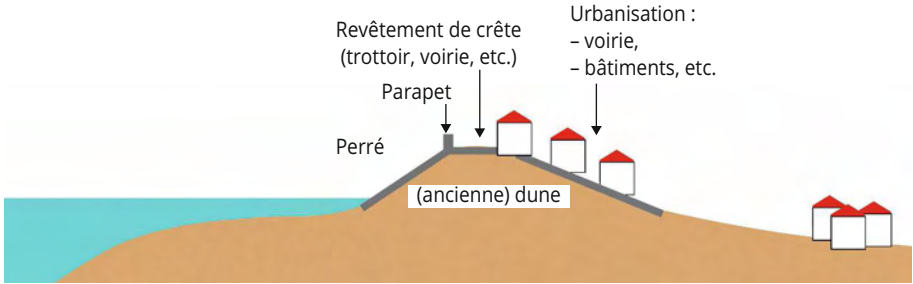
Lorsque les digues maritimes sont proches ou au contact de l'eau, elles sont assez régulièrement sollicitées et souvent par des phénomènes à forte énergie (vagues).

La composition des digues maritimes est fortement dépendante des conditions du milieu dans lequel elles s'insèrent. Les conditions de houle, de marée, de courant et de bathymétrie du site, la distance à la mer déterminent la géométrie et l'importance des dispositifs de protection mis en œuvre. Dans le cas de poldérisation de mer à marées, les digues sont bien souvent des ouvrages en terre de petites dimensions, dont les talus sont parfois protégés par des perrés. A contrario, les aménagements de front de mer soumis à la houle mettent en œuvre des dispositifs beaucoup plus lourds et composites combinant des carapaces en maçonnerie, en enrochements ou en béton bitumineux, des murs pare-vagues ou chasse-mer en crête côté eau (Figure 2-98) et d'autres éléments de gestion des franchissements.

De nombreuses digues en domaine maritime résultent d'anciennes dunes qui ont été progressivement urbanisées au fur et à mesure de l'urbanisation du littoral immédiat (Figure 2-99). Le résultat est une structure complexe, en termes techniques mais également en termes de propriété et de responsabilité.



**Figure 2-98.** Digue de Saint-Malo : perré, parapet et pieux « brise-lames » à marée basse et lors d'une marée haute de fort coefficient (106) (Sources : A) R. Tourment ; B) Larzaliier, Wikipedia).



**Figure 2-99.** Dune anthropisée devenue ouvrage de protection (Source : R. Tourment).

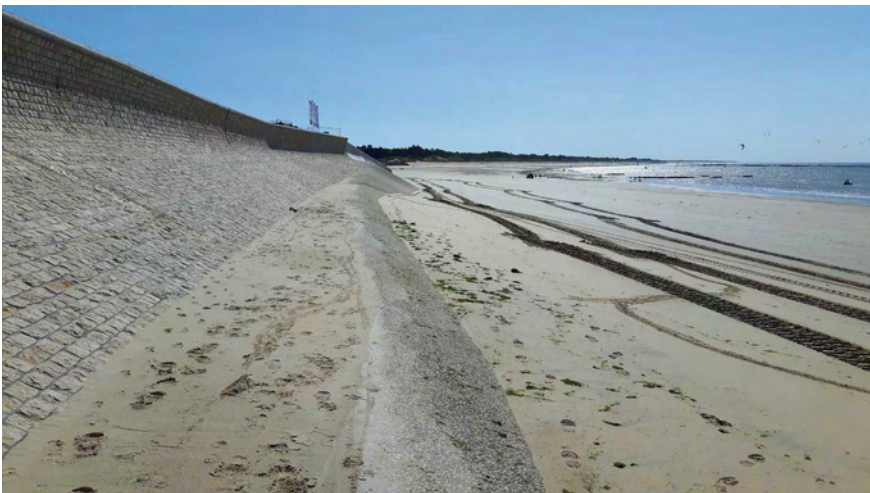
- On rencontre alors fréquemment depuis le côté mer vers l'intérieur des terres :
- un ou plusieurs brise-lames au large (Figure 2-100) ;
  - une plage, avec éventuellement des épis (Figures 2-100 et 2-101) ;
  - un talus côté mer protégé plus ou moins lourdement (dalles béton, ouvrage maçonné) ;
  - un parapet (voir Figure 2-98) ou mur chasse-mer (Figures 2-101 et 2-102) ;
  - une crête aménagée en voirie urbaine (automobile ou piétonne) ;
  - un « talus » aval difficile à identifier de visu comprenant un tissu urbain (habitations, autres bâtiments, voirie) ;
  - une zone protégée basse, également difficile à identifier de visu.



**Figure 2-100.** Brise-lames et épis protégeant une digue côtière à l'embouchure du Petit Rhône (Source : Symadrem [9]).



**Figure 2-101.** Mur chasse-mer et épi, à Mers-les-Bains dans la Somme (Source : C. Caffin, DREAL Hauts-de-France).



**Figure 2-102.** Mur chasse-mer, le Boutillon, Île de Ré (Source : S. Navarre, Département de la Charente-Maritime).

Les ruptures de pente entre la crête et le « talus » côté zone protégée sont faibles et pas toujours évidentes à l'œil humain non averti. Néanmoins, dans ce type de configuration, une analyse de la topographie (à l'aide d'un SIG et d'un MNT par exemple) met aisément en évidence le rôle de protection contre les inondations d'origine marine de telles structures complexes.

La sécurité de telles structures et l'efficacité de leur rôle de protection contre les venues d'eau (entre autres sous la forme de franchissement – ou « paquets de mer ») nécessitent à la fois :

- le maintien sur le long terme de la structure côté mer (brise-lames et plage) qui conditionne fortement le niveau atteint par les vagues pour une même houle venue du large sur un même niveau moyen de la mer ;
- l'efficacité en continu de la structure de protection, y compris à sa base, pour éviter l'érosion du remblai sableux sous l'effet des variations du niveau d'eau (soutirage) ;
- l'absence de problèmes d'érosion interne pouvant être causés par les nombreux réseaux humides présents dans la structure.

### 5.5.3. En milieu torrentiel

Soumis à des actions violentes résultant du fort transport solide qui caractérise les écoulements torrentiels (charriages ou laves torrentielles), lui-même sous influence d'autres aléas de montagne (mouvements de terrain, avalanches, etc.), les systèmes de protection torrentiels doivent résister aux différents mécanismes de dégradation auxquels ils sont soumis (érosions externes, incision généralisée du lit, affouillements localisés, impacts et chocs localisés, surverse, etc.) [30].

Les digues torrentielles peuvent être regroupées en trois grands types de structure :

- les ouvrages en remblai (sans revêtement de protection) : encore relativement répandus, notamment en bordure de torrent à laves ;
- les ouvrages mixtes : remblai de matériau grossier, protégé côté torrent par un mur ou un caparaçonnage en maçonnerie ou en enrochement, voire un perré en béton ;
- les ouvrages rigides (structure poids ou autostables) pourvus ou non d'un « cavalier » arrière (remblai).

Il existe par ailleurs de nombreux ouvrages composites au gré des aménagements successifs et des évolutions des techniques.

#### 5.5.3.1. Ouvrages en remblai

Les matériaux constitutifs des ouvrages en remblai ont majoritairement été prélevés sur place (dans les anciens dépôts torrentiels). Certaines « digues » sont simplement constituées des bourrelets latéraux laissés naturellement par les laves torrentielles ou d'anciens dépôts de charriage, parfois remaniés et confortés par l'homme.

Il s'agit généralement de matériaux grossiers, hétérogènes et plutôt perméables. Il est rare en effet que l'on ait cherché à rendre ces ouvrages « imperméables », l'objectif étant de faire transiter les écoulements torrentiels vers l'aval du cône.

#### 5.5.3.2. Fondation des ouvrages

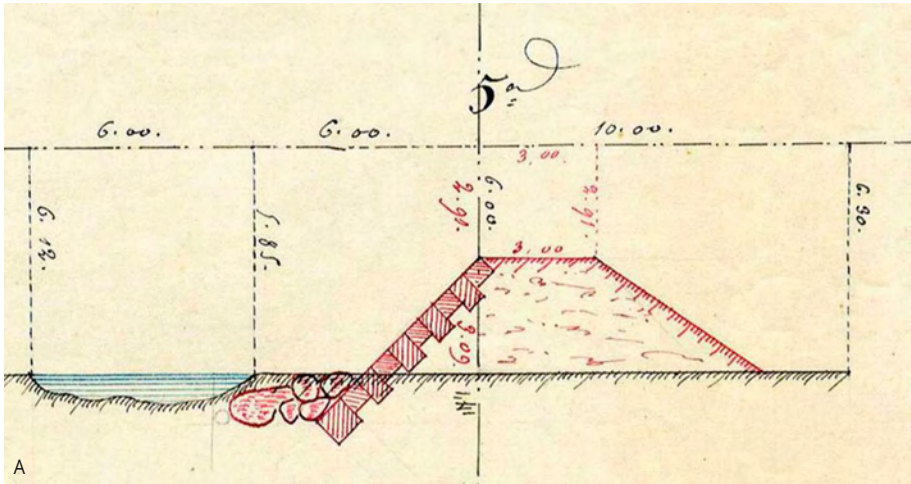
Leurs fondations, elles-mêmes constituées des déjections du torrent, sont de même nature (matériaux meubles, grossiers et perméables). De gros, voire très gros blocs sont généralement enchâssés dans le corps des ouvrages et leur fondation, ce qui augmente notablement les caractéristiques mécaniques du remblai, notamment l'angle de frottement interne  $\Phi$ .

Signalons tout de même que des couches d'argiles, parfois non visibles en surface, peuvent être présentes en fondation (dépôts lacustres, voire glacio-lacustres à la suite d'une obturation du fond de vallée, apports anciens résultant de l'altération d'une couche d'argile dans le bassin-versant amont, etc.).

#### 5.5.3.3. Revêtement de protection des ouvrages composites

Le type de revêtement de protection du remblai dépend beaucoup de la période de construction des ouvrages. Un perré de faible épaisseur (40-50 cm) constitué de pierres bien équarries recouvrait principalement les digues en remblai construites à la suite des crues survenues au cours du XIX<sup>e</sup> siècle (Figure 2-103), ensuite des parements en pierres maçonnées, puis en béton non armé firent leur apparition, avant l'arrivée du béton armé vers le milieu du XX<sup>e</sup> siècle, sans oublier les structures en gabions métalliques assez répandues en Montagne.





**Figure 2-103.** Coupe-type des travaux d'endiguement du Vachères (1841) (A) et contrôle des fondations (2012) (B) (Source : ONF – RTM 05).

Le revêtement de protection le plus répandu actuellement en travaux neufs est une carapace en enrochements, liaisonnés ou pas au béton selon la pente des talus. La protection la plus courante en bordure de torrent est constituée d'une carapace de gros enrochements appareillés en une seule couche (posés un à un en « tuiles ») (Figure 2-104).





**Figure 2-104.** Digue en remblai avec carapace en enrochements appareillés (simple couche) (Source : ONF – RTM 05).

A) Digue de la Durance à La Roche-de-Rame (05). B) Digue du Piézan à Cons-Sainte-Colombe (74).

#### 5.5.3.4. Pente des talus (ouvrages en remblai ou composites)

Les talus des digues de torrent présentent souvent une pente plus forte qu'en fluvial (typiquement 2V/3H, « adaptée » aux caractéristiques mécaniques des remblais).

#### 5.5.3.5. Ouvrages rigides

Sur les tronçons fortement contraints latéralement (centre des villages, zones densément urbanisées, etc.), il existe également des structures poids sans cavalier arrière (murs poids en maçonnerie, béton ou enrochements bétonnés), voire des structures autostables en béton armé. Ils assurent la double fonction de protection et de soutènement (Figure 2-105).



**Figure 2-105.** Exemples d'ouvrages rigides (Source : ONF – RTM 05).

A) Digue de type mur béton affouillée – Gave de Cauterets – Soulom (65). B) Digue de type mur poids en maçonnerie – Fournel – L'Argentière-La-Bessée (05). C) Endiguement de Glyssibach à Brienz (Suisse) – Mur béton avec parement pierre. D) Mur poids en enrochements bétonnés – Digue rive gauche Garcine – Abriès (05).

### 5.5.3.6. Ouvrages parafoUILLES associés

Quel que soit leur type de perré rigide ou souple, les digues torrentielles sont généralement associées à des ouvrages singuliers transversaux (épis, seuils, etc.) ou des ouvrages longitudinaux (poutre, sabot parafouille, radier de fond, etc.) qui visent à réduire les phénomènes d'incision du lit, d'affouillements localisés ou à compenser leurs conséquences (Figure 2-106).



**Figure 2-106.** Exemples d'ouvrages parafoUILLES associés (Source : ONF – RTM).

A) Reprise protection parafouille digue du Gabre en bordure du Var. B) Épis maçonné et en gabions en bordure de la digue du Vachères (05).

### 5.5.4. En milieu de transition

Les digues en milieux de transition combinent les caractéristiques propres aux types milieux combinés, en fonction des actions prépondérantes localement au niveau du système de protection.

## 6. Système de gestion de la sécurité

La gestion de la sécurité du système de protection contre les inondations est essentielle pour assurer le maintien de son niveau de sûreté (*voir Chapitre 3 : paragraphe 3.2.*) et donc de son niveau de protection (*voir Chapitre 3 : paragraphe 3.1.*).

Les paragraphes suivants décrivent les actions qui composent cette activité.

### 6.1. Surveillance des ouvrages en période normale

Bon nombre de désordres pouvant affecter une digue et ses ouvrages annexes se révèlent par des indices de surface : mouvements ou accidents de terrain (au sens le plus large), érosions et ravinements, zones de végétation singulière, suintements, terriers de fousseurs, sorties de canalisation, fissures, déplacements, etc. L'examen visuel constitue le meilleur moyen de repérer de tels indices et s'avère incontournable pour établir un état initial de la digue puis en permettre le suivi ultérieur.

### 6.2. Auscultation des ouvrages

Les pratiques d'auscultation des systèmes et ouvrages de protection sont encore peu développées à l'heure actuelle [29]. L'auscultation d'un ouvrage consiste en un ensemble

de mesures ou d'observations, répétées dans le temps, de manière à pouvoir tirer, à partir de leur analyse, des conclusions sur le comportement de l'ouvrage et/ou de son environnement et, in fine, sur sa sécurité. L'auscultation d'un ouvrage hydraulique comporte principalement des mesures en lien avec l'hydraulique (niveaux piézométriques, pressions interstitielles, débits de drainage ou de fuite, etc.) ou avec ses déformations. L'auscultation vient compléter les examens visuels réguliers pour permettre au gestionnaire de prendre ses décisions de maintenance ou de déclenchement d'un diagnostic plus approfondi si nécessaire. En cas de diagnostic approfondi, les mesures d'auscultation et leur analyse apportent d'importants éléments à l'expert, en complément d'éventuelles reconnaissances spécifiques et ponctuelles. En ce qui concerne les ouvrages hydrauliques soumis très occasionnellement à une charge hydraulique (comme la plupart des digues de protection contre les inondations), une des difficultés réside dans le fait que les influences de cette mise en charge ne peuvent pas être analysées en temps normal.

### 6.3. Entretien des ouvrages

Au-delà des considérations de responsabilité et de réglementation, l'objectif de maintenir les ouvrages en bon état justifie à lui seul l'entretien régulier. Il permet en effet de freiner le vieillissement et donc d'augmenter la longévité de l'ouvrage. Des petits travaux réguliers, par exemple sur la végétation ou vis-à-vis des animaux fouisseurs, peuvent éviter des interventions lourdes de réhabilitation. Enfin, le bon entretien des ouvrages (notamment dégagement de la végétation, maintenance des voies de service) permet leur surveillance dans de bonnes conditions.

### 6.4. Gestion des crues, des tempêtes, ou d'événements particuliers

La gestion d'une crue, d'une tempête marine ou d'un événement particulier (séisme, accident nautique, etc.) implique, de la part du gestionnaire d'un système de protection, une réflexion spécifique préalable sur l'organisation et les moyens à mettre en place pour faire face à chacune des situations de crise identifiées, tant du point de vue de la surveillance des ouvrages que du circuit de transmission de l'information aux autorités compétentes et aux populations (en vue de leur mise en sécurité), des moyens à mettre en œuvre d'urgence en cas de désordres identifiés (dans le but d'éviter l'ouverture de brèches), et des dispositions post-événement à prévoir à court ou plus long terme.

### 6.5. Déclaration des événements importants pour la sûreté hydraulique (EISH)

Pour juger de l'efficacité et mesurer un niveau de sûreté, le retour d'expérience est essentiel. La détection des événements importants du point de vue de la sûreté hydraulique, leur analyse et le partage des éventuelles conclusions résultant de cette analyse sont une source de progrès importante pour la sûreté hydraulique.

Pour plus d'information sur les principes de la gestion de la sécurité des systèmes de protection contre les inondations, le lecteur pourra consulter le guide « Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations » [31] qui développe les actions à entreprendre pour assurer la pérennité des digues fluviales, ainsi que le chapitre 5 du « Référentiel technique digues maritimes et fluviales » [40] qui propose une synthèse actualisée pour chacune des activités introduites ci-dessus.

## CHAPITRE 3

# Niveaux et objectifs liés à la protection contre les inondations et à la sûreté des ouvrages

Un système de protection contre les inondations a pour objectif de protéger un territoire contre les inondations auxquelles il est naturellement soumis. Cette protection est bien entendu limitée à un certain niveau des eaux en fonction de la hauteur des ouvrages. Ce niveau de protection est lui-même limité puisqu'il peut exister un potentiel de rupture des ouvrages avant que l'eau n'atteigne ce niveau (par exemple, par érosion interne).

On peut donc caractériser les digues et systèmes de protection par le biais de différents niveaux :

- le niveau de protection ;
- le niveau de sûreté ;
- le niveau de danger ;
- le niveau de sécurité des populations.

Nous allons essayer dans ce chapitre de clarifier ces différentes notions et la manière de les qualifier.

### 1. La notion de niveaux relatifs aux digues et systèmes de protection contre les inondations

Dans le contexte qui nous intéresse, les niveaux correspondent à des caractéristiques physiques altimétriques liées aux éléments constituant un système de protection. Les niveaux cités ci-dessus, à l'exception du niveau de sécurité des populations, correspondent à un seuillage de l'action de l'eau sur ces éléments en fonction des conséquences envisageables.

Ils expriment soit des **constats**, effectués par un ingénieur, dans le cadre d'un diagnostic (ou d'une analyse de risque), donc dans un état donné à un instant donné, soit des **objectifs**, fixés par un maître d'ouvrage, dans le cadre d'un projet d'ouvrage neuf ou de modification d'un ouvrage existant. Le constat résultant du diagnostic permet au gestionnaire d'orienter ses actions, dans le but de conserver ou de retrouver le niveau objectif, ou encore de modifier ses objectifs.



## 2. Difficultés associées

Les termes de niveaux, cotes et objectifs appliqués aux différents niveaux caractéristiques cités ci-dessus et définis ci-après sont employés dans différents documents techniques et réglementaires avec des significations différentes, entre autres, notamment, selon que l'on parle de hauteur altimétrique ou de période de retour d'événement rare ou extrême, de tronçon de digue, de système de protection ou de sécurité des personnes, que l'on soit en milieu marin ou fluvial.

Il est important en tout premier lieu de distinguer les définitions de ces notions s'appliquant aux ouvrages et aux systèmes des processus de quantification sur un système donné, devant prendre en compte l'hydrologie du milieu eau.

Le premier type de difficulté est lié aux problèmes de correspondance entre les différentes manières de qualifier les niveaux. En effet, les niveaux associés aux digues sont généralement exprimés en cotes, en profil en long ou lignes d'eau (cote variable en fonction de la position du point sur la digue), en débits (en domaine fluvial), en périodes de retour ou relativement à un événement de référence (pas nécessairement l'événement de référence du PPR).

Pour la détermination d'un niveau constaté en cote ou en profil, on peut en rester à des considérations relatives au système de protection ou à l'ouvrage ; mais si l'on désire travailler en probabilité ou en période de retour, on doit également intégrer l'analyse hydrologique du milieu eau en rapport, ce qui introduit une difficulté supplémentaire.

Par ailleurs, la période de retour d'un événement n'intègre généralement qu'une seule des grandeurs qui le définissent (volume, débit, ligne d'eau, durée, etc.) et ne suffit donc pas à le caractériser complètement. Enfin, fixer une période de retour à un événement réel (récent, ou événement de référence) peut être un exercice délicat, voire trompeur, compte tenu de la multiplicité de paramètres définissant un événement individuel notamment pour les événements de sollicitations sur le littoral (des informations complémentaires sur la notion de période de retour sont données en [Annexe 4](#)).

À l'inverse, mais en corollaire, on peut également souligner la difficulté à caractériser le niveau d'un ouvrage (la cote de la crête de digue), dans un processus de conception, sur la base d'un objectif de protection qui serait seulement exprimé en période de retour.

Dans le domaine fluvial, on emploie régulièrement les mots « crue » ou « cote » en lieu et place de « niveau ». Cela introduit une double ambiguïté car des hauteurs d'eau différentes (sur une même section du cours d'eau) peuvent correspondre à des crues de même période de retour et la correspondance entre niveau et période de retour des événements atteignant ce niveau peut aussi évoluer.

Dans le domaine maritime [28], le niveau de la mer à la côte, donc au niveau des ouvrages lors d'un événement de sollicitation, est la combinaison, avec une proportion variable suivant les systèmes, d'un niveau de mer « moyen », de la marée astronomique, de la surcote liée à la pression atmosphérique, du set-up lié au vent et aux vagues, et du run-up qui est le niveau haut du swash (jet de rive ou zone de lèche) ([Figure 3-1](#)).

Dans le domaine torrentiel, il est nécessaire de prendre en compte non seulement l'eau mais également l'influence du transport solide sur les conditions d'écoulement, sous forme de charriage (évolutions du niveau du fond du lit durant la crue) ou de laves torrentielles ([voir paragraphe 4.3.](#) et [Chapitre 5 : paragraphes 3.6.1. et 3.9.1.](#)).

Dans tous les cas, l'interaction entre l'ouvrage et le milieu eau vient modifier le niveau « naturel » qui serait atteint par un événement en l'absence d'ouvrage.

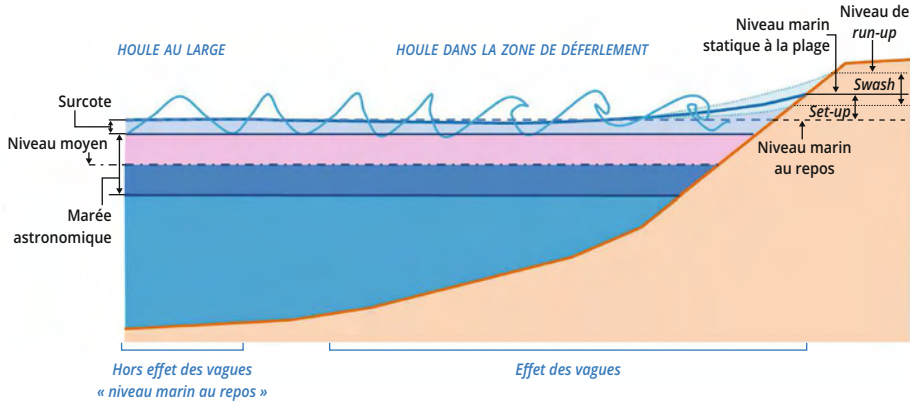


Figure 3-1. Composantes du niveau de la mer à la côte (Source : Artelia).

### 3. Les différents niveaux de la gestion des systèmes de protection

#### 3.1. Niveau de protection (de la digue ou du système de protection)

Le niveau de protection (NP) est le niveau d'eau jusqu'auquel on n'a pas d'entrée d'eau dans la zone protégée (issu de la ou des étendues d'eau contre lesquelles le système de protection protège : mer, fleuves, rivières, torrents, lacs, etc.) ou dans une quantité limitée et acceptable par le système d'assainissement et de drainage de la zone protégée (par exemple, par des embruns ou faibles franchissements en milieu marin) [23, 26, 42].

- Au sens du décret du 12 mai 2015, le niveau de protection du système d'endiguement est choisi et garanti par le gestionnaire à l'issue de l'étude de dangers.
- Ce concept s'applique au système de protection dans son ensemble, ou aux différentes parties du système de protection dans le cas particulier où le territoire protégé a des niveaux de protection différents.
- Il est en rapport avec la fonction de **protection** contre les inondations (objectif de protection). L'objectif de protection est donc fixé par le maître d'ouvrage.
- Le constat du niveau de protection lors d'un diagnostic ou d'une analyse de risque est la détermination du ou des événements jusqu'auxquels la zone sera effectivement protégée.

#### Remarque

Dans un système ancien existant, pour lequel on ne connaît pas le niveau de protection objectif ou le niveau de sûreté, nous appelons par ailleurs **niveau de protection apparent** (NPA) [26] le niveau de protection « géométrique » que procure le système, du fait de l'altitude de la crête de ses ouvrages, en prenant l'hypothèse que celui-ci ne rompt pas avant la surverse ou, le cas échéant, avant le fonctionnement du ou des déversoirs en fluvial. Cette définition ne fait pas l'unanimité, néanmoins, il n'en existe pas de définition alternative, nous pouvons donc l'employer sans ambiguïté.

- C'est une notion uniquement topographique et hydraulique qui s'applique au système de protection.

**Remarque (Suite).**

- Le niveau de protection apparent est estimé sur la base d'un diagnostic hydraulique du système de protection (*voir* Chapitre 10 ; paragraphe 3.2.2.).
- Le niveau de protection réel d'un système correspond au niveau de protection apparent lorsque le niveau de sûreté (*voir* ci-dessous) constaté lui est supérieur. Sinon, il correspond à une valeur inférieure ou égale au niveau de sûreté et la différence entre les deux correspond à une marge permettant de gérer le risque d'inondation (notamment la mise en place de mesures de sauvegarde dans la zone protégée).

### 3.2. Niveau de sûreté (de la digue ou du système de protection)

Le niveau de sûreté (NS) est le niveau d'eau jusqu'auquel l'ouvrage est sûr, c'est-à-dire que sa probabilité de rupture est négligeable pour les différents modes de rupture auxquels il est potentiellement exposé [23, 26].

- Ce concept n'est pas repris dans le décret du 12 mai 2015, mais sa détermination est indispensable, dans l'étude de dangers, pour estimer la performance structurelle du système d'endiguement et déterminer son niveau de protection.
- Ce concept s'applique au système de protection dans son ensemble ou par parties de système (dans le cas particulier où le territoire protégé a des niveaux de protection différents), mais peut éventuellement s'appliquer tronçon par tronçon (dans ce cas, celui du système, ou de la partie du système considérée, est le plus faible de tous les tronçons).
- Il est en rapport avec la **sûreté** de l'ouvrage pour assurer la fonction de protection contre les inondations (objectif de sûreté). L'objectif de sûreté devrait donc être fixé par le maître d'ouvrage, après avoir évalué le risque résiduel et considéré qu'il était acceptable.
- Le niveau de sûreté de l'ouvrage doit impérativement, dans les faits, être supérieur ou égal au niveau de protection. Dans un système ancien si lors d'un diagnostic, le constat du niveau de sûreté est inférieur au niveau de protection apparent (*voir* ci-dessus), il convient de se fixer un niveau de protection réel inférieur ou égal au niveau de sûreté.
- La différence entre le niveau de protection et le niveau de sûreté correspond à la tranche de niveau d'eau pour laquelle la zone protégée peut être inondée mais où le système est maintenu dans un fonctionnement nominal, et pour laquelle on peut prévoir le scénario d'inondation, donc bien gérer les mises en sécurité. Donc, plus cette différence sera élevée, plus on aura un système qui permettra d'assurer la sécurité des populations et des biens présents dans la zone protégée. À l'extrême, lorsque les deux niveaux sont confondus, on passe d'une situation sans inondation à une situation où le risque d'inondation non maîtrisée n'est plus négligeable (aléa de brèche dans le système).
- Cette notion de niveau de sûreté se rapproche du « risque résiduel de rupture » maximal pour le niveau de protection, qui est introduit et fixé à 5 % dans l'arrêté du 7 avril 2017 (chapitre 8 de l'arrêté, scénario 1).

### 3.3. Niveau de danger (de la digue ou du système de protection)

Le niveau de danger (ND) d'un ouvrage est le niveau d'eau à partir duquel sa probabilité de rupture est très élevée à certaine pour les différents modes de rupture auxquels

il est potentiellement exposé [23, 42]. C'est notamment 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 à cet effet.

- Ce concept n'est pas repris dans le cadre du décret du 12 mai 2015, mais sa détermination est nécessaire, dans l'étude de dangers, pour estimer la performance structurelle du système d'endiguement et déterminer le risque résiduel d'inondation au-delà du niveau de protection.
- Ce concept s'applique aisément tronçon par tronçon et peut également s'appliquer au système de protection, dans ce cas celui du système est le plus faible de tous les tronçons, mais on n'en tire pas nécessairement des conséquences en matière de gestion.
- Il est en rapport avec la sûreté de l'ouvrage (probabilité de rupture élevée).
- Dans le cas d'un ouvrage neuf ou d'un projet de confortement, il va résulter des choix du concepteur (à approuver par le maître d'ouvrage si clairement établi).
- Cette notion se rapproche du « risque de rupture d'au moins un ouvrage supérieur à 50 % », qui est introduit dans l'arrêté du 7 avril 2017 (chapitre 8 de l'arrêté, scénario 3).

### 3.4. Niveau de sécurité des personnes

Le niveau de sécurité des personnes (NSP) peut être considéré comme le niveau d'eau dans le milieu eau, au contact du système, en dessous duquel les personnes situées dans la zone protégée se trouvent en sécurité. Il est normalement supérieur au niveau de protection (si celui-ci a bien été calé). C'est une donnée utile pour la gestion du risque d'inondation et l'aménagement du territoire. Sa connaissance doit constituer un objectif de l'EdD.

Il est déterminé à partir des autres niveaux (protection, sûreté, danger), de la connaissance des scénarios d'inondation et phénomènes dangereux associés (hauteur, vitesses, temps d'arrivée), et de la connaissance de l'occupation du sol de la zone protégée et des éventuels dispositifs de sauvegarde de la population. La détermination de ce niveau est ardue car, contrairement aux trois autres niveaux présentés plus haut, il n'est pas directement traduisible en niveau d'action hydraulique sur le système de protection. En effet, pour un système de protection donné, il correspond à un niveau d'intensité des phénomènes d'inondation dans la zone protégée. Sa détermination nécessite donc une ou plusieurs modélisations hydrauliques de l'inondation de la zone protégée.

Selon les cas, le niveau de sécurité des personnes se classe différemment vis-à-vis des autres niveaux : de manière générale, il peut être inférieur ou supérieur au niveau de sûreté comme au niveau de danger.

Dans tous les types de système, pour des niveaux supérieurs au niveau de sûreté du système, le niveau de sécurité des personnes peut être atteint sur différentes parties de la zone protégée, résultant de divers scénarios de défaillance et donc de différents niveaux d'action hydraulique sur le système de protection. Dans ce cas, pour le connaître avec certitude dans l'absolu, il faudrait être capable de modéliser l'ensemble des scénarios possibles, ce qui, dans l'état actuel des choses, est inenvisageable dans le cas général, il faut se contenter d'un ensemble de scénarios « représentatifs ».

Dans le cas d'un système en bon état ( $NS \geq NP$ ), le niveau de sécurité des personnes est supérieur au niveau de protection (pas d'eau dans le système avant NP) mais, suivant les systèmes, il pourra être inférieur au niveau de sûreté (cas où des écoulements en aval des zones de surverse organisée atteignent des caractéristiques hauteur ou vitesse

d'écoulement ou de montée des eaux trop importante) ou, au contraire, supérieur (cas où ces hauteurs et vitesses gardent des valeurs acceptables).

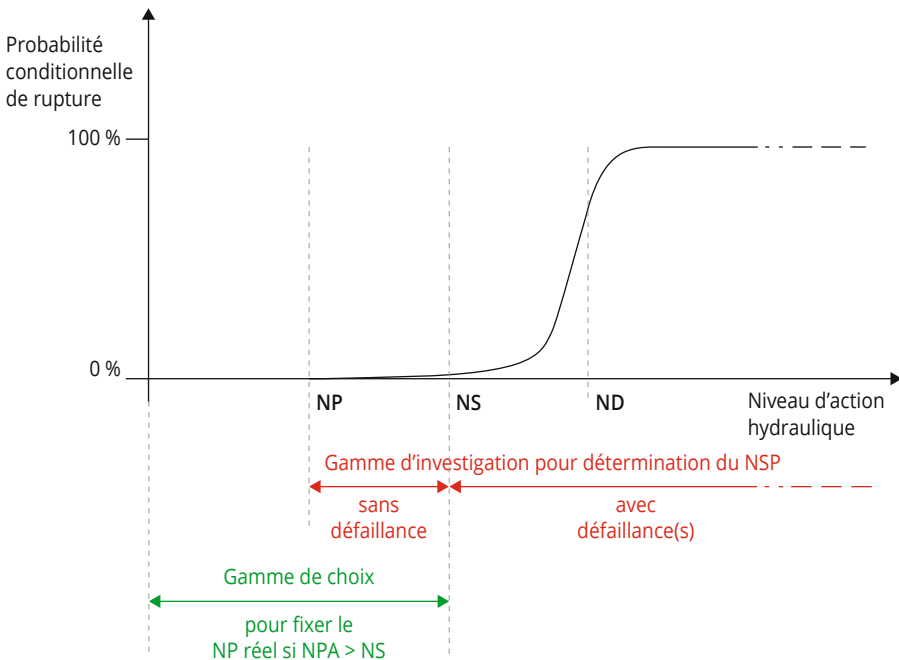
Si des plans de sauvegarde existent, ils peuvent être pris en compte pour la détermination du niveau de sécurité des personnes. En effet, pour les systèmes en bon état et résilients à la surverse ( $NS > NP$ ), il faudrait éventuellement prendre en compte les plans de mise en sécurité des populations pour les écoulements « normaux » d'inondation contrôlée ( $NP < N < NS$ ), puisque ceux-ci sont prévisibles et que l'on peut donc s'organiser. À l'inverse, pour des systèmes non résilients à la surverse ( $NS = NP$ ), à partir du moment où  $NP$  est dépassé, des brèches peuvent se produire à différents endroits du système et conduire à des scénarios d'inondation très distincts, ce qui rend la gestion de ces événements beaucoup plus difficile.

### 3.5. Synthèse sur les niveaux

Les niveaux de protection et de sécurité des populations sont liés à la fonction principale de protection du système de protection contre les inondations.

Les niveaux de sûreté et de danger sont en revanche liés aux fonctions techniques devant garantir l'efficacité et la pérennité du système de protection.

Les différents niveaux propres à un système de protection ( $NP$ ,  $NS$  et  $ND$ ) peuvent être représentés de manière théorique selon une courbe représentant la probabilité de rupture en fonction du niveau de l'action hydraulique (Figure 3-2). La connaissance du niveau de sécurité des populations dépendra de modélisations hydrauliques dans la zone protégée dans une gamme de scénarios de niveau supérieur au niveau de protection.



**Figure 3-2.** Niveau de protection (NP), niveau de sûreté (NS), niveau de danger (ND), niveau de sécurité des personnes (NSP) et probabilité de rupture (Source : B. Beullac).

NPA : niveau de protection apparent.



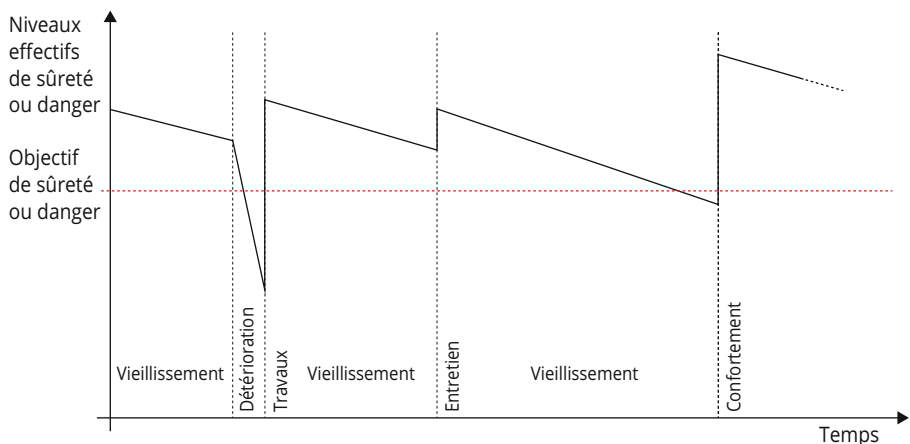
Le **Tableau 3-1** présente pour chacun des quatre niveaux la manière de le déterminer dans le cas de figure d'un projet (système neuf ou modifié) ou d'une analyse de risque (spécifique ou périodique pour les systèmes existants).

**Tableau 3-1.** Synthèse sur les niveaux de protection, sûreté et danger.

	Projet	Diagnostic/Analyse de risque
Niveau de protection (des digues)	Objectif de protection du maître d'ouvrage	Détermination du niveau de protection apparent (diagnostic hydraulique)  Le niveau de protection réel (ou effectif) correspond au plus faible des niveaux de protection apparent et de sûreté, déterminés par le bureau d'études.  Le gestionnaire peut revoir à la baisse le niveau de protection objectif, pour garantir une marge de sécurité.
Niveau de sûreté (des digues)	Objectif de sûreté du maître d'ouvrage	Détermination du niveau de sûreté (diagnostic structurel)
Niveau de sécurité (des personnes)	Résulte de modélisation de scénarios d'inondation hors défaillance (niveau compris entre niveau de protection et niveau de sûreté)	Résulte de modélisation de scénarios d'inondation par défaillance (niveau > NS) ou non (NP < niveau < NS) (analyse de risque)
Niveau de danger (des digues)	Résulte des choix du concepteur à valider par le maître d'ouvrage (notamment la revanche)	Détermination du niveau de danger (diagnostic structurel)

La détermination ou la vérification de ces différents niveaux doit être un objectif de tout diagnostic approfondi ainsi que des analyses de risque. À l'issue d'un diagnostic ou d'une analyse de risque, si le niveau constaté est inférieur à l'objectif initial, il convient soit de modifier les objectifs affichés, soit de remonter la performance du système pour regagner le ou les niveaux objectifs en cause.

Les niveaux effectifs évoluent au cours de la vie de l'ouvrage. Cela concerne principalement les niveaux de sûreté et de danger (à la suite de dégradations ou de travaux) mais également le niveau de protection (évolutions morphologiques, changements climatiques) (**Figure 3-3**).



**Figure 3-3.** Principe de la variation des niveaux de sûreté et/ou danger au cours du temps de travaux de réparation et travaux de confortement (Source : B. Beullac).

La correspondance entre les niveaux altimétriques et les périodes de retour se fait de manière **punctuelle** (projet, diagnostic) et doit donc être vérifiée par des diagnostics périodiques.

## 4. Niveaux et milieux eau

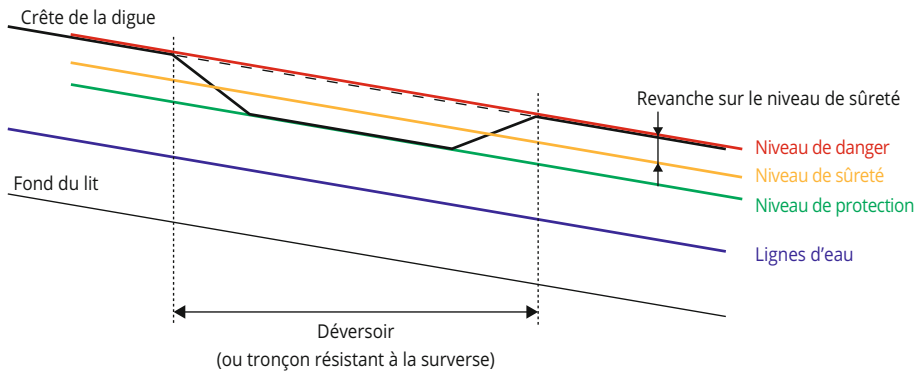
Les niveaux relatifs au système de protection ou aux ouvrages qui sont présentés au [paragraphe 3](#). le sont en termes fonctionnels. Les définitions et considérations qui y sont présentées sont génériques à tous les types de milieux. À l'inverse, la manière de déterminer ces niveaux pour un milieu eau donné peut varier, tout comme la conception d'un système varie, pour atteindre ses objectifs de protection, en fonction des spécificités du milieu eau auquel il fait face. Les méthodes et modèles hydrauliques et hydrologiques permettant de prédéterminer des niveaux en fonction de périodes de retour, d'événement hydrométéorologique initiateur ou de toute autre donnée d'entrée dépendent bien entendu de chaque type de milieu. Le but du présent guide n'est pas de faire l'état de l'art sur ces méthodes et modèles dans chaque type de milieu. Nous renvoyons le lecteur à la littérature abondante sur ces sujets. À l'inverse nous attirons l'attention du lecteur sur la nécessité, dans le cadre de la conception, du diagnostic ou de l'analyse de risque de systèmes de protection contre les inondations, de bien faire cadrer ces études hydrauliques et hydrologiques aux attentes spécifiques à ces systèmes ; pour cela, nous renvoyons le lecteur aux sections relatives à l'hydraulique globale et à l'hydraulique locale des milieux eau dans la [Partie II](#) du présent guide (*voir Chapitre 5 : paragraphes 3.6. et 3.9.*).

La suite de cette section présente des spécificités liées aux différents niveaux dans chacun des principaux types d'environnement.

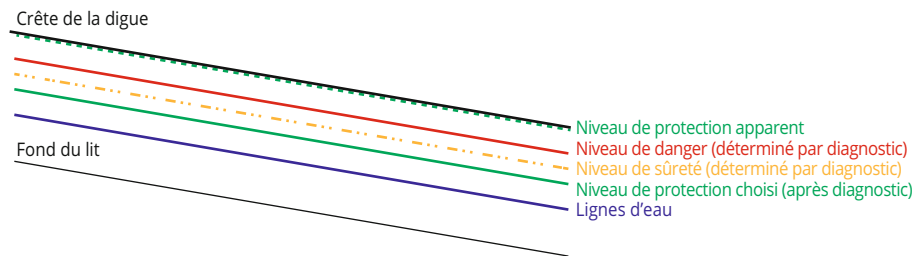
### 4.1. Illustration et spécificités des différents niveaux pour les digues fluviales

En milieu fluvial, la spécificité principale est la possibilité de gérer les surverses pour protéger le système endigué contre les dommages liés aux surverses incontrôlées : dommages aux ouvrages à la suite d'une surverse sur un tronçon non résistant, dommages aux enjeux de la ZP à la suite d'une inondation dans un secteur non prévu. Dans ce contexte, la [Figure 3-4](#) présente les différents niveaux liés à la digue (NP, NS et ND, à l'exclusion de NSP qui nécessite la connaissance de la propagation des inondations dans la ZP) sur un système conçu pour résister aux surverses grâce à un déversoir ou une section résistante à la surverse [13]. La revanche figurant sur cette figure, au-dessus du niveau de sûreté, correspond à la marge de sécurité ajoutée pendant le processus de conception du système.

La [Figure 3-5](#) présente le cas (fréquent) des digues anciennes, en état dégradé, et mal connues en termes d'objectifs. Après le premier diagnostic, on connaît les niveaux de sécurité et de danger, ainsi que le niveau de protection apparent. Ces niveaux peuvent être comme sur la [Figure 3-5](#), inférieurs à celui de la crête. Il faut alors dans un premier temps, de manière réaliste, fixer le niveau de protection à une valeur inférieure ou égale au niveau de sécurité constaté, pour que la zone protégée ne soit pas réputée protégée au-delà du niveau de sûreté, ce qui aggraverait le risque par un sentiment de fausse sécurité. Ultérieurement, des travaux pourront être prévus par le responsable du



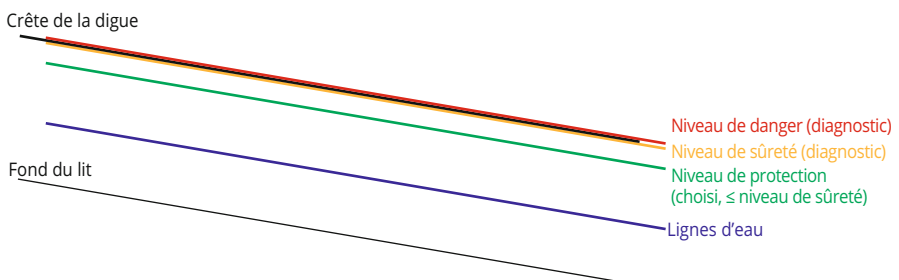
**Figure 3-4.** Niveaux de protection, sûreté, danger, pour un projet ou une conception intégrant la gestion des surverses (Source : R. Tourment).



**Figure 3-5.** Niveaux de protection, sûreté, danger, pour des digues anciennes et en mauvais état, après premier diagnostic (Source : R. Tourment).

système pour remonter le niveau de protection, en remontant les niveaux de sécurité et de danger. Comme indiqué aux paragraphes 3.2. et 3.4., une différence de niveau suffisante entre NP et NS est souhaitable pour pouvoir gérer correctement la mise en sécurité des populations de la ZP.

La Figure 3-6 présente le cas des digues anciennes, après leur premier diagnostic et en bon état (pas de risque de rupture avant surverse). Dans ce cas, on peut consi-



**Figure 3-6.** Niveaux de protection, sûreté, danger, pour des digues en remblai, en bon état mais sans déversoir (Source : R. Tourment).

dérer en première approche que NP, NS et ND sont confondus et égaux au niveau de crête. Il est néanmoins souhaitable de différencier ces trois niveaux car chacun d'entre eux a des implications en matière de gestion des risques. En ce qui concerne la différenciation entre NS et ND, il s'agit d'après leurs définitions d'une question d'incertitude sur la rupture de l'ouvrage pour une charge donnée et il est difficilement concevable de passer instantanément d'une probabilité négligeable de rupture à une probabilité certaine. On peut alors positionner le niveau de sûreté juste en dessous de la crête et celui de danger juste au-dessus (ce qui correspond à une certaine résilience du remblai à l'érosion par surverse, que l'on ne sait que mal quantifier aujourd'hui mais qui existe bel et bien). Comme dans le cas précédent, on cale ensuite le niveau de protection NP avec une différence de niveau suffisante entre NP et NS pour pouvoir gérer correctement la mise en sécurité des populations de la ZP.

## 4.2. Illustration et spécificités des différents niveaux pour les digues maritimes

Le calage d'un niveau le long d'un système de protection en milieu marin est, comme dans les autres environnements, un exercice délicat. En milieu marin, la diversité des événements peut conduire à des niveaux d'eau fortement différents le long d'un système d'un événement à l'autre. Entre autres, lors de la concomitance de surcotes identiques mais avec une houle et un vent local de direction différente, on peut, pour des événements d'intensité ou de probabilité équivalentes, avoir des zones de surverse ou de franchissement complètement différentes. Par ailleurs, sous l'action de vagues et de vents d'afflux<sup>1</sup> de forte intensité, des événements de plus faible niveau en cote peuvent engendrer de plus fortes actions sur les ouvrages et de plus importants volumes de franchissement qu'un niveau de mer supérieur avec de plus faibles conditions de vagues et de vent.

À la différence des systèmes de protection en milieu fluvial, il n'est pas possible d'envisager en milieu marin de gérer les surverses sur des zones aménagées à cet effet de manière à avoir une réduction de la charge sur le reste du système. Comme il est par ailleurs difficilement envisageable de rendre l'intégralité d'un système de protection de taille importante résistant à la surverse, il faut envisager la gestion des surverses de manière différente.

Les considérations sur l'ordre des différents niveaux, NP, NS, ND et NSP présentées ci-dessus (3.5. et 4.1.) restent valables en maritime.

Un système de protection maritime est souvent constitué d'ouvrages résistant à la surverse en milieu urbain (dunes caparaçonnées ou anthropisées, voir Figure 2-99) et de structures naturelles et/ou d'ouvrages en remblai en milieu naturel. Compte tenu de ce constat, il peut sembler préférable dans ces cas de figure, pour que les premières surverses aient lieu en milieu naturel, que la crête des ouvrages en remblai (ou des dunes) soit plus basse que celle des ouvrages urbains. De manière paradoxale, les premiers franchissements ou surverses auront lieu sur des secteurs non résistants et ont donc des chances de donner lieu à des brèches. Il faut alors gérer ces inondations de manière à éviter les conséquences néfastes sur les secteurs habités, avec des ouvrages de second rang par exemple ; on peut de manière complémentaire rendre ces ouvrages en remblai et/ou ces dunes résilients aux franchissements et surverses, en jouant par

1. Un vent d'afflux pousse les eaux de surface vers la cote et provoque une montée du niveau d'eau près de celle-ci. À l'inverse, un vent de reflux pousse les eaux de surface vers le large et provoque une baisse du niveau marin près des côtes.

exemple sur leur largeur, leur pente, leur enherbement, etc. On peut aussi jouer sur l'existence de plages ou autres zones de déferlement pour réduire la hauteur des vagues au droit des ouvrages, et donc la quantité des franchissements.

En définitive, pour choisir les niveaux (NP, NS et ND) d'un système de protection, il est probablement nécessaire de les analyser séparément pour les zones urbaines et les zones naturelles. Pour concevoir un système et un mode de gestion associé qui minimise les risques sur les lieux habités, il est nécessaire de compléter l'analyse des niveaux par une analyse de la propagation des inondations dans la zone protégée (connaissance du NSP) reposant sur une analyse de risque.

### 4.3. Illustration et spécificités des différents niveaux pour les digues torrentielles

Dans le cas des torrents, la présence de déversoir est relativement rare, on reste donc souvent dans le cas des [Figures 3-5](#) ou [3-6](#).

En contexte torrentiel, l'une des principales difficultés est d'estimer de façon fiable le niveau atteint en crue par les écoulements. Il faut au préalable déterminer le ou les types d'écoulements qui peuvent affecter le système de protection.

Deux principaux types d'écoulements avec transport solide intéressent les torrents (*voir Chapitre 5 : paragraphe 3.9.1.*) :

- des écoulements qui, du point de vue des mécanismes de transport solide mis en œuvre, sont assez comparables à ceux observés en rivière ; ils peuvent toutefois atteindre des concentrations bien supérieures en torrent ; on distingue classiquement les deux modes de transport solide par suspension et par charriage : la suspension n'a d'influence sur les rivières à forte pente que lorsque la concentration est considérable (bassin-versant dans les terres noires des Alpes du Sud par exemple). C'est donc le **charriage**, voire le **charriage hyperconcentré** qui doit être pris en compte le plus souvent ;
- les **laves torrentielles**, qui sont un phénomène tout à fait spécifique des torrents. « Les laves torrentielles sont des coulées boueuses et rocailleuses pouvant se déclencher dans certains torrents de montagne, notamment à la faveur d'événements pluviométriques intenses. Elles sont généralement constituées d'écoulements transitoires par "bouffées" de mélanges eau – matériau solide de très forte concentration (typiquement de l'ordre de  $\frac{3}{4}$  de solide pour  $\frac{1}{4}$  d'eau, en volume) et de granulométrie très étendue (des argiles à des blocs de plusieurs mètres de diamètre) (Hungr, 2005) » [41].

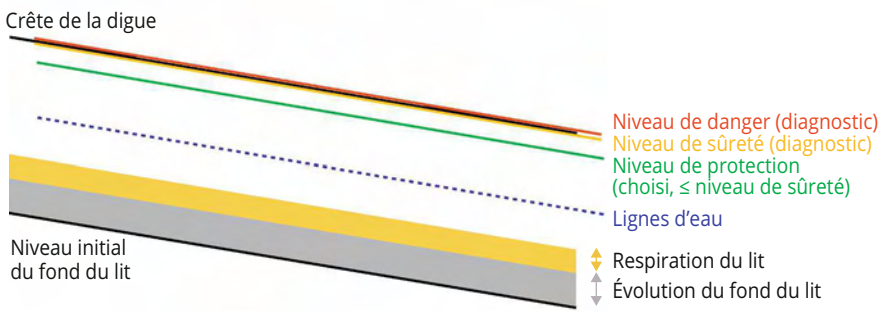
La seule prise en compte du débit liquide (et donc du niveau d'eau résultant) est très souvent insuffisante car les conséquences du transport solide en termes de types d'écoulement (charriage, laves torrentielles) et d'évolutions morphologiques (incision ou exhaussement du fond du lit, modifications des sections d'écoulement durant la crue, etc.) influencent directement et indirectement le niveau d'écoulement dans des proportions considérables.

Le calcul d'écoulement classique, en ne tenant compte que du débit liquide, perd alors tout son sens.

Pour les torrents à charriage, le niveau d'eau dans un lit en crue est la combinaison de trois paramètres (*voir compléments Chapitre 5 : paragraphe 3.9.*) : l'engravement systématique sur le long terme, les respirations du lit durant la crue et enfin la hauteur d'eau qui est fortement influencée par le transport solide et les modifications de géométrie durant la crue.



La **Figure 3-7** présente les différents niveaux liés à la digue dans un contexte torrentiel (valable sur les zones d'engravement).



**Figure 3-7.** Niveaux de protection, sûreté, danger, pour des digues en milieu torrentiel (Source : R. Tourment).

Signalons à ce propos que la majeure partie des systèmes de protection ont été implantés plutôt dans des zones d'engravement car les premières levées (ou bourrelets) étaient constituées des produits de curage que les riverains aménageaient en rouvrant les lits.

En présence de laves torrentielles, la hauteur d'écoulement peut être encore nettement plus importante et requiert une analyse spécifique (*voir* compléments **Chapitre 5** : paragraphe 3.9.).

La revanche doit également être adaptée au contexte torrentiel. On pourra notamment se référer aux recommandations proposées récemment par la commission pour la protection contre les crues (CIPC) de l'Association suisse pour l'aménagement des eaux (ASAE).

#### 4.4. Illustration et spécificités des différents niveaux pour les digues en milieu eau de transition et systèmes mixtes

##### 4.4.1. Interactions entre les niveaux marins et fluviaux

Les niveaux d'eau en milieu estuarien ou plus généralement d'embouchure (*voir* **Chapitre 2** : paragraphe 4.3.4.) dépendent de trois grands forçages :

- l'hydrologie (débit du fleuve, des affluents et niveau des nappes) ;
- l'astronomie (propagation de la marée) ;
- la météorologie (vent et pression atmosphérique) qui peut créer des surcotes océaniques ou estuariennes.

Le niveau d'eau en un point donné dépendra de l'interaction de ces différents forçages, dont le poids respectif varie tout au long de l'estuaire.

Le **Tableau 3-II** présente des exemples de forçages pour différents événements sur l'embouchure du Rhône, région où les forçages hydrologiques et météorologiques sont prépondérants (faible influence de la marée).

**Tableau 3-II.** Valeurs des forçages pour les événements rares à exceptionnels récents sur le Rhône aval  
(Source : Symadrem – étude de dangers du système d'endiguement de la rive gauche du Rhône).

Crue	Crue du Rhône		Mer		Vent		
	Débit de Pointe Beaucaire/Tarascon (m <sup>3</sup> /s)	Période de retour crue	Niveau marin à la pointe de crue (m NGF)	Période de retour niveau marin	Force du vent moyen (m/s)	Période	Direction du vent moyen
Octobre 1993	9 000	≈ 15 ans	0,6	< 1 an	5-10	< 1 an	Sud-est/est
Janvier 1994	10 300	≈ 40 ans	0,4	< 1 an	< 6	< 1 an	Nord
Novembre 1994	9 000	≈ 15 ans	0,6	< 1 an	4-8	< 1 an	Nord et sud-est
Novembre 1996	8 400	≈ 10 ans	0,7	≈ 1 an	4-6	< 1 an	Nord
Septembre 2002	9 600	≈ 25 ans	0,4	< 1 an	2-4	< 1 an	Nord/nord-ouest
Novembre 2002 (1 <sup>re</sup> )	8 500	≈ 10 ans	0,8	≈ 3 ans	5-8	< 1 an	Sud/sud-est
Novembre 2002 (2 <sup>e</sup> )	9 400	≈ 20 ans	0,95	≈ 10 ans	6-10	< 1 an	Nord
Décembre 2003	11 500	≈ 100 ans	1,0	≈ 20 ans	9-11 : nord du delta 12-18 : sud du delta	≈ 1 an	Sud-est/est puis nord-est

NGF : nivellement général de la France.

**Influences maritimes.** En milieu estuarien (embouchure large), les influences maritimes (niveaux, vagues, éventuellement courants marins) sont plus nettement perceptibles que dans le cas d'embouchures étroites. Ces influences sont dues aux entrées d'eau et/ou de vagues dans l'estuaire qui dépendent, entre autres, des niveaux marins et de l'état de la mer au large, mais également de la direction locale du vent.

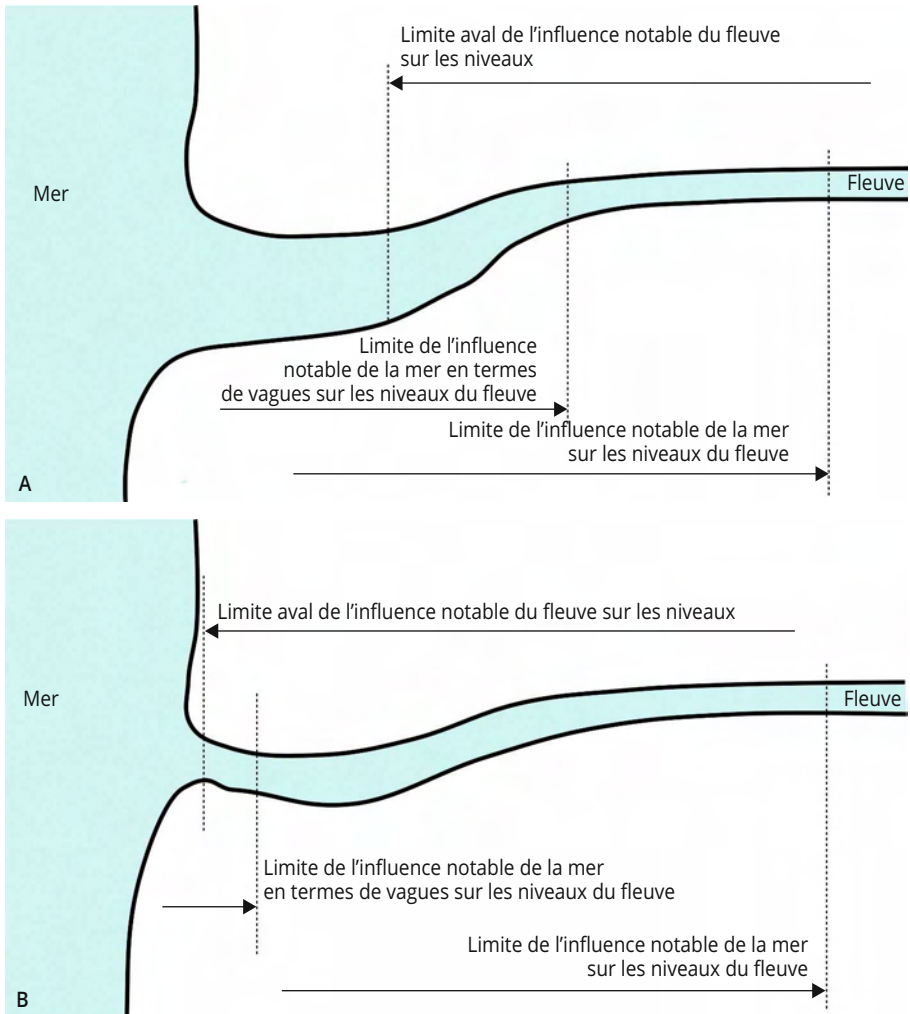
Néanmoins, sur tous les types d'embouchures, l'influence maritime sur les niveaux dans le cours d'eau peut se faire ressentir très en amont de la côte. Ces influences sont dues aux marées ou aux surcotes (incluant entre autres le set-up, voir Figure 3-1) qui influencent les conditions aux limites aval de l'écoulement du cours d'eau.

**Influences fluviales.** À l'inverse, le régime hydraulique du fleuve (étiages, débits médians, crues) a une influence plus ou moins importante sur les niveaux dans un estuaire.

En termes de niveaux, la mer influence les écoulements dans le fleuve du fait des conditions aux limites aval qu'elle impose. Les paramètres qui jouent sur l'influence respective de la mer et du fleuve sont, entre autres :

- l'existence de marées et de courants dans le milieu marin ;
- la géométrie (largeur et profondeur) de l'estuaire (ou de l'embouchure) ;
- le régime hydrologique du fleuve.

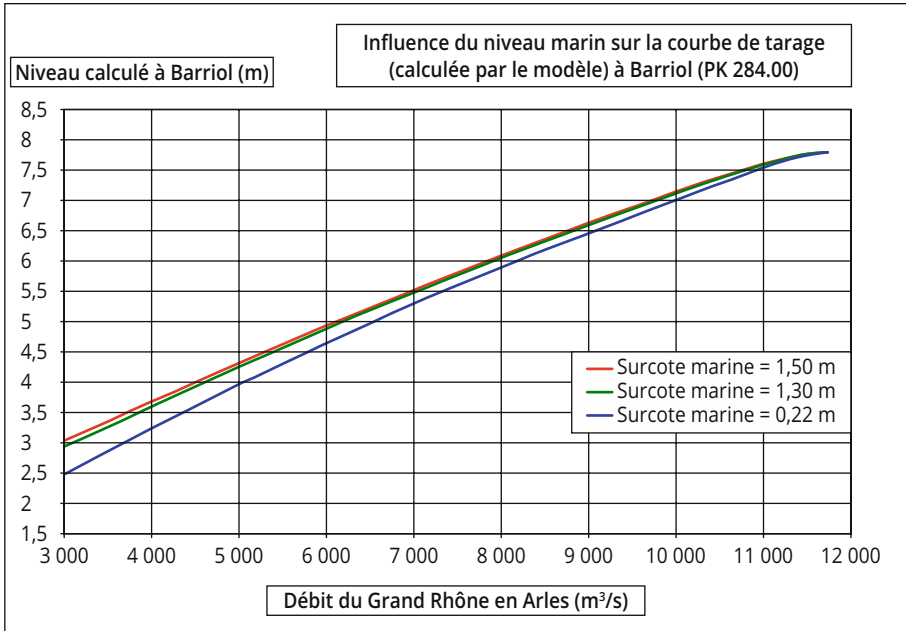
La Figure 3-8 illustre ces différentes influences.



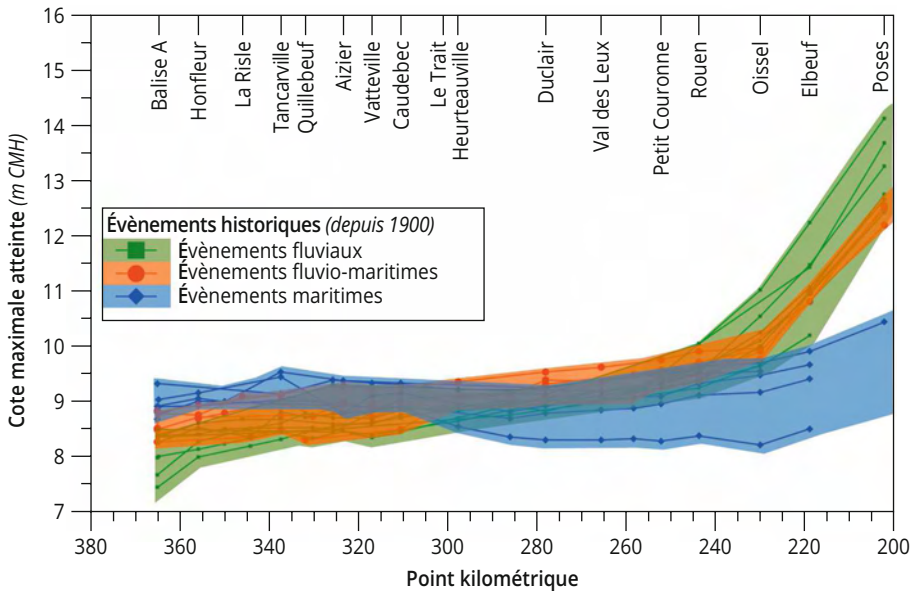
**Figure 3-8.** Influences respectives de la mer et du fleuve dans le cas d'un estuaire (A) et dans le cas d'une embouchure plus étroite (B) (Source : Tourment).

La Figure 3-9 présente un exemple d'influence des niveaux marins sur les niveaux en crue du Rhône, environ 40 km en amont de l'embouchure.

La Figure 3-10 montre la diversité des effets observés, en termes de niveaux d'eau, en fonction des forçages maritimes et fluviaux qui caractérisent les événements historiques observés dans l'estuaire de la Seine depuis 1900. L'influence du niveau marin sur le niveau du cours d'eau s'observe jusqu'à plus de 150 km en amont de l'embouchure.



**Figure 3-9.** Influence de la surcote de la mer Méditerranée sur les niveaux du Grand Rhône à Barriol (quartier situé en aval de la ville d'Arles) (Source : Symadrem).



**Figure 3-10.** Enveloppe des événements de hautes eaux dans l'estuaire de la Seine depuis 1900 : compilation non exhaustive des événements marquants en termes d'inondations, de débits et de niveaux (GIP Seine-Aval, 2015 - Source : CODAH, DREAL-HN, GIP Seine-Aval, GPMH, GPMR, ORMES, SHOM).

### 4.4.2. Interactions entre les niveaux du torrent et de la rivière principale (torrentielle)

La détermination des niveaux dans un système de protection torrentiel peut nécessiter d'envisager plusieurs scénarios au niveau de la zone de confluence, en considérant une concomitance ou pas de crues du torrent et de la rivière.

La combinaison des débits du torrent et de la rivière est un élément essentiel pour déterminer les niveaux d'engravement relatifs dans chacun de ces cours d'eau. Les niveaux atteints en crue dépendent ainsi de l'intensité relative des crues des deux cours d'eau, du volume de matériaux transportés par chacun, mais également de l'enchaînement temporel des deux crues (décalage des hydrogrammes de crues) (Figure 3-11).

Scénario	Schéma illustratif	Principale cause des débordements
1	<p>Torrent affluent : crue ordinaire</p> <p>Rivière principale : crue ordinaire</p>	<p>Dans le torrent affluent : fort engravement du lit par dépôt solide régressif et excès de débit liquide.</p> <p>Dans la rivière principale : fort engravement du lit par les apports solides issus du torrent affluent.</p>
2	<p>Torrent affluent : crue ordinaire</p> <p>Rivière principale : forte crue</p>	<p>Dans le torrent affluent : pas de débordement.</p> <p>Dans la rivière principale : excès de débit liquide.</p>
3	<p>Torrent affluent : forte crue</p> <p>Rivière principale : forte crue</p>	<p>Dans le torrent affluent : fort engravement du lit par dépôt solide régressif (souvent moins important que dans le cas 1 grâce à la reprise partielle de la rivière principale) et excès de débit liquide.</p> <p>Dans la rivière principale : excès de débit liquide et fort engravement du lit par les apports solides du torrent affluent.</p>

**Figure 3-11.** Interactions entre les niveaux du torrent et de la rivière principale (Source : Yann Quefféléan, Guide PPR – Note complémentaire. Les crues des torrents de montagne, version provisoire 2008 non publiée).



Selon les cas, les modalités de dépôt et de reprise des matériaux transportés par les différents cours d'eau, alliées à l'intensité plus ou moins forte des débits en jeu, peuvent ainsi conduire à des situations très différentes, tant d'un point de vue des phénomènes à l'origine des débordements que de la localisation spatiale et/ou temporelle de ces débordements.

On considère souvent qu'une crue importante de la rivière principale est plutôt favorable à la reprise de matériaux provenant du torrent et aura donc tendance à réduire l'exhaussement du lit du torrent par les dépôts.

Selon la configuration de la zone de confluence, l'inverse peut également se produire, un niveau de charge trop élevé dans la rivière torrentielle peut relever le niveau de charge au débouché du torrent affluent et, par conséquent, réduire les capacités d'évacuation et favoriser le dépôt de matériaux en amont immédiat de la confluence (et amplifier de fait le dépôt régressif dans le chenal).

Si les pointes de crue sont fortement décalées, c'est-à-dire que la pointe de crue de la rivière principale arrive bien plus tard, la reprise de matériaux peut être aussi plus limitée, essentiellement concentrée sur les dépôts de la zone de confluence avec tout de même une érosion régressive qui va remonter progressivement dans les dépôts vers l'amont.

En cas de laves torrentielles, les bouffées peuvent selon leur volume repousser la rivière principale sur sa rive opposée, voire venir obstruer temporairement le lit de la rivière torrentielle avec des conséquences en termes de niveaux d'eau (Figure 3-12) et la formation éventuelle d'un lac. Cela doit être pris en compte dans l'analyse des risques du système de protection de la rivière principale.



**Figure 3-12.** Débordement en rive droite de l'Arc à la suite de l'obstruction de la zone de confluence par des bouffées de laves torrentielles du torrent de la Madeleine - Lanslebourg (73) - mai 2008 (Source : ONF-RTM).



**Partie II**  
**Analyse de risque**  
**des systèmes**  
**de protection**  
**contre les inondations**

Cette partie du guide présente successivement :

- les *grands principes de l'analyse de risque des systèmes de protection contre les inondations* ; ces principes ont été validés au niveau international dans l'ILH [9], ils sont repris de manière détaillée et complétée dans le [Chapitre 4](#) ;
- une proposition de *méthodologie de réalisation de ces analyses de risque*, fondée sur une décomposition en études élémentaires, dans le [Chapitre 5](#) ;
- les suites de l'analyse de risque : *l'évaluation du risque* dans le [Chapitre 6](#), et les *mesures de maîtrise et de réduction du risque*, finalités du processus de gestion des risques renseigné par l'analyse de risque, dans le [Chapitre 7](#) ;
- les aspects liés à la *provenance et à la gestion des données* relatives aux digues et systèmes de protection, en lien avec l'analyse de risque, dans le [Chapitre 8](#) ;
- une proposition de *méthodologie d'analyse fonctionnelle et d'analyse des modes de défaillance*, originale et spécifiquement adaptée aux systèmes de protection contre les inondations, utile pour réaliser l'analyse de risque, dans le [Chapitre 9](#) ;
- les tâches de *diagnostic* des ouvrages, dans le cadre de l'analyse de risque des systèmes de protection, en lien avec les méthodologies présentées dans le chapitre précédent, dans le [Chapitre 10](#).

## CHAPITRE 4

# Généralités et spécificités de l'analyse de risque des systèmes de protection contre les inondations

### 1. Généralité sur le principe d'analyse de risque

Le risque est la mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable (l'aléa) et une mesure de ses effets ou conséquences dommageables pour des personnes, des aménagements, des enjeux au sens large y compris les milieux naturels, le patrimoine, etc.

Le risque comprend donc à la fois les notions :

- de cause ayant une composante aléatoire ;
- et de conséquence dommageable.

Parmi les risques naturels (c'est-à-dire ceux **d'origine** naturelle<sup>1</sup>), les inondations sont celui qui est le plus fréquent (50 % des catastrophes naturelles à l'échelle mondiale) et celui qui a le plus d'impact en termes financier et humain en France comme en Europe ces dernières décennies.

Pour se prémunir contre les risques, les hommes et plus généralement les sociétés humaines font appel à des mesures de **prévention** et de **gestion** de ces risques. Dans le langage courant, ces deux expressions sont souvent synonymes alors qu'elles ont des définitions voisines mais différentes :

- la **prévention du risque** concerne l'ensemble des mesures pour prévenir un risque, c'est-à-dire pour limiter son occurrence ou, à défaut, pour éviter ses conséquences ou en réduire les effets ou la fréquence. Ces mesures peuvent être choisies de manière empirique, ou bien résulter d'un processus plus rigoureux : la gestion des risques ;
- la **gestion (ou le management) des risques** est la discipline qui s'attache à identifier, évaluer et prioriser les risques et les facteurs qui y contribuent, pour les traiter méthodiquement de manière coordonnée, de façon à réduire et contrôler la probabilité des événements redoutés, et réduire l'impact éventuel de ces événements.

Le principe d'analyse de risque est apparu dans la deuxième moitié du <sup>xx</sup>e siècle dans des domaines industriels tels que le nucléaire, l'aéronautique, la chimie ou encore le domaine militaire. Il est, quoique proche dans ses principes, à distinguer des approches

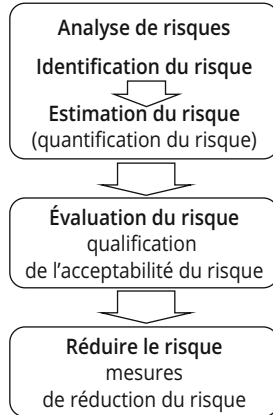
---

1. On peut noter, au vu de la définition proposée ci-dessus, que le risque n'existe que s'il a des conséquences dommageables d'un point de vue anthropique. De ce point de vue, il comprend donc systématiquement une composante non naturelle...



de gestion des risques dans les domaines de conduite des processus (conduite d'une entreprise, gestion de projet, etc.).

L'analyse de risque est la première étape du processus de gestion du risque, qui vise à estimer, évaluer et réduire les risques associés à des systèmes de toute nature (Figure 4-1).



**Figure 4-1.** La gestion des risques : l'analyse de risque et son utilisation (Source : B. Beullac).

Pour un système donné, l'objectif de l'analyse de risque est d'abord d'identifier le risque et ses composantes, puis de l'analyser pour enfin aboutir à son estimation. L'estimation du risque consiste en l'estimation de la probabilité de défaillance du fonctionnement prévu du système considéré, puis en l'estimation des conséquences potentielles.

En France, l'application de l'analyse de risque au domaine des ouvrages hydrauliques (barrages, digues et ouvrages assimilables à l'une ou l'autre de ces catégories) est entrée de manière obligatoire dans la pratique depuis la réglementation sur la sécurité de ces ouvrages (décret du 11 décembre 2007 et textes d'application). L'adaptation de la démarche depuis le domaine industriel au domaine des barrages réservoir a requis un certain nombre d'adaptations, parfois conséquentes [39], mais s'est faite sans trop de difficultés. Cela résulte de la relative indépendance qui existe entre les aléas naturels (ou autres) mettant en jeu la sûreté du barrage (le barrage lui-même et sa fonction principale) et les conséquences de sa défaillance pouvant avoir des conséquences à l'aval (telle une rupture ou une ouverture intempestive de vanne) par inondation brutale.

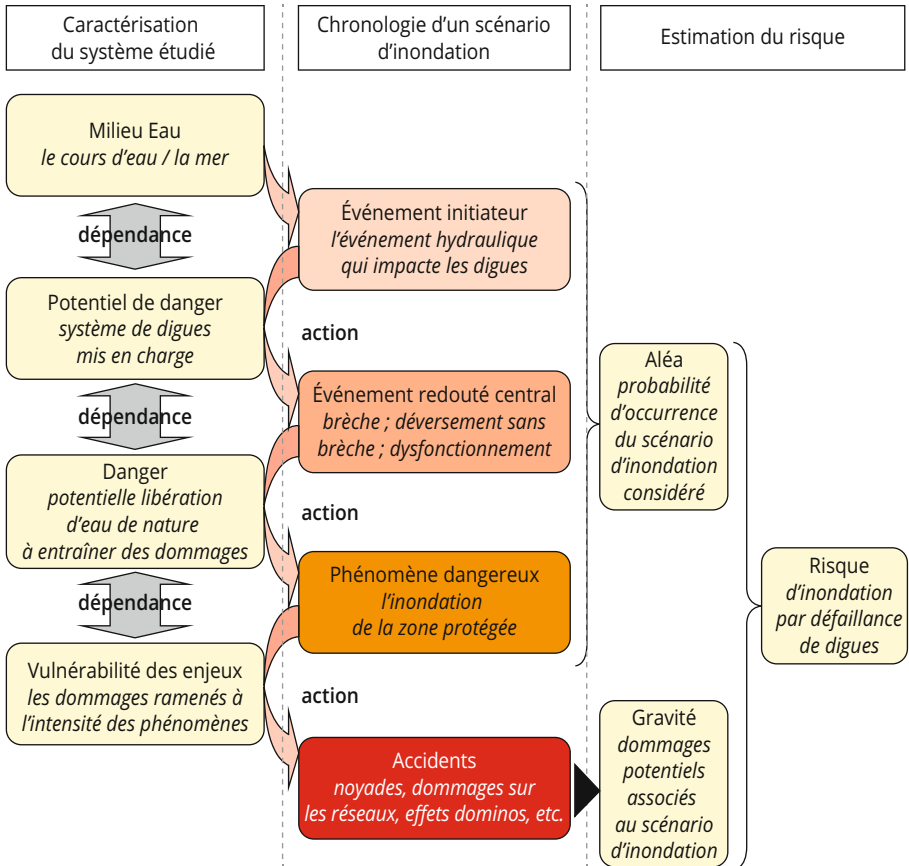
## 2. Spécificités de l'application de l'analyse de risque aux systèmes de protection contre les inondations

### 2.1. La notion de risque pour les systèmes de protection

Par rapport aux barrages réservoirs, l'analyse de risque des systèmes de protection contre les inondations (qui consiste également en l'analyse d'un aménagement et d'une zone géographique associée) est plus complexe car les conséquences d'une défaillance du système sont de même nature que le phénomène dont le système vise à se prémunir : l'inondation.

Le modèle SPR (*voir Chapitre 2 : paragraphe 1.*, notamment la *Figure 2-1*) souligne bien l'opposition qui existe entre le milieu eau et la zone protégée, ainsi que le risque d'inondation associé à la possible défaillance du système de protection et aux conséquences possibles de cette défaillance pour la zone protégée. Un système de protection protège des inondations, jusqu'à une certaine limite (son niveau de protection : *voir Chapitre 3 : paragraphe 3.1.*) et pour autant qu'il résiste physiquement (absence de brèche, jusqu'à son niveau de sûreté : *voir Chapitre 3 : paragraphe 3.2.*). Le risque associé à ce système est donc une combinaison d'un aléa naturel (la crue, la tempête, l'événement naturel contre lequel on se protège) et d'un aléa technologique (la rupture ou la défaillance du système de protection). Un système de protection contre les inondations ne supprime donc pas ce risque : il le transforme.

La *Figure 4-2* replace la terminologie du risque, utilisée entre autres dans la circulaire du 16 avril 2010 relative aux études de dangers des digues de protection contre les inondations fluviales (*voir Annexe 2*), dans le contexte des systèmes de protection et de leur environnement, des scénarios d'inondation qui leur sont associés et de l'analyse du risque qui en découle.



**Figure 4-2.** Le vocabulaire du risque dans l'analyse de risque des systèmes de protection (Source : B. Beullac).

Comme le montre la *Figure 4-3*, les équivalences de vocabulaire du risque proposées peuvent également s'appliquer aux systèmes naturellement inondables non protégés.

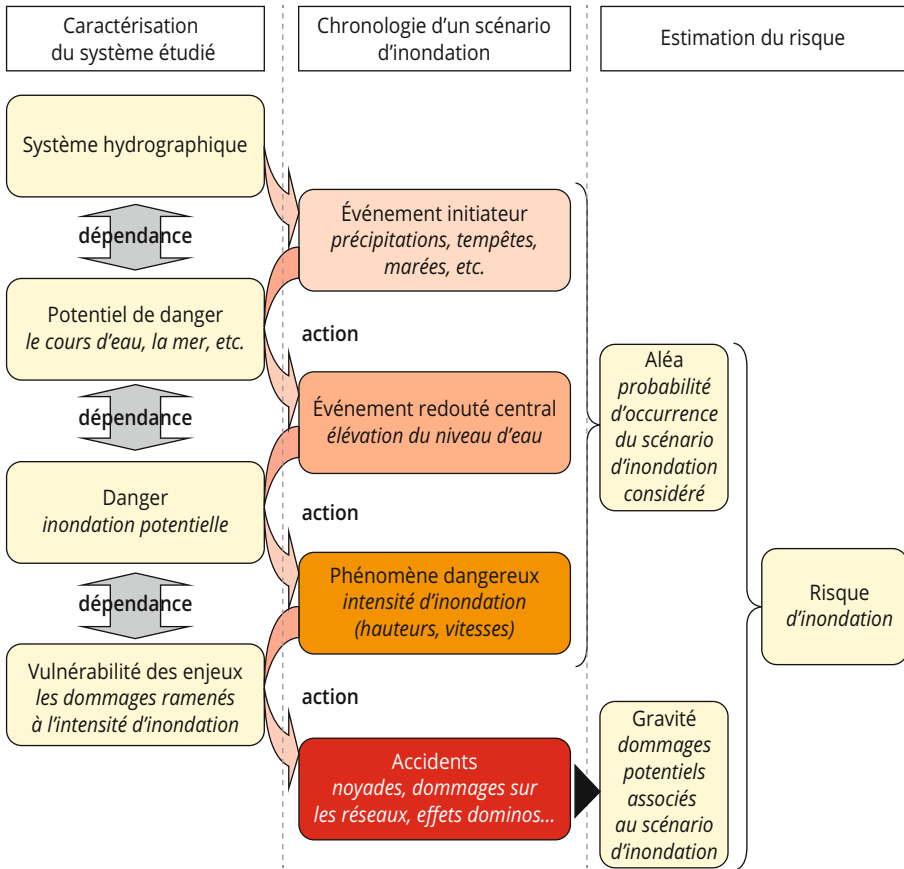


Figure 4-3. Le vocabulaire du risque appliqué à une analyse de risque d'inondations naturelles (Source : B. Beullac).

## 2.2. Des systèmes particulièrement complexes

L'analyse de risque des systèmes de protection est particulièrement compliquée du fait de la nature même de ces systèmes et de l'environnement dans lequel ils sont implantés.

En effet, comme détaillé au [Chapitre 2](#), les systèmes de protection sont des aménagements dont la constitution, le fonctionnement et donc la défaillance et les conséquences de cette défaillance peuvent être d'une grande complexité :

- ils peuvent être composés d'une grande diversité d'éléments (ouvrages de différentes natures ou éléments naturels) aux vocations tout aussi diversifiées et souvent sous la responsabilité d'acteurs du territoire différents (bien que la nouvelle compétence GEMAPI doive, à terme, simplifier le paysage des acteurs en termes de responsabilité des systèmes de protection), et aux caractéristiques structurelles souvent très hétérogènes et mal connues ;
- ils sont le siège d'interactions nombreuses et très variées avec leur environnement, des actions hydrauliques et de l'activité morphodynamique, des détériorations dues à la végétation, aux animaux fouisseurs ou à des phénomènes gravitaires (chute de blocs, avalanches, glissements de terrains, etc.), des détériorations dues aux activités humaines, ou encore une position de potentiel de danger vis-à-vis des enjeux présents dans leurs zones protégées ;
- les milieux eau qui sont à leur contact peuvent être de natures très variées (fluviaux, marins, estuariens, torrentiels, etc.), impliquant des actions très différentes ;

- leurs zones protégées peuvent être composées d'une grande diversité d'enjeux, plus ou moins vulnérables et parfois potentiellement sources de suraccident par effet domino ;
- du fait de la grande variabilité de leur nature, les systèmes de protection et leur environnement peuvent être le théâtre d'une grande variété de scénarios de défaillance et d'inondation. Ils doivent s'étudier à différentes granularités d'analyse pour en estimer le risque (voir Chapitre 5 : paragraphe 2.1.) ;
- la qualité de la caractérisation des systèmes de protection et de leur environnement et celle de leurs scénarios de défaillance sont le plus souvent limitées par les fortes incertitudes liées à la qualité et la densité des données (nécessaires) disponibles.

### Remarque

De fait, l'analyse de risque d'un système de protection consiste en l'analyse de risque d'un système endigué (voir Figure 2-3 pour les liens entre système de protection, système d'endiguement et système endigué). En effet, le système de protection et sa zone protégée, qui forment le système endigué, sont indissociables en termes d'analyse de risque, puisque le risque étudié est celui de l'inondation de la zone protégée en présence du système de protection, risque résiduel lié au dépassement, à la défaillance ou à la rupture du système ou d'un de ses composants.

## 2.3. La démarche d'analyse de risque des systèmes de protection

On peut analyser le risque avec plusieurs approches.

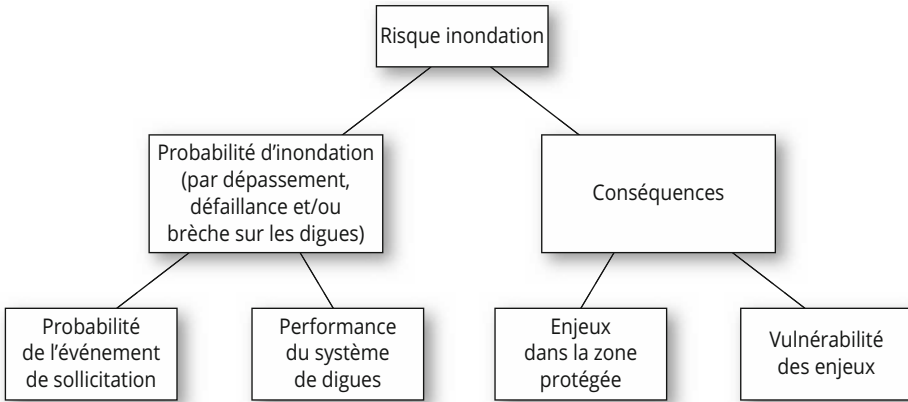
- L'analyse **qualitative** des risques (et l'analyse semi-quantitative) peut être utilisée comme une première étape pour l'analyse des risques d'inondation de tous les systèmes de protection et peut prendre une forme verbale, des échelles d'évaluation descriptives ou numériques pour décrire l'ampleur des conséquences potentielles et la probabilité que ces conséquences se produiront. Son résultat peut généralement être représenté dans une matrice d'évaluation des risques comme dans le [Tableau 4-I](#). Les descriptifs de la probabilité d'inondation (rare, peu probable, possible, etc.) peuvent être jumelés avec des intervalles de probabilité numériques (par exemple : de 1 à 0,1 ; de 0,1 à 0,01 ; etc.) si nécessaire. L'avantage de l'approche qualitative est la rapidité de sa mise en œuvre ; un inconvénient en est la subjectivité de l'évaluateur, de sorte que le résultat pourrait ne pas être stable et sujet à discussion. Une analyse semi-quantitative correspond au cas où une partie des composantes du risque est évaluée quantitativement et les autres qualitativement.

**Tableau 4-I.** Exemple de matrice d'évaluation du risque pour une analyse qualitative ou semi-quantitative.

Probabilité de défaillance/d'inondation	Conséquences de la défaillance/de l'inondation				
	Insignifiantes	Mineures	Modérées	Majeures	Sévères
Presque certaine	Risque modéré	Risque fort	Risque fort	Risque extrême	Risque extrême
Probable	Risque modéré	Risque modéré	Risque fort	Risque fort	Risque extrême
Possible	Risque faible	Risque modéré	Risque modéré	Risque fort	Risque extrême
Improbable	Risque Faible	Risque modéré	Risque modéré	Risque fort	Risque fort
Rare	Risque faible	Risque faible	Risque modéré	Risque modéré	Risque fort

• Alors que les méthodes d'analyse qualitative peuvent être suffisantes lorsque les conséquences et/ou la probabilité de défaillance du système sont considérées comme faibles, ou en première approche pour classer un ensemble de systèmes, il peut être plus approprié d'appliquer une méthode **quantitative** plus complexe et consommatrice de temps là où l'analyse qualitative des risques indique que le risque est élevé. Cette approche repose sur l'utilisation de valeurs numériques pour les conséquences potentielles et la probabilité, l'intention étant que ces valeurs soient une représentation valide de l'ampleur réelle des conséquences et de la probabilité des différents scénarios examinés. L'avantage de l'approche quantitative est son objectivité ; les inconvénients pourraient être le temps nécessaire et la disponibilité des données, entre autres lorsqu'on décompose finement les composantes du risque.

Une analyse de risque d'un système de protection nécessite l'identification et l'examen de tous les facteurs constitutifs qui influent sur le risque d'inondation dans un système. La Figure 4-4 indique les deux premiers niveaux de décomposition du risque, chacune des composantes pouvant à nouveau être analysée. Le processus d'analyse de risque doit être en mesure d'identifier, d'évaluer chacun des éléments et de les intégrer.



**Figure 4-4.** Les différents composants du risque inondation dans une zone protégée par des digues (Source : B. Beullac).

En nous fondant sur la démarche développée dans le cadre du chapitre 5 de l'International levee handbook [9], nous avons décomposé l'analyse de risque des systèmes de protection en huit composantes :

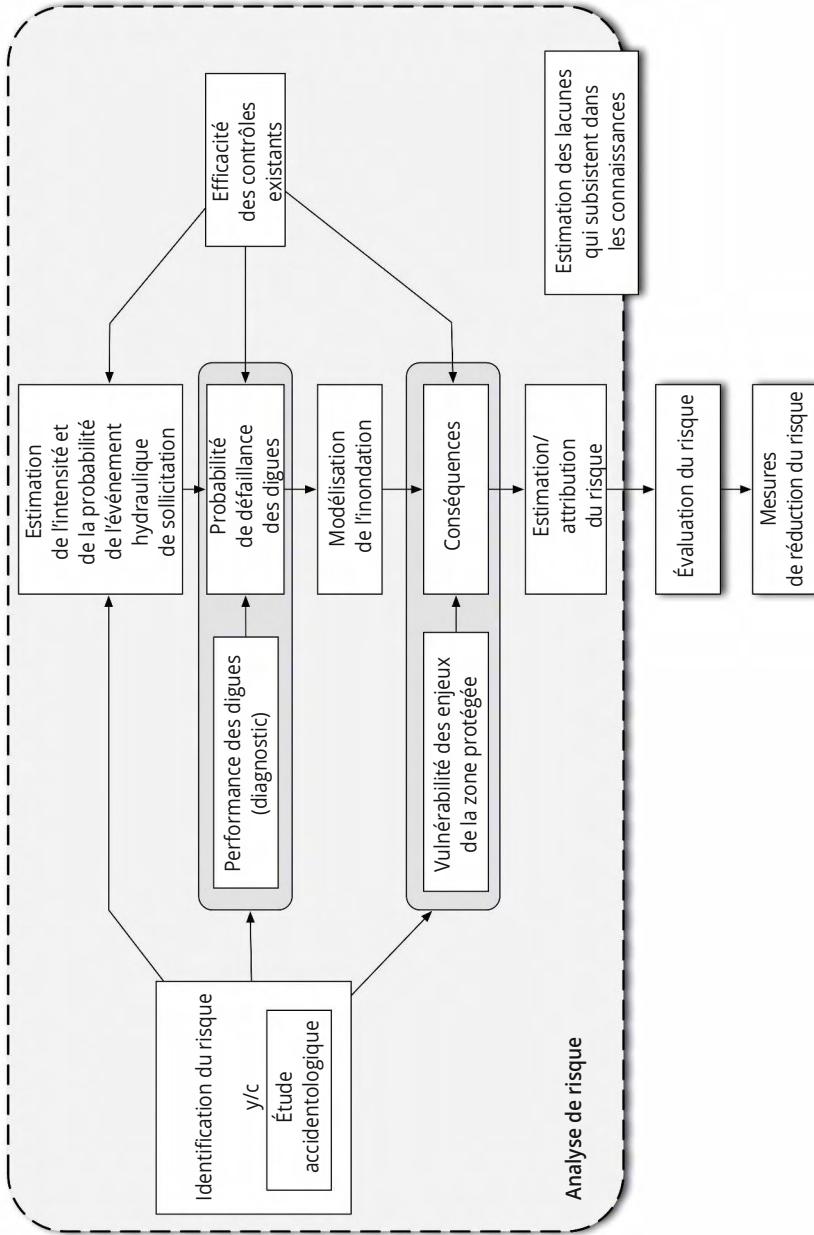
- étude accidentologique ;
- identification du risque ;
- estimation de la probabilité de l'événement hydraulique ;
- probabilité de défaillance de la digue ;
- modélisation de l'inondation ;
- conséquences ;
- efficacité des contrôles existants ;
- estimation/attribution du risque.

Les résultats de l'analyse de risque sont ensuite utilisés dans deux actions successives qui permettent une prise de décision vis-à-vis du risque estimé :

- l'évaluation du risque ;
- la définition des mesures de réduction du risque.

La Figure 4-5 décrit l'organisation des différents éléments qui font la démarche d'analyse de risque et le lien avec l'utilisation de ses résultats (l'évaluation du risque et





**Figure 4-5.** La démarche d'analyse de risque des systèmes de protection (Source : R. Tourment, d'après [9]).

la définition de mesures de réduction du risque). Chacun de ces éléments va être décrit en détail dans les [sections 3. à 12.](#) suivantes.

Sur la base de ces différentes informations et de ce cadre de démarche, l'analyse de risque qui en découle adopte généralement une des deux approches suivantes :

- choix et analyse de scénarios spécifiques en sélectionnant des combinaisons particulières d'événement de sollicitation, de mode de défaillance du système de protection, chacun avec leurs probabilités associées, et les caractéristiques des inondations qui en découlent et les conséquences sur les enjeux protégés associées. Ces scénarios peuvent être variables d'une étude à l'autre et donc conduire à des difficultés de comparaison entre différentes estimations du risque. Si une cohérence des différentes analyses est nécessaire, une orientation sur les scénarios à étudier doit être sollicitée auprès des autorités et/ou des organismes responsables ;
- évaluation de toutes les combinaisons possibles d'action, d'état des digues (surverse, brèche et autres défaillances) pour étudier les inondations résultantes et leurs conséquences, en utilisant la simulation de Monte Carlo et des modélisations rapides des inondations pour, in fine, combiner les résultats en fonction des probabilités individuelles, pour produire une évaluation globale des risques d'inondation exprimée par exemple en termes économiques (approche adoptée au Royaume-Uni).

### 3. Étude accidentologique

#### Objectif

Sur la base de l'analyse de retours d'expérience, cette étude doit produire un premier bilan des facteurs de risque, utilisé dans l'étape plus globale d'identification du risque (décrite au [paragraphe 4.](#)).

Les retours d'expérience doivent porter à la fois sur le système endigué considéré par l'analyse de risque et sur les systèmes endigués similaires (que ce soit du point de vue du milieu eau, du système de protection, et/ou de la zone protégée).

Les facteurs de risque principaux consistent en :

- des actions (du milieu eau principalement, mais pas uniquement) ([voir Chapitre 2, paragraphe 2.2.](#)) et des facteurs aggravants envisageables sur les ouvrages ;
- des défaillances possibles du système de protection ;
- des conséquences possibles des inondations dans la zone protégée ;
- l'efficacité des systèmes de gestion de la sécurité dans le système endigué et dans le milieu eau ([voir paragraphe 9.](#)).

Il serait souhaitable qu'une base de données nationale, voire internationale, permette de capitaliser l'ensemble des retours d'expérience sur de nombreux systèmes endigués de manière à pouvoir (peut-être de manière plus synthétique) bénéficier d'un large retour d'expérience sur les facteurs de risque génériques, en fonction de la typologie des ouvrages et des systèmes. Par exemple, la Base de données historiques sur les inondations (BDHI) du ministère en charge de l'environnement, qui recense et décrit les phénomènes de submersions dommageables d'origine fluviale, marine, lacustre et autres survenus sur le territoire français (métropole et départements d'outre-mer) depuis des siècles, pourrait intégrer la description des aspects liés aux ouvrages de protection.

## 4. Identification du risque

### Objectif

Identifier, décrire et caractériser les différentes façons dont la digue peut être impactée, défaillir ou être simplement dépassée, peut donc conduire à l'inondation de la zone protégée et ainsi avoir des conséquences.

Pour analyser le risque, la première étape consiste en fait à identifier et à lister l'ensemble des facteurs qui influent sur celui-ci afin de prévoir ce qui pourrait arriver et quelles situations pourraient survenir. Ces facteurs comprennent des éléments du milieu eau, du système de protection, et de la zone protégée. Le retour d'expérience permet d'alimenter cette phase d'identification du risque, mais celle-ci doit également envisager d'autres facteurs, par une analyse d'ensemble du système et un examen de ce qui peut conduire à une inondation.

Le modèle SPR (*voir* Figure 2-1) est un modèle robuste et particulièrement bien adapté à l'analyse du risque inondation des systèmes endigués. D'autres modèles utilisant aussi une approche séquentielle (succession de causes et d'effets) sont envisageables, et pas exclusifs vis-à-vis de l'approche SPR, par exemple : « formation, déclenchement, propagation, impact et vulnérabilités », la différence étant essentiellement une question de niveau de détail de l'analyse.

Le risque peut être analysé par l'identification d'une chaîne de causes et d'effets :

- la pluie ou les tempêtes entraînent des niveaux d'eau élevés ;
  - la charge sur les digues augmente ;
  - l'augmentation de la charge sur les digues peut entraîner leur défaillance ;
  - la défaillance de la digue peut entraîner une brèche et l'inondation de la zone protégée ainsi que la défaillance d'éventuelles autres fonctions portées par l'ouvrage (par exemple, le transport routier ou ferroviaire) ;
  - l'inondation de la zone protégée peut noyer des personnes et dévaster des biens.
- Ainsi, le risque n'est pas seulement associé à l'événement hydraulique. Il dépend également :
- de l'état du système de protection – par exemple, un mauvais état peut augmenter la probabilité de défaillance ;
  - des conditions dans la zone protégée – par exemple, une augmentation imprévue du nombre de personnes dans la zone d'inondation sur une courte période (comme lors d'événements culturels ou sportifs) ;
  - du système de gestion de la sécurité (dans le milieu eau, sur le système de protection, dans la zone protégée) – par exemple, la fermeture d'une route utile à l'évacuation ou une défaillance dans la prévision d'un événement hydrométéorologique extrême ou dans la transmission de l'alerte correspondante ;
  - du comportement des personnes face au risque d'inondation.

Pour déterminer les facteurs énumérés ci-dessus, on peut utiliser les connaissances issues de l'analyse d'événements passés (*voir* paragraphe 3.) : inondations, presque inondations (événements pour lesquels le système a bien fonctionné ou au contraire presque défailli). Mais pour des événements rares, cela pourrait bien ne pas suffire. En tout état de cause, les circonstances – par exemple l'état des ouvrages de protection contre les inondations, et l'occupation de la zone protégée – ont changé ou vont peut-être le faire (*voir* ILH [9], section 2.1.4). Par conséquent, il est nécessaire d'étudier :

- les probabilités et les caractéristiques hydrologiques et hydrauliques de tous les éventuels événements de sollicitation (en pratique, d'un ensemble d'événements représentant la gamme des événements possibles : des événements fréquents, rares et exceptionnels) ;

- les probabilités et les effets des défaillances du système de protection, y compris ses évolutions ;
- les conséquences et impacts des inondations résultantes sur les enjeux présents dans la zone protégée.

Le résultat de la phase d'identification du risque doit se présenter a minima sous la forme d'une liste des facteurs de risque. Ils devront si possible être répartis en fonction des différentes phases ultérieures de l'analyse (a minima en fonction de leur localisation entre milieu eau, système de protection, et zone protégée).

## 5. Estimation de la probabilité et de l'intensité de l'événement hydraulique

### Objectif

Caractériser une gamme d'événements hydrauliques, leur intensité et leur probabilité.

La nature de l'événement hydraulique dépend du type milieu eau. Par exemple :

- pour un cours d'eau : les précipitations excédentaires et/ou les ruptures de barrages conduisent à des crues ;
- pour la mer : les tempêtes, les surcotes ou les séismes conduisent à des inondations côtières ou des tsunamis.

Pour les cours d'eau, on distingue :

1. les « crues éclair », pendant des orages intenses et caractérisées par des vitesses élevées des écoulements ;
2. les « crues lentes », lorsque les eaux de crue s'accumulent lentement dans de grands bassins-versants ;
3. les crues intermédiaires.

La charge sur les digues peut être augmentée ou diminuée par d'autres événements aléatoires tels que :

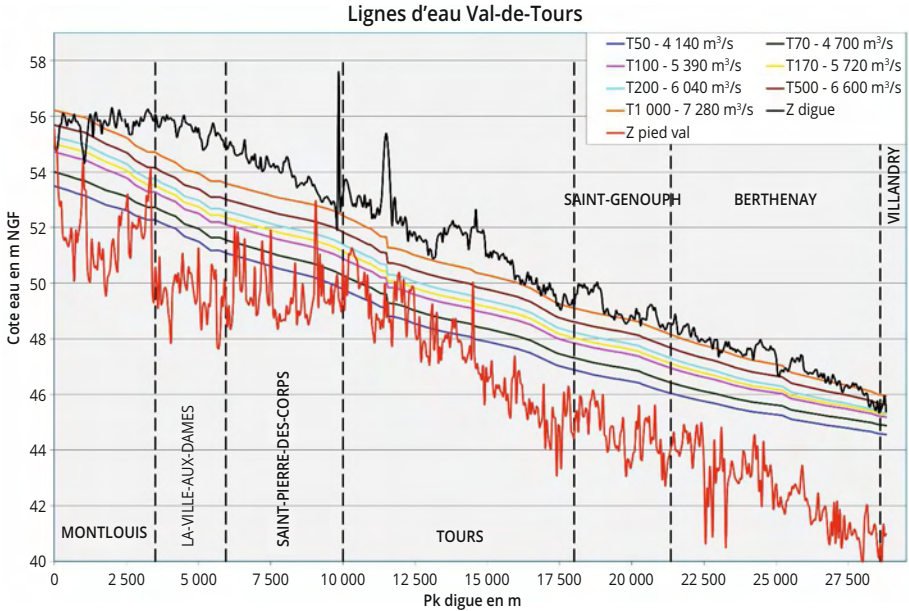
- la défaillance d'autres systèmes de protection ou de barrages ;
- des embâcles et débâcles (glace, bois flottant, etc.).

Cette phase de l'analyse de risque a pour but de déterminer pour un ou plusieurs événements, une caractérisation des actions hydrauliques au droit du système de protection, avec la probabilité associée. Ces caractéristiques, a priori variables le long du linéaire de digues, sont (*voir Chapitre 2 : paragraphe 2.2.*) :

- le niveau d'eau (ou charge hydrostatique) ;
- les courants ou écoulements côté eau ;
- les courants ou écoulements de surverse ou de franchissement ;
- les vagues.

On s'intéresse également à l'aspect temporel du phénomène (hydrogramme, limniogramme) ; en effet, certains mécanismes de dégradation sont très sensibles à la durée de la mise en charge de la digue, l'érosion interne entre autres.

La [Figure 4-6](#) présente le résultat d'une telle analyse, pour le Val-de-Tours : pour différentes probabilités de crue, on dispose du niveau de la ligne d'eau tout au long du linéaire des digues de premier rang.



**Figure 4-6.** Niveaux maximaux des crues de la Loire le long de la levée du Val-de-Tours (Source : DREAL Centre – Val-de-Loire).

### Remarque

Des généralités sur les études hydrauliques liées à l'étude des systèmes de protection contre les inondations en contexte fluvial sont données en Annexe 4.

## 6. Probabilité de défaillance du système de protection

### Objectif

Estimer comment, où et avec quelle probabilité le système de protection risque de défaillir.

### 6.1. Diagnostics et probabilités de défaillance

Cette phase de l'analyse de risque, reposant sur un diagnostic du système de protection (*voir* le détail au [Chapitre 10](#)), doit, dans le cadre d'une analyse de risque, aboutir à une estimation de la probabilité de défaillance du système de protection, pour un, plusieurs ou une gamme d'événements de sollicitation.

La probabilité de défaillance globale d'un système de protection peut être estimée sommairement : soit de manière experte sur l'ensemble du système de protection (diagnostic rapide), soit de manière plus fine en considérant la défaillance la plus probable de chacun des tronçons. De manière plus fine, le système peut être décomposé en tronçons, avec des probabilités de défaillance différenciées. En effet, le risque d'inondation dans



une zone protégée dépend de la performance du système de protection et l'endroit où, dans un système de protection, se produit une défaillance déterminera en partie (en lien avec la topographie de la zone protégée) les enjeux qui seront touchés par l'inondation et avec quelle intensité ils le seront. Comment et où un système de protection peut défaillir est donc une considération importante dans l'estimation du niveau de risque, la détermination de cela étant l'objet du diagnostic.

Des méthodes à base d'analyse fonctionnelle (qui est par ailleurs un des éléments d'une étude de dangers) et d'analyse des modes de défaillance sont utilisables pour justifier les scénarios de défaillance à modéliser et à estimer.

## 6.2. Probabilités de défaillance conditionnelles et annuelles

L'étude de la défaillance du système de protection est à effectuer pour chacun des événements hydrauliques étudiés dans la phase précédente (paragraphe 5.). Il est donc à noter que les probabilités (ou classes de probabilité) recherchées dans cette étape sont des probabilités **conditionnelles** (aussi parfois dénommées probabilités **événementielles**), associées à un événement naturel ayant sa propre probabilité ; la probabilité **annuelle** du scénario d'inondation résultant étant le produit des deux probabilités.

Cette différence entre probabilités de défaillance conditionnelle et annuelle est particulièrement importante dès lors que l'on fait appel dans le processus d'analyse de risque à des estimations qualitatives. Les équivalences entre évaluation qualitative et valeur chiffrée (évaluation semi-qualitative) font généralement l'objet de tables de correspondance (Tableaux 4-II et 4-III).

**Tableau 4-II.** Équivalence entre probabilité qualitative et valeurs semi-quantitatives pour des probabilités conditionnelles (d'après les valeurs utilisées dans le EdD des digues de classe A de la Loire moyenne).

Qualification de la probabilité conditionnelle de rupture	Probabilité conditionnelle $P_c$ (%)
Quasi certaine	Proche de 100
Très forte	> 85
Forte	Entre 50 et 85
Moyenne	Entre 15 et 50
Faible	< 15
Quasi nulle	Proche de zéro

**Tableau 4-III.** Équivalence entre probabilités qualitatives et valeurs semi-quantitatives pour des probabilités annuelles (d'après les valeurs utilisées dans les EdD des digues de classe A de la Loire moyenne).

Qualification de la probabilité annuelle de rupture	Probabilité annuelle $P_a$
Très probable	$P_a \geq 10^{-1}$
Probable	$10^{-2} \leq P_a < 10^{-1}$
Moyennement probable	$5 \cdot 10^{-3} \leq P_a < 10^{-2}$
Peu probable	$2 \cdot 10^{-3} \leq P_a < 5 \cdot 10^{-3}$
Très peu probable	$10^{-3} \leq P_a < 2 \cdot 10^{-3}$
Improbable	$10^{-4} \leq P_a < 10^{-3}$
Très improbable	$P_a < 10^{-4}$

Or, dans la pratique (dans les études de dangers), il est souvent constaté un manque d'explicitation sur la différence entre probabilités conditionnelles et annuelles. Celui-ci vient probablement en partie du fait que la seule source « officielle » présentant des équivalences entre ces deux types de probabilité concerne le milieu de l'industrie (*échelles de probabilités issues de l'arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation*). Le tableau figurant dans l'annexe de cet arrêté présente des probabilités annuelles mais pas de probabilités conditionnelles en lien avec des événements initiateurs ayant eux-mêmes des probabilités.

### 6.3. Probabilités de défaillance d'un système et des différents tronçons qui le composent

Le risque d'inondation dans une zone protégée par des digues dépend de la performance combinée de tous les tronçons de digues constituant le système. Le système va être défaillant dès lors qu'un des tronçons qui le composent va défaillir. En revanche, les conséquences ne seront pas identiques quel que soit le tronçon considéré. Par ailleurs, la défaillance d'un composant quelconque d'un système de protection peut être :

- tributaire de la performance d'un autre composant (par exemple, la performance d'un tronçon de second rang dépend de l'ensemble des tronçons de premier rang qui la protègent) ;
- complètement indépendante (par exemple, tous les tronçons de premier rang d'un système de protection maritime) ;
- partiellement dépendante (par exemple, le long d'un système fluvial, où généralement la défaillance d'un tronçon va diminuer la probabilité des autres tronçons, soit en diminuant le niveau d'eau côté rivière, soit éventuellement en créant une charge côté zone protégée).

Pour une analyse (quantitative) des risques d'un système de protection, ces relations entre probabilités de défaillance du système et de ses différents tronçons devraient idéalement être exprimées en termes probabilistes, ce qui n'est pas aisé et toujours de l'ordre de la recherche actuellement. Ces relations complexes ne sont pas facilement décrites ou représentées mathématiquement, en tout cas pour le troisième cas de la liste ci-dessus.

## 7. Modélisation de l'inondation

### Objectif

Caractériser l'intensité et la cinétique des phénomènes dangereux d'inondation dans la zone protégée.

En utilisant les résultats des étapes précédentes (niveaux d'eau à l'extérieur des digues, défaillance ou dépassement des digues), les phénomènes d'inondation de la zone protégée peuvent être calculés ou estimés, en fonction de la localisation des entrées d'eau possibles dans la zone protégée.

Dans le cadre d'une analyse de risque, afin d'évaluer les dommages potentiels (victimes, dommages matériels, etc.) dans la zone protégée, des informations sont nécessaires sur les caractéristiques hydrauliques des inondations qui peuvent s'y produire. Ces informations peuvent être obtenues en utilisant des modèles hydrauliques, à savoir des programmes informatiques qui simulent l'inondation. Ces modèles peuvent être plus ou moins complexes, en fonction des enjeux, de la topographie ou de résultats disponibles antérieurement.

Les caractéristiques hydrauliques des inondations peuvent être également utiles, au-delà de l'analyse de risque, entre autres pour préparer des plans d'évacuation.

Pour chaque scénario étudié, la première analyse concerne l'entrée d'eau dans la zone protégée, et sera suivie en deuxième temps de la propagation de cette venue d'eau sur le territoire. Lorsque de telles mesures sont prévues, il faut également intégrer les dispositifs de ressuyage (pompages, organes vannés, etc.).

## 7.1. Venue d'eau dans la zone protégée

Il faut considérer deux cas principaux, selon qu'il s'agit d'une « simple » surverse ou d'une défaillance du système sans brèche (par exemple, non-fermeture d'un passage batardeable) ou, au contraire, d'une défaillance structurelle conduisant à une brèche.

Dans le premier cas, un calcul hydraulique relativement simple pourra simplement conduire à la connaissance de l'hydrogramme d'entrée de l'inondation dans la zone protégée, alors que dans le cas d'une brèche, il faudra en premier lieu estimer la dynamique de formation jusqu'à la taille finale de la brèche.

Le second cas (avec brèche) (*voir* ILH [9] section 8.10) est beaucoup plus complexe car il fait appel à des calculs hydrauliques et géomécaniques couplés, avec de nombreux points qui sont encore du domaine de la recherche. À ce jour, il n'existe pas, à la différence des barrages réservoir, de modèle d'utilisation courante. Dans de nombreux cas, une étude de brèche historique [27] sur le système considéré ou un système analogue (hydrologie, taille des ouvrages, topographie) fournira des renseignements essentiels pour aider à déterminer l'hydrogramme d'entrée de l'inondation dans la ZP.

## 7.2. Ressuyage de la zone protégée

Le ressuyage de la zone protégée doit être caractérisé, pour les différents dispositifs concernés (organes vannés, clapets, pompes, etc.) et en fonction de leurs conditions de fonctionnement, en termes de capacité d'évacuation des eaux d'inondations.

Ces différents dispositifs peuvent, selon les cas de figure, être actifs pendant l'inondation ou seulement immédiatement après.

## 7.3. Propagation de l'inondation dans la zone protégée

Il est utile de connaître en tout point de la zone protégée (en tout cas ceux qui comportent des enjeux significatifs) les paramètres hydrauliques suivants, ainsi que (pour les premiers) leur variation au cours du temps :

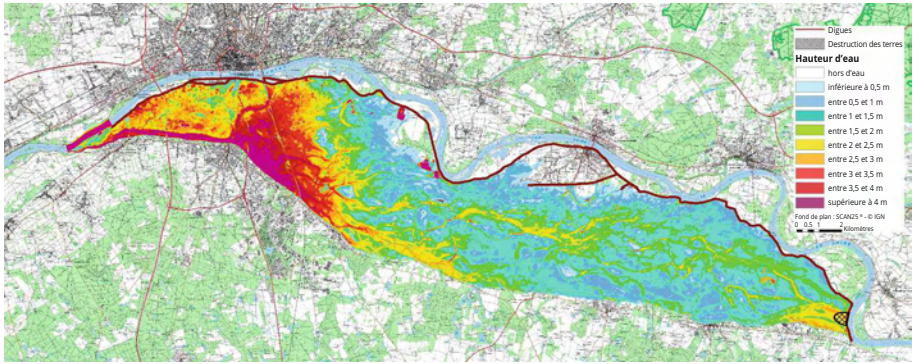
- hauteurs d'eau ;
- vitesse (horizontale) du courant ;

- vitesse de montée de l'eau ;
- temps d'arrivée de l'onde d'inondation ;
- durée d'inondation.

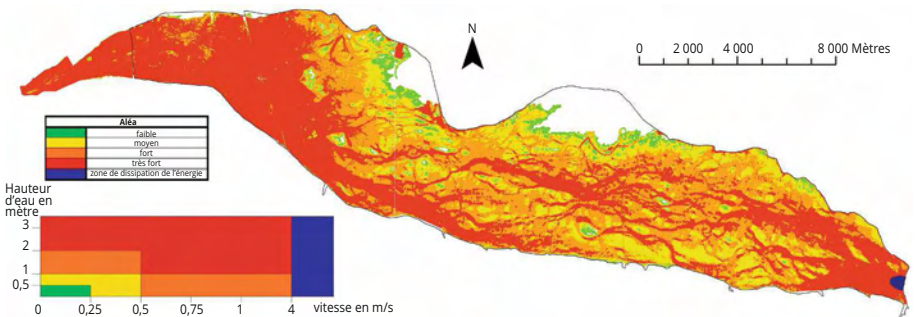
Ces résultats nécessitent généralement l'utilisation d'un modèle hydraulique de type 2D transitoire.

Chacun de ces paramètres a en effet un impact direct sur les conséquences pour les enjeux de la zone protégée, et peut par ailleurs être cartographié ; la **Figure 4-7** représente par exemple la hauteur d'eau maximale d'un scénario d'inondation du Val-d'Orléans par une brèche située en amont du Val, en rive gauche de la Loire.

Les résultats de la modélisation hydraulique d'un scénario d'inondation peuvent être traduits en termes d'intensité de l'aléa d'inondation, en les combinant entre eux si l'on veut pouvoir les traduire sous forme cartographique. Il n'existe pas de manière normalisée de procéder à cette combinaison, mis à part l'échelle utilisée dans les PPRI qui croise les valeurs maximales des vitesses d'écoulement et de hauteurs d'eau ; la **Figure 4-8** représente l'adaptation de cette classification par la DREAL Centre – Val-de-Loire pour l'étude de dangers du Val-de-Tours et son utilisation dans un scénario donné.



**Figure 4-7.** Exemple de représentation cartographique de résultats (ici la hauteur d'eau) de modélisation d'un scénario d'inondation (Source : DREAL Centre – Val-de-Loire).



**Figure 4-8.** Intensité de l'aléa d'inondation. Exemple d'échelle de classification et utilisation dans un scénario donné sur le Val-d'Orléans (Source : DREAL Centre – Val-de-Loire).

## 8. Analyse des conséquences

### Objectif

Estimer la gravité des conséquences des scénarios d'inondation pour les enjeux présents dans la zone protégée.

Les « conséquences » d'une inondation apparaissent quand une personne vulnérable ou des biens sont effectivement exposés à une inondation et ont subi un préjudice réel. Les conséquences peuvent être un résultat direct des inondations (par exemple, des victimes, des bâtiments ou leur contenu endommagés) ou indirect (par exemple, la santé des populations, des impacts sociaux, la perte de chiffre d'affaires d'une société en raison du temps de reprise de son activité). Une analyse et une évaluation des conséquences probables d'une inondation doivent donc être effectuées afin de déterminer l'ampleur potentielle des impacts d'une inondation.

L'évaluation des conséquences de l'inondation dans la zone protégée passe par la combinaison des résultats de la modélisation hydraulique (*voir* [paragraphe 7.](#)) des inondations potentielles avec la vulnérabilité estimée des différents enjeux identifiés et localisés dans la zone protégée. Les impacts dépendent également des caractéristiques et de la qualité de l'eau (eau douce/eau salée, température, turbidité, polluants, etc.). La vulnérabilité des enjeux peut être vue comme une fonction qui relie l'endommagement d'un type d'enjeu en fonction des caractéristiques hydrauliques des inondations possibles (le niveau d'aléa d'inondation).

La gravité des conséquences est estimée par le croisement entre :

- la vulnérabilité intrinsèque des enjeux exposés au risque, en fonction de leur nature ;
- le degré d'exposition des enjeux à l'aléa d'inondation en fonction de leur localisation.

### Remarque

La mesure de la gravité des scénarios d'inondation est, dans les faits, d'une grande complexité tant les données manquent pour avoir une vision fine des choses. Savoir par exemple si l'exposition de personnes peut effectivement générer des victimes reste très compliqué tant les retours d'expériences et les données manquent à ce sujet. Cette activité est donc encore pleinement du domaine de la recherche.

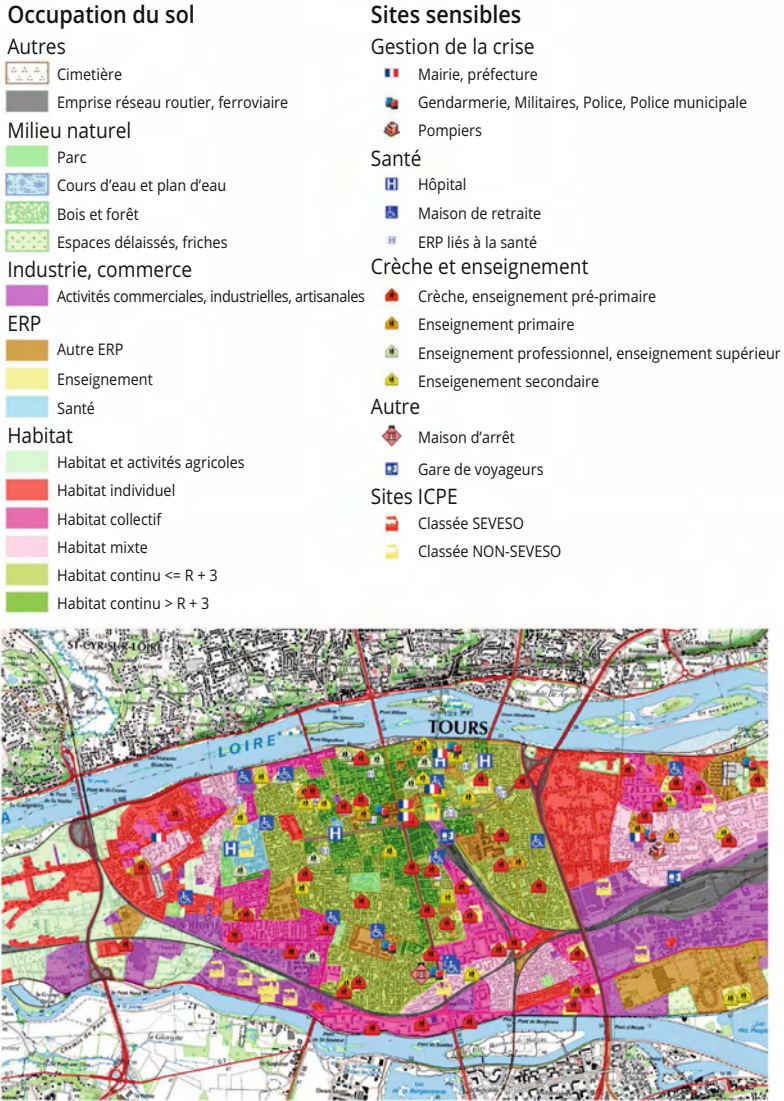
Une zone protégée peut contenir différents types d'enjeux, notamment :

- populations ;
- bâtiments ;
- zones naturelles/zones dépourvues d'aménagements ;
- zones agricoles/zones d'activités ;
- réseaux de transport/réseaux de communication ;
- établissements recevant du public (ERP) sensibles (d'enseignement, de santé, etc.) ;
- infrastructures (AEP, gaz, assainissement, station d'épuration, etc.) ;
- etc.

La [Figure 4-9](#) présente une carte de recensement et de localisation de plusieurs types d'enjeux dans une zone protégée (Val-de-Tours).

La vulnérabilité de ces différents types d'enjeux vis-à-vis de l'aléa recouvre de nombreuses dimensions :

- conséquences humaines,
- conséquences sociales,



**Figure 4-9.** Recensement et localisation cartographique des enjeux sur le Val-de-Tours (Source : DREAL Centre - Val-de-Loire).

- conséquences économiques,
- conséquences environnementales,
- conséquences patrimoniales,
- etc.,

Les conséquences, pour chacun de ces enjeux, sont conditionnées par leur sensibilité à l'aléa d'inondation (intrinsèque à chaque type d'enjeu), leur exposition à l'aléa d'inondation (en fonction de leur localisation), leur adaptation au risque d'inondation (la réaction et la résilience). Ces conséquences résultent soit des effets directs de l'exposition à l'inondation (par exemple, destruction de bâtiments, noyades, etc.), soit des



effets induits (par exemple, pertes de marchés d'entreprises faisant suite à l'arrêt d'activité pendant l'inondation).

La présence, dans la zone protégée, d'enjeux présentant un danger particulier (par exemple, stockage de produits polluants, matériel ou véhicule mis en flottaison, etc.) peut entraîner la réalisation de sur accidents du fait de leur atteinte par une inondation (effet domino).

De plus, l'inondation peut avoir des conséquences à l'extérieur de la zone protégée. Par exemple, une activité industrielle située en dehors de la zone d'aléa peut être affectée par la coupure des réseaux d'énergie, d'eau, de transport.

Les mesures prévues pour la sauvegarde des personnes et des biens (plans communaux de sauvegarde, zones refuges, etc.) ainsi que l'estimation de leur efficacité (*voir paragraphe 9.*) doivent idéalement être prises en compte dans l'analyse des conséquences. Il est toutefois important de noter que les méthodes permettant l'intégration de ces aspects sont aujourd'hui encore au stade de la recherche.

L'analyse des conséquences nécessite des choix méthodologiques :

- quant à la finesse du degré d'analyse (par exemple, estimation grossière du nombre d'habitants en fonction d'une densité de population ou recensement précis du nombre de logements et des populations qu'ils contiennent, des effectifs des entreprises, etc.) ;
- quant à la manière de caractériser la vulnérabilité (par exemple, évaluation économique des dommages directs tangibles [type analyse coûts-bénéfices] via des fonctions de dommages, évaluation qualitative suivant les couples critères/indicateurs définis en fonction des récepteurs, etc.).

Une analyse multicritère permet d'associer, en termes de conséquence, des types d'enjeu et des types de vulnérabilité de natures complètement différentes.

Un choix méthodologique est indispensable ; il doit être clairement explicité et justifié du mieux possible. Pour chaque type d'enjeu et d'endommagement associé auquel s'intéresse une analyse de risque, il conviendra de construire une fonction d'endommagement (de mise en danger pour les populations) correspondant à la vulnérabilité associée au couple enjeu/dommage et prenant en compte les paramètres pertinents de l'intensité de l'inondation (*voir paragraphe 7.*) ; par exemple, le **Tableau 4-IV** représente une estimation du nombre de personnes mises en danger dans un habitat comportant 2 étages ou plus, en fonction de l'intensité de l'inondation (estimée conformément à la **Figure 4-8**).

**Tableau 4-IV.** Estimation du nombre de personnes mises en danger en fonction de l'intensité d'inondation.

Intensité de l'aléa d'inondation	Mise en danger « Habitat R+2 et plus »
5. Zone de destruction du bâti	95 % (du total)
4. Très fort	10 % (des étages 0 et 1)
3. Fort	1 % (des étages 0 et 1)
2. Moyen	0,5 % (des étages 0 et 1)
1. Faible	0 % (des étages 0 et 1)

### Remarques

En France, il existe différents documents pouvant enrichir la réflexion sur la méthode à adopter pour l'analyse des conséquences des inondations :

- le « **Référentiel national de vulnérabilité aux inondations** » [36] : initié par la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) du ministère en charge de l'environnement et destiné aux porteurs de stratégies locales, de programmes d'actions de prévention des inondations (PAPI), et plus généralement à tous les acteurs de la prévention des risques d'inondation, il constitue un cadre de référence opérationnel, pouvant être utilisé pour aider à la réalisation d'un diagnostic de vulnérabilité sur un territoire ;
- le guide du CEPRI « **L'ACB (analyse coût/bénéfice) : une aide à la décision au service de la gestion des inondations Guide à l'usage des maîtres d'ouvrage et de leurs partenaires** » [5] a vocation à accompagner les acteurs locaux porteurs de projet à se familiariser avec la méthode d'analyse coût/bénéfice validée par le ministère en charge de l'environnement et à tirer parti de tous les apports que cette méthode d'analyse économique est susceptible de générer pour nourrir le débat et la concertation locale précédant la prise de décision ;
- le guide « **Analyse multicritères des projets de prévention des inondations : guide méthodologique** » [8] : destiné aux porteurs des projets de gestion des inondations (collectivités, établissements publics territoriaux de bassins), aux DREAL et aux DDT ainsi qu'aux bureaux d'études qui travaillent avec eux, il propose une méthode d'évaluation socio-économique des mesures de prévention des inondations, fondée sur une approche multicritère. Il fournit des recommandations et des outils pour évaluer le bien-fondé des mesures envisagées sur les territoires.

## 9. Efficacité des contrôles existants

### Objectif

Identifier et caractériser les contrôles existants.

### 9.1. Généralités

Les contrôles sont des mesures, structurelles ou non structurelles, prises afin de limiter la possibilité de survenue d'une inondation ou de ses conséquences. Ils peuvent s'appliquer :

- au milieu eau (par exemple, par des épis, des seuils ou des brise-lames, par la gestion en amont des inondations, par des barrages ou des zones d'expansion de crue, par une veille météo et de prévision de crues) ;
- au système de protection (par exemple, l'entretien des digues, la surveillance pendant les crues, les interventions d'urgence, la présence de dispositif de sécurité) ;
- à la zone protégée (par exemple, avertissement des populations en cas de risque d'inondation, mise en sécurité de la population, augmentation de la résilience des bâtiments et/ou des zones urbaines).

Lors de la réalisation d'une analyse de risque, les contrôles existants peuvent et doivent être pris en compte dans l'estimation de la probabilité des événements de sollicitation, de la défaillance des digues et des conséquences des inondations qui en résultent. Pour cela, les contrôles peuvent être intégrés dans la démarche d'analyse fonctionnelle et d'analyse de la défaillance (*voir Chapitre 9*) et être traduits en termes de *barrières de sécurité*.

## 9.2. La notion de barrière de sécurité

La notion de **barrière de sécurité**, comme le principe d'analyse de risque, est issue du domaine industriel. Dans un système, les barrières de sécurité sont des éléments qui ont pour objectif d'assurer des **fonctions de sécurité** (voir Chapitre 5 : paragraphe 1.2.) pour améliorer la sécurité du système et fiabiliser son bon fonctionnement.

Les barrières de sécurité peuvent correspondre à des dispositifs techniques autonomes (barrières techniques), à des mesures purement organisationnelles (barrières humaines) ou, plus généralement, à des combinaisons des deux (barrières mixtes).

La Figure 4-10 présente une classification des différents types de barrières de sécurité pouvant être rencontrées. Cette classification, qui a initialement été définie pour une application au milieu industriel, peut également être appliquée aux systèmes de protection contre les inondations.

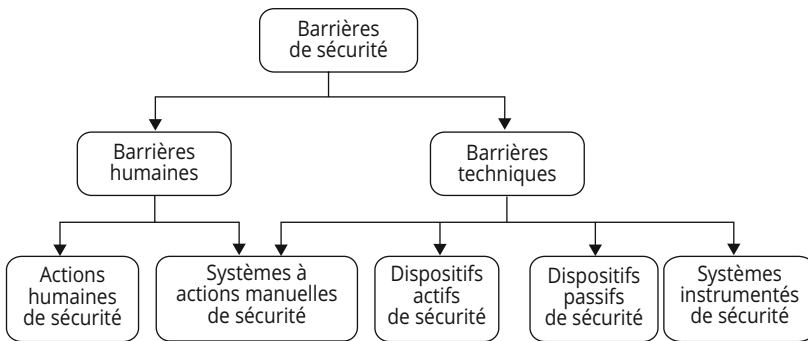


Figure 4-10. Les différents types de barrières de sécurité en milieu industriel (d'après [33]).

Cinq types de barrières de sécurité peuvent être distingués :

- **les actions humaines de sécurité** : elles correspondent à des fonctions de sécurité réalisées par des humains sans l'aide d'éléments techniques de sécurité.

Par exemple, pour un système de protection : une inspection visuelle planifiée qui prévoit une alerte en cas d'identification de détériorations sur les ouvrages et prévoit finalement des diagnostics puis des prises de décisions pour réparer les détériorations. La fonction de sécurité de cet exemple de barrière de sécurité est : maintenir la performance structurelle du système de protection ;

- **les systèmes à actions manuelles de sécurité** : ils correspondent à des systèmes combinant des actions humaines et des éléments techniques de sécurité pour réaliser des fonctions de sécurité.

Par exemple, pour un système de protection : un système de mesure de la déformation d'un remblai mesuré par un opérateur qui a pour mission d'alerter en cas d'identification de déformations, le tout relayé par un processus de diagnostic et de prise de décision conduisant si nécessaire la mise en œuvre d'un confortement. La fonction de sécurité de cet exemple de barrière de sécurité est : maintenir la performance structurelle du système de protection ;

- **les dispositifs actifs de sécurité** : ils correspondent à des dispositifs techniques autonomes comportant des mécanismes, qui remplissent des fonctions de sécurité de

manière automatique (mais sans apport d'énergie), directement en réponse à des sollicitations non prévues résultant de défaillances de composants.

Ce type de barrière de sécurité n'est pas classique pour les systèmes de protection contre les inondations mais peut toutefois être envisagé, notamment pour améliorer la sécurité de sous-systèmes complexes tels que les pompes, les vannes, ou d'autres organes électromécaniques ;

- **les dispositifs passifs de sécurité** : ils correspondent à des dispositifs techniques, autonomes et statiques, qui remplissent des fonctions de sécurité de manière automatique et directe, en cas de défaillance de composants.

Ce type de barrière de sécurité n'est pas classique pour les systèmes de protection contre les inondations mais peut toutefois être envisagé dans des cas de figure particuliers. Par exemple : un dispositif de drainage placé sous une géomembrane étanche. La fonction de sécurité de cet exemple de barrière est : diminuer la probabilité d'érosion interne, en cas de défaillance de l'étanchéité de la géomembrane ;

- **les systèmes instrumentés de sécurité** : ils correspondent à des systèmes techniques, comportant des instruments de mesure, qui remplissent des fonctions de sécurité de manière autonome lorsque certaines valeurs prédéfinies sont mesurées.

Par exemple : un système comportant un instrument de mesure du niveau d'eau qui déclenche l'ouverture (ou la fermeture) d'une vanne de manière autonome pour des niveaux d'eau prédéfinis. La fonction de sécurité de cet exemple de barrière est : diminuer la probabilité de défaillance structurelle en contrôlant la charge hydraulique sur les ouvrages.

Pour être considéré comme une barrière de sécurité et être pris en compte dans l'évaluation de la probabilité de défaillance d'un système, un élément de sécurité doit d'abord satisfaire certaines exigences. Il peut ensuite être caractérisé du point de vue de différents critères. L'estimation de ces critères permet l'estimation de la performance des barrières de sécurité.

Ces exigences et critères sont les suivants [33] :

- exigence d'**indépendance** : pour pouvoir considérer comme barrière une mesure vis-à-vis d'un scénario de défaillance, il est nécessaire que cette dernière soit indépendante de la cause du scénario ou du scénario lui-même. Par exemple, si une inondation résulte de la non-fermeture d'une vanne par un opérateur, on ne peut pas considérer comme barrière l'action de ce même opérateur en rattrapage de la défaillance opérationnelle : la mesure est sous la dépendance de la cause du scénario. De plus, les performances de la mesure ne doivent pas être dégradées par l'occurrence de l'événement initiateur et les différentes mesures doivent être indépendantes les unes des autres pour permettre l'agrégation des probabilités relatives aux scénarios de défaillance ;
- exigence et critère de **temps de réponse** : le temps de réponse correspond à l'intervalle de temps entre le moment où une barrière de sécurité, dans un contexte d'utilisation, est sollicitée et celui où la fonction de sécurité assurée par cette barrière de sécurité est réalisée dans son intégralité. Pour qu'une barrière soit retenue selon ce critère, le temps de réponse de la barrière doit être en adéquation avec la cinétique du phénomène qu'elle doit maîtriser, c'est-à-dire qu'il doit être significativement inférieur à la cinétique ;

- critère d'**efficacité** : l'efficacité est l'aptitude de la barrière de sécurité à remplir la fonction de sécurité (*voir Chapitre 5 : paragraphe 1.2.*) pour laquelle elle a été choisie (prévenir ou relayer la défaillance de la fonction technique à laquelle elle est associée). Elle peut s'exprimer en pourcentage de réalisation de la fonction de sécurité. L'évaluation de l'efficacité d'une barrière de sécurité repose notamment sur la vérification :
  - de son dimensionnement adapté ou non vis-à-vis de la défaillance à traiter,
  - de sa résistance aux phénomènes impliqués par la défaillance (en matière de sécurité des opérateurs pour ce qui concerne les barrières opérationnelles),
  - de son éventuelle dégradation compte tenu du possible vieillissement ;
- critère de **niveau de confiance** : le niveau de confiance d'une barrière de sécurité exprime la réduction de probabilité de défaillance qui résulte, pour un composant, de l'action de cette barrière. Il correspond à la probabilité que la barrière de sécurité assure, le moment venu, la fonction de sécurité à laquelle elle est dédiée. Les critères d'évaluation du niveau de confiance sont notamment (liste non exhaustive) :
  - la fiabilité : concept éprouvé, REX, testabilité,
  - la tolérance aux anomalies matérielles (redondances),
  - la complexité des tâches humaines à réaliser,
  - la facilité de diagnostic,
  - la maintenance/la formation/l'entraînement/tests/exercices,
  - la disponibilité des ressources (matériaux, matériel, personnel), etc.

## 10. Estimation du niveau de risque, attribution des risques

### Objectif

Quantifier le risque d'inondation par défaillance ou dépassement du système de protection.

L'estimation du niveau de risque d'inondation est calculée en tenant compte de la probabilité qu'un événement d'inondation se produise et des conséquences potentielles de cet événement. Cette étape produit en fait le résultat de l'analyse des risques.

### => **Risque = probabilité de l'aléa × gravité des conséquences**

- Un risque important résulte soit d'une forte probabilité d'inondation conduisant à des conséquences modestes, soit d'une probabilité faible conduisant à des conséquences très graves, soit d'une forte probabilité conduisant à de graves conséquences.
- Un risque faible résulte soit d'une très faible probabilité, soit de très faibles conséquences, soit d'une combinaison des deux.

Les digues fonctionnent ensemble au sein d'un système pour réduire le risque d'inondation. Cependant, tous les systèmes de protection laissent un risque d'inondation résiduel dans la zone protégée, par dépassement ou défaillance du système. En complément de l'estimation du risque, on peut attribuer à chaque élément du système la part du risque résiduel global, c'est ce que l'on dénomme l'« attribution du risque », qui permet d'identifier les composants du système prioritaires en matière de mise en œuvre de mesures de réduction du risque. L'attribution du risque peut également être réalisée du point de vue de la zone protégée, et représenter l'estimation du risque

d'inondation en tout point de la zone protégée (en intégrant les différents scénarios en fonction de leur probabilité). La Figure 4-11 donne un exemple de représentation pour l'attribution du risque.

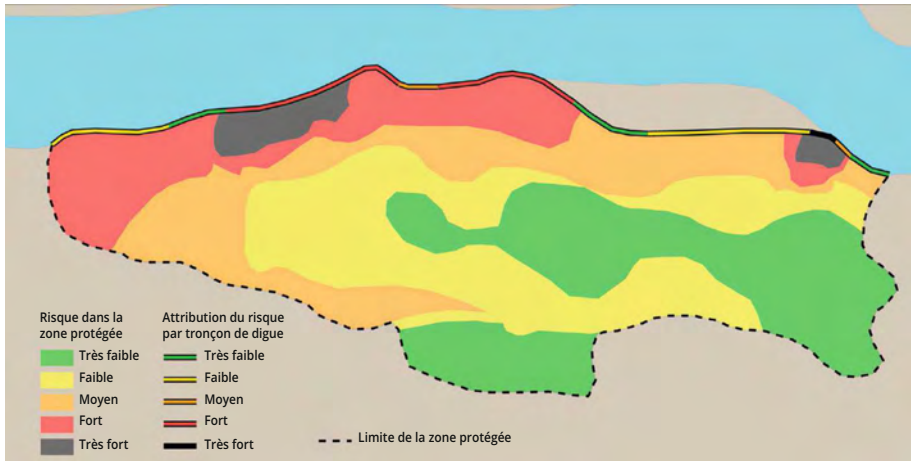


Figure 4-11. Exemple d'attribution du risque (Source : B. Beullac).

## 11. Évaluation des lacunes dans les connaissances

### Objectif

Identifier et évaluer les lacunes pouvant exister dans l'ensemble des connaissances utiles à la réalisation de l'analyse de risque et autant que possible traduire ces lacunes en termes d'incertitudes sur chaque donnée ou résultat de l'étude.

Les connaissances utiles correspondent à l'intégralité des méthodes utilisées pour mener les différentes phases précédemment décrites (paragraphe 4. à 10.) de l'analyse de risque et aux données d'entrée utiles à l'application de ces méthodes. Les méthodes peuvent être relatives à de nombreux systèmes de protection, les données sont en revanche spécifiques à chaque système.

Les lacunes et les incertitudes relatives aux connaissances sont répandues dans tous les types d'activités relatives à l'analyse de risque et à chacune de leurs sous-tâches. Il est important de reconnaître ces lacunes et incertitudes et de les répertorier.

L'analyse de risque va souvent être entreprise, bien qu'il y ait des lacunes dans les connaissances qui, si elles étaient comblées, pourraient influencer le résultat. Le processus d'analyse des risques doit a minima reconnaître et identifier au moins où il existe des lacunes dans les connaissances relatives aux données ou encore dans les méthodes d'analyse utilisées pour l'estimation du risque.

L'évaluation des lacunes consiste en la quantification ou qualification de leur impact sur l'incertitude des résultats de l'analyse de risque.

Elle se fait notamment en considérant :

- l'applicabilité des données disponibles (actualité, qualité, densité, etc.) ;
- la validité des dires d'experts ;



- l’incertitude des estimations ;
- les limites des méthodes utilisées, etc.

On pourra se reporter à la section 5.2.2 de l’ILH [9] pour des considérations plus détaillées sur cette évaluation des lacunes, et pour une proposition de cadre méthodologique d’évaluation.

## 12. Utilisation des résultats de l’analyse de risque

Deux étapes successives font suite à l’analyse de risque : l’évaluation du risque et la définition des mesures de réduction du risque. Ces deux étapes ne font pas partie intégrante de l’analyse de risque, dans le sens où le risque est connu dès la fin de la phase d’estimation du risque. En revanche, elles justifient la nécessité d’utilisation d’une analyse de risque pour constituer un outil d’aide à la décision performant pour la gestion des risques (*voir* Figure 4-1).

L’évaluation du risque peut, selon les cas, être effectuée à l’échelle des tronçons de digues ou des systèmes de protection, en fonction de l’échelle de l’analyse de risque (un seul ou de multiples systèmes de protection) et des objectifs de l’évaluation des risques (gestion des digues d’un système ou politique de gestion des inondations à plus grande échelle). L’évaluation du risque permet de déterminer si des mesures de réduction du risque sont souhaitables pour atteindre un niveau de risque acceptable ou même seulement tolérable.

### 12.1. Évaluation du risque

#### Objectif

Juger le résultat de l’estimation du niveau risque, en termes d’acceptabilité du risque.

L’évaluation du risque consiste en la hiérarchisation des scénarios d’inondation étudiés dans l’analyse de risque, en fonction de l’acceptabilité de leur niveau de risque (en termes de probabilité de réalisation et de gravité des conséquences). Ce travail est mené sur la base d’une grille (ou matrice) de criticité qui doit être préalablement définie.

La définition de la grille de criticité est directement liée aux objectifs des acteurs en charge de la gestion du territoire et de ses populations, en matière de prévention des inondations. Celle-ci a donc pour objectif de traduire l’acceptabilité du risque d’inondation, pour les types de vulnérabilité du territoire qui sont considérés dans l’analyse (*voir* paragraphe 8.). Elle peut difficilement résulter uniquement de l’appréciation du technicien en charge de la réalisation de l’analyse de risque. Il est souhaitable qu’une concertation associant tous types d’acteurs et de parties prenantes participe à la définition d’une grille communément acceptée dans un territoire donné, comme c’est le cas dans plusieurs pays étrangers.

Les enjeux pris en compte pour l’établissement des matrices de criticité sont généralement soit des personnes (inondées, mises en danger, etc.), soit des biens matériels (valeur monétaire des dommages). On pourrait aussi envisager une matrice de criticité reposant sur les résultats d’une analyse multicritères. Certains pays intègrent aux dommages monétaires le coût des vies humaines, ce qui n’est pas une pratique acceptée de nos jours en France.

La Figure 4-12 présente une grille de criticité utilisée dans le cadre de l'étude de dangers du Val-d'Orléans.

Criticité des scénarios	Probabilité annuelle des scénarios							
	0,01 %	0,1 %	0,2 %	0,5 %	1 %	10 %		
	très improbable	improbable	très peu probable	peu probable	moyennement probable	probable	très probable	
Gravité du scénario d'inondation	5. Dévastateur				risque intolérable			
	10.000				risque intolérable			
	4. Catastrophique				risque intolérable			
	1.000				risque intolérable			
	3. Important				risque intolérable			
100				risque intolérable				
2. Sérieux	risque acceptable			risque préoccupant ou tolérable sous conditions				
10	risque acceptable			risque préoccupant ou tolérable sous conditions				
1. Modéré	risque acceptable			risque préoccupant ou tolérable sous conditions				

**Figure 4-12.** Exemple de matrice de criticité (en ordonnée : nombre de personnes mises en danger) (Source : B. Beullac).

## 12.2. Mesures de réduction du risque

### Objectif

Définir des mesures envisageables pour réduire le niveau de risque d'inondation associé au système de protection, à ses limites et à ses risques de défaillance.

La réduction du risque jusqu'au niveau le plus bas raisonnable est la finalité réelle de la gestion des risques, fondée sur l'analyse des risques (*voir* Figure 4-1).

L'ensemble des mesures de réduction du risque envisageables sur un système après une analyse de risque peut être priorisé en fonction de l'évaluation du risque que représente chaque scénario d'inondation et/ou de l'attribution des risques aux différents composants du système.

Il peut également être effectué une deuxième estimation du niveau de risque avec la mise en place d'une ou plusieurs mesures de réduction du risque pour permettre d'estimer le gain en termes de risque apporté par une ou plusieurs mesures.

Différents types de mesures sont envisageables à l'échelle du système de protection (*voir Chapitre 7 : paragraphe 1.*) :

- réparations ;
- amélioration de la politique de gestion (entretien, surveillance, etc.) ;
- modifications du système de protection ;
- reconnaissances et diagnostics complémentaires.

Des mesures sont également envisageables dans les milieux eau et dans la zone protégée (*voir Chapitre 7 : paragraphes 2. et 3.*), le plus souvent portées par d'autres acteurs que le gestionnaire du système de protection.

## CHAPITRE 5

# Réalisation de l'analyse de risque de système de protection

### Remarque

L'analyse de risque des systèmes de protection contre les inondations est une activité interdisciplinaire requérant un niveau de compétence élevé dans chacune des disciplines qu'elle utilise, en plus de la maîtrise de la démarche d'ensemble. Il est donc essentiel de noter que chacun des aspects d'une analyse de risque de digues (hydrologie, hydraulique, géotechnique, génie civil, morphodynamique, étude des enjeux et de leur vulnérabilité, etc.) est affaire de spécialistes, un ou des spécialistes des ouvrages hydrauliques, et plus particulièrement des digues étant requis pour la conduite de l'ensemble de l'étude, celui ou ceux-ci devront par ailleurs être formés à cette relativement nouvelle discipline qu'est l'analyse de risque.

L'analyse de risque doit consister en une démarche *systematique* et *analytique* rigoureuse intégrant l'ensemble des aspects liés à l'ouvrage et à son environnement. Dans cette optique, la mise en application d'une analyse fonctionnelle bien structurée est un atout précieux pour définir l'ensemble des composantes internes et externes du système de protection étudié.

L'ensemble de ce [Chapitre 5](#) présente notre proposition de méthode de réalisation d'une analyse de risque de systèmes de protection contre les inondations ; cette méthodologie est entièrement fondée sur l'analyse fonctionnelle et l'analyse des modes de défaillance [46], pour lesquelles nous proposons également une méthodologie. Cette proposition de méthode repose sur les principes généraux présentés dans le [Chapitre 4](#), et détaille son application au domaine des systèmes de protection contre les inondations.

## 1. Fonctions et terminologie

### 1.1 Fonction, vocation et rôle des éléments d'un système de protection

Une fonction décrit les actions d'un produit ou de l'un de ses constituants, exprimées exclusivement en termes de finalité (NF X50-150). Cette notion s'intègre dans une démarche d'analyse fonctionnelle qui consiste à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions d'un système (Eurocode 1, Afnor, 1996).

En d'autres termes, il s'agit du rôle joué par un système ou un élément d'un système, du point de vue de l'analyse fonctionnelle que l'on mène.

Ce rôle peut dans certains cas diverger de sa **vocation** que nous définissons comme la ou les fonctions(s) traduisant la raison première de sa création ou de son exploitation. Par exemple, d'un point de vue strictement hydraulique, un remblai dont la vocation est le transport routier ou ferroviaire peut faire partie d'un système de protection et y jouer un rôle de protection contre les inondations (*voir Figures 2-68 et 2-95*).

La fonction du système, la protection contre les inondations, n'est donc pas nécessairement la vocation de tous les ouvrages ou autres éléments qui le composent.

## 1.2 Fonctions principales, fonctions contraintes, fonctions techniques et fonctions de sécurité

On distingue les fonctions principales, les fonctions contraintes, les fonctions techniques et les fonctions de sécurité (*voir Chapitre 9* pour plus de détails sur la méthode d'analyse fonctionnelle que nous proposons).

### 1.2.1. Fonctions principales

Les *fonctions principales* traduisent l'objet de l'action (le rôle) et/ou la vocation (*voir paragraphe 1.1.*) d'un système. Elles sont identifiées au cours de l'analyse fonctionnelle externe du système (*voir Chapitre 9 : paragraphe 1.1.*).

Par exemple, les fonctions principales d'un système de protection sont généralement :

- protéger contre les inondations avec un objectif de protection donné ;
- selon les cas, protéger de l'érosion les berges ou plages et, a minima, les ouvrages.

La fonction principale de protection contre les inondations est prépondérante dans le cadre de l'analyse de risque des systèmes de protection. En effet, ce type d'étude vise la caractérisation du risque d'inondation par défaillance du système de protection. Il est néanmoins difficile voire dangereux de ne pas étudier simultanément la seconde fonction lorsqu'elle est présente, ce qui est généralement le cas pour les digues proches de l'eau, compte tenu de l'importance des évolutions morphodynamiques pour la pérennité du système de protection, et compte tenu de l'interaction des phénomènes hydrauliques et morphodynamiques (*voir Chapitre 2 : paragraphe 2.*).

La nature des fonctions principales définit le cadre général dans lequel doit être mené l'ensemble de l'analyse de risque et plus particulièrement l'analyse fonctionnelle et l'analyse de la défaillance du système (*voir Chapitre 9*).

Il est à noter que dans certains cas (surtout en domaine maritime ou torrentiel), la fonction initiale d'un système de protection concerne la protection contre l'érosion plutôt que la protection contre les inondations.

### 1.2.2. Fonctions contraintes

Les fonctions contraintes correspondent aux réponses que doit apporter le système pour faire face aux contraintes qui lui sont imposées par son environnement, et ainsi permettre la réalisation de ses fonctions principales et garantir sa pérennité. Elles sont identifiées au cours de l'analyse fonctionnelle externe du système (*voir Chapitre 9 : paragraphe 1.1.*).

Ces contraintes sont principalement le reflet des interactions qui existent entre le système et ses milieux extérieurs : les actions imposées par les milieux physiques dans lesquels le système s'inscrit (actions hydrauliques, morphodynamique, animaux fouisseurs, activités humaines, etc.), les diverses réglementations auxquelles le système doit s'adapter,

le budget dont dispose le maître d'ouvrage, la nécessité de surveillance et d'entretien qui s'impose au système, etc.

- Des exemples de fonctions contraintes d'un système de protection sont notamment :
- être adapté aux actions imposées par les milieux extérieurs (actions hydrauliques, actions morphodynamiques, développement de la végétation, activités humaines, etc.) ;
  - satisfaire l'objectif de protection recherché ;
  - ne pas engendrer de suraccidents ;
  - permettre la surveillance et l'entretien des ouvrages et des berges ;
  - respecter les recommandations techniques en vigueur ;
  - respecter la réglementation ;
  - respecter les budgets prévus, etc.

La définition des fonctions contraintes permet d'identifier les problématiques à prendre en compte dans la conception et la gestion du système. Elles influent donc directement sur la nature des fonctions techniques et des fonctions de sécurité qui doivent être adoptées pour assurer la réalisation des fonctions principales du système.

### 1.2.3. Fonctions techniques

Les fonctions techniques (ou fonctions de conception) traduisent les objectifs techniques auxquels doivent répondre les composants du système pour réaliser les fonctions principales tout en prenant en compte les fonctions contraintes. Elles sont identifiées au cours de l'analyse fonctionnelle interne du système (*voir Chapitre 9 : paragraphe 1.2.*).

Il s'agit donc des fonctions qui garantissent le fonctionnement et la pérennité du système ou du composant considéré, en intégrant ses objectifs et les contraintes auxquelles il est soumis.

Des exemples de fonctions techniques de composants de système de protection sont notamment :

- empêcher l'entrée d'eau jusqu'à un niveau donné ;
- contrôler l'écoulement des eaux d'inondation ;
- évacuer les eaux d'inondation ;
- stocker les eaux d'inondation ;
- être stable ;
- résister à l'érosion externe ;
- être étanche ;
- résister à l'érosion par surverse ;
- résister à l'érosion interne, etc.

L'identification et la caractérisation des fonctions techniques constituent la base sur laquelle peuvent être menées l'analyse de la défaillance du système et l'identification de ses scénarios de défaillance (*voir Chapitre 9 : paragraphe 2.*), au travers de l'analyse de la défaillance de ses fonctions techniques.

### 1.2.4. Fonctions de sécurité

Les fonctions de sécurité traduisent les actions de sécurité qui permettent de **prévenir** (fonctions de sécurité de prévention) les défaillances des fonctions techniques des composants d'un système, en évitant qu'elles ne se produisent, ou de les **relayer** (fonctions de sécurité de relai), en y apportant des solutions de substitution.

Les fonctions de sécurité ne participent pas directement au fonctionnement normal du système ni à la réalisation de ses fonctions principales et fonctions techniques associées. Elles ont pour objectif de favoriser le bon fonctionnement du système et l'accomplissement de ses fonctions principales, en limitant ou corrigeant les dérives envisageables dans la réalisation des fonctions techniques des composants du système. Les



fonctions de sécurité sont assurées au travers de barrières de sécurité (*voir Chapitre 4 : paragraphe 9.2.*).

Une fonction de sécurité peut dans la majorité des cas (excepté pour les barrières de sécurité de type actives et passives [*voir Chapitre 4 : paragraphe 9.2.*], qui remplissent de manière automatique et directe leurs fonctions de sécurité en cas de défaillance de composants) être décomposée en trois *sous-fonctions de sécurité* qui s'articulent de manière chronologique dans l'exécution d'une fonction de sécurité :

- **détecter le dysfonctionnement** : identification de la dégradation/défaillance d'une fonction technique ou l'identification d'une situation connue comme une cause potentielle de défaillance. Cette phase peut être réalisée par des opérateurs seuls (par exemple, inspection, surveillance, etc.), par des opérateurs assistés d'instruments de mesure (par exemple, lecture de mesures de hauteurs d'eau, de température, de déformations, etc.), ou par des instruments de mesure autonomes reliés à des automates (par exemple, mesure et transmission automatique de hauteurs d'eau, de déformations, etc.) ;
- **traiter l'information** : analyse de l'information obtenue lors de la phase de détection des dysfonctionnements et décision pour définir des mesures correctives pour prévenir et/ou relayer les défaillances possibles. Cette phase peut être réalisée par analyse humaine et prise de décision (par exemple, diagnostic de la performance d'une digue et définition des confortements nécessaires) ou par des systèmes automatisés, programmés pour analyser des informations et prendre des décisions prédéfinies (par exemple, automatiquement ordonner l'ouverture d'une vanne au-delà d'un niveau d'eau mesuré prédéfini) ;
- **exécuter l'action de sécurité** : exécution d'une action corrective, définie lors de la phase de traitement de l'information, pour prévenir et/ou relayer une défaillance. Cette phase finale de la mise en œuvre d'une fonction de sécurité peut être réalisée par des hommes seuls (par exemple, réparations, travaux, entretien, etc.), par des opérateurs utilisant des éléments techniques de sécurité (par exemple, un opérateur qui ouvre ou ferme une vanne) ou par des éléments techniques de sécurité autonomes (par exemple, ouverture ou fermeture automatique d'une vanne).

Les barrières de sécurité existantes et leurs fonctions de sécurité associées sont identifiées au cours de l'analyse fonctionnelle interne du système (*voir Chapitre 9 : paragraphe 1.2.*). Elles viennent compléter l'analyse de la défaillance du système, par leur intégration au sein des scénarios de défaillance (*voir Chapitre 9 : paragraphe 2.*).

## 2. Proposition d'une méthode de réalisation de l'analyse de risque des systèmes de protection

### 2.1 Décomposition fonctionnelle et niveaux d'analyse

Nous proposons de réaliser l'analyse fonctionnelle des systèmes de protection contre les inondations à trois granularités d'analyse (ou résolutions d'analyse) différentes [17]. La granularité 1, la plus grossière, correspond à la plus faible résolution d'analyse du système (la plus globale). Ainsi, chaque granularité d'analyse de résolution supérieure décompose les objets analysés à la granularité de résolution inférieure.

Les trois granularités d'analyse que nous proposons sont les suivantes :

- **granularité 1** : le système de protection dans son ensemble et ses fonctions principales (la protection contre les inondations, le contrôle de la morphodynamique, etc.) et

- fonctions contraintes (résister aux actions imposées par l'environnement, permettre l'entretien, respecter la réglementation, etc.) qui résultent de ses interactions avec les milieux extérieurs eau, zone protégée et éventuellement autres (souterrain, atmosphérique, etc.) ;
- **granularité 2** : les sous-systèmes hydrauliques qui composent le système de protection (digues, déversoirs, batardeaux, zones de stockage de l'eau d'inondation, organes de vidange, pompes, etc.) et leurs fonctions techniques hydrauliques (empêcher l'entrée d'eau dans la zone située en arrière du sous-système jusqu'au niveau de crête, permettre un écoulement d'eau ponctuel d'un côté à l'autre d'un sous-système linéaire, etc.) ;
  - **granularité 3** : les composants structurels qui composent les sous-systèmes hydrauliques du système de protection et leurs fonctions techniques structurelles. Notamment, les tronçons homogènes de sous-systèmes hydrauliques linéaires (du type digues, déversoirs, etc.) peuvent être décomposés en **sections en travers** du point de vue de leurs **composants structurels** (organes d'étanchéité, organes de protection contre l'érosion, corps de digue, filtres, drains, recharges, type de fondation, etc.) dont sont déterminées les **fonctions techniques structurelles** (étanchéité, drainage, stabilité, filtration, protection contre l'érosion externe, etc.) pour chaque section en travers identifiée. Pour les autres types de sous-systèmes hydrauliques tels que les sous-systèmes électromécaniques (pompes, ouvrages vannés, etc.), l'analyse de granularité 3 s'intéresserait aux composants ou groupes de composants formant ces organes. De plus, des décompositions de granularités supérieures à 3 pourraient s'avérer nécessaires pour modéliser de manière satisfaisante le fonctionnement de tels organes.

La **défaillance** est définie comme l'incapacité d'atteindre un seuil de performance relatif à une fonction donnée. Elle peut concerner tout le système de protection, ou ses sous-systèmes ou les composants de ces derniers.

Sur un système de protection bien conçu et en bon état, le bon fonctionnement structurel des sous-systèmes (absence de défaillance structurelle de leurs composants) permet leur bon fonctionnement hydraulique (absence de défaillance hydraulique des sous-systèmes), sous réserve d'absence d'autres causes de défaillance (modification de l'environnement, défaut de conception, ou défaillance opérationnelle) (Figure 5-1). En complément de cet état structurel performant, la surveillance régulière (y compris pendant et après les événements de sollicitation), associée à une pratique opératoire performante, contribue à l'absence de défaillance hydraulique. In fine, comme le représente la Figure 5-2, l'absence de défaillances hydrauliques et structurelles permet le bon fonctionnement du système de protection (absence de défaillance du système de protection), c'est-à-dire la réalisation de l'ensemble de ses fonctions contraintes et de ses fonctions principales.

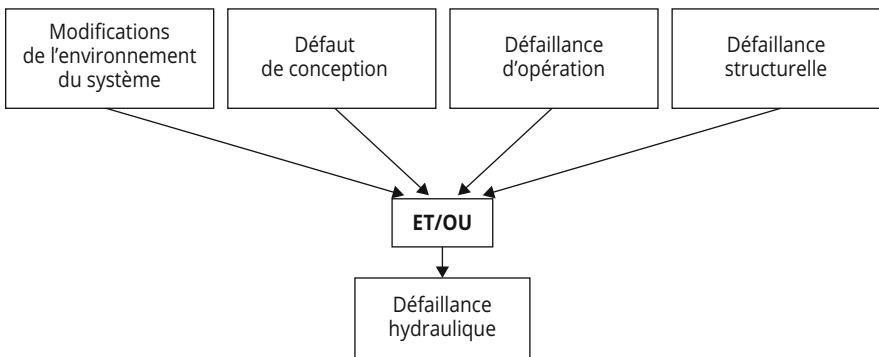
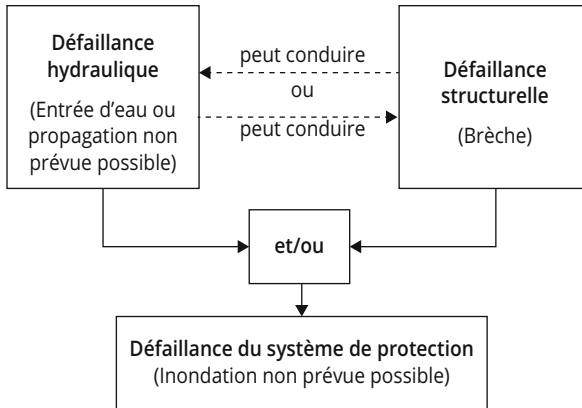


Figure 5-1. Causes pouvant conduire à des défaillances hydrauliques de sous-systèmes (D'après [9]).



**Figure 5-2.** Défaillances hydrauliques et structurelles, deux situations indépendantes ou liées pouvant causer la défaillance d'un système de protection (D'après [9]).

Notre proposition de méthode pour l'analyse fonctionnelle et l'analyse des modes de défaillance est détaillée au [Chapitre 9](#).

## 2.2 Études élémentaires de réalisation de l'analyse de risque

L'analyse de risque et les besoins en données peuvent être décomposés en différentes études élémentaires ([Figure 5-3](#)), correspondant à des étapes individualisées, pouvant chacune faire l'objet d'une analyse spécifique et d'un rapport d'étape.

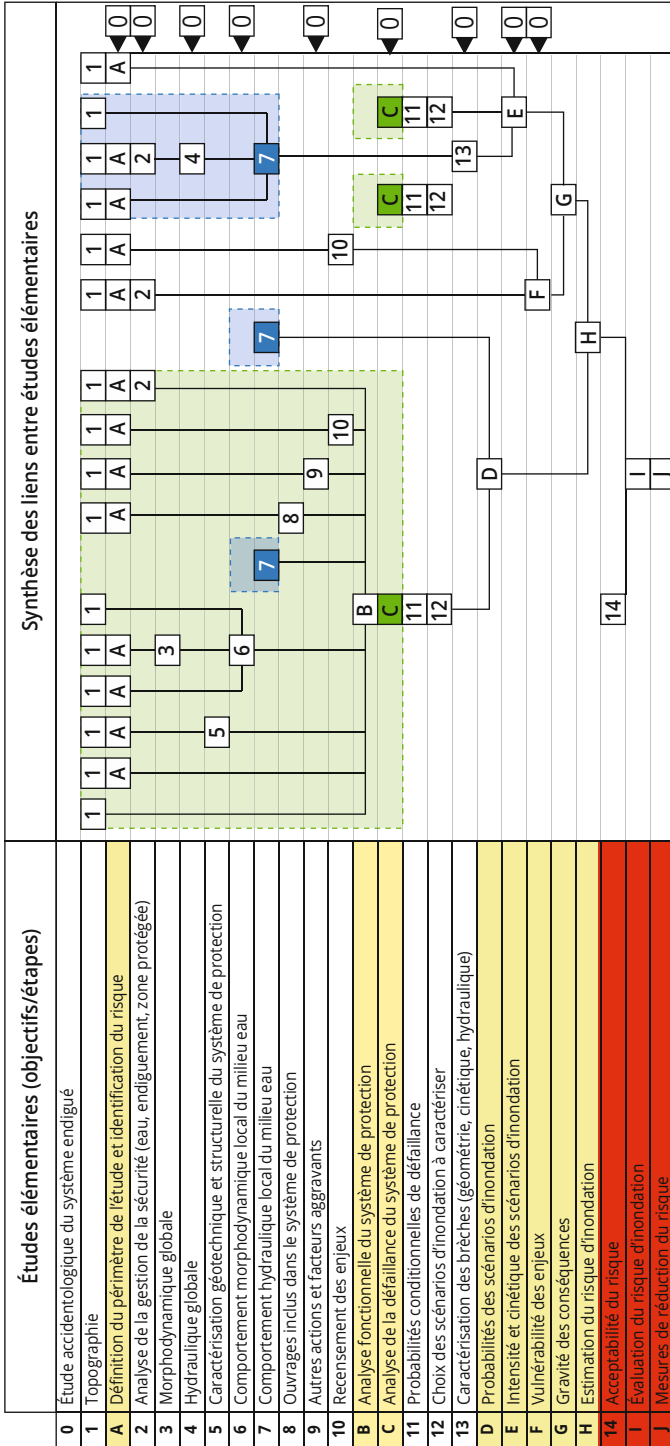
On remarque différents types d'études élémentaires à la lecture de ce diagramme. Elles sont désignées par les lettres A à J et les chiffres 1 à 14 :

- les études identifiées par des lettres de A à J correspondent aux étapes incontournables de la méthode générale exposée dans le [Chapitre 4](#). Les études A à H constituent l'analyse de risque proprement dite, alors que les études I et J traitent de l'utilisation des résultats de cette dernière (*voir* [Chapitre 4 : paragraphe 12.](#), et [Chapitres 6 et 7](#)) ;
- les études numérotées de 1 à 14 définissent les différents types de données (à recueillir ou à produire spécifiquement) nécessaires à la réalisation de ces études. Il s'agit pour la plupart d'études qui pourraient être produites indépendamment d'un processus de réalisation d'une analyse de risque. Les études 1 à 13 alimentent l'analyse de risque proprement dite, alors que l'étude 14 constitue une phase ultérieure, utilisant les résultats de cette dernière.

Dans la [Figure 5-3](#), la couleur rouge est relative à non pas l'analyse de risque stricto sensu mais à son utilisation. Le vert surligne tout ce qui alimente l'importante étape d'analyse de la défaillance. Le bleu surligne tout ce qui permet la caractérisation du comportement hydraulique local du milieu eau.

D'un point de vue de proposition de méthodologie, deux types d'études élémentaires peuvent être identifiés :

- des études pour lesquelles nous apportons dans ce guide une certaine plus-value en termes méthodologiques ou de définition précise des objectifs dans le cadre de ce guide ;



**Figure 5-3.** Décomposition de l'analyse de risque en études élémentaires (Source : B. Beullac).  
 En blanc : les données d'entrée nécessaires ; en jaune : les étapes de l'analyse de risque ; en rouge : l'utilisation des résultats de l'analyse de risque.

- des études pour lesquelles une ou plusieurs méthodologies existent préalablement à l'écriture de ce guide et sont satisfaisantes (bien que pouvant être néanmoins toujours améliorées pour l'utilisation dans une analyse de risque, *voir Chapitre 4 : paragraphe 11*).

Le [paragraphe 3](#) présente chacune de ces études élémentaires en termes :

- d'objectifs ;
- d'interactions avec les autres études élémentaires ;
- et de flux de données et de résultats en entrée et en sortie de chacune d'elles.

L'Annexe 1 présente une description plus détaillée, pour chaque étude élémentaire, de la nature des interactions entre études élémentaires et des flux de données et de résultats en entrée et en sortie de chacune d'elles.

Les interactions entre études élémentaires comprennent des échanges de données, parfois simples (le résultat d'une étude est utilisé en entrée d'une autre), parfois plus complexes (nécessité d'une réelle interaction lors de la réalisation des deux études) ; elles sont symbolisées dans les diagrammes correspondants par des flèches simples dans le premier cas ou doubles dans le second.

Les méthodes proposées ou citées en référence pour la réalisation d'une étude élémentaire ne prétendent pas à l'exhaustivité, en particulier lorsqu'il existe des méthodes spécifiques à tel ou tel type de milieu. Le but du présent guide est de décrire la méthode intégratrice et, pas dans le détail, chaque méthode relative à une étude élémentaire. Par ailleurs, certaines études peuvent être réalisées à l'aide de méthodes « classiques » (par exemple, hydrologie et hydraulique) existantes, bien que pouvant être perfectionnées, alors que d'autres études élémentaires ne bénéficient d'aucune méthode de référence à ce jour. Dans tous les cas, il sera intéressant d'effectuer une recherche bibliographique actualisée à la date de réalisation de l'étude d'analyse de risque, car des actions de recherche ou de développement méthodologique dans le domaine sont nombreuses et des méthodes sont proposées dans de nombreuses publications, telles que des communications à des colloques ou congrès et dans des revues scientifiques ou techniques.

### 3. Description des études élémentaires de réalisation de l'analyse de risque des systèmes de protection

Les études élémentaires proposées sont présentées ci-dessous dans l'ordre indiqué dans la [Figure 5-3](#).

#### 3.1. Étude 0 – Accidentologie

Cette étude (*voir Chapitre 4 : paragraphe 3*) consiste en l'analyse des retours d'expérience relatifs au système de protection sujet de l'analyse de risque, à sa zone protégée et aux milieux eau pouvant l'impacter, ainsi qu'à des systèmes endigués similaires. Les événements à analyser sont les événements d'inondation de la zone protégée (y compris les événements anciens pendant lesquels le système de protection n'existait pas ou était

différent de sa configuration actuelle), les événements naturels n'ayant pas donné lieu à inondation, mais ayant mis le système de protection à l'épreuve, ainsi que tout accident ou presque accident sur le système de protection.

Cette étude a pour objectif de produire une première analyse des composantes du risque d'inondation lié au système de protection, au vu de l'analyse (et pas seulement d'une description) des événements passés et des retours d'expériences sur :

- les actions (du milieu eau principalement, mais pas uniquement) et les facteurs aggravants envisageables (embâcles, débâcles, phénomènes morphodynamiques, actions diverses) sur les ouvrages ;
- les types de défaillances possibles du système de protection ;
- les caractéristiques des brèches historiques et autres désordres ayant affecté le système ;
- les caractéristiques hydrauliques des inondations et leurs conséquences possibles dans la zone protégée ;
- l'efficacité des systèmes de gestion de la sécurité pour le système de protection, la zone protégée et les milieux eau ;
- etc. (tout autre facteur de risque).

Le recueil de données de toute nature doit être le plus exhaustif possible car ces données, même entachées d'incertitude, pourront servir au calage de modèles, à des analyses expertes ou à des validations dans d'autres études élémentaires (*voir* entre autres celles figurant sur la [Figure 5-5](#)). Le recours à des recherches historiques ([Figure 5-4](#)) peut s'avérer très utile pour enrichir le recueil de données (*voir* [Chapitre 8 : paragraphe 2.4.](#)). Bien entendu, les événements importants pour la sûreté hydraulique (EISH) déclarés sur le système étudié ou sur des systèmes équivalents (en matière d'ouvrages et de milieu extérieur eau) doivent également alimenter l'étude accidentologique. Depuis



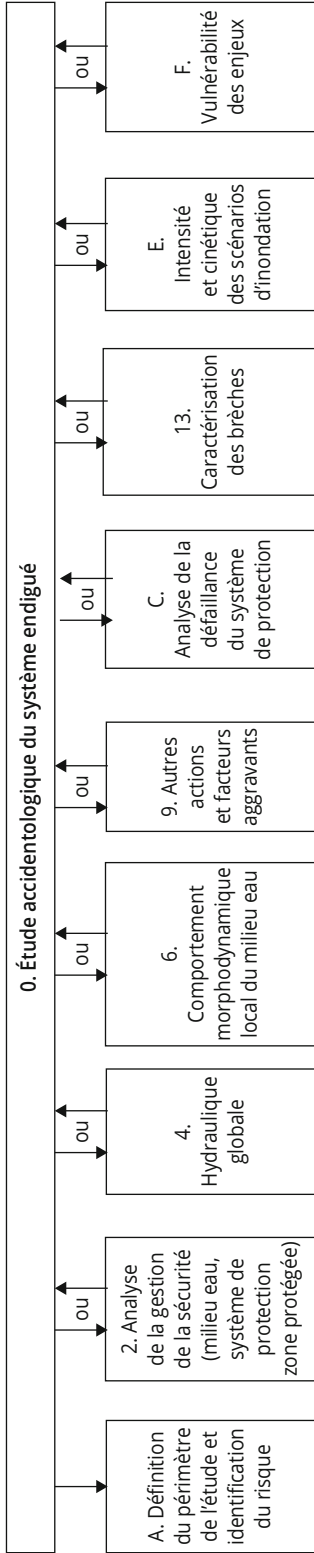
L. Goussier et J. L. L.

L. Goussier et J. L. L.

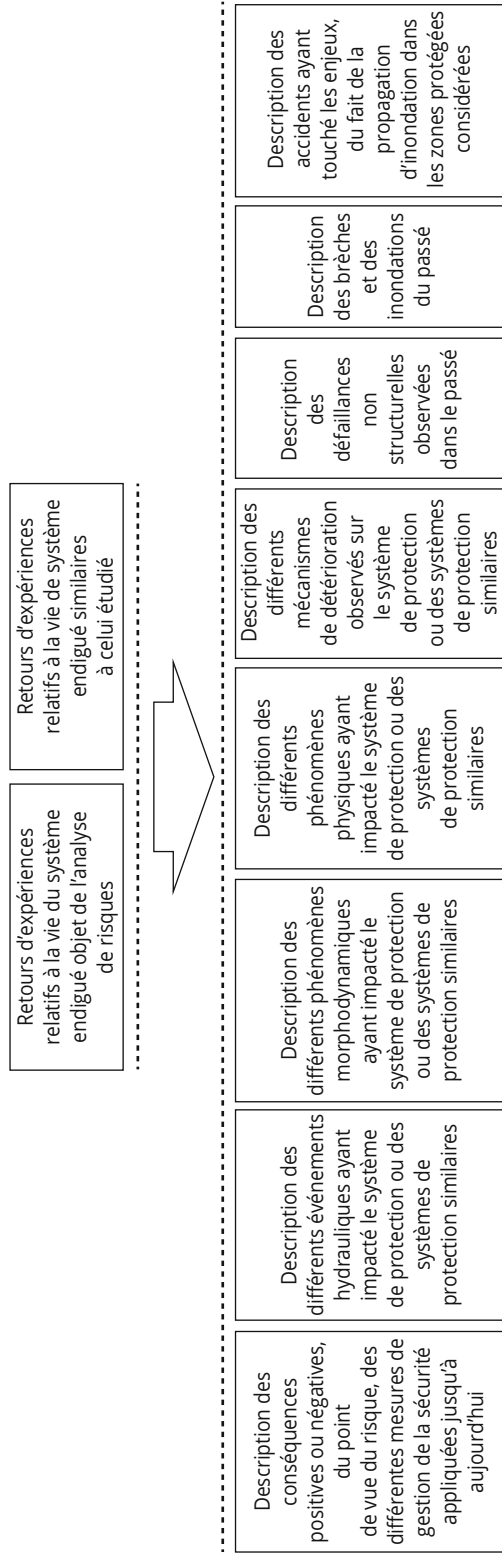
LA CHAPELLE-BLANCHE  
Rupture de la levée. 4 Juin 1856.

**Figure 5-4.** Rupture de la levée à la Chapelle-Blanche le 4 juin 1856, sur le système de protection du Val d'Authion (Source : B. Beullac).





**Figure 5-5.** Liens entre l'étude 0 et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque. Les « ou » sont explicités par le choix entre deux méthodes différentes pour la réalisation de l'étude accidentologique (voir fiches correspondantes).



**Figure 5-6.** Flux de données pour l'étude élémentaire 0 (Source : B. Beullac).

janvier 2010, les informations recueillies sur les événements relatifs aux barrages et en premier lieu les EISH viennent alimenter la base de données ARIA (analyse, recherche et information sur les accidents), gérée par le ministère en charge de l'environnement ([www.aria.developpement-durable.gouv.fr](http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr)). À terme, les EISH concernant les digues doivent également alimenter cette base de données.

Les résultats de cette étude devraient être capitalisés sous la forme d'une base de données alimentée et tenue à jour par le gestionnaire du système de protection. Celle-ci permettrait de faciliter la réalisation des futures analyses de risque et autres diagnostics du système endigué.

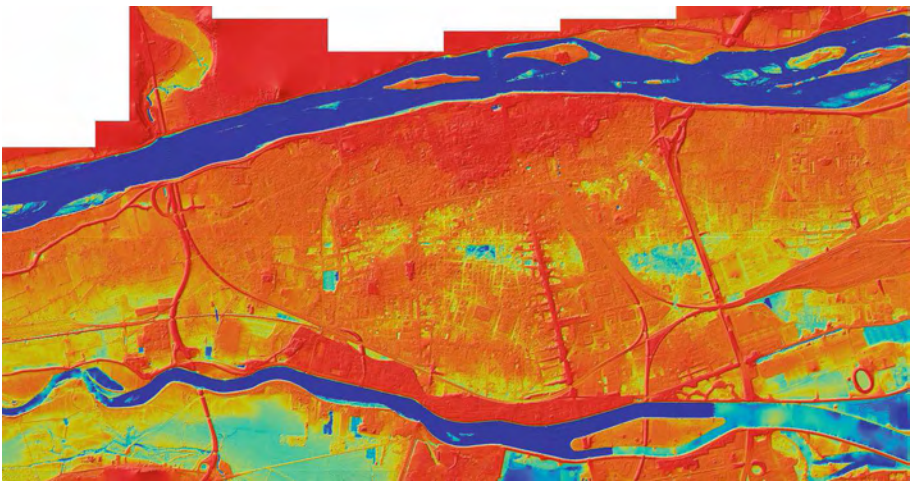
Comme déjà évoqué précédemment, il serait par ailleurs souhaitable qu'une base de données nationale, voire internationale, permette de capitaliser l'ensemble des retours d'expériences sur de nombreux systèmes de manière à pouvoir (peut-être de manière plus synthétique) bénéficier d'un large retour d'expérience sur les facteurs de risque génériques en fonction de la typologie des ouvrages et des systèmes.

La [Figure 5-5](#) décrit les liens existant entre l'étude 0 et les autres études élémentaires de la méthode et la [Figure 5-6](#) détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude 0 et la teneur des résultats qui en découlent.

### 3.2 Étude 1 – Topographie et bathymétrie

L'étude de la topographie doit satisfaire les objectifs suivants :

- connaître la topographie (coordonnées planimétriques et altimétriques de points) du terrain naturel terrestre et subaquatique (bathymétrie), comprenant les ouvrages de protection ainsi que des ouvrages inclus, dans le périmètre présupposé puis établi de l'étude ;
- représenter graphiquement l'information topographique recueillie, sous les différentes formes (MNT, MNE, profils en travers, profils en long, plans cotés) utiles à la réalisation des différentes études élémentaires de la méthodologie (*voir* [Figure 5-8](#)). La [Figure 5-7](#) donne un exemple de représentation, sous forme de MNT, de la topo-



**Figure 5-7.** MNT de la partie centrale du Val-de-Tours issu du levé Lidar des Vals-de-Loire, moyenne réalisée en 2002 (Source : DREAL Centre – Val-de-Loire).

Les cotes les plus élevées sont représentées en rouge, les cotes les plus basses en bleu foncé. Sont ainsi distingués en rouge vif les digues et autres ouvrages linéaires en élévation ainsi que les zones de tertres.

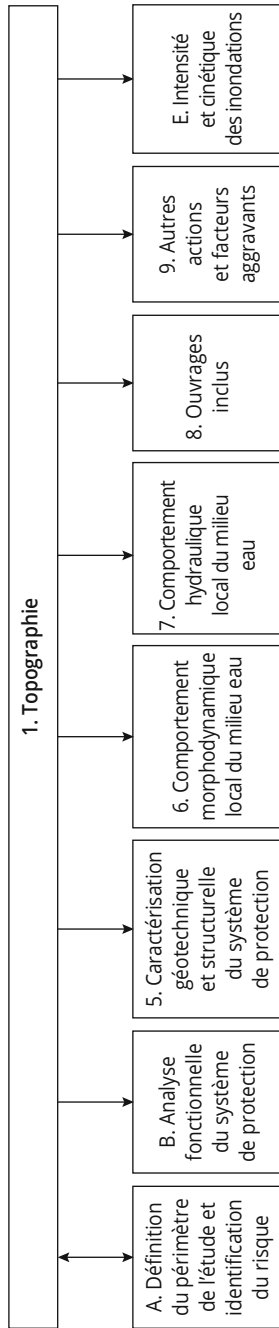


Figure 5-8. Liens entre l'étude 1 et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).

graphie (levée par Lidar) de la partie centrale du Val-de-Tours. Cette représentation permet notamment de distinguer les différents ouvrages et les zones en élévation comprises dans la zone d'étude.

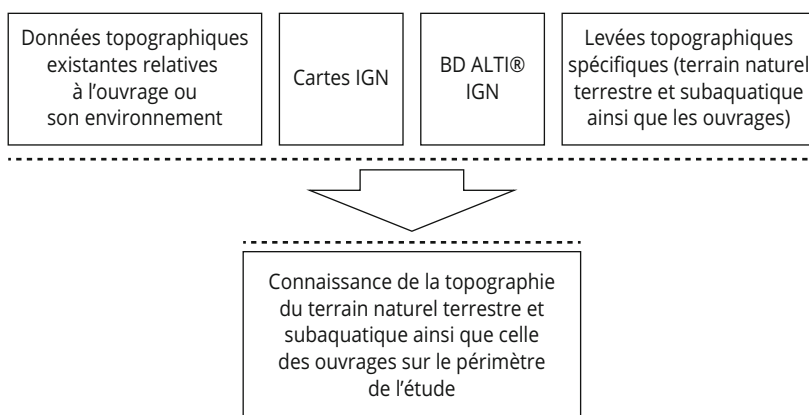
Selon la nature des données et études antérieures mises à disposition du responsable de l'étude par le responsable (ou gestionnaire) du système, ce dernier devra veiller à ce que les données topographiques permettent notamment :

- de produire 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 ;
- de produire les profils en long des pieds de digues afin de les comparer avec les lignes d'eau et d'évaluer la charge hydraulique ;
- de produire les profils en travers utiles pour apprécier les aléas géotechniques : calcul de stabilité, d'érosion interne ;
- d'établir un plan de la digue à une échelle permettant le report des observations visuelles et des ouvrages englobés dans le corps de digue ou ses fondations ;
- de produire des coupes représentant les singularités : traversée hydraulique, batardeau, pont, etc. ;
- de réaliser des études hydrauliques en vue de définir les actions hydrauliques caractéristiques au contact de l'endiguement ainsi que la caractérisation de l'intensité et de la cinétique des inondations dans la zone protégée ;
- de réaliser des études morphodynamiques en vue d'apprécier les tendances d'évolution morphologique du milieu eau en profil en long et en plan ;
- d'identifier et caractériser les éventuels facteurs aggravant les potentiels de risque comme la végétation, les sources d'embâcles et les activités à proximité de l'endiguement.

La précision altimétrique et la résolution planimétrique des résultats peuvent être très variables en fonction des méthodes utilisées et des moyens investis. L'utilisation à laquelle est destinée la donnée topographique conditionne la précision et la résolution des résultats à rechercher pour les différentes zones du périmètre de l'étude (milieu eau, système de protection, zone protégée).

Il est souvent nécessaire d'utiliser plusieurs documents ou méthodes de levé topographique pour traiter chacune des différentes zones du périmètre de l'étude à caractériser en termes de topographie.

La [Figure 5-8](#) décrit les liens existant entre l'étude 1 et les autres études élémentaires de la méthode et la [Figure 5-9](#) détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude 1 et la teneur des résultats qui en découlent.



**Figure 5-9.** Flux de données pour l'étude élémentaire 1 (Source : B. Beullac).

### 3.3. Étude A – Définition du périmètre de l'étude et identification du risque

#### 3.3.1. Définition du périmètre de l'étude

Le périmètre de l'étude d'analyse de risque est défini de manière experte sur la base des données disponibles, et en particulier sur une analyse de la topographie des ouvrages et de la zone protégée. Les résultats de l'analyse de risque (les différents scénarios d'inondation envisageables et les modélisations hydrauliques des écoulements dans la zone protégée et le milieu eau) doivent confirmer ultérieurement que le périmètre était correctement identifié.

Le périmètre de l'étude correspond à l'enveloppe contenant (*voir Chapitre 2, paragraphe 1.*) :

- le système de protection étudié,
- sa zone protégée,
- et le(s) milieu(x) eau qui les borde(nt).

Ces trois entités géographiques doivent avant tout traduire une cohérence sur le plan du fonctionnement hydraulique (du milieu eau et de la zone protégée) (*voir Figure 2-4*) et hydro-sédimentaire (du milieu eau et du système de protection).

Leur détermination repose principalement sur la donnée topographique (puisque celle-ci conditionne en grande partie la protection pour les ouvrages et les écoulements pour leur environnement) et de la nature des écoulements envisageables.

Certaines études élémentaires (morphodynamique globale, hydraulique globale, identification du risque) débordent largement ce cadre strict.

Concernant le système de protection, cette étude élémentaire doit identifier et valider :

- la ligne de défense (protection) principale : le linéaire de protection (ouvrages ou éléments naturels) de référence pour le gestionnaire du système de protection et/ou du point de vue de la protection de la zone protégée ;
- les éléments de protection secondaire : linéaires d'ouvrages, zones et autres éléments naturels, situés côté zone protégée, assurant une protection contre les inondations en complément de l'action de la ligne de défense principale, ou influençant la propagation des inondations dans la zone protégée ;
- les éléments de protection indirecte : ouvrages et autres éléments naturels, situés côté eau, ayant pour effet de diminuer les actions sur les linéaires de protection.

##### 3.3.1.1. Système de protection

Il correspond à l'ensemble d'ouvrages et autres éléments ayant pour but (ou effet) de protéger un territoire naturellement inondable contre les inondations issues d'une ou plusieurs étendue d'eau, en diminuant l'aléa d'inondation en matière de probabilité, d'intensité, de durée ou de temps d'arrivée.

Ces éléments sont identifiés au travers de l'analyse de la topographie du terrain naturel environnant et des écoulements d'eau qu'elle contraint.

L'étude du fonctionnement hydraulique de la zone protégée permet de valider le périmètre du système de protection. Par exemple, vérifier la transparence des remblais et autres ouvrages présents dans la zone protégée permet d'identifier leur influence sur les écoulements et donc de leur attribuer ou non un rôle de protection secondaire (*voir Chapitre 2 : paragraphe 4.2.*).

De même, l'étude des écoulements côté eau permet de valider les limites du système de protection en identifiant notamment les éventuels phénomènes de contournement.

### 3.3.1.2. Zone protégée

La zone protégée correspond à la zone du territoire naturellement inondable (par une ou plusieurs « étendues » d'eau : mer, fleuves, rivières, torrents, lacs, etc.), qui se trouve protégée contre les inondations (*voir* Chapitre 2 : paragraphe 1.) par un système de protection contre les inondations, jusqu'aux différents niveaux de protection (*voir* Chapitre 3 : paragraphe 3.1.) qui caractérisent ce système.

Le périmètre de la zone protégée est délimité par le système de protection du côté du milieu eau et par la morphologie du terrain naturel situé en arrière du linéaire de digue (*voir* Chapitre 2 : paragraphe 1.).

Pour un système de protection mal connu sur lequel les niveaux de sûreté et de protection ne sont pas encore déterminés, la méthode de projection du niveau de crête du système de protection sur le terrain naturel en arrière de ce dernier est une première approche [21, 22] simpliste permettant de déterminer l'étendue de la zone protégée. Cette méthode trouve toutefois rapidement ses limites dans des contextes spécifiques tels que par exemple :

- les côtes à faibles reliefs soumis aux marées, ceux-ci nécessitant plutôt une étude particulièrement complexe des volumes entrants ou une analyse de retours d'expériences historiques ;
- les situations où le niveau de protection est inférieur à celui de la crête. Dans ce cas, la méthode permettra plutôt de déterminer la zone qui se trouve impactée par le système de protection.

Dans la majorité des cas, une étude de modélisation du fonctionnement hydraulique de la zone protégée peut permettre de valider le périmètre de la zone protégée.

### 3.3.1.3. Milieux eau

Ils doivent être suffisamment étendus pour permettre la plus juste caractérisation de leurs comportements hydraulique et morphodynamique et de leurs implications en termes d'actions sur le système de protection étudié.

La définition de ce périmètre repose sur des paramètres qui influencent les déplacements de l'eau au sein des étendues d'eau :

- morphologiques : les formes et reliefs (écoulements fluviaux, écoulements torrentiels, houle, vagues, etc.) ;
- climatiques : les précipitations, le vent ;
- sismiques : les séismes peuvent provoquer des tsunamis ;
- gravitaires : les mouvements de terrain (qui peuvent notamment provoquer des vagues), etc.

La Figure 5-10 donne l'exemple du périmètre retenu dans le cadre de la première étude de dangers du Val-d'Orléans. La ligne de défense principale et les ouvrages secondaires forment le système de protection.

Les éventuels autres systèmes endigués présents dans l'environnement proche du système de protection (*voir* un exemple en Figure 2-7) font partie intégrante des milieux eau, notamment les éventuels systèmes de protection sur la rive opposée d'un cours d'eau.

Les limites des différentes composantes du périmètre de l'étude doivent ensuite être vérifiées, et validées, sur la base des informations disponibles (retours d'expériences d'événements d'inondation, modélisations hydrauliques, etc.)



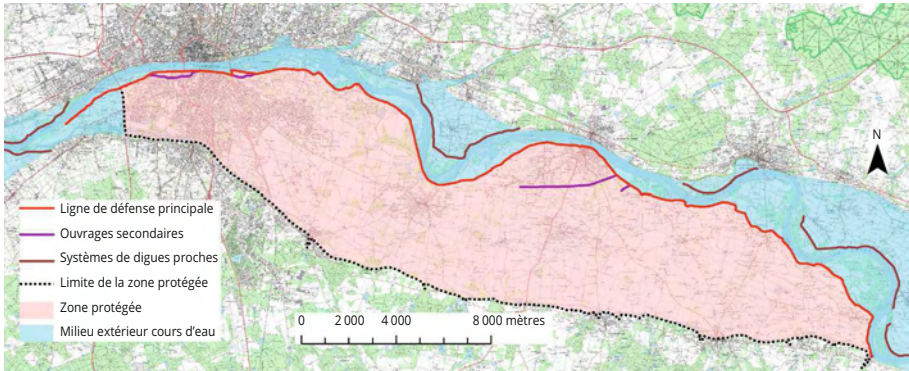


Figure 5-10. Périmètre de l'étude de dangers du Val-d'Orléans (Source : DREAL Centre - Val-de-Loire).

### 3.3.2. Identification du risque

L'identification du risque consiste en une description **qualitative** de toutes les composantes matérielles et organisationnelles du périmètre de l'étude qui influent sur le risque d'inondation par défaillance du système de protection.

Ces composantes sont notamment :

- les caractéristiques des ouvrages formant le système de protection ;
- le milieu eau source des actions sur le système de protection et ses spécificités ;
- les mesures de contrôle de la sécurité, relatives aux actions issues du milieu eau (météo, alerte, etc.), la sûreté du système de protection (surveillance, entretien, travaux et actions de prévention/protection en crise), la vulnérabilité des enjeux (alerte, évacuation des populations, protection des biens, etc.), l'identification de leurs rôles vis-à-vis de la protection contre les inondations et/ou le fonctionnement hydraulique du système endigué, et la définition de leurs implications en cas de défaillance ;
- les ouvrages inclus présents, à vocation hydraulique (de transparence, de vidange, etc.), constituant des facteurs aggravants pour le système de protection (canalisations, bâtiments, etc.), l'identification de leurs rôles vis-à-vis de la protection contre les inondations et/ou le fonctionnement hydraulique du système endigué, et la définition de leurs implications en cas de défaillance ;
- les autres facteurs aggravants et actions envisageables sur les ouvrages (végétation, animaux fouisseurs, séismes, karsts, précipitations, facteurs externes d'accidents, etc.) ;
- les types d'enjeux présents dans la zone protégée (populations, logements, entreprises, agriculture, réseaux, bâtiment ou équipement public, patrimoine, milieu naturel, etc.) et la description de leur vulnérabilité aux inondations.

L'identification du risque vise donc à déterminer la nature des études élémentaires qui devront être menées dans la suite de l'analyse de risque et les compléments spécifiques que ces dernières devront comporter. Ces études auront alors pour objectif de caractériser de manière **quantitative** (ou semi-quantitative) les phénomènes et autres éléments prenant place dans le périmètre de l'étude.

L'identification du risque repose en grande partie sur les résultats de l'étude accidentologique et sur une analyse du système.

La Figure 5-11 décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la Figure 5-12 détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.

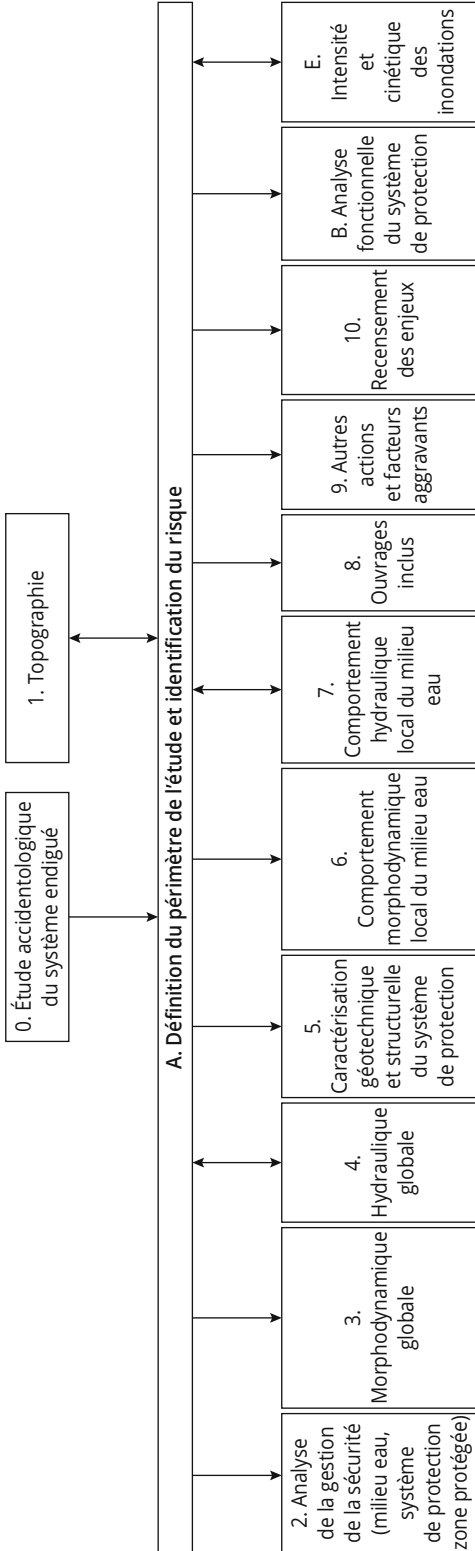


Figure 5-11. Liens entre l'étude A et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullaç).

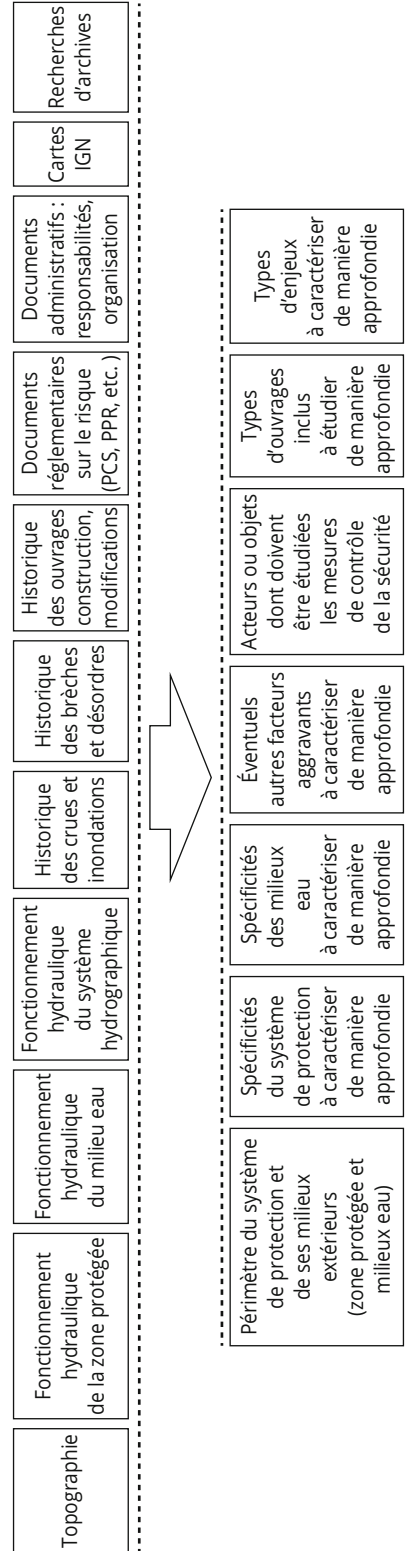


Figure 5-12. Flux de données pour l'étude élémentaire A (Source : B. Beullaç).

### 3.3.3. Spécificités liées au milieu torrentiel

#### 3.3.3.1. Identification du périmètre de l'étude

##### *Système de protection*

Les ouvrages associés (seuils, sabot parafouille, etc.) doivent être inclus dans le système de protection car ils sont indispensables à la pérennité de ce dernier.

##### *Zone protégée*

Lorsque les deux rives sont endiguées, la zone protégée couvre alors l'ensemble du cône de déjection. Si une seule des deux rives est protégée par un endiguement, la zone protégée est limitée à la partie du cône à l'arrière de l'ouvrage (Figure 5-13).

La situation des endiguements discontinus est à analyser avec plus d'attention, car cela peut amener à morceler le cône en plusieurs sous-zones protégées non jointives.

D'une manière générale, la délimitation des zones protégées est plus simple que dans un contexte fluvial ou maritime. On peut tout de même rencontrer des configurations où sa délimitation sera plus délicate et où les écoulements débordants en bordure du cône pourraient suivre le pied de versant sur une grande distance (cela reste toutefois relatif par rapport au contexte fluvial).

Certaines configurations particulières peuvent influencer sur la délimitation des zones protégées :

- si le lit du torrent s'est profondément incisé sur son cône, certaines parties du cône « géologique » ne peuvent plus être atteintes par les écoulements, même en cas de changement de lit et/ou de défaillance du système de protection. Il s'agit par exemple de terrasses plus hautes qui sont maintenant « insubmersibles ». Un risque de débordement dès l'apex du cône « géologique » doit alors pouvoir être écarté même en cas de formation d'un embâcle par des flottants ;
- la rive opposée de la vallée alluviale (de la rivière principale) pourrait, dans certains cas extrêmes, être considérée comme faisant partie de la zone protégée, si la défaillance du système de protection permet un changement de lit et si les écoulements empruntant ce nouveau lit peuvent impacter la rive opposée (cas par exemple d'une lave torrentielle qui viendrait obstruer la rivière principale avec des conséquences sur la rive opposée).

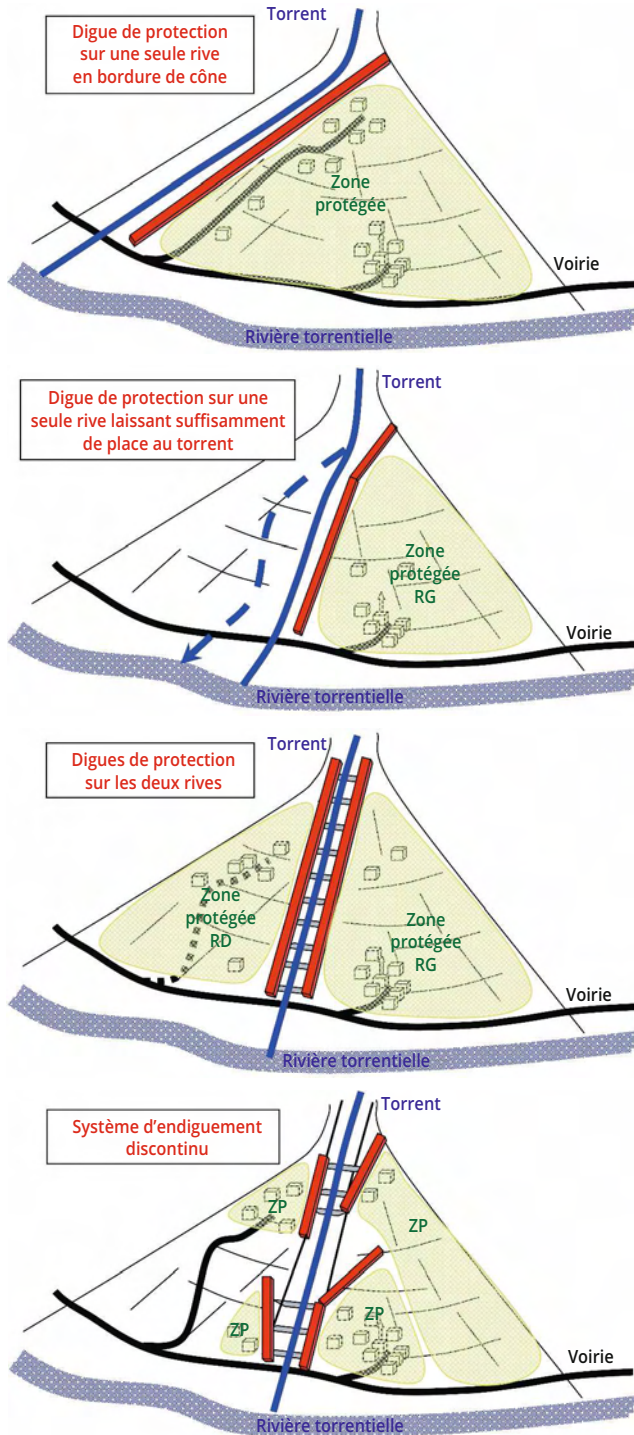
Pour la délimitation des zones protégées, il faut considérer des scénarios relativement pessimistes (avec prise en compte de facteurs aggravants : formation d'embâcles par des flottants, etc.), mais qui restent tout de même réalistes.

##### *Milieux eau*

Tout le bassin-versant torrentiel amont fait partie des « milieux extérieurs eau » situés en amont du système.

La caractérisation des bassins-versants en amont détermine de manière essentielle les phénomènes observés dans le système de protection [30], voire de leur aggravation potentielle.

Ces « milieux extérieurs » de type bassin-versant torrentiel sont la plupart du temps eux-mêmes objet d'une correction au moyen d'ouvrages de protection, hydrauliques ou non (correction torrentielle au moyen de seuils de stabilisation du lit, traitement de versant, etc.), et ces systèmes d'ouvrages eux-mêmes sont susceptibles de connaître toutes sortes de défaillances. Or, il est rare de disposer, pour la prise en compte de ces scénarios de défaillance des dispositifs amont dans l'étude de dangers du système de protection aval, d'une étude de dangers du système amont [30].



**Figure 5-13.** Les différentes configurations de zones protégées sur un système de protection torrentiel (Source : Y. Quefféléan, ONF – RTM).  
RD : rive droite ; RG : rive gauche.

### 3.3.3.2. Identification du risque

Le niveau de risque tel que défini ici correspond à la combinaison de la probabilité d'occurrence de l'aléa avec les conséquences résultant de cet aléa (risque = probabilité de l'aléa × gravité des conséquences).

En préambule, il faut donc rappeler la distinction sémantique qui existe entre l'aléa « inondation » des rivières de plaine et l'aléa « divagations et alluvionnement » des torrents de montagne.

#### Rappel des principales spécificités des torrents à prendre en compte

*« L'observation des crues des torrents montre qu'au-delà de la caractérisation des contraintes hydrauliques des écoulements, d'autres particularités doivent aussi être considérées lors de l'établissement d'une carte d'aléa. En raison de leur impact, notamment sur la morphologie du site étudié, les spécificités suivantes sont à prendre en compte lorsque l'on s'efforce de caractériser l'écoulement d'un torrent en dehors de son lit ordinaire :*

- la divagation et la forte instabilité des lits torrentiels ;
- le caractère relativement aléatoire des débordements torrentiels à l'intérieur de la zone potentiellement exposée ;
- le « lissage » de la topographie du terrain naturel dans les zones submergées, par engravement ou par érosion ;
- les risques liés à l'affouillement des terrains et des bâtiments, qui ont une acuité particulière pour les crues des torrents de montagne ;
- l'effet des flottants ;
- le caractère destructeur des laves torrentielles.

*Ces spécificités amènent ainsi à faire une distinction sémantique nette entre l'aléa « inondation » des rivières de plaine et celui des torrents de montagne qualifié aléa « divagation et alluvionnement » dans le présent guide. »*

Extrait du *Guide PPR – Note complémentaire – Les crues des torrents de montagne*, version provisoire 2008, non parue.

Il en ressort que les critères de qualification de l'intensité de l'aléa ne sont pas les critères « classiques » hauteur – vitesse de l'aléa inondation, mais prennent plutôt en compte les gravités des conséquences, ce qui va le même sens que la démarche d'analyse des risques proposée ici.

## 3.4. Étude 2 – Analyse de la gestion de la sécurité (eau, endiguement, zone protégée)

Cette partie de l'étude s'intéresse principalement aux aspects : gestion, surveillance, entretien et maintenance, alerte, urgence, etc. Sur ces questions, elle a pour objectif :

- l'identification et la description des politiques de gestion de la sécurité :
  - mesures appliquées aux milieux eau source des actions sur les ouvrages,
  - mesures appliquées au système de protection,
  - mesures appliquées à la zone protégée ;
- l'analyse et la traduction de ces mesures en termes de barrières de sécurité, en vue de leur intégration dans l'analyse fonctionnelle, puis de leur prise en compte dans l'analyse des scénarios d'inondation, de la défaillance du système de protection et dans l'estimation de la vulnérabilité des enjeux.

Concernant le système de protection, cette étude élémentaire doit donc **définir, décrire et analyser** la politique de prévention des accidents majeurs actuellement mise en place et le système de gestion de la sécurité qui en découle :

- organisation du gestionnaire du système de protection et des éventuelles autres entités impliquées pour ce qui concerne les aspects liés à la sécurité ;

- définition des principales procédures qui encadrent l'identification et l'évaluation des risques d'accidents majeurs, la surveillance de l'ouvrage en toutes circonstances, la gestion des situations d'urgence et la gestion du retour d'expérience ;
- dispositions prises par l'exploitant pour s'assurer en permanence du respect des procédures, auditer et réviser son système de gestion de la sécurité dans le cadre de son amélioration continue.

Cette analyse s'attachera principalement à analyser les consignes de surveillance et d'entretien et les consignes spécifiques à la gestion des événements hydrométéorologiques, ainsi que les documents d'organisation correspondants.

Concernant le milieu eau, cette étude élémentaire doit également définir, décrire et analyser la politique de prévention permettant au système de protection de fonctionner de manière optimale et/ou nominale. Cela comprend généralement, entre autres et sans exhaustivité :

- le dispositif de surveillance de prévision et d'alerte des événements hydrométéorologiques (crues, tempêtes, etc.) ;
- la gestion des ouvrages de protection (épis, brise-lames, seuils, etc.) ;
- la gestion de l'environnement (gestion des plages, des dunes, des berges, de la végétation côté eau, etc.).

Concernant la zone protégée, cette étude élémentaire doit également définir, décrire et analyser la politique de prévention visant à réduire les vulnérabilités des enjeux situés dans la zone protégée, entre autres les plans d'urgence (PCS, etc.) visant à mettre les populations exposées en sécurité.

Bien que ces deux dernières composantes (milieu eau et zone protégée) ne soient pas strictement du ressort du gestionnaire du système de protection, ces facteurs ont néanmoins une composante importante dans l'estimation finale du risque et, à ce titre, ils doivent être pris en considération.

L'analyse de ces différents types de mesures doit conduire à l'identification d'une partie (essentiellement organisationnelle) des barrières de sécurité qui s'appliquent au système considéré et à leur caractérisation. Une des premières étapes de cette partie de l'étude sera donc l'identification de ces autres acteurs influant sur la sécurité.

La [Figure 5-14](#) décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la [Figure 5-15](#) détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.

## 3.5. Étude 3 – Morphodynamique globale

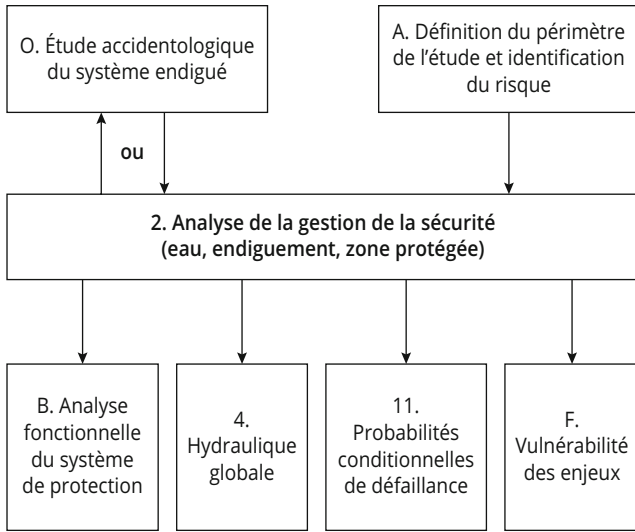
### 3.5.1. Cas général

Cette étude a pour objectif de définir le fonctionnement morphodynamique global du système étudié, c'est-à-dire celui des différents milieux eau dans lesquels s'inscrit le périmètre de l'étude. L'étude locale de la morphodynamique au contact du système de protection fait l'objet de l'étude élémentaire 6 : comportement morphodynamique local du milieu eau.

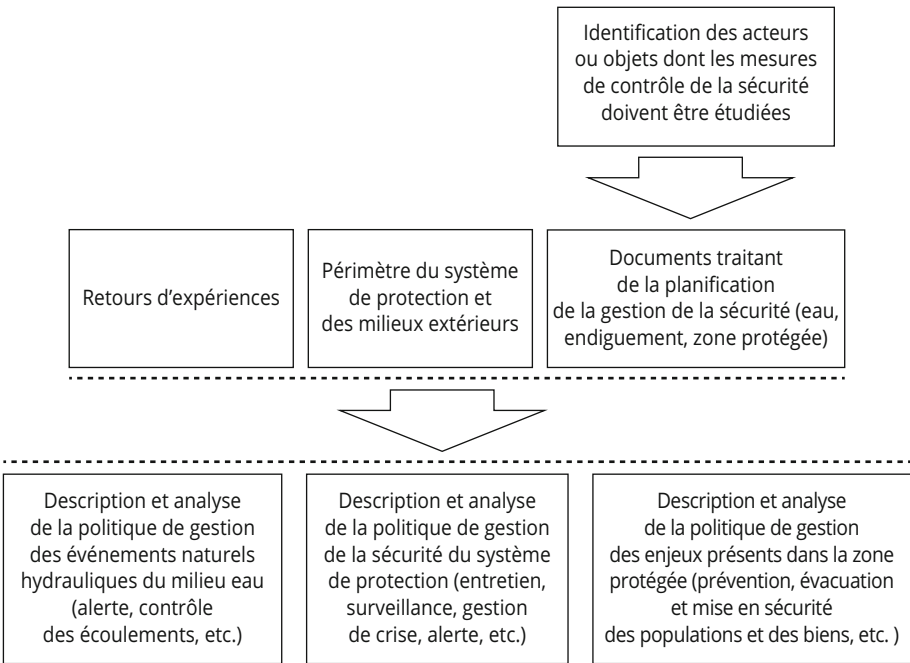
Les points à caractériser sont principalement les suivants :

- zonage des grands ensembles morphodynamiques des milieux eau : identification et délimitation des milieux eau ayant un même style de fonctionnement morphodynamique (par exemple, pour un cours d'eau : secteur à méandres, secteur divagant, secteur en tresses, secteur rectiligne, etc.) ;
- évolutions passées des ensembles identifiés : description des éventuelles modifications passées dans le fonctionnement sédimentaire des milieux eau pour aboutir à la situation actuelle (généralement du fait de la perturbation des équilibres naturels) et au bilan des évolutions bathymétriques observées et mesurées ;





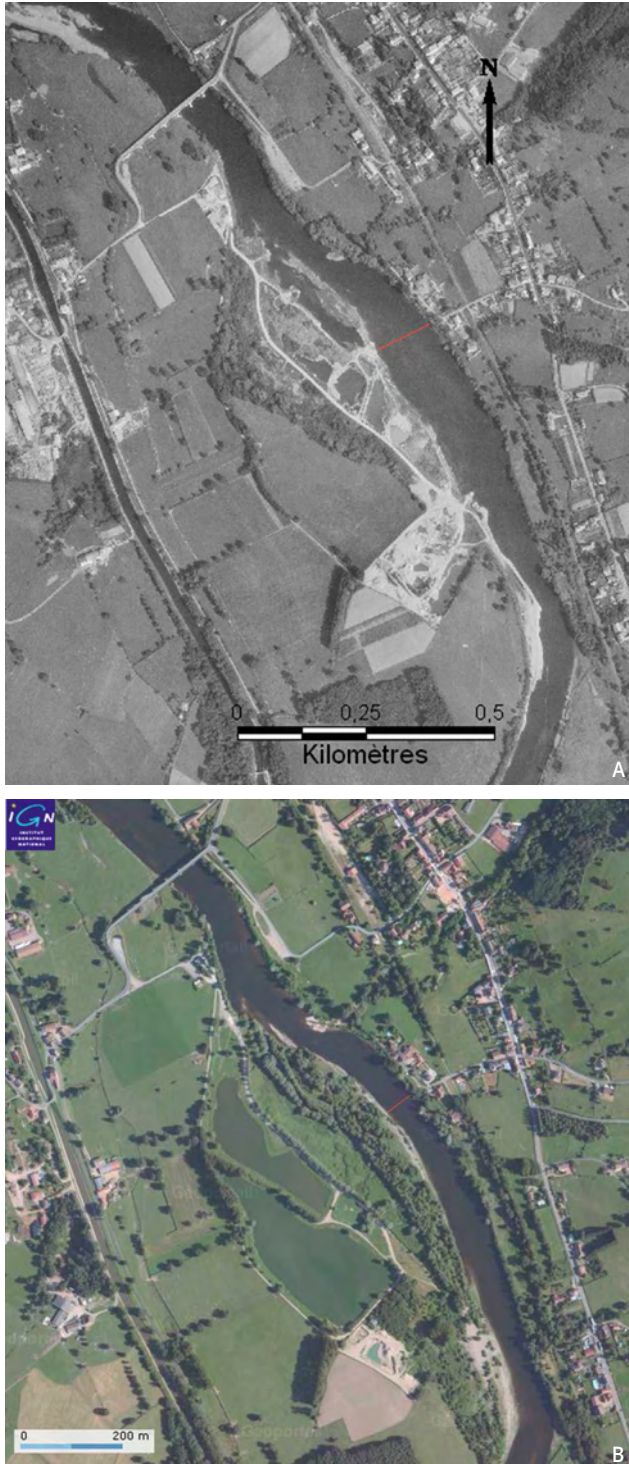
**Figure 5-14.** Liens entre l'étude (2) et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).



**Figure 5-15.** Flux de données pour l'étude élémentaire (2) (Source : B. Beullac).

- tendances globales actuelles et évolutions futures prévisibles : du fait de l'action anthropique (implantation d'ouvrages dans les milieux eau notamment), de l'évolution de la végétation dans les milieux eau, des changements climatiques, etc. (par exemple, incision, exhaussement, migration de méandre, translation de méandre, etc.).

La Figure 5-16 illustre, par exemple, le phénomène (par ailleurs global) de chenalisation du cours d'eau, qui est mis en évidence par l'observation d'une réduction de



**Figure 5-16.** Rétrécissement de la section d'écoulement en amont d'Iguerande en 1979 (A) et 2010 (B) (DREAL Centre - Val-de-Loire ; Extraits des cartes IGN, © IGN - 2018, autorisation n° 80-1812, reproduction interdite).

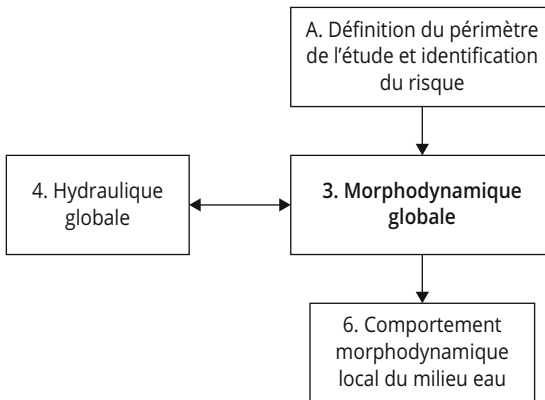
la largeur de la bande active du cours d'eau (la bande active de la Loire passant dans cet exemple d'une largeur d'environ 115 m en 1979 à environ 60 m en 2010). Le développement de ce phénomène, sur le moyen et le long terme, influence fortement le comportement morphodynamique local (*voir* [paragraphe 3.8.](#)), au droit des systèmes de protection concernés.

Une telle étude est notamment importante du fait qu'une analyse morphodynamique trop localisée, centrée uniquement sur les environs immédiats du système de protection, peut être insuffisante, par exemple pour évaluer le risque d'un contournement du système, ou encore pour prendre en compte les effets d'éventuels engravements localisés.

On pourra se reporter :

- à l'International Levee Handbook [9], section 7.3 pour la présentation de principes relatifs aux études morphodynamiques et hydrauliques en milieu fluvial et section 7.4 pour le milieu côtier ;
- au cahier technique du CEREMA « Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral » [11] et au guide « La gestion du trait de côte » [34] pour la présentation de principes relatifs aux études morphodynamiques en milieu marin ;
- au manuel pratique « Diagnostic, aménagement et gestion des rivières – Hydraulique et morphologie fluviales appliquées » [12] pour les spécificités liées aux cours d'eau.

La [Figure 5-17](#) décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la [Figure 5-18](#) détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.



**Figure 5-17.** Liens entre l'étude 3 et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).

### 3.5.2. Spécificités liées au milieu torrentiel

L'analyse du bassin-versant et de son profil en long en amont du cône est nécessaire pour déterminer notamment le potentiel de production sédimentaire, la pente caractéristique amont (qui va conditionner directement les évolutions morphologiques du lit dans le système de protection), la granulométrie des matériaux provenant de l'amont, la prédisposition du bassin à générer des laves torrentielles, à former des embâcles par amoncellement de flottants, à connaître des glissements de versant et des avalanches, etc.

En montagne, les autres aléas peuvent impacter directement ou indirectement le milieu eau (un glissement de terrain peut être à l'origine du déclenchement d'une lave torrentielle et/ou provoquer une augmentation très importante des apports en matériaux, obstruer partiellement ou totalement le chenal d'écoulement amont, etc.).

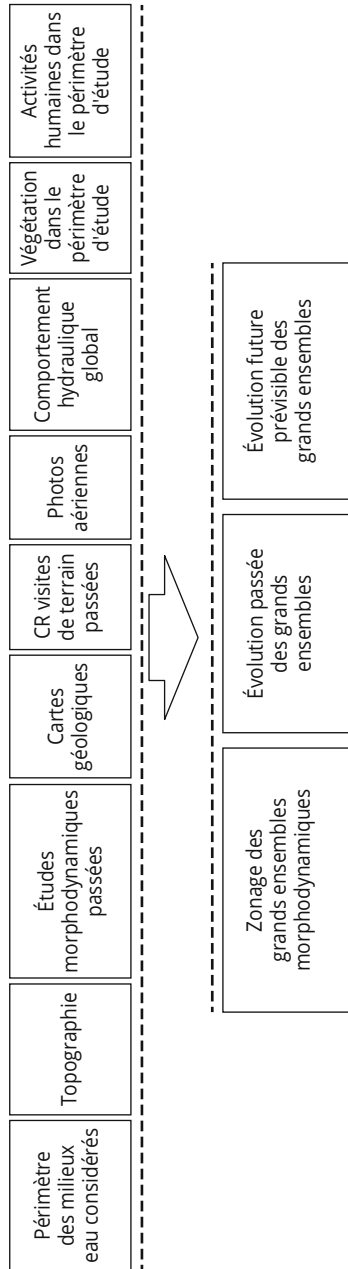
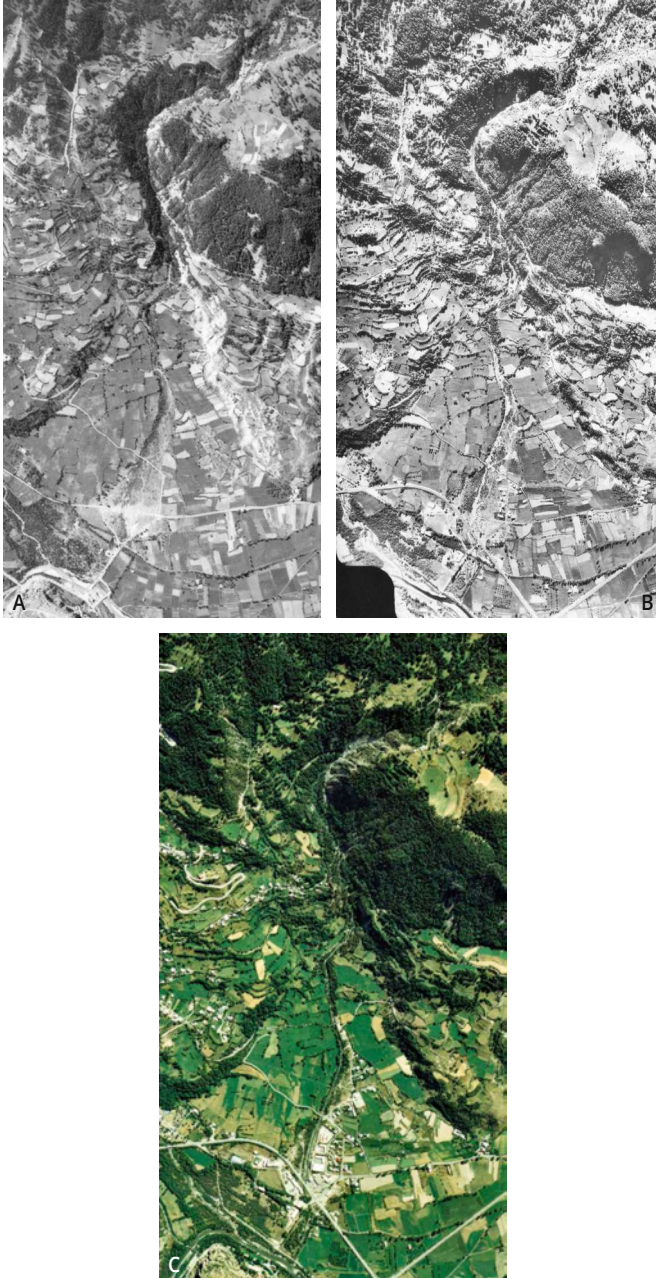


Figure 5-18. Flux de données pour l'étude élémentaire 3 (Source : B. Beullac).

Le bassin de réception et le chenal d'écoulement des torrents constituent ainsi deux entités géomorphologiques situées à l'amont du système de protection qui devraient être décrites au moins de façon sommaire – tant sur les aspects de la géologie, de la topographie et de la couverture végétale que de l'historique (Figure 5-19) de la correction torrentielle si ces deux entités en sont pourvues [30].



**Figure 5-19.** Exemple d'analyse diachronique du chenal d'écoulement et du cône de déjection – Torrent du Palps (Risoul - 05) (Source : O. Michel, ONF - RTM 05).  
A) 1948. B) 1971. C) 1993.



Une analyse hydraulique et morphodynamique trop localisée, centrée uniquement sur le système de protection, peut être insuffisante, notamment pour évaluer le risque d'un contournement du système par l'amont, mais également pour prendre en compte les effets d'un engrèvement régressif depuis la zone de confluence.

C'est pourquoi il est recommandé que l'analyse porte a minima sur l'ensemble du cône de déjection, même si le système de protection ne couvre qu'une partie du linéaire.

Sur la photo (Figure 5-20) prise après la crue de 1928, la digue rive droite du Fournel a été contournée par les écoulements à la suite d'un débordement amont dès l'apex du cône. Les écoulements longeaient ainsi la digue, de part et d'autre, ce qui a conduit à sa ruine partielle par affouillement de pied.



**Figure 5-20.** Exemple de contournement amont de l'endiguement du Fournel durant les crues de 1928 (Source : ONF – RTM 05).

Une analyse qui aurait porté uniquement sur le système de protection n'aurait pas permis de mettre en évidence ce risque de contournement amont.

### 3.6. Étude 4 – Hydraulique globale (niveaux/événement)

Cette étude a pour objectif d'identifier et de caractériser, à une échelle étendue et avec la précision correspondante, les événements hydrauliques qui peuvent se réaliser dans le ou les milieux eau (crues, tempêtes, tsunamis, conjonction d'événements, etc.), produire des actions hydrauliques sur le système de protection étudié et entraîner l'inondation de la zone protégée.



Ces événements (fréquents, rares et exceptionnels) sont à caractériser à la fois en termes de probabilités et de caractéristiques hydrauliques (débits, niveaux d'eau, vagues, cinétiques, etc.). Il s'agit donc d'une étude mettant en jeu aussi bien de la modélisation hydraulique que des méthodes hydrologiques.

L'étude locale plus précise des actions hydrauliques sur le système de protection fait l'objet de l'étude élémentaire 7 : comportement hydraulique local du milieu eau.

Il convient d'obtenir toute une gamme d'événements représentant des probabilités variées, et donnant des niveaux d'eau qui encadrent les différents niveaux caractéristiques (voir Chapitre 3 : paragraphe 3.) du système de protection :

- pied des ouvrages, pour les événements de sollicitation courants et la sensibilité aux phénomènes d'affouillement ;
- niveau de protection apparent (les points bas de la crête du système de protection) ;
- niveaux de large débordement, permettant d'être certain de dépasser les niveaux de sûreté et de danger, pour leur détermination dans une phase ultérieure.

Une telle étude est notamment importante du fait que l'analyse hydraulique localisée, centrée uniquement sur les environs immédiats du système de protection, nécessite la connaissance des origines du phénomène hydraulique et celle des conditions aux limites du périmètre de l'étude pour la modélisation et la définition des actions hydrauliques au droit du système de protection. En revanche, sa réalisation est généralement du ressort d'une autre entité (EPTB par exemple), il est de toute manière souhaitable, car bénéficiant à l'étude de nombreux systèmes de protection, que sa réalisation soit mutualisée à l'échelle d'un bassin.

La Figure 5-21 présente les hydrogrammes de crues pouvant se propager sur la Loire moyenne à partir du Bec d'Allier. Ces hydrogrammes ont été définis à travers d'une étude hydrologique de la Loire et de ses affluents. Ces événements, représentatifs du fonctionnement hydraulique global de cette partie du fleuve, constituent les conditions aux limites amont du modèle hydraulique de l'ensemble de la Loire moyenne. Ce modèle global permet par la suite de définir les conditions aux limites (débits, volumes, niveaux d'eau) amont (voir l'exemple du Tableau 5-I pour les débits) et aval de chacune des zones pour lesquelles on souhaite définir plus précisément le comportement hydraulique local du cours d'eau (voir paragraphe 3.9.), c'est-à-dire au droit de chacun des systèmes de protection de la Loire moyenne.

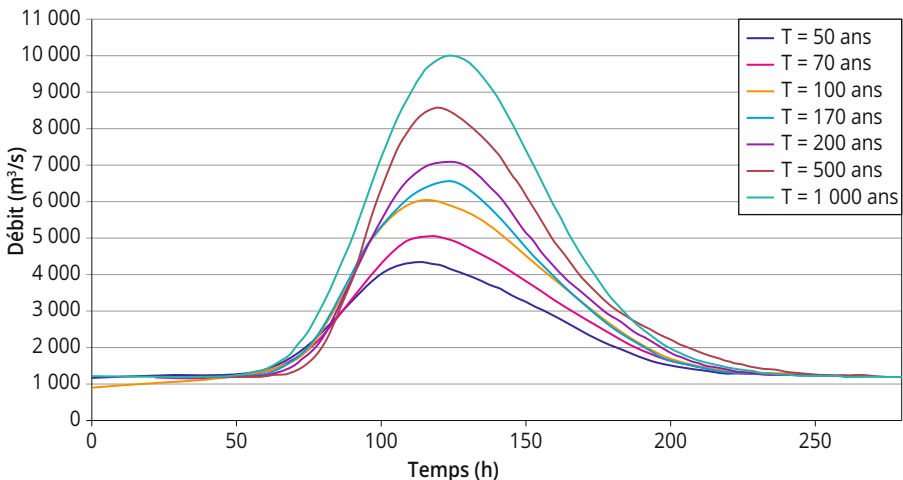


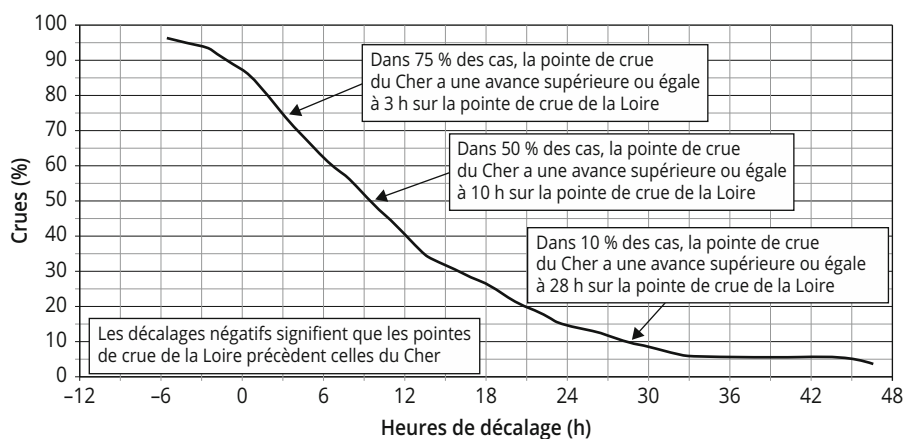
Figure 5-21. Hydrogrammes de crues au Bec d'Allier et périodes de retour associées, injectés en tête du modèle hydraulique global Loire Moyenne (Source : DREAL Centre - Val-de-Loire).

**Tableau 5-1.** Débits de pointe calculés à l'amont de la zone d'étude hydraulique locale des trois vals de classe A de la Loire moyenne (Source : DREAL Centre – Val-de-Loire).

Période de retour du scénario hydrologique au Bec d'Allier	Débits de pointe calculés à l'amont de la zone d'étude hydraulique locale (m <sup>3</sup> /s)		
	Val-d'Orléans	Val-de-Tours	Val d'Authion
T 50 ans	4 040	4 140	5 200
T 70 ans	4 670	4 700	5 660
T 100 ans	5 560	5 390	5 890
T 170 ans	6 000	5 720	6 100
T 200 ans	6 230	6 040	6 300
T 500 ans	6 420	6 600	6 450
T 1 000 ans	6 600	7 280	6 880

Dans de nombreux cas, une telle étude globale existe préalablement à la réalisation de l'analyse de risque des systèmes endigués. Il convient alors de bien l'analyser pour voir si les hypothèses correspondent à ce qui peut être attendu dans le cadre d'une analyse de risque, et également que l'on obtient bien une gamme de probabilités d'événements suffisante.

Dans les systèmes soumis aux inondations en provenance de plusieurs milieux eau, il faudra, si les différents milieux eau ont des régimes indépendants, se livrer à l'analyse de concomitance des événements, et à la détermination de la probabilité combinée (la Figure 5-22 donne un exemple d'une analyse pour le cas de la concomitance entre les crues de la Loire et du Cher). Ce peut également être le cas pour la combinaison d'un événement hydraulique et d'un autre événement indépendant (séisme, glace, etc.).



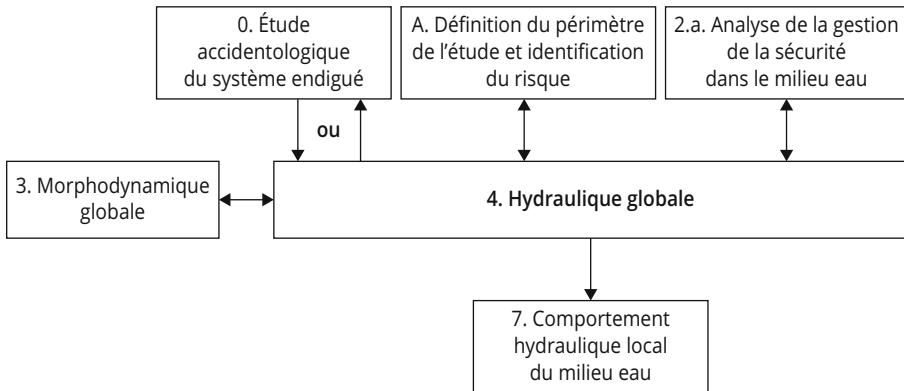
On pourra se reporter :

- à l'International Levee Handbook [9], section 7.3 pour la présentation de principes relatifs aux études morphodynamiques et hydrauliques en milieu fluvial et section 7.4 pour le milieu côtier, ainsi que section 5.2.5 pour des compléments relatifs aux probabilités des événements (principalement en milieu fluvial) ;
- au manuel pratique « Diagnostic, aménagement et gestion des rivières – Hydraulique et morphologie fluviales appliquées » [12] pour les spécificités liées aux cours d'eau.

**Remarque**

Des généralités sur les études hydrauliques liées à l'étude des systèmes de protection contre les inondations en contexte fluvial sont données en Annexe 4.

La Figure 5-23 décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la Figure 5-24 détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.



**Figure 5-23.** Liens entre l'étude 4 et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).

### 3.6.1. Spécificités liées au milieu torrentiel

#### 3.6.1.1. Type(s) de phénomène

Du fait de leur forte pente, les torrents disposent d'une énergie considérable qui leur donne une capacité d'arrachement et de transport élevée, particulièrement en période de crue. Elle leur permet alors d'affouiller leur lit et d'éroder les berges ainsi que les versants au milieu desquels ils s'écoulent.

Par rapport aux crues de plaine, que l'on qualifie généralement « d'eau claire », les crues torrentielles sont donc caractérisées par une composante solide très importante, dont l'influence est prépondérante sur les conditions d'écoulement.

Ainsi, au droit de diminutions de pente marquées, les matériaux transportés depuis l'amont des bassins sont généralement déposés par les torrents. Dans certains cas, cette dynamique peut conduire à l'engravement complet de la section d'écoulement, provoquant le débordement et la divagation du torrent en dehors de son lit ordinaire.

À l'origine de ces désordres, le charriage et les laves torrentielles sont les deux principaux modes de transport solide rencontrés dans les cours d'eau de montagnes à forts reliefs :

- le **charriage torrentiel** peut engendrer des conséquences très importantes lors de crues rares ou exceptionnelles : affouillements, comblement du lit et déviation provoquant des inondations, etc. ;
- la formation de **lave torrentielle** ne s'observe que dans quelques torrents présentant des caractéristiques géologiques, géomorphologiques et météorologiques favorables à leur genèse. On note également que la plupart des écoulements de lave sont suivis d'une phase de charriage, en général peu importante.

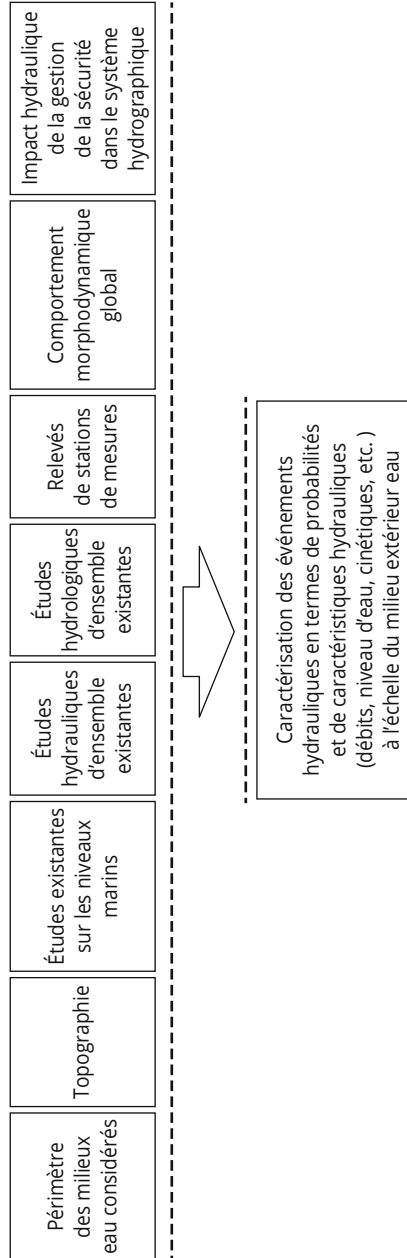


Figure 5-24. Flux de données pour l'étude élémentaire 4 (Source : B. Beullac).

Dans certains bassins (généralement de superficie faible et de pente forte), la majeure partie des crues se produit sous forme de laves torrentielles, alors que dans d'autres (de superficie plus étendue et de pente plus faible), on a tendance à observer un fonctionnement mixte, les écoulements avec charriage alternant éventuellement, de manière plus ou moins régulière dans le temps et dans l'espace, avec des laves torrentielles.

Avant toute chose, il faut donc distinguer le ou les types de phénomènes de transport solide (charriage et/ou laves torrentielles) qui peut intéresser le système de protection, car les conséquences en termes d'actions et de hauteurs d'écoulement seront différentes selon le cas.

### 3.6.1.2. Observations sur la caractérisation des phénomènes torrentiels en termes de probabilités

Comme en fluvial, la démarche consiste dans les grandes lignes à attacher des périodes de retour à des débits de pointe. Il convient toutefois de rappeler les limites de cette méthode en contexte torrentiel (ce qui amène parfois à proposer des adaptations lorsqu'on l'applique aux torrents de montagne).

#### *Écoulements à fort charriage*

En fluvial, le niveau maximum est souvent atteint à la pointe de crue (à nuancer en cas de débordement amont, de laminage dans des champs d'expansion de crue, etc.), ce n'est pas forcément le cas en torrentiel, notamment dans les zones d'engrèvement, où ce niveau maximum est généralement atteint durant la décrue, lorsque l'accroissement du niveau d'engrèvement excède encore la réduction de la hauteur d'eau due à la diminution du débit.

Le scénario le plus pénalisant n'est ainsi pas forcément celui qui présente le débit de pointe le plus élevé. La durée de la crue est un paramètre essentiel à prendre en compte pour la détermination du volume de matériaux potentiellement transportés en crue.

Il est recommandé, dans un contexte de forte incertitude, de considérer plusieurs durées d'écoulement, c'est-à-dire plusieurs hydrogrammes de référence, correspondant de ce fait à des volumes d'apports solides plus ou moins importants.

L'estimation de la charge sédimentaire des crues avec charriage torrentiel présente également de fortes incertitudes, liées à l'imprécision des formules de transport solide et des données hydrologiques. Notamment, entre l'acquisition des données hydrométriques de base et le traitement statistique, l'étendue des incertitudes est déjà remarquable. C'est particulièrement le cas en ce qui concerne les débits s'écoulant dans des lits torrentiels, pour lesquels les données sont souvent assez rares.

Sur de nombreux torrents, la notion de durée de retour d'un événement est en outre souvent mise à mal par l'intermittence de leur régime hydrologique, qui s'apparente grossièrement à un fonctionnement du type « tout ou rien ». Par exemple, sur l'intervalle de quelques siècles, l'observateur attentif d'un même torrent pourrait très bien être le témoin de plusieurs fortes crues qualifiées de centennales, sans que ne se soient produites de crues moins intenses – d'ordre décennal pour fixer les idées – donc plus fréquentes en théorie.

#### *Laves torrentielles*

La caractérisation des laves torrentielles est déjà un exercice difficile en raison du manque de données de base, de la complexité des processus et de leur grande variabilité, elle l'est encore plus lorsque l'on tente de leur attribuer une période de retour.

Dans la majeure partie des cas, le praticien doit se contenter d'une appréciation qualitative et s'appuie surtout sur son expérience pour définir des scénarios d'occurrence courante, rare et exceptionnelle.

### 3.6.2. Spécificités liées au milieu marin

En contexte maritime, il faut veiller à ce que l'emprise de l'étude élémentaire soit suffisamment grande pour caractériser correctement la propagation du large à la côte (au droit des ouvrages) des phénomènes hydrauliques rares et exceptionnels (voir Figure 3-1).

À ce stade, les caractéristiques hydrauliques des événements rares et exceptionnels doivent être décomposées, calculées et justifiées en termes de :

- niveaux moyens de mer ;
- marées ;
- houles au large ;
- surcotes : du fait des effets barométrique et de la poussée des eaux de surfaces par le vent ;
- surélévation du niveau moyen (set-up) du fait de la bathymétrie ;
- houle à la côte.

Différentes combinaisons de ces paramètres, pour des événements de périodes de retour et de niveaux d'eau équivalents, peuvent alors être étudiées.

Les caractéristiques hydrauliques au contact des ouvrages (notamment le run-up) sont caractérisées dans le cadre de l'étude élémentaire 7 : comportement hydraulique local du milieu eau.

## 3.7. Étude 5 – Caractérisation géotechnique et structurale du système de protection

### 3.7.1. Cas général

Cette partie de l'étude a pour objectif de décrire les caractéristiques géotechniques et structurales, de la crête jusqu'à la fondation (les composants, comprenant la fondation et les pieds de digues, leur disposition), pour les différentes portions du système de protection.

Cette étape de la démarche d'analyse de risque est en lien avec l'activité de diagnostic du système de protection et plus particulièrement avec sa partie recueil des données (voir Chapitre 10).

Les résultats attendus sont notamment :

- la définition des différents types de sections en travers de digues (en termes de composants, comprenant la fondation et les pieds de digues), représentatifs de tronçons de digues ;
- la nature des matériaux des différents composants des tronçons de digues ;
- une identification géotechnique et les caractéristiques mécaniques des composants ;
- la perméabilité des composants ;
- la sensibilité des composants aux différents mécanismes de détérioration (ces conclusions devront entre autres alimenter l'étude élémentaire 6 – morphodynamique locale – et l'étude élémentaire 11 – probabilités conditionnelles de défaillance).

La Figure 5-25 illustre un exemple de résultat, pour le cas d'une digue de Loire confortée sur le système de protection du Val-d'Orléans.

Pour une présentation de méthodes utilisables pour la reconnaissance et la caractérisation géotechnique et structurale des digues et de leur fondation, on pourra se reporter :

- à l'« Aide-mémoire de mécanique des sols » [14] ;
- aux sections 7.1 et 7.7 à 7.9 de l'ILH [9] ;
- au guide « Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations » [31] ;
- au guide « Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues » [16] ;
- au work package 3.2 « Levé Lidar et géophysique » du projet FLOODPROBE [18].



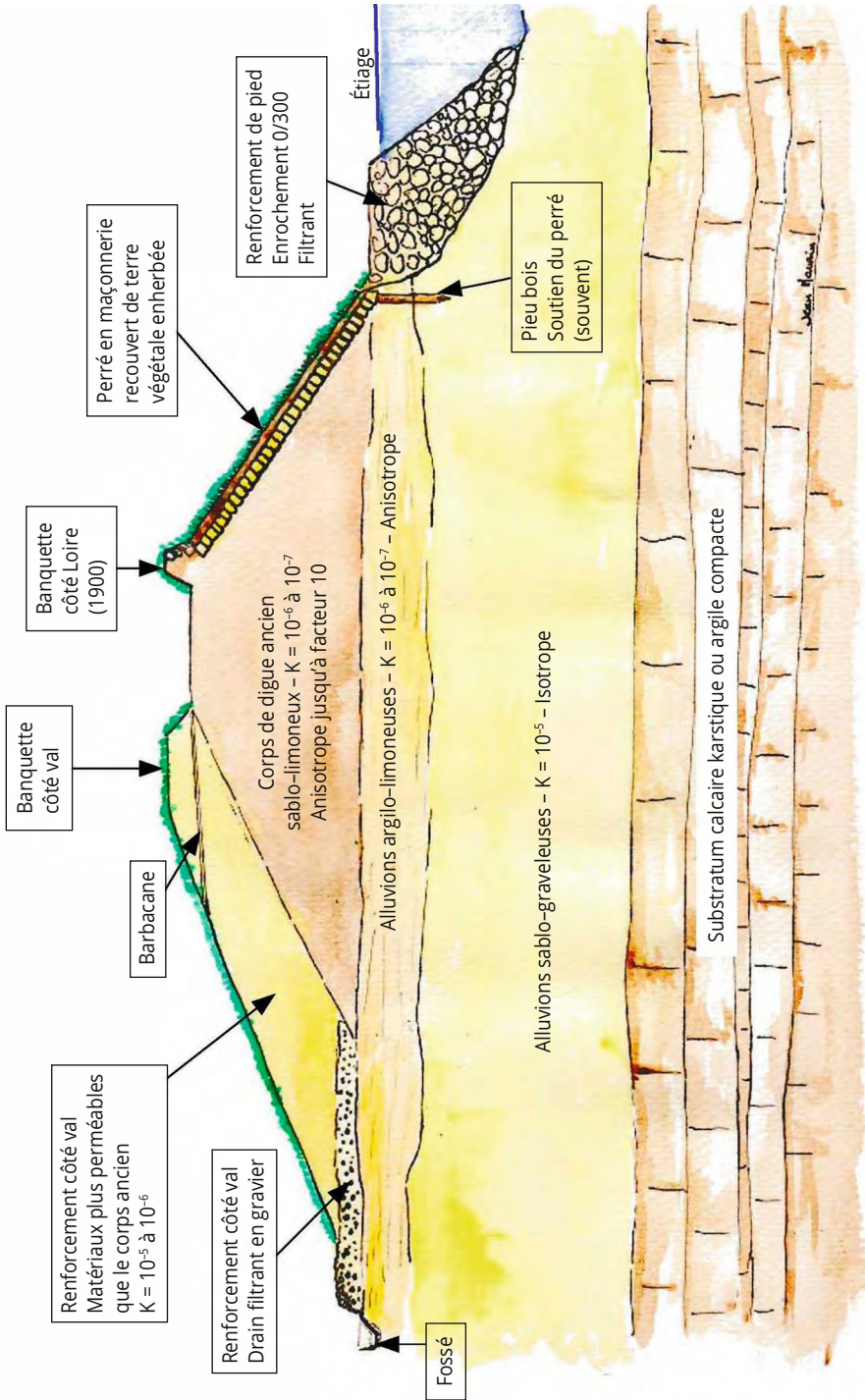
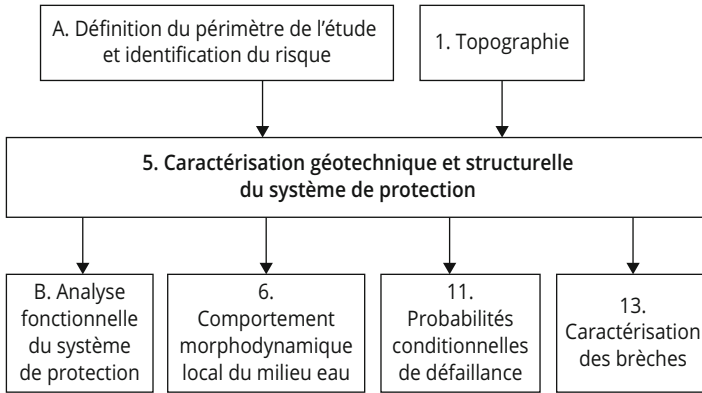


Figure 5-25. Coupe type d'une levée de Loire confortée par remblai drainé côté zone protégée (Source : DREAL Centre - Val-de-Loire).

La **Figure 5-26** décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la **Figure 5-27** détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.



**Figure 5-26.** Liens entre l'étude 5 et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).

### 3.7.2. Spécificités liées au milieu torrentiel

Les remblais des digues torrentielles sont constitués majoritairement de matériaux très grossiers. La caractérisation de ces sols reste délicate en utilisant des méthodes « classiques ». Celles-ci amènent souvent à sous-estimer les caractéristiques mécaniques de ces matériaux.

Des appareils spécifiques se développent (boîtes de cisaillement de  $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ , voire  $1 \times 1 \text{ m}^2$ , essais Proctor sur moule de  $\Phi 400 \text{ mm}$ ), mais sont encore peu utilisés.

Des études et travaux ont été menés par le Cemagref entre 1994 et 2000 afin de déterminer des ordres de grandeur des caractéristiques mécaniques de classes représentatives de sol de torrent en fonction de leur appartenance aux classes GTR les plus représentatives en torrent [45].

## 3.8. Étude 6 – Comportement morphodynamique local du milieu eau

### 3.8.1. Cas général

Les objectifs de cette étude élémentaire sont :

- de faire le bilan des évolutions morphologiques passées, dans les trois dimensions de l'espace, au contact ou à proximité immédiate du système de protection (dynamique sédimentaire et érosion externe des ouvrages) du fait des actions hydrauliques (en temps normal et lors d'événements hydrauliques rares et exceptionnels) et anthropiques, et de la nature des matériaux mis en jeu ;
- de définir et localiser les évolutions morphologiques futures envisageables en cas d'événements hydrauliques rares et exceptionnels (en prenant en compte les évolutions en cours d'événement, y compris les situations transitoires) ou du fait du fonctionnement hydraulique « normal » du milieu eau au contact des ouvrages (affouillement, érosion latérale, dépôt de sédiments, etc.), compte tenu de la présence ou de l'absence d'un espace entre l'eau en situation « normale » et le système de protection (ségnoal ou

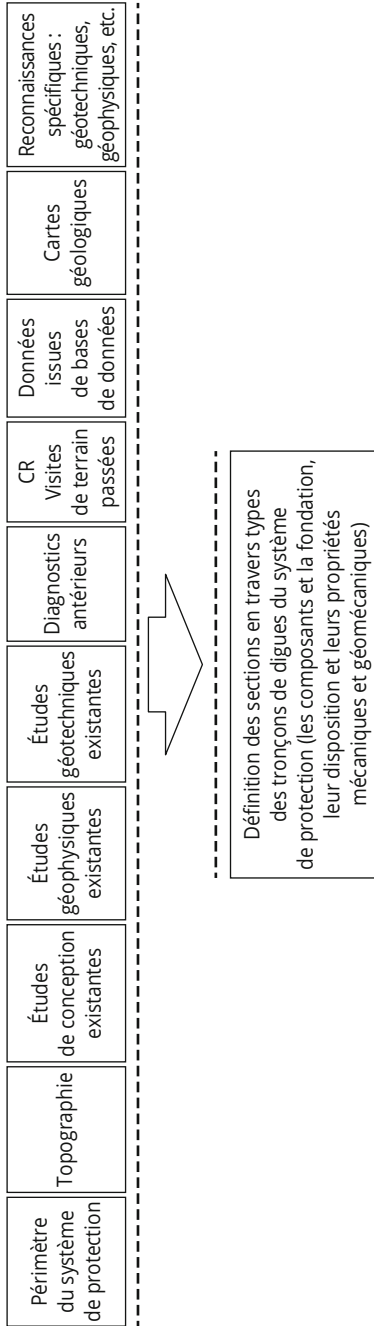


Figure 5-27. Flux de données pour l'étude élémentaire 5 (Source : B. Beulliac).

franc-bord pour un cours d'eau, plage en maritime), pour une période d'une ou plusieurs dizaines d'années (échéance de la prochaine analyse de risque régulière).

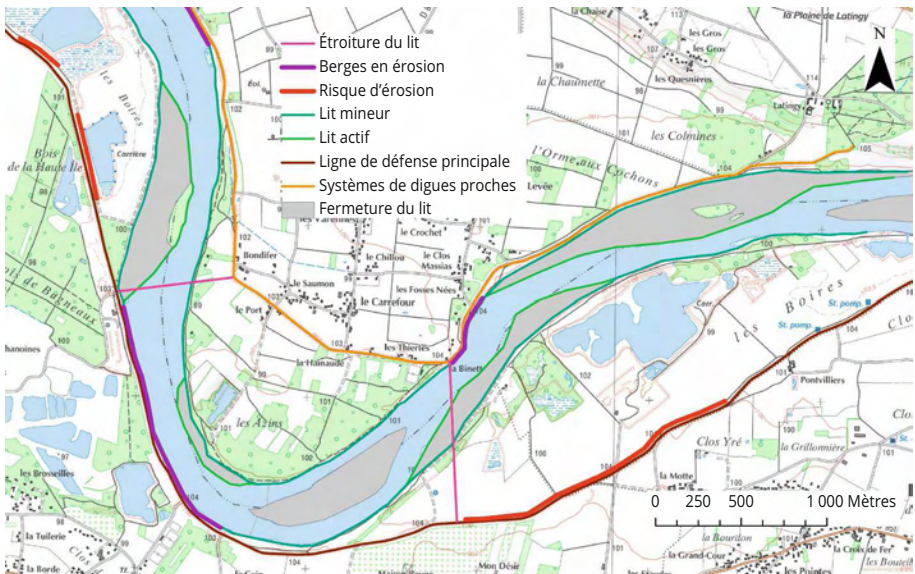
Cette étude doit être particulièrement justifiée au travers des résultats de l'étude morphodynamique globale (étude élémentaire 3), de l'étude hydraulique locale (étude élémentaire 7) et de l'étude de caractérisation géotechnique et structurelle (étude élémentaire 5), en plus des reconnaissances et expertises spécifiques.

L'étude morphodynamique consiste à comprendre la sédimentologie, l'hydrologie et les caractéristiques morphométriques du milieu eau. Les processus morphodynamiques (en milieu marin, fluvial ou torrentiel) peuvent influencer sur la sécurité des digues par divers moyens :

- affouillements ou sapement de berge, de plage ou de pied de digue par l'eau (courant, vagues, battage) qui peuvent déstabiliser les digues ;
- disparition de plages, ce qui va modifier les conditions de déferlement des vagues venus du large ;
- changements en plan de lit d'un cours d'eau ou du trait de côte, qui peuvent modifier les courants pendant les inondations ou rapprocher la mer ou le lit mineur de la digue ;
- évolutions du profil de la rivière du fait d'une incision généralisée, qui peuvent déstabiliser les digues par glissement ou effondrement, diminuer la fréquence des débordements, changer l'emplacement du premier débordement, modifier le fonctionnement des déversoirs dans les digues ;
- évolutions du profil de la rivière par exhaussement généralisé, qui peut également modifier les conditions de débordement.

Ces processus sont influencés par les transports de sédiments et de matériaux alluvionnaires, sans oublier l'importance de la végétation ligneuse, à la fois pour son rôle dans la résistance des berges, et pour le transport et l'accumulation de bois. Le bois transporté peut éroder les berges de la rivière, les talus ou les revêtements des talus de la digue. Le bois déposé pendant les crues peut provoquer des débordements localisés sur les digues.

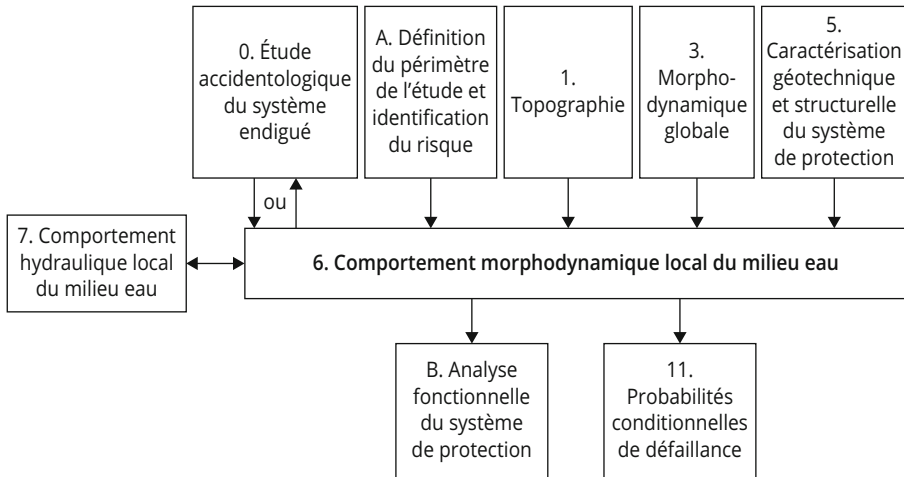
La Figure 5-28 donne un exemple de résultat d'étude morphodynamique locale pour un secteur du système de protection du Val-d'Orléans.



**Figure 5-28.** Résultat d'étude morphodynamique locale pour un secteur du système de protection du Val-d'Orléans (Source : étude de dangers du Val-d'Orléans, DREAL Centre - Val-de-Loire) (Source : B. Beullac).

On pourra se reporter :

- à l'International Levee Handbook [9], section 7.3 pour la présentation de principes relatifs aux études morphodynamiques et hydrauliques en milieu fluvial, et section 7.4 pour le milieu côtier ;
- au cahier technique du CEREMA « Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral » [11] et au guide « La gestion du trait de côte » [34] pour la présentation de principes relatifs aux études morphodynamiques en milieu marin ;
- au manuel pratique « Diagnostic, aménagement et gestion des rivières – Hydraulique et morphologie fluviales appliquées » [12] pour les spécificités liées aux cours d'eau.



**Figure 5-29.** Liens entre l'étude 6 et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).

La Figure 5-29 décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la Figure 5-30 détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.

### 3.8.2. Spécificités liées au milieu torrentiel

Les évolutions morphologiques de type « évolution systématique du fond » peuvent être estimées de façon relativement fiable, même s'il reste encore de nombreuses incertitudes sur les formules de transport solide employées et sur les données d'entrée (débits, durée de la crue, etc.).

Il est en revanche beaucoup plus difficile d'appréhender les phénomènes d'érosion de berges, les respirations aléatoires et temporaires du lit, les affouillements localisés, en fait toutes les déformations de la section d'écoulement associées au transport solide, sans parler de l'aggravation de ces évolutions morphologiques liée aux facteurs aggravants que sont les embâcles.

Il n'existe pas à ce jour de méthodes pour quantifier ces évolutions. On se « contentera » alors d'une approche experte reposant sur l'observation des indices morphologiques (anciens dépôts dans les zones de divagation), sur l'analyse des données historiques (comportement lors d'événements passés, analyse des photos aériennes, etc.) et sur la comparaison avec des configurations similaires (référence à des événements passés sur d'autres sites comparables). L'expérience du chargé d'études est essentielle pour cette activité.

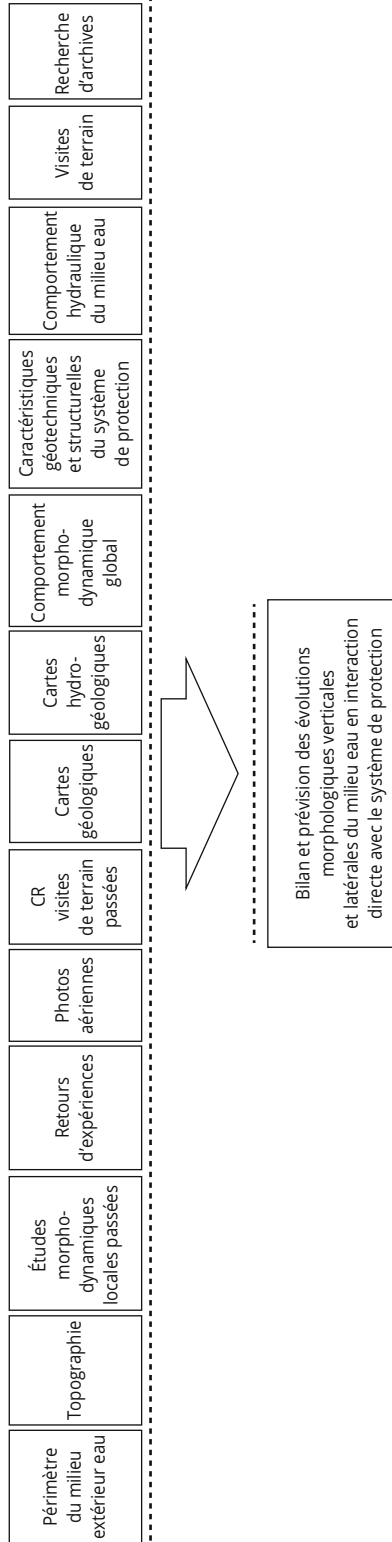


Figure 5-30. Flux de données pour l'étude élémentaire 6 (Source : B. Beullac).



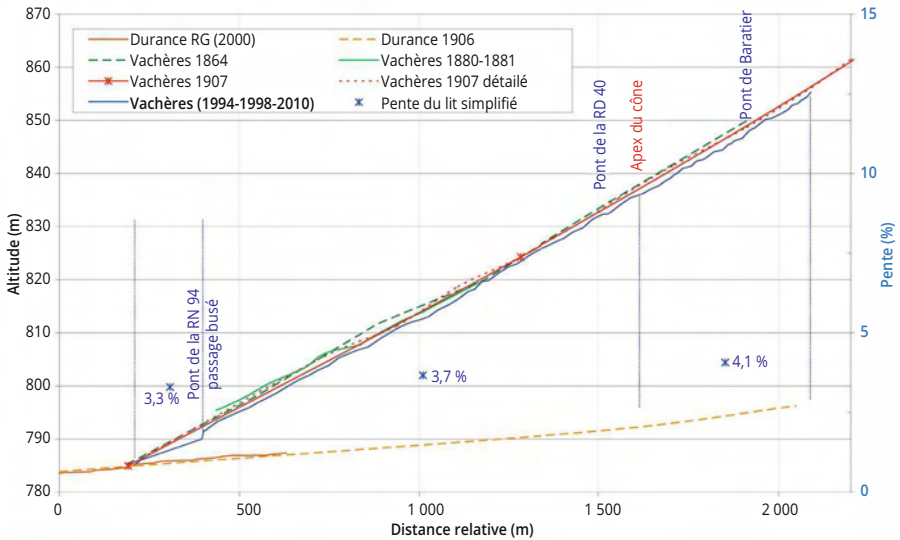


L'analyse diachronique, de même que les reconnaissances de terrain ou les relevés Lidar permettent parfois de déceler des débordements anciens qui ne sont pas forcément recensés dans les données d'archives (Figure 5-33).

Une analyse comparative du profil en long dans le temps (Figure 5-34) permet de mettre en évidence les éventuelles évolutions morphologiques verticales du lit. La création d'un système de protection est souvent à l'origine d'un enfoncement du lit.



**Figure 5-33.** Analyse diachronique sur le cône de déjection du torrent du Palps (Risoul 05) (Source : ONF - RTM 05).



**Figure 5-34.** Évolution du fond du lit du Vachères et de la Durance à la suite de la construction du système de protection (Source : Y. Quefféléan, ONF - RTM).

Sur la Figure 5-34, un abaissement généralisé du lit a ainsi pu être constaté depuis le XIX<sup>e</sup> siècle et la création du système de protection. Cet enfoncement peut atteindre 1,5 à 2 m par endroits.

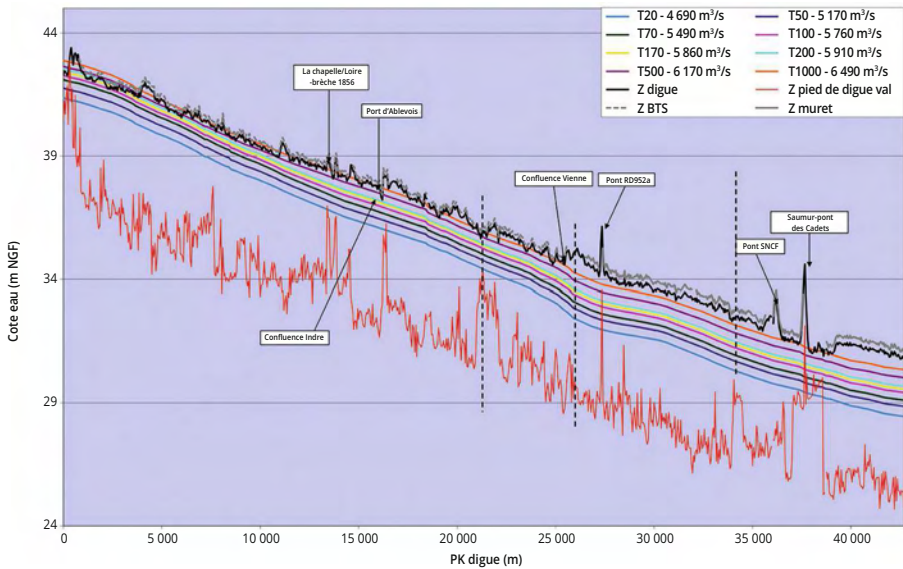
D'autres causes peuvent expliquer un enfoncement du lit : curage et prélèvement de matériaux directement dans le lit, absence de crues notables, fermeture progressive du lit par la végétation, aménagements dans le bassin-versant amont : correction active, reboisement, etc.

### 3.9. Étude 7 – Comportement hydraulique local du milieu eau

Cette étude élémentaire a pour objectif l'estimation des intensités (niveaux d'eau, caractéristiques des vagues, vitesses des courants au contact des ouvrages, contraintes impliquées, etc.) et cinétiques des actions hydrauliques possibles au contact du système de protection, pour les différents événements hydrauliques rares ou exceptionnels dont la probabilité et les caractéristiques hydrauliques générales ont été préalablement définies dans l'étude hydraulique globale (*voir* l'étude élémentaire 4).

Cette étude peut notamment être menée par le biais d'une modélisation hydraulique numérique, fondée sur la connaissance de la topographie du milieu eau et du système de protection et les événements issus de l'étude hydraulique globale.

La **Figure 5-35** donne un exemple de résultat de cette étude, pour le secteur amont du val d'Authion sur la Loire.



**Figure 5-35.** Lignes d'eau de crues en Loire au droit du système de protection du val d'Authion, sur le secteur Langeais-Saumur (Source : DREAL Centre – Val-de-Loire).  
BTS : banquettes ; NGF : nivellement général de la France ; PK : point kilométrique.

Cette étape de la démarche d'analyse de risque est en lien avec l'activité de diagnostic du système de protection et plus particulièrement avec la caractérisation du fonctionnement hydraulique du système de protection et avec l'étape de combinaison des résultats permettant l'estimation de la performance des tronçons de digues (*voir* Chapitre 10).

#### Remarque

Des généralités sur les études hydrauliques liées à l'étude des systèmes de protection contre les inondations en contexte fluvial sont données en Annexe 4.

On pourra se reporter :

- à l'International Levee Handbook [9], section 7.3 pour la présentation de principes relatifs aux études morphodynamiques et hydrauliques en milieu fluvial, section 7.4 pour le milieu côtier, ainsi que section 5.2.5 pour des compléments relatifs aux probabilités des événements (principalement en milieu fluvial) ;
- au manuel pratique « Diagnostic, aménagement et gestion des rivières – Hydraulique et morphologie fluviales appliquées » [12] pour les spécificités liées aux cours d'eau.

La Figure 5-36 décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la Figure 5-37 détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.

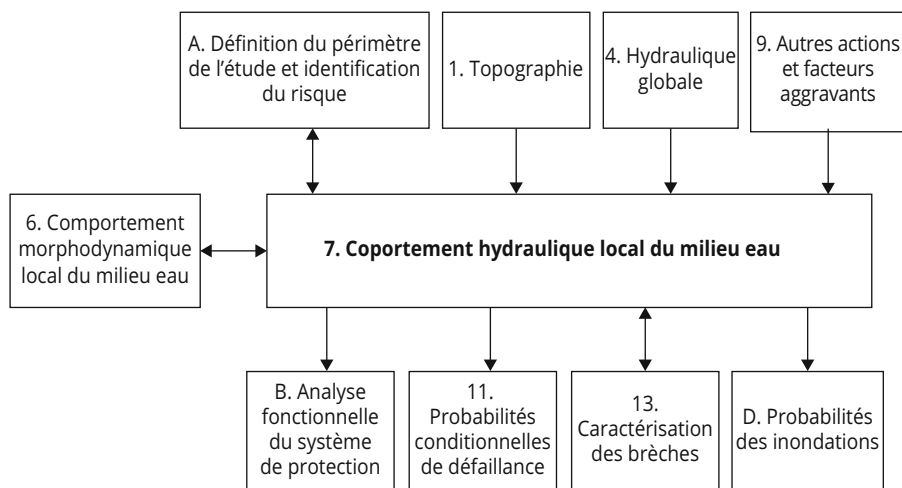


Figure 5-36. Liens entre l'étude 7 et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).

### 3.9.1. Spécificités liées au milieu torrentiel

L'objectif ici est uniquement d'attirer l'attention du lecteur sur quelques spécificités torrentielles dans l'estimation des niveaux d'écoulement ; pour plus de détails, il pourra notamment se référer à l'ouvrage « Torrents et rivières de montagne – Dynamique et aménagement » [41] qui fournit une très bonne synthèse des connaissances actuelles dans ce domaine.

Comme précisé précédemment dans le cas des systèmes de protection torrentiel, on ne peut se limiter à l'étude des écoulements d'eau claire car, en torrent, le transport solide est un phénomène indissociable de l'écoulement de crue. L'influence du transport solide sur l'écoulement liquide, et réciproquement, est généralement trop forte pour que les deux phénomènes puissent être abordés séparément.

Le calcul des écoulements d'eau claire peut tout de même permettre de mettre en évidence des sous-dimensionnements évidents, même sans tenir compte du transport solide, par exemple au droit d'un ouvrage de franchissement. Il constitue une première évaluation de la capacité des sections chenalées, des sections des ponts, etc. pour déceler déjà des insuffisances dans les sections d'écoulement (l'inverse n'est en revanche pas toujours vrai).

Ce calcul d'eau claire peut par ailleurs être considéré comme majorant le risque de surverse pour des crues de charriage avec enfoncement du lit qui auront tendance, du fait de l'incision, à manifester des niveaux de surface libre des écoulements plus faibles [30].

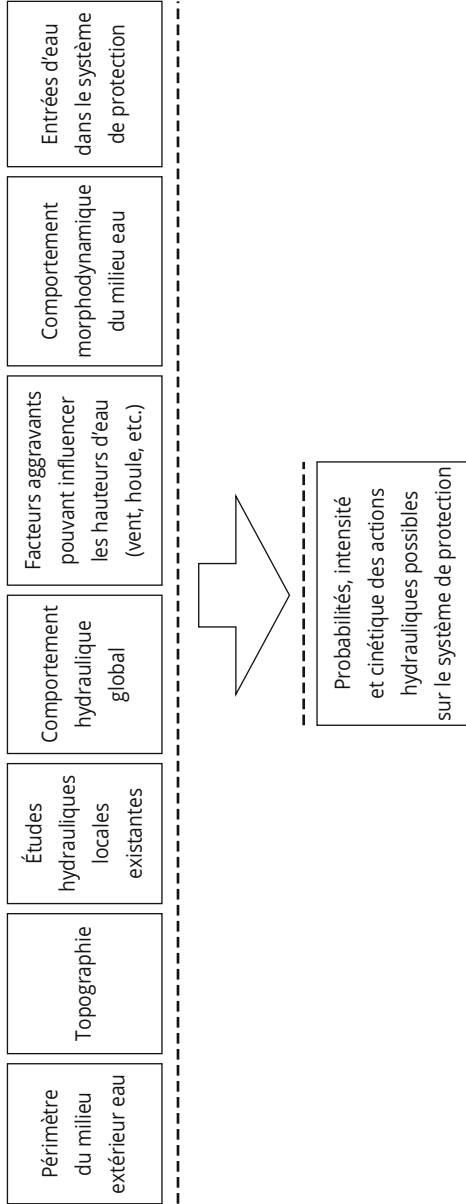


Figure 5-37. Flux de données pour l'étude élémentaire 7 (Source : B. Beullac).



De même, au droit d'un pont, un surcreusement localisé peut se produire si le fond du lit n'est pas pavé ou protégé par une carapace, et augmenter la capacité de transit sous l'ouvrage.

#### 3.9.1.1. Spécificités hydrauliques avec fort charriage

Sur les torrents ou rivières torrentielles à charriage (écoulements à fortes pentes), le niveau pouvant être atteint par les eaux dépend de trois paramètres :

- **l'évolution systématique du fond** : il s'agit des évolutions du lit qui résultent de la variation de la capacité moyenne de transport. Ces variations du fond sont d'abord liées aux irrégularités du profil en long, mais peuvent aussi être provoquées par des embâcles divers et notamment par des flottants ;
- **la respiration du lit durant la crue** : les irrégularités de la fourniture en matériaux et le caractère intrinsèquement instable du charriage torrentiel conduisent à des évolutions importantes mais temporaires du lit. Ces respirations sont souvent liées à des divagations latérales. La respiration regroupe toutes les variations temporaires et souvent aléatoires du niveau du lit ;
- **la hauteur de l'eau** qui est fortement influencée par le transport solide et les modifications de géométrie durant la crue.

La [Figure 5-38](#) illustre la nécessaire combinaison de ces trois paramètres pour bien estimer le niveau atteint en crue.

Les hauteurs liées à chacun de ces paramètres ne doivent pas être directement cumulées car certains phénomènes se succèdent dans le temps plutôt qu'ils se superposent. Il faut donc utiliser des outils capables de modéliser l'évolution du fond du lit suivant un certain pas de temps pour déterminer le niveau le plus défavorable durant la crue.

Dans les zones d'engravement, ce niveau maximum est généralement atteint durant la décrue, lorsque l'accroissement du niveau d'engravement excède encore la réduction de la hauteur d'eau due à la diminution des débits. Dans les zones où il n'y a pas de dépôt et/ou plutôt de l'érosion, le niveau maximum est quant à lui plutôt atteint à la pointe de crue.

Dans le cas de **système de protection étroit** (*voir Chapitre 2 : paragraphe 4.3.3.*), les phénomènes de divagations latérales sont réduits et les sections du lit sont relativement fixes (du moins latéralement). Il est en revanche essentiel de prendre en compte les évolutions éventuelles du fond du lit durant la crue.

La faible largeur du chenal endigué peut ainsi favoriser une incision marquée du fond du lit, si ce dernier n'est pas protégé contre l'affouillement. Cet approfondissement du lit peut favoriser un effondrement de la structure et/ou un glissement du remblai de la digue côté torrent.

A contrario, en cas de réduction de pente sur le profil en long entre l'apex du cône et la zone de confluence, un dépôt de matériaux est probable durant les crues avec fort transport solide.

Les deux phénomènes peuvent d'ailleurs se succéder durant la crue : incision du lit à la montée de crue, puis exhaussement à la décrue.

Selon l'importance de la réduction de pente, ce dépôt peut être très conséquent et à l'origine, quasiment à lui seul, d'une surverse ; une analyse détaillée de profil en long est indispensable pour bien appréhender ce phénomène d'évolution systématique du fond.

Dans ce cas, plus que le débit de pointe instantané, c'est la durée de la crue et donc le volume de matériaux transportés durant la crue (dépendant aussi de la pente caractéristique amont et de la granulométrie des matériaux) et la différence de pente amont-aval qui influent surtout sur l'ampleur de ces évolutions morphologiques.

Dans l'exemple de la [Figure 5-39](#), l'absence de prise en compte du transport solide, et donc de l'évolution du fond du lit durant la crue, amènerait à la conclusion erronée qu'il n'y a pas de risque de surverse sur ce tronçon endigué.



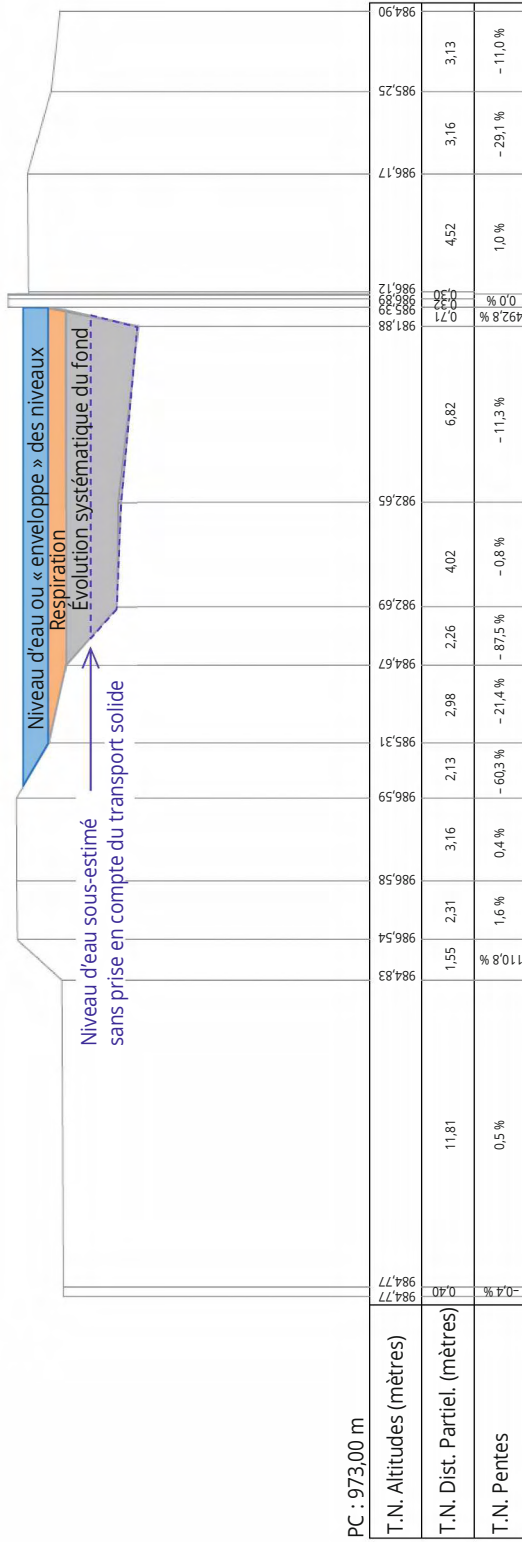


Figure 5-38. Estimation du niveau de crue par la combinaison des paramètres : évolution systématique du fond, respiration du lit durant la crue et hauteur de l'eau (Source : Y. Queffelec, ONF-RTM).

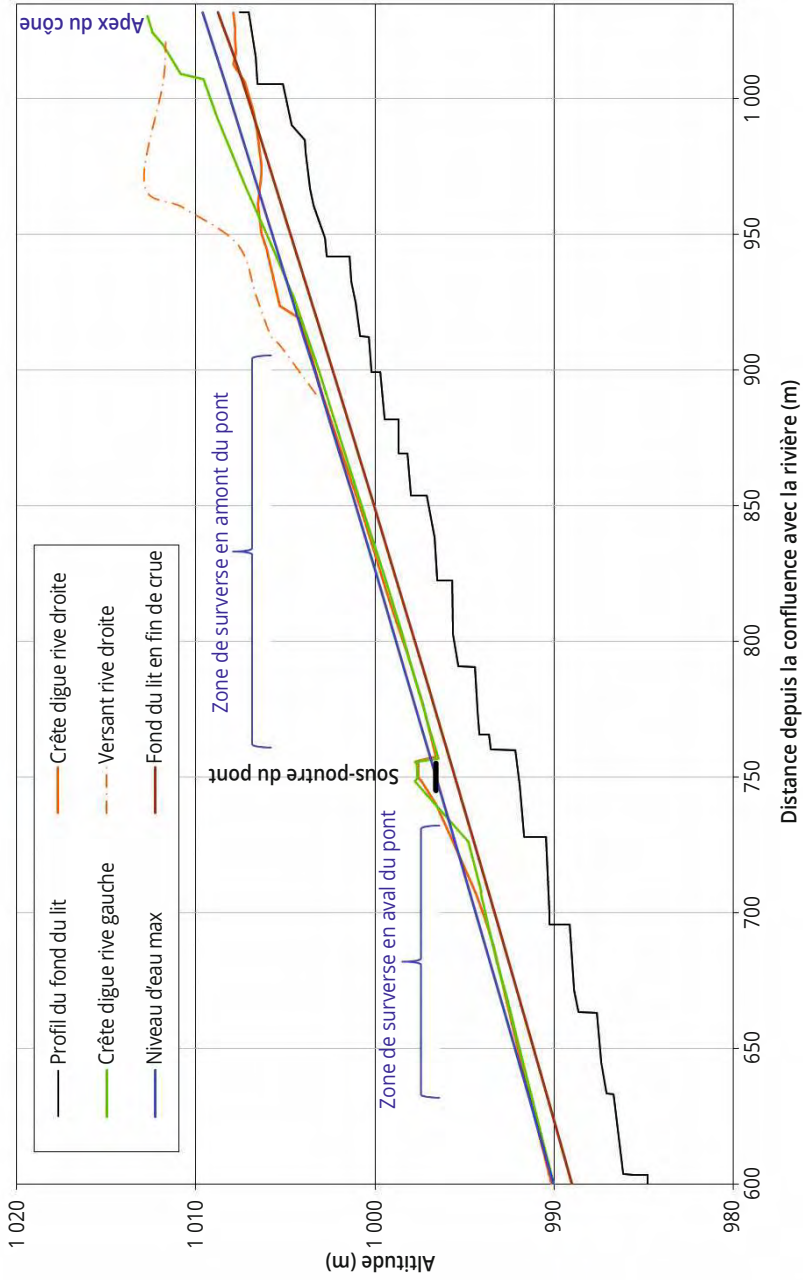


Figure 5-39. Exemple de calcul de niveau atteint en crue avec prise en compte de l'évolution du lit (Source : ONF - RTM 05).

Un dépôt de matériaux est souvent observé à l'aval immédiat des endiguements étroits (zone où le lit est plus large), ce dépôt peut provoquer un engravement régressif dans le cours aval de l'endiguement.

On assiste ainsi souvent à un basculement de pente sur les chenaux ou tronçons endigués étroits avec un enfoncement du lit dans la partie amont et un dépôt dans la partie aval. Ce basculement est d'autant plus important que l'état de surface du parement de digue est lisse (fixation de l'écoulement contre le parement du fait de la faiblesse de la rugosité). Le risque de débordement et de surverse est donc amplifié dans la partie aval du système de protection et, en amont, l'enfoncement du lit peut menacer la stabilité de l'ouvrage.

Autre spécificité, le comportement bien tranché (quasiment en « tout ou rien ») en cas d'occurrence d'un débordement significatif et/ou d'une surverse par-dessus la crête de digue. Dès qu'une fraction significative du débit liquide déborde dans la zone protégée, cette fraction ne participe plus au transport solide par charriage (transport de matériaux par le fond), ce qui amplifie le dépôt de matériaux dans le lit mineur et donc augmente d'autant le débit débordant, et ainsi de suite, on aboutit rapidement à un engravement total du chenal et à un changement de lit. Tout le débit peut alors déborder en dehors du système de protection.

Ce phénomène peut se produire également dans des parties chenalées (sans digue) en amont ou en aval d'un système de protection avec, pour conséquences, soit un contournement amont du système, soit une aggravation du dépôt régressif depuis l'aval qui peut aussi avoir une incidence dans la partie endiguée.

Dans le cas de **système de protection laissant un « vaste » espace de divagation**, il faut tenir compte de surcroît, pour l'estimation de la hauteur d'eau, que l'écoulement ne s'étale pas forcément sur l'ensemble du lit (concentration dans un ou plusieurs bras, voire développement de lits en tresses) et que les sections sont fortement remaniées par les écoulements lors des crues.

Le transport solide, intense durant les crues, est capable d'adapter la forme des sections aux conditions d'écoulement en crue.

La détermination précise d'une hauteur d'écoulement, fondée notamment sur des profils établis à un instant donné (typiquement sur les sections relevées avant la crue) est souvent illusoire, voire parfaitement inadaptée. Le lit ou les lits vont se combler, se déplacer, etc. durant la crue au gré des dépôts successifs.

Ainsi, plutôt que la détermination de la hauteur d'eau sur une section « figée » relativement large, il convient de définir une **enveloppe des niveaux** atteints lors de la crue en considérant une section d'écoulement réduite (fonction de la section réelle entre berges non érodables, mais aussi de la capacité du torrent à former son lit) qui peut se déplacer au gré des dépôts dans le système de protection et/ou entre les berges, et à l'intérieur de laquelle le rapport de la largeur de l'écoulement sur sa hauteur ( $L/h$ ) reste compris entre 15 et 40 (Figure 5-40).



**Figure 5-40.** Illustration de la détermination de l'enveloppe des niveaux (dans le cas d'un lit divagant) (Source : Y. Quefféléan, ONF-RTM).

Des expérimentations et observations ont en effet montré que lorsqu'un écoulement a la possibilité de divaguer, le rapport entre la largeur de l'écoulement et la hauteur d'eau ( $L/h$ ) est rarement inférieur à 15 dans un lit naturel, et exceptionnellement supérieur à 40 si l'on ne considère que le bras vif.

Les niveaux ainsi obtenus peuvent correspondre à une section très importante, mais qui ne sera pas entièrement occupée par l'écoulement à un instant donné. Ceci n'est donc valable que sur des lits larges et divagants et non pas dans des configurations avec des systèmes de protection étroits évoqués précédemment où un calcul hydraulique plus « classique » reste adapté.

Rappelons à cet égard que lorsque la submersion relative ( $h/d$ ) est faible, les équations de Manning-Strickler ne sont plus valables.

Pour de plus amples informations sur l'estimation proprement dite des hauteurs d'écoulement (présentation des différentes équations, domaine de validité, etc.), nous invitons le lecteur à se référer au chapitre 3 de l'ouvrage « Torrents et rivières de montagne – Dynamique et aménagement » [41].

En termes d'évolution du lit, il faut tenir compte qu'un système de protection laissant un « vaste » espace de divagation est souvent ponctué d'un ou plusieurs ouvrages de franchissement qui réduisent considérablement la largeur du lit. Un tel rétrécissement marqué du lit peut être à l'origine d'un dépôt important de matériaux. En effet, le rétrécissement brutal et excessif du lit à ce niveau provoque une surélévation importante des niveaux d'eau (remous hydraulique), ce qui favorise les dépôts de matériaux à l'amont du rétrécissement. La hauteur de dépôt peut parfois atteindre plusieurs mètres selon l'importance de la contraction (évaluée par rapport à un lit alluvionnaire). À la décrue, une partie de ces matériaux est reprise. Un dépôt de matériaux se forme également souvent à l'aval immédiat de l'ouvrage du fait de l'élargissement marqué à ce niveau. Ce dépôt peut s'effacer en période de crue, pour réapparaître en fin de crue.

### 3.9.1.2. Laves torrentielles

#### Spécificités

*« Les laves torrentielles sont un phénomène spécifique des torrents. Elles se forment généralement à la faveur des fortes pluies, sur des pentes fortes et lorsque le site permet la formation d'un mélange concentré d'eau et de matériaux solides de granulométrie étendue allant des argiles à des blocs de dimensions métriques.*

*Comparées aux écoulements chargés, les laves torrentielles présentent généralement les caractéristiques suivantes :*

- *contrairement au charriage dont le débit moyen varie de façon graduelle, leur écoulement est très transitoire, constitué de bouffées successives indépendantes, qui se présentent essentiellement sous la forme de vagues de l'ordre de quelques mètres de hauteur se propageant à une vitesse de quelques m/s ;*
- *leur concentration en matériau solide est très élevée. Généralement supérieure à 50 % en volume, elle peut atteindre 80 % et plus, tandis qu'elle ne dépasse pas 20 à 40 % pour les écoulements hyperconcentrés ;*
- *le matériau solide des coulées présente une large étendue granulométrique. La présence d'éléments fins, tels que des argiles, contribue, en mélange avec l'eau, à la présence d'un fluide interstitiel aux propriétés déterminantes pour le comportement d'ensemble de la coulée. Le comportement de cette dernière étant de ce fait relativement homogène d'apparence monophasique, contrairement aux écoulements chargés qui sont clairement biphasiques, ce qui se traduit dans les faits par les caractéristiques suivantes :*
  - *un faible tri granulométrique tout au long de l'écoulement et notamment lors de la phase de dépôt,*
  - *un comportement intermédiaire entre fluide et solide qui, sur de nombreux aspects, ressemble plus à l'écoulement d'une pâte que d'un liquide à proprement parler. Ceci se traduit, notamment lorsqu'une zone de pente plus faible est atteinte, par un arrêt « en masse » de la coulée, avec une épaisseur de dépôt importante et la présence d'un bourrelet frontal. Un tel comportement se traduit également par la formation de bourrelets latéraux de forme linéaire, résultant du dépôt sur les bords du chenal d'une certaine quantité de matériau lors de la propagation des bouffées. »*

Extrait du « Guide PPR » – Note complémentaire – Les crues des torrents de montagne version provisoire 2008, non parue.

Enfin, elles ont la capacité de transporter de gros à très gros blocs (volume de l'ordre du mètre cube). Ces gros blocs ont par ailleurs tendance à se rassembler à l'avant des bouffées de laves torrentielles, constituant ainsi un « front » de lave nettement différent du « corps » de lave qui le suit [41].

#### *Conditions d'écoulement/d'étalement et estimation des niveaux*

Les laves torrentielles présentent un comportement totalement différent des fluides newtoniens (comme l'eau) pour lesquels la contrainte de cisaillement est directement proportionnelle au gradient de vitesse.

Ce sont des fluides à seuil, c'est-à-dire que l'écoulement n'est possible qu'à partir du moment où une valeur limite de la contrainte de cisaillement est dépassée. On peut donc avoir une épaisseur importante de lave sur une pente significative sans qu'il y ait de mouvement des matériaux.

L'estimation des conditions d'écoulement et d'étalement fait donc appel à des lois de comportement spécifiques qui dépendent du type de lave (comportement viscoplastique pour les laves à matrice boueuse, frictionnel-collisionnel pour les laves granulaires, frictionnel-visqueux pour les Lahars).

Nous ne développons pas plus cette partie qui reste l'affaire de spécialistes et invitons le lecteur à se reporter au chapitre 4 de l'ouvrage « Torrents et rivières de montagne – Dynamique et aménagement » [41].

#### **Ce qu'il faut retenir en priorité**

Il faut être avant tout capable de déceler si des écoulements de laves torrentielles peuvent se déclencher sur le bassin-versant et venir impacter ou atteindre le système de protection étudié.

Une erreur à ce niveau invaliderait toute la démarche ultérieure d'analyse des risques, les conditions d'écoulement et de dépôt étant très différentes entre charriage et laves torrentielles (sans parler des débits, des volumes, des effets dynamiques des écoulements, etc.).

Sur certains torrents, où le transport solide intervient indifféremment sous forme de charriage et de coulées de laves torrentielles, plusieurs scénarios doivent être analysés pour tenir compte des dynamiques très différentes de ces deux types d'écoulements.

Pour un même phénomène, il est recommandé, dans un contexte de forte incertitude, de considérer plusieurs durées d'écoulement, correspondant de ce fait à des volumes d'apports solides plus ou moins importants.

### **3.9.2. Spécificités liées au milieu marin**

Dans un contexte maritime, les caractéristiques hydrauliques locales doivent être décomposées, calculées et justifiées en termes de :

- jet de rive (*swash*) ;
- caractéristiques de la houle (hauteur, longueur d'onde, déferlement, etc.) et run-up ;
- phénomènes de réflexion ;
- courants latéraux ;
- phénomènes de transmission :
  - à travers l'ouvrage,
  - par-dessus l'ouvrage : franchissements,
  - par les côtés : diffraction ;
- phénomènes de dissipation : déferlement sur l'ouvrage et frottements au sein de l'ouvrage.

Les matériaux solides mis en mouvement pendant les événements, principalement sous l'effet des vagues, font également partie des caractéristiques à déterminer car ces matériaux peuvent avoir des impacts en termes d'aléas de défaillance du système de protection (déstructuration de perrés sous le choc de galets par exemple), voire en termes de conséquence dans la zone protégée (impact de galets sur les bâtiments voire les personnes, apport de sable et obstruction du système d'assainissement).

### 3.10. Étude 8 – Ouvrages inclus

Cette étude élémentaire a pour objectif l'identification, la localisation et la caractérisation des ouvrages inclus dans le système de protection : canalisations, bâtiments, autres structures anthropiques, ouvrages hydrauliques ponctuels, etc.

Deux grands types d'ouvrages inclus peuvent être identifiés :

- les ouvrages participant au fonctionnement hydraulique du système de protection : vannes, clapets, etc. ;
- les ouvrages constituant des facteurs aggravants pour la sûreté du système de protection : canalisations, bâtis encastrés, etc.

Le premier type peut avoir des conséquences en matière de scénarios de défaillance hydraulique du système, les deux types peuvent avoir des impacts en termes de scénarios de défaillance structurelle à la suite soit d'une rupture directe de l'ouvrage, soit d'un phénomène se produisant à la transition (*voir Chapitre 2 : paragraphe 2.4.4.*) entre l'ouvrage et le reste de la digue.

Les [Figures 5-41](#) et [5-42](#) (*voir aussi Figure 2-92*) donnent différents exemples d'ouvrages inclus caractéristiques.

Cette étape de la démarche d'analyse de risque est en lien avec l'activité de diagnostic du système de protection et plus particulièrement avec sa partie recueil des données (*voir Chapitre 10*).

La [Figure 5-43](#) décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la [Figure 5-44](#) détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.

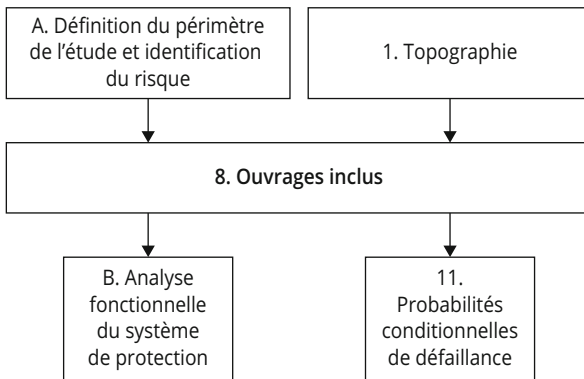


**Figure 5-41.** Exutoire sur le talus côté ZP d'une digue (A) d'un collecteur des eaux pluviales de la chaussée, situé en crête (B) (Source : R. Tourment).





**Figure 5-42.** Local d'exploitation pour les agents chargés de l'entretien, inclus dans une levée du Val-d'Orléans au lieu-dit de « La Croix Tibi » (Source : R. Tourment).

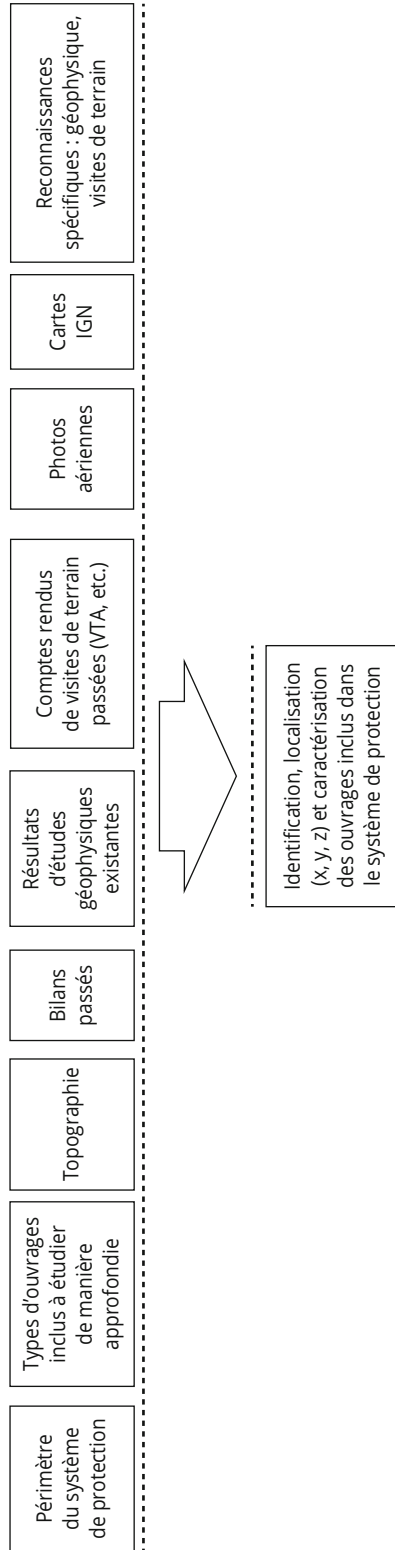


**Figure 5-43.** Liens entre l'étude 8 et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).

## 3.11. Étude 9 – Autres actions et facteurs aggravants

### 3.11.1. Cas général

Cette étude élémentaire a pour objectif l'identification, la description et la **caractérisation quantitative** des éventuels autres facteurs aggravants et sources d'actions envisageables sur le système de protection.



**Figure 5-44.** Flux de données pour l'étude élémentaire 8 (Source : B. Beullac).  
VTA : visite technique approfondie.

Ces facteurs aggravants, qui auront été préalablement identifiés dans l'étude d'identification du risque (étude élémentaire A) sont par exemple :

- la végétation ;
- les animaux fouisseurs : principalement le blaireau et plus marginalement le ragondin, le rat musqué, le castor, le lapin ou encore la taupe (*voir* encadré ci-après pour plus d'informations) ;
- les embâcles de glace ;
- les séismes ;
- la circulation sur les digues ;
- les chocs liés à la navigation ;
- le battillage dû à la navigation ;
- l'exploitation de gravières à proximité immédiate des digues ;
- les activités agricoles (irrigation à proximité immédiate des digues, etc.).

### Animaux fouisseurs

- Au dire des témoignages des nombreux gestionnaires français de digues qu'Irstea a pu rencontrer ces 25 dernières années, seul le **blaireau** a été mentionné comme étant responsable de dégâts importants sur les parties en remblai d'ouvrages hydrauliques de taille importante et régulièrement entretenus (un cas d'incident [EISH] par terrier de castor a toutefois été recensé en novembre 2016 dans la base ARIA sur une levée de Loire – Sully-sur-Loire). C'est ainsi incontestablement l'animal dont il faut surveiller l'apparition dans une digue. Un entretien et une surveillance adéquats des talus sont dissuasifs et permettent de détecter rapidement l'installation inopportune d'une population.
- **La taupe**, ne creusant que des galeries superficielles, ne porte pas atteinte à la sécurité des digues. Il en est de même pour **le lapin**, du moins tant que l'on ne laisse pas se développer une population envahissante, susceptible de dégrader la surface des talus. C'est surtout pour les digues à charge temporaire (protection contre les crues) que de telles dégradations sont potentiellement gênantes : des terriers de lapins creusés, en nombre et à sec, sur le talus côté cours d'eau de la digue, favorisent, en effet, l'imbibition des premiers décimètres du parement lors de la crue, ce qui peut le rendre instable à la décrue.
- Enfin, **rat musqué**, **ragondin** et **castor** sont des fouisseurs aquatiques. Ils ne peuvent donc porter atteinte qu'aux digues à charge permanente ou aux tronçons de digues de protection contre les inondations situées à proximité immédiate d'une berge de cours d'eau permanent ou quasi permanent, ou côté terre d'un marécage. Outre que le milieu doit leur être favorable, ils ne peuvent creuser des terriers qu'à partir de talus subverticaux, non protégés par un ouvrage de génie civil et en contact avec l'eau.

L'installation d'animaux fouisseurs sur un ouvrage en remblai est favorisée par la présence d'un couvert végétal arbustif.

Les Figures 5-45 à 5-50 illustrent différents types de facteurs aggravants pouvant être observés sur les ouvrages de protection.

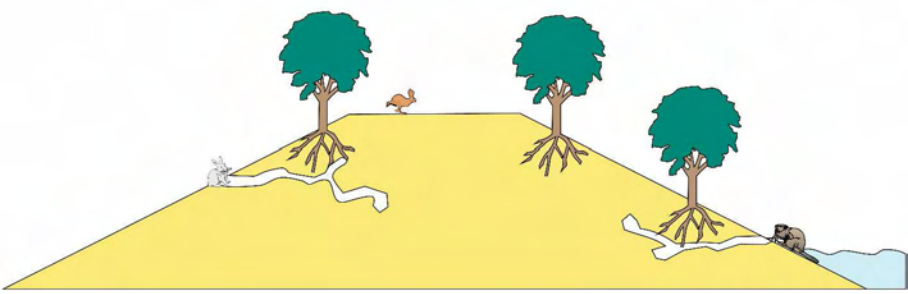


**Figure 5-45.** Travaux (non autorisés) dans le remblai d'une digue, réalisés par les habitants d'un bâtiment encastré dans celle-ci (Source : R. Tourment).



**Figure 5-46.** Batillage dû à la navigation sur les digues de l'île des Impressionnistes (Croissy-sur-Seine) (Source : R. Tourment).





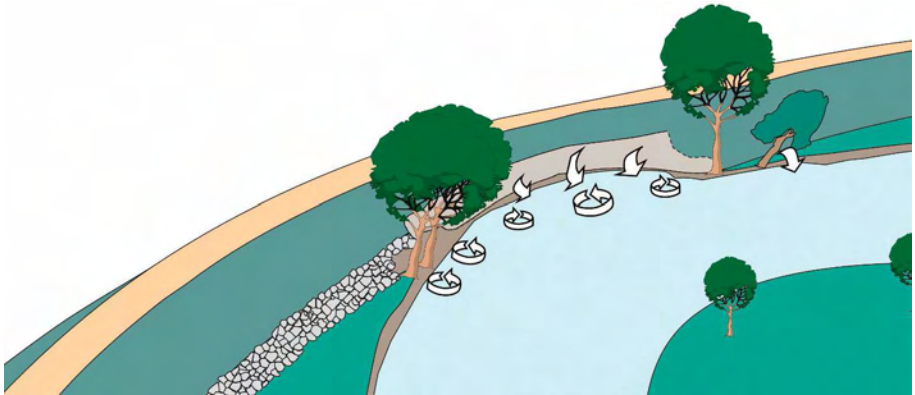
**Figure 5-47.** Terriers d'animaux fouisseurs et racines des arbres (particulièrement en décomposition) : des aggravants vis-à-vis des phénomènes d'érosion interne et d'effondrement des remblais (D'après [31]).



**Figure 5-48.** Terrier de blaireau sur une digue (échelle : la largeur du sac est supérieure à 30 cm) (Source : R. Tourment).



**Figure 5-49.** Paire de ragondins (un adulte et un jeune) nageant à proximité d'une digue (Source : R. Tourment).



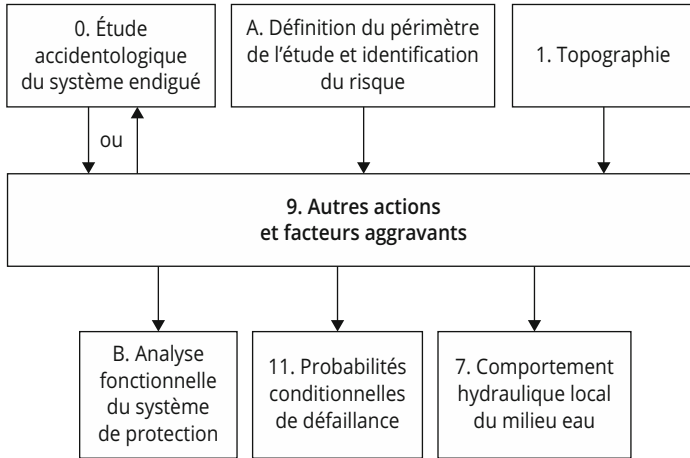
**Figure 5-50.** Présence d'arbres en pied de talus pouvant favoriser l'apparition de phénomènes d'érosion externe des ouvrages, par la formation de courants tourbillonnants ou par basculement (D'après [31]).

Cette étape de la démarche d'analyse de risque est en lien avec l'activité de diagnostic du système de protection et plus particulièrement avec sa partie recueil des données (voir Chapitre 10).

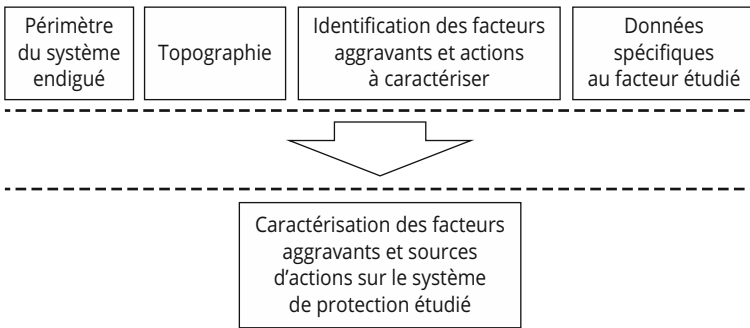
On pourra se référer au guide « Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai » [48] pour plus d'information sur les implications négatives (mais également positives) de la présence de végétation arborée sur les digues.



La **Figure 5-51** décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la **Figure 5-52** détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.



**Figure 5-51.** Liens entre l'étude 9 et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque.



**Figure 5-52.** Flux de données pour l'étude élémentaire 9 (Source : B. Beullac).

### 3.11.2. Spécificités torrentielles

En aucun cas, il faut considérer que les évolutions morphologiques prévisibles du lit (dont l'évolution systématique du fond) sont des facteurs aggravants car leur quantification et prise en compte est indispensable dans l'estimation des niveaux atteints en crue.

#### 3.11.2.1. Corps flottants, voire transport de très gros blocs et/ou de débris divers

En période de crue, il est fréquent que de grandes quantités de bois soient arrachées aux berges et dans les lits, puis transportées par flottaison.

En particulier, au passage de sections ou de ponts aux arches trop étroites, ces flottants peuvent s'amonceler et former des embâcles, provoquant ou aggravant le débordement du torrent et les évolutions morphologiques (érosions de berges, incision du lit, affouillements localisés, etc.).

Les dernières crues des Pyrénées en juin 2013 ont, une nouvelle fois, mis en évidence l'impact important et néfaste de ces flottants.

L'arrêt de flottants s'accompagne en général d'un amoncellement de matériaux à l'arrière, ce qui peut augmenter l'amplitude des respirations aléatoires du lit. Des survitesses peuvent également se produire à proximité des amas d'arbres et augmenter les phénomènes d'affouillements si ces amas surviennent à proximité du parement de digue.

Les flottants peuvent également causer de graves dommages aux bâtiments, aux infrastructures et aux équipements, en raison de l'effort d'impact ponctuel qu'ils imposent. Souvent, les constructions et les ouvrages les plus exposés à ces phénomènes destructeurs sont ceux dont l'implantation jouxte le lit mineur des cours d'eau, dont les digues.

Les arbres sur les digues peuvent être arrachés et créer une amorce de brèche. Les lits étant relativement étroits en contexte torrentiel, il suffit que l'arbre se couche dans le torrent en renvoyant l'écoulement vers la digue pour que cette dernière soit rapidement détruite.

La prise en compte des facteurs aggravants que sont les embâcles par des flottants est essentielle, car ces derniers ont souvent été à l'origine de débordements et/ou d'aggravations notables des évolutions morphologiques (notamment des érosions de berges marquées).

Il n'existe pas de moyen de prédire ces phénomènes ni de les prendre en compte dans des calculs hydrauliques. L'appréciation des risques de formation d'embâcles reste donc relativement subjective.

Même s'il est illusoire de vouloir localiser avec précision tous les points critiques, il existe toutefois un certain nombre de configurations défavorables qui doivent inciter le praticien à prendre en compte ce facteur aggravant. Principalement, il s'agit du passage de singularités marquées, comme des ponts étroits, surbaissés ou avec piles centrales, des méandres brusques, des seuils ou des barrages, des contractions brusques du lit, etc.

Pour limiter ce phénomène, des interventions préventives de traitement de la végétation sont souvent efficaces, mais selon l'étendue du bassin, cela peut nécessiter des interventions de grande envergure.

#### 3.11.2.2. Autres aléas de montagne : avalanche, chute de blocs, glissement de terrain

Les autres aléas de montagne peuvent impacter directement ou plus souvent indirectement les systèmes de protection : augmentation de la charge sédimentaire, du volume de laves torrentielles, etc.

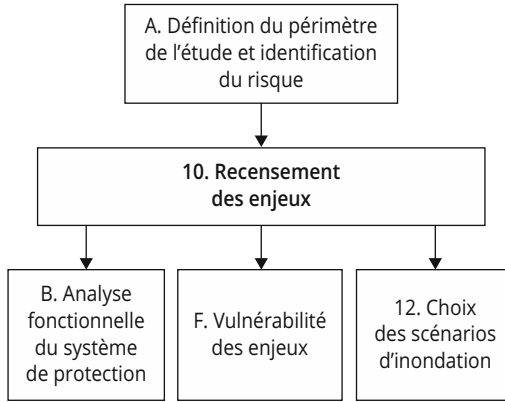
## 3.12. Étude 10 – Recensement des enjeux

Cette étude élémentaire a pour objectif la localisation et la description des enjeux présents dans la zone protégée (populations, types d'occupation du sol, réseaux, ERP, etc.).

Ce travail doit notamment être mené sur la base des données disponibles dans les dossiers d'ouvrage, de photos aériennes, de la cartographie IGN et des différentes bases de données existantes et/ou mises à disposition (*voir* un exemple de résultat sous forme cartographique [Figure 4-9](#)). L'utilisation d'un SIG est avantageuse pour cette étude, on pourra y reporter chaque type d'enjeu recensé et ses différentes classes dans une couche séparée, et utiliser les fonctions du SIG pour représenter les informations de manière brute ou croisée.

Le paragraphe 8. du Chapitre 4 donne des généralités sur l'étude des conséquences et cite différents référentiels techniques pouvant donc guider la réalisation de cette étude de recensement des enjeux.

La [Figure 5-53](#) décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la [Figure 5-54](#) détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.



**Figure 5-53.** Liens entre l'étude 10 et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).

### 3.13. Étude B – Analyse fonctionnelle du système de protection

L'analyse fonctionnelle a pour objet la décomposition du système de protection et la caractérisation de son fonctionnement, aux différentes échelles qui le caractérisent. Le fonctionnement du système de protection doit être analysé du point de vue des interactions que lui impose son environnement (milieux extérieurs [milieux eau, zones protégées, autres] réglementation, état de l'art, etc.) et en tenant compte des éléments qui constituent le système (les digues et autres ouvrages et leurs composants, les éventuels éléments naturels). Il doit donc être caractérisé 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 contraintes (contraintes notamment imposées par l'environnement et la réglementation) du système de protection (*voir* [paragraphe 1.2.](#)).

Elle consiste ensuite en une analyse fonctionnelle interne, identifiant l'ensemble des fonctions techniques (*voir* [paragraphe 1.2.](#)) hydrauliques des éléments du système de protection et des fonctions techniques structurelles des composants formant ces éléments.

Le niveau de raffinement de l'analyse fonctionnelle interne structurelle est déterminé et justifié en fonction des besoins ultérieurs de l'analyse de la défaillance du système endigué :

- pour les ouvrages et systèmes de génie civil, le niveau de détail de l'analyse sera le composant de génie civil étudié : par exemple, le corps de digue en remblai, le drain, le revêtement de protection, les interfaces, etc. ;
- pour les éventuels ouvrages et systèmes autres que génie civil tels que les ouvrages hydrauliques traversants (canalisations, clapets antiretour, vannes, etc.) ou les pompes,

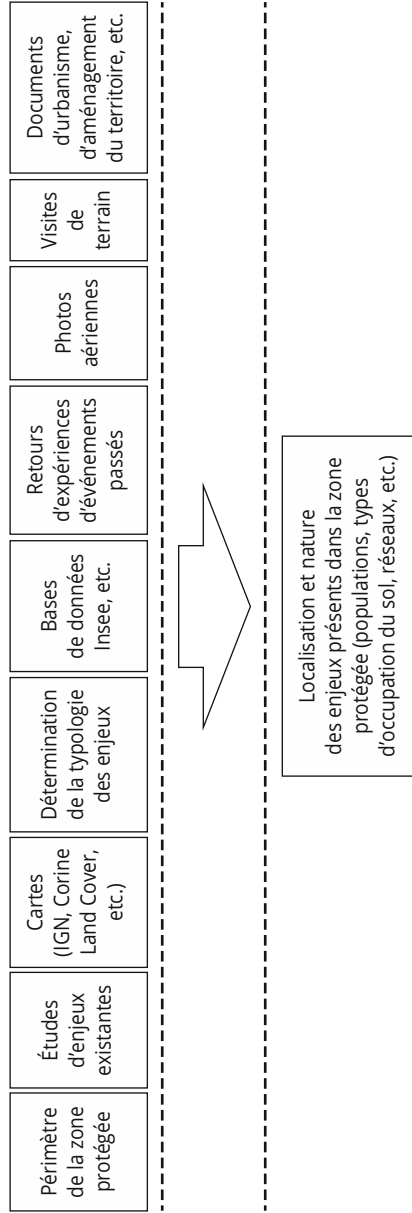


Figure 5-54. Flux de données pour l'étude élémentaire 10 (Source : B. Beullac).

les éléments constitutifs de l'équipement susceptibles de dysfonctionnements devront être pris en compte : par exemple, les articulations, les échelons, les regards, etc.

Les éventuelles fonctions de sécurité (*voir* [paragraphe 1.2.](#)) associées aux fonctions techniques identifiées et les barrières de sécurité qui les portent peuvent alors être identifiées.

Dans un système bien conçu, les fonctions techniques répondent à l'ensemble des objectifs définis au travers des fonctions principales et des fonctions contraintes identifiées lors de l'analyse fonctionnelle externe.

### Remarque

L'analyse fonctionnelle constitue la base sur laquelle est construite l'analyse de la défaillance du système de protection. Une cohérence totale doit donc exister entre l'analyse fonctionnelle et l'analyse de la défaillance. Par ailleurs, l'analyse fonctionnelle ne doit pas se limiter à une simple description du système et de ses composants, mais constituer une analyse structurée, avec un formalisme facilitant le passage à l'étape d'analyse de la défaillance.

L'analyse fonctionnelle peut être réalisée par application de la méthode présentée au [paragraphe 1.](#) du [Chapitre 9.](#) Les résultats de l'analyse fonctionnelle peuvent être exposés sous la forme de tableaux de synthèse (*voir* [Chapitre 9 : paragraphe 1.](#)) répertoriant les différentes granularités d'analyse du système de protection (*voir* [paragraphe 2.1.](#)).

La [Figure 5-55](#) décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la [Figure 5-56](#) détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.

## 3.14. Étude C – Analyse de la défaillance du système de protection

Reposant directement sur les résultats de l'analyse fonctionnelle (*voir* [paragraphe 3.13.](#)), l'objectif de cette partie de l'analyse de risque est d'évaluer la possibilité de défaillance des fonctions techniques hydrauliques des éléments qui composent le système de protection et de défaillance structurelle des composants qui constituent ces éléments du système. Cette analyse doit aboutir à l'identification et à la description des différents scénarios de défaillance envisageables à l'échelle :

- du système endigué : 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 qui constituent le système de protection : les scénarios de brèches pouvant résulter, pour chacun des éléments du système, de scénarios de défaillances structurelles des composants le constituant.

### Remarque

L'analyse fonctionnelle constitue la base sur laquelle est construite l'analyse de la défaillance du système de protection. Une cohérence totale doit exister entre l'analyse fonctionnelle et l'analyse de la défaillance.

L'analyse de la défaillance peut être réalisée par application de la méthode présentée au [paragraphe 2.](#) du [Chapitre 9.](#)

Les résultats de l'analyse de la défaillance du système de protection consistent en premier lieu en des tableaux d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)

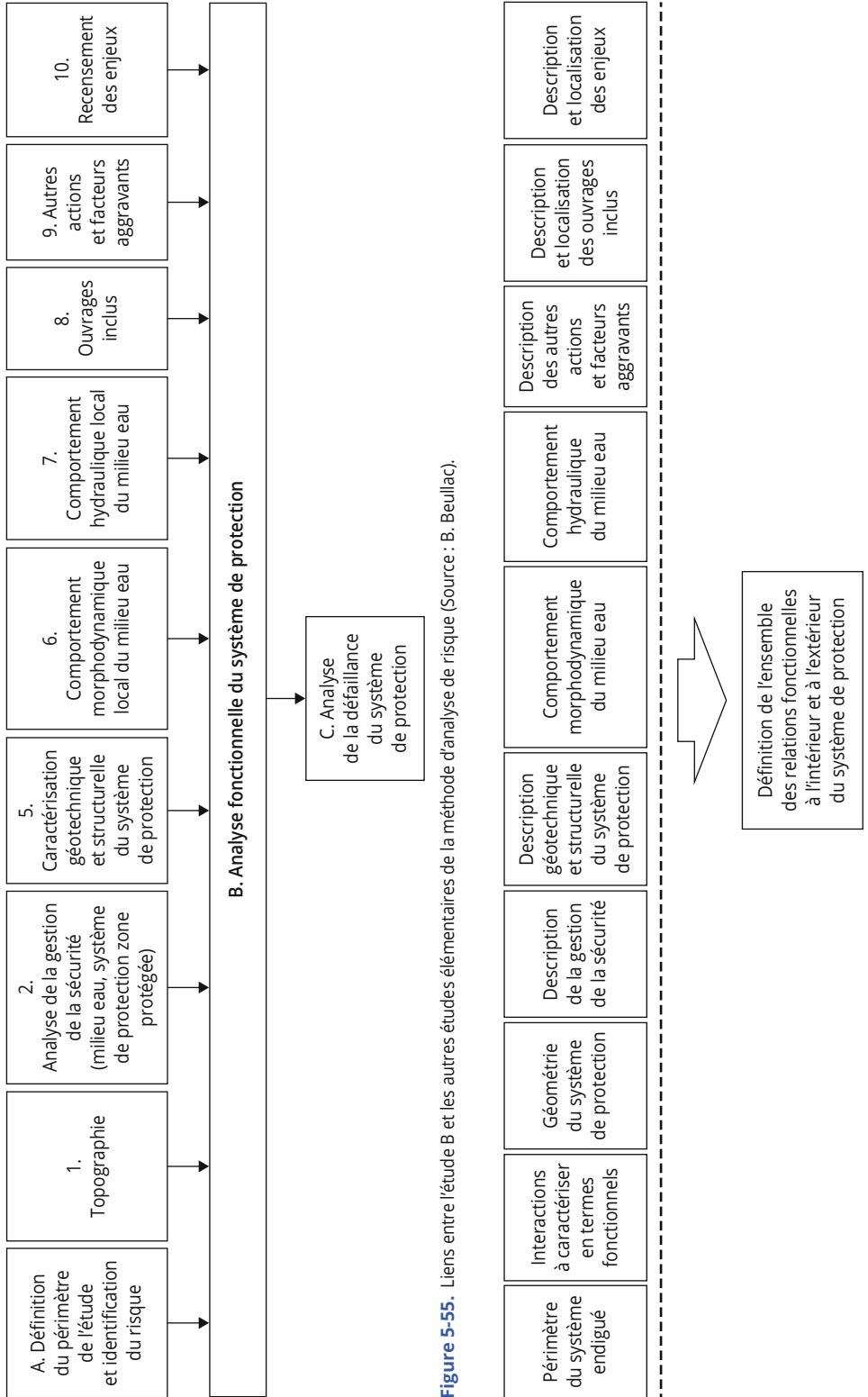


Figure 5-55. Liens entre l'étude B et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).

Figure 5-56. Flux de données pour l'étude élémentaire B (Source : B. Beullac).



récapitulant, pour chaque fonction technique (structurelles et hydrauliques), des éléments du système de protection, les modes de défaillance associés, leurs causes et leurs effets (voir Tableaux 9-VII et 9-XI).

Ces résultats consistent ensuite en la représentation de l'ensemble des scénarios de défaillance (structurels et hydrauliques) envisageables pour le système de protection. Pour permettre une meilleure lisibilité des enchaînements et combinaisons d'événements qui composent les scénarios de défaillance, ces derniers doivent être représentés sous la forme d'arbres (voir Chapitre 9 : paragraphe 3.). Ces représentations faciliteront ensuite l'activité de diagnostic et le calcul des probabilités de défaillance.

Cette étape de la démarche d'analyse de risque est en lien avec l'activité de diagnostic du système de protection et plus particulièrement avec le choix des scénarios de défaillance à considérer pour mener le diagnostic (voir Chapitre 10). En effet, ce choix repose en grande partie sur les résultats de l'analyse de la défaillance du système de protection.

La Figure 5-57 décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la Figure 5-58 détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.

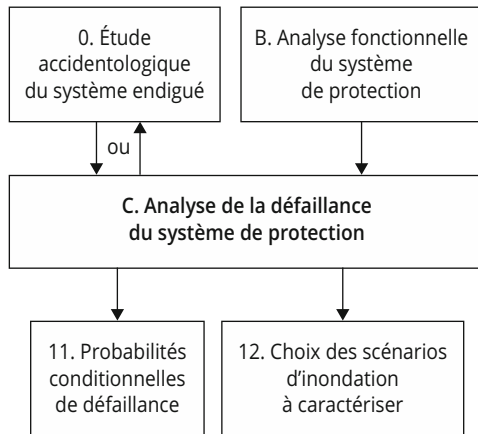


Figure 5-57. Liens entre l'étude C et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).

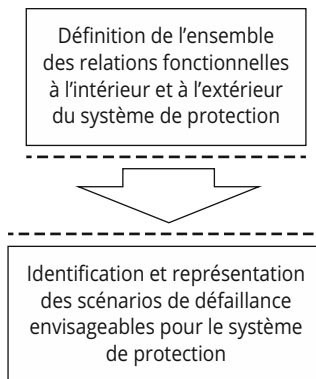


Figure 5-58. Flux de données pour l'étude élémentaire C (Source : B. Beullac).

## 3.15. Étude 11 – Probabilités conditionnelles de défaillance

### 3.15.1. Cas général

Cette étude élémentaire, qui repose notamment sur les résultats de l'analyse de la défaillance structurelle, correspond au diagnostic structurel de la performance du système de protection. Dans le cadre d'une analyse de risque, ce diagnostic (*voir Chapitre 10*) a pour finalité l'estimation des probabilités conditionnelles (pour des conditions d'actions hydrauliques données) de défaillance structurelle du système de protection (probabilités d'ouvertures de brèches).

Les résultats à produire, pour chaque type de section en travers de digue identifiée lors de l'analyse fonctionnelle interne structurelle (*voir paragraphe 3.13. et Chapitre 9 : paragraphe 1.*), sont les suivants :

1. identification et caractérisation des différents tronçons homogènes (pouvant éventuellement correspondre à des points singuliers, tronçon de « longueur nulle ») en fonction :
  - de leurs géométries et de leurs sections en travers (*voir paragraphe 3.2.*),
  - des données géotechniques disponibles ou obtenues lors des éventuelles études complémentaires (*voir paragraphe 3.7.*),
  - du comportement morphodynamique du milieu eau (*voir paragraphe 3.9.*) au droit de chacun d'entre eux : érosion, dépôt de matériaux, etc.,
  - de la présence d'ouvrages inclus (*voir paragraphe 3.10.*) : canalisations, bâti, etc.,
  - de la nature des éventuels facteurs aggravants (*voir paragraphe 3.11.*) : végétation ligneuse, terriers d'animaux fouisseurs, activités humaines, etc. ;
2. choix expert (parmi les scénarios déterminés lors de l'analyse de la défaillance ; *voir paragraphe 3.14. et Chapitre 9 : paragraphe 2.*) et justification des scénarios de défaillance structurelle à considérer pour chaque tronçon homogène préalablement identifié et en fonction de ses caractéristiques (les scénarios pourront être différents selon les tronçons) ;
3. estimation de la performance, vis-à-vis de la défaillance structurelle (ouverture de brèche), des composants de digues (*voir Chapitre 2 : paragraphe 5.2.*) et de leurs éventuelles barrières de sécurité associées (*voir Chapitre 4 : paragraphe 9. et Chapitre 5 : paragraphe 1.2.4.*) :
  - pour chaque tronçon homogène préalablement identifié,
  - pour chaque scénario de défaillance structurelle retenu,
  - pour les différents événements hydrauliques préalablement identifiés ;
4. estimation de l'incertitude ou de l'intervalle de confiance sur les résultats de l'estimation de la performance ;
5. traduction des résultats de l'estimation de la performance en matière de probabilités conditionnelles (*voir Chapitre 4 : paragraphe 6.2.*), c'est-à-dire en matière de probabilité de rupture pour une intensité d'aléa donnée pour tous les scénarios de défaillance structurelle envisagés (si la méthode d'estimation de la performance ne la produit pas directement). Le calcul de la probabilité de réalisation de chaque scénario de défaillance est facilité par l'application d'une méthode de représentation par arbres (*voir Chapitre 9 : paragraphe 3.*) ;
6. estimation des probabilités annuelles (*voir Chapitre 4 : paragraphe 6.2.*) de défaillance pour chaque événement hydraulique ;
7. détermination des niveaux de sûreté et de danger des ouvrages (*voir Chapitre 3 : paragraphe 3.*).

Pour une meilleure compréhension et exploitation par les services gestionnaires et les services de contrôle, il est intéressant que soit produit un rendu cartographique, à une échelle adaptée, de l'ensemble de ces résultats.

Les Tableaux 4-II et 4-III donnent respectivement des exemples d'équivalences entre probabilité qualitative et semi-quantitative pour des probabilités conditionnelles et annuelles.

La Figure 5-59 décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la Figure 5-60 détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.

### 3.15.2. Spécificités liées au milieu torrentiel

Une étude accidentologique [3] a été réalisée dans le cadre de l'étude de dangers des digues du torrent de La Salle (05) [30].

Cette étude recense, dans la base de données RTM, 822 événements ayant pu provoquer une dégradation importante ou une destruction de digues sur 150 ans (Figure 5-61). Le nombre de digues n'étant pas connu, il est difficile d'en tirer des conclusions en matière de probabilités. Cela a été fait pour le seul département des Hautes-Alpes à partir du recensement des digues de la base de données « Bardigues ».

*« 248 événements susceptibles d'avoir généré des destructions de digues sont recensés dans la « Base de données RTM – Partie Événements » sur les Hautes-Alpes (soit près de 30 % des événements de ce type recensés au niveau national) sur une période d'environ 300 ans. La probabilité de « destruction » (rupture partielle, brèche, etc.) de digues torrentielles est de  $1,6.10^{-3}$  (établie sur 300 ans) et  $1,8.10^{-3}$  (au cours du XX<sup>e</sup> siècle). » [30].*

La majeure partie des dégradations aux digues résulte d'érosions externes (attaques directes par le torrent ou la rivière torrentielle) ou d'affouillement des ouvrages.

Les évolutions morphologiques du lit sont également très importantes :

- une incision du lit peut provoquer une déstabilisation d'un parement appareillé ou rigide ;
- l'engravement complet ou partiel de la section d'écoulement peut provoquer le débordement et la divagation du torrent en dehors de son lit ordinaire.

En divaguant, l'orientation des écoulements peut être modifiée et venir impacter perpendiculairement le parement de digue ; les contraintes sur la structure sont alors beaucoup plus fortes avec possibilité d'apparition d'une fosse en pied à l'aval immédiat.

L'arrêt intempestif de flottants ou la présence d'un point dur sur la rive opposée (affleurements rocheux, voire simplement existence d'un bosquet d'arbres suffisamment résistants) peut engendrer les mêmes conséquences en déviant les écoulements en direction de la digue.

Les débordements par surverse se produisent plutôt sur les cônes de déjection et dans les zones de confluence, à la suite de l'engravement total du lit par des matériaux, comme ce fut notamment le cas sur le cône de déjection du Chagnon à Vars en 1957 où la digue rive droite a été entièrement submergée à Ste-Marie (sans rupture).

Les extrémités aval des digues, notamment lorsqu'il y a un élargissement brusque du lit à l'aval, sont également plus propices à la surverse, puisque les phénomènes d'engravement y sont plus marqués par dépôt régressif (cas du Vachères en 1856 même si aucune surverse ne s'est produite, un très fort engravement a été constaté vers l'extrémité aval de la digue datant de 1841-1843).

D'une manière générale, les deux extrémités des tronçons endigués sont par ailleurs plus menacées par les phénomènes d'érosions externes ou d'affouillement, si les entonnements sont mal conçus ou insuffisamment ancrés en profondeur et dans les berges (destruction de l'extrémité amont de l'ancienne digue du Fournel à L'Argentière-La-Bessée en 1916-1917 – destruction de la digue amont du Dévezet à Montgardin).

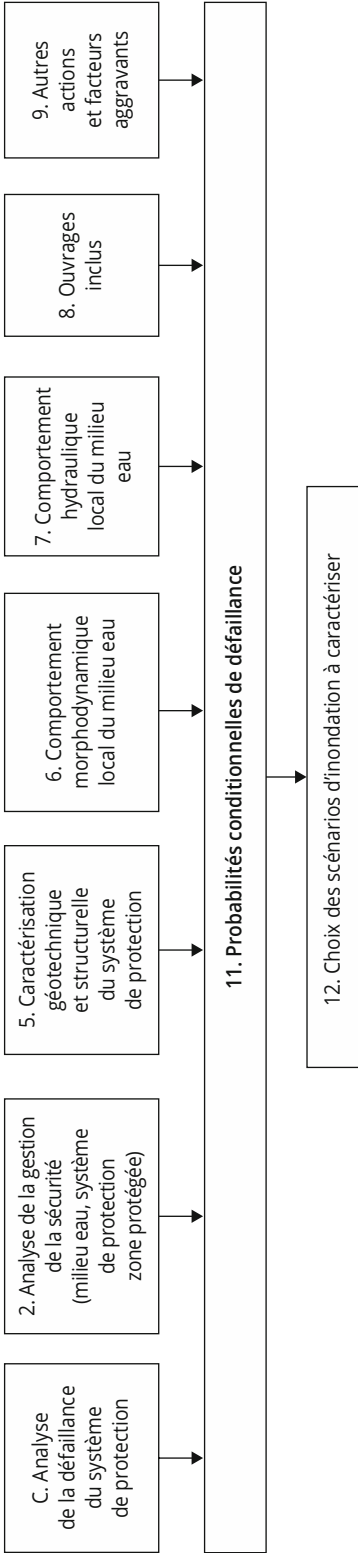


Figure 5-59. Liens entre l'étude 11 et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).

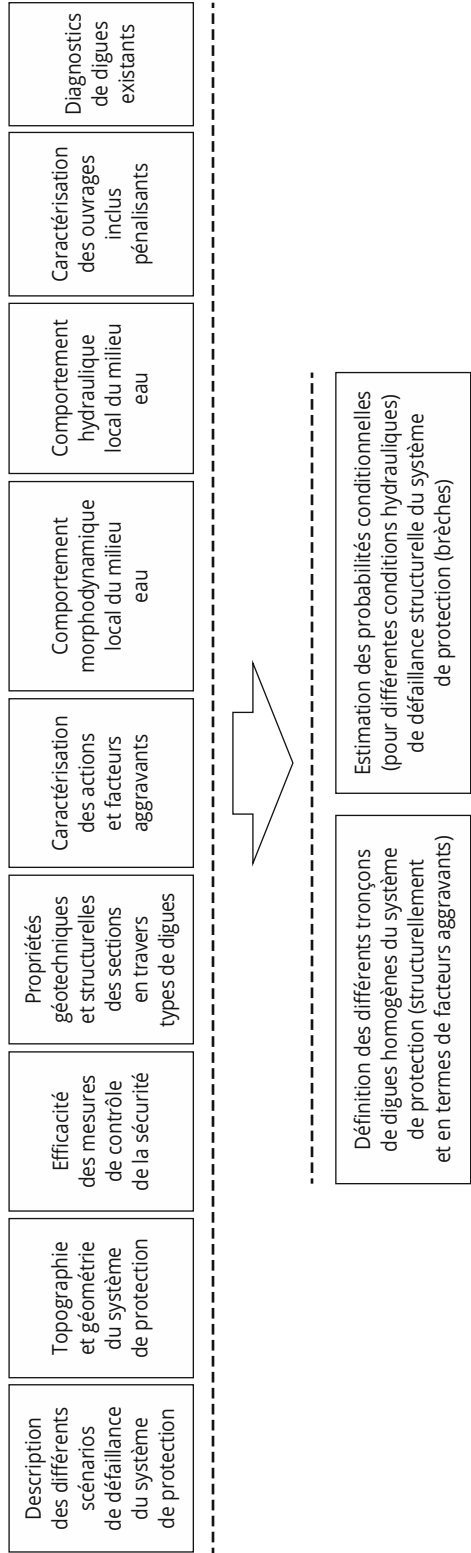


Figure 5-60. Flux de données pour l'étude élémentaire 11 (Source : B. Beullac).



**Figure 5-61.** Vue des brèches sur l'endiguement du Fournel après la crue de 1928 (Source : M. Henry, fonds ONF – RTM 05).

La déstabilisation massive du talus côté terre en crue et/ou du talus côté torrent à la décrue semble bien plus marginale ; nous n'avons retrouvé aucun exemple de défaillance de ce type sur des digues torrentielles.

Nous ne connaissons enfin aucun cas de rupture de digues en bordure de torrent par érosion interne. Il est vrai qu'après l'apparition d'une brèche, il est parfois difficile d'en déterminer la ou les cause(s) exacte(s) qui ont initié l'occurrence du désordre. Mais l'observation des ouvrages de protection durant de nombreuses crues tend à privilégier l'hypothèse précédemment émise de rupture par érosions externes et/ou phénomènes d'affouillement.

D'une manière générale, le risque d'érosion interne est très réduit dans le cas des torrents car les durées de crues sont relativement courtes ; le maintien d'une cote d'eau à un niveau élevé ne dure pas très longtemps, ce qui limite la saturation des sols. Dans le cas des écoulements de laves torrentielles, ce risque peut être d'emblée écarté.

Signalons à ce propos que des parements en enrochements secs sont parfois déstabilisés en l'absence de couche de transition ou de géotextile. Les écoulements en passant au travers du parement emportent les « fines » à l'arrière et provoquent une déstabilisation du parement. Il s'agit alors toujours d'une rupture par érosion externe due à une mauvaise conception de la protection.

En conclusion, les ruptures de digue par **érosion externe et/ou affouillement** paraissent prépondérantes dans un contexte torrentiel.

Des débordements par **surverse** (Figure 5-62) peuvent également se produire, notamment sur les cônes de déjection (zones de confluence) après engrèvement partiel ou total du lit. À noter toutefois que dans ce dernier cas, la rupture de digue n'est pas systématique si les apports en matériaux sont massifs (tendance au remblaiement de toute la zone) et ce d'autant plus que les digues torrentielles sont en général relativement basses.



**Figure 5-62.** Surverse sur la digue du ravin du Ponteillard à Mallemoisson (04) : section entre la route nationale et la Bléone – Crue du 22 mai 2012 (Source : M. Mandine, fonds ONF – RTM 04).

### 3.16. Étude 12 – Choix des scénarios d'inondation à caractériser

Cette étude a pour objectif de choisir, de manière experte, les scénarios de défaillance hydraulique ou de dépassement du niveau de protection apparent qui seront à considérer dans la suite de l'analyse de risque. Ces scénarios sont à choisir parmi les scénarios d'inondation identifiés au cours de l'analyse de la défaillance hydraulique du système de protection (voir paragraphe 3.14. et Chapitre 9 : paragraphe 2.). Le choix est notamment fait sur la base d'un diagnostic hydraulique du système de protection (voir II.7.3.2.2).

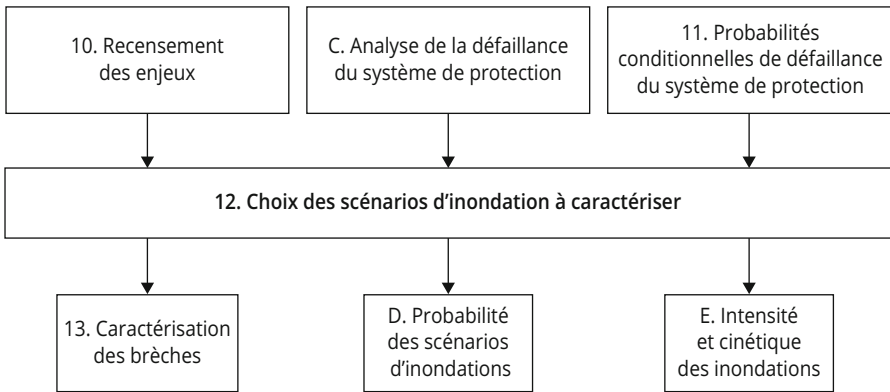
Ce sont, a minima :

- le ou les scénarios d'inondation, par défaillance hydraulique et/ou structurelle (voir paragraphe 2.1.) du système de protection, les plus probables : sur la base des résultats du diagnostic structurel (voir paragraphe 3.15. et Chapitre 10 : paragraphe 3.2.3.) du système de protection et de l'estimation des probabilités de défaillance des sous-systèmes hydrauliques autres que les digues (organes vannés, batardeaux, etc.) ;
- un ou plusieurs scénarios d'inondation sans défaillance du système de protection, notamment pour un niveau d'eau égal au niveau de protection du système d'endiguement (pour évaluer le fonctionnement nominal du système) et pour un niveau d'eau supérieur ou égal au niveau de sûreté (pour caractériser le risque résiduel associé au fonctionnement nominal du système de protection) ;
- le ou les scénarios d'inondation les plus dommageables pour les enjeux ;
- un ensemble de scénarios d'inondation permettant de couvrir l'ensemble de la variabilité de l'aléa d'inondation envisageable dans la zone protégée (en termes d'emprise et d'intensité des phénomènes dangereux d'inondation).

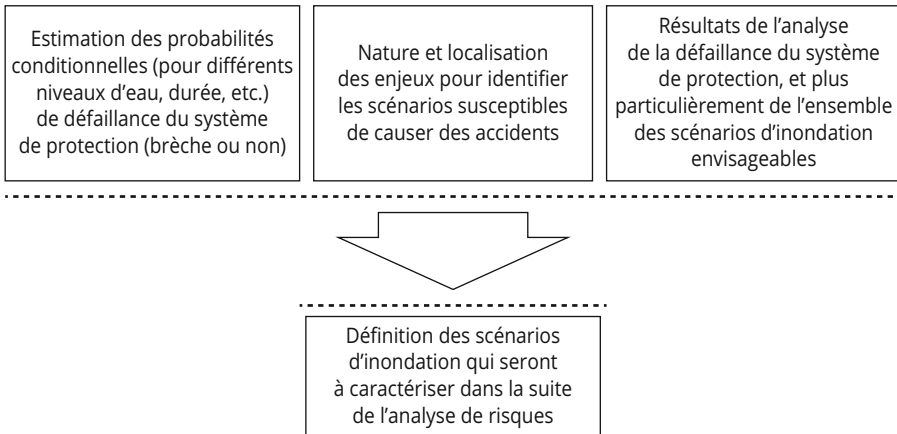
Cette étape de la démarche d'analyse de risque est en lien avec l'activité de diagnostic du système de protection. En effet, le choix des scénarios de défaillance à considérer constitue l'une des premières étapes de ce diagnostic (voir Chapitre 10).

La Figure 5-63 décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la Figure 5-64 détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.





**Figure 5-63.** Liens entre l'étude 12 et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).



**Figure 5-64.** Flux de données pour l'étude élémentaire 12 (Source : B. Beullac).

### 3.17. Étude 13 – Caractérisation des brèches (géométrie, cinétique, hydraulique)

L'objectif de cette partie de l'étude est de définir les caractéristiques des brèches qui sont impliquées dans les scénarios d'inondation choisis dans le cadre de l'étude élémentaire 12.

Les brèches considérées dans les scénarios de défaillance doivent être caractérisées en matière de géométrie finale, de cinétique d'élargissement et d'approfondissement, ainsi que de caractéristiques hydrauliques (hydrogrammes de brèches), en fonction de la nature des actions hydrauliques issues du milieu eau, des caractéristiques structurelles des tronçons de digues concernés et des résultats du diagnostic de la performance structurelle de l'ouvrage (notamment la nature des scénarios d'ouverture de brèche susceptibles d'être impliqués : érosion par surverse, érosion interne, combinaison de mécanismes, etc.).

Le cas des brèches sur des éléments de protection secondaire doit également être considéré, compte tenu de leur influence sur les caractéristiques des inondations résultantes.

La [Figure 5-65](#) présente une brèche partielle sur une digue littorale ; compte tenu de la présence des blocs du perré de protection du côté aval dans le sens d'écoulement à travers la brèche (ce perré étant généralement situé du côté eau), il s'agit vraisemblablement d'une brèche en retour (créée par un écoulement du côté protégé vers le côté eau).



**Figure 5-65.** Brèche partielle sur une digue littorale, le 3 mars 2010, après la tempête Xynthia du 28 février 2010 (Source : DREAL Pays-de-la-Loire).

Une attention particulière doit être portée au dimensionnement de la géométrie des fosses d'érosion qui accompagnent l'ouverture des brèches, et à leurs implications hydrauliques ([Figure 5-66](#)).

On se référera utilement à la section 8.10 de l'ILH [9, pp. 929-942] pour des considérations sur la formation des brèches et la prévision de leur taille.

Lors d'un événement hydrométéorologique (crue, tempête, etc.), le développement des éventuelles brèches atteint une taille d'équilibre, sauf dans le cas où les actions hydrauliques (*voir Chapitre 2 : paragraphe 2.2.1.*) viennent à s'abaisser rapidement, auquel cas la taille de la brèche est déterminée par le niveau maximum atteint par ces actions. En effet, lorsque la brèche s'élargit et/ou s'approfondit, les sollicitations d'origine hydraulique sur la digue ont tendance à diminuer à la suite de l'augmentation de la section et de la diminution de la charge.



**Figure 5-66.** Brèche et fosse d'érosion sur une digue de l'Agly en 2013 (Source : P. Mériaux)

Cette taille d'équilibre est déterminée par :

- la différence de niveau entre les deux côtés de la brèche (effet moteur) ;
- la résistance des composants de la digue aux différents mécanismes de dégradation (effet résistant).

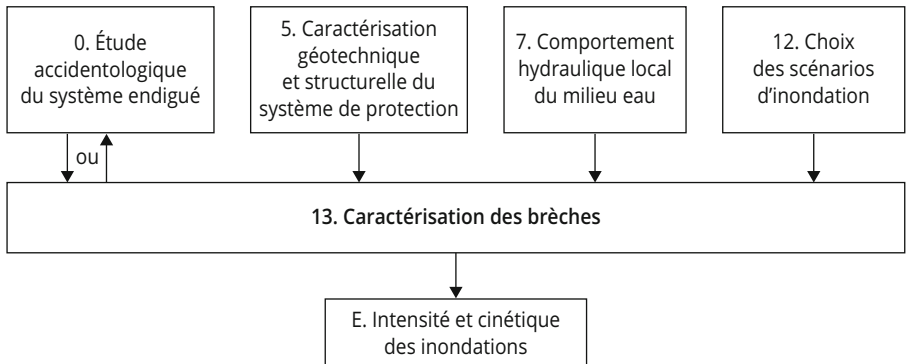
La détermination de la taille d'équilibre est donc un problème de résolution couplée entre hydraulique et mécanique, les niveaux amont et aval de la brèche étant eux-mêmes fonction de la taille de la brèche, en plus des caractéristiques hydrauliques du milieu eau (*voir paragraphe 3.9.*) et des écoulements dans la zone protégée (*voir paragraphe 3.19.*).

L'utilisation de modèles numériques plus ou moins complexes [38] existants (HEC RAS, RUPRO, CastorDigue, liste non exhaustive) adaptés à la problématique des digues est possible, une étude paramétrique étant nécessaire pour tenir compte de la variabilité des paramètres d'entrée. Notons que sans adaptation, les modèles développés spécifiquement pour les barrages ne conviennent généralement pas aux digues fluviales, compte tenu des différences essentielles entre les deux types d'ouvrages : condition hydraulique en amont de la brèche (réservoir qui se vide dans le cas d'un barrage, et écoulement parallèle avec un hydrogramme en entrée dans le cas d'une digue fluviale), condition hydraulique en aval de la brèche (écoulement généralement proche du monodimensionnel et concentré dans le cas d'un barrage, et plutôt proche du bidimensionnel et réparti dans le cas des digues), caractéristiques mécaniques de la fondation de l'ouvrage (souvent bien meilleures dans le cas des barrages), ce qui conditionne les fosses d'érosion.

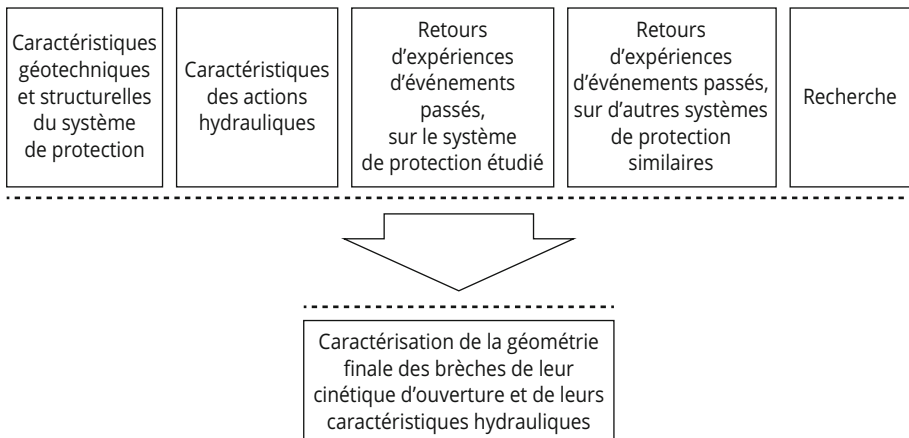
On peut également se fonder sur l'analyse des brèches historiques [27] pour déterminer les caractéristiques de brèches envisageables.

Le paragraphe 2.5. du Chapitre 2 dans le présent guide donne des généralités sur les brèches, présente les principaux paramètres influençant leur taille et leur cinématique, ainsi que des ordres de grandeur en matière de dimension et de débit dérivé.

La Figure 5-67 décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la Figure 5-68 détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.



**Figure 5-67.** Liens entre l'étude 13 et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).



**Figure 5-68.** Flux de données pour l'étude élémentaire 13 (Source : B. Beullac).

### 3.17.1. Spécificités pour le milieu torrentiel

La longueur des brèches est très variable ; elle n'est pas forcément directement liée au débit débordant, mais plutôt à l'ampleur des attaques de berges (érosions externes), elles-mêmes dépendantes de l'ampleur des divagations du cours d'eau.

Parfois d'ailleurs, des brèches peuvent apparaître sans débordement dans la zone protégée, simplement par érosion externe totale du remblai (et de la fondation) de la digue (Figure 5-69). Toute une portion de la digue est emportée, sans que le niveau d'eau dépasse le niveau des terrains derrière la digue.



**Figure 5-69.** Large brèche par érosion latérale liée à la divagation du lit : crue du Var de 1994 – Commune de Guillaumes (06) (Source : RTM 06).

En cas de débordement et/ou de surverse, on peut, à l'inverse, assister à un changement total de lit pour les raisons évoquées précédemment (diminution de la capacité de transport solide par charriage, qui accélère le phénomène d'engravement du lit et conduit rapidement à son engravement total), tout le débit peut alors transiter par la brèche.

Les surverses se produisent plutôt à la décrue dans les zones propices à l'engravement, le chenal endigué est alors partiellement ou totalement engravé par des matériaux (Figure 5-70) et les hauteurs d'eau sont relativement modérées. La brèche ne s'ouvre ainsi pas forcément jusqu'au niveau du lit avant engravement de ce dernier (fond du lit initial), c'est pourquoi les hauteurs de brèche peuvent être réduites. On assiste souvent à un relargage partiel des matériaux à l'arrière de la brèche, mais le débit en diminution ne peut en général reprendre tous les matériaux stockés dans le chenal.



**Figure 5-70.** Surverse sur la digue RD à la suite de l'engravement total du lit par charriage : torrent du Chagnon (Vars 05) – 1957 (Source : fonds ONF – RTM 05).

Un dépôt de matériaux se produit souvent à l'aval immédiat de la brèche, réduisant d'autant l'abaissement du fond de la brèche (lissage de la pente), mais ces dépôts peuvent être très dommageables pour des enjeux d'immédiate proximité de la digue.

Le fait que l'on soit plutôt à la décrue (débit en baisse et durée d'événement relativement courte en torrentiel) explique aussi pourquoi parfois la surverse ne conduit pas forcément à l'ouverture d'une brèche, en cas de surverse. Le contraire reste tout aussi probable selon les conditions de surverse.



En présence de laves torrentielles, des débordements limités par-dessus les digues sont en général peu pénalisants pour le remblai. Selon le volume débordant, ils s'arrêtent rapidement sous forme de bourrelets ou lobes (Figure 5-71). Les écoulements plus liquides qui suivent les bouffées de laves et qui peuvent divaguer à la suite de l'obstruction du chenal sont quant à eux plus érosifs, mais leur débit reste relativement faible.



**Figure 5-71.** Surverse d'une bouffée de lave sur la digue rive gauche : torrent du Verdarel, crue de 1988 (Source : fonds ONF - RTM 05).

Tous ces éléments mettent en évidence qu'il y a peu ou pas d'accroissement des contraintes hydrauliques par rupture de digue torrentielle (contexte avec « forte » pente) par rapport à une configuration sans digue où un changement de lit naturel produirait sensiblement les mêmes effets.

Ce propos est à nuancer dans le cas de lit fortement et « artificiellement » perché (exemple du Doménon (38), Figures 5-72 et 5-73).



**Figure 5-72.** Digue du Doménon après travaux - la flèche indique la maison engravée de la Figure 5-73 (Source : R. Tourment).





**Figure 5-73.** Maison engravée en rive gauche du Doménon, crue du 22-23 août 2005 (Source : ONF - RTM 38).

L'objectif ici n'est pas de nier les risques induits par la rupture d'une digue torrentielle, car les vitesses des écoulements torrentiels restent toujours très élevées du fait des fortes pentes, mais de mettre en évidence qu'il y a généralement bien moins d'augmentation de l'aléa entre une configuration avec et sans endiguement dans un contexte torrentiel que dans un contexte fluvial.

Si elles se produisent, les brèches en contexte torrentiel surviennent généralement brusquement, avec une arrivée brutale des écoulements sur la zone protégée.

Les délais de propagation seront de toute façon très brefs (au plus quelques minutes).

Le délai de rupture a été assimilé à un délai « instantané » dans le scénario de débordement avec charriage, dans la mesure où les conséquences en termes de débordement seraient assez proches des conséquences d'une rupture instantanée (débordement de l'ensemble des écoulements).

À l'inverse, les délais de rupture sous l'effet des autres processus (impact, incision, érosion latérale, érosion interne) ont été considérés proportionnellement « longs » comparés aux durées relativement brèves des crues torrentielles, se traduisant par une probabilité faible de destruction complète de tronçons de digue en l'espace d'une unique crue sous l'effet de ces agressions [30].

### 3.17.2. Spécificités pour le milieu marin

La caractérisation des brèches en maritime présente certaines spécificités liées aux modes de rupture et à la cinétique des phénomènes qui entrent en jeu ; sur les notions de cinétique, il y a également lieu de distinguer la présence de marée et son amplitude qui ont une importance sur la durée des actions sur les ouvrages. Par ailleurs, contrairement

aux conditions fluviales, la création d'une brèche ne crée pas de baisse de charge ni de diminution des actions de la mer sur les tronçons voisins ; les longueurs de brèches ne sont limitées que par la « résistance » des digues sans aucune notion de « décharge » ou de limitation de débit après les premières brèches.

L'érosion par le franchissement de paquets de mer est également spécifique des digues maritimes.

Ces spécificités n'induisent pas de nature particulière des brèches qui restent largement liées aux caractéristiques des ouvrages et de leurs fondations mais constituent un paramètre important pour la détermination de la taille des brèches (profondeur parfois limitée par la durée du phénomène mais longueur pouvant être importante), de leur forme (érosion « par l'arrière » depuis le côté ZP par la succession de franchissements, destruction mécanique des carapaces, etc.). Par ailleurs, le caractère cyclique et limité dans le temps des actions sur les ouvrages joue un rôle dans les scénarios susceptibles de conduire à la rupture des digues maritimes (les éléments de l'ouvrage qui constituent les points de résistance à la rupture peuvent être différents de ceux généralement rencontrés sur les digues fluviales).

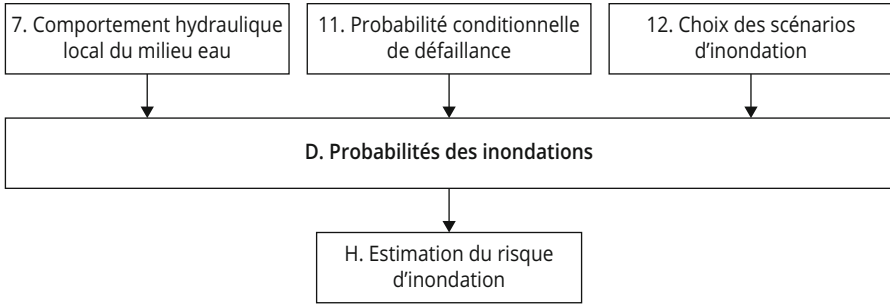
### 3.18. Étude D – Probabilités des inondations

L'objectif de cette partie de l'étude est l'estimation de la probabilité de réalisation des scénarios d'inondation dont il a été choisi d'estimer le risque.

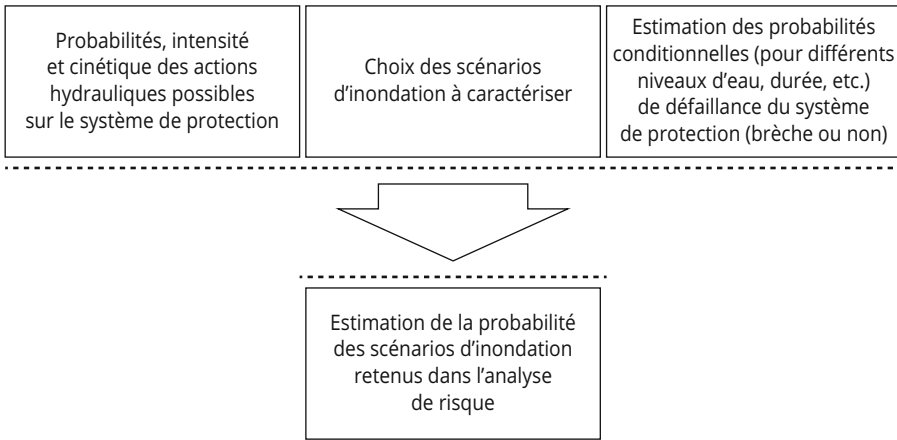
Pour chaque scénario d'inondation, le calcul de la probabilité d'occurrence du scénario est mené par la combinaison :

- de la probabilité d'occurrence de l'événement hydraulique de sollicitation à considérer (*voir* [paragraphe 3.6.](#)) ;
- des probabilités conditionnelles de défaillance structurelle (ouverture de brèche) des tronçons de digues subissant des brèches (*voir* [paragraphe 3.15.](#)) ;
- de l'estimation, principalement experte, des probabilités conditionnelles d'occurrence des éventuelles défaillances opérationnelles (non-fermeture de batardeau, non-fermeture de vannes, non-fonctionnement de pompe, etc.) que comporte le scénario d'inondation considéré ;
- de la prise en compte des éventuelles barrières de sécurité (*voir* [paragraphe 1.2.4.](#) et [Chapitre 4 : paragraphe 9.2.](#)) liées à des fonctions techniques de sous-systèmes hydrauliques, dont la performance pourra être estimée dans le cadre de cette étude élémentaire.

La [Figure 5-74](#) décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la [Figure 5-75](#) détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.



**Figure 5-74.** Liens entre l'étude D et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).



**Figure 5-75.** Flux de données pour l'étude élémentaire D (Source : B. Beullac).

### 3.19. Étude E – Intensité et cinétique des inondations

#### 3.19.1. Cas général

L'objectif de cette partie de l'étude est l'estimation de l'intensité (hauteur, vitesse verticale, vitesse horizontale) et de la cinétique (temps de propagation, durée) des phénomènes dangereux d'inondation impliqués par chacun des scénarios d'inondation qui ont été choisis dans le cadre de l'étude élémentaire 12.

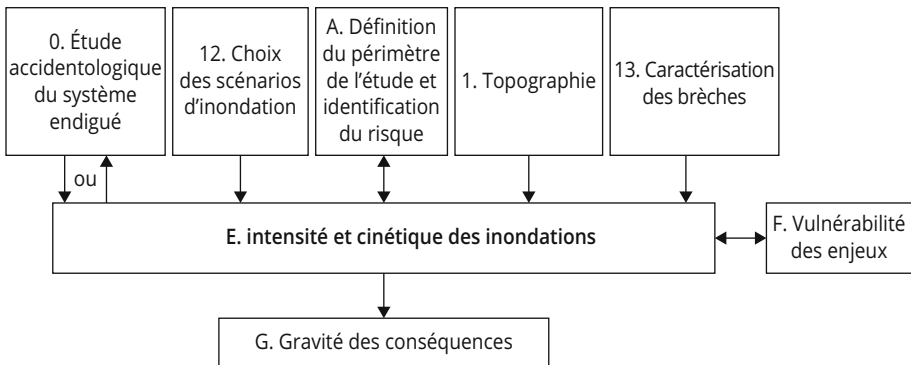
- Pour chaque scénario d'inondation ce travail est mené sur la base de la connaissance :
- de la localisation des entrées d'eau dans la zone protégée ou dans des sous-parties de celle-ci. Selon les scénarios d'inondation, ces entrées d'eau sont situées sur la ligne de défense principale ou sur des éléments de protection secondaire dans le cas de communication entre sous-parties de la ZP ;
  - de l'estimation de l'intensité et de la cinétique des entrées d'eau dans la zone protégée. Ces entrées d'eau correspondent généralement à des brèches ou des surverses sans rupture, mais peuvent également résulter du fonctionnement (intempestif ou non) d'ouvrages hydrauliques ponctuels (vannes, clapet, non-fermeture de batardeaux, stations de pompage, etc.) ;
  - de la capacité de ressuyage de la zone protégée ;

– de la topographie et de l'occupation des sols (bâtiments, végétation, etc.) de la zone protégée.

La réalisation des études hydrauliques d'estimation de l'intensité et de la cinétique des phénomènes dangereux d'inondation impliqués par chacun des scénarios d'inondations est menée selon la démarche suivante :

- caractérisation hydraulique des entrées et transferts d'eau dans la zone protégée, pour chaque scénario d'inondation : brèches, surverses sans rupture, non-fermeture de batardeaux, etc. ;
- modélisation hydraulique de la propagation de chaque scénario d'inondation dans la zone protégée dans son ensemble ou par sous-ensemble (« casier ») :
  - modélisation hydraulique transitoire des scénarios d'inondation : numérique bidimensionnel, 1D à casiers, CastorDignes<sup>1</sup>, analyse experte, combinaison de méthodes, etc.,
  - simulation de chaque scénario d'inondation et calcul des résultats hydrauliques en chaque maille du modèle et à chaque pas de temps (la Figure 4-7 donne un exemple de résultat) : hauteur d'eau, vitesse horizontale, vitesse verticale, cinétique des scénarios (temps d'arrivée de l'onde, durée de l'inondation, temps de vidange) ;
- traduction de chaque scénario d'inondation en termes d'intensité d'aléa d'inondation par un calcul spatialisé de combinaison des résultats hydrauliques ci-dessus, réalisé en utilisant un outil SIG. Les règles de combinaison des différents phénomènes hydrauliques (hauteurs, vitesses, etc.) et les bornes des classes d'aléa doivent être définies en vue de l'estimation de la gravité des conséquences des scénarios d'inondation, suivant une méthode à expliciter (voir un exemple en Figure 4-8) ;
- identification des « enveloppes » de zones dangereuses, pour le cas des scénarios d'inondation par défaillance du système de protection ainsi que pour le cas des scénarios d'inondation sans défaillance du système de protection.

La Figure 5-76 décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la Figure 5-77 détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.



**Figure 5-76.** Liens entre l'étude E et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).

1. Logiciel Irstea gratuit – calcul simplifié pour le traitement des ondes de rupture de digue – qui simule la rupture d'une digue et calcule les grandeurs hydrauliques permettant d'évaluer les risques intéressant la sécurité publique (<http://www.irstea.fr/castordigue>).

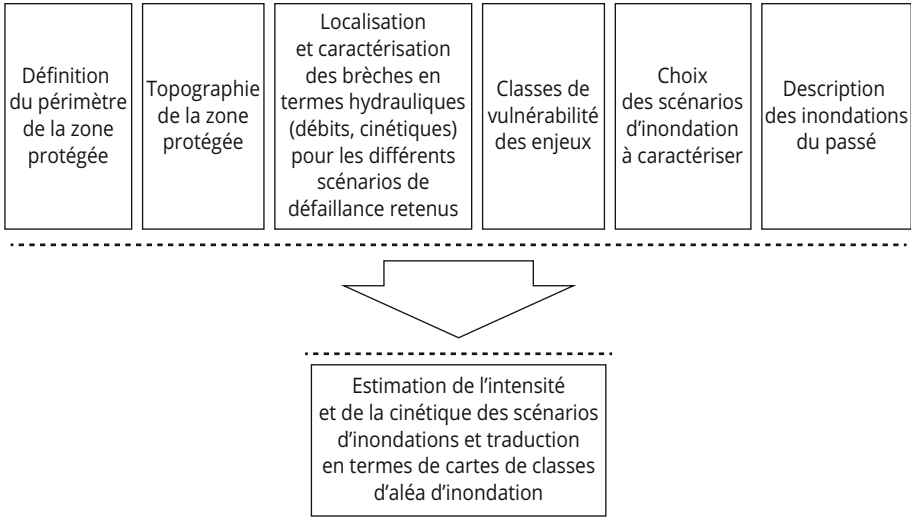


Figure 5-77. Flux de données pour l'étude élémentaire E (Source : B. Beullac).

### 3.19.2. Spécificités liées au milieu torrentiel

Dans le cas des inondations de plaine, l'intensité du phénomène est classiquement traduite par les caractéristiques physiques de l'écoulement (hauteur, vitesse, durée).

Pour les crues torrentielles, dans les zones à fortes pentes, les vitesses d'écoulement dépassent souvent des valeurs de quelques mètres par seconde, même pour des débits et des hauteurs faibles. À de telles vitesses, les écoulements débordants sont susceptibles de modifier grandement la topographie des terrains impactés (incision), de même que le transport solide peut combler les zones en dépression.

L'utilisation d'outils de modélisation 2D « fluviaux » (qui peuvent fonctionner pour les inondations en lits majeurs des fleuves et rivières de plaine) est alors totalement illusoire et n'est pas adaptée pour les cônes de déjection ou le lit majeur des rivières torrentielles.

Les modifications de topographie que les débordements provoquent (lissages, incisions de parties saillantes, comblement des creux, etc.) sont certains, mais quasi impossibles à quantifier précisément en 2D dans l'état actuel des connaissances scientifiques, notamment en présence de phénomènes de charriage.

L'expérience montre aussi qu'il est souvent plus pertinent de considérer des critères comme la hauteur de l'engravement qui peut affecter les terrains exposés ou la profondeur des affouillements susceptibles de se produire localement.

Par ailleurs, la détermination d'une « hauteur d'écoulement » résultante souffre encore de très nombreuses indéterminations, et encore davantage lorsque l'écoulement a lieu en dehors du lit ordinaire du torrent.

Étant donné le caractère un peu aléatoire des cheminements torrentiels, l'effet très important des facteurs aggravants que sont les flottants, qui peuvent conduire, pour des mêmes débits de crue, à des modalités de submersion, d'engravement et de divagation très différentes d'un événement à un autre, il est difficile de délimiter de façon précise une emprise de la zone impactée à la suite d'une défaillance du système de protection.

La gravité des scénarios pourra être évaluée à partir d'une délimitation approximative de l'extension des écoulements en cas de défaillance d'un tronçon de digue.

Les zones ainsi délimitées sont des zones maximales d'extension des crues, qui ne seront jamais totalement concernées par les débordements d'une unique crue, compte tenu de leurs divagations plus ou moins aléatoires, mais dont chaque point est susceptible d'être atteint à l'occasion d'une crue ou une autre. De ce point de vue, notre évaluation de la gravité est très sécuritaire, mais il est difficile de l'être moins [30].

La particularité des cônes de déjection torrentiels, dont chaque point est susceptible d'être atteint en cas de débordement en amont, introduit un certain biais dans ce mode de décompte. En effet, l'effectif de bâtiments susceptibles d'être impactés est décroissant de l'amont vers l'aval. Dans la réalité des faits, un écoulement torrentiel débordant en sommet du cône atteindra éventuellement les zones plus aval après s'être partiellement étalé au préalable. Il devrait ainsi avoir une intensité réduite par rapport à un écoulement torrentiel atteignant les mêmes zones après avoir débordé à l'amont immédiat de ces zones. Cette « atténuation » est toutefois impossible à évaluer, en tout cas sans recourir à des outils de modélisation sophistiqués [30].

Des outils 2D se développent notamment pour la modélisation de l'étalement des laves torrentielles, en considérant que ces écoulements sont peu érosifs durant cette phase d'étalement. Il faut tout de même rester prudent sur l'utilisation de tels outils et sur l'interprétation de leurs résultats, car la détermination des caractéristiques des écoulements de laves torrentielles reste toujours délicate. Il est conseillé de recourir à des approches paramétriques (et/ou par scénarios) avec tests de sensibilité.

### 3.20. Étude F – Vulnérabilité des enjeux

L'objectif de cette partie de l'étude est de procéder :

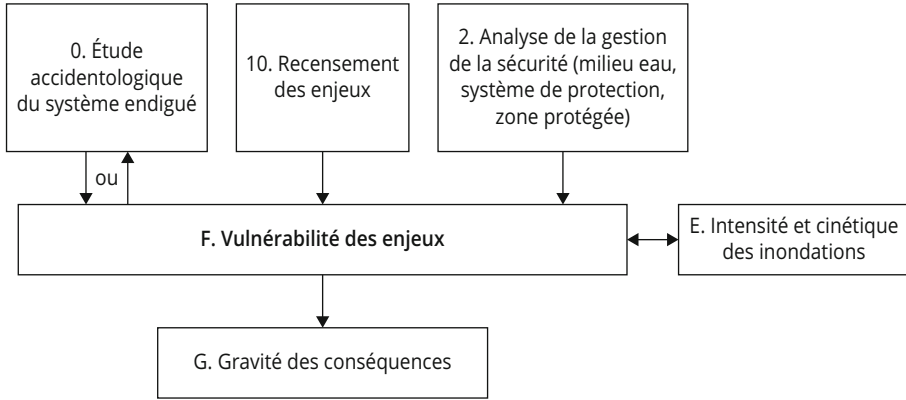
- au choix des types d'enjeux à considérer et de la manière de traiter leur vulnérabilité pour estimer les conséquences des scénarios d'inondation dans l'analyse de risque que l'on mène (*voir Chapitre 4 : paragraphe 8.*) ;
- à la définition de classes de vulnérabilité pour chaque type d'enjeu présent dans la zone protégée que l'on choisit de considérer et en fonction du type de vulnérabilité (*voir Chapitre 4 : paragraphe 8.*) retenu pour l'analyse de risque (en France, les analyses de risque de systèmes de protection se limitent généralement à la prise en compte de l'enjeu humain, en matière de dommages physiques). Ces classes de vulnérabilité définissent des fonctions d'endommagement (ou de mise en danger pour les populations) pour chaque type d'enjeu considéré, en fonction de l'aléa d'inondation (*voir paragraphe 3.19.*). Elles intègrent (*voir Chapitre 4 : paragraphe 8.*) :
  - la sensibilité à l'aléa d'inondation (intrinsèque à chaque type d'enjeu),
  - l'exposition à l'aléa d'inondation (en fonction de la localisation des enjeux),
  - l'adaptation au risque d'inondation (la réaction et la résilience) ;
- à la traduction spatiale des classes de vulnérabilité des enjeux considérés.

Le paragraphe 8. du Chapitre 4 donne des généralités sur l'étude des conséquences et cite différents référentiels techniques pouvant guider la réalisation de cette étude de la vulnérabilité des enjeux.

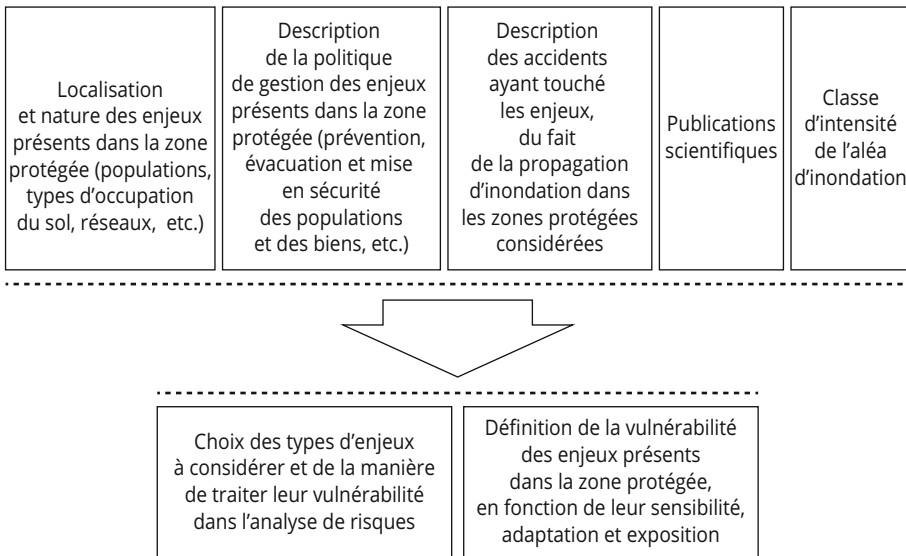
Le Tableau 4-IV donne un exemple d'évaluation de la vulnérabilité en fonction de l'intensité de l'aléa d'inondation, pour un enjeu de type « habitat R+2 et plus ».



La **Figure 5-78** décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la **Figure 5-79** détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.



**Figure 5-78.** Liens entre l'étude F et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).



**Figure 5-79.** Flux de données pour l'étude élémentaire F (Source : B. Beullac).

### 3.21. Étude G – Gravité des conséquences

L'objectif de cette partie de l'étude est de procéder :

- à l'estimation des conséquences des scénarios d'inondation étudiés pour les enjeux présents dans la zone protégée ;
- au positionnement des conséquences dans des classes de gravité.

Ce travail est mené de la manière suivante :

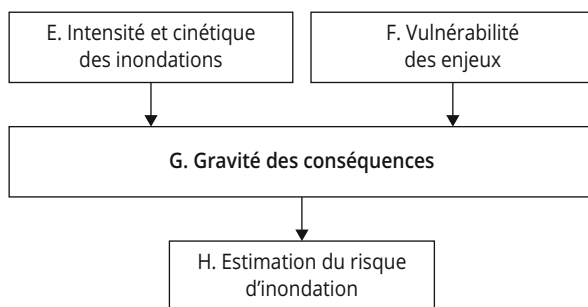
- calcul des conséquences des scénarios d'inondations par croisement spatialisé (par l'utilisation d'un outil SIG) de l'intensité et de la cinétique des aléas d'inondations

- (voir paragraphe 3.19.) avec la vulnérabilité des enjeux considérés (traduite en termes de fonction d'endommagement ou de mise en danger pour les populations) (voir paragraphe 3.20. et Chapitre 4 : paragraphe 8.) ;
- estimation de la gravité des conséquences des scénarios d'inondations sur la base d'une ou plusieurs grilles de gravité des conséquences dont les classes doivent préalablement être définies (Tableau 5-II).

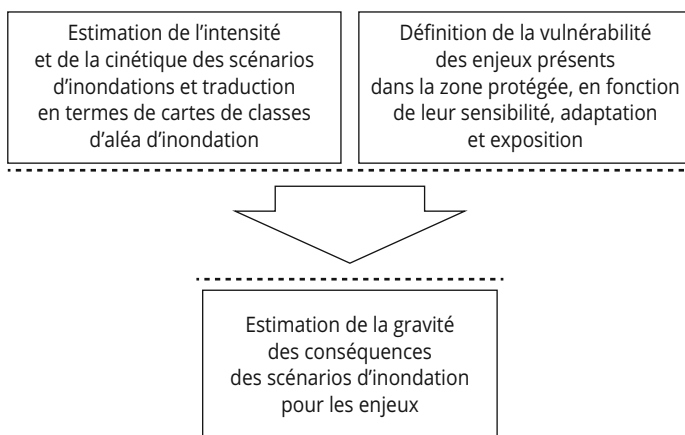
**Tableau 5-II.** Exemple de grille de gravité des scénarios d'inondation.

Niveau de gravité du scénario d'inondation	Nombre de personnes potentiellement en danger
5. Désastreux	> 10 000
4. Catastrophique	Entre 1 000 et 10 000
3. Important	Entre 100 et 1 000
2. Sérieux	Entre 10 et 100
1. Modéré	< 10

La Figure 5-80 décrit les liens existant entre l'étude et les autres études élémentaires de la méthode et la Figure 5-81 détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l'étude et la teneur des résultats qui en découlent.



**Figure 5-80.** Liens entre l'étude G et les autres études élémentaires de la méthode d'analyse de risque (Source : B. Beullac).



**Figure 5-81.** Flux de données pour l'étude élémentaire G (Source : B. Beullac).

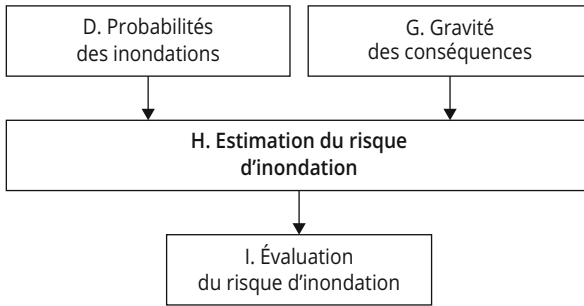
### 3.22. Étude H – Estimation du risque d’inondation

Cette partie de l’étude constitue la conclusion de l’analyse de risque. Elle fait le bilan des résultats de cette analyse en termes d’estimation du risque associé à chacun des différents scénarios d’inondation retenus dans le cadre de l’étude.

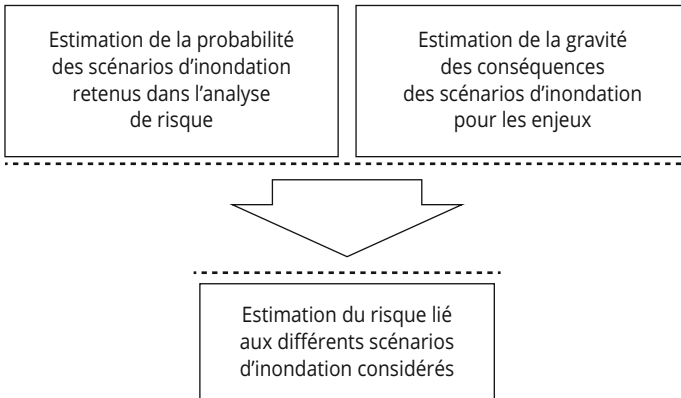
Chacun de ces scénarios d’inondation est ainsi caractérisé en termes de probabilité d’occurrence et de gravité des conséquences pour les enjeux de la zone protégée.

Les résultats de l’estimation du risque peuvent être représentés spatialement, ce qui correspond à l’attribution du risque ([Chapitre 4 : paragraphe 1.10.](#)).

La [Figure 5-82](#) décrit les liens existant entre l’étude et les autres études élémentaires de la méthode et la [Figure 5-83](#) détaille la nature des informations nécessaires à la réalisation de l’étude et la teneur des résultats qui en découlent.



**Figure 5-82.** Liens entre l’étude H et les autres études élémentaires de la méthode d’analyse de risque (Source : B. Beullac).



**Figure 5-83.** Flux de données pour l’étude élémentaire H (Source : B. Beullac).

## CHAPITRE 6

# Évaluation du risque

L'évaluation du risque (*voir Chapitre 4 : paragraphe 12.1.*) a pour but de caractériser, en termes d'acceptabilité du risque, les scénarios d'inondation dont le niveau de risque a été estimé lors de l'analyse de risque (*voir Chapitre 5 : paragraphe 3.22.*). Cette activité porte donc un jugement quant à la menace que représente, pour la société, le rapport probabilité/gravité de chacun des différents scénarios d'inondation envisageables pour le système de protection étudié.

L'objectif final de l'évaluation du risque est de donner au gestionnaire du système de protection, voire à d'autres acteurs du milieu eau ou du milieu zone protégée, les moyens d'orienter et de prioriser leur politique de gestion dans une logique d'atténuation du risque d'inondation.

Cette activité est menée au travers des études élémentaires 14 et I de la méthode illustrée en [Figure 5-3](#).

## 1. Définition de l'acceptabilité du risque

La présente étude (étude élémentaire 14) a pour objectif de définir les différents degrés d'acceptabilité du risque (par exemple, risque acceptable, risque tolérable, risque inacceptable) qui seront ensuite utilisés pour évaluer le risque d'inondation dans le cadre de l'étude élémentaire de détermination de la criticité du risque (*voir paragraphe 2.*).

La définition de l'acceptabilité du risque se traduit généralement par l'adoption d'une grille de criticité (par exemple, [Tableaux 6-I et 4-I](#)) qui constitue un outil d'aide à la décision permettant de hiérarchiser les différents scénarios d'inondation de la zone protégée. Leur hiérarchisation est alors fonction de deux paramètres :

- la probabilité de réalisation des scénarios ;
- la gravité associée aux différents scénarios.

À l'heure actuelle, l'acceptabilité du risque d'inondation ne fait pas l'objet d'une réglementation spécifique. Même si l'on peut s'inspirer d'études précédemment menées ou d'autres formes partagées par ailleurs, voire de publications scientifiques ou techniques (notamment les travaux de la CIGB sur le sujet de l'évaluation du risque [10]), la définition des différents niveaux d'acceptabilité du risque inondation dans une zone protégée doit donc pour le moment toujours être menée dans chaque cas de figure et traduire les priorités locales des acteurs responsables de la gestion du territoire et de la sauvegarde de ses populations. Cette activité, qui implique des décisions politiques engageant toute la société, est donc particulièrement subjective et dépendante de la vision de ces acteurs locaux (critères éthiques, économiques, politiques, moraux, etc.). Pour cette raison, la définition de l'acceptabilité du risque ne devrait pas être uniquement confiée

**Tableau 6-1.** Exemple de grille de criticité.

Criticité des scénarios		Probabilité de réalisation des scénarios d'inondation				
		E. Extrêmement improbable	D. Très improbable	C. Improbable	B. Probable	A. Courant
Gravité des scénarios d'inondation	1. Modéré					
	2. Sérieux					
	3. Important					
	4. Catastrophique					
	5. Désastreux					

	Risque acceptable
	Risque préoccupant ou tolérable sous conditions
	Risque inacceptable

au technicien chargé de l'analyse de risque mais résulter d'un processus de concertation. Le technicien doit intervenir dans ce dernier pour aider à la décision, en organisant et en renseignant les critères qui fondent les choix des gestionnaires des territoires concernés.

Enfin, il existe un lien fort entre l'acceptabilité du risque et la définition de la vulnérabilité des enjeux. En effet, la nature des enjeux à considérer et la manière de caractériser leur endommagement doivent être cohérentes avec les paramètres choisis in fine pour caractériser l'acceptabilité.

### Remarques

- La définition de la grille de criticité et des classes de niveau d'acceptabilité qu'elle contient doit être menée sans prise en considération des niveaux de risque estimés pour les différents scénarios considérés dans l'analyse de risque objet de l'étude. Bien que relative aux objectifs des différents acteurs locaux, elle devrait avoir une valeur absolue et non pas relative aux risques estimés. En effet, les grilles de criticité sont parfois construites sur la base de la connaissance du risque estimé associé aux scénarios d'inondation étudiés, cela dans le but de mieux discriminer ces derniers et de les répartir parmi plusieurs ou la totalité des classes d'acceptabilité du risque. Cette pratique est à proscrire car elle fausse la lecture du risque et donc la gestion qui en découle, surtout si l'on souhaite comparer des systèmes de protection entre eux.
- Par ailleurs, compte tenu des nombreuses incertitudes inhérentes à toute analyse de risque, une grille de criticité doit toujours proposer une évolution progressive du degré d'acceptabilité en fonction des variations des paramètres de probabilité et de gravité. Par exemple, dans le cas classique d'une acceptabilité à trois degrés de type acceptable/tolérable/inacceptable, il ne serait pas recevable qu'une grille de criticité juxtapose des degrés d'acceptabilité « acceptable » et « inacceptable » sans les séparer par des degrés d'acceptabilité « tolérable ».

## 2. Détermination de la criticité du risque d'inondation

L'étude élémentaire de détermination de la criticité du risque d'inondation (étude élémentaire I) a pour objectif d'évaluer le risque associé aux différents scénarios d'inondation considérés par l'analyse de risque. Cette activité est menée au travers de l'utilisation de la grille de criticité du risque définie dans le cadre de l'étude élémentaire 14 (voir Chapitre 5 : paragraphe 1.).




L'évaluation du risque proprement dite consiste alors en le positionnement, dans la grille de criticité, des scénarios d'inondation étudiés en fonction de leur risque précédemment estimé (en termes de probabilité et de gravité : voir Chapitre 4 : paragraphe 1.10. et Chapitre 5 : paragraphe 3.22.), et en la lecture de la criticité (en termes de degré d'acceptabilité) à laquelle ils correspondent. L'identification des situations les plus préoccupantes est alors possible.

Le Tableau 6-II illustre un exemple fictif d'évaluation du risque pour différents scénarios d'inondation. Dans cet exemple, le scénario SC2 est identifié comme inacceptable et doit donc impérativement faire l'objet de mesures de réduction du risque visant à le rendre plus acceptable à courte échéance. Le scénario SC3 est préoccupant et doit donc faire l'objet d'une surveillance spécifique et/ou de mesures de réduction du risque à plus longue échéance.

**Tableau 6-II.** Exemple de classement de scénarios d'inondation dans une grille de criticité.

Criticité des scénarios		Probabilité de réalisation des scénarios d'inondation				
		E. Extrêmement improbable	D. Très improbable	C. Improbable	B. Probable	A. Courant
Gravité des scénarios d'inondation	1. Modéré			SC4 et SC5		
	2. Sérieux		SC1			SC2
	3. Important					
	4. Catastrophique					
	5. Désastreux	SC3				

	Risque acceptable
	Risque préoccupant ou tolérable sous conditions
	Risque inacceptable

Le classement des scénarios de défaillance dans une grille de criticité constitue un bon outil de communication, tout d'abord pour le technicien dans sa mission d'aide à la décision auprès des décideurs (gestionnaire/service de contrôle), mais également ultérieurement pour justifier les choix qui ont été faits quant à la gestion du système de protection.

En plus de leur représentation matricielle, les résultats peuvent éventuellement faire l'objet d'une représentation cartographique leur donnant une meilleure lisibilité (par exemple, niveau d'acceptabilité du risque rapporté à chacun des tronçons de digues du système de protection).





## CHAPITRE 7

# Définition des mesures de maîtrise ou réduction du risque

Cet élément de la méthode illustrée en [Figure 5-3](#) (étude élémentaire J) a pour objectif la définition et la description des mesures de maîtrise ou de réduction du risque associé au système de protection, en fonction des résultats de l'étude d'évaluation des risques (*voir* [Chapitre 5](#)).

Comme déjà introduit au [paragraphe 2](#) du [Chapitre 1](#), la politique de prévention des risques s'appuie sur différents types d'actions complémentaires :

1. connaissance des aléas et des enjeux ;
2. surveillance, prévision, vigilance et alerte ;
3. préparation aux situations d'urgence ;
4. éducation et information préventive des citoyens ;
5. réglementation et plan de prévention des risques ;
6. réduction de la vulnérabilité ;
7. **protection** (systèmes de protection, barrages écrêteurs et autres ouvrages dans le cas des inondations) ;
8. résilience et mise en sûreté ;
9. mémoire et retour d'expérience ;
10. adaptation aux impacts attendus du changement climatique.

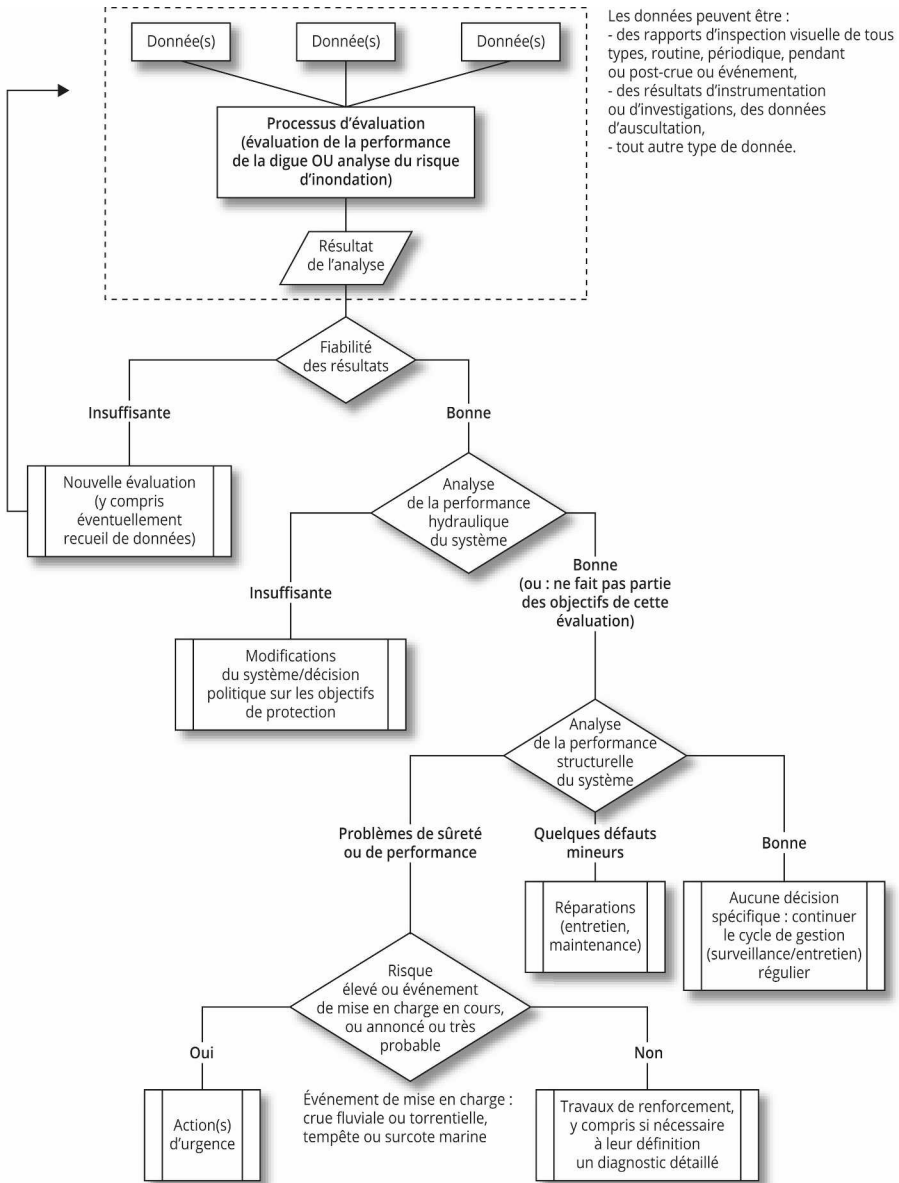
Dans le cas des systèmes endigués, chacune de ces actions constitue un levier pour agir dans le sens de la maîtrise du risque d'inondation pour les enjeux présents dans les zones protégées, bien qu'avec un focus sur les actions du gestionnaire du système de protection sur les ouvrages dont il a la charge.

En réponse aux conclusions de l'évaluation du risque, des actions sont à entreprendre pour rendre acceptable le risque associé aux scénarios d'inondation les plus pénalisants. Ces mesures de réduction du risque peuvent s'appliquer aux différentes actions de la prévention des risques et plus particulièrement à la protection, la réduction de la vulnérabilité, la préparation aux situations d'urgence et la surveillance, la vigilance et l'alerte. Elles sont alors portées par différents types d'acteurs du territoire concerné (gestionnaires de digues, collectivités locales, etc.) et peuvent s'appliquer au système de protection, aux milieux eau ou à la zone protégée.

Parallèlement aux actions de réduction du risque, l'analyse de risque aide également à pointer les actions les plus utiles permettant de maîtriser le risque, et donc dont il convient de s'assurer l'efficacité sur le long terme (*voir* le concept de « barrières de sécurité »).

Concernant l'aspect **protection** contre les inondations et donc les actions à mener par les gestionnaires de systèmes de protection, la définition des mesures de réduction du

risque découle d'un processus d'aide à la décision à plusieurs niveaux. Cette démarche est détaillée dans la Figure 7-1.



Les actions d'urgence peuvent comprendre :

- une intensification des observations (période, moyens),
- des travaux (d'urgence) de renforcement des digues et autres éléments du système de protection,
- l'intervention d'un ingénieur(s) spécialiste(s) pour mieux évaluer la situation et proposer une/des solution(s),
- l'information des autorités en charge de la sécurité de la population d'une possible inondation,
- ...

Figure 7-1. Évaluation du risque et aide à la décision pour les gestionnaires de digues (Source : R. Tourment [9]).

Dans la démarche d'analyse de risque, l'identification des mesures de réduction du risque nécessaires et de leurs objets d'application est facilitée par l'application d'une méthode par

arbres (*voir Chapitre 9 : paragraphe 3.*) pour la représentation des scénarios de défaillance. En effet, une telle méthode facilite l'identification des événements les plus pénalisants vis-à-vis du risque final pour chaque scénario de défaillance, et donc l'identification des composants du système de protection nécessitant la mise en œuvre de mesures spécifiques.

L'utilisation de tels arbres permettra également de faciliter la représentation des mesures correctives envisagées (en tant que nouvelles barrières de sécurité dans les arbres) et, in fine, l'estimation des bénéfices obtenus vis-à-vis du risque, par la mise en application de ces mesures.

La suite de ce chapitre présente l'ensemble des mesures de maîtrise et de réduction du risque inondation dans un système endigué. Afin de juger de l'efficacité de chaque mesure, ou d'un ensemble de mesures, on peut utilement appliquer la démarche suivante fondée sur l'analyse de risque présentée dans les **Chapitres 4 et 5** :

- pour les mesures existant avant la réalisation de l'analyse de risque :
  - réalisation de l'analyse de risque en présence de la mesure,
  - réalisation de l'analyse de risque en l'absence de la mesure,
  - analyse du différentiel en termes de risque (probabilité et conséquences) ;
- pour les mesures à mettre en place après une analyse de risque :
  - réalisation de l'analyse de risque avec le système dans son état actuel,
  - recherche, en analysant les scénarios de défaillance, de mesures de maîtrise ou de réduction du risque possibles (réduction de la probabilité **ou** des conséquences du scénario),
  - réalisation de l'analyse de risque en présence de la mesure,
  - analyse du différentiel en termes de risque (probabilité et conséquences).

Ces mesures de maîtrise et de réduction du risque peuvent, de manière générale, concerner :

- des mesures d'urgence (en cas de risque très élevé et/ou de relative urgence compte tenu de l'imminence d'un événement hydrométéorologique) ;
- des mesures transitoires (en l'attente de mesures plus pérennes) ;
- ou des mesures pérennes.

À l'inverse des mesures pérennes, les mesures d'urgence mettent généralement en œuvre peu de moyens de reconnaissance et d'étude, mais requièrent une forte intensité de présence et de réactivité sur le terrain. Les mesures transitoires se situent entre les deux.

Le présent chapitre ne prétend pas à l'exhaustivité des mesures de maîtrise ou de réduction du risque envisageables. En revanche, il a pour objet de présenter le lien entre ces mesures et la démarche d'analyse de risque ainsi que l'intérêt de cette démarche vis-à-vis de la définition et de l'amélioration de ces mesures.

## 1. Mesures appliquées au système de protection

Ces mesures sont de la responsabilité du gestionnaire du système de protection.

Leur objectif est d'agir sur l'efficacité de la protection, en améliorant selon les cas de figure :

- la connaissance du système de protection, de ses fonctions et de ses limites ;
- le fonctionnement hydraulique du système de protection en termes de protection contre les inondations et de ressuyage : modifications des sous-systèmes ;
- la sûreté des tronçons du système de protection : modifications/réparations (structurelles) des tronçons de digues ;

- la surveillance et l’entretien courant du système de protection ;
- la gestion du système de protection pendant les périodes d’événement hydrométéorologique (opération, surveillance, confortements).

### 1.1. Études spécifiques et reconnaissances associées

Les résultats de l’analyse de risque peuvent mettre en évidence des lacunes dans la connaissance du système de protection qui impliquent une trop forte incertitude sur les résultats du diagnostic des tronçons du système de protection ou de l’estimation du risque du système endigué.

Les mesures de réduction du risque qui peuvent en découler consistent en la mise en œuvre d’études spécifiques dans les domaines comportant des lacunes en termes de données de base ou de résultat d’étude élémentaire (*voir* la liste et la description complète au [Chapitre 5](#)). Le plus souvent, il s’agira d’études ou de données en lien avec la géotechnique ou l’hydrologie/hydraulique, il peut aussi s’agir de compléments de données ou de résultats relatifs à la connaissance des enjeux ou de leur vulnérabilité mais, in fine, tout type de donnée ou d’étude élémentaire peut être concerné.

Ces reconnaissances et études peuvent être des mesures d’urgence ou réalisées en conditions normales :

- dans le premier cas, les reconnaissances seront principalement des observations visuelles et les diagnostics associés seront « rapides » (voir à mobiliser un expert pour ce diagnostic « temps réel ») ;
- dans le second cas, on rentre dans un processus normal de réalisation de diagnostic ou d’étude : définition des besoins, rédaction de cahier des charges, réalisation des reconnaissances, analyse, rédaction de conclusions, à la suite de quoi l’analyse de risque de départ pourra/devra être remise à jour.

### 1.2. Travaux de modification du fonctionnement du système de protection

Les résultats de l’analyse de risque peuvent mettre en évidence des problèmes dans le fonctionnement hydraulique du système de protection, ou plus simplement un fonctionnement perfectible. Ces problèmes peuvent être liés soit à une mauvaise conception, soit à la modification des actions hydrauliques sur le système de protection depuis sa conception (par exemple, du fait de modifications morphologiques du milieu eau ou de la zone protégée). On peut aussi décider d’améliorer la protection offerte par le système.

Les mesures de réduction du risque relatives au fonctionnement du système de protection peuvent consister en :

- la mise en œuvre de travaux visant la modification du fonctionnement hydraulique de certains sous-systèmes du système de protection (par exemple, modifier le niveau de crête, rendre résistant à la surverse, modifier la cote ou la longueur d’un déversoir, etc.) ;
- le déplacement de sous-systèmes (par exemple, éloignement du lit mineur ou de l’interface mer – terre des digues),
- la création de nouveaux sous-systèmes (par exemple, ouvrage de ressuyage ou digue de protection rapprochée),

- ou la suppression de sous-systèmes jugés pénalisants vis-à-vis du rôle de protection contre les inondations du système de protection (par exemple, digue ou remblai secondaire de partitionnement de la zone protégée, qui a bien souvent l'effet d'augmenter le risque global plutôt que de le diminuer, contrairement à l'impression erronée du commun des mortels).

Ce type de mesure est généralement de l'ordre de mesures décidées et réalisées en conditions normales car elles vont nécessiter des réflexions sereines. Dans certains cas, elles pourront être décidées en urgence, avant ou pendant un événement hydrométéorologique, voire pendant une inondation de la zone protégée. On peut citer en exemple la réalisation de digue de protection rapprochée pour des enjeux situés loin de la ligne principale, en cas d'apparition d'une brèche sur celle-ci. On pourrait citer aussi la rehausse provisoire de secteurs de digue en limite de surverse, mais dans ce cas il faut se méfier d'effets pervers d'augmentation du risque de brèche ou de surverse sur d'autres secteurs avec une augmentation du risque global (*voir* ILH [9], textes introductifs des sections 6.6.1 et 6.10).

### 1.3. Travaux d'amélioration de la sûreté des tronçons du système de protection

Les résultats de l'analyse de risque peuvent mettre en évidence des caractéristiques structurelles des tronçons de digues pénalisantes du point de vue de la sûreté de fonctionnement du système de protection. Ces problèmes sont soit liés à une mauvaise conception des tronçons considérés, soit à la détérioration ou à la ruine de certains de leurs composants (protections contre l'érosion, organe d'étanchéité, corps de digue, organe de drainage, etc.). Ils peuvent également être détectés lors d'un examen visuel (ou inspection, etc.) du système de protection ou d'un diagnostic intermédiaire ; mais l'évaluation du risque associé nécessitera toutefois le déroulé de la méthode générale présentée au [Chapitre 5](#), une simple actualisation de la dernière analyse suffira probablement.

Les mesures de réduction du risque qui peuvent en découler consistent en la conception et la mise en œuvre de travaux visant la modification structurelle des tronçons de digues (reconstruction totale, ajout, remplacement, modification, suppression de composants, etc.). Notons que dans notre approche, le niveau de protection et la localisation de chacun des tronçons de digue devront rester inchangés, sinon, il s'agit d'une modification du système et de ses fonctions, abordée dans la section précédente.

Nous ne rentrons pas ici dans le détail des solutions techniques de confortement des digues. Sur ce sujet, un groupe de travail du CFBR est en cours de rédaction de fiches d'études de cas et de techniques et de recommandations générales. Les principes de base des confortements sont par ailleurs présentés dans la section 4.4 du « Référentiel digues » [40].

Les travaux de confortement des ouvrages peuvent avoir lieu en conditions normales, en incluant des reconnaissances, des études de conception et dimensionnement réalisées dans les règles de l'art et dans le respect des procédures d'autorisation. Il est dans ce cas souhaitable, comme proposé dans l'introduction au présent chapitre, d'actualiser l'estimation du niveau de risque pour quantifier en termes de risque le gain apporté par les travaux, ce qui peut aussi permettre de prioriser différentes tranches de travaux.

Ces travaux peuvent aussi avoir lieu en mesure transitoire, avec également une ingénierie et un respect des procédures réglementaires adaptés.

En condition d'urgence (juste après un événement de sollicitation des ouvrages) ou d'extrême urgence (pendant ou juste avant un événement de sollicitation des ouvrages), il



sera préférable de faire appel à des solutions prédéfinies (par exemple, dans les consignes ou dans des cahiers annexes) liées à des problématiques types (par exemple, début de percolation, d'érosion interne, d'érosion externe, etc.). On trouvera dans l'ILH [9] aux sections 6.6 à 6.9 des propositions de travaux en urgence ou extrême urgence.

#### 1.4. Surveillance et entretien des ouvrages en période normale

Les résultats de l'analyse de risque, incluant un diagnostic, peuvent mettre en évidence des problèmes, avérés ou potentiels, de détériorations des tronçons du système de protection résultant ou pouvant résulter d'un mauvais entretien de ce dernier. Ces problèmes peuvent également être détectés lors d'un examen visuel (ou inspection, etc.) du système de protection ou d'un diagnostic intermédiaire ; mais dans ces cas, bien que les problèmes puissent être détectés et identifiés, l'évaluation du risque associé nécessitera toutefois le déroulé de la méthode générale présentée au [Chapitre 5](#), une simple actualisation de la dernière analyse de risque suffira probablement.

Les mesures de maîtrise et de réduction du risque liées à ces aspects de la gestion des ouvrages sont des outils classiques et la base du métier de « gestionnaire de digues ». Leurs principes en sont présentés, entre autres, pour les digues fluviales, dans le guide « Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations – Guide pratique à l'usage des gestionnaires » [31]. Des mesures de surveillance et d'entretien peuvent concerner des aspects plus spécifiques comme la gestion de la végétation arborée, pour laquelle on pourra se référer au guide « Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai » [48], ou comme l'entretien des maçonneries ou des canalisations pour lesquelles on se référera à de la documentation non spécialisée dans les digues.

De manière générale, en cas de désordre avéré mais limité (par exemple, un affouillement) et hors période de risque hydrométéorologique, on pourra mettre en place des mesures de gestion particulières, transitoires : surveillance accrue, expertise du niveau de risque, etc. dans l'attente d'une solution définitive et en se tenant prêt à mettre en œuvre une solution d'urgence en cas d'annonce d'événement hydrométéorologique.

Dans le cadre de la réalisation de l'analyse de risque, les mesures de maîtrise du risque existantes doivent être connues et détaillées dans les consignes d'exploitation (*voir* [Chapitre 5](#) : [paragraphe 3.4.](#)) pour être analysées, et les mesures de réduction du risque déterminées après l'analyse de risque évaluées par une analyse différentielle comme proposé dans l'introduction du présent chapitre. L'analyse de risque permet « simplement » de démontrer la nécessité ou l'utilité de ces mesures et éventuellement d'en quantifier l'efficacité.

#### 1.5. Gestion du système de protection pendant les périodes d'événement hydrométéorologique (opération, surveillance, confortements)

Les aspects particulièrement importants de la gestion des ouvrages pendant les événements de sollicitation (crues, tempêtes) à prendre en compte en lien avec les possibilités de défaillance des systèmes de protection sont :

- des temps de réaction pour les gestionnaires courts (variable suivant les systèmes et les événements) ;

- un réel danger pour la sécurité des personnes situées dans la zone protégée (montée rapide des eaux dans des zones où il n'y a jamais eu d'eau) ;
- des dommages aux biens conséquents (effets mécaniques liés à la vitesse de l'eau en sus de la submersion, ressuyage long, etc.) ;

L'analyse de risque aide à quantifier ces aspects. Il faut considérer également des éléments complémentaires influant sur la gestion en crise (contraintes) :

- la gestion de situation de danger du personnel de surveillance et d'intervention ;
- la gestion dans la durée de situations d'action (hydraulique sur les ouvrages) ;
- la gestion de crise avérée (rupture d'ouvrage, souvent associée à des situations [crue, tempête, etc.] ayant provoqué des situations de crise par ailleurs).

Dans la méthode que nous proposons, les mesures de gestion de la sécurité en période de crue (ou plus généralement d'événement de sollicitation) doivent être analysées ainsi que leur efficacité et prises en compte dans l'estimation du risque de défaillance du système.

Entre autres seront analysés :

- le temps nécessaire à la préparation après l'alerte hydrométéorologique (est-il suffisant ?) ;
- la préparation du système préalable à l'événement (mise en place de batardeaux, fermeture de vannes, etc. : ces aspects sont-ils suffisamment préparés et opérationnels ?) ;
- la surveillance du système de protection (y a-t-il suffisamment de personnel et est-il bien formé pour pouvoir détecter et décrire les désordres en temps utile pour en permettre le diagnostic d'urgence et permettre leur neutralisation, les accès aux digues sont-ils aisés en toutes circonstances, existe-t-il un système de repérage du linéaire, etc. ?) ;
- l'efficacité du dispositif d'auscultation éventuel : piézomètres, mesures de débits de fuite, etc. (disponibilité du matériel de mesure, temps de réponse des personnes chargées de l'analyse, etc.) ;
- la préparation aux travaux d'urgence (fiches descriptives des travaux de confortement d'urgence en fonction des différents cas envisageables, disponibilité de stocks de matériaux, de matériel et de personnel nécessaires à leur mise en œuvre, etc.) ;
- les moyens de communication entre le personnel présent sur le terrain et la cellule d'encadrement en veille dans les locaux du gestionnaire (ou regroupé au sein d'une autre cellule de crise) ;
- les moyens de communication entre le gestionnaire du système de protection et les autorités, principalement celles chargées de la sécurité des populations.

Un dispositif efficace de préparation aux événements et de gestion de ceux-ci peut avoir pour effet de réduire notablement la probabilité de rupture d'une digue ou d'une défaillance opérationnelle (manœuvre intempestive ou absence de manœuvre nécessaire), le coefficient réducteur ( $10^{-1}$  par exemple) étant pris en compte dans la probabilité de défaillance.

Les résultats de l'analyse de risque peuvent éventuellement mettre en évidence des manques dans la planification de la gestion du système de protection pendant les événements hydrométéorologiques, ou au contraire pointer les composantes existantes et particulièrement critiques pour la sécurité.

Il s'agit de mesures qui se mettent en œuvre en périodes liées à un événement hydrométéorologique (préparation, pendant, après), mais **doivent se préparer à froid, avant les événements et être réévaluées après chaque événement (retour d'expérience).**

## 2. Mesures sur les milieux eau

Les mesures de réduction du risque qui s'appliquent aux milieux eau sont de différentes natures. Elles peuvent être la responsabilité du gestionnaire du système de protection ou bien sous celle de l'un ou l'autre des différents acteurs et gestionnaires des milieux eau, local ou pas. Elles peuvent concerner différents aspects des milieux eau :

- hydraulique, bien entendu ;
- morphodynamique (évolutions de la topographie et de la bathymétrie) ;
- végétation et de manière plus générale ;
- biodiversité ;
- activités humaines pouvant impacter le système de protection (activités économiques ou de loisir), etc.

### 2.1. Mesures portées par le gestionnaire du système de protection ou par d'autres acteurs

Des mesures de maîtrise ou de réduction du risque inondation peuvent, suivant les attributions locales, être portées par le gestionnaire du système de protection ou par d'autres acteurs. Il s'agit principalement de mesures relatives à l'hydraulique et à la morphologie. En effet, selon les cas, le gestionnaire du système de protection pourra ou non être le gestionnaire local de l'espace situé entre le système et l'eau, voire tout ou partie de l'espace aquatique. À terme, avec la mise en place de la compétence GEMAPI, on doit arriver à un rapprochement des structures de gestion, qui sera probablement progressif.

#### 2.1.1. Morphologie

Des modifications en cours ou surtout futures de la morphologie du milieu eau peuvent avoir un impact direct sur le fonctionnement et la sûreté du système de protection : affouillements mettant en jeu la stabilité ou risquant de déclencher des infiltrations et des érosions internes, modification du profil modifiant les conditions hydrauliques (niveaux, vagues, etc.).

Il peut en découler, à la suite de l'analyse de risque, des mesures de maîtrise du risque correspondant à la mise en œuvre de travaux ou de mesures organisationnelles visant la surveillance et la gestion de la morphologie des milieux eau ou la maîtrise, voire la modification de sa morphodynamique. Des ouvrages pourront être à maintenir, voire à installer (épis, brise-lames, seuils, etc.). D'autres mesures de gestion sont envisageables (rechargements, transfert de matériaux, etc.).

Les diagnostics des phénomènes morphodynamiques ou la conception d'ouvrages ou de mesure de gestion qui les influencent doivent se faire à plusieurs échelles (*voir Chapitre 5 : paragraphes 3.5. et 3.8.*).

Dans tous les cas de figure, que le gestionnaire de ces mesures ou ouvrages soit le gestionnaire du système de protection ou pas, il devra contrôler à son niveau les évolutions de la morphologie, si l'analyse de risque en pointe l'importance vis-à-vis de la sécurité des ouvrages et/ou de la performance du système. Ce contrôle devra être régulier, au cours des diagnostics et inspections de toute nature des ouvrages de protection contre les inondations, y compris lors des analyses de risque régulières. En effet, les attentes et les périodicités du suivi de chacun des acteurs sont différentes.

### 2.1.2. Hydraulique

Pour la maîtrise ou la réduction du risque inondation des zones protégées par des ouvrages, on peut maîtriser ou réduire les actions hydrauliques au niveau des ouvrages de protection, caractérisées en termes de hauteur, de vitesse ou de vagues. Une partie des mesures prises dans ce domaine sont souvent communes avec les actions liées à la maîtrise des évolutions morphodynamiques, les phénomènes hydrauliques, d'érosion et de transport solide étant physiquement liés. Il s'agit souvent également d'ouvrages de protection indirecte (*voir Chapitre 2 : paragraphe 4.2.*), épis, brise-lames ou seuils. En domaine fluvial, on fait aussi parfois appel à des aménagements hydrauliques, notamment barrages (ou bassins) écrêteurs de crue, ou à des mesures de gestion des crues (ralentissement dynamique).

## 2.2. Mesures portées par les autres acteurs des milieux eau

Un certain nombre d'acteurs ont des vocations les amenant à intervenir sur les milieux eau, influençant de manière directe mais sans que ce soit leur objectif les caractéristiques hydrauliques et les évolutions morphologiques au voisinage d'un système de protection. On peut citer les exploitants d'autres ouvrages hydrauliques (barrages entre autres), les gestionnaires de la navigation.

D'autres acteurs ont vocation à communiquer des informations et/ou à réaliser des études qui peuvent bénéficier au gestionnaire du système de protection pour ses connaissances relatives au milieu eau et donc à une meilleure estimation ou gestion des risques et/ou des événements. Citons entre autres : les services de prévision des crues, Météo France, le SHOM, les EPTB ou autres structures de bassin, les DREAL (ou autres services de l'État), les gestionnaires d'ouvrages de vocation autre que la protection mais jouant un rôle de protection (VNF, SNCF, sociétés d'autoroutes, conseils départementaux, etc.).

Dans de nombreux cas, les acteurs du milieu eau auront des intérêts communs en termes de gestion des inondations mais parfois, les intérêts pourront être conflictuels. Dans tous les cas, il est souhaitable que le gestionnaire du système de protection contre les inondations communique régulièrement avec le(s) autre(s) gestionnaire(s) et acteurs du milieu eau : échanges d'informations sur leurs actions respectives, sur leurs études (connaissances) et sur leurs objectifs (qui peuvent évoluer), sur leurs plans de gestion des événements, etc. de manière que chacun gère au mieux en fonction d'une connaissance améliorée.

## 3. Mesures sur la zone protégée

L'analyse de risque d'un système endigué doit prendre en compte la propagation des inondations dans la zone protégée par le système de protection, à la fois pour l'arrivée de l'inondation et pendant le ressuyage (*voir Chapitre 4 : paragraphe 7. et Chapitre 5 : paragraphe 3.19.*). Au vu de l'étude, un certain nombre d'équipements et de mesures en lien avec la gestion des eaux et des écoulements dans la zone protégée peuvent être identifiés comme critiques pour le maintien du fonctionnement existant (tel qu'analysé) pour la non-aggravation des risques. On peut également identifier des mesures ou aménagements à mettre en œuvre pour réduire le risque, par exemple, en vue du maintien de l'état existant : la surveillance et l'entretien des ouvrages de transparence des remblais de la zone protégée, des talwegs et des canaux, etc. et pour l'amélioration : la mise en

place d'ouvrages de transparence de certains remblais ou la création d'ouvrages permettant un ressuyage plus rapide de la zone protégée après une inondation ou la création d'ouvrages de protection rapprochée pour certains enjeux particulièrement vulnérables.

Ces mesures peuvent, suivant les cas, être du ressort du gestionnaire du système de protection, ou d'autres acteurs. Les évolutions liées à la GEMAPI doivent conduire à une plus grande intégration, à terme, des différentes structures responsables de la gestion des eaux, comme du côté milieu eau, vu précédemment.

Les autres types de mesures de maîtrise ou de réduction du risque envisageables dans la zone protégée ne sont généralement pas du ressort du gestionnaire du système de protection. Elles concernent plutôt des attributions des autorités communales ou de l'État, ou encore des initiatives individuelles (aménageurs, particuliers et autres usagers de l'espace tels que des entreprises ou exploitants agricoles). Elles ont d'abord pour objectif de diminuer la vulnérabilité des enjeux présents dans la zone protégée. Les sociétés d'assurance peuvent également, dans une certaine mesure, influencer des initiatives de réduction ou de maîtrise de la vulnérabilité des enjeux en zone inondable. Citons entre autres mesures :

- mise en sécurité des populations :
  - planification,
  - réalisation d'exercices,
  - mises à jour des PCS et plans ORSEC,
  - voies de communication utilisables en crise, etc. ;
- maîtrise de l'urbanisme et réduction de la vulnérabilité du bâti :
  - révision/élaboration de PPRI,
  - expropriations en zone dangereuse,
  - mesures structurelles (constructions à étages, mise hors d'eau des alimentations électriques, etc.),
  - communication auprès du public, etc.

Comme pour les mesures concernant les milieux eau, les mesures de maîtrise et de réduction du risque dans la zone protégée font intervenir plusieurs voire de nombreux acteurs, dont les gestionnaires de digues. La communication entre les acteurs est donc essentielle, principalement en ce qui concerne :

- la transmission de l'alerte venant de la prévision des événements hydrauliques dangereux (crues, tempêtes, marées, etc.) ;
- la transmission de l'alerte relative à un dépassement ou une défaillance du système de protection, avéré ou imminent ;
- la communication et les actions (coordination) relatives à la maîtrise de la propagation des inondations dans la zone protégée (ouvrages de vidange, pompes, etc.) ;
- les échanges sur les procédures respectives d'exploitation, de surveillance et d'intervention en période d'événement hydrométéorologique, actualisations coordonnées, etc.

## 4. Lacunes liées aux connaissances et méthodes

Pour la réalisation de l'analyse de risque et des études élémentaires décrites dans le présent guide, de nombreuses lacunes existent encore concernant des connaissances de base ou des méthodologies :

- la connaissance des phénomènes élémentaires (par exemple, certaines formes d'érosion interne ou d'autres mécanismes de détérioration et de rupture) ;

- la caractérisation de ces phénomènes ;
- la modélisation de ces phénomènes élémentaires ou de phénomènes plus complexes (par exemple, modélisation couplée hydraulique/géomécanique de la formation des brèches dans les digues et leur fondation) ;
- la caractérisation des enjeux et de leur(s) vulnérabilité(s) ;
- l'évaluation du risque inondation sur une base « normalisée ».

Ces lacunes dans les méthodes ne sont bien entendu pas une raison suffisante pour ne pas réaliser d'analyse de risque de nos systèmes endigués. En revanche, le fait de pointer et de hiérarchiser ces lacunes dans la réalisation d'une étude, et la remontée de cette analyse auprès de la communauté de pratique et les échanges au sein de celle-ci, permettront, en confrontant les analyses et les besoins, de dégager les besoins prioritaires en termes de recherche et de développement et de permettre une bonne synergie entre recherche et pratique. La communauté de pratique autour de la gestion du risque inondation, et celle des digues, qui est un sous-ensemble de la première, rassemble gestionnaires locaux, autorités en charge de la réglementation et du contrôle. Une communauté de pratique autour de la gestion du risque inondation, principalement européenne, est en cours de mise en place autour des acteurs des conférences FLOODrisk ; une seconde communauté, également européenne, centrée autour de la question des digues et ouvrages de protection contre les inondations, se met en place au sein de la CIGB ; enfin au niveau national, France Dignes est une communauté qui rassemble les gestionnaires de digues, le CFBR de son côté rassemble tous les types d'acteurs et traite de l'ensemble des questions techniques relatives à ces ouvrages comme aux autres ouvrages de protection (et bien sûr aux barrages).





## CHAPITRE 8

# Sources de données, gestion des données

Une analyse du risque inondation de système endigué utilise de très nombreuses données, de provenance et de nature très variées. Selon les besoins, ces données correspondent à des données « brutes » ou à des résultats d'études qui produisent des données de l'analyse de risque. La disponibilité des données, leur qualité, leur référencement dans le temps et dans l'espace, leur précision et plus généralement leur qualité, comme les métadonnées associées, sont très importants pour des résultats d'une analyse de risque suffisamment fiables pour pouvoir servir correctement de base informative aux décideurs.

Ce chapitre présente successivement des considérations générales sur les natures et types de données, les différentes provenances de données et la gestion des données sur le long terme.

### 1. Généralités sur les différentes natures et types de données

On peut tout d'abord identifier les données en fonction de leur nature, à savoir pour quel type d'analyse elles sont nécessaires ou bien quel type d'étude spécifique les produits. Les données sont disponibles soit sous la forme de données numériques ou alphanumériques bien décrites (et utilisables directement dans un modèle), soit au contraire uniquement dans un document dont l'analyse préalable est nécessaire pour obtenir la donnée utilisable dans l'analyse de risque ou le diagnostic (par exemple, dans un rapport).

La nature des données est par exemple (cas des données essentielles pour un diagnostic complet et une analyse de risque) :

- historique (crues/inondations) ;
- géométrique et topographique, y compris bathymétrie ;
- géotechnique et génie civil (structure), y compris géologie, hydrogéologie et géophysique ;
- hydrologique (ou océanographique) et hydraulique ;
- morphologique ;
- les résultats d'examen visuel ;
- les documents d'organisation ;
- les documents administratifs et réglementaires, etc.

Une même donnée peut servir à plusieurs reprises, pour différents types d'analyses dans une même analyse de risque ou un même diagnostic. Par exemple, les données

topographiques et géométriques servent à la fois aux études des actions hydrauliques et aux calculs de stabilité, les études morphodynamiques donnent des résultats qui servent à l'analyse de stabilité (anciennes brèches, traduites en singularités dans la composition de la digue, modifications possibles de la géométrie du lit, définitives voire transitoires pendant une crue) et à l'analyse des actions hydrauliques (prévisions des modifications de la géométrie de l'environnement qui modifieront à leur tour les caractéristiques hydrauliques).

Les données peuvent ensuite être classées par type, qui indique ce que décrit la donnée (par exemple, les différents résultats d'essais géomécaniques représentent chacun un type de donnée) et par format, qui indique comment est décrite la donnée (numérique, alphanumérique, unités, champ descriptif, etc.). Le [Chapitre 10](#) présente les principaux types de données utilisées dans les diagnostics des ouvrages et systèmes.

Ces différentes typologies en lien avec les données sont à prendre en considération dans la définition des besoins en matière de données dans la réalisation d'une analyse de risque ou d'un diagnostic. Il est encore plus essentiel de les intégrer à l'analyse préalable à la mise en place d'un système informatisé de gestion des données.

Les métadonnées sont des données relatives à la description des données existantes, des descripteurs pouvant par exemple indiquer leur provenance, leur précision, leur résolution, leur date de production, etc. Dans le cadre des données relatives aux systèmes de protection contre les inondations, il est nécessaire que toutes les données soient rattachées à une position géographique et à une datation (date de début et/ou de fin de validité).

Les métadonnées permettent entre autres de qualifier la confiance que l'on peut avoir dans les données associées et donc dans le résultat d'un traitement les combinant.

## 2. Provenance des données nécessaires à la réalisation des études élémentaires

La présente section identifie les données pouvant être utilisées dans le cadre des analyses de risque et des diagnostics, du point de vue de leurs natures et types, ainsi que de leurs sources, recueil et gestion sur le long terme.

Une analyse de risque ou un diagnostic s'appuie sur de multiples données, qui sont ensuite analysées suivant différentes méthodes. Certaines données sont disponibles auparavant directement auprès du gestionnaire du système de protection ou auprès d'autres acteurs. Lorsque des données utiles à la réalisation de l'analyse de risque sont manquantes, il va être nécessaire de mener des études spécifiques afin de rechercher ou de produire ces données. Ces données sont notamment les résultats :

- d'études historiques et de recherche d'archives : étude des événements passés (événements naturels, inondations résultantes, accidents sur les ouvrages, etc.), étude des évolutions structurelles de l'ouvrage (constitution, modifications, entretien), étude sur l'évolution de la morphologie du milieu eau ou plus généralement sur l'environnement du système, etc. ;
- d'inspections visuelles : de l'ouvrage (identification et caractérisation de désordres et d'ouvrages inclus), de la zone protégée (identification et la caractérisation des enjeux, etc.), du milieu eau (morphologie, végétation, etc.) ;
- de reconnaissances spécifiques : de géotechnique, de géophysique, de topographie, etc.

La suite de cette section détaille les différentes provenances et sources de données envisageables et présente un bilan non exhaustif, pour chaque origine, des principaux types de données pouvant être utiles pour la réalisation d'une analyse de risque de système de protection.

## 2.1. Résultats d'études élémentaires

Comme le montre la [Figure 5-3](#), dans le déroulement de la méthode de réalisation de l'analyse de risque de systèmes de protection que nous proposons dans ce guide, les résultats de chacune des études élémentaires sont utilisés dans une ou plusieurs autres études élémentaires. Les résultats d'études élémentaires constituent donc des données d'entrée pour les études élémentaires. Cette évidence est néanmoins à rappeler aux éventuels prestataires qui ne réaliseraient qu'une ou plusieurs études en lien avec une ou plusieurs études élémentaires : il faut que les liens avec les autres études élémentaires soient bien pris en considération.

Les études élémentaires produisent généralement des données d'une nature bien spécifique.

## 2.2. Données disponibles auprès du gestionnaire du système de protection

Une source de données importante est constituée par les informations à disposition du gestionnaire du système de protection. Ces informations sont celles qui constituent ou devraient constituer le dossier d'ouvrage. Ce sont notamment :

- les bases de données alimentées par le gestionnaire : sur la constitution des ouvrages, sur leur historique, sur leur état, etc. ;
- des données topographiques ;
- les inspections visuelles antérieures, qui donnent des données de toute nature ;
- d'éventuels résultats d'auscultation, qui donnent des données de nature principalement d'ordre topographique ou géométrique et en lien avec l'hydraulique interne ;
- des rapports ou résultats d'études passées : géotechniques, hydrauliques, morphodynamiques, sur la végétation, les enjeux. Ils nécessitent une interprétation ou une réinterprétation. Cela peut concerner des données de toute nature.

## 2.3. Données externes

Ce sont tout d'abord les données vendues ou mises à disposition par des organismes externes, notamment :

- les produits IGN : scan 25, scan 100, scan 1 000, BD ORTHO, BD TOPO, BD PARCELLAIRE, BD ADRESSE, BD CARTHAGE, cartes anciennes (cartes de l'état-major) ;
- les bases de données du BRGM (bureau de recherches géologiques et minières) : banque de données du sous-sol (BSS), inventaire historique des sites industriels et de service (BASIAS), etc. ;
- CORINE LAND COVER ;
- les bases de données de l'Insee : recensement de population : données infracommunales, données carroyées, base de données SIRENE ;
- les données de Météo France ;
- les données du SHOM, etc.

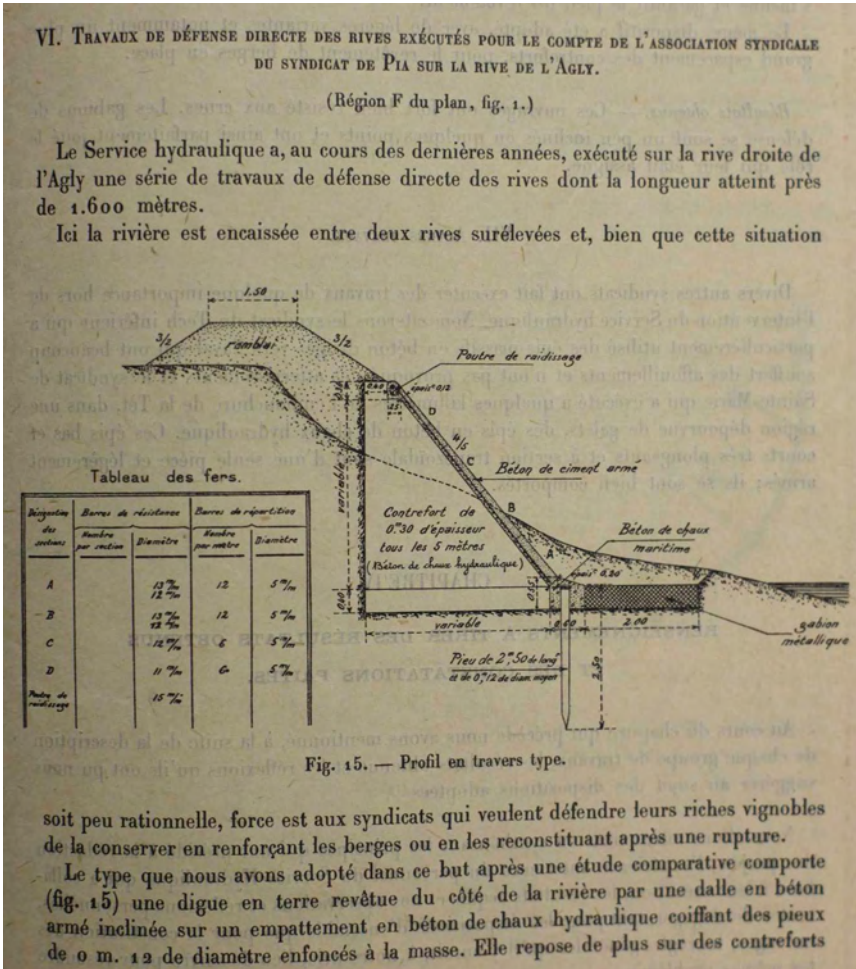
Ce sont également les données disponibles auprès d'autres acteurs du territoire (communes, départements, préfetures, services de l'État, etc.), notamment :

- les plans communaux de sauvegarde (PCS) ;
- les plans de prévention des risques inondation (PPRI), etc.

## 2.4. Recherches historiques

Dans le cas fréquent de l'instauration d'une gestion opérationnelle d'un système de protection ancien et longtemps négligé, le dossier d'ouvrage du gestionnaire ne contiendra que peu d'informations historiques, et souvent de manière insuffisante pour réaliser une analyse de risque. Dans ce cas, il est nécessaire, si le gestionnaire ne l'a pas fait au préalable de manière spécifique, de réaliser dans le cadre de la première analyse de risque une recherche exhaustive des données historiques relatives :

- aux ouvrages (Figure 8-1, voir aussi Figure 2-74) ;
- à leurs fondations (Figure 8-1) ;
- à leur environnement ;
- aux ouvrages inclus dans les ouvrages de protection ;
- aux événements d'inondation ou de sollicitation hydraulique des ouvrages (aspects hydrologiques, conséquences pour les ouvrages, propagation de l'inondation et conséquences sur les enjeux de la zone protégée) (Figures 8-2 et 8-3) ;
- aux acteurs et aux aspects administratifs, etc.



**Figure 8-1.** Exemple d'ouvrage de défense des rives de l'Agly, extrait de « La défense des rives des rivières torrentielles dans la plaine du Roussillon » (Source : M. Buré, Ministère de l'Agriculture, Paris, Imprimerie Nationale, 1931).





**Figure 8-2.** Napoléon III visitant Tarascon lors de l'inondation de juin 1856, tableau de William-Adolphe Bouguereau.



**Figure 8-3.** Destruction partielle du mur de protection en arrière de la plage de Cagnes-sur-Mer (Source : Archives départementales des Alpes Maritimes, rapport de visite de terrain des Ponts-et-Chaussées, 1957).

Une première étude historique peut s'avérer insuffisante, auquel cas il faudra la compléter à court ou à moyen terme. Il est très souhaitable que les personnes en



charge de ces recherches aient une vraie connaissance des méthodes de recherches historiques ou d'archives, au risque d'arriver à un résultat décevant si ce sont des ingénieurs ou techniciens compétents en ouvrages hydrauliques mais n'ayant pas les bonnes méthodes.

À l'inverse, la recherche historique sur un secteur localisé peut amener à des données concernant un secteur nettement plus étendu. Il est donc à recommander une mutualisation des premières recherches historiques à l'échelle d'un bassin ou sous-bassin.

Parmi les sources de données historiques, on peut citer :

- les archives départementales ;
- les archives des ex-ponts et chaussées, accessibles par le biais des Archives nationales et des archives de l'École nationale des ponts et chaussées ;
- les archives des différentes collectivités locales du secteur, des associations ;
- la presse locale ;
- internet (moteurs de recherche), etc.

La recherche de données historique concerne également des données de toute nature (géotechnique, géophysique, topographie, hydraulique, etc.) et toutes les études élémentaires numérotées de 0 à 13 de la méthode que nous proposons au [paragraphe 3.](#) du [Chapitre 5.](#)

## 2.5. Inspections visuelles spécifiques

Le diagnostic de digues et donc l'analyse de risque des systèmes de protection contre les inondations doivent reposer sur une inspection détaillée des ouvrages et de leur environnement, qui est un élément primordial (*voir* [31] chapitre 3 ou [9] section 5.4 pour une description approfondie des principes relatifs aux inspections). Nous utilisons ce terme au sens technique : inspection des ouvrages ; depuis 2007 la réglementation utilise le terme « visite technique approfondie » pour des inspections approfondies réglementaires et réserve le terme « inspection » à la mission du service de contrôle qui a pour objet d'inspecter les actions du responsable et non pas ces ouvrages. Notons qu'au-delà des visites techniques approfondies (VTA), les gestionnaires doivent conduire des inspections régulières, plus ou moins approfondies, tout au long du cycle de vie des ouvrages. Cette inspection va être spécifique si une VTA ou autre inspection détaillée récente n'est pas disponible ; dans le cas où une telle inspection détaillée est disponible, il est tout de même nécessaire que le responsable de l'étude (diagnostic ou analyse de risque, entre autres études élémentaires C et 11) effectue une visite des ouvrages et valide le compte rendu d'inspection.

Lors de ces inspections, la majeure partie concerne le recueil d'observations (inspection **visuelle** détaillée) avec prises de photos autant que de besoin, mais il peut être également fait appel à des tests **opérationnels** (fermeture de vannes, de batardeaux, etc.), voire à des mesures (piézométrie, pente de talus, etc.) si nécessaire.

Les inspections doivent donner lieu à des comptes rendus détaillés, les données étant géoréférencées (coordonnées GPS, PK, repérage sur plan topographique détaillé, etc.).

Une inspection détaillée prend en compte le compte rendu de la précédente opération du même type, afin de détecter les évolutions.

Les données obtenues lors des inspections des ouvrages concernent également toute nature de données (géotechniques, géophysiques, topographie, hydraulique, morphodynamique, mécanique, opérationnelle, sur la végétation, les ouvrages inclus, etc.), bien que, le plus souvent, de manière descriptive et non quantitative, et peuvent être utiles dans toutes les études élémentaires numérotées de 0 à 13.

## 2.6. Reconnaissances spécifiques

Dans le cadre d'un diagnostic ou d'une analyse de risque d'un système de protection contre les inondations, **on peut** être amené à réaliser des reconnaissances spécifiques, si les données nécessaires sont absentes ou insuffisantes, en précision ou en densité (par exemple, des données relatives à la connaissance géotechnique des ouvrages), ou encore si les données disponibles sont trop anciennes et nécessitent une réactualisation (par exemple, les évolutions des parties noyées berges ou rivages ou l'état intérieur d'ouvrages non visités habituellement). Les reconnaissances concernent les ouvrages et leur environnement, entre autres les fondations.

Les principes des reconnaissances, ou investigations, réalisées dans le cadre d'un diagnostic ou d'une analyse de risque sont présentés dans la section 5.5 et le détail des méthodes les plus courantes dans les chapitres 7 et 8 de [9]. Il convient d'analyser les données disponibles avant d'établir un programme de reconnaissances. Ce programme peut être décomposé en plusieurs phases itératives, afin d'optimiser le ratio utilité des résultats/coûts. Le responsable du système de protection prépare le cadre général du programme de reconnaissance, le bureau d'études qui réalise le diagnostic ou l'EdD devant effectuer les propositions pour adapter au mieux les reconnaissances au fur et à mesure de la réalisation de l'étude.

À la différence des inspections visuelles, les reconnaissances permettent d'obtenir des données chiffrées en plus des données descriptives. Un (ou des) rapport(s) de reconnaissance doi(ven)t être établi(s) et les résultats présentés de manière à faciliter leur interprétation dans les études élémentaires qui vont les utiliser.

Les données obtenues lors de reconnaissances peuvent concerner toute nature de données (géotechnique, géophysique, topographie, hydraulique, morphodynamique, mécanique, ouvrages inclus, etc.) et être utiles, directement à travers un modèle ou indirectement de manière experte, dans toutes les études élémentaires numérotées de 0 à 13 (*voir Chapitre 5 : paragraphe 3.*).

## 2.7. Cas des examens techniques complets

Les examens techniques complets (ETC) imposés par la réglementation française de 2007 pour les digues de classe A et B, préalables à la réalisation des revues de sûreté (RDS) qui sont de l'ordre d'un diagnostic, comprennent d'une part l'examen des parties habituellement visitables, mais aussi de ce qui ne l'est pas en conditions usuelles (par exemple, berges et rivages noyés, ouvrages traversants, etc.), assimilables à de l'inspection visuelle. Ils comprennent également systématiquement la réalisation de reconnaissances particulières, y compris si nécessaire des mesures (par exemple, épaisseur résiduelle d'une canalisation). Ces reconnaissances spécifiques, faisant appel à des moyens particuliers de mesure ou d'examen, à réaliser entre autres à l'occasion des ETC de la réglementation de 2007, peuvent l'être également dans le cadre de l'EdD de la réglementation de 2015, car celle-ci comprend un diagnostic approfondi et donc des reconnaissances autant que nécessaire.

Les résultats des ETC sont à intégrer dans les données utilisées dans une analyse de risque.

### 3. Archivage et conservation des données

L'archivage continu des résultats de l'ensemble des études menées sur un système de protection est une plus-value indéniable pour le gestionnaire du système de protection. En effet, il permet de constituer une base solide en termes de connaissance de l'ouvrage et de son environnement, ce qui peut grandement faciliter le travail pour les différentes analyses de risque qui pourront ensuite être réalisées sur l'ouvrage.

Il permet également de faire un suivi de l'évolution de la vie de l'ouvrage et de ses différents composants.

Pour améliorer l'accès à l'information et sa lisibilité, il peut être envisagé de la compiler dans un système d'information géographique permettant le géoréférencement des données et la réalisation d'analyse multicritères.

#### 3.1. Nécessité de conserver et gérer les données

Une analyse de risque fait appel, comme il a déjà été dit précédemment, à de nombreuses données, de production récente pour certaines mais également ancienne, compte tenu de l'importance dans l'analyse de risque de l'historique de l'ouvrage pouvant expliquer ou laisser prévoir des évolutions défavorables et des défaillances. La recherche ou la production de ces données a un coût non négligeable.

Il est donc nécessaire que les gestionnaires de digues aient une politique de gestion rigoureuse des données relatives à l'ouvrage et à son environnement. Ces données servent à tous les niveaux de l'analyse de risque et de prise de décision concernant l'ouvrage, y compris pour la maintenance et l'entretien courant et la gestion de crise, ainsi que la conception des travaux lourds de confortement.

Tout document d'ordre technique, administratif, organisationnel et contractuel doit être archivé et facilement accessible. Réglementairement, c'est une obligation de tenir à jour un tel « dossier d'ouvrage ». En pratique, il convient non seulement de remplir cette obligation d'archivage, mais aussi de s'assurer que toutes les données et les documents seront facilement accessibles et exploitables, ce qui implique un effort d'organisation. Il est recommandé d'utiliser l'outil informatique pour gérer ces données, a minima avec un logiciel de type gestion de bibliothèque, et a maxima avec une gestion électronique complète de tous les documents numérisés. Néanmoins, il convient, pour des raisons de sécurité et d'accessibilité en toutes conditions, voire de lisibilité, de jouer sur la complémentarité papier/numérique.

#### 3.2. Utilisation de l'informatique

On peut envisager de gérer les documents et tout ou partie des données relatives aux digues avec des bases de données alphanumériques « classiques ». Néanmoins, la dimension linéaire des digues, et bi voire tridimensionnelle de leur environnement incite à l'utilisation d'un logiciel de type SIG (système d'information géographique) permettant aisément de gérer et d'accéder aux données en intégrant le lien avec la position des points auxquels elles sont attachées (géolocalisation).

Le « SIRS Digues » [24, 25] est une application informatique fondée sur un SIG et un système de gestion de base de données dédiée à la gestion des données relatives aux digues de protection. Cette application a été et est développée sous la maîtrise d'ouvrage

de trois des plus importants gestionnaires de digues de protection contre les inondations en France – le Symadrem, l'AD Isère Drac Romanche et la DREAL Centre – Val-de-Loire, par ordre d'entrée dans le projet, qui gèrent à eux trois plus de 1 000 km de digues (environ 15 % de la longueur totale des digues fluviales en France) –, sur une idée initiale et avec l'appui technique d'Irstea (ex-Cemagref). Cette application est utilisée sur une base opérationnelle depuis 2005 et couramment maintenue et en évolution. Ce système de gestion gère bien sûr les données qui y sont stockées, mais aussi des liens avec des documents externes, par exemple des fichiers images ou AutoCAD stockés en dehors de la base de données, qui peuvent être liés à un objet afin d'affiner sa description. Une application secondaire a également été développée en tant que module indépendant utilisant uniquement la base de données alphanumérique, qui permet de saisir et mettre à jour les données, par exemple par les garde-digues sur le terrain. Une version 2 a été développée, elle est disponible auprès de l'association France-Digues depuis fin 2017.

Bien entendu, l'utilisation d'une application informatique requiert une phase initiale de réflexion, d'analyse des besoins, de construction de l'architecture des données et de définition des fonctionnalités de traitement et d'interface à ne pas négliger, sous peine d'aboutir à un résultat au pire inutilisable ou inutile, au mieux non satisfaisant.



## CHAPITRE 9

# Analyse fonctionnelle et analyse de la défaillance des systèmes de protection contre les inondations

Ce chapitre présente les méthodologies d'analyse fonctionnelle et d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) qui ont été adaptées par l'Irstea pour l'étude des systèmes de protection contre les inondations [46].

Ces deux méthodes peuvent être appliquées pour mener respectivement les études élémentaires B et C de la démarche d'analyse de risque présentée au [paragraphe 3. du Chapitre 5](#). Elles reposent sur les notions de fonctions définies au [paragraphe 1. du Chapitre 5](#) et sur le principe de décomposition fonctionnelle des systèmes de protection (selon trois granularités) explicité au [paragraphe 2.1. du Chapitre 5](#). Elles reposent également sur les notions de défaillance structurelle et de défaillance hydraulique présentées au [paragraphe 2.1. du Chapitre 5](#).

Dans la démarche d'analyse de la défaillance que nous proposons, l'analyse fonctionnelle et l'AMDE constituent deux étapes à conduire successivement pour aboutir à la définition de l'ensemble des scénarios de défaillance du système de protection contre les inondations. En effet, l'analyse fonctionnelle du système permet de définir le cadre dans lequel sera ensuite analysée la défaillance du système, par l'application de la méthode AMDE. Pour garantir la qualité de l'analyse, ces deux étapes doivent être menées en totale cohérence.

Afin d'intégrer les deux aspects, hydraulique et structurel, de la défaillance, notre proposition de méthode s'intègre dans une démarche d'analyse de risque dont la [Figure 9-1](#) expose les différentes étapes. Dans cette démarche, le résultat de l'analyse structurelle alimente l'analyse hydraulique pour aboutir à l'estimation du risque d'inondation. Dans la suite du présent chapitre, nous détaillerons les trois premières étapes des analyses hydraulique et structurelle : analyse fonctionnelle, analyse de la défaillance et détermination des scénarios de défaillance.



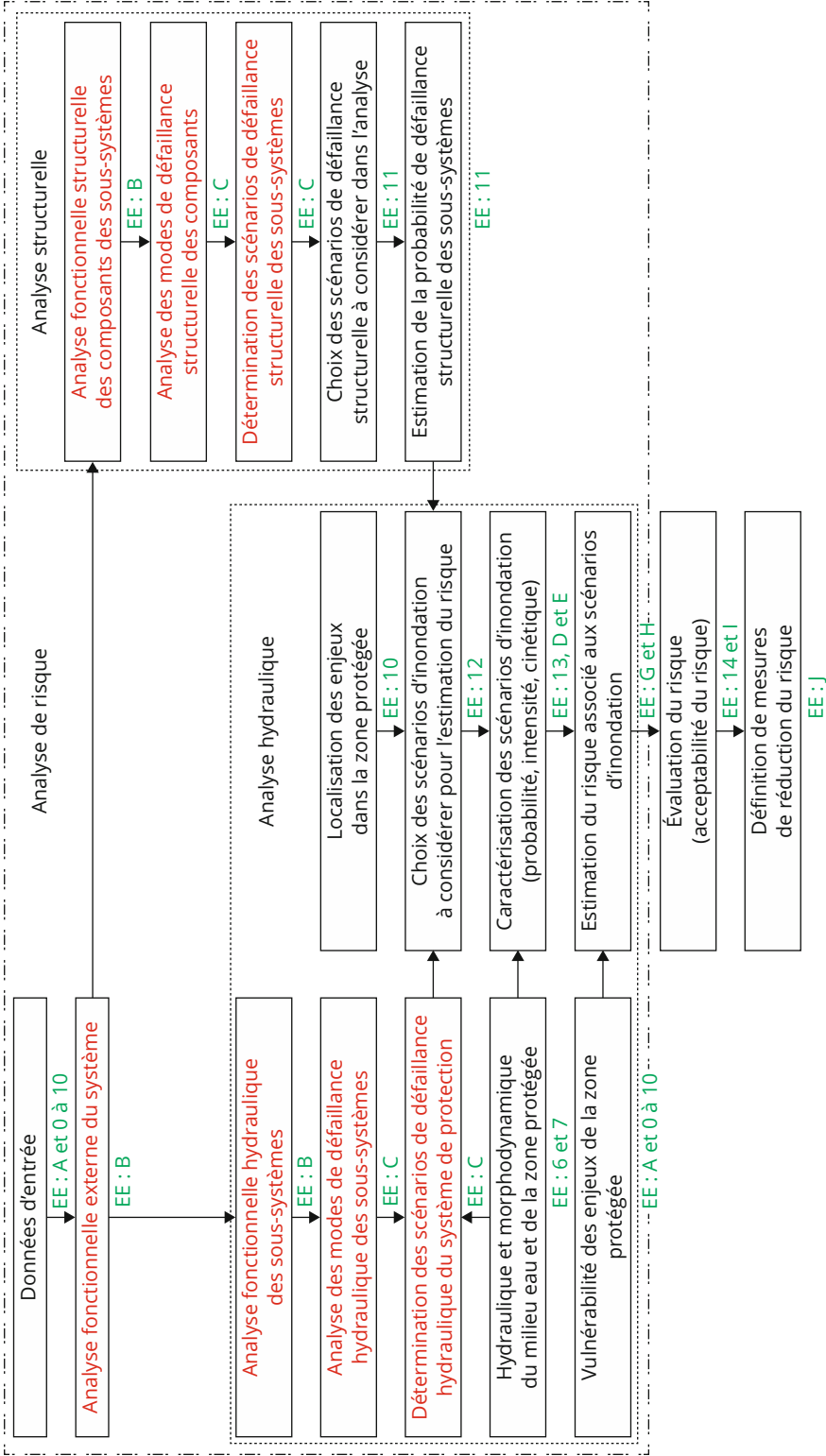


Figure 9-1. Principe d'intégration des analyses hydrauliques et structurelles au sein de la démarche d'analyse de risque et lien avec les différentes études élémentaires (EE) de la méthode présentée au paragraphe 3. du Chapitre 5 (Source : B. Beullac).

# 1. Proposition de méthodologie d'analyse fonctionnelle

La méthodologie d'analyse fonctionnelle que nous proposons est une démarche qui permet l'identification et la caractérisation de l'ensemble des relations fonctionnelles qui s'appliquent au système de protection. Elle a pour objectif de définir le modèle de fonctionnement (modèle fonctionnel) sur lequel reposera ensuite l'analyse de la défaillance (*voir* [paragraphe 2.](#)).

L'analyse fonctionnelle doit être entreprise à l'échelle du périmètre de l'analyse de risque (*voir* [Chapitre 5 : paragraphe 3.3.1.](#)) et s'intéresser à l'ensemble des éléments qui ont été précédemment identifiés lors de l'identification des risques (*voir* [Chapitre 5 : paragraphe 3.3.2.](#)), et caractérisés dans le cadre des études 1 à 10 de la méthodologie d'analyse de risque décrite au [paragraphe 3.](#) du [Chapitre 5.](#)

La démarche d'analyse fonctionnelle adopte un principe de raffinement par phases successives dans l'étude du fonctionnement du système. Ainsi, elle part du général (le système dans sa globalité) pour aboutir au détail (chacun des composants, voire des sous-composants du système).

Deux grands types de relations fonctionnelles et de phases d'analyse associées sont identifiables dans l'analyse d'un système :

- les relations fonctionnelles **externes**, qui traduisent les interactions entre le système de protection et son environnement physique (*voir* [Chapitre 2 : paragraphe 2.](#)), mais également réglementaire, technique, écologique ou encore économique et social. Ces relations fonctionnelles correspondent aux fonctions principales et aux fonctions contraintes du système (*voir* [Chapitre 5 : paragraphe 1.2.](#)). Elles sont analysées dans le cadre d'une première phase appelée **analyse fonctionnelle externe** ;
- les relations fonctionnelles **internes**, qui traduisent les rôles et les vocations (*voir* [Chapitre 5 : paragraphe 1.1.](#)) des composants formant le système de protection, ainsi que leurs interrelations. Ces relations fonctionnelles correspondent aux fonctions techniques des composants du système et aux éventuelles fonctions de sécurité qui peuvent leur être associées (*voir* [Chapitre 5 : paragraphe 1.2.](#)). Elles sont analysées dans le cadre d'une seconde phase appelée **analyse fonctionnelle interne**.

Les objectifs, la méthodologie de réalisation et les résultats attendus pour chacune de ces deux phases d'analyse sont respectivement détaillés dans les [paragraphe 1.1.](#) et [1.2.](#)

## 1.1. Analyse fonctionnelle externe du système de protection

### 1.1.1. Principes

Nous proposons que l'analyse fonctionnelle externe d'un système de protection réponde aux attentes suivantes :

- cadre d'analyse :
  - l'analyse doit être conduite à la granularité 1 d'analyse (*voir* [Chapitre 5 : paragraphe 2.1.](#)), et donc à l'échelle du périmètre du système de protection et de ses milieux extérieurs (*voir* [Chapitre 5 : paragraphe 3.3.1.](#)),
  - l'analyse doit intégrer l'ensemble des éléments identifiés dans le cadre de l'étude élémentaire d'identification des risques (*voir* [Chapitre 5 : paragraphe 3.3.2.](#)),

- les éléments à traiter dans l'analyse sont plus particulièrement ceux caractérisés dans le cadre des études élémentaires 2, 5, 6, 7, 8, 9 et 10 de la méthodologie d'analyse de risque décrite au [paragraphe 3.](#) du [Chapitre 5](#) ;
- objectifs :
  - identifier les interactions qui existent entre le système de protection et les différents éléments de l'environnement dans lequel il est implanté : environnement physique (*voir* [Chapitre 2](#) : [paragraphe 2.](#)), réglementaire, technique, économique, écologique, social, etc.,
  - traduire les interactions identifiées en termes de relations fonctionnelles externes : identification et caractérisation des **fonctions principales** et des **fonctions contraintes** du système de protection (*voir* [Chapitre 5](#) : [paragraphe 1.2.](#)).

### 1.1.2. Mise en œuvre de la méthode d'analyse fonctionnelle externe

Pour cet exemple d'application de la méthode, nous nous intéressons à un système de protection contre les inondations fluviales factice considéré existant, pour lequel l'étude d'identification des risques (*voir* [Chapitre 5](#) : [paragraphe 3.3.2.](#)) et les études élémentaires spécifiques qui en découlent aboutissent à la description suivante (pour l'exemple, elle est synthétique et non exhaustive) :

- le système de protection a pour vocation la protection de la zone protégée : elle comprend une population résidente de 5 000 individus ;
- l'objectif de protection correspond à la crue de référence de période de retour évaluée à 100 ans ;
- le budget annuel du maître d'ouvrage pour la gestion du système est de X milliers d'euros ;
- la surveillance, l'entretien et la gestion de crise sont une volonté du maître d'ouvrage ;
- le système de protection est un système de protection de type fermé, de 5 km de long et constitué de digues en remblai homogènes ;
- le système est implanté en zone Natura 2000 ;
- le système est soumis à des actions hydrauliques de type fluvial ;
- l'activité morphodynamique locale du cours d'eau se caractérise par des zones préférentielles d'érosion de berges et d'autres de dépôt de sédiments ;
- le système est implanté sur des alluvions limono-sableux ;
- le système est de classe B selon la réglementation sur la sécurité des ouvrages hydrauliques : il est donc soumis aux exigences réglementaires et aux recommandations techniques liées à cette classe ;
- une végétation ligneuse est présente au contact et sur les ouvrages ;
- des animaux fouisseurs sont présents dans l'environnement immédiat des ouvrages ;
- la crête de digue est utilisée comme sentier de randonnée ouvert au public ;
  - la description de l'ouvrage et de son environnement permet de procéder, de manière experte, à l'identification des interactions qui existent entre l'ouvrage et les éléments de son environnement.

Ces interactions sont de deux types :

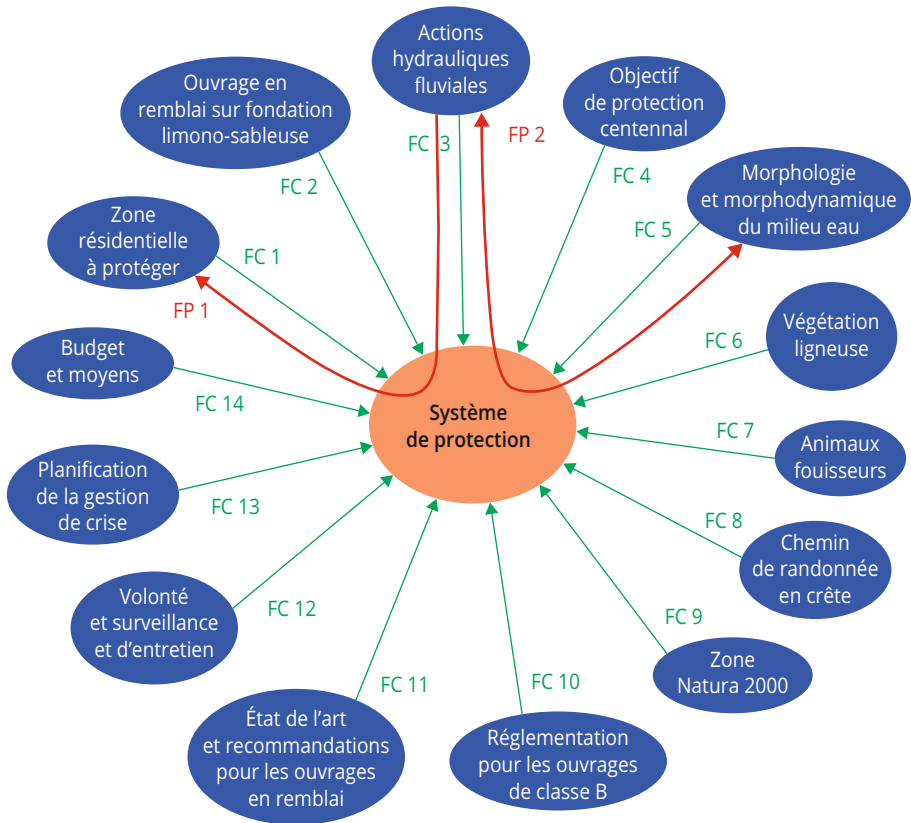
- des actions exercées par des éléments extérieurs sur d'autres éléments extérieurs, par l'intermédiaire de l'action du système de protection : par exemple, la zone protégée est potentiellement inondée par le cours d'eau lorsque la ligne d'eau dépasse le niveau de protection du système de protection. Ce type d'interactions met en évidence les vocations ou rôles (*voir* [Chapitre 5](#) : [paragraphe 1.1.](#)) du système étudié, et donc ses fonctions principales (*voir* [Chapitre 5](#) : [paragraphe 1.2.](#)) ;
- des contraintes que des éléments extérieurs imposent au système de protection : par exemple, la présence d'animaux fouisseurs contraint à l'adoption de mesures spécifiques,

en termes de conception et/ou de surveillance et entretien. Ce type d'interactions met en évidence les fonctions contraintes (*voir Chapitre 5 : paragraphe 1.2.*) qui doivent être prises en compte dans la conception et la gestion du système étudié.

Le diagramme en **Figure 9-2** donne un exemple de représentation graphique permettant de faire la synthèse des différentes interactions qui existent entre un système de protection les éléments de ses milieux extérieurs. Celui-ci est appliqué au système objet de la présente application de la méthode.

La dernière étape de l'analyse fonctionnelle externe consiste à caractériser l'ensemble des fonctions principales et fonctions contraintes, sur la base de chacune des interactions ayant été identifiées.

Le **Tableau 9-I** propose un exemple de résultat pour l'analyse fonctionnelle externe du système considéré dans cette application. Chaque fonction identifiée et définie doit par ailleurs être caractérisée de la manière la plus précise et complète, afin de renseigner au mieux l'analyse fonctionnelle interne.



**Figure 9-2.** Synthèse des interactions existant entre le système de protection et les éléments de ses milieux extérieurs (Source : B. Beullac).

Les interactions représentées par des flèches rouges mettent en évidence les fonctions principales du système de protection, celles représentées en vert correspondent à ses fonctions contraintes.

**Tableau 9-I.** Exemple de résultat de l'analyse fonctionnelle externe.

N°	Définition de la fonction
FP 1	Protéger la zone résidentielle de 5 000 habitants contre les inondations issues du cours d'eau fluvial (FP 1 est la seule vocation du système de protection).
FP 2	Empêcher la divagation du cours d'eau en contraignant son fonctionnement hydraulique et morphodynamique (FP2 n'est pas une vocation du système mais correspond à un rôle joué de fait).
FC 1	Permettre la protection de la zone visée.
FC 2	Prendre en compte le contexte et les objectifs en termes de matériaux (remblai sur fondation limono-sableuse).
FC 3	Être adapté aux caractéristiques des actions hydrauliques fluviales.
FC 4	Être dimensionné pour répondre à l'objectif de protection : crue de référence centennale.
FC 5	Intégrer dans sa gestion et sa conception les spécificités morphologiques et morphodynamiques du cours d'eau.
FC 6	Intégrer dans sa gestion et sa conception la présence et le développement continu de la végétation ligneuse.
FC 7	Intégrer dans sa gestion et sa conception l'action courante et répétée des animaux fouisseurs.
FC 8	Intégrer dans sa gestion et sa conception la présence du chemin de randonnée situé en crête de l'ouvrage.
FC 9	Répondre aux exigences réglementaires liées au classement en zone Natura 2000 du site dans lequel est implanté le système de protection.
FC 10	Répondre aux exigences réglementaires, en termes de gestion, liées à la classe B de la réglementation sur la sécurité des ouvrages hydrauliques.
FC 11	Intégrer, dans sa conception, les recommandations pour le dimensionnement des digues en remblai de classe B.
FC 12	Permettre une surveillance et un entretien efficace du système de protection (chemins d'accès, moyens humains et matériels).
FC 13	Faire l'objet d'une planification de la gestion en crise (lors des crues).
FC 14	Répondre à l'ensemble de ses contraintes et vocations dans les limites du budget disponible.

## 1.2. Analyse fonctionnelle interne du système de protection

Nous proposons que l'analyse fonctionnelle interne d'un système de protection réponde aux attentes suivantes :

- cadre d'analyse :
  - l'analyse doit être conduite aux granularités 2 et 3 d'analyse (*voir Chapitre 5 : paragraphe 2.1.*) et donc respectivement à l'échelle des sous-systèmes hydrauliques qui composent le système de protection et à celle des composants structurels qui composent ces sous-systèmes hydrauliques,
  - l'analyse est donc menée en deux étapes successives sur les mêmes objets : l'analyse fonctionnelle interne hydraulique des sous-systèmes hydrauliques (granularité 2) et l'analyse fonctionnelle interne structurelle qui décompose les sous-systèmes hydrauliques sur la base des composants structurels qui les forment (granularité 3) (*voir Chapitre 5 : paragraphe 2.1.*),
  - les éléments à traiter dans l'analyse sont principalement ceux caractérisés dans le cadre des études élémentaires 1, 2, 5, 8 et 9 de la méthodologie d'analyse de risque décrite au *paragraphe 3. du Chapitre 5*,
  - l'analyse doit prendre en compte les fonctions principales et les fonctions contraintes identifiées lors de l'analyse fonctionnelle externe ;

- objectifs :
  - décomposer le système de protection au travers de l'identification de ses sous-systèmes hydrauliques et de leurs composants structurels (voir Chapitre 5 : paragraphe 2.1.),
  - identifier les rôles et les vocations (voir Chapitre 5 : paragraphe 1.1.) des sous-systèmes hydrauliques et des composants structurels identifiés, ainsi que les interrelations qui peuvent exister entre eux et les traduire en termes de relations fonctionnelles internes : les **fonctions techniques hydrauliques** des sous-systèmes hydrauliques, les **fonctions techniques structurelles** des composants structurels et les éventuelles **fonctions de sécurité** pouvant être associées aux fonctions techniques (voir Chapitre 5 : paragraphe 1.2.).

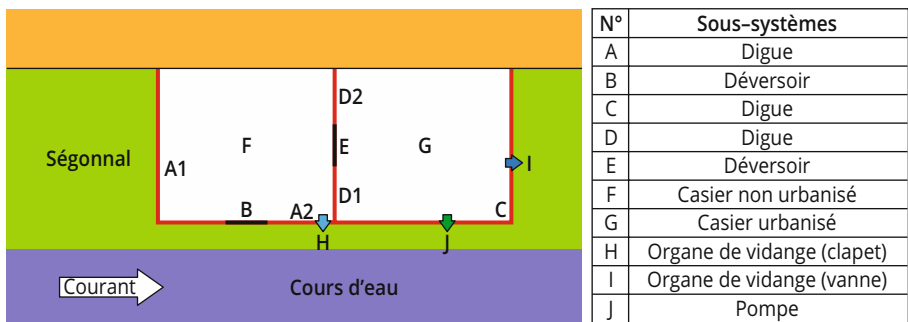
### 1.2.1. Mise en œuvre de la méthode d'analyse fonctionnelle interne hydraulique

La première étape de l'analyse fonctionnelle interne hydraulique consiste en l'identification et la description des sous-systèmes hydrauliques qui composent le système de protection (voir Chapitre 5 : paragraphe 2.1.).

En première approche, ces sous-systèmes sont discrétisés sur la base de leurs caractéristiques géométriques et techniques. Ces sous-systèmes peuvent être de trois types :

- linéaires :
  - digue,
  - digue résistante à la surverse,
  - déversoir avec ou sans fusible,
  - réservoir,
  - passage batardable ; etc. ;
- ponctuels :
  - ouvrages de vidange et de ressuyage,
  - ouvrages de transparence, etc. ;
- surfaciques :
  - casier,
  - zone d'écoulement ; etc.

La Figure 9-3 présente un exemple d'application de la décomposition d'un système de protection factice.



**Figure 9-3.** Exemple de décomposition d'un système de protection en sous-systèmes hydrauliques (Source : B. Beullac).

L'analyse fonctionnelle interne hydraulique a ensuite pour objectif d'identifier les fonctions techniques hydrauliques des sous-systèmes précédemment identifiés. Celles-ci traduisent les rôles et les vocations des sous-systèmes hydrauliques, ainsi que leurs possibles interrelations.



Le **Tableau 9-II** propose une liste des fonctions techniques hydrauliques les plus courantes pour les sous-systèmes hydrauliques des systèmes de protection. Il présente également leur caractérisation et les types de sous-systèmes hydrauliques associés.

**Tableau 9-II.** Exemple de liste de fonctions techniques hydrauliques des sous-systèmes de digues.

N°	Fonction technique hydraulique	Caractérisation de la fonction	Type de sous-système
1	Empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée ou une ou des parties de la zone protégée, jusqu'à la crête	- Niveau d'eau correspondant à la crête - Cote basse de la crête	Linéaire
2	Contrôler le déversement dans la zone située en arrière du sous-système, depuis le seuil	- Niveau d'eau correspondant au seuil de contrôle du déversement - Cote basse du seuil - Loi débit - Sens d'écoulement	Linéaire
3	Empêcher temporairement l'entrée d'eau dans la zone située en arrière du sous-système, jusqu'au sommet de la protection temporaire	- Niveau d'eau correspondant au sommet de la protection temporaire - Cotes basses de la protection - Niveau d'eau de mise en place	Linéaire
4	Permettre un écoulement d'eau gravitaire, au travers d'un sous-système linéaire	- Niveau d'eau correspondant à la cote de l'écoulement - Débit maximum	Ponctuel
5	Maîtriser un transfert d'eau (niveau, sens et/ou débit d'écoulement), d'un côté à l'autre d'un sous-système	- Débit maximum - Consignes de fonctionnement (sens et débit en fonction des niveaux d'eau)	Ponctuel
6	Stocker l'eau d'inondation	- Volume maximum - Cote de remplissage - Modélisation hydraulique - Loi de stockage	Surfacique
7	Permettre l'écoulement gravitaire de l'eau d'inondation	- Modélisation hydraulique - Localisation entrées - Localisation sorties - Loi de débit	Surfacique

Une fois les fonctions techniques hydrauliques des sous-systèmes hydrauliques identifiées, l'analyse peut alors déterminer les éventuelles fonctions de sécurité (*voir Chapitre 5 : paragraphe 1.2.4.*) qui favorisent le bon fonctionnement hydraulique des sous-systèmes, ainsi que leurs barrières de sécurité associées (*voir Chapitre 4 : paragraphe 9.*).

Les fonctions de sécurité (et barrières de sécurité associées) pouvant être distinguées à la granularité 2 d'analyse sont celles dont les actions s'appliquent aux fonctions techniques hydrauliques pour en prévenir ou relayer la défaillance, par exemple :

- la surveillance, le diagnostic et l'entretien d'un sous-système hydraulique (par exemple, en évitant l'accumulation d'embâcles) sont une barrière de sécurité qui a pour fonction de sécurité de prévenir la défaillance hydraulique de ce sous-système ;
- en crise, la surveillance, le diagnostic et la mise en place d'un digue temporaire pour assurer la protection normalement apportée par une digue qui se trouve défaillante sont une barrière de sécurité qui a pour fonction de sécurité de relayer la défaillance hydraulique de ce sous-système.

Le **Tableau 9-III** propose un exemple de résultat de l'analyse fonctionnelle interne hydraulique pour l'exemple de système présenté en **Figure 9-3**. L'analyse est menée sur la base des fonctions présentées dans le **Tableau 9-II**. Le tableau présente également

des barrières et fonctions de sécurité identifiées au cours de l'analyse. Les fonctions techniques hydrauliques sont caractérisées par leurs paramètres hydrauliques (niveaux d'eau, débits, etc.). L'estimation du niveau de protection apparent du système de protection (voir Chapitre 3 : paragraphe 3.1.) est déduite des résultats de l'analyse fonctionnelle interne hydraulique.

**Tableau 9-III.** Exemple de résultat de l'analyse fonctionnelle interne hydraulique.

N°	Sous-systèmes hydrauliques	Fonctions hydrauliques et fonctions de sécurité	Caractérisation des fonctions	Barrières de sécurité/fonction de sécurité associée
A	Digue	1. Empêcher l'entrée d'eau dans la zone F, jusqu'à la crête	- Niveau d'eau correspondant à la crête (crue Q150)	Digue temporaire/ relayer la défaillance de la digue
B	Déversoir	1. Empêcher l'entrée d'eau dans la zone F, jusqu'à la crête	- Niveau d'eau correspondant à la crête (crue Q100)	Digue temporaire/ relayer la défaillance de la digue
		2. Contrôler le déversement dans la zone F, depuis le seuil	- Niveau d'eau correspondant au seuil de contrôle du déversement contrôlé (crue Q100) - Cote du seuil : 250 m - Loi débit : défini par une loi de seuil (L, N) - Sens d'écoulement : cours d'eau = > F	Surveillance et entretien/prévenir l'obstruction du seuil déversant
C	Digue	1. Empêcher l'entrée d'eau dans la zone G, jusqu'à la crête	- Niveau d'eau correspondant à la crête (crue Q150)	Digue temporaire/ relayer la défaillance de la digue
D	Digue	1. Empêcher l'entrée d'eau de la zone F vers la G, ou de la G vers la F, jusqu'à la crête	- Niveau d'eau correspondant à la crête (hauteur d'eau amont/aval 3,5 m) - Cote de la crête : 250 m	Digue temporaire/ relayer la défaillance de la digue
E	Déversoir	1. Empêcher l'entrée d'eau de la zone F vers la G, ou de la G vers la F, jusqu'à la crête	- Niveau d'eau correspondant à la crête amont/aval (hauteur d'eau amont/aval 2,5 m)	Digue temporaire/ relayer la défaillance de la digue
		2. Contrôler le déversement dans la zone G, depuis le seuil (résistance à la surverse)	- Niveau d'eau correspondant au seuil de contrôle du déversement contrôlé (hauteur d'eau amont/aval 2,5 m) - Cote du seuil : 249 m - Loi débit : défini par une loi de seuil (L, N) - Sens d'écoulement : F = > G	Surveillance et entretien/prévenir l'obstruction du seuil déversant
F	Casier non urbanisé	7. Stocker l'eau d'inondation	- Volume maximum - Cote de remplissage : 249 m - Modélisation hydraulique - Loi de stockage	
G	Casier urbanisé	7. Stocker l'eau d'inondation	- Volume maximum - Cote de remplissage : 249 m - Modélisation hydraulique - Loi de stockage	
H	Organe de vidange (clapet)	6. Maîtriser un transfert d'eau (débit d'écoulement), d'un côté à l'autre de A	- Débit maximum (m <sup>3</sup> /s) - Maîtrise du sens de transfert (F = > cours d'eau) - Niveau de début de transfert (Q10 à la décrue)	Surveillance et entretien/prévenir les obstructions

Tableau 9-III. (Suite).

N°	Sous-systèmes hydrauliques	Fonctions hydrauliques et fonctions de sécurité	Caractérisation des fonctions	Barrières de sécurité/fonction de sécurité associée
I	Organe de vidange (vanne)	6. Maîtriser un transfert d'eau (débit d'écoulement), d'un côté à l'autre de C	- Maîtrise du débit de transfert : débit maximum (m <sup>3</sup> /s) - Niveau de début de transfert (Q10 à la décrue)	Surveillance et entretien/prévenir les obstructions
				Formation des opérateurs/prévenir les défaillances opérationnelles
J	Pompe	6. Maîtriser un transfert d'eau (débit d'écoulement), d'un côté à l'autre de C	- Maîtrise du sens de transfert (G = > cours d'eau) - Maîtrise du débit de transfert : débit maximum (m <sup>3</sup> /s) - Niveau de début de transfert (0,5 m dans G)	Surveillance et entretien/prévenir les obstructions
				Formation des opérateurs/prévenir les défaillances opérationnelles

### 1.2.2. Mise en œuvre de la méthode d'analyse fonctionnelle interne structurelle

La première étape de l'analyse fonctionnelle interne structurelle consiste en la décomposition des sous-systèmes hydrauliques en composants structurels : organes d'étanchéité, organes de protection contre l'érosion, corps de digue, filtres, drains, recharges, type de fondation, etc. (voir Chapitre 2 : paragraphe 5.2. et Chapitre 5 : paragraphe 2.1.).

Pour les ouvrages linéaires, cette décomposition permet la mise en évidence des différents tronçons structurellement homogènes qui composent le système de protection. Chacun de ces tronçons structurellement homogènes, qui sont définis par leur section en travers, doit faire l'objet d'une analyse fonctionnelle structurelle.

La Figure 9-4 donne un exemple de section en travers de digue simple et de décomposition en composants structurels, sur lequel nous allons mettre en application la méthodologie d'analyse fonctionnelle structurelle.

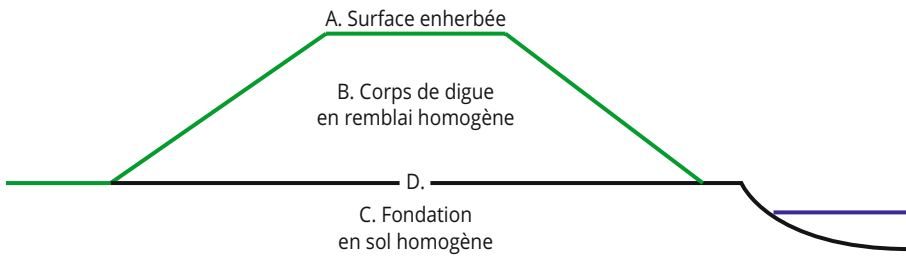


Figure 9-4. Exemple de section en travers de digue définissant un tronçon structurellement homogène d'un système de protection (Source : B. Beullac).

L'analyse fonctionnelle interne structurelle a ensuite pour objectif d'identifier les fonctions techniques structurelles des composants structurels précédemment identifiés. Celles-ci traduisent les rôles et les vocations des composants structurels, ainsi que leurs possibles interrelations.

Le niveau de raffinement de l'analyse fonctionnelle interne structurelle est déterminé et justifié en fonction des besoins ultérieurs de l'analyse de la défaillance du système de protection :

- pour les ouvrages et systèmes de génie civil, le niveau de détail de l'analyse sera le composant de génie civil étudié : par exemple, le corps de digue en remblai, le drain, le revêtement de protection, les interfaces, etc. ;
- pour les éventuels ouvrages et systèmes autres que génie civil tels que les ouvrages hydrauliques traversants (canalisations, clapets antiretour, vannes, etc.) ou les pompes, les éléments constitutifs de l'équipement susceptibles de dysfonctionner devront être pris en compte : par exemple, les articulations, les échelons, les regards, etc.

Les fonctions techniques structurelles doivent être caractérisées en termes mécaniques et hydrauliques. Pour les ouvrages en remblai, ces caractéristiques sont notamment :

- la cohésion (C) et l'angle de frottement ( $\phi$ ) ;
- la perméabilité ;
- la densité ;
- les contraintes limites, etc.

Le **Tableau 9-IV** propose une liste des fonctions techniques structurelles les plus courantes pour les composants structurels des digues en remblai.

**Tableau 9-IV.** Exemple de liste de fonctions techniques structurelles des composants structurels des digues en remblai.

N°	Fonctions	Description
1	Stabilité	Conditionne la stabilité mécanique du tronçon
2	Imperméabilité	Limite les écoulements
3	Drainage	Capte les écoulements internes au tronçon et les évacue
4	Filtration	Empêche la migration des particules à l'interface des composants granulaires
5	Autofiltration	Empêche la migration des particules, au sein d'un composant granulaire
6	Protection	Résistance à l'érosion externe (eau, autres agents)

Une fois les fonctions techniques structurelles des composants structurels identifiées, l'analyse peut alors déterminer les éventuelles fonctions de sécurité (*voir Chapitre 5 : paragraphe 1.2.4.*) qui favorisent le bon comportement structurel des composants, ainsi que leurs barrières de sécurité associées (*voir Chapitre 4 : paragraphe 9.*).

À la granularité 3 d'analyse, les fonctions de sécurité et leurs barrières associées agissent sur les fonctions techniques structurelles pour en prévenir ou relayer les défaillances (par exemple, la surveillance et l'entretien des composants qui permettent leur bon fonctionnement structurel).

Le **Tableau 9-V** propose un exemple de résultat de l'analyse fonctionnelle interne structurelle pour l'exemple de tronçon homogène présenté en **Figure 9-4**. L'analyse est menée sur la base des fonctions présentées dans le **Tableau 9-IV**. Le tableau présente également des exemples de barrières et fonctions de sécurité pouvant être associées aux différents composants.

**Tableau 9-V.** Exemple de résultat d'analyse fonctionnelle interne structurelle d'un tronçon de digue en remblai.

N°	Composants	Contacts	Fonctions	Barrières de sécurité	Fonctions de sécurité
A	Surface enherbée	B, extérieur	6. Résistance à l'érosion externe	Surveillance, diagnostic, entretien/confortement	Maintenir la performance du composant
				Surveillance en crise, diagnostic, rapide, protection temporaire	Relayer la défaillance de la fonction de protection
B	Corps de digue en remblai homogène	A, B	1. Stabilité	Auscultation/surveillance, diagnostic, confortement	Maintenir la performance du composant
				2. Étanchéité	Auscultation/surveillance, diagnostic, confortement
			5. Autofiltration	Surveillance en crise, diagnostic, rapide, étanchéité temporaire	Relayer la défaillance de la fonction d'étanchéité
				Auscultation/surveillance, diagnostic, confortement	Maintenir la performance du composant
C	Fondation granulaire homogène	B, extérieur	1. Stabilité	Auscultation/surveillance, diagnostic, confortement	Maintenir la performance du composant
				2. Étanchéité	Auscultation/surveillance, diagnostic, confortement
			5. Autofiltration	Auscultation/surveillance, diagnostic, confortement	Maintenir la performance du composant

## 2. Proposition de méthodologie pour l'analyse de la défaillance

L'analyse de la défaillance du système de protection est menée sur la base des résultats de l'analyse fonctionnelle. À l'image de l'analyse fonctionnelle interne, l'analyse de la défaillance suit le principe de trois granularités d'analyse qui est introduit au [paragraphe 2.1.](#) du [Chapitre 5](#) et se décompose en une analyse de la **défaillance hydraulique** et une analyse de la **défaillance structurelle**.

La méthode que nous proposons pour chacun de ces deux volets de l'analyse de la défaillance repose sur le principe de l'AMDE qui est issue de l'industrie et aujourd'hui classiquement utilisée pour l'analyse de la défaillance des barrages [39].

Nous détaillerons notre proposition de méthode pour l'analyse de la défaillance hydraulique des systèmes de protection, avant d'aborder les principes de notre proposition de méthode pour leur analyse de la défaillance structurelle.

### 2.1. Analyse de la défaillance hydraulique et construction des scénarios de défaillance hydraulique

#### 2.1.1. Principes

L'analyse de la défaillance hydraulique repose sur les résultats de l'analyse fonctionnelle interne hydraulique (*voir* [paragraphe 1.2.1.](#)).

Dans cette analyse, les modes de défaillance, qui traduisent l'incapacité d'atteindre un seuil de performance pour une fonction donnée, sont associés à chacune des fonctions techniques hydrauliques ayant été identifiées lors de l'analyse fonctionnelle.

Le **Tableau 9-VI** propose un exemple de liste de modes défaillances pouvant être associés aux principales fonctions techniques hydrauliques (*voir paragraphe 1.2.1.*) qui peuvent être portées par les différents types de sous-systèmes hydrauliques que l'on peut retrouver dans un système de protection.

**Tableau 9-VI.** Exemple de liste de fonctions techniques hydrauliques, avec leurs caractéristiques et leurs modes de défaillance [46].

N°	Fonction hydraulique	Caractérisation de la fonction	Type de sous-système	Mode de défaillance
1	Empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée ou une ou des parties de la zone protégée, jusqu'à la crête	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Niveau d'eau correspondant à la crête</li> <li>- Cote basse de la crête</li> </ul>	Linéaire	Entrée d'eau et/ou propagation des écoulements possible avant le niveau d'eau objectif
2	Contrôler le déversement dans la zone située en arrière du sous-système, depuis le seuil déversant (résistance à la surverse)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Niveau d'eau correspondant au seuil de contrôle du déversement</li> <li>- Cote basse du seuil</li> <li>- Loi de seuil</li> <li>- Sens d'écoulement</li> </ul>	Linéaire	Déversement possible avant le niveau d'eau objectif et/ou avec un débit supérieur aux conditions prévues
				Déversement possible mais à partir d'un niveau supérieur au niveau d'eau objectif et/ou avec un débit inférieur aux conditions prévues
3	Empêcher temporairement l'entrée d'eau dans la zone située en arrière du sous-système, jusqu'au sommet de la protection temporaire (fusible, batardeau, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Niveau d'eau correspondant au sommet de la protection temporaire</li> <li>- Cote basse de la protection</li> <li>- Niveau d'eau de mise en place</li> </ul>	Linéaire	Entrée d'eau possible avant le niveau d'eau objectif
4	Permettre un écoulement d'eau gravitaire, au travers d'un sous-système linéaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Niveau d'eau correspondant à la cote de l'écoulement</li> <li>- Débit maximum</li> <li>- Loi de débit</li> </ul>	Ponctuel	Écoulement impossible ou avec un débit inférieur aux conditions prévues
5	Maîtriser un transfert d'eau (niveau, sens et/ou débit d'écoulement), d'un côté à l'autre d'un sous-système	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Débit maximum</li> <li>- Consignes de fonctionnement (sens et débit en fonction des niveaux d'eau)</li> </ul>	Ponctuel	Transfert d'eau impossible ou avec un débit plus faible que prévu
				Transfert d'eau non prévu possible
6	Stocker l'eau d'inondation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Volume maximum</li> <li>- Cote de remplissage</li> <li>- Loi de stockage (H, V)</li> </ul>	Surfacique	Stockage du volume prévu impossible
7	Permettre l'écoulement gravitaire de l'eau d'inondation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fonctionnement hydraulique (modélisable)</li> <li>- Localisation entrées</li> <li>- Localisation sorties</li> <li>- Loi de débit</li> </ul>	Surfacique	Écoulement gravitaire impossible ou d'un débit plus faible que prévu
				Écoulement de débit plus fort que prévu

La méthode proposée est conduite sur la base d'un tableau d'AMDE. Ce tableau a été adapté pour le cas particulier des systèmes de protection, à partir des modèles de tableau d'AMDE classiquement utilisés dans le milieu industriel.



Le **Tableau 9-VII** présente l'en-tête du tableau d'AMDE que nous proposons et un exemple de résultat pour un sous-système hydraulique du type digue. Un tableau plus complet est présenté au **paragraphe 2.1.2.** dans un exemple d'application de la méthode.

**Tableau 9-VII.** Extrait (en-tête et premier sous-système hydraulique) de tableau d'AMDE hydraulique.

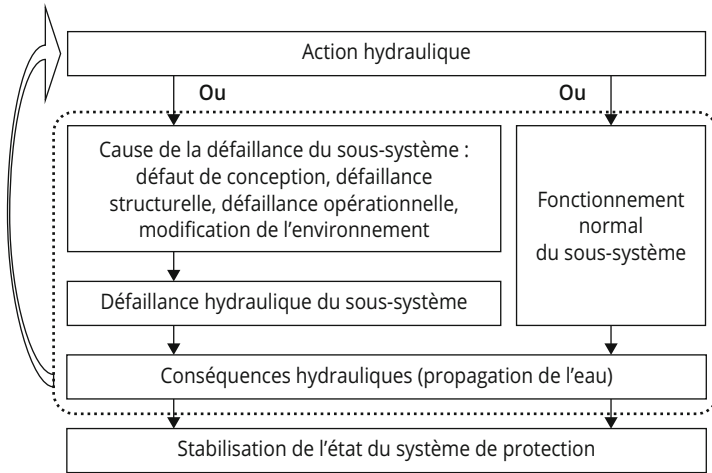
N°	Sous-systèmes	Contacts hydrauliques	Fonctions hydrauliques	Causes de la défaillance	Mode de défaillance	Effets de la défaillance
A	Digue	Cours d'eau, casier F	1. Empêcher l'entrée d'eau dans la zone F, jusqu'à la crête	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conception : niveau de la crête &lt; Q150</li> <li>- Défaillance structurelle : abaissement du niveau de la crête sous Q150/brèche</li> <li>- Environnement : abaissement relatif de la crête sous Q150</li> </ul>	Entrée d'eau possible avant Q150	L'eau entre dans F, avant Q150

L'application de ce principe d'analyse permet de mettre en évidence les relations de **causes de défaillances** de fonctions techniques hydrauliques à **effets de défaillances** de fonctions techniques hydrauliques pour chacun des sous-systèmes hydrauliques. Ces relations sont nommées des chaînes élémentaires d'événement.

En se fondant sur l'identification des **contacts** entre sous-systèmes, l'identification des différents **scénarios de défaillance hydraulique** envisageables pour le système de protection peut alors être conduite par la détermination des différents enchaînements possibles de chaînes élémentaires d'événements.

- **Les causes de défaillance** des fonctions techniques hydrauliques sont principalement :
  - les erreurs dans la conception ou la construction : par exemple, une erreur dans l'élévation de la crête d'un sous-système qui est inférieur au niveau prévu et conduit à un niveau inférieur de protection du sous-système hydraulique ;
  - les modifications morphologiques ou topographiques de l'environnement : par exemple, une élévation de l'altitude du lit du cours d'eau (à la suite d'une crue), qui devient plus élevée que le niveau initial à proximité d'un sous-système hydraulique, et se traduit par un niveau de protection diminué pour le sous-système ;
  - les défaillances opérationnelles : par exemple, une défaillance dans la fermeture d'une vanne qui résulte en une situation imprévue pour ce sous-système hydraulique et conduit à une inondation non prévue ;
  - les défaillances structurelles : par exemple, une brèche sur un tronçon de digue.
- **Les effets des défaillances** correspondent à leurs conséquences hydrauliques possibles dans la zone protégée au travers du comportement des sous-systèmes, pour des événements hydrauliques d'intensités données (principalement le niveau d'action hydraulique dans les milieux eau) :
  - entrée d'eau dans une partie de la zone protégée ;
  - propagation de l'inondation dans la zone protégée ;
  - augmentation du niveau d'eau dans une partie de la zone protégée, etc.
- **Les contacts** d'un sous-système correspondent aux interactions directes du sous-système hydraulique considéré avec les autres sous-systèmes ou avec l'environnement extérieur du système de protection.

La **Figure 9-5** illustre le principe de l'enchaînement (n fois) de chaînes élémentaires d'événements (cadre pointillé sur la figure) qui forment les scénarios de défaillance hydraulique.



**Figure 9-5.** Principe de construction des scénarios de défaillances hydrauliques (Source : B. Beullac).

Les scénarios démarrent par des actions hydrauliques externes (actions hydrauliques associées à des phénomènes du type : crues, tempêtes, tsunamis, etc.) et conduisent le système de protection à des nouveaux états de stabilité de ses sous-systèmes, certains d'entre eux étant défaillants. Selon la configuration du système de protection et le contexte hydraulique dans lequel il est situé, cet état de stabilité correspond soit à une situation d'étalement de l'inondation, soit à l'évacuation complète des eaux d'inondation présentes dans la zone protégée.

Dans ce processus, certains types de sous-systèmes permettent la propagation des phénomènes d'inondation sans pour autant connaître de défaillance hydraulique. En effet, le fonctionnement normal d'un déversoir peut par exemple provoquer un scénario d'inondation, initialement prévu, mais dont la propagation peut devenir ensuite non prévue du fait de la défaillance hydraulique d'autres sous-systèmes à l'intérieur de la zone protégée.

Différentes intensités d'actions hydrauliques externes doivent être prises en considération pour identifier l'ensemble des scénarios de défaillance possibles. Pour un cours d'eau, elles correspondent par exemple aux différents niveaux de crue envisageables.

Les barrières de sécurité, identifiées au cours de l'analyse fonctionnelle interne hydraulique (voir [paragraphe 1.2.1.](#)), peuvent être introduites en bonne place au sein des scénarios ainsi définis. Le principe de leur intégration est décrit au [paragraphe 2.3.1.](#)

Les scénarios de défaillance hydraulique ainsi définis peuvent être représentés sous la forme d'arbre de défaillance ou d'arbres d'événements. Notre proposition d'arbre d'événements pour les scénarios de défaillance hydraulique est présentée plus loin en [Figure 9-6.](#)

### Synthèse de la démarche

Pour synthétiser, notre proposition d'analyse de la défaillance hydraulique d'un système de protection contre les inondations est menée en appliquant la démarche suivante :

1. analyse des modes de défaillance hydraulique, sur la base des résultats de l'analyse fonctionnelle interne hydraulique, par la mise en œuvre de la méthode d'AMDE hydraulique présentée plus haut [46] ;
2. identification et justification des scénarios de défaillance hydraulique (scénarios d'inondation) envisageables, sur la base des résultats de l'AMDE hydraulique ;
3. représentation des scénarios de défaillance hydraulique envisageables, par la méthode des arbres d'événements ;
4. intégration des éventuelles barrières de sécurité identifiées dans l'analyse fonctionnelle interne hydraulique.

## 2.1.2. Analyse de la défaillance hydraulique d'un exemple de système de protection

Le Tableau 9-VIII présente un extrait de proposition de tableau d'AMDE pour l'analyse de la défaillance de l'exemple de système de protection dont l'analyse fonctionnelle est menée au paragraphe 1.2.1. (Figure 9-3).

**Tableau 9-VIII.** Extrait du tableau d'AMDE pour l'exemple de système de protection présenté en Figure 9-3.

N°	Sous-systèmes	Contacts hydrauliques	Fonctions hydrauliques	Causes de la défaillance	Mode de défaillance	Effets de la défaillance			
A	Digue	Cours d'eau, F	1. Empêcher l'entrée d'eau dans la zone F, jusqu'à la crête	- Conception : niveau de la crête < Q150 - Défaillance structurelle : abaissement du niveau de la crête sous Q150/ brèche - Environnement : abaissement relatif de la crête sous Q150	Entrée d'eau possible avant Q150	L'eau entre dans F, avant Q150			
B	Déversoir	Cours d'eau, F	1. Empêcher l'entrée d'eau dans la zone F, jusqu'à la crête	- Conception : niveau de la crête < Q100 - Défaillance structurelle : abaissement du niveau de la crête sous Q100/ brèche - Environnement : abaissement relatif de la crête sous Q100	Entrée d'eau possible avant Q100	L'eau entre dans F, avant Q100			
				2. Contrôler le déversement dans la zone F, depuis le seuil (résistance à la surverse)			- Conception : niveau du seuil de contrôle du déversement < Q100 - Défaillance structurelle : abaissement du niveau du seuil de contrôle du déversement sous Q100 - Environnement : abaissement relatif du niveau du seuil de contrôle du déversement sous Q100	Déversement possible avant Q100 et/ou avec un débit supérieur aux conditions prévues	L'eau entre plus tôt ou en plus grande quantité que prévu dans F
							- Conception : niveau du seuil de contrôle du déversement > Q100 - Opérationnel : obstruction du seuil de contrôle du déversement - Environnement : élévation relative du niveau du seuil de contrôle du déversement au dessus de Q100		

N°	Sous-systèmes	Contacts hydrauliques	Fonctions hydrauliques	Causes de la défaillance	Mode de défaillance	Effets de la défaillance
D	Digue	F, G	1. Empêcher l'entrée d'eau de la zone F vers la G, ou de la G vers la F, jusqu'à la crête	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conception : niveau de la crête inférieur au niveau 3,5 m</li> <li>- Défaillance structurelle : abaissement du niveau de la crête sous le niveau 3,5 m/brèche</li> <li>- Environnement : abaissement relatif de la crête sous le niveau 3,5 m</li> </ul>	Entrée d'eau possible avant le niveau 3,5 m	L'eau se propage dans G, avant le niveau 3,5 m
F	Casier non urbanisé	A, B, D, E, coteau	7. Stocker l'eau d'inondation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conception : volume inférieur à l'objectif</li> <li>- Environnement : diminution du volume de stockage</li> </ul>	Stockage du volume prévu impossible	Cote 249 m atteinte plus tôt que prévu : l'eau s'écoule plus tôt sur E
H	Organe de vidange (clapet)	Cours d'eau, F	8. Maîtriser un transfert d'eau (sens), d'un côté à l'autre de A	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conception : fonctionnement non conforme</li> <li>- Défaillance structurelle : dispositif hors service</li> <li>- Environnement : obstruction</li> </ul>	Transfert d'eau impossible ou avec un débit plus faible que prévu	Le niveau d'eau reste haut dans F à la décrue
					Transfert d'eau non prévu possible	L'eau entre dans F pendant la crue

Les scénarios d'inondations sont identifiés et construits sur la base du tableau d'AMDE (Tableau 9-VIII), en partant des actions hydrauliques externes choisies comme initiatrices et en suivant les chaînes élémentaires d'événements qui s'y trouvent mises en évidence.

La Figure 9-6 est une proposition d'arbre d'événements permettant la représentation graphique des scénarios de défaillance hydraulique. Cet exemple est construit sur la base du tableau d'AMDE présenté ci-dessus (Tableau 9-VIII). Il présente les scénarios de défaillance hydraulique susceptibles de survenir sur le système de protection pris en exemple (voir Figure 9-3), pour le cas de l'occurrence d'une action hydraulique correspondant à une crue de période de retour de 120 ans. Le principe d'intégration des barrières de sécurité au sein des scénarios de défaillance hydraulique est présenté au paragraphe 2.3.1.

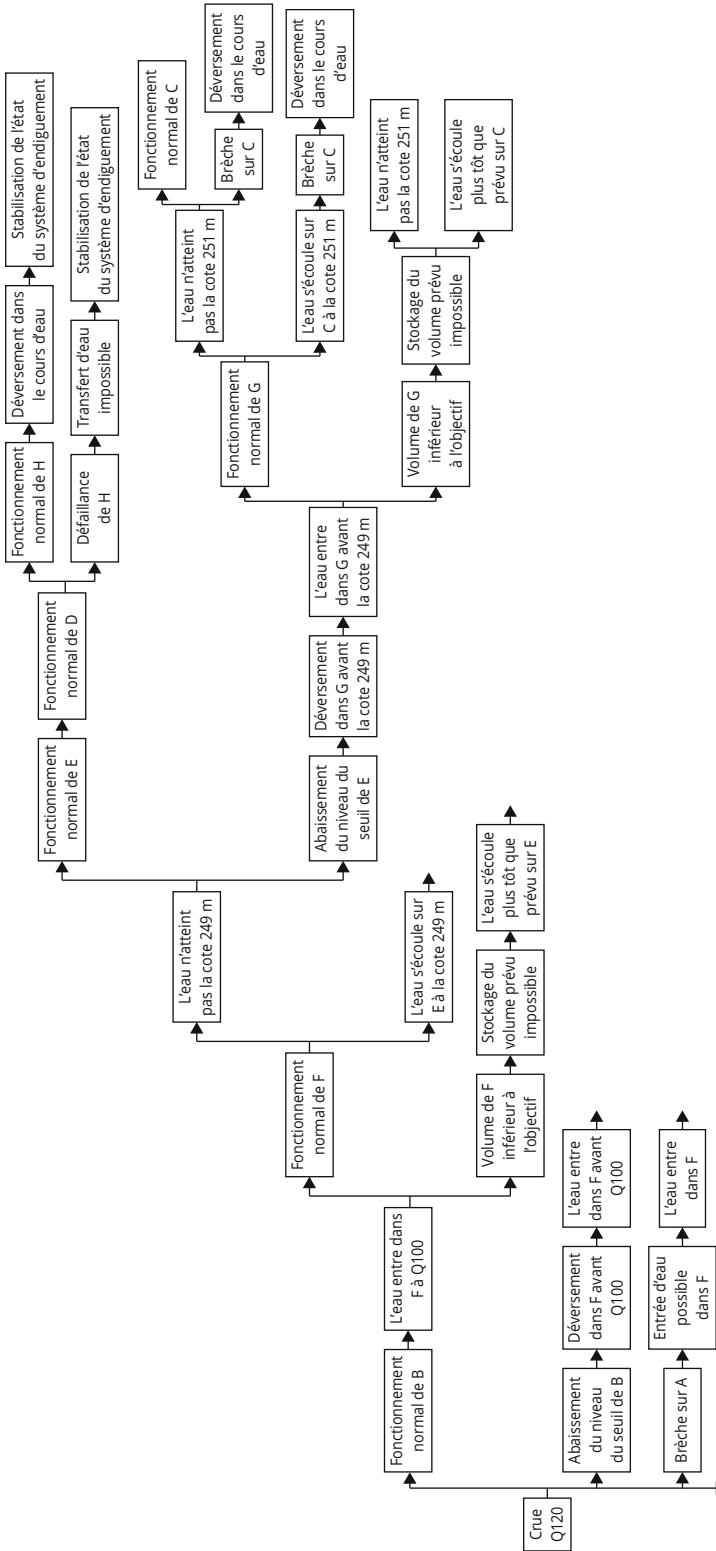


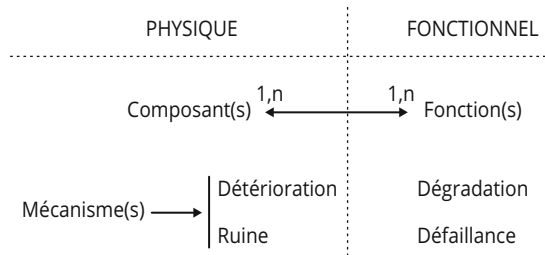
Figure 9-6. Extrait de la représentation graphique des scénarios d'inondation pour l'exemple de système de protection présenté en Figure 9-3, pour une crue Q120 (Source : B. Beullac).

## 2.2. Analyse de la défaillance structurelle et construction des scénarios de défaillance structurelle

### 2.2.1. Principes

Un scénario de défaillance structurelle conduit à la rupture de la digue et consiste en un processus qui implique des phénomènes à la fois physiques et fonctionnels [9, 46]. Ce processus est traditionnellement appelé « mode de rupture » [31, 46], un mode de rupture qui s'applique à un scénario de rupture mettant en œuvre un certain nombre de mécanismes pouvant se succéder ou se produire en parallèle, étant généralement dénommé par son mécanisme initiateur ou prépondérant : mode de rupture par surverse, par glissement, etc. (*voir Chapitre 10 : paragraphe 3.2.3.*).

La Figure 9-7 illustre les relations qui existent entre les phénomènes physiques et fonctionnels.



**Figure 9-7.** Aspects physiques et fonctionnels dans l'analyse des scénarios de défaillance structurelle (D'après [9, 46]).

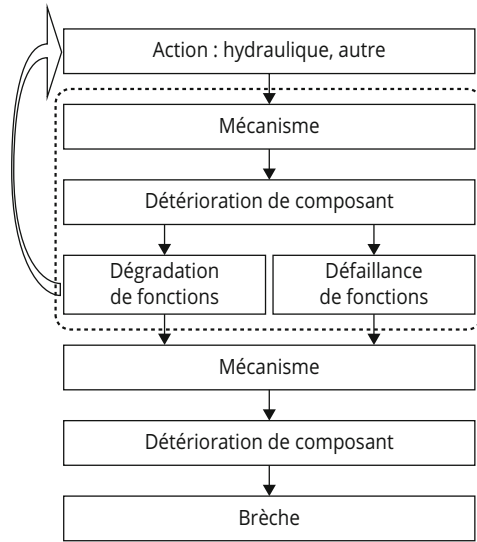
Les premiers mécanismes d'un scénario de défaillance structurelle [9] sont induits par des actions externes (principalement les actions hydrauliques, humaines, des animaux fouisseurs, etc.). Ces phénomènes initiateurs peuvent entraîner la détérioration ou la ruine d'un ou plusieurs composants structurels, et conduire ainsi à la dégradation ou la défaillance d'une ou plusieurs fonctions associées auxdits composants.

La dégradation ou défaillance d'une fonction peut alors initier ou aggraver des mécanismes, et faire survenir de nouvelles chaînes élémentaires d'événements. Pour certains mécanismes, ces initiations ou aggravations sont également conditionnées par la nature des actions externes.

La Figure 9-8 illustre le principe de construction des scénarios de défaillance structurelle, qui consiste en l'enchaînement (n fois) de chaînes élémentaires d'événements (cadre pointillé sur la figure), comprenant des mécanismes, des détériorations ou ruines de composants et des dégradations ou défaillances de fonctions pouvant déboucher sur la formation de brèches [9, 46].

Un scénario de défaillance peut s'interrompre lorsque cessent l'action externe (crues ou tempêtes, sécheresse, animaux, végétation, activités humaines, etc.) ou le mécanisme à l'œuvre. La digue est alors détériorée (ce qui signifie que les fonctions de certains de ses composants sont dégradées ou défaillantes) mais pas nécessairement ruinée. Le scénario peut alors redémarrer en cas de nouvelle action, pouvant cette fois conduire les composants de la digue à la ruine et donc à la création d'une brèche si une réparation n'est pas intervenue entre-temps.





**Figure 9-8.** Principe de construction des scénarios de défaillance structurelle (Source : B. Beullac).

Le **Tableau 9-IX** propose une liste des principaux mécanismes qui entrent en jeu dans la vie des digues en remblai. Ces mécanismes sont caractérisés en termes de seuils de détérioration et de ruine des composants impactés.

**Tableau 9-IX.** Exemples de mécanismes et détériorations/ruines résultants pouvant s’appliquer à des composants de digues.

Mécanismes	État possible au seuil de détérioration (ELS)	État possible au seuil de ruine (ELU)
Affouillement	Disparition partielle	Disparition totale
Érosion externe	Disparition partielle	Disparition totale
Érosion de surverse	Disparition partielle	Disparition totale
Érosion interne	Disparition de particules	Conduit, cavité, décompression
Glissement	Ruine partielle	Ruine totale
Effondrement	Ruine partielle	Ruine totale
Colmatage	Obstruction partielle	Obstruction totale

Le **Tableau 9-X** donne quant à lui un exemple des principales dégradations et défaillances de fonctions pouvant s’appliquer aux fonctions techniques structurelles des composants granulaires des digues en remblais.

**Tableau 9-X.** Exemples de fonctions structurelles, de dégradations et défaillances associées.

N°	Fonctions	Dégradation de la fonction	Défaillance de la fonction
1	Stabilité		Perte de stabilité
2	Étanchéité	Perméabilité supérieure au seuil de dégradation	Perméabilité supérieure au seuil de défaillance
3	Drainage	Débit de drainage inférieur au seuil de dégradation	Débit de drainage inférieur au seuil de défaillance
4	Filtration		Possible migration des particules d’un composant vers un autre

Tableau 9-X. (Suite).

N°	Fonctions	Dégradation de la fonction	Défaillance de la fonction
5	Autofiltration		Possible migration des particules au sein d'un composant
6	Protection	Protection affaiblie	Plus de protection

À l'image de l'analyse de la défaillance hydraulique, l'identification des scénarios de défaillance structurelle possibles est facilitée par l'utilisation d'une méthode d'AMDE permettant d'en avoir une approche analytique et systématique.

Celle-ci repose également sur un tableau qui identifie l'ensemble des chaînes élémentaires d'événements pouvant conduire à la défaillance structurelle des composants de digues (mécanismes = > détérioration ou ruine de composants = > dégradation ou défaillance de fonctions) et les relations de cause à effet entre chaînes élémentaires. Le **Tableau 9-XI** illustre la structure que peut prendre un tel tableau d'AMDE.

Les différentes étapes pour compléter le tableau d'AMDE sont :

- étape 0 : identification des différents composants du profil en travers de digue considéré ;
- étape 1 : analyse fonctionnelle du profil en travers ;
- étape 2 : identification des mécanismes possibles pour chaque composant en fonction de leurs caractéristiques ;
- étape 3 : identification des éventuelles détériorations ou ruines pouvant résulter de chaque mécanisme ;
- étape 4 : identification des liens entre détériorations ou ruines de composants et dégradations ou défaillances de fonctions. Les détériorations/ruines de composants sont les causes des dégradations ou défaillances de fonctions. Leurs liens sont indiqués dans le tableau d'AMDE par les expressions entre parenthèses associées aux détériorations ou ruines des composants. Par exemple, l'expression (A6b) signifie : défaillance (b) de la fonction de protection (6) pour le composant « surface enherbée » (A) ;
- étape 5 : identification des conséquences de la dégradation ou défaillance de chaque fonction en termes de mécanismes pour les composants.

Pour une meilleure lisibilité, les scénarios de défaillance structurelle peuvent aussi être représentés graphiquement sous la forme d'arbres d'événements illustrant l'ensemble des enchaînements de chaînes d'événements possibles, depuis le phénomène initiateur jusqu'aux différentes brèches. Chaque ramification de l'arbre reliant le phénomène initiateur à une brèche constitue un scénario de défaillance structurelle.

Pour chaque section de digue étudiée, les actions externes envisageables doivent être identifiées ainsi que les mécanismes qui peuvent en résulter pour les composants de digue. Ils constituent les possibles phénomènes initiateurs des scénarios de défaillance structurelle (ils peuvent être combinés). Il peut être choisi de faire varier leur nature au sein des scénarios.

Partant des actions externes choisies comme initiatrices et des mécanismes qui en résultent, les scénarios sont construits sur la base du tableau d'AMDE du profil en travers considéré, en suivant les chaînes élémentaires d'événements qui s'y trouvent mises en évidence (**Figure 9-9**).

Tableau 9-XI. Extrait (en-tête) de tableau d'AMDE structurelle.

N°	Composant	Causes des dégradations ou défaillances de fonctions		Fonctions	Dégradations ou défaillances des fonctions		Conséquences des dégradations ou défaillances des fonctions (mécanismes)
		Détérioration	Ruine		État	Caractérisation	
A	Surface enherbée	- Érosion de surverse - Érosion externe	- Disparition totale (A6b) - Disparition totale (A6b)	6. Protection	a) Dégradé b) Défaillant	- Protection détériorée - Plus de protection	Selon le niveau de crue : - érosion externe A - érosion de surverse A  Selon le niveau de crue : - érosion externe B - érosion de surverse B
...	...	...	...	...	...	...	...

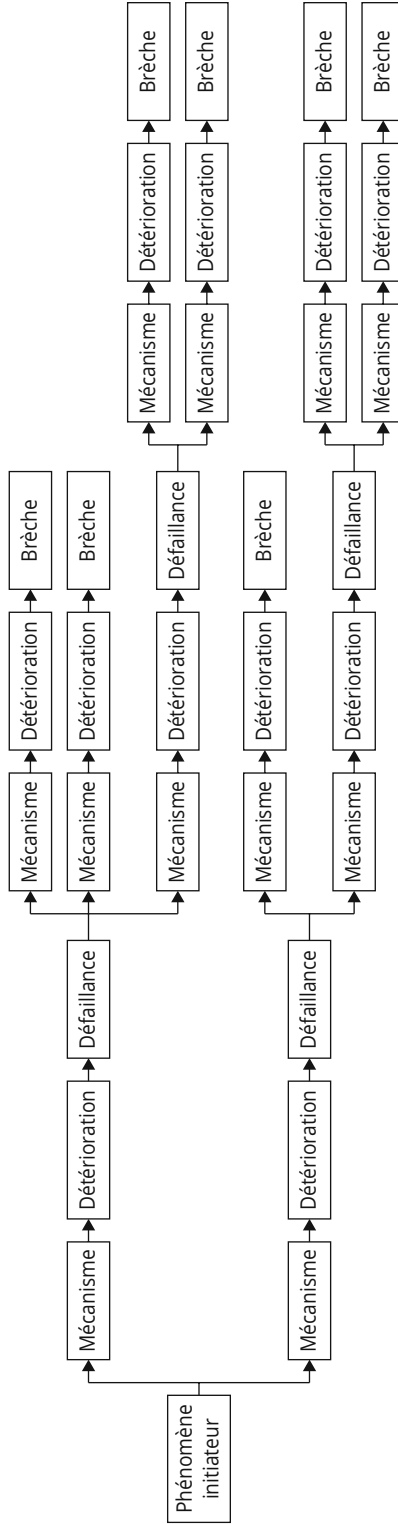


Figure 9-9. Principe de représentation des scénarios de défaillance structurelle (Source : B. Beullac).

Les barrières de sécurité, identifiées au cours de l'analyse fonctionnelle interne structurale (*voir* [paragraphe 1.2.2.](#)), peuvent être introduites en bonne place au sein des scénarios ainsi définis. Le principe de leur intégration est décrit au [paragraphe 2.3.2.](#)

### Synthèse de la démarche

Pour synthétiser, notre proposition d'analyse de la défaillance structurale de chaque type de section en travers de digue identifié sur le système de protection est menée en appliquant la démarche suivante :

1. analyse des modes de défaillance structurale, sur la base des résultats de l'analyse fonctionnelle interne structurale de la section en travers considérée, par la mise en œuvre de la méthode d'AMDE structurale développée par l'Irstea [46] ;
2. identification et justification des scénarios de défaillance structurale (scénarios de brèches) envisageables, sur la base des résultats de l'AMDE structurale ;
3. représentation des scénarios de défaillance structurale envisageables, par l'application de la méthode des arbres d'événements ;
4. intégration des éventuelles barrières de sécurité identifiées dans l'analyse fonctionnelle interne structurale.

## 2.2.2. Analyse de la défaillance structurale d'un exemple de tronçon de digues

L'application est menée pour l'exemple de tronçon structurellement homogène de digue étudié au [paragraphe 1.2.2.](#) (*voir* [Figure 9-4.](#)).

Par suite de l'analyse fonctionnelle interne structurale (*voir* [paragraphe 1.2.2.](#)), la démarche d'analyse de la défaillance commence par l'identification des actions externes pouvant s'appliquer à l'ouvrage. Dans le cadre d'une démarche d'analyse de risque, ce travail est mené sur la base des résultats de l'analyse fonctionnelle externe (*voir* [paragraphe 1.1.](#)).

À titre d'exemple, nous retenons ici un certain nombre d'actions externes. Les mécanismes initiateurs possibles présentés dans le [Tableau 9-XII](#) sont alors identifiés sur la base de l'analyse fonctionnelle structurale du tronçon et de la connaissance des caractéristiques de ses composants.

**Tableau 9-XII.** Actions externes considérées et mécanismes initiateurs associés.

Actions externes	Mécanismes initiateurs possibles (non limitatif)
Crue nettement inférieure au niveau de crête de digue	Affouillement de C, érosion longitudinale de A
Crue proche (inférieure) du niveau de la crête de digue	Affouillement de C, érosion longitudinale de A, érosion par franchissement de A
Crue supérieure au niveau de la crête de digue	Affouillement de C, érosion longitudinale de A, érosion par surverse de A
Chocs sur l'ouvrage	Érosion longitudinale de A
Karsts dans le substratum	Effondrement (instabilité) de C
...	...

L'analyse des modes de défaillance est ensuite menée. Elle conduit à la construction d'un tableau d'AMDE pour la section en travers de digue considérée ([Tableau 9-XIII](#)).

Tableau 9-XIII. Extrait de tableau d'AMDE pour la section de digue présentée en Figure 9-4.

N°	Composants	Contacts	Mécanismes applicables aux composants	Causes de dégradations ou défaillances des fonctions		Fonctions des composants	Modèles des défaillances des fonctions des composants		Effets de dégradations ou défaillances des fonctions (mécanismes résultants)		
				Seuil de détérioration	Dommage		État	Caractérisation			
A	Surface enherbée	B : extérieur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Érosion longitudinale</li> <li>- Érosion par surverse ou franchissement</li> </ul>	Disparition partielle (6a)	Disparition totale (6b)	6. Résistance à l'érosion externe	a) Dégradée	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Protection détériorée</li> </ul>	Selon le type de crue : - érosion longitudinale de A - érosion par surverse ou franchissement de A		
							b) Défaillante	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plus de protection</li> </ul>		Selon le type de crue : - érosion longitudinale de B - érosion par surverse ou franchissement de B	
							<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disparition des particules fines (2a)</li> <li>- Disparition des particules fines (2a)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cavités (1, 2a, 2b)</li> <li>- Disparition totale (brèche)</li> </ul>	1. Stabilité	Défaillante	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perte de stabilité mécanique</li> </ul>
B	Corps de digue homogène	A, C	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Érosion de conduit</li> <li>- Érosion longitudinale</li> <li>- Érosion par surverse ou franchissement</li> <li>- Glissement côté val</li> <li>- Effondrement</li> <li>- Liquéfaction</li> <li>- Augmentation des pressions interstitielles</li> </ul>		Disparition totale (brèche)	2. Étanchéité	a) Dégradée	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perméabilité supérieure à l'ELS de la fonction</li> </ul>	Si circulation d'eau dans B : - érosion régressive et de conduit de B - augmentation des pressions interstitielles dans B		
							b) Défaillante	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perméabilité supérieure à l'ELU de la fonction</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Glissement côté val de B</li> <li>- Effondrement de B</li> <li>- Liquéfaction de B</li> </ul>	
						Disparition partielle (brèche partielle)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ruine totale (brèche)</li> </ul>	5. Autofiltration	Défaillante	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possible migration des particules au sein du composant</li> </ul>	Suffusion dans B
						<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ruine partielle (2a)</li> <li>- Ruine partielle (2a)</li> <li>- Ruine partielle (2a)</li> </ul>					
						<ul style="list-style-type: none"> <li>- Instabilité géomécanique (1)</li> </ul>					

Tableau 9-XIII. (Suite).

N°	Composants	Contacts	Mécanismes applicables aux composants	Causes de dégradations ou défaillances des fonctions		Fonctions des composants	Modèles des défaillances des fonctions des composants		Effets de dégradations ou défaillances des fonctions (mécanismes résultants)
				Seuil de détérioration	Dommage		État	Caractérisation	
C	Fondation	B, extérieur	- Érosion régressive	- Disparition des particules fines (2)		1. Stabilité	Défaillante	- Perte de stabilité mécanique	- Glissement côté val de C - Effondrement de C - Liquéfaction de C
				- Suffusion	- Disparition des particules fines (2)				
			- Érosion de conduit	- Disparition partielle (1, 2)	- Disparition totale (brèche)	5. Autofiltration	Défaillante	- Perméabilité supérieure à l'ELU de la fonction	- Glissement côté val de C - Effondrement de C - Liquéfaction de C
			- Affouillement	- Disparition partielle (brèche partielle)	- Ruine totale (brèche, 1B)				
			- Glissement côté val	- Ruine partielle (2, 1B)	- Ruine totale (brèche, 1B)				
			- Effondrement	- Ruine partielle (2, 1B)	- Ruine totale (brèche, 1B)				
			- Liquéfaction	- Ruine partielle (2, 1B)	- Instabilité géomécanique (1)				
			- Augmentation des pressions interstitielles						



La [Figure 9-10](#) est une proposition d'arbre d'événements permettant la représentation graphique des scénarios de défaillance structurelle. Cet exemple est construit sur la base du tableau d'AMDE présenté dans le [Tableau 9-XIII](#). Il présente les scénarios de défaillance structurelle susceptibles de survenir sur le tronçon de digue pris en exemple dans cette application (*voir* [Figure 9-4](#)), pour le cas d'une action hydraulique correspondant à une crue inférieure au niveau de la crête de digue. Le principe d'intégration des barrières de sécurité au sein des scénarios de défaillance structurelle est présenté au [paragraphe 2.3.2](#).

### 2.3. Intégration des fonctions de sécurité

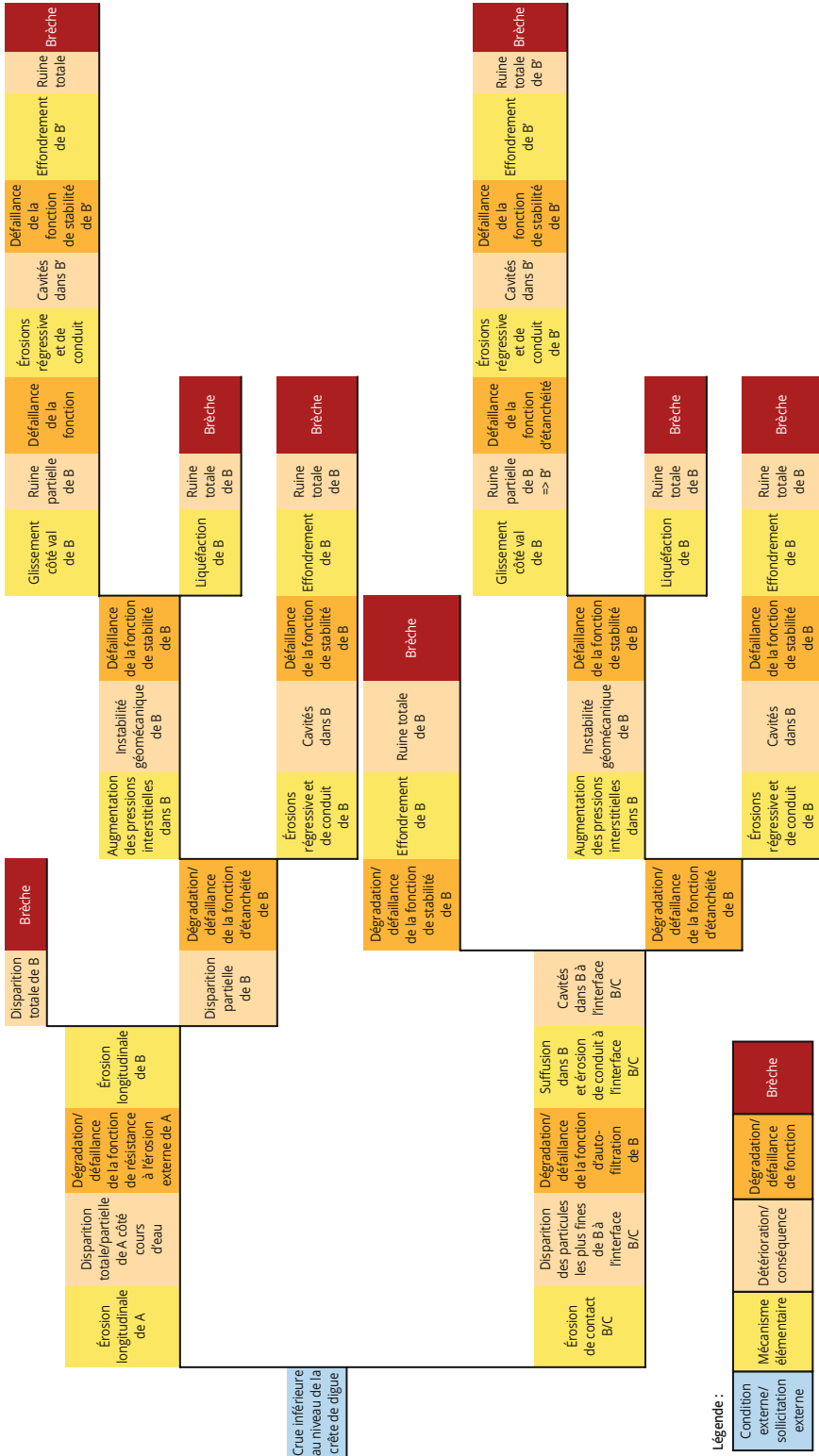
Comme nous l'indiquons au [paragraphe 1.2.4](#), du [Chapitre 5](#), deux types de fonctions de sécurité peuvent être identifiés :

- **les fonctions de sécurité de prévention** : prévenant les défaillances des fonctions techniques, elles **agissent avant les défaillances** des fonctions techniques et **agissent sur les causes des défaillances** de fonctions. Ces fonctions de sécurité sont principalement : maintenir la performance structurelle des composants structurels des éléments du système de protection ; maintenir la performance hydraulique des sous-systèmes ;
- **les fonctions de sécurité de relai** : relayant les défaillances des fonctions techniques, elles **agissent après les défaillances** des fonctions techniques et **se substituent à leur action défaillante**. Ces fonctions de sécurité sont par exemple : relayer la défaillance du composant assurant la protection externe d'un segment de digue (par la mise en place d'une protection temporaire), pour assurer la fonction technique défaillante « protéger contre l'érosion externe » portée par ce composant, relayer la défaillance d'un sous-système de type digue (par la mise en place d'une digue temporaire), pour assurer la fonction technique défaillante « empêcher l'entrée d'eau dans la zone protégée » portée par ce sous-système, etc.

L'intégration des barrières de sécurité dans les analyses des modes de défaillance hydraulique et structurelle dépend directement de la nature de leurs fonctions de sécurité (de prévention ou de relai).

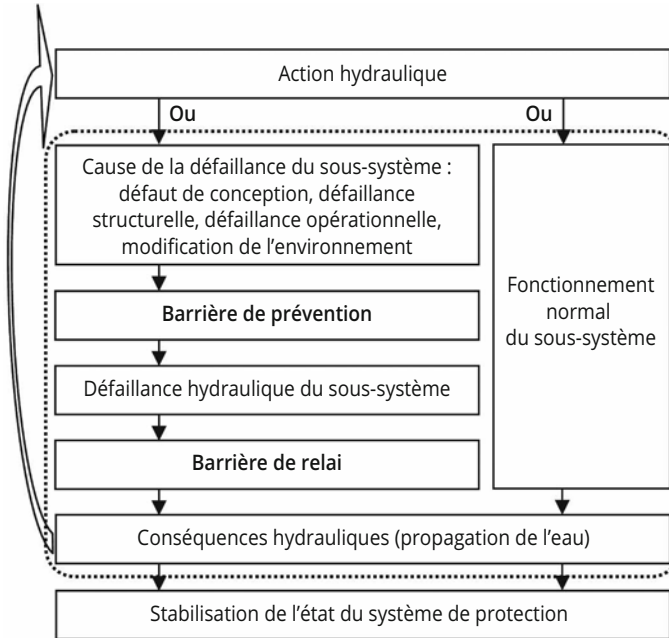
#### 2.3.1. Intégration dans les scénarios de défaillance hydraulique

La [Figure 9-11](#) présente une proposition de principe d'intégration de ces deux types de fonctions de sécurité dans les scénarios de défaillance hydraulique, sur la base du principe d'enchaînement de chaînes élémentaires d'événements présenté au [paragraphe 2.1.1](#).



Légende :

Figure 9-10. Représentation graphique des scénarios de défaillance structurelle pour l'exemple de tronçon de digue présenté en Figure 9-4, pour une crue au niveau inférieure à la crête de digue (Source : B. Beullac).



**Figure 9-11.** Principe de l'intégration des fonctions de sécurité de prévention et de relai dans les scénarios de défaillance hydraulique (Source : B. Beullac).

Dans les scénarios de défaillance hydraulique, les fonctions de sécurité de prévention visent à identifier et corriger les causes de défaillance des sous-systèmes. Comme indiqué précédemment au [paragraphe 2.1.1.](#), ces causes sont principalement :

- les erreurs dans la conception ou la construction des sous-systèmes ;
- les modifications de la morphologie ou la topographie de l'environnement des sous-systèmes de digues ;
- les défaillances opérationnelles ;
- les défaillances structurelles.

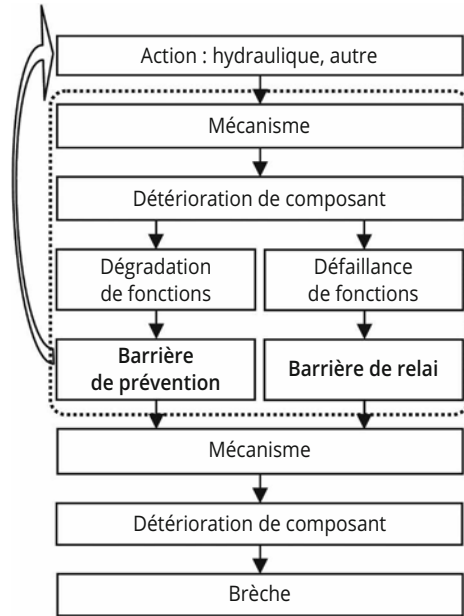
Les fonctions de sécurité de relai, dans les scénarios de défaillance hydraulique, visent à se substituer aux sous-systèmes hydrauliques dont les fonctions techniques sont défaillantes. Par exemple, l'identification d'un tronçon de digue rompu et la construction d'urgence d'une digue temporaire sont une barrière de sécurité assurant une fonction de sécurité de relai pour un sous-système hydraulique du type digue.

### 2.3.2. Intégration dans les scénarios de défaillance structurelle

La [Figure 9-12](#) présente une proposition de principe d'intégration de ces deux types de fonctions de sécurité dans les scénarios de défaillance structurelle, sur la base du principe d'enchaînement de chaînes élémentaires d'événements présenté au [paragraphe 2.2.1.](#)

Dans les scénarios de défaillance structurelle, les fonctions de prévention agissent sur les composants détériorés dont les fonctions techniques sont dégradées. Ces barrières de sécurité sont principalement des barrières de maintenance comme des inspections de digues planifiées qui permettent l'alerte en cas de détérioration des digues et la réparation après le diagnostic et la prise de décision.

Les fonctions de sécurité de relai, dans les scénarios de défaillance structurelle, sont prévues pour se substituer aux composants structurels dont les fonctions techniques sont défaillantes. Ces fonctions de sécurité correspondent principalement à des barrières de sécurité



**Figure 9-12.** Principe de l'intégration des fonctions de sécurité de prévention et de relai dans les scénarios de défaillance structurelle (Source : B. Beullac).

de gestion de crise, comme une surveillance en crue d'un système de protection, qui lance une alerte du fait de la détérioration de la protection contre l'érosion externe d'un tronçon de digue, et conduit au renforcement d'urgence du talus côté eau de la digue (par exemple, par la mise en place de sacs de sable), pour empêcher l'érosion externe du corps de digue.

### 3. Méthodes de représentation des scénarios de défaillance sous la forme d'arbres

Il existe deux méthodes classiquement utilisées pour représenter les scénarios de défaillance d'un système dont on a réalisé l'analyse de la défaillance : l'arbre de défaillance et l'arbre d'événements [37]. Le nœud papillon constitue une troisième méthode qui réunit les deux premières pour représenter le scénario de défaillance et les scénarios de conséquences qui peuvent en découler.

Ces méthodes d'arbres peuvent constituer des outils à part entière pour la définition des scénarios de défaillance. Toutefois, pour obtenir de meilleurs résultats, il est recommandé que l'application de ces différentes méthodes repose sur une analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) (voir [paragraphe 2.](#)), qui permet de définir les défaillances de fonctions techniques possibles pour le système ainsi que leurs causes et leurs conséquences, et qui structure ainsi la définition et la construction des scénarios de défaillance envisageables. L'arbre ne constitue alors qu'un moyen de représentation des scénarios de défaillance.

La représentation des scénarios de défaillance sous la forme d'arbre a plusieurs intérêts. Elle permet une meilleure visualisation des scénarios et des enchaînements d'événements qui les constituent. Cette visualisation, qui met en évidence les combinaisons d'événements dépendants et indépendants formant les scénarios de défaillance, permet de faciliter le calcul des probabilités de réalisation des scénarios.

L'utilisation de tels arbres permet de représenter l'action des barrières de sécurité existantes dans les scénarios de défaillance. Elle facilite également l'identification et la représentation des mesures correctives nécessaires et l'estimation des bénéfices qui en résultent vis-à-vis du risque.

### 3.1. Méthode de l'arbre de défaillance

L'arbre de défaillance est à la base une méthode experte et déductive permettant d'identifier l'ensemble des combinaisons de causes (les scénarios de défaillance) qui peuvent expliquer la réalisation d'un événement final (la défaillance du système) [37]. Comme indiqué plus haut, il est conseillé à l'expert de s'appuyer sur les résultats d'une AMDE pour construire les arbres de défaillance.

Un arbre de défaillance est construit de la défaillance finale vers les causes originales. La première étape consiste à chercher les différentes causes finales (événements/défaillances) de l'événement final, puis les causes (événements/défaillances) de ces différentes causes finales (en répondant à la question « qu'est-ce qui est nécessaire et suffisant à la réalisation de ces événements/défaillances ? »). Le même procédé est utilisé pour trouver les causes d'origine des premières défaillances. Un arbre de défaillance se termine quand les causes identifiées sont externes au système étudié. Pour chaque niveau de l'analyse, les causes peuvent être nombreuses (il n'y a pas de limites au nombre de causes conduisant à un niveau donné de l'arbre) et correspondre à des combinaisons de causes (exprimées par des liens de type « et ») ou à des causes indépendantes (exprimées par des liens de type « ou »). La Figure 9-13 montre une application pour un exemple simple de défaillance de digue conduisant à une brèche.

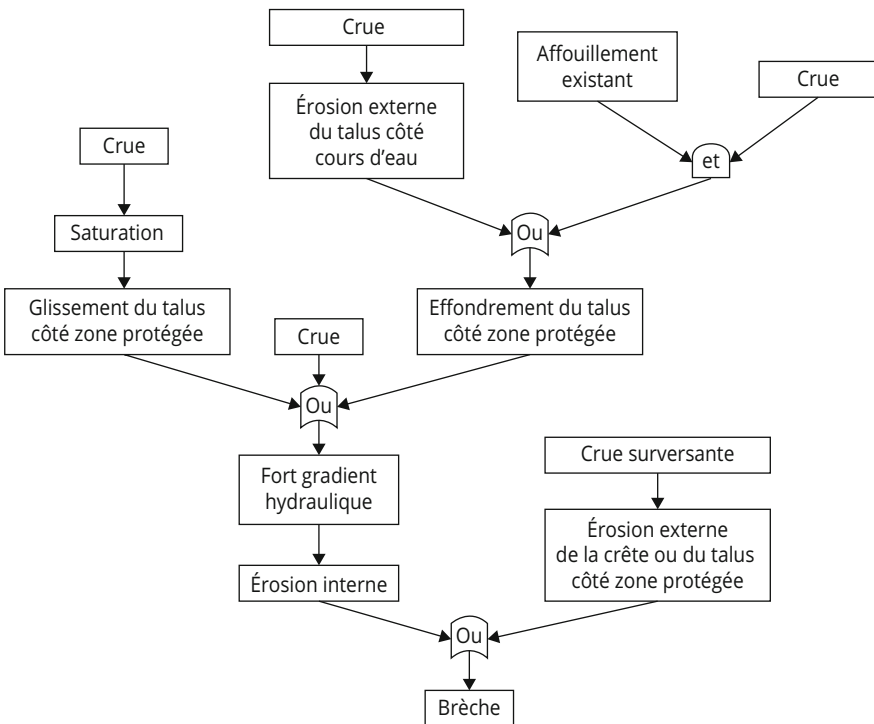


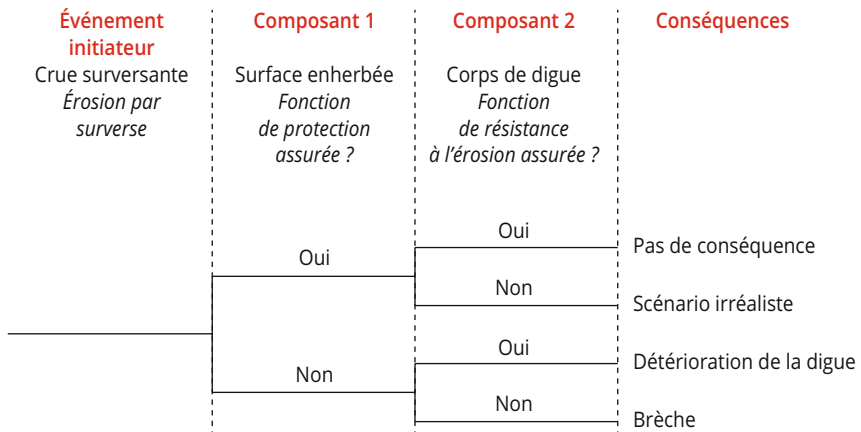
Figure 9-13. Exemple simple d'arbre de défaillance appliqué à une digue (Source : B. Beullac).

Dans cette méthode, chaque chemin depuis une cause jusqu'à l'événement de défaillance final correspond à un scénario de défaillance.

### 3.2. Méthode de l'arbre d'événements

La méthode de l'arbre d'événements est une méthode inductive permettant de modéliser tous les scénarios possibles résultant de l'événement indésirable initial et conduisant à différents événements finaux possibles, et de calculer leur probabilité pour une chaîne chronologiquement organisée d'événements indépendants (par exemple, un mode de défaillance) [37]. Cette méthode de modélisation consiste en un processus binaire (fonctionnement de la fonction/défaillance de la fonction), discret (événements ou évolution ponctuelle du temps) et chronologique. Comme pour l'arbre de défaillance, il est conseillé de s'appuyer sur les résultats d'une AMDE pour construire les arbres d'événements.

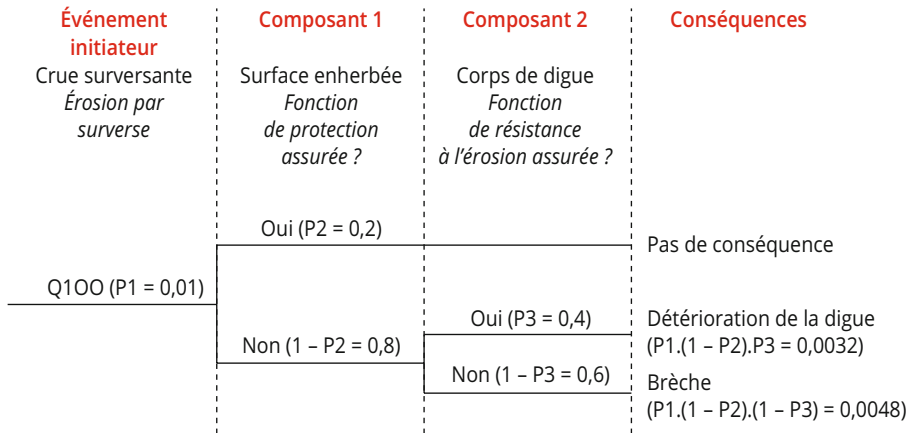
La Figure 9-14 montre un exemple d'arbre d'événements très simplifié pour un mode de défaillance par surverse. Un arbre d'événements est constitué d'une série de nœuds et de branches allant généralement de gauche à droite, de l'événement initial aux différentes conséquences finales. Chaque nœud représente un événement incertain ou une condition. Chaque branche représente l'un des résultats binaires possibles de l'événement ou un état possible d'une condition. Les conséquences des scénarios et les scénarios physiquement impossibles sont identifiés par analyse experte.



**Figure 9-14.** Exemple d'arbre d'événements très simplifié pour un mode de défaillance par surverse (Source : B. Beullac).

Pour compléter un arbre d'événements avec des valeurs de probabilité, l'arbre doit d'abord être réduit (pour réduire un arbre d'événements, il faut supprimer les scénarios impossibles) (Figure 9-15). Une fois l'arbre d'événements réduit, une valeur de probabilité peut être associée à chaque branche résultant d'un événement (un nœud). Les différents événements composant un scénario étant indépendants, la probabilité de la conséquence d'un scénario est calculée en multipliant les valeurs des probabilités de ses différents événements.





**Figure 9-15.** Exemple simple d'arbre d'événements réduit et complété avec des probabilités (Source : B. Beullac).

### 3.3. Méthode du « nœud papillon »

Cette méthode d'arborescence est une combinaison de l'arbre de défaillance et de l'arbre d'événements. Elle permet de modéliser toutes les chaînes d'événements des causes possibles (arbre de défaillance) d'un événement redouté, jusqu'aux conséquences envisageables (arbre d'événements) de cet événement.

Comme le montre la [Figure 9-16](#), ces arbres sont généralement représentés horizontalement, de gauche (causes) à droite (conséquences). Sur la gauche, nous trouvons un arbre de défaillance montrant les différents scénarios de défaillance qui peuvent conduire à l'événement redouté central (ERC au centre de l'arbre). Sur la droite, nous trouvons un arbre d'événements montrant les différentes conséquences possibles résultant de l'événement redouté central. La [Figure 9-16](#) est un exemple simplifié pour les scénarios de défaillance des digues conduisant à une brèche et les conséquences qui peuvent en résulter pour la zone protégée.

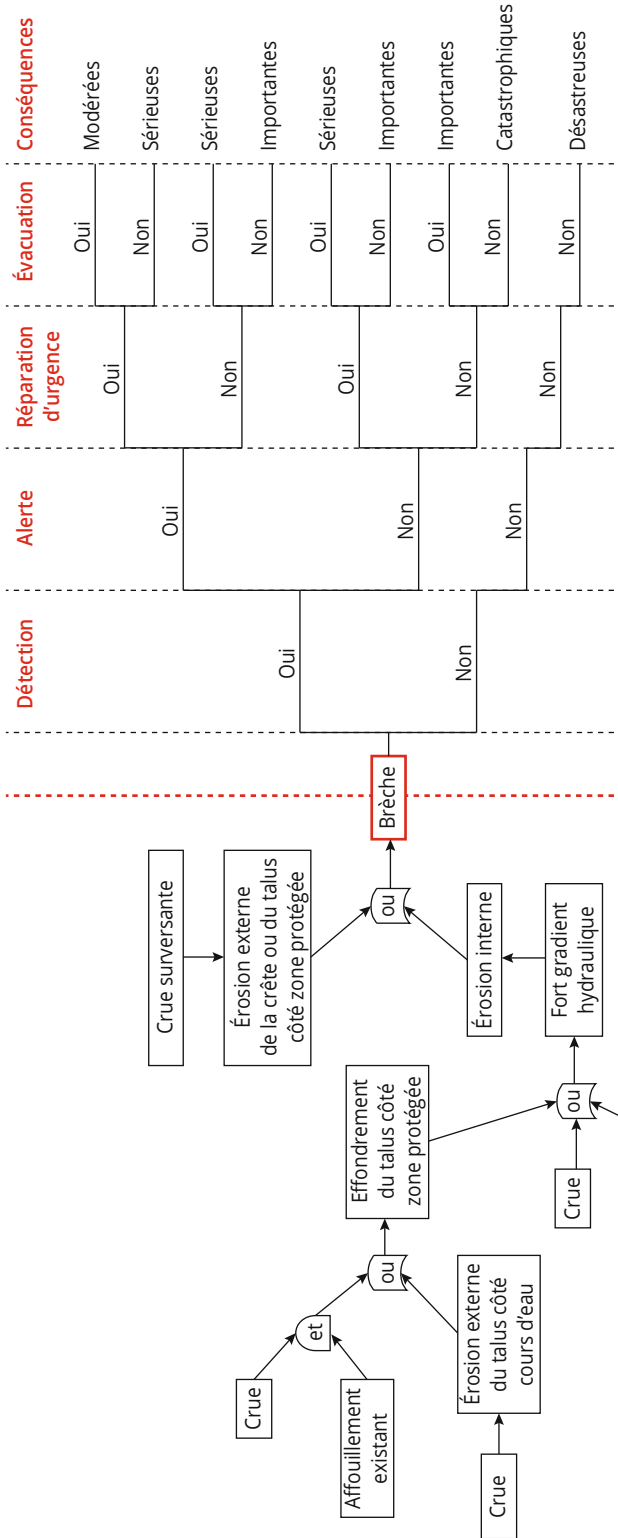


Figure 9-16. Exemple d'arbre nœud papillon pour des scénarios de défaillance conduisant à une brèche et entraînant différents scénarios de conséquences (Source : B. Beullac).



## CHAPITRE 10

# Diagnostic des digues et des systèmes de protection

## 1. Introduction

### 1.1. Objectifs

Le diagnostic d'un système de protection contre les inondations est une activité essentielle dans le cadre de sa gestion comme de la sécurité des populations protégées. Ce diagnostic, actualisé à intervalles réguliers, permet de s'assurer du maintien du niveau de protection apporté ainsi que de la non-aggravation du niveau de risque résiduel par dépassement ou défaillance.

#### Remarque

Dans ce chapitre, comme dans le reste de cet ouvrage, nous présentons les activités de diagnostic en tant qu'objet technique de connaissance des ouvrages et des systèmes, et non pas en tant qu'objet réglementaire.

L'objectif du diagnostic d'un système de protection est double. Il s'agit de connaître, pour différents événements de sollicitation hydraulique et niveaux d'eau associés, les niveaux (*voir Chapitre 3*) effectifs de performance :

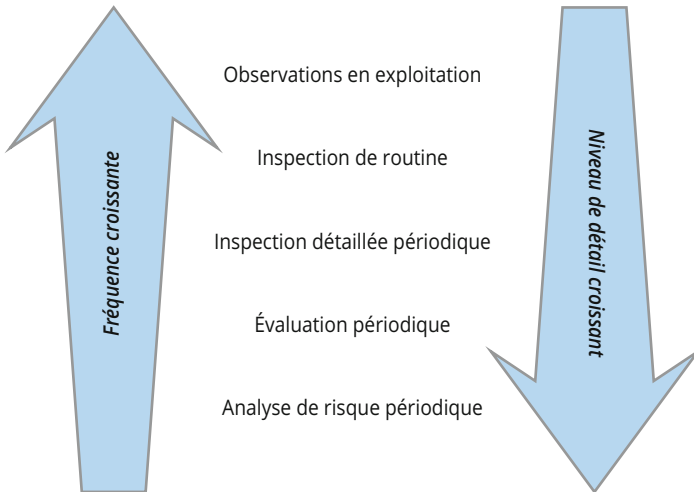
- hydraulique : niveau(x) de protection ;
- structurel : niveau(x) de sûreté (résistance aux différents modes de rupture).

La performance mesure l'atteinte des objectifs fixés.

Le diagnostic, au-delà de l'évaluation de ces performances en termes de niveaux, identifie pour arriver à ces résultats la cause (l'origine) des défaillances possibles ou avérées. On confond parfois dans le langage courant diagnostic et évaluation de la performance. L'évaluation de la performance peut être globale et représenter les niveaux de protection et de sûreté d'un ouvrage ou d'un système de protection, sans pour autant expliciter les scénarios et mécanismes à l'œuvre, ce que fait le diagnostic.

Le contenu de ce chapitre est inspiré et adapté du chapitre 3 du « Référentiel technique digues maritimes et fluviales » [40], du même auteur. Nous nous intéressons ici aux diagnostics détaillés produits ou à utiliser dans le cadre d'une analyse de risque, d'autres diagnostics étant produits au cours de la vie des ouvrages et systèmes. Au cours du cycle de vie de l'ouvrage, des diagnostics plus ou moins précis succèdent donc à des diagnostics plus complets et précis, de manière à garantir une optimisation des ressources et des

résultats (Figure 10-1). Il est éventuellement possible dans cette démarche de procéder par itérations successives pour arriver au premier diagnostic complet.



**Figure 10-1.** Diagnostics périodiques, niveaux de détail et fréquences (D'après ILH [9], chapitre 5).

Dans le cadre d'une analyse de risque quantitative ou semi-quantitative visant à connaître le risque et ses composantes au niveau d'un système particulier, il est important de s'appuyer sur un diagnostic détaillé (ou approfondi) de ce système, ainsi que le demande justement dans le cadre d'une EdD le décret n° 2015-526 du 12 mai 2015. À un autre niveau, pour une analyse de risque qualitative, par exemple pour connaître de manière relative les risques à l'échelle d'un territoire comprenant de nombreux systèmes, on pourra s'appuyer sur diagnostic rapide de chacun des systèmes.

De la même manière, dans le cadre d'une analyse de risque, dans laquelle les démarches d'analyse fonctionnelle et d'analyse des modes de défaillance (*voir Chapitre 5 : paragraphes 3.13. et 3.14., et Chapitre 9*) sont déjà incluses, il est souhaitable d'utiliser les résultats de ces analyses pour servir de base aux diagnostics, comme il sera explicité plus loin dans ce chapitre.

## 1.2. Données et formes de résultats

Les évaluations de performance (ou de sûreté) et les diagnostics reposent sur des données (*voir Chapitre 8*) qui sont ensuite combinées par l'ingénieur spécialisé pour obtenir un résultat de l'évaluation. De nombreux types et natures de données sont utilisables, et de nombreuses méthodes utilisées pour leur combinaison.

Les résultats de l'évaluation peuvent prendre différentes formes :

- seuil (charge limite) ;
- coefficient ou facteur de sécurité ;
- probabilité conditionnelle de défaillance (pour une charge donnée) ;
- courbe de fragilité (probabilité conditionnelle de défaillance donnée en fonction d'une gamme de charges) ;
- index ou indicateur (par exemple, sur une échelle de 0-5 ou de 0-10) ;
- notation qualitative (par exemple, très bien, bien, passable, mauvais, très mauvais.) ;
- probabilité annuelle de défaillance, etc.

La forme du résultat dépend largement de la méthode utilisée, mais aussi de la manière dont il sera utilisé par la suite. Il est possible de construire des équivalences entre les différents types de résultats, par exemple entre des indicateurs et des probabilités de défaillance, ou entre des coefficients de sécurité et des indicateurs ou des probabilités de défaillance. Dans le cadre d'une analyse de risque, il est important d'aboutir in fine à un résultat indiquant une probabilité de défaillance, pour un ou plusieurs événements de sollicitation, le format courbe de fragilité étant idéal.

Les résultats d'une évaluation de performance et d'un diagnostic, comme ceux d'une analyse de risque, gagnent à présenter, en plus du résultat brut, une qualification de ce résultat en termes de précision ou de fiabilité, que ce soit en termes qualitatifs ou quantitatifs ; en effet, les décisions qui seront prises à la suite de ce diagnostic devraient intégrer l'incertitude des résultats (*voir* Figure 7-1).

### 1.3. Liens entre diagnostics, analyse de risque et analyse de la défaillance

Comme on le voit à de nombreuses reprises tout au long de ce document, les activités de diagnostic, d'analyse de risque et d'analyse de la défaillance des systèmes de protection contre les inondations sont étroitement liées. Nous détaillons la nature de ces liens ci-dessous.

#### 1.3.1. Liens entre diagnostics et analyse de risque

Les résultats des diagnostics d'un système de protection (niveaux de performance hydraulique et structurelle, et identification des lacunes vis-à-vis de la connaissance et de la justification du système de protection) constituent une des données d'entrée principales pour la réalisation d'une analyse de risque de ce système et donc pour l'estimation du niveau de risque d'inondation qu'il représente. En effet, les résultats d'un diagnostic à jour jugé cohérent et suffisamment approfondi peuvent être directement utilisés pour caractériser la performance d'un système de protection dans le cadre de son analyse de risque.

Inversement, les conclusions d'une analyse de risque peuvent permettre d'identifier et de prioriser les aspects du système de protection à propos desquels des diagnostics complémentaires sont jugés nécessaires pour améliorer la caractérisation de la performance du système.

#### 1.3.2. Liens entre diagnostics et analyse de la défaillance

Une des premières étapes d'un diagnostic consiste en l'identification des scénarios de défaillance à prendre en compte pour estimer la performance du système de protection.

Ces scénarios sont de deux types (*voir* Chapitre 5 : paragraphe 2.1.) :

- pour le diagnostic hydraulique : les scénarios de défaillance hydraulique, qui correspondent aux scénarios d'inondation de la zone protégée envisageables compte tenu des caractéristiques hydrauliques des ouvrages (principalement en termes de cotes caractéristiques et de capacités hydrauliques des ouvrages) composant le système de protection ;
- pour le diagnostic structurel : les scénarios de défaillance structurelle, qui correspondent principalement aux scénarios de rupture de digues envisageables compte tenu des caractéristiques structurelles des ouvrages composant le système de protection.



Pour garantir son exhaustivité, cette identification des scénarios envisageable peut être menée sur la base d'une démarche formelle d'analyse fonctionnelle et d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE), telle que celle que nous proposons au [Chapitre 9](#).

## 2. Étapes d'un diagnostic de digues

La démarche de diagnostic se résume de la manière générique suivante :

1. recueil de données, notamment :
  - a. données existantes (disponibles auprès du gestionnaire, auprès de fournisseurs de données, recherches historiques),
  - b. données d'inspections visuelles,
  - c. données acquises spécifiquement (reconnaitances spécifiques) ;
2. analyse de ces données (combinaison suivant différents modèles et méthodes) ;
3. conclusion en termes de niveau de performance (suivant les cas, performance hydraulique et/ou structurelle), y compris la qualification en termes de précision ou de fiabilité des résultats (le plus souvent fonction directe des deux étapes précédentes) ;
4. dans le cadre d'une analyse de risque, intégration des résultats en termes de probabilité (ou conclusion en termes de suites à donner dans les autres cadres de réalisation d'un diagnostic).

Tout diagnostic se doit d'être formalisé sous la forme d'un rapport indépendant reprenant et explicitant chacun des différents points d'étape de la démarche ci-dessus, y compris les méthodes employées.

Le guide « Méthodologie de diagnostic des digues appliquée aux levées de la Loire moyenne » [32] propose une méthode de conduite de diagnostic de digue présentant entre autres les grandes phases de recueil de données. Cette méthode a souvent été présentée comme une « méthode de diagnostic en 9 points » :

1. Approche historique
2. Géomorphologie fluviale
3. Topographie
4. Étude hydraulique
5. Examen visuel (initial)
6. Reconnaitances géotechniques
7. Modélisation : hydraulique (interne) et mécanique
8. Étude des risques liés à la rupture
9. Étude des solutions de confortement

Dans la démarche présentée dans ce présent guide, on peut dire que les points 1 à 6 ci-dessus concernent les recueils de données, le point 7 concerne l'analyse des données, le point 8 explicite l'intérêt de conduire une analyse de risque après avoir étudié les aléas de rupture, et le point 9 traite des suites à donner à un diagnostic et en particulier, pour le diagnostic des digues anciennes, la définition des travaux. Dans cette méthodologie, il était déjà établi que la première phase nécessaire est la recherche et l'examen des données préexistantes. La nécessité d'une étude géomorphologique était également établie, cette dernière pouvant néanmoins avoir lieu **après** la reconnaitance topographique, qui peut d'ailleurs donner des éléments intéressants au géomorphologue.

## 3. Données, recueil et traitement

Un diagnostic s'appuie sur de multiples données, qui sont ensuite combinées à des fins d'analyse suivant différentes méthodes. Une même donnée peut servir dans différentes analyses au cours d'un même diagnostic ou d'une même analyse de risque. Les

paragraphes suivants présentent les données utilisées dans le cadre des **diagnostics** de digues avec leurs natures et leurs principaux types (paragraphe 3.1.), ainsi que leur provenance (voir Chapitre 8 : paragraphe 2.) et leur recueil et leur gestion sur le long terme (voir Chapitre 8 : paragraphe 3.). Les analyses de risque utilisent d'autres données, moins centrées sur les ouvrages et concernant souvent les milieux eau et zone protégée.

En termes de provenance de données, les recherches historiques (voir Chapitre 8 : paragraphe 2.4.) sont particulièrement importantes car elles peuvent permettre de retrouver les plans anciens et les rapports relatifs à la construction de l'ouvrage. Lorsqu'on ne dispose que des plans de projet (absence de plan de récolement), il est nécessaire d'engager des investigations complémentaires (sondage à la pelle par exemple) pour lever les incertitudes persistantes.

### 3.1. Types de données

On trouvera ci-après une liste par nature (non exhaustive) des différents types de données (voir Chapitre 8 : paragraphe 1.) utilisées dans les diagnostics de digues et systèmes de protection, et éventuellement des précisions sur les formats possibles. Cette liste présente néanmoins l'essentiel des données qu'il faut rechercher et considérer dans un diagnostic. Ces données ont besoin d'être rattachées à une position sur le système (en PK), en plan (en X, Y), ou bien dans l'espace (en X, Y, Z), à un point, un segment, une surface ou un volume.

#### 3.1.1. Géométrie et topographie, y compris bathymétrie

- Profils en long de la crête des ouvrages (graphiques, plans, tableaux de points XY, fichiers numérisés, etc.), voire des autres lignes caractéristiques (par exemple, pied d'ouvrages côté eau et côté zone protégée).
- Profils en travers des ouvrages, ceux-ci devant déborder des pieds d'ouvrages (graphiques, plans, tableaux de points XZ, fichiers numérisés, etc.).
- Bathymétrie (plans cotés, MNT, etc.).
- Topographie du milieu terrestre côté eau et/ou côté zone protégée (plans cotés, MNT, etc.).

#### 3.1.2. Géotechnique et génie civil (structure et sa fondation), y compris géologie, hydrogéologie et géophysique

- Sections en travers et coupes (zones et composition en nature de matériau, y compris fondation).
- Paramètres géotechniques (reliés à une zone d'une section ou à un sondage et avec un degré de précision/évaluation adapté aux besoins) :
  - essais d'identification ;
  - caractérisation de la perméabilité ;
  - caractéristiques de cisaillement ;
  - caractérisation de la compressibilité ;
  - caractérisation de l'érodabilité ;
  - résultats d'essais de compactage.
- Résultats de campagnes géophysiques (résultats bruts, interprétation en termes de caractéristiques géotechniques – voir « Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues » [16]).
- Synthèse cartographique reliant les différentes campagnes géophysiques avec les différents prélèvements et essais géotechniques.
- Géologie (sondages, bases de données, cartes, etc.).
- Hydrogéologie (sondages, bases de données, cartes, essais de permittivité, etc.).

### 3.1.3. Hydrologique et hydraulique

- Études hydrologiques et hydrauliques (à la différence des études similaires effectuées pour les barrages, on sépare moins pour les digues les études hydrologique et hydraulique car, sur les longs systèmes, les écoulements le long des digues influencent la propagation des crues. C'est particulièrement vrai en présence d'affluents : par exemple, étude Loire moyenne), y compris affluents ou analyse des niveaux marins, pour différentes périodes de retour des événements (lignes d'eau, modèle numérique, etc.).
- Étude hydraulique des écoulements dans la zone protégée, en cas de surverse, de contournement ou de brèche, etc.
- Étude hydraulique d'écoulement à travers des déversoirs, des vannes, etc. situés dans la digue.

### 3.1.4. Morphologie

- Documents cartographiques historiques et plus récents : photographies aériennes (analyse diachronique), cartes anciennes (Cassini, État-major), cadastres napoléoniens, profils en long des fils d'eau ; en particulier caractérisation d'anciens bras de fleuve (paléo-chenaux).
- Étude morphologique et morphodynamique (profil en long du cours d'eau et tracé en plan).
- Étude du transport solide.

### 3.1.5. Résultats d'examen visuel

La méthodologie d'inspection visuelle des digues de protection, les données recueillies, ainsi que des modèles de fiche de saisie sont complètement décrits dans le guide sur la surveillance, l'entretien et le diagnostic des digues [31] auquel on se référera.

## 3.2. Analyse des données

### 3.2.1. Analyses hydraulique et structurelle

Dans un diagnostic, l'analyse des données est bien évidemment l'activité la plus sensible. Elle comprend deux volets :

1. l'évaluation des performances hydrauliques du système de protection ;
2. l'évaluation de la performance structurelle des sous-systèmes qui forment le système de protection.

Ces deux volets ne sont pas indépendants : l'évaluation de la performance structurelle nécessite par exemple de connaître le fonctionnement hydraulique du système et en particulier les aléas de surverse, ce qui est un des objectifs du diagnostic hydraulique.

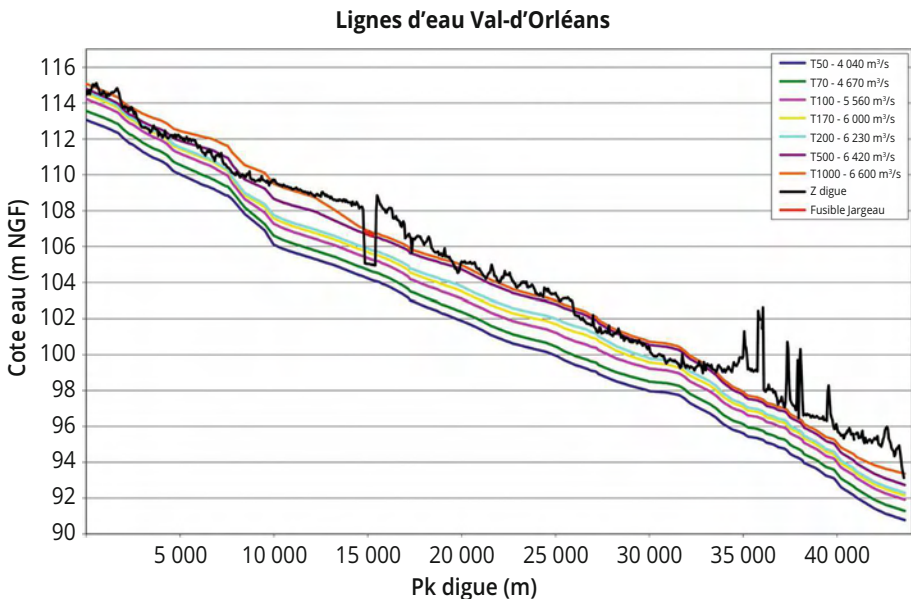
### 3.2.2. Diagnostic hydraulique

Le diagnostic hydraulique du système de protection contre les inondations vise à constater ou vérifier le fonctionnement hydraulique de ce dernier et à le caractériser en termes de niveaux d'événement de sollicitation hydraulique du milieu eau (*voir Chapitre 5 : paragraphe 3.9.*). Cette analyse est purement hydraulique et ne s'intéresse pas aux aspects structurels en lien avec la sûreté du système de protection.

Le premier objectif de ce diagnostic est de constater le niveau de protection apparent du système de protection et de le comparer avec le niveau de protection objectif (*voir Chapitre 3 : paragraphe 3.1.*), pour vérifier si les objectifs hydrauliques du système sont respectés ou non. Sur un système de protection ancien, pour lequel le niveau de protection objectif n'est pas défini, la détermination du niveau de protection apparent consiste en la première caractérisation de la protection apportée par le système (d'un point de vue hydraulique uniquement).

La détermination du niveau de protection apparent peut être réalisée par une comparaison entre les niveaux de lignes d'eau d'événements de sollicitation hydraulique représentatifs (crues, surcotes, tempêtes, etc.) pour différentes périodes de retour d'événement (issues d'études hydrologiques ou d'évaluation des niveaux marins et hydrauliques), et les cotes de crête de la ligne de défense principale (*voir Chapitre 2 : paragraphe 4.2.*). Cette comparaison permet ainsi de trouver où et pour quelle occurrence d'événement de sollicitation les premiers déversements vont se produire, ce qui permet de vérifier si l'objectif de protection est correctement rempli.

Dans l'exemple représenté dans la *Figure 10-2*, on constate que les premiers déversements du Val-d'Orléans vont se produire pour des crues de période de retour d'environ 170 et 200 ans, en des endroits non prévus à cet effet, et ensuite pour des crues d'occurrence 500 ans sur le déversoir de Jargeau (cote de la crête fusible). Le système est donc défaillant sur le plan hydraulique, le fonctionnement hydraulique prévu n'étant pas respecté (la défaillance provient du fait que le déversoir ne joue pas son rôle de supporter les premiers débordements). Dans ce cas particulier, la cause de la défaillance est liée aux évolutions morphologiques du lit de la Loire depuis la conception et la réalisation du système de protection, au XIX<sup>e</sup> siècle.



**Figure 10-2.** Sur le Val-d'Orléans, l'EdD a montré que les premiers déversements se produisaient pour des crues de période de retour d'environ 170 et 200 ans, et que le déversoir de Jargeau ne fonctionnait qu'à partir des crues d'occurrence 500 ans (Source : B. Beullac).

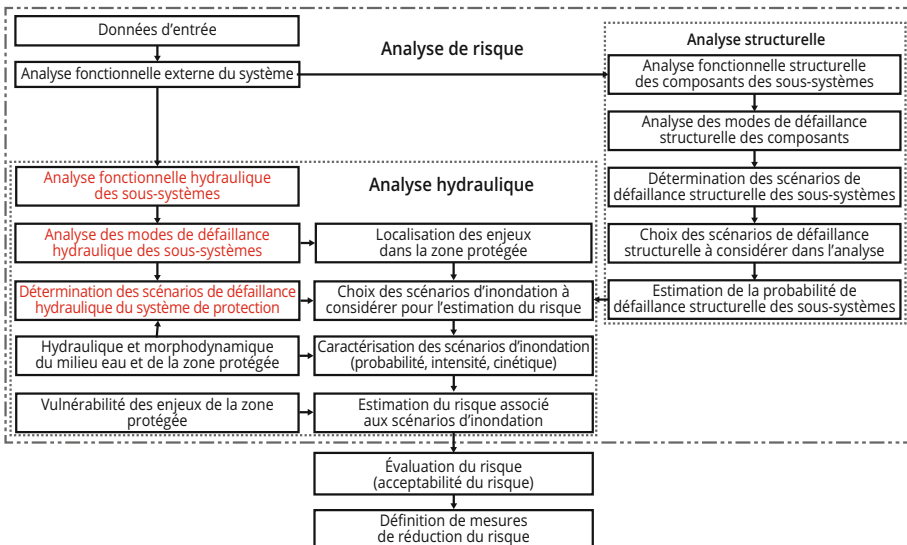
**Remarque**

Dans le cas d’Orléans, le diagnostic structurel a conduit à un niveau de sûreté inférieur de 1 m au niveau de protection apparent. Ce qui implique que le niveau de protection réel, qui se rapporte en fait à un niveau au plus égal au niveau de sûreté du système, correspond à une crue de période de retour  $T = 70$  ans contre un niveau de protection apparent de période de retour  $T = 200$  ans.

Le second objectif du diagnostic hydraulique vise à constater ou vérifier le fonctionnement hydraulique du système de protection. Cela consiste à caractériser (en termes de cotes, de débits, etc.) les possibles entrées d’eau dans la zone protégée (issues du milieu eau et résultant de défaillances hydrauliques ou du fonctionnement normal du système de protection), la propagation des eaux d’inondation dans cette zone et l’évacuation de ces eaux vers le milieu eau. Ce diagnostic permet de vérifier si la conception du système de protection est adaptée (d’un point de vue hydraulique) aux événements de sollicitation auxquels il est soumis.

Cette caractérisation doit s’appuyer sur les résultats de l’analyse de la défaillance hydraulique du système (voir Chapitre 5 : paragraphe 3.14. et Chapitre 9 : paragraphe 2.1.). En effet, cette analyse structure le processus d’identification des scénarios d’inondation de la zone protégée (et peut permettre d’atteindre l’exhaustivité), ce qui facilite le choix des scénarios de défaillance hydraulique les plus pertinents à considérer dans le cadre du diagnostic hydraulique (voir Chapitre 5 : paragraphe 3.16.).

L’utilisation de la méthode d’analyse des modes de défaillance proposée au Chapitre 9 permet d’obtenir les scénarios possibles de défaillance hydraulique d’un système de protection et d’en estimer les probabilités (Figure 10-3), puis, dans une analyse de risque, d’en estimer les conséquences et donc le risque.



**Figure 10-3.** Utilisation de l’analyse des modes de défaillance hydraulique dans le cadre d’un diagnostic hydraulique d’un système de protection pour utilisation dans une analyse de risque (Source : B. Beullac).

**3.2.3. Diagnostic structurel (ou estimation des aléas de rupture)**

L’objectif du diagnostic structurel des digues, ou des autres éléments d’un système de protection, est de vérifier que celui-ci répond à ses objectifs en termes de niveau de

sûreté. Celui-ci doit être a minima égal au niveau de protection mais idéalement, pour pouvoir gérer correctement les risques résiduels correspondant à son dépassement, il devrait lui être suffisamment supérieur (*voir Chapitre 3 : paragraphe 3.2.*).

Il est également souhaitable que le diagnostic structurel permette de connaître le niveau de danger des différents éléments du système.

Enfin, le lien entre les ruptures (défaillances structurelles) et les modes de rupture (scénarios mettant en jeu une succession de mécanismes élémentaires et de défaillances, *voir Chapitre 9 : paragraphe 2.2.1.*) doit être déterminé dans un diagnostic structurel approfondi.

On peut déterminer des niveaux de sûreté et de danger individualisés pour chaque élément du système, ou les globaliser à l'échelle du système.

Les étapes successives d'un diagnostic d'un système de protection sont les suivantes et détaillées ci-après :

- représentation du système (découpage en tronçons) ;
- détermination et choix des scénarios de rupture pour chaque tronçon homogène en termes de section en travers ;
- détermination des modèles utilisables pour la quantification des résistances aux différents scénarios et/ou mécanismes de rupture, choix des modèles qui seront utilisés (y compris mise au point de modèles spécifiques à l'étude) ;
- traitement des données, combinaison des résultats ;
- conclusions et rapport.

#### 3.2.3.1. Mode de représentation de la digue pour l'évaluation

Le diagnostic structurel des digues peut être réalisé directement à l'échelle globale du système, dans ce cas en général avec des méthodes à base de jugement expert. Il peut également être réalisé à l'échelle de chacun des tronçons du système. Dans ce cas, les digues étant rarement uniformes en termes de matériaux, de méthodes de construction, de géométrie, de fiabilité, ou encore de vieillissement, cette variabilité influera sur les scénarios de rupture possibles et sur leur probabilité de réalisation.

Le diagnostic d'une digue ou d'un système analysé en tronçons intègre celui de chacun des tronçons. Son objectif est d'obtenir :

- une évaluation de la performance structurelle du système, de la digue, du tronçon ou, de manière générale, de l'élément du système ;
- le lien entre les défaillances possibles et les mécanismes en cause.

En ce qui concerne le premier point, cette évaluation pourra s'exprimer sous différentes formes. A minima, on s'attend pour tout type de diagnostic à avoir une évaluation de la performance structurelle (soit de sa sûreté) en termes qualitatifs et, pour les diagnostics complets, une évaluation du niveau de sûreté et du niveau de danger, associée éventuellement à différentes probabilités de rupture pour différentes crues. On comparera le niveau de sûreté effectif du système avec celui prévu à l'origine de sa conception ou, à défaut, avec des valeurs admissibles compte tenu des enjeux protégés (lien avec l'analyse de risque).

Le diagnostic structurel s'effectue de manière classique en découpant la digue en tronçons, sur lesquels la démarche qui va être décrite ci-dessous sera appliquée. Le découpage en tronçons peut se faire de plusieurs manières :

- soit on découpe la digue en tronçons « homogènes », en fonction des paramètres utilisés pour l'évaluation, les tronçons ont alors une longueur variable ;
- soit on découpe la digue en tronçons de longueur fixe.

Au-delà des tronçons, il existe également des points singuliers (transitions, ouvrages « ponctuels », etc.). Ces points singuliers peuvent être soit traités séparément, soit intégrés au tronçon auquel ils appartiennent et modifier l'évaluation de ce dernier.



### 3.2.3.2. Détermination et choix des scénarios de rupture

Une des premières étapes d'un diagnostic complet est d'identifier les scénarios de rupture envisageables sur une digue donnée, pour chaque tronçon homogène du point de vue des sections en travers. Cela peut être fait soit sur la base d'une démarche formelle d'analyse fonctionnelle et d'analyse des modes de défaillance (*voir Chapitre 9*), soit par analyse experte, soit en faisant une étude bibliographique, soit a minima en faisant référence aux scénarios « classiques » (on appelle mode de rupture un scénario de rupture qui met en œuvre un certain nombre de mécanismes qui peuvent se succéder ou se produire en parallèle ; en général, le scénario ou mode de rupture est dénommé par le mécanisme initiateur ou prépondérant) :

- érosion par surverse ;
- érosion interne (aussi appelée de manière imprécise « renard » hydraulique). L'état de l'art actuel distingue désormais quatre grands modes d'érosion interne : suffusion, érosion régressive, érosion de contact et érosion de trou ou érosion concentrée. Cette dernière est celle qui correspond à la phase finale de l'érosion interne, le fameux « renard » ;
- glissement ;
- érosion externe par le courant ou affouillement ;
- soulèvement hydraulique aval (correspondant à un « claquage » d'une couche superficielle relativement imperméable suivi d'une érosion interne régressive et de conduit d'une fondation sous-jacente plus perméable et non cohésive).

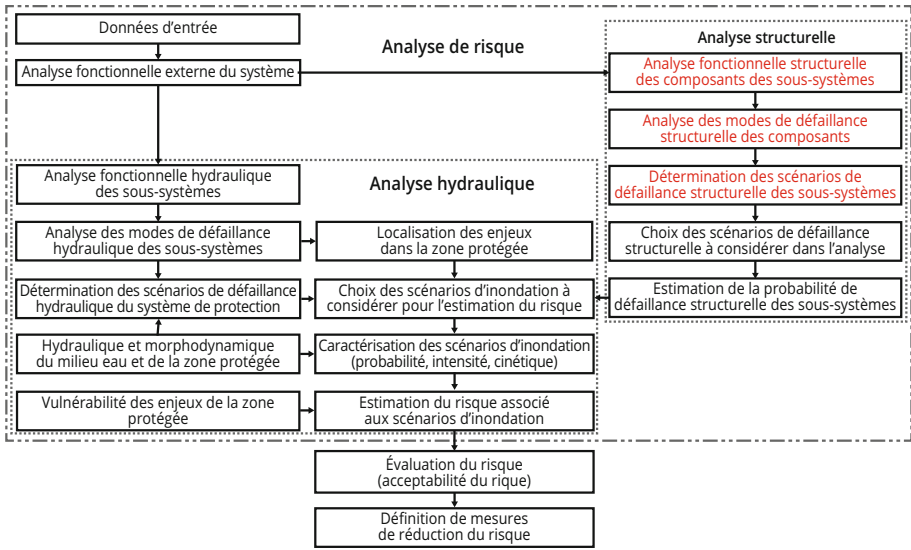
Les quatre premiers de ces scénarios sont décrits pour les digues fluviales dans le guide « Méthodologie de diagnostic des digues appliquées aux levées de la Loire moyenne » [32], le dernier ne concerne bien évidemment que certaines configurations. Il est de même envisageable d'imaginer des scénarios supplémentaires suivant les configurations. Pour cela, la démarche d'analyse fonctionnelle puis d'analyse des modes de défaillance (*Figure 10-4 ; voir Chapitre 9 : paragraphe 2.2.*) est a priori la seule pouvant prétendre à identifier systématiquement les scénarios potentiels. Le grand nombre de scénarios potentiels nécessitera généralement un choix, fondé le plus souvent sur une analyse experte, pour sélectionner les scénarios qui seront quantifiés.

### 3.2.3.3. Modèles utilisables par scénario ou mécanisme

L'étape suivante consiste en une analyse, tronçon par tronçon, pour une crue ou différentes crues ou niveaux d'action hydraulique, et scénario par scénario. Cette analyse peut aussi être conduite par mécanisme, mais il convient alors d'envisager les enchaînements de mécanismes dans un second temps. Les données sont analysées suivant différentes méthodes (*voir liste des types ci-après*) mais il convient de les rattacher à des mécanismes ou des scénarios. Parmi les types de méthodes d'analyse, on distingue :

- l'analyse à l'aide de modèles mathématiques, fondés :
  - soit sur des lois physiques (par exemple, le cisaillement),
  - soit sur des lois empiriques (par exemple, l'érosion interne régressive) ;
- l'analyse avec des méthodes à base d'indicateurs ;
- les analyses expertes (pas de formalisation préalable des données nécessaires, utilisation de toute donnée pertinente).

L'avantage des deux derniers types de méthodes est qu'elles permettent de combiner des données de type numérique (quantitatives) et des résultats d'observations visuelles (qualitatives). Par ailleurs, vu la complexité et l'hétérogénéité des structures des digues, les modélisations mathématiques ne sont pas forcément représentatives de l'ensemble de l'ouvrage. Enfin, de nombreux mécanismes et surtout les scénarios ne sont aujourd'hui pas modélisables en termes mathématiques, alors qu'une approche à base de règles expertes, formalisées ou non, permettra de se prononcer sur le niveau de performance.



**Figure 10-4.** Utilisation de l'analyse des modes de défaillance structurale dans le cadre d'un diagnostic structurel d'un système de protection pour utilisation dans une analyse de risque (Source : B. Beullac).

Pour chaque scénario (ou mécanisme) retenu, on recherchera les données nécessaires et/ou utiles pour conduire les analyses et le résultat des analyses sera présenté dans des tableaux, par tronçon homogène au niveau de ces données. Un même mécanisme ou scénario peut être, pour le même diagnostic, analysé avec plusieurs de ces méthodes. In fine, il est de toute façon nécessaire qu'un ingénieur spécialisé corrige ou affine les résultats de tout type d'analyse, ou combine des analyses de types différents. Comme il a été dit précédemment, les résultats du diagnostic peuvent prendre différentes formes (voir paragraphe 1.2.) et seule une approche experte pourra, dans l'état actuel des connaissances, combiner des résultats de nature différente.

#### 3.2.3.4. Combinaison des résultats - performance globale d'un tronçon

La phase de diagnostic précédemment décrite aboutit à l'estimation de l'aléa de rupture des tronçons de digues. L'aléa de rupture (Al) d'un tronçon se calcule pour différentes crues et différents scénarios de rupture. Son calcul, pour un scénario de rupture et une crue donnés, s'exprime de la façon suivante :

$$Al_{\text{rupture}} (\text{mécanisme } m, \text{ crue } c) = Al_{\text{crue}} (\text{crue } c) \times Al_{\text{conditionnel de rupture}} (\text{mécanisme } m, \text{ crue } c)$$

Dans cette expression, l'aléa de crue correspond à la probabilité annuelle de la crue. L'aléa conditionnel de rupture pour le mécanisme de rupture considéré est quant à lui conditionné par les caractéristiques (intensité et cinétique) de la crue considérée. Ainsi, pour un tronçon de digue donné, on obtient dans un premier temps l'ensemble des aléas conditionnels de rupture, pour chaque mécanisme de rupture, pour chaque crue. Ces résultats peuvent dans un second temps être agrégés pour obtenir d'un côté l'aléa de rupture pour tous les mécanismes de rupture pour une crue et, de l'autre, l'aléa de rupture pour chaque mécanisme de rupture pour toutes les crues. Enfin, le résultat final pour un tronçon consiste en l'agrégation de ces précédents résultats et aboutit à l'aléa de rupture du tronçon pour toutes les crues et tous les mécanismes de rupture (Tableau 10-I).

**Tableau 10-I.** Principe d'agrégation de l'aléa de rupture pour un tronçon de digue.

	Mécanisme 1	Mécanisme 2	Mécanisme 3	Mécanisme 4	
Crue 1	Al <sub>conditionnel</sub> (m1, c1)	Al <sub>conditionnel</sub> (m2, c1)	Al <sub>conditionnel</sub> (m3, c1)	Al <sub>conditionnel</sub> (m4, c1)	Al <sub>rupture</sub> (c1)
Crue 2	Al <sub>conditionnel</sub> (m1, c2)	Al <sub>conditionnel</sub> (m2, c2)	Al <sub>conditionnel</sub> (m3, c2)	Al <sub>conditionnel</sub> (m4, c2)	Al <sub>rupture</sub> (c2)
Crue 3	Al <sub>conditionnel</sub> (m1, c3)	Al <sub>conditionnel</sub> (m2, c3)	Al <sub>conditionnel</sub> (m3, c3)	Al <sub>conditionnel</sub> (m4, c3)	Al <sub>rupture</sub> (c3)
Crue 4	Al <sub>conditionnel</sub> (m1, c4)	Al <sub>conditionnel</sub> (m2, c4)	Al <sub>conditionnel</sub> (m3, c4)	Al <sub>conditionnel</sub> (m4, c4)	Al <sub>rupture</sub> (c4)
	Al <sub>rupture</sub> (m1)	Al <sub>rupture</sub> (m2)	Al <sub>rupture</sub> (m3)	Al <sub>rupture</sub> (m4)	Al <sub>rupture</sub> (tronçon)

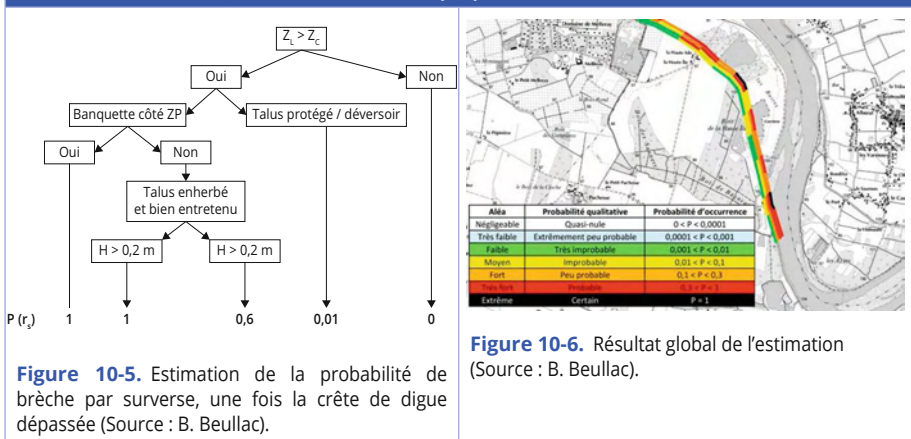
**3.2.3.5. Exemples de méthodologies de diagnostic**

Les deux exemples ci-dessous (Tableaux 10-II et 10-III) présentent des méthodes de diagnostic qui permettent d'évaluer les performances structurelles de digues différenciées par tronçon, et qui reposent sur une approche des modes de rupture par scénario mettant en jeu plusieurs mécanismes de dégradation.

**Tableau 10-II.** Exemple de diagnostic de digue à Orléans (France, Loire, 2011-2012) (D'après DREAL Centre – Val-de-Loire, Irstea et LRPC de Blois).

<b>Méthode de diagnostic</b>	Application de modèles mathématiques sur les longueurs fixes de tronçons de digues, sur la base de lois physiques ou empiriques (selon différents modes de défaillance), et ajustés en fonction d'autres données. Évaluation de la probabilité de défaillance pour différentes charges hydrauliques, en tenant compte des propriétés et de l'état des digues, pour des scénarios composés d'un ou plusieurs mécanismes, et faisant une distinction entre la probabilité d'apparition et la probabilité d'évolution vers une brèche. Utilisation à la fois de modèles mathématiques (physiques et empiriques) et de méthodes reposant sur des règles expertes.
<b>Ce qui est combiné</b>	Données géométriques, données géotechniques, charges hydrauliques, résultats d'inspections visuelles (par exemple, terriers d'animaux, arbres) et autres bases de données (par exemple, empiétements de canalisations) ainsi que l'organisation (suivi des digues en crue, capacité d'intervention).
<b>Modes de défaillance et/ou mécanismes</b>	Surverse, érosion interne, glissement de talus suivi d'un autre mécanisme, érosion externe suivie d'un autre mécanisme, soulèvement hydraulique suivi d'une érosion interne régressive.

**Graphiques**



**Tableau 10-II.** (Suite).

Explication
<p>Cinq modes de défaillance principaux ont été identifiés et conservés pour l'analyse de cette méthode de diagnostic. Ces modes de défaillance sont composés d'un seul mécanisme (surverse, érosion interne) ou à partir de deux ou trois mécanismes (glissement de talus suivi par l'érosion interne, érosion externe suivie par l'érosion interne ou par l'effondrement puis l'érosion interne, soulèvement hydraulique suivi par l'érosion interne régressive).</p> <p>Chacun de ces modes de défaillance (ou scénarios de brèche) a été évalué sur des longueurs de digues fixes (50 m), pour différentes crues (QT = Q50 ans, Q100 ans, Q170 ans, Q200 ans, Q500 ans). D'abord, il a été déterminé la probabilité P (A) que le premier mécanisme se produise, et ensuite la probabilité P (r) que cet événement conduise à une brèche, impliquant soit l'évolution du premier mécanisme jusqu'à la brèche, soit d'autre(s) mécanisme(s), pour chaque probabilité de crue P (qt) d'intérêt. Le résultat calcule la probabilité de brèche pour un mode de défaillance donné : <math>P(R) = P(A) \times P(r) \times P(QT)</math>.</p> <p>Différents modèles ont été appliqués pour chacun de ces termes sur chacune des sections pour chaque crue. Ils sont différents pour chaque mécanisme et mode de défaillance, prenant en compte soit des modèles physiques (de glissement, etc.), soit des modèles empiriques (Selmeyer : érosion régressive d'une couche de sable sous une couche imperméable, etc.), ainsi que des règles expertes (résistance à l'érosion par surverse (Figure 10-5), en prenant en compte le suivi de la « lutte » contre l'érosion interne, etc.).</p> <p>Les données proviennent à la fois du système SIG de gestion de données du gestionnaire du système de protection (par exemple, du SIRS Digues [24]), d'un examen visuel spécifique d'une recherche dans les informations historiques (rapports) relatives à la géotechnique et d'un MNT (créé par levé Lidar, voir tâche 3.2 de FloodProBE).</p> <p>Le modèle a été développé dans un tableur (CARDigue).</p> <p>Un tableau d'équivalence entre les probabilités et leur traduction en termes qualitatifs (par exemple, événement possible mais extrêmement peu probable, événement très peu probable, événement improbable, événement probable, événement habituel) a été mis au point. Il permet soit de produire des probabilités à partir de règles expertes, soit d'exprimer en mots les résultats probabilistes.</p> <p>Une fois que la probabilité de brèche a été évaluée pour chaque mode de défaillance et classe de crue considérés, ces résultats seront utilisés comme tels par le gestionnaire de travaux ou combinés pour produire les probabilités suivantes : probabilités globales pour chaque crue (tous les modes de défaillance), probabilités globales pour chaque mode de défaillance (toutes les classes de crue), probabilités globales (pour tous les modes de défaillance et toutes les classes de crue). Les méthodes, reposant sur des probabilités, adaptées pour produire de telles combinaisons, sont encore à déterminer.</p> <p>Quels que soient les types de résultats attendus, ceux-ci peuvent être représentés graphiquement, à l'aide d'un SIG, sur une carte affichant la probabilité de brèche sur toute la longueur de la digue considérée (Figure 10-6). Ils peuvent également être enregistrés dans un système SIG de gestion de données.</p>

**Tableau 10-III.** Exemple de méthode de diagnostic basé sur une analyse fonctionnelle des composants d'une digue (France, 2011-2012) (D'après Irstea [49]).

<b>Méthode d'analyse</b>	Combinaison d'indices (indicateurs d'état, critères de fonctions, indicateurs de performance) à l'aide de règles fondées sur les connaissances expertes formalisées. Combine différents types et natures de données (géométriques, géotechniques, hydrauliques, morphodynamiques ; observations visuelles, etc.) dans une méthodologie explicite.
<b>Ce qui est combiné</b>	Informations issues d'inspections visuelles, données géométriques, géotechniques, informations morphologiques, informations issues de bases de données (empiètements des ouvrages, etc.).
<b>Modes de défaillance et/ou mécanismes</b>	L'exemple détaille la méthode pour l'érosion interne mais la méthode existe aussi pour la surverse, l'érosion externe et le glissement. Les principes génériques de la méthode sont également présentés.

Tableau 10-III. (Suite).

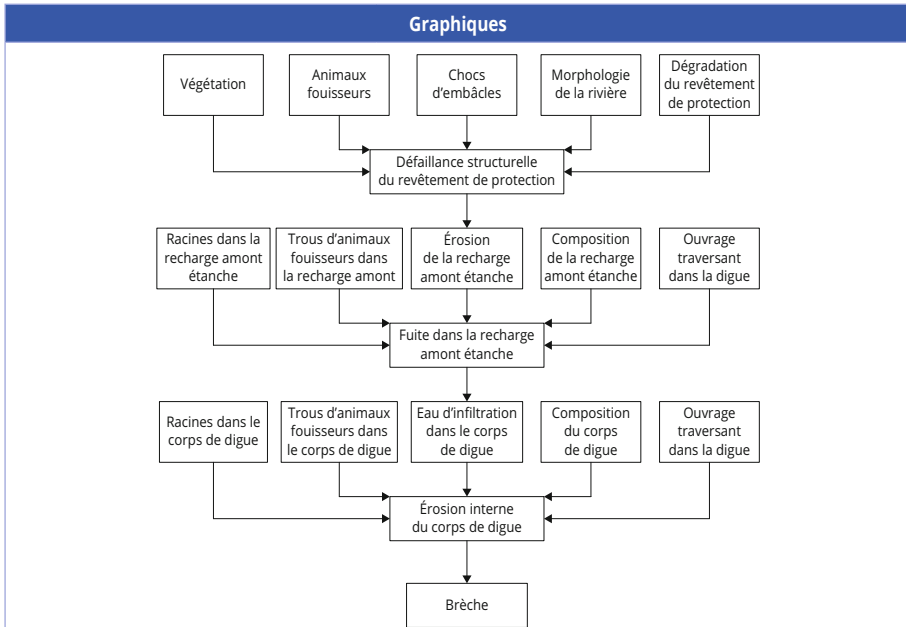


Figure 10-7. Exemple d'arbre de défaillance pour l'érosion interne sur une digue avec recharge amont imperméable (Source : B. Beullac).

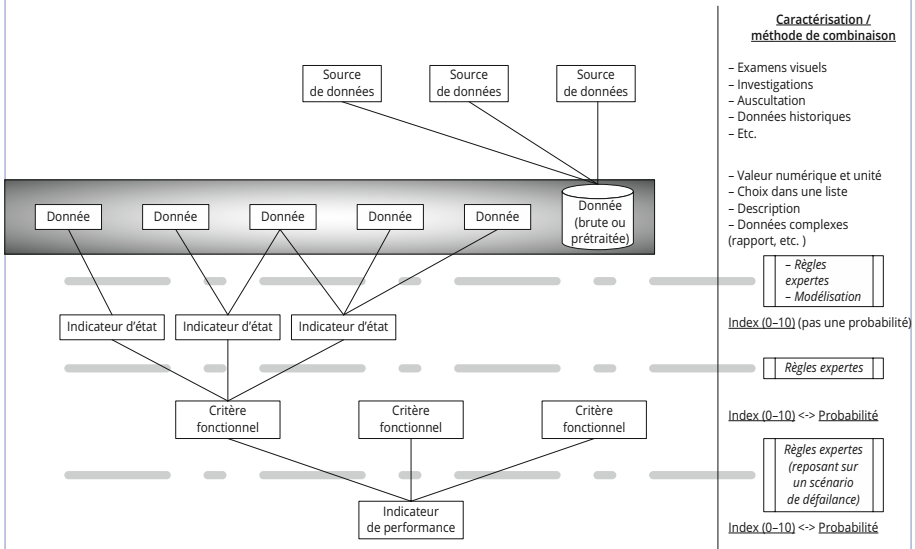
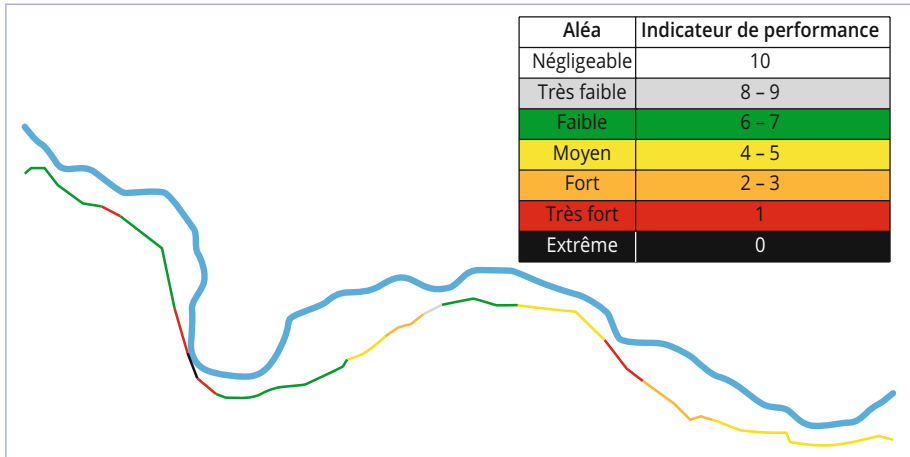


Figure 10-8. Processus général de diagnostic utilisant la méthode fondée sur des indicateurs de cet exemple (Source : R. Tourment).

Tableau 10-III. (Suite).



**Figure 10-9.** Exemple de carte montrant le résultat d'un diagnostic de digues global pour différents tronçons (Source : B. Beullac).

#### Explication

Reposant sur une analyse fonctionnelle des composants d'une digue, dans chaque section en travers, les scénarios de défaillance sont identifiés et analysés, en reliant des fonctions essentielles (comme la protection, l'étanchéité, la stabilité, la filtration, etc.) et des composants. La Figure 10-7 présente un tel scénario de défaillance.

Les données sont d'abord utilisées pour établir les différents indicateurs d'état. Les valeurs de ces indicateurs résultent soit directement des données brutes, soit des données prétraitées ou des données combinées. Elles sont relatives à une fonction, et à un seul composant lié à la fonction, par exemple, la nature (ou l'état) du revêtement de protection du parement côté cours d'eau.

Les critères fonctionnels sont alors calculés, sur la base de la combinaison des valeurs des indicateurs d'état. Ils sont relatifs à une fonction en relation avec le mode de défaillance étudié, par exemple, la résistance du revêtement à l'érosion externe.

Enfin, comme indiqué sur la Figure 10-8, l'évaluation des indicateurs de performance repose sur une combinaison de critères fonctionnels. Ils sont relatifs à un scénario de défaillance/rupture (ou « mode de défaillance ») pour une section en travers donnée, par exemple, la performance du tronçon de digue vis-à-vis du « scénario d'érosion interne ».

L'évaluation finale tient compte de tous les modes de défaillance.

Un avis d'expert est utilisé d'une manière formalisée pour produire les règles d'agrégation permettant de passer des indicateurs d'état aux critères fonctionnels, et des critères fonctionnels aux indicateurs de performance.

Un SIG permet de :

- gérer toutes les données disponibles relatives à la digue,
- mettre à disposition chaque donnée pertinente à tous les indicateurs d'état,
- prétraiter les données pour produire les indicateurs d'état pour ceux qui ont mis en place les règles expertes,
- prétraiter la combinaison des indicateurs d'état et des critères fonctionnels pour produire les critères fonctionnels et les indicateurs de performance,
- représenter l'estimation de la performance à la fois pour l'indicateur de performance globale et les indicateurs de performance propres à chaque mode de défaillance (Figure 10-9).





# Partie III

## Études de dangers des systèmes d'endiguement

Utilisation de l'analyse de risque

Cette partie présente l'intérêt de l'analyse de risque des systèmes de protection et de la méthode associée proposée en [Partie II](#), pour la réalisation d'études de dangers (EdD) et plus généralement pour la gestion des systèmes d'endiguement (*voir Chapitre 2 : paragraphe 1*, pour les définitions de système d'endiguement et de système de protection). Des indications pratiques pour la réalisation d'EdD réglementaires sont également présentées. Une distinction est faite, lorsque nécessaire, entre les EdD réalisées au titre du décret de 2007 ou de celui de 2015.

# Du concept d'EdD à son application aux systèmes de protection

L'étude de dangers est à l'origine un concept issu de la sécurité industrielle, développé dans le cadre de la réglementation sur les installations classées pour la protection de l'environnement (décret n° 77-1133 du 21 septembre 1977 pris pour l'application de la loi n° 76-663 relative aux ICPE – installations classées pour la protection de l'environnement). Ce type d'étude consiste d'abord à dresser l'inventaire des éléments et dangers intrinsèques associés à l'objet d'étude, puis à analyser les risques qu'ils impliquent (scénarios pouvant aboutir à des événements non souhaités), avant de définir des mesures dont la mise en place peut permettre d'améliorer la maîtrise du risque.

Ce concept est aujourd'hui appliqué aux ouvrages hydrauliques, depuis son introduction par le décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 (les plans particuliers d'intervention sur les très grands barrages – introduits par le décret n° 92-997 du 15 septembre 1992 – étaient néanmoins similaires à des analyses de risque). Pour les barrages, sa mise en application a fait l'objet de travaux de recherche spécifiques [39], mais a toutefois été relativement aisée compte tenu des propriétés de ces ouvrages. En effet, les barrages impliquent un risque de nature technologique et ont des caractéristiques structurelles généralement bien connues. De plus, du fait de leur implantation ponctuelle, il est relativement facile de déconnecter les aléas naturels (crues, séismes, mouvements de terrain, etc.) susceptibles d'impacter les barrages et de causer leur rupture des conséquences de leur rupture ou dysfonctionnement (inondation à l'aval du barrage à la suite de la libération du volume stocké) – si l'on excepte le cas des barrages ou bassins écrêteurs de crues.

En revanche, pour ce qui concerne les systèmes de protection, la complexité de l'objet d'étude, les résultats attendus et les conséquences sur la gestion du territoire sont autant de spécificités qui ne permettent pas une application classique du concept d'EdD industrielle. En effet, d'une part la conséquence de la rupture ou de la défaillance d'un système de protection est l'inondation du territoire protégé que les ouvrages étaient censés éviter, et d'autre part il y a une forte intégration territoriale entre l'environnement côté eau, les ouvrages de protection et les territoires protégés. L'inondation d'une zone protégée par suite d'une défaillance de système de protection résulte toujours de la combinaison d'un aléa naturel (la crue fluviale, la surcote ou tempête marine, etc.) et d'un aléa technologique (la défaillance du système).

L'objet de ce chapitre est de fournir des informations pratiques permettant la réalisation d'une EdD de digues ou de système d'endiguement par la méthode Irstea de décomposition de l'analyse de risque en études élémentaires (*voir Chapitre 5*).

## 1. Cadre réglementaire

L'EdD est imposée par la réglementation sur la sécurité des ouvrages hydrauliques depuis décembre 2007 et s'applique notamment aux digues et systèmes d'endiguement contre les inondations. Elle constitue l'un des points marquants de l'évolution de la réglementation relative aux digues depuis près de 20 ans.

À l'heure de la rédaction du présent guide, deux réglementations différentes s'appliquent aux digues, selon qu'elles ont été classées à l'initiative de l'État par arrêté préfectoral au titre du décret de décembre 2007, ou bien qu'une collectivité compétente en matière de gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations (GEMAPI) en a demandé l'autorisation et le classement en tant que système d'endiguement (*voir Chapitre 2 : paragraphe 1.*), au titre du décret du 12 mai 2015.

### 1.1. Historique de la réglementation sur la sécurité des digues

La réglementation sur la sécurité des ouvrages hydrauliques est relativement récente et comporte de nombreux textes.

Une liste détaillée des textes relatifs aux ouvrages de protection contre les inondations figure en [Annexe 2](#). Les plus importants sont les suivants (les textes abrogés et les circulaires non publiées au Journal Officiel n'ont pas de valeur réglementaire) :

- la **circulaire DE/SDGE/BPIDPF-MPN/n° 629 du 28 mai 1999** du ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, relative au recensement des digues de protection des lieux habités contre les inondations fluviales et marines. Elle a permis le lancement de l'inventaire national des digues, de leurs gestionnaires et des zones protégées, à l'appui du logiciel « DIGUES », avec la mise en place ultérieure de la base de données en ligne « BarDigues » ;
- la **circulaire interministérielle DE/SDGE/BPIDPFCCG/n° 8 du 6 août 2003** des ministères de l'Intérieur et de l'Écologie et du Développement durable, relative à l'organisation du contrôle des digues de protection contre les inondations fluviales intéressant la sécurité publique. Elle instaure un dispositif de contrôle visant les digues « intéressant ou susceptibles d'intéresser la sécurité publique » (ISP), avec définition des obligations qui incombent aux gestionnaires et/ou aux propriétaires, d'une part, aux services de contrôle (en l'occurrence, services chargés de la police de l'eau), d'autre part. Les ouvrages concernés sont : les digues de protection contre les débordements de cours d'eau, y compris torrentiels ainsi que les digues construites dans le cadre d'aménagements de « ralentissement dynamique ». Cette circulaire, qui a été abrogée par la circulaire du 8 juillet 2008, est la première tentative de réglementation spécifique avec digues « ISP », comme la circulaire du 14 août 1970 pour les barrages ;
- le **décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007** relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques, et modifiant le code de l'environnement (JO du 13 décembre 2007), et ses textes subséquents (arrêtés et circulaires). Ce décret concerne les barrages et les digues, et précise les obligations en matière de visite technique approfondie, revue de sûreté, étude de dangers, consignes de surveillance et d'exploitation, agrément des organismes intervenant pour le compte du maître d'ouvrage (maître d'œuvre, bureau d'études, maîtrise d'œuvre interne, etc.), diagnostic sur les garanties de sûreté, incidents et événements devant être déclarés, etc. Pour ce qui est des digues, il définit, en fonction

- d'un nombre croissant de personnes localisées dans la zone protégée, quatre classes (D, C, B et A) auxquelles se rattachent des obligations réglementaires de plus en plus contraignantes. Notamment, il impose la réalisation d'un diagnostic initial de sûreté et d'une étude de dangers pour les digues de classe A, B ou C, et rend obligatoire la consultation du CTPB(OH) pour les projets relatifs aux digues de classe A ;
- le décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques, et ses textes subséquents (arrêté du 7 avril 2017, voir [paragraphe 1.3.](#)). Il fixe le cadre selon lequel les communes et établissements publics de coopération intercommunale à fiscalité propre compétents, en vertu de la loi en matière de GEMAPI, établissent et gèrent les ouvrages de prévention<sup>1</sup> des risques, en particulier les digues. Il modifie et complète le décret du 11 décembre 2007. Ce décret concerne principalement les ouvrages de protection contre les inondations : les digues, organisées en systèmes d'endiguement (voir [Chapitre 2 : paragraphe 1.](#)), et les aménagements hydrauliques de stockage provisoire des écoulements (barrages écrêteurs, bassins de stockage, etc.). Il concerne de manière moins essentielle les barrages (quelle que soit leur vocation). Les classes (A, B et C) de l'ensemble des ouvrages, et les obligations réglementaires établies par le décret de 2007 susvisé y sont (re)définies. Le contenu technique des examens techniques complets (ETC) et revues de sûreté (RDS) doit désormais être traité dans le cadre de l'étude de dangers, sous la forme d'un diagnostic exhaustif approfondi.

## 1.2. EdD de digues et réglementation de 2007

Trois textes réglementaires encadrent l'étude de dangers des digues classées au titre du décret de décembre 2007 :

- le décret du 11 décembre 2007 (ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables, 2007) sur la sécurité des ouvrages hydrauliques. Il classe les digues en quatre catégories en fonction de leur hauteur et du nombre d'individus qu'elles protègent (D, C, B et A pour les plus importantes). Pour chacune de ces catégories, le décret définit les obligations des responsables d'ouvrages. L'étude de dangers est l'une de ces obligations. Elle doit être réalisée pour les digues de classes A, B et C ;
- l'arrêté du 12 juin 2008 (ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, 2008). Il définit le plan de l'étude de dangers et en précise le contenu ;
- la circulaire du 16 avril 2010 (ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, 2010). Elle rappelle et précise les obligations de réalisation d'une étude de dangers par les responsables de digues, donne des éléments de doctrine sur l'examen par le service de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques (SCSOH) du contenu de celle-ci et précise les différentes mesures à retenir en fonction du niveau de risque présenté par l'ouvrage. Elle est accompagnée d'un « guide de lecture » adapté au cas des digues de protection contre les inondations et destiné aux services chargés du contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques.

Onze chapitres numérotés de 0 à 10 constituent le plan réglementaire d'une étude de dangers d'après l'arrêté du 12 juin 2008 :

- Chapitre 0 – Résumé non technique

1. On peut noter une ambiguïté dans l'utilisation de ce mot à la place de celui de « protection », la prévention occupant un champ beaucoup plus vaste que les seuls ouvrages de protection (voir [Chapitre 1 : paragraphe 2.](#) et [35]).



- Chapitre 1 – Renseignements administratifs
- Chapitre 2 – Objet de l'étude
- Chapitre 3 – Analyse fonctionnelle de l'ouvrage et de son environnement
- Chapitre 4 – Présentation de la politique de prévention des accidents majeurs et du système de gestion de la sécurité (SGS)
- Chapitre 5 – Identification des risques et caractérisation des potentiels de dangers
- Chapitre 6 – Caractérisation des aléas naturels
- Chapitre 7 – Étude accidentologique et retour d'expérience
- Chapitre 8 – Identification et caractérisation des risques en termes de probabilité d'occurrence, d'intensité et de cinétique des effets, et de gravité des conséquences
- Chapitre 9 – Étude de réduction des risques
- Chapitre 10 – Cartographie

### 1.3. EdD de système d'endiguement et réglementation de 2015

Deux textes réglementaires encadrent l'étude de dangers des systèmes d'endiguement (*voir Chapitre 2 : paragraphe 1.*) classés au titre du décret de mai 2015 :

- le décret du 12 mai 2015. Relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques, il classe les systèmes d'endiguement en trois catégories en fonction du nombre d'individus qu'ils protègent (C, B et A pour les plus importantes). Pour chacune de ces catégories, le décret définit les obligations des responsables d'ouvrages. L'étude de dangers est l'une de ces obligations. Elle doit être réalisée pour les systèmes appartenant à chacune de ces trois classes ;
- l'arrêté du 7 avril 2017. Il précise le plan de l'étude de dangers des digues organisées en systèmes d'endiguement et des autres ouvrages conçus ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions.

D'après l'arrêté du 7 avril 2017, l'étude de dangers d'un système d'endiguement comporte trois parties :

- un 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 événement (crue, tempête) provoquant une montée des eaux excédant le niveau de protection ;
- un document A « Présentation générale du système d'endiguement, associé le cas échéant à un ou plusieurs aménagements hydrauliques, contre les inondations et les submersions », 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, 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 ;
- un document B « Analyse des risques et justification des performances », qui détaille les analyses techniques et scientifiques permettant d'établir et de justifier les performances du système d'endiguement. Le document B est en pratique l'analyse de risque du système de protection.

Le plan réglementaire du document A est le suivant :

1. Renseignements administratifs
2. Objet de l'étude
3. Description précise de la zone protégée, du système d'endiguement bénéficiant le cas échéant d'un ou plusieurs aménagements hydrauliques, de son environnement et de ses fonctions de protection contre les inondations et les submersions
  - 3.1. Zone protégée
  - 3.2. Description des conditions naturelles pouvant conduire à des crues ou des tempêtes et des conditions de fondation des ouvrages et des sollicitations s'exerçant sur ces fondations
  - 3.3. Descriptions des éléments composant le système de protection et leurs fonctions hydrauliques
  - 3.4. Analyse du fonctionnement du système d'endiguement – analyse des risques de rupture – niveau de protection – analyse de l'organisation du gestionnaire et gestion en situation de crue ou de tempête

Le plan réglementaire du document B est le suivant :

4. Caractérisation des aléas naturels
5. Description du système d'endiguement
  - 5.1. Ouvrages existants
  - 5.2. Ouvrages à construire ou à modifier
  - 5.3. Description fonctionnelle du système d'endiguement
6. Retour d'expérience concernant la zone protégée et le système d'endiguement
7. Diagnostic approfondi des éléments constitutifs du système d'endiguement et tenue des ouvrages
8. Étude des risques de venues d'eau dans et en dehors de la zone protégée
9. Présentation et analyse de l'organisation mise en place par le gestionnaire pour l'exercice de ses missions – adéquation des moyens mis en place pour la surveillance et l'entretien courant avec l'objectif de protection garanti
  - 9 bis Recommandations de l'organisme agréé qui réalise l'étude de dangers
10. Cartographie

#### Remarque

Le décret du 12 mai 2015 précise, dans son article 3 section 2, que « *les règles fixées par la présente section sont applicables à la mise en conformité des ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations ainsi qu'à la réalisation de tels ouvrages, à l'exception des ouvrages de correction torrentielle* ». Si, en effet, le décret ne s'applique pas aux ouvrages de correction torrentielle (seuils, plages de dépôts, etc.), il s'applique toutefois bien aux systèmes d'endiguement en contexte torrentiel.

## 1.4. EdD de système d'endiguement et évolutions de la réglementation

Pour les auteurs de cet ouvrage, la réalisation d'une étude de dangers sérieuse et utile à tous (*voir Chapitre 12*) passe par la réalisation d'une analyse de risque du système endigué par une méthode cohérente, telle celle qui est présentée dans la *Partie II* ; les évolutions du contenu réglementaire d'une EdD (arrêtés du 12 juin 2008 et du 7 avril 2017) sont donc plus de l'ordre de la présentation que du fond. Nous notons néanmoins les différences essentielles suivantes :

- l'EdD « arrêté 2017 » concerne de manière explicite un système de protection, alors que la réglementation précédente (depuis les ouvrages classés jusqu'à l'EdD « arrêté

2008 ») concernait une digue (les systèmes n'étaient pas définis dans cette réglementation). Mais, en tout état de cause, pour être cohérente, une « bonne » EdD « arrêté 2008 » ne pouvait de toute façon pas être réalisée sur une partie seulement d'un système de protection. Les EdD « arrêté 2008 » réalisées en collaboration entre l'Irstea et la DREAL Centre – Val-de-Loire (3 EdD de classe A, 43 de classes B et C), et celles réalisées depuis en collaboration entre l'Irstea et d'autres gestionnaires d'ouvrages, l'ont d'ailleurs toutes été à l'échelle de systèmes cohérents ;

- dans le cadre de la compétence GEMAPI, l'EdD « arrêté 2017 » doit servir à justifier le niveau de protection « garanti » affiché par l'autorité compétente, ce qui n'était pas explicitement demandé auparavant. En revanche, là aussi, une « bonne » EdD se doit en tout état de cause de produire une évaluation des différents niveaux (*voir Chapitre 3 : paragraphe 3.*) et donc servir au choix de l'objectif de protection « garanti » ;
- il était demandé explicitement dans les EdD « arrêté 2008 » une évaluation du risque et la définition de mesures de réduction du risque, ce qui n'est plus demandé dans une EdD « arrêté 2017 ». Mais l'utilité d'une EdD (*voir Chapitre 12*) reste bien de mieux connaître le risque pour mieux le gérer, et un gestionnaire de système d'endiguement se doit logiquement de réaliser pour son propre compte ces analyses découlant de l'analyse initiale du risque.

## 1.5. Obligations réglementaires autres que l'EdD

Les réglementations de 2007 et de 2015 prévoient un certain nombre d'autres obligations à remplir de la part des responsables d'ouvrages. La plupart des éléments techniques issus de ces éléments réglementaires (dossier d'ouvrage, registres, consignes, documents d'organisation, visites techniques approfondies, examens techniques complets, revues de sûreté, etc.) sont à prendre en compte en tant que données d'entrée de l'étude de dangers ; ils sont identifiés dans le [paragraphe 3.](#) du [Chapitre 5](#), en termes de données d'entrée des différentes études élémentaires concernées.

## 2. Objectifs de l'EdD de digues ou de système d'endiguement

Les principaux objectifs d'une EdD de digues ou de système d'endiguement doivent être les suivants :

- définir le système de protection (ses limites, ses composants), sa zone protégée et son (ou ses) milieu(x) extérieur(s) eau (*voir Chapitre 2 : paragraphe 2.1.*), le fonctionnement de cet ensemble et le(s) niveau(x) de protection (*voir Chapitre 3 : paragraphe 3.1.*) associé(s) ;
- identifier et estimer le risque d'inondation pour les enjeux présents dans la zone protégée, en fonction des limites du système de protection considéré et de sa possible défaillance ;
- évaluer l'acceptabilité du risque d'inondation compte tenu du système de protection, des enjeux protégés et des incertitudes sur le niveau de risque ;
- identifier les recherches, études et reconnaissances complémentaires à mener pour améliorer la qualité et la résolution des données ou encore la performance des méthodes employées pour réaliser l'étude de dangers ;

- proposer des mesures de gestion et d'amélioration du système de protection destinées à réduire les risques : prévention de l'érosion interne, de l'érosion externe, fréquence et nature des opérations de surveillance et d'entretien, modification du système, etc.

### Remarque

Les trois derniers points constituent l'une des finalités de la démarche de gestion des risques et donc une justification de la réalisation de l'analyse des risques. Néanmoins, dans l'arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers en application du décret de 2015, ils ne sont pas rendus obligatoires. Cependant l'intérêt du gestionnaire est aussi de disposer de propositions de mesures complémentaires de gestion des risques (*voir* Chapitres 7 et 14), ne constituant pas un engagement de sa part, et qu'il pourra mettre en œuvre à plus ou moins long terme.

## 3. Complexité de réalisation de l'EdD de digues ou de système d'endiguement

Contrairement aux barrages pour lesquels l'application du concept d'EdD est désormais maîtrisée, après une adaptation des principes de la sécurité industrielle, l'application du concept d'EdD aux digues et systèmes de protection contre les inondations est particulièrement délicate en raison de la grande complexité de ces systèmes. Cette complexité se manifeste notamment lors de la définition du périmètre de l'étude et de la mise en œuvre de l'analyse de risque :

- des difficultés pour définir le périmètre de l'étude de dangers (*voir* Chapitre 5 : paragraphe 3.3.), du fait :
  - de la nature des différents types d'EdD possibles (*voir* Chapitre 13) : EdD constat pour des ouvrages existant, EdD projet ou programme pour la création de nouveaux ouvrages ou la modification d'ouvrages existants,
  - des limites réelles (hydrauliques) des systèmes endigués (*voir* Chapitre 2 : paragraphe 1.) qui ne sont pas toujours faciles à appréhender : topographie peu marquée ou complexe à analyser,
  - de l'existence de territoires non compris dans la zone protégée (définie par le gestionnaire) mais pour lesquels le système de protection apporte tout de même une modification de l'aléa d'inondation (*voir* Chapitre 2 : paragraphe 1.),
  - de la présence d'ouvrages souvent très anciens et mal connus,
  - d'un historique des ouvrages complexe (travaux, modifications, rehaussements, brèches et réparations, etc.) et également mal connu,
  - que les systèmes sont composés d'ouvrages à longs linéaires, souvent ramifiés ou parallèles, et pouvant comporter plusieurs rangs de protection,
  - de systèmes de protection pouvant parfois s'inscrire dans des zones protégées par d'autres systèmes de protection,
  - de la présence d'ouvrages dont la vocation n'est pas forcément la protection contre les inondations (*voir* Chapitre 2 : paragraphe 4.2. et chapitre 5 : paragraphe 1.1.) : des remblais routiers, ferroviaires, etc.,
  - de la présence d'ouvrages de protection directe ou indirecte (*voir* Chapitre 2 : paragraphe 4.2.),
  - de la présence d'éléments naturels (dunes, éperons rocheux, etc.) pouvant participer à la protection contre les inondations,

- de propriétaires et gestionnaires d'ouvrages parfois multiples et aux intérêts pouvant diverger : cela peut engendrer des difficultés quant à la prise en compte des systèmes de protection dans leur intégralité dans le cadre de l'étude. La mise en œuvre de la compétence GEMAPI devrait améliorer ce point, mais une grande vigilance sera nécessaire lors de la première définition des systèmes dans ce cadre, compte tenu de limites géographiques de compétence pas nécessairement cohérentes avec les limites physiques des systèmes,
- de limites d'influence des milieux eau de sollicitation parfois difficiles à définir, etc. ;
- des difficultés quant à la mise en œuvre de l'analyse de risque :
- une imbrication physique (topographique et hydraulique) souvent très complexe entre le système de protection et son environnement : de nombreux paramètres peuvent avoir une influence sur l'intensité des événements hydrauliques (les lignes d'eau au contact des ouvrages), les zones protégées peuvent être le siège d'une grande complexité hydraulique,
- de nombreuses spécificités hydrauliques et morphodynamiques directement liées à la nature de l'environnement de l'ouvrage : milieu fluvial, milieu marin (avec/sans marée), milieu estuarien ou d'embouchure, milieu torrentiel, milieu lacustre,
- des caractéristiques structurelles des ouvrages souvent hétérogènes : impliquant un besoin en reconnaissances à forte résolution ou de nombreuses approximations,
- des mécanismes élémentaires de détérioration des ouvrages et surtout des scénarios de défaillance et d'inondation pouvant s'avérer difficiles à appréhender, etc.

## CHAPITRE 12

# Intérêt des études de dangers de digues ou de systèmes d'endiguement

Les résultats de l'étude de dangers, et donc de l'analyse de risque, présentent un intérêt pour différents types d'acteurs du territoire, ce chapitre en détaille la nature.

Pour tous les acteurs de la gestion des risques et tous les partis concernés par le risque d'inondation, l'étude de dangers permet de conclure sur la nature et l'importance de ce risque. Le premier intérêt de ce type d'étude est donc la connaissance du risque pour l'ensemble de ces acteurs du territoire (populations, collectivités locales, État, entreprises, gestionnaires de digues, gestionnaires de réseaux, etc.) ; la connaissance du risque est la première étape de la démarche de maîtrise du risque (*voir Chapitre 4 : paragraphe 1*).

### 1. Intérêt pour les gestionnaires de digues

L'EdD est un outil au service du gestionnaire du système de protection (gestionnaires actuels ou gestionnaires « GEMAPI »). En effet, elle permet tout d'abord d'approfondir la connaissance des ouvrages et d'identifier les éventuelles insuffisances en termes de niveau de protection et de niveau de sûreté. Elle donne également une évaluation de la criticité du risque associé aux ouvrages et à leur environnement (*voir Chapitre 6*). Cela facilite grandement l'optimisation de la politique de surveillance, d'entretien, de confortement et de gestion des systèmes de protection et permet de s'orienter vers une meilleure gestion des inondations qui résultent d'insuffisances ou de défaillances du niveau de protection. En effet, l'aide à la décision est alors menée en pleine conscience des conséquences potentielles pour les enjeux et avec la possibilité d'évaluer les réductions du risque pouvant découler de l'application des mesures envisagées.

Au-delà de ses résultats, l'EdD est également, pour le gestionnaire du système de protection, une occasion de synthétiser ou d'actualiser l'ensemble des éléments de connaissance relatifs au système de protection et aux risques d'inondation associés. À ce titre, la première EdD d'un système de protection est l'occasion de rechercher et de capitaliser (dans le dossier d'ouvrage) certains des éléments de connaissance qui n'étaient pas immédiatement disponibles ; les futures EdD ou autres études sur le même système de protection s'en trouveront ainsi facilitées, voire enrichies.

## 2. Intérêt pour les acteurs du territoire et de la gestion des risques

L'EdD est un outil au service des gestionnaires du territoire :

- elle donne des connaissances sur les enjeux et leur exposition aux phénomènes d'inondation et les niveaux de risque ;
- elle apporte des connaissances sur les dynamiques d'inondation dans la zone protégée et peut donc aider à la planification de la gestion de crise ;
- elle sert de support pour aider à définir les actions à entreprendre en termes de planification pour la réduction de la vulnérabilité. L'EdD indique implicitement les zones dans lesquelles il ne devrait pas y avoir d'augmentation des enjeux et/ou de leur vulnérabilité, et peut donc permettre de mettre en place une meilleure maîtrise de l'urbanisation et/ou des mesures particulières d'urbanisme et d'aménagement du territoire.

L'EdD est également un outil au service des gestionnaires de la sauvegarde des populations et des biens :

- pour tous les acteurs de la crise : l'EdD constitue une base objective sur laquelle pourra reposer le travail de communication entre le gestionnaire du système de protection et les gestionnaires de la sauvegarde des populations (maire, préfet, services de secours), et éventuellement les collaborations (par exemple, utilisation de la réserve communale de sécurité civile pour la surveillance des digues en période de crue) permettant l'anticipation et la planification globale de la gestion de crise, pour mieux définir les actions à entreprendre en cas de crise (mise en sécurité des populations et des biens),
  - au niveau de l'État, au moyen du plan ORSEC (loi n° 2004-811 du 13 août 2004 de modernisation de la sécurité civile, décret n° 2005-1157 du 13 septembre 2005 relatif au plan ORSEC). Il s'appuie sur trois niveaux territoriaux : départemental, zonal et maritime, et comporte trois volets : recensement et analyse des risques, dispositif opérationnel, préparation et exercices. L'EdD, présentant le recensement et l'analyse des risques, peut permettre au préfet de planifier les secours adaptés aux crises ;
  - au niveau communal, au moyen du PCS. L'EdD donne au maire des éléments utiles à l'élaboration ou la révision du PCS ;
- pour les établissements scolaires et plus généralement les établissements recevant du public ;
- pour les entreprises : mise en protection des installations, plans d'évacuation, PPI, etc. ;
- pour les réseaux : planification des actions à entreprendre pour diminuer leur vulnérabilité et améliorer la résilience de leurs fonctions ;
- pour les particuliers : connaissance des risques et anticipation pour la mise en sécurité, mise au point de « plan familial de mise en sûreté », adaptation de l'habitat, etc.

Ces différentes valorisations indirectes des résultats de l'EdD (celle-ci étant avant tout dédiée au gestionnaire du système de protection) sont d'autant plus évidentes lorsqu'un effort de pédagogie et de communication est entrepris autour de l'étude. Ce travail est nécessaire pour une meilleure gestion du risque d'inondation sur le territoire.



### 3. Rôle du service de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques

Le service de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques (SCSOH) n'a pas vocation à approuver les EdD. Comme pour les différentes études réglementaires, il doit néanmoins s'assurer de l'atteinte des objectifs et d'une qualité de réalisation suffisante ; le SCSOH n'a pas d'attente propre, il doit « simplement » vérifier que le travail effectué par ou pour le maître d'ouvrage permet d'appréhender le risque d'inondation pour, si besoin, en optimiser la gestion et, dans le cadre de la GEMAPI, que l'ensemble « système d'endiguement/zone protégée/niveau de protection » est correctement justifié.

Dans l'instruction d'une EdD, le SCSOH doit :

- vérifier la conformité des EdD vis-à-vis des objectifs énoncés dans la réglementation ;
- vérifier la justification de la démarche entreprise pour mener l'étude (méthodologie d'analyse de risque, méthodologies relatives aux différentes études élémentaires) ;
- vérifier la continuité et la cohérence entre les différents chapitres et annexes de l'étude ;
- vérifier la validité et la cohérence de l'ensemble des résultats de l'étude, en termes de :
  - justification des données d'entrée utilisées dans l'étude,
  - justification des niveaux (*voir* Chapitre 3) de protection, de sûreté et de danger de l'ouvrage, et de sécurité des populations,
  - vérification de la bonne argumentation des mesures de réduction du risque proposées et du calendrier de leur mise en œuvre (pour les EdD réalisées au titre du décret de 2007),
  - vérification de la cohérence entre le contenu des EdD, la complexité des systèmes de protection et l'importance des enjeux potentiellement exposés (populations et biens matériels).



## CHAPITRE 13

# Les différents types d'études de dangers de digues ou de systèmes d'endiguement

En fonction de l'existence réelle ou projetée de tout ou partie d'un système de protection, il est possible de distinguer jusqu'à cinq types d'EdD de digues ou de systèmes d'endiguement. L'approche présentée ci-après est une analyse dans le cadre de ce guide, compatible avec les réglementations de 2007 comme de 2015, mais n'est pas une lecture « mot à mot » de chacune de ces réglementations.

### 1. EdD « constat »

Nous appelons EdD « constat » toute étude de dangers relative à un système de protection existant qui ne fait l'objet d'aucun projet de modification. L'EdD « constat » a pour objectif d'analyser les risques induits par un tel système à un instant donné (risque résiduel lié aux dépassements du niveau de protection et aux éventuelles défaillances du système).

Dans le cadre de la réglementation de 2007, l'EdD propose des mesures de réduction de ces risques. Le contenu du chapitre 9 de ce type d'EdD doit répondre aux attentes du guide de lecture des EdD de digues (circulaire du 16 avril 2010). Dans le cas de la réglementation de 2015, les mesures de réduction du risque ne sont plus demandées dans le cadre de l'EdD, mais le gestionnaire doit bien évidemment utiliser les résultats de l'EdD de la même manière afin de maîtriser ou réduire le risque sur son système.

On identifie trois types d'EdD « constat » :

- l'EdD initiale ;
- la mise à jour régulière de l'EdD ;
- la mise à jour exceptionnelle de l'EdD.

#### 1.1. EdD initiale

Il s'agit de la première EdD réalisée sur un système de protection existant. Elle est donc fondatrice.

Dans le cadre de la réglementation version 2015, l'EdD initiale entre dans le cadre de la demande d'autorisation initiale d'un système d'endiguement. Plusieurs cas sont possibles et peuvent se combiner pour une telle demande d'autorisation :

- la régularisation de digues existantes précédemment autorisées ;

- la régularisation d'ouvrages de protection contre les inondations existants mais 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 (exemple : remblais routiers...) ;
- la création d'un nouveau système d'endiguement.

Après avoir procédé à l'identification du périmètre du système de protection, l'EdD initiale dresse un premier constat daté du risque d'inondation de la zone protégée par rupture ou dépassement (surverse, contournement) de ce système. Elle aboutit, entre autres, à l'identification de la zone protégée et du niveau de protection associé.

L'EdD initiale résulte de l'exploitation de toutes les données nécessaires **disponibles**, rassemblées ou produites préalablement, et identifie précisément les études et investigations complémentaires à mener sur le système de protection et son environnement avant la prochaine EdD.

S'il fait l'acquisition de nouvelles données lui permettant d'approfondir les résultats de son EdD initiale, le gestionnaire n'est pas obligé d'attendre la prochaine mise à jour régulière pour faire évoluer le contenu de son EdD.

## 1.2. Mise à jour régulière de l'EdD

Le décret du 11 décembre 2007 impose aux gestionnaires de digues de mettre à jour les EdD au moins une fois tous les 10 ans. Le décret de 2015 impose une remise à jour tous les 10 ans pour les systèmes de classe A, tous les 15 ans pour ceux de classe B et tous les 20 ans pour ceux de classe C.

Ces révisions passent notamment par l'intégration de toutes les évolutions récentes du système et de son environnement, ainsi que par l'exploitation des résultats des dernières investigations (VTA entre autres, REX sur événements, ETC, etc.).

Des évolutions des méthodologies d'analyse peuvent également être intégrées lors des mises à jour ; par exemple, les méthodes de justification actuelle des ouvrages hydrauliques en remblai [7] ne prennent pas en compte de manière satisfaisante tous les mécanismes de détérioration et de rupture, tels les mécanismes d'érosion interne, alors que des recherches sur ces mécanismes sont en cours et amèneront à la définition de nouvelles méthodes d'évaluation dans le futur.

## 1.3. Mise à jour exceptionnelle de l'EdD

Le préfet peut demander la mise à jour exceptionnelle d'une EdD s'il considère qu'un événement nouveau est de nature à remettre en cause sa validité, comme la modification structurelle du système de protection ou encore un événement hydrologique majeur, ou un EISH. Il indique alors le délai dans lequel cette mise à jour doit être réalisée.

La réalisation de ce type d'EdD peut également répondre à un besoin énoncé dans les conclusions du chapitre 9 de la dernière EdD en date (type « 2007 ») ou encore être initiée par le responsable de l'ouvrage.

## 2. EdD « projet » ou « programme » de travaux

Concernant soit la création d'un nouveau système de protection, soit la modification d'un système existant déjà pourvu d'une EdD, ces études ne concluent pas sur des mesures de réduction du risque telles que décrites au chapitre 9 du plan réglementaire de l'EdD type 2007 (*voir Chapitre 11 : paragraphe 1.2.*). En revanche, elle permet de justifier et de quantifier l'amélioration en termes de risque qui résulte de la réalisation d'un projet ou d'un programme de travaux, en effectuant une estimation du risque dans les deux situations (avant et après réalisation).

### 2.1. EdD « projet »

Une EdD « projet » est menée avant la mise en œuvre du projet. Elle doit permettre d'en justifier le bien-fondé, en montrant l'influence du projet sur le risque d'inondation en présentant :

- une estimation du risque pour la situation initiale ;
- une estimation du risque pour la situation correspondant au projet ;
- une estimation des bénéfices résultant de la mise en œuvre du projet (différence entre les deux situations précédentes).

L'EdD ultérieure et immédiatement consécutive à la réalisation du projet (une EdD « constat ») ne nécessitera alors qu'une actualisation de l'EdD « projet », pour rendre compte de l'aménagement effectivement implanté et du risque résiduel associé.

La différence essentielle entre les EdD liées à des travaux et les EdD « constat » tient à ce qu'au lieu de proposer ou d'aider à définir des mesures de réduction du risque, l'EdD « projet » permet plutôt de quantifier la réduction du risque apportée par la réalisation des travaux, en une ou plusieurs étapes.

### 2.2. EdD « programme »

Un programme de travaux est un projet mené par étapes, sur le moyen ou le long terme, et dont les résultats en matière de diminution du risque ne sont pas nécessairement effectifs avant l'étape finale.

L'EdD « programme » doit donc estimer la réduction du risque qui sera apportée par la mise en œuvre complète du programme en explicitant, pour chaque phase de travaux, les objectifs à atteindre. Ce programme peut correspondre à la création d'un nouveau système de protection ou à la modification d'un système de protection existant.

### 2.3. Spécificités liées à la création d'un nouveau système de protection

En l'absence d'ouvrages de protection, il n'existe localement aucune EdD antérieure à la réalisation de l'EdD « projet » ou « programme ». Une étude spécifique d'estimation du risque d'inondation en situation initiale doit alors être menée sur la zone d'influence du projet d'aménagement. Elle permettra de mesurer l'impact du projet de création sur le risque d'inondation.

## 2.4. Spécificités liées à la modification d'un système de protection existant

Dans le cas de la modification d'un système de protection existant, l'EdD « projet » ou « programme » s'appuie sur la dernière mise à jour de l'EdD du système, si elle existe. Ce sont les résultats de cette dernière qui serviront de référence pour mesurer l'impact du projet de modification sur le risque d'inondation.

Le projet de modification, qui peut résulter de la mise en application de mesures de réduction du risque proposées dans (ou définies à l'aide) des EdD antérieures, peut faire partie d'un programme de travaux plus vaste sur plusieurs années. Un objectif de diminution du risque d'inondation est alors annoncé dans le projet et atteint à l'issue de sa mise en œuvre.

## CHAPITRE 14

# Utilisation de l'analyse de risque pour l'aide à la décision relative aux systèmes d'endiguement

### 1. Analyse de risque et aide à la décision

L'analyse de risque d'un système endigué (présentée dans son ensemble en [Partie II](#)) comprend le diagnostic des ouvrages de protection qui le composent (*voir* [Chapitre 10](#)) et permet d'asseoir les décisions du gestionnaire en termes de :

- définition des actions de surveillance et d'entretien en période normale ;
- planification et organisation de la surveillance et de la mise en œuvre de mesures d'urgence en période de crue ou d'événement hydrométéorologique ;
- reconnaissances et/ou diagnostics complémentaires pour une actualisation de l'analyse de risque ;
- confortements des ouvrages ;
- modification du système ou de ses objectifs de protection.

La [Figure 7-1](#) présente, sous forme d'un logigramme, le processus de prise de décision en fonction des résultats de l'analyse de risque.

### 2. Détermination de nouvelles mesures de réduction du risque

Le [Chapitre 7](#) présente l'ensemble des mesures envisageables de gestion ou de réduction du risque d'inondation lié à un système de protection. Celles-ci peuvent relever de chacune des catégories de décision présentées au [paragraphe 1](#) de ce [Chapitre 7](#).

La démarche d'analyse de risque et la méthode que nous proposons en [Partie II](#) permettent d'identifier l'ensemble des scénarios envisageables, combinant les dépassements et défaillances de la fonction de protection du système, les inondations associées et leurs conséquences, en détaillant les différents événements de chaque scénario, ce qui permet d'estimer leurs probabilités et leurs conséquences individuelles.

L'estimation du risque (*voir* [Chapitre 5](#) : [paragraphe 3.22.](#)) pour un certain nombre de scénarios parmi les plus représentatifs (*voir* [Chapitre 5](#) : [paragraphe 3.16.](#)) et la définition de l'acceptabilité du risque (*voir* [Chapitre 6](#) : [paragraphe 1.](#)) permettent de classer les scénarios en termes de criticité (*voir* [Chapitre 6](#) : [paragraphe 2.](#)) et de déterminer lesquels doivent ou peuvent faire l'objet de mesure(s) de réduction du risque.

Pour un scénario donné, l'estimation du risque associé se fait en analysant, pour chacun des événements élémentaires du scénario, sa probabilité et ses conséquences. Pour



chacun des scénarios analysés en détail, on identifie parmi les événements composant le scénario ceux pour lesquels on peut envisager des mesures permettant de réduire leur probabilité d'apparition, ou encore d'atténuer leur conséquence sur les enjeux de la zone protégée. Par exemple, sur une digue où l'on aura diagnostiqué un risque élevé de rupture en cas de crue par érosion interne liée à la présence d'un ouvrage traversant, on pourra envisager des travaux de fiabilisation de cette traversée. Comme autre exemple on pourra, en visant en priorité les secteurs avec une probabilité de brèche plus élevée ou des conséquences plus dramatiques, améliorer la surveillance des ouvrages et les interventions en crue (*voir* l'ILH [9], sections 6.5 à 6.8) pour éviter les brèches après apparition d'un désordre mineur et avant son évolution irréversible. Dans un dernier exemple, on pourra imaginer la mise en œuvre de stations de pompage pour évacuer l'eau d'une zone protégée qui aurait été inondée, de façon à accélérer son ressuyage, ce qui aura pour effet de limiter les conséquences sur les bâtiments, cultures et autres types de biens pour lesquels la durée de l'inondation a une influence directe.

L'examen détaillé des scénarios et de chaque composante du risque qui y est associé permet également d'analyser l'efficacité et l'importance des barrières de sécurité existantes (*voir* Chapitre 5 : paragraphe 3.4.) et d'identifier celles qui sont essentielles en termes de réduction de l'aléa ou de conséquences, comme d'identifier la possibilité de les renforcer ou d'en ajouter des nouvelles.

### 3. Évaluation de mesures de réduction du risque

L'utilisation de l'analyse de risque permet d'évaluer la réduction du risque apportée par chacune des mesures envisagées pour réduire le risque : en utilisant la même analyse de risque et en procédant à l'estimation du risque associé aux différents scénarios de défaillance considérés, en comparant les situations avec et sans mise en œuvre de chacune des mesures de réduction du risque.

En complément de l'analyse de risque qui donne une estimation de l'efficacité d'une mesure en termes de réduction du risque (ce risque étant estimé d'après l'échelle d'analyse des conséquences choisies, par exemple le nombre de personnes inondées), il est possible d'effectuer des analyses coûts-dommages évités (plus classiquement dénommées ACB – analyse coûts/bénéfices) [5] pour éclairer les choix des mesures sur le plan financier, ou encore des analyses multicritères [8] pour les éclairer sur plus de critères. Les analyses de ce type sont désormais classiquement exigées en cas de financement par l'État d'un projet de type PAPI et peuvent être effectuées en cohérence avec l'analyse de risque.

## CHAPITRE 15

# Réalisation d'une étude de dangers

### 1. Application de la méthode d'analyse de risque proposée par l'Irstea

L'étude de dangers de digues ou de système d'endiguement consiste en une analyse de risque. La méthode développée par l'Irstea, présentée dans le [Chapitre 5](#) et reposant sur une décomposition de l'analyse de risque en études élémentaires, est donc aussi bien applicable aux études de dangers réalisées au titre des décrets de 2007 ou de 2015.

L'utilisation de cette méthode générique (*voir* [Figure 5-3](#)), plutôt que d'une méthode calée sur la rédaction des textes réglementaires, présente l'avantage d'être plus logique et modulaire. Elle facilite donc la réutilisation et l'actualisation des résultats des études élémentaires et de l'analyse d'ensemble, lors d'une actualisation de l'étude de dangers. Par exemple, une étude de dangers réalisée avec cette méthode pour satisfaire à la réglementation de 2007 sera facilement, et de façon valide, actualisable pour produire une étude au format 2015.

L'ensemble des études élémentaires a vocation à figurer en annexe du rapport d'EdD proprement dit, celui-ci devant faire l'objet d'une rédaction spécifique, à réaliser de préférence à la fin de l'analyse de risque.

Le [Tableau 15-I](#) indique de quelle manière les résultats de chacune des études élémentaires sont utilisés pour la rédaction des différents chapitres du plan réglementaire de l'EdD (pour les formats 2007 et 2015).

**Tableau 15-I.** Liens entre études élémentaires et chapitres de l'étude de dangers réglementaire (formats « 2007 » et « 2015 »).

N°	Études élémentaires (objectifs/étapes)	Utilisation dans le rapport EdD 2007	Utilisation dans le rapport EdD 2015
0	Étude accidentologique du système endigué	Chap. 7	Chap. B.6
1	Topographie	Chap. 3	Chap. B.5 (1, 2 et 3)
A	Définition du périmètre de l'étude et identification du risque	Chap. 2 ; 3	Chap. B.5 (1, 2 et 3)
2	Analyse de la gestion de la sécurité (eau, endiguement, zone protégée)	Chap. 3 ; 4	Chap. B.9
3	Morphodynamique globale	Chap. 3 ; 6	Chap. B.4 et B.5.3
4	Hydraulique globale	Chap. 3 ; 6	Chap. B.4 et B.5.3
5	Caractérisation géotechnique et structurelle du système de protection	Chap. 3	Chap. B.5 (1, 2 et 3)

Tableau 15-I. (Suite).

N°	Études élémentaires (objectifs/étapes)	Utilisation dans le rapport EdD 2007	Utilisation dans le rapport EdD 2015
6	Comportement morphodynamique local du milieu eau	Chap. 3 ; 6	Chap. B.4 et B.5.3
7	Comportement hydraulique local du milieu eau	Chap. 3 ; 6	Chap. B.4 et B.5.3
8	Ouvrages inclus dans le système de protection	Chap. 3	Chap. B.5 (1, 2 et 3)
9	Autres actions et facteurs aggravants	Chap. 3 ; 6	Chap. B.4 et B.5.3
10	Recensement des enjeux	Chap. 3	Chap. B.5.3 et B.8
B	Analyse fonctionnelle du système de protection	Chap. 3	Chap. B.5.3
C	Analyse de la défaillance du système de protection	Chap. 5 ; 8.2	Chap. B.7 et B.8
11	Probabilités conditionnelles de défaillance	Chap. 8.3.1	Chap. B.7
12	Choix des scénarios d'inondation à caractériser	Chap. 5 ; 8.2.2 ; 8.3.1	Chap. B.5.3 et B.8
13	Caractérisation des brèches (géométrie, cinétique, hydraulique)	Chap. 5 ; 8.3.2	Chap. B.8
D	Probabilités des scénarios d'inondation	Chap. 8.3.1	Chap. B.8
E	Intensité et cinétique des scénarios d'inondation	Chap. 8.3.2	Chap. B.8
F	Vulnérabilité des enjeux	Chap. 8.3.3	Chap. B.8
G	Gravité des conséquences	Chap. 8.3.3	Chap. B.8
H	Estimation du risque d'inondation	Chap. 8.3.4	Chap. B.8
14	Acceptabilité du risque	Chap. 8.3.4	Non prévu dans le plan réglementaire mais suite logique de l'EdD
I	Évaluation du risque d'inondation	Chap. 8.3.4	
J	Mesures de réduction du risque	Chap. 9	

## 2. Cahier des charges et conduite de l'EdD

Ce chapitre, dont le contenu repose en grande partie sur le retour d'expérience de la DREAL Centre – Val-de-Loire, a pour objectif de faciliter la rédaction du cahier des charges de l'EdD et la conduite de l'étude.

Par ailleurs, il est proposé en [Annexe 3](#) un modèle de cahier des charges complet et détaillé s'appuyant sur l'ensemble de la démarche que propose le présent guide. Notons que l'adaptation de ce modèle de cahier des charges, ou de tout autre modèle, au contexte d'un système de protection, nécessite un minimum de compétences techniques de la part du maître d'ouvrage de l'étude (généralement le gestionnaire). Si ce dernier ne possède pas les compétences nécessaires en interne, il est très souhaitable qu'il se les adjoigne sous la forme d'une assistance à maîtrise d'ouvrage (AMO), ainsi que pour le suivi du déroulement de l'étude.

### Considérations sur la maîtrise d'ouvrage de l'EdD

Le **maître d'ouvrage de l'EdD** est généralement le gestionnaire du système de protection. Cette responsabilité peut éventuellement être déléguée à un **maître d'ouvrage délégué** (par exemple, à un EPTB). Lorsque plusieurs structures se trouvent être responsables de différents ouvrages d'un même système de protection, celles-ci peuvent se mettre d'accord pour confier la maîtrise d'ouvrage de l'EdD à un unique maître d'ouvrage commun. Par ailleurs, pour être assisté dans son travail, le maître d'ouvrage de l'EdD peut s'entourer d'une aide technique de type assistance à maîtrise d'ouvrage. Quoi qu'il en soit, quelle que soit la manière dont est organisée la maîtrise d'ouvrage de l'EdD, le gestionnaire du système de protection reste toujours responsable de la remise de l'EdD achevée au service de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques.

## 2.1. Données disponibles et données à obtenir

Avant toute chose, il convient de s'intéresser aux données disponibles pour la conduite de l'étude.

Par la constitution du dossier d'ouvrage, le gestionnaire du système de protection est le mieux placé pour avoir une vision globale des données existantes. Si le dossier d'ouvrage n'existe pas encore, c'est le cas d'un nouveau responsable d'un parc d'ouvrages transférés, délaissés ou d'ouvrages nouvellement créés, il s'agit de la première tâche à effectuer.

La lecture de la [Partie II](#) du présent guide et notamment des [Chapitres 8 et 10](#) amène également le responsable du système de protection à s'intéresser aux données qui ne sont pas sa propriété et qui peuvent être publiques ou bien propriété d'un tiers et pour lesquelles il doit s'assurer de la possible mise à disposition au démarrage de l'étude. Ces données pourront concerner l'ouvrage lui-même, l'historique de l'ouvrage, la zone protégée ou encore le milieu eau (données hydrologiques, modèle hydraulique, par exemple, banque de données du sous-sol du BRGM, archives départementales, données de l'Insee, données d'un EPTB, etc.).

La possession de la liste exhaustive et détaillée des données disponibles permettra au maître d'ouvrage de l'EdD de définir les acquisitions de données manquantes et nécessaires à la conduite de l'étude, soit en termes de reconnaissances (topographie, géotechnique, etc.), soit en termes d'études (hydrologie/hydraulique, morphodynamique, etc.). Le recueil de données spécifiques nécessite éventuellement plusieurs itérations, les premiers résultats donnant des indications sur les phases ultérieures, y compris avec des « ponts » entre les différentes reconnaissances et études (par exemple, recensement des enjeux et construction d'un modèle hydraulique permettant de caractériser l'inondation de la zone protégée en cas de défaillance du système de protection). Certaines études ou parties d'études vont requérir un « prétraitement » pour fournir des données directement utilisables dans l'analyse de risque, c'est par exemple le cas des campagnes de reconnaissances géotechniques et géophysiques.

Si l'EdD est réalisée par un bureau d'études agréé à travers la passation d'un marché (étude non réalisée en interne par un gestionnaire ou maître d'ouvrage agréé), le maître d'ouvrage de l'EdD devra ajuster les termes du cahier des charges pour y inclure si besoin les études spécifiques d'acquisition de données jugées nécessaires.

De même, le choix de la passation d'un marché amènera le gestionnaire à s'interroger sur l'organisation de la maîtrise d'ouvrage de l'étude (*voir* plus haut [l'encadré sur les considérations sur la maîtrise d'ouvrage de l'EdD](#)) et sur la constitution d'un comité de pilotage de l'étude.

## 2.2. Marchés liés à la réalisation d'une EdD

S'il ne dispose pas de l'agrément « ouvrages hydrauliques » (conformément aux articles R.214-129 à R.214-132 du Code de l'environnement) et des compétences nécessaires à la réalisation d'une EdD, le maître d'ouvrage de l'EdD doit contracter avec un organisme agréé.

Le contenu des prestations dépend de l'inventaire et de l'analyse des données disponibles. En effet, on peut distinguer ici la production des études élémentaires, de l'élaboration de l'étude de dangers elle-même. Si cette dernière prestation est nécessairement réalisée par un organisme agréé, en application de la réglementation sur les ouvrages hydrauliques, la production d'études élémentaires peut tout à fait être confiée à des organismes non agréés.

Il s'avère, néanmoins, que nombre d'organismes agréés disposent de l'ensemble ou de la quasi-totalité des compétences techniques pour réaliser les études élémentaires de la méthode d'analyse de risque présentée ici ou, si tel n'est pas le cas, peuvent sous-traiter certaines prestations à des organismes compétents (cas des recherches historiques ou des reconnaissances géotechniques et géophysiques par exemple).

Le choix d'un organisme agréé unique réalisant (ou sous-traitant en partie) l'ensemble des prestations (réalisation des études élémentaires et élaboration de l'EdD) demeure *la solution la plus simple*, qui offre de meilleures garanties vis-à-vis du respect de l'échéance de remise de l'étude (la chaîne de production est entièrement sous la responsabilité d'un unique organisme).

Le maître d'ouvrage de l'EdD peut néanmoins s'orienter sur la passation de plusieurs marchés, ou de marchés en lots, ou encore d'un marché unique avec des sous-traitances, qui auront pour objectif la réalisation d'une ou plusieurs études élémentaires. La recherche de certaines compétences orientera le nombre de marchés (Tableau 15-II).

**Tableau 15-II.** Compétences nécessaires pour la réalisation des études élémentaires de l'analyse de risque.

Principales compétences recherchées	Études élémentaires (objectifs/étapes)
Recherche et analyse de documents historiques	0 Étude accidentologique du système endigué (et l'ensemble des études élémentaires alimentées par cette étude - voir Figure 5-3)
Géomètre	1 Topographie
Morphodynamique fluviale ou marine	3 Morphodynamique globale
	6 Comportement morphodynamique local du milieu eau
	J Mesures de réduction du risque
Hydrologie - Hydraulique	4 Hydraulique globale
	7 Comportement hydraulique local du milieu eau
	B Analyse fonctionnelle du système de protection
	C Analyse de la défaillance du système de protection
	12 Choix des scénarios d'inondation à caractériser
	13 Caractérisation des brèches (géométrie, cinétique, hydraulique)
	D Probabilités des scénarios d'inondation
	E Intensité et cinétique des scénarios d'inondation
	F Vulnérabilité des enjeux
	J Mesures de réduction du risque
Géotechnique - Géophysique - Génie civil	5 Caractérisation géotechnique et structurelle du système de protection
	8 Ouvrages inclus dans le système de protection
	B Analyse fonctionnelle du système de protection
	C Analyse de la défaillance du système de protection
	11 Probabilités conditionnelles de défaillance
	12 Choix des scénarios d'inondation à caractériser
	13 Caractérisation des brèches (géométrie, cinétique, hydraulique)
	J Mesures de réduction du risque

Tableau 15-II. (Suite).

Principales compétences recherchées	Études élémentaires (objectifs/étapes)	
Exploitation et analyse des données spécifiques aux enjeux de la zone protégée	10	Recensement des enjeux
	F	Vulnérabilités des enjeux
	J	Mesures de réduction du risque
Mathématique, statistique	11	Probabilités conditionnelles de défaillance
	D	Probabilités des scénarios d'inondation
Analyse de risque		Ensemble de la démarche
	H	Estimation du risque d'inondation
	I	Évaluation du risque d'inondation
	J	Mesures de réduction du risque

### 2.3. Organisation du suivi de l'étude

Que le gestionnaire du système de protection décide de réaliser l'EdD en régie (s'il dispose de l'agrément conformément aux dispositions des articles R.214-129 à R.214-132 du Code de l'environnement), ou bien de passer un marché avec un organisme agréé externe – auquel cas le gestionnaire se constitue maître d'ouvrage de l'étude (*voir plus haut l'encadré sur les considérations sur la maîtrise d'ouvrage de l'EdD*), il convient d'organiser le suivi de l'étude afin d'atteindre les objectifs définis au [paragraphe 2.](#) du [Chapitre 11.](#)

Nous conseillons de constituer un **comité de pilotage** de l'étude qui peut rassembler, en plus du maître d'ouvrage de l'EdD et de son éventuel AMO :

- le gestionnaire du système d'endiguement s'il n'est pas le maître d'ouvrage de l'EdD ;
- le(s) propriétaire(s) des éléments composant le système de protection ;
- le(s) gestionnaire(s) des éléments composant le système de protection, s'il(s) existe(nt) ;
- les propriétaires et/ou gestionnaires d'ouvrages ayant fonction de protection contre les inondations sans avoir cette vocation ou en ayant une autre vocation (s'ils sont connus au démarrage de l'EdD) – les dispositions de la compétence GEMAPI permettent la prise en charge pour leur rôle de protection d'ouvrages ayant une autre vocation. La gestion effective de ces ouvrages doit être négociée entre les gestionnaires des différentes fonctions ;
- des représentants des services gestionnaires de crise sur le territoire concerné (services de l'État, services communaux spécifiques), etc.

Si nécessaire, le maître d'ouvrage de l'EdD peut s'entourer d'experts dans les domaines en lien avec les ouvrages hydrauliques (hydrologie, océanographie, hydraulique, morphodynamique fluviale ou marine, géotechnique, génie civil, cartographie, etc.) et constituer ainsi un **comité technique** pour le suivi de l'étude.

### 2.4. Planning de l'EdD

La durée de réalisation d'une étude de dangers doit permettre la validation, par le MO de l'EdD, assisté de son éventuel comité technique, des principales études élémentaires et de la rédaction des chapitres de l'EdD. Il est conseillé de réserver un délai de plusieurs mois en fin d'étude pour la mise au point définitive du rapport lui-même,

notamment pour ce qui concerne les mesures de réduction du risque (version « arrêté 2008 ») ou le choix des objectifs de protection (version « arrêté 2017 »), ces éléments étant du ressort du gestionnaire du système de protection plus que du bureau d'études.

Un délai de 18 mois est, a priori, raisonnable pour la totalité du déroulé d'une première étude de dangers d'un système de protection. Ce délai est bien entendu variable selon l'étendue, la complexité du système, les connaissances initialement disponibles et les études complémentaires préalables à recueillir (choix de la bonne période pour les prestations topographiques, inspection visuelle, etc.).

Nous préconisons la tenue de réunions périodiques et formelles pendant lesquelles l'organisme agréé présente les études élémentaires et les chapitres rédigés à l'avancement de l'EdD. Pour la bonne tenue de ces réunions, l'organisme agréé doit remettre les documents au minimum 15 jours avant les réunions afin que le maître d'ouvrage et son comité de pilotage aient le temps de les lire et de les assimiler.

### 3. Rédaction du rapport de l'étude

L'étude de dangers fait le point sur tous les risques liés au système d'endiguement. Elle a vocation à être lue par un public technique très large, en tout cas en ce qui concerne son résumé non technique. Elle doit être portée à connaissance dans le cadre des procédures de réalisation ou de révision de différents documents qui peuvent s'en enrichir. Notamment, les PPRI et les plans de mise en sécurité des populations, tels les PCS et les plans ORSEC, pourront être rendus cohérents avec l'étude de dangers.

L'EdD n'est pas une étude faite uniquement pour des experts ou des spécialistes. Sa rédaction doit en tenir compte. Nous recommandons donc d'élaborer un rapport concis et de mettre l'ensemble des études ayant servi à bâtir le raisonnement en annexe, à disposition des spécialistes. Le rapport doit être rédigé pour un public non averti et doit donc définir toutes les notions qui y sont abordées, les acronymes doivent être explicités à leur première citation, et mieux encore, au niveau de chaque chapitre de l'EdD car ceux-ci doivent pouvoir être lus séparément.

La relecture par des personnes non impliquées dans l'étude permet d'alerter le rédacteur sur les parties qui lui paraissent simples du fait de son immersion dans l'étude alors qu'un « candide » aura la vision extérieure d'un lecteur non averti.

Un retour d'expérience de la DREAL Centre – Val-de-Loire sur la rédaction des EdD au format de la réglementation de 2007 est présenté en [Annexe 5](#).



## CONCLUSION

---

La gestion des digues et des systèmes d'endiguement est une profession en pleine croissance, qui se structure (CFBR, association France Digues) et qui a néanmoins un fort besoin de développement d'outils et de méthodes. Ce guide est le fruit de plusieurs années de travail des auteurs et de leurs partenaires, gestionnaires de digues, bureaux d'études et services de l'État. Il est fortement attendu par les praticiens en vue de son application à la réalisation des Études de Dangers (EdD) des Systèmes d'Endiguement dans le cadre de la mise en place de la nouvelle compétence GEMAPI. Le lecteur y aura trouvé, dans la première partie, une description des éléments généraux permettant d'analyser la première des questions posées par cette mise en place : quel système endigué considérer (système d'endiguement et autres éléments participant à la protection, aléas naturels contre lesquels le système protège, zone protégée et niveaux limites associés) ? La deuxième partie du guide a présenté une méthodologie d'analyse de risque formalisée et cohérente permettant de justifier la réponse à cette question initiale mais également de produire l'EdD réglementaire et d'aider le gestionnaire dans les décisions relatives à la surveillance, à l'entretien, au confortement de ses ouvrages ou à la modification de son système. La troisième partie a fait le lien entre l'analyse de risque et la production de cette EdD réglementaire.

Pour les systèmes de protection contre les inondations et les digues qui les composent, l'analyse de risque est l'élément de suivi régulier le plus complet, pour l'évaluation de leur état, de leurs performances et du risque résiduel d'inondation. Les examens visuels réguliers par le gestionnaire, les visites techniques approfondies, le suivi des dispositifs d'auscultation éventuels, les diagnostics des ouvrages et, enfin, l'analyse de risque du système affinent progressivement les connaissances. Leur réalisation régulière, selon un cycle intégré au cycle de gestion des ouvrages, est un des outils d'aide à la décision qui, associé à des analyses coûts-bénéfices et à des analyses multicritères, pourront éclairer et asseoir les décisions dans un cadre de gestion patrimoniale des infrastructures vers lequel les nouveaux acteurs de la compétence GEMAPI devront naturellement faire porter leurs efforts.

Au niveau international de la profession des ouvrages hydrauliques, et c'est entre autres un constat au sein des travaux de la Commission internationale des grands barrages (CIGB), l'approche « risque » par rapport à l'approche déterministe classique dans l'ingénierie est de plus en plus répandue et acceptée, même si, d'un pays à l'autre, d'une activité (conception ou diagnostic) à l'autre et d'un type d'ouvrage (barrage ou digue) à l'autre, les mises en œuvre sont différentes.

En France, l'analyse de risque des digues a été introduite avec la réglementation sur les ouvrages hydrauliques et le concept d'EdD. Le plan réglementaire de ces EdD a été fondamentalement modifié entre la première version de 2008 (décret de 2007) et l'actuelle de 2017 (décret de 2015), au-delà de la simple intégration de la justification des choix en termes de système d'endiguement, de zone protégée et de niveau de protection. La méthode proposée dans ce guide permet une analyse selon une méthode robuste et pérenne, indépendante du format attendu pour l'EdD. La mise à jour d'une analyse de risque demandera beaucoup moins d'effort que sa réalisation initiale, pour des résultats toujours plus précis, les incertitudes tendant à diminuer grâce à de nouvelles données sur les ouvrages et des progrès dans les méthodes de réalisation des différentes études élémentaires. L'analyse de risque des systèmes endigués est donc un outil de connaissance, d'aide à la décision, mais également un investissement sur le long terme.

Lorsqu'on parle d'analyse de risque, il ne faut pas négliger la notion d'incertitudes. D'une part, le risque est lui-même lié à une incertitude sur les événements qui peuvent se produire ; mais d'autre part, la réalisation d'une analyse de risque est largement accompagnée d'incertitudes, dans les données d'entrée et de sortie, y compris intermédiaires, et dans les méthodes utilisées pour les différentes études élémentaires. L'affichage de ces incertitudes, qui fait partie intégrante des résultats d'une analyse de risque, est un critère à ne pas oublier pour l'aide à la décision.

Avec nos travaux, nous espérons avoir jeté des bases solides pour l'application d'une discipline pour laquelle, nous en avons conscience, de nombreux développements scientifiques ou méthodologiques sont encore nécessaires. Une future édition de ce guide intégrera probablement plus de méthodes spécifiques de réalisation de certaines études élémentaires, mais également des développements plus approfondis de la partie III, une doctrine de réalisation des EdD devant se construire avec l'application du nouveau cadre réglementaire. Néanmoins, le défi relevé lors de la réalisation des premières EdD en l'absence de méthodologie est désormais plus abordable pour la nouvelle formule de ces études réglementaires : les lacunes qui demeurent dans les connaissances spécifiques aux ouvrages ou génériques liées à des besoins de recherche ne doivent pas empêcher de produire des résultats utiles aux gestionnaires de systèmes d'endiguement et plus largement à toutes les parties prenantes des territoires protégés contre les inondations.

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

---

ACB	Analyse coût/bénéfice
AEP	Alimentation en eau potable
AMDE	Analyse des modes de défaillance et de leurs effets
AMO	Assistance à maîtrise d'ouvrage
ARIA	Analyse, recherche et information sur les accidents
ASAE	Association suisse pour l'aménagement des eaux
BASIAS	Base nationale des anciens sites industriels et activités de service
BDHI	Base de données historiques sur les inondations
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
BSS	Banque de données du sous-sol
CCTP	Cahier des clauses techniques particulières
CEPRI	Centre européen de prévention de risque d'inondation
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CFBR	Comité français des barrages et réservoirs
CIGB	Commission internationale des grands barrages
CIPC	Commission pour la protection contre les crues
CNR	Compagnie nationale du Rhône
CR	Compte rendu
CTPB(OH)	Comité technique permanent des barrages (ouvrages hydrauliques)
DDT	Direction départementale des territoires
DETL	Département des études et travaux de Loire
DGFIP	Direction générale des Finances publiques
DGPR	Direction générale de la prévention des risques
DGPS	Differential global positioning system
DICT	Déclaration d'intention de commencement de travaux
DIG	Déclaration d'intérêt général
DIREN	Direction régionale de l'environnement
DPF	Domaine public fluvial
DREAL	Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement
DUP	Déclaration d'utilité publique
EdD	Étude de dangers
EISH	Événement important pour la sûreté hydraulique.
ELS	État limite en service
ELU	État limite ultime
EPAGE	Établissement public d'aménagement et de gestion des eaux
EPCI	Établissement public de coopération intercommunale
EPCI-FP	Établissement public de coopération intercommunale à fiscalité propre
EPTB	Établissement public territorial de bassin
ERC	Événement redouté central
ERP	Établissement recevant du public
ETC	Examen technique complet

GEMAPI	Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations (loi du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique crée une compétence ciblée et obligatoire relative à la gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations, et l'attribue aux communes et à leurs groupements)
GPS	Global positioning system
ICPE	Installation classée pour la protection de l'environnement
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
ILH	International levee handbook
Ineris	Institut national de l'environnement industriel et des risques
Insee	Institut national de la statistique et des études économiques
Irstea	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
ISP	Intéressant la sécurité publique
LENE	Loi d'engagement national pour l'environnement
Lidar	Light detection and ranging (technique de mesure à distance fondée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé vers son émetteur, notamment utilisée pour réaliser des mesures topographiques)
LRPC	Laboratoire régional des ponts et chaussées
MAPTAM	Modernisation de l'action publique territoriale et affirmation des métropoles
MEDAD	Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'aménagement durables
MEEDDAT	Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire
MEEDDM	Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer
MISE	Mission interservice de l'eau
MNE	Modèle numérique d'élévation
MNT	Modèle numérique de terrain
ND	Niveau de danger
NGF	Nivellement général de la France
NMM	Niveau moyen de la mer
NP	Niveau de protection
NPA	Niveau de protection apparent
NS	Niveau de sûreté
NSP	Niveau de sécurité des personnes
ONF	Office national des forêts
ORSEC	Organisation de la réponse de sécurité civile (initialement « Organisation des secours »)
PAPI	Programme d'actions de prévention des inondations
PCS	Plan communal de sauvegarde
PHEC	Plus hautes eaux connues
PK	Point kilométrique
PPI	Plan particulier d'intervention
PPR	Plan de prévention des risques
PPRI	Plan de prévention des risques d'inondation
PPRN	Plan de prévention des risques naturels
PSH	Précurseur pour la sûreté hydraulique

PSR	Plan submersions rapides
RD	Rive droite
RDS	Revue de sûreté
REX	Retour d'expérience
RTM	Restauration des terrains en montagne
SCSOH	Service de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques
SGS	Système de gestion de la sécurité
SHOM	Service hydrographique et océanographique de la marine
SIG	Système d'information géographique
SIRS	Système d'information à référence spatiale
SPC	Service de prévision des crues
SPR	Modèle « source, pathway, receptors »
TRI	Territoires à risques importants d'inondation
VNF	Voies navigables de France
VTA	Visite technique approfondie
y/c	Y compris
ZP	Zone protégée



## BIBLIOGRAPHIE

---

1. « AFN 96 » Afnor « XP ENV 1991-1 avril 1996 », Eurocode 1 « Bases de calcul et actions sur les structures » et Document d'application nationale, 1996.
2. Béguin R. (2011). Étude multi-échelle de l'érosion de contact au sein des ouvrages hydrauliques en terre. Sciences de la Terre. Université de Grenoble.
3. Boncompain I. (2011). Accidentologie des ouvrages hydrauliques RTM et retour d'expériences, Rapport établi par l'ONF/RTM à la demande du ministère en charge de l'Écologie (convention SU 0007323 d'avril 2010).
4. Bonelli S. (coord.). (2012). Érosion des géomatériaux érosion interne et de surface. Traité MIM série Risques naturels, Hermès Science Publication, 2012, 400 p.
5. Centre européen de prévention du risque inondation (CEPRI). (2011). L'ACB (analyse coût/bénéfice) : une aide à la décision au service de la gestion des inondations Guide à l'usage des maîtres d'ouvrage et de leurs partenaires, Edition CEPRI, 44 p.
6. 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, CEPRI.
7. CFBR. (2015). Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai, CFBR, 132 p.
8. Christin N., Peinturier C., Magnier C. (2014). Analyse multicritères des projets de prévention des inondations. Guide méthodologique, Collection « Références » du Commissariat général au développement durable (CGDD).
9. Ciria, MEDE (ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie), USACE (US Army Corps of Engineers). (2013). International Levee Handbook (ILH), Ciria, 2013.
10. Commission internationale des grands barrages (2005), Évaluation du risque dans la gestion de la sécurité du barrage – Examen des bénéfices, des méthodes et des dernières applications. Bulletin 130, 281 p.
11. Costa S., Perherin C. (2015). Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral. Cahier technique. CEREMA, Collection connaissances, 70 p.
12. Degoutte G. (2012). Diagnostic, aménagement et gestion des rivières – Hydraulique et morphologie fluviales appliquées, 2<sup>e</sup> édition. TEC&DOC, Lavoisier, Paris, 542 p.
13. Degoutte G. (coord.). (2012). Les déversoirs sur digues fluviales, QUAE, 184 p.
14. Degoutte G., Royet P., (1999, 2009, rééd.). Aide-mémoire de mécanique des sols, Les publications de l'ENGREF, 96 p.
15. Deroo L., Fry J.J. (2013). Recommandations ERINOH (volume 3) : maîtrise de l'érosion interne. 2<sup>e</sup> colloque national – Dignes, MEDDTL/CFBR/Irstea, Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions, Aix-en-Provence, pp. 298-307.
16. Fauchard C., Mériaux P. (2007). Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues, Cemagref, 124 p.
17. Félix H., Beullac B., Tourment R., Mériaux P., Peyras L. (2011). Méthodologie pour l'analyse fonctionnelle des ouvrages hydrauliques à grand linéaire, CFBR/AFEID Études de dangers, 22 p.
18. FLOODPROBE work package 3 : 3.1 érosion interne, résistance à l'érosion externe par végétation, transitions ; 3.2 Levé Lidar et géophysique ; 3.3 Diagnostics et SIG. Documentation disponible en ligne : <http://www.floodprobe.eu/project-documents.asp> et <http://www.floodprobe.eu/project-outputs.asp>
19. Gautier J.N. (2001). Étude Loire moyenne, Synthèse des connaissances hydrologiques. Équipe pluridisciplinaire plan Loire grandeur nature, 39 p.
20. Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies, <http://www.floodsite.net/>.
21. Ledoux P., Tourment R. (2010). Note du PATOUH (Pôle d'appui technique aux services de police de l'eau dans le domaine de la sécurité des ouvrages hydrauliques) pour l'application du décret du 11 décembre 2007 aux digues de protection contre les submersions marines (Détermination de la hauteur et de la zone protégée), CETE Méditerranée/Cemagref Aix-en-Provence, 12 p.



22. Ledoux P., Tourment R., Degoutte G. (2009). Détermination de la hauteur et de la zone protégée d'une digue en vue de son classement pour l'application du décret du 11 décembre 2007, CETE Méditerranée/Cemagref Aix-en-Provence, Pôle d'appui technique aux services de police de l'eau dans le domaine de la sécurité des ouvrages hydrauliques (PATOUH). 14 p.
23. Mallet T., Degoutte G., Royet P. (2013). Niveaux de protection, de sûreté et de danger pour les digues fluviales : définitions, conséquences et responsabilités. 2<sup>e</sup> colloque national – Dignes, MEDDTL/CFBR/Irstea, Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions, Aix-en-Provence, pp. 42-50.
24. Maurel P., Serre D., Tourment R. (2004). Towards a generic GIS for Dike management in flood plain areas : from conceptual design to real applications. In : AGILE 2004 Conf on Geographic Information Science. Heraklion : Crete University Press.
25. Maurel P., Tourment R., Romac A., Pinhas M. (2004). Le SIRS digue, un système d'information pour les gestionnaires locaux de digue, cas du Symadrem et de l'AD-Isère-Drac-Romanche, Colloque technique CFGB MEDD, Sécurité des digues fluviales et de navigation, Orléans.
26. Maurin J., Boulay A., Ferreira P., Tourment R., Beullac B. (2013). Études de dangers des digues de classe A de la Loire et de ses affluents – retour d'expérience. 2<sup>e</sup> colloque national – Dignes, MEDDTL/CFBR/Irstea, Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions, Aix-en-Provence, pp. 158-163.
27. Maurin J., Boulay A., Piney S., Le Barbu E., Tourment R. (2012). Les brèches des levées de la Loire : brèche de Jargeau 1856. Congrès SHF Événements extrêmes fluviaux et maritimes, Paris, 8 p.
28. Mazas F., Hamm L. (2011). Niveaux marins extrêmes en France : état des lieux. La Houille Blanche, n° 5, pp. 5-11.
29. Mériaux P., Monier T., Tourment R., Mallet T., Palma Lopes S., Maurin J., Pinhas M. (2012). L'auscultation des digues de protection contre les inondations : un concept encore à inventer. Colloque CFBR : « Auscultation des barrages et des digues – Pratiques et perspectives », Chambéry, 17 p.
30. Mériaux P., Richard D., Félix H., Laigle D., Bon M., Astier G., Boncompain I., Quefféléan Y. (2013). Étude de dangers des digues de protection contre les crues torrentielles : présentation du cas de l'EdD des digues du torrent de La Salle, recommandations et perspectives. 2<sup>e</sup> colloque national – Dignes, MEDDTL/CFBR/Irstea, Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions, Aix-en-Provence, pp. 164-175.
31. Mériaux P., Royet P., Folton C. (2004). Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires – Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations, Cemagref.
32. Mériaux P., Royet P., Lino M. (2000). Méthodologie de diagnostic des digues appliquée aux levées de la Loire moyenne. Cemagref, 224 p.
33. Miche E., Perinet R. (2009). Maîtrise des risques accidentels par les dispositions technologiques et organisationnelles – DRA 77 – Démarche d'évaluation des barrières humaines de sécurité – Ω 20. Direction des risques accidentels, rapport d'étude Ineris n° DRA-09-103041-06026B, 51 p.
34. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer. (2010). La gestion du trait de côte, QUAE, 304 p.
35. Ministère de la Transition écologique et solidaire, Prévention des risques majeurs, <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/prevention-des-risques-majeurs>
36. Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, CEPRI, CEREMA. (2016). Référentiel national de vulnérabilité aux inondations, 176 p.
37. Mortureux Y. (2002). Arbres de défaillance, des causes et d'événement. In : Techniques de l'ingénieur. n° SE 4050, Paris, 24 p.
38. Paquier A. (2015). Comparison of three methods assessing the inundation caused by the erosion of an embankment, La Houille Blanche, n° 4, pp. 32-38.
39. Peyras L. (2003). Diagnostic et analyse de risques des barrages – Développement de méthodes d'aide à l'expertise, Thèse de doctorat spécialité génie civil, Université Blaise Pascal – Clermont II, 199 p.
40. Poulain D., Tourment R. (coord.). (2015). Référentiel technique digues maritimes et fluviales, MEDD – DGPR, Paris, 191 p.

41. Recking A., Richard D., Degoutte G. (2013). Torrents et rivières de montagne – Dynamique et aménagement, Quae, 334 p.
42. Royet P., Degoutte G., Peyras L., Lavabre J., Lemprière F. (2009). Cotes et crues de protection, de sûreté et danger de rupture. Colloque CFBR-SHF « Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues ».
43. Sergent P., Prévot G., Mattarolo G., Luck M., Brossard J., Nguyen D.T., Morel G., Mar N.F., Benoit M., Ropert F., Guillou N., Bouttes F., Kergadallan X., Trichet J.-J., Delisle J.-R., Menon J.-M., Mallet P., Voyneau N., Lam M., Le Banner G. (2013). Projet Sao Polo. Adaptation des structures côtières au changement climatique. 2<sup>e</sup> colloque national – Dignes, MEDDTL/CFBR/Irstea, Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions, Aix-en-Provence, pp. 113-121.
44. Simm J., Wallis M., Smith P., Tourment R., Veylon G., Deniaud Y., Durand E., McVicker J., Hersh-Burdick R. (2012). The significance of failure modes in the design and management of levees-a perspective from the International Levee Handbook team. 2nd European conference on Flood Risk Management, FLOODrisk2012, Rotterdam, 9 p.
45. Tacnet J.M., Gotteland P., Bernard A., Mathieu G., Deymier C. (2000). Mesures des caractéristiques géotechniques des sols grossiers – Application aux sols de torrent, Actes du colloque international Interpraevent – Villach, pp. 307-320.
46. Tourment R., Beullac B., Degoutte G. (2015). Études de dangers des systèmes de protection contre les inondations : une méthode d'analyse de la défaillance, La Houille Blanche, n° 1, pp. 41-55.
47. Tourment R., Beullac B., Deniaud Y., Simm J., Wallis M., Sharp M., Pohl R., van Hemert H. (2013). De l'EdD des digues en France aux travaux de l'ILH sur les mécanismes élémentaires et les scénarios de défaillance. 2<sup>e</sup> colloque national – Dignes, MEDDTL/CFBR/Irstea, Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions, Aix-en-Provence, pp. 288-297.
48. Vennetier M., Mériaux P., Zanetti C. (2015). Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai. Co-édition Irstea Aix en Provence – Cardère, 2015, 229 p.
49. Vuillet M. (2012). Élaboration d'un modèle d'aide à la décision basé sur une approche probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues fluviales. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, École doctorale Ville, transport et Territoires.



# GLOSSAIRE

---

## Thèmes et termes associés

### Analyse de risque et diagnostic

Analyse de risque  
Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)  
Analyse fonctionnelle  
Barrière de sécurité  
Composant  
Composant de digue  
Défaillance  
Dégradation (d'une fonction)  
Détérioration (d'un composant)  
Diagnostic  
Dommage  
Durabilité  
Enjeux  
Fonction  
Fonction contrainte  
Fonction de sécurité  
Fonction principale  
Fonction technique  
Granularité  
Indicateur de performance  
Indicateur/Indicateur d'état  
Ligne de défense (de protection) principale  
Milieux extérieurs  
Mode de défaillance  
Niveau de danger  
Niveau de protection apparent  
Niveau de protection  
Niveau de sécurité des personnes  
Niveau de sûreté  
Objectif de protection  
Ouvrages de protection contre les inondations  
Ouvrages secondaires  
Performance  
Protection contre les inondations  
Protection indirecte  
Protection secondaire  
Rôle (d'un ouvrage)  
Scénario  
Scénario de défaillance  
Système d'endiguement  
Système de protection contre les inondations  
Système endigué  
Tronçon de digue  
Vocation (d'un ouvrage)  
Zone protégée

<p><b>Concepts généraux</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aide à la décision</li> <li>Amont</li> <li>Analyse de risque</li> <li>Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)</li> <li>Analyse fonctionnelle</li> <li>Aval</li> <li>Barrage</li> <li>Confortement</li> <li>Crue</li> <li>Crue torrentielle</li> <li>Défense contre les inondations</li> <li>Diagnostic</li> <li>Entretien/Maintenance</li> <li>Géotechnique</li> <li>Hydraulique</li> <li>Hydrogramme</li> <li>Hydrologie</li> <li>Inondation</li> <li>Limnigramme</li> <li>Marégramme</li> <li>Morphodynamique</li> <li>Niveau</li> <li>Performance</li> <li>Plan communal de sauvegarde</li> <li>Plan de prévention des risques</li> <li>Prévention des inondations</li> <li>Protection</li> <li>Protection contre les inondations</li> <li>Renforcement</li> <li>Résilience (d'un système)</li> <li>Risque</li> <li>SIRS digues</li> <li>Sol</li> <li>Sûreté de fonctionnement</li> </ul>
---------------------------------	--

<p><b>Environnement des systèmes de protection</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bande active</li> <li>Barrage</li> <li>Bassin-versant</li> <li>Berge</li> <li>Casier</li> <li>Chevrette</li> <li>Duit ou Dhuit</li> <li>Embâcle</li> <li>Enjeux</li> <li>Épi</li> <li>Estuaire</li> <li>Étendue d'eau</li> <li>Franc-bord</li> <li>Karst</li> <li>Lit majeur</li> <li>Lit mineur</li> <li>Lit vif</li> <li>Milieux extérieurs</li> <li>Rivière</li> <li>Rivière torrentielle</li> <li>Sédiments</li> <li>Ségonnal (ou ségonal)</li> <li>Seuil</li> <li>Sol</li> <li>Substratum</li> <li>Torrent</li> <li>Val</li> <li>Zone protégée</li> </ul>
--	---

<p><b>Phénomènes physiques</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Action</li> <li>Affouillement (mécanisme)</li> <li>Brèche</li> <li>Brèche partielle</li> <li>Brèche totale</li> <li>Charriage</li> <li>Crue</li> <li>Crue torrentielle</li> <li>Désordre</li> <li>Drainage</li> <li>Écrêtement des crues</li> <li>Effondrement (mécanisme)</li> <li>Effondrement karstique</li> <li>Embâcle</li> <li>Érosion (mécanisme)</li> <li>Érosion concentrée ou érosion de trou</li> <li>Érosion de contact</li> <li>Érosion externe (mécanisme)</li> <li>Érosion interne (mécanisme)</li> <li>Érosion interne régressive</li> <li>Érosion par surverse ou franchissement (mécanisme)</li> <li>Étanchéité</li> <li>Filtration</li> <li>Fissure</li> <li>Fontis</li> <li>Fosse d'érosion</li> <li>Franchissement</li> <li>Glissement (mécanisme)</li> <li>Glissement de talus (mécanisme)</li> <li>Incision</li> <li>Infiltration</li> <li>Inondation</li> <li>Karstification (mécanisme)</li> <li>Lave torrentielle</li> <li>Mécanisme</li> <li>Ralentissement dynamique des crues</li> <li>Rupture (de digue)</li> <li>Sollicitation</li> <li>Soulèvement hydraulique</li> <li>Soutènement</li> <li>Stabilité</li> <li>Suffusion (mécanisme)</li> <li>Surverse</li> <li>Tassement (mécanisme)</li> </ul>
<p><b>Réglementation ouvrages hydrauliques</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aménagement hydraulique</li> <li>Étude de dangers</li> <li>Niveau de protection</li> <li>Système d'endiguement</li> <li>Zone protégée</li> </ul>

<b>Risque</b>	Acceptation du risque Accident Aléa Analyse de risque Barrière de sécurité Danger Dommages Effets dominos Enjeux Estimation du risque Évaluation du risque Événement initiateur Événement redouté central Gravité Phénomène dangereux ou redouté Potentiel de danger Résilience (d'un système) Risque Risque résiduel Scénario d'accident (majeur) Vulnérabilité (des enjeux)
---------------	---

<b>Systèmes de protection et composants</b>	Banquette Batardeau Bouchure Clapet antiretour Corps de digue Crête de digue Déversoir Déversoir fusible Digue Digue résistante à la surverse Drain Écran étanche Enrochement Épi Filtre Fines Fondation Fruit Levée Muret Organe Palplanche Parafouille Parement Pente Perré Pieu PK (PM) Revanche Reversoir Risberme Sol Tertre Vanne
---	--



## Termes et définitions associées

**Acceptation du risque** : « *Décision d'accepter un risque* ». L'acceptation du risque dépend des critères de risques retenus par la personne qui prend la décision (ISO/CEI 73) (Ineris – Glossaire grand public, 2004). *Voir aussi Gravité.*

**Accident** : Événement non désiré (une inondation par exemple) qui entraîne des conséquences dommageables vis-à-vis des personnes, des biens ou de l'environnement.

**Action** : Désigne l'ensemble des phénomènes externes pouvant provoquer des mouvements ou des déformations sur un ouvrage. Il rassemble les notions de force et de moment utilisées en mécanique générale. Selon les eurocodes, le terme action désigne :

- l'ensemble de forces (charges) appliquées à la structure (action directe) ;
- l'ensemble de déformations ou accélérations imposées, résultant par exemple de changements de température, de variations du taux d'humidité, de tassements différentiels ou de tremblements de terre (action indirecte).

Les actions peuvent être permanentes, variables, ou accidentelles. Ne pas confondre avec « **sollicitation** » (*voir ce terme*).

**Affouillement (mécanisme)** : Phénomène d'**érosion externe** (*voir ce terme*) dû aux actions hydrodynamiques des écoulements turbulents au contact des ouvrages ou des berges. Se manifeste le plus souvent à proximité de la ligne d'eau habituelle. Il est aggravé et plus aléatoire lors des événements (crues, tempêtes ; etc.) rares à extrêmes (effet des embâcles, du transport solide, etc.).

**Aide à la décision** : Activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à recommander, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels ces intervenants se trouvent placés d'autre part (Roy et al., 1993).

**Aléa** : L'aléa traduit, en un point donné, la probabilité d'occurrence d'un phénomène naturel ou technologique de nature et d'intensité définies. L'aléa est donc l'expression du couple (Probabilité d'occurrence × Intensité des effets). Par exemple, pour un système endigué, l'aléa correspond à l'inondation de la zone protégée, de probabilité et de caractéristiques données (vitesses et hauteurs d'eau, surface, cinétique, durée). Cet aléa résulte d'un événement de sollicitation rare à extrême et de la défaillance ou du dépassement du système endigué.

**Aménagement hydraulique** : Au sens du décret n° 2015-526 du 12 mai 2015, ensemble d'ouvrages (barrages écrêteurs, bassins de stockage, etc.) qui permettent soit de stocker provisoirement des écoulements provenant d'un bassin, sous-bassin ou groupement de sous-bassins hydrographiques, soit le ressuyage des venues d'eaux en provenance de la mer (les franchissements).

**Amont** : Relatif au cours d'eau, dans la direction de la source. S'applique au parement (ou talus) côté amont d'un barrage, ne s'applique pas au parement (ou talus) côté du cours d'eau d'une digue de protection.

**Analyse de risque** : C'est l'objet des méthodes qui permettent l'estimation du risque, c'est-à-dire l'estimation de la probabilité de survenance d'un événement potentiellement dommageable et de ses conséquences. L'analyse de risque, qui consiste en une analyse des faits ou des situations, prépare à l'évaluation des risques. *Voir également les termes*

**Estimation du risque et Évaluation du risque.** L'analyse de risque doit répondre aux trois questions suivantes (Kaplan, 1997) :

- qu'est-ce qui peut conduire à des situations de danger ?
- quelles sont les chances que ces situations se produisent ?
- si elles se produisent, à quelles conséquences doit-on s'attendre ?

**Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) :** Méthode inductive d'analyse de systèmes utilisée pour l'étude systématique des causes et effets des défaillances qui peuvent affecter les composants de ce système (NF X60-510, CEI 812-1985, norme MIL-STD 1629A).

**Analyse fonctionnelle :** Démarche qui consiste à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions d'un système (Afnor, 1996).

**Aval :** Relatif au cours d'eau, dans la direction de l'embouchure. S'applique au parement (ou talus) côté aval d'un barrage, ne s'applique pas au parement (ou talus) côté zone protégée d'une digue de protection.

**Bande active :** Terme utilisé en géomorphologie fluviale. Il correspond à la zone non végétalisée du lit de la rivière qui permet l'écoulement de l'eau. Il comprend les chenaux et les bancs fréquemment remaniés lors des crues.

**Banquette :** Ouvrage de rehausse étroit au-dessus du corps de la digue, constitué d'un merlon de terre ou parfois d'un muret en maçonnerie. Terminologie en usage dans la région de la Loire. Les banquettes sont souvent situées en limite de crête, côté du cours d'eau, parfois aussi du côté de la zone protégée, ou parfois encore des deux côtés.

**Barrage :** Ouvrage destiné à stocker un volume d'eau et qui barre un lit majeur. Les barrages sont à distinguer des seuils en rivière, ouvrages destinés à relever la ligne d'eau et qui barrent le lit mineur. Les barrages sont principalement en terre, en enrochements, en maçonnerie ou en béton. Parfois, les barrages en terre sont aussi qualifiés de « digues ». C'est une erreur, un barrage est transversal à la rivière et barre les lits mineur et majeur et souvent au-delà. Il est destiné à stocker un volume d'eau. Une digue fluviale est construite dans le lit majeur, généralement en position longitudinale, latéralement par rapport au lit mineur, et est destinée à s'opposer à la venue d'eau dans une zone à protéger. *Voir* aussi **Digue**.

**Barrière de sécurité :** Éléments qui ont pour objectif d'assurer des fonctions de sécurité pour améliorer la sécurité du système et fiabiliser son bon fonctionnement. Les barrières de sécurité peuvent correspondre à des dispositifs techniques autonomes (barrières techniques), à des mesures purement organisationnelles (barrières humaines), ou plus généralement à des combinaisons des deux (barrières mixtes).

**Bassin-versant :** Ensemble de la surface où l'eau de pluie circule ou s'infiltrate naturellement vers une même rivière ou nappe d'eau souterraine.

**Batardeau :**

1. Pièce de bois (ou parfois métallique), que l'on glisse dans des rainures prévues à cet effet, permettant d'obturer des zones plus basses en crête de digue, zones où sont aménagés des traversées ou des accès au fleuve ou à la mer (portes, escaliers, cales, etc.).
2. Ouvrage de retenue provisoire, destiné à protéger un chantier des venues d'eau.

**Berge :** Talus plus ou moins incliné qui sépare le lit mineur du lit majeur (ou éventuellement de la fondation de la digue).

**Bouchure :** Fermeture d'une ouverture dans une digue ou un mur (banquette) par la pose de **batardeaux**. Terminologie en usage dans la région de la Loire.

**Brèche** : Ouverture accidentelle à travers le corps de la digue (d'un parement à un autre) ; la digue ne remplit plus son office.

**Brèche partielle** : Brèche sur une partie seulement de la hauteur de la digue (partie supérieure ou large conduit traversant).

**Brèche totale** : Brèche sur toute la hauteur de la digue. Une brèche totale peut être complétée par une **fosse d'érosion**.

**Casier** : Espace ceinturé par une frontière plus ou moins continue et fermée, susceptible de se remplir d'eau (surverse, brèche, franchissements). Cette frontière peut être constituée par des digues, par d'autres remblais surélevés et par des éléments de relief naturel. Les casiers ont tendance à favoriser le stockage de l'eau et à entraver les écoulements (sauf au cours de la mise en eau du casier, puis de sa vidange). Ils communiquent avec d'autres casiers, avec le cours d'eau ou avec la mer, par des écoulements de type déversements, orifices, siphons, etc.

**Charriage** : Les matériaux granulaires transportés par charriage se déplacent sur le fond en roulant, en glissant ou en effectuant des bonds successifs. Les grains charriés se déplacent à une vitesse nettement inférieure à celle de l'eau.

**Chevrette** : Ouvrage de navigation (petite digue submersible) édifié dans le lit mineur, parallèlement ou obliquement à l'écoulement. Il est en général ancré en berge ; variante de « **duit** ».

**Clapet antiretour** : Appareillage sur une conduite ou un ouvrage autorisant le passage de l'eau dans un seul sens.

**Composant** : Élément matériel ou ensemble matériel remplissant une fonction particulière dans un système ou un sous-système (Zwingelstein, 1996).

**Composant de digue** : Élément remplissant une fonction particulière au sein d'un tronçon de digue : organe d'étanchéité, organe de drainage, filtre, protection, corps de digue, etc.

**Confortement** : *Voir Renforcement.*

**Corps de digue** : Composant incontournable qui mobilise les volumes les plus importants. Il est très souvent constitué de matériaux prélevés à proximité immédiate du site (argile, limon, sable, graves, etc.). Son rôle est d'assurer la stabilité propre de la digue. Les propriétés géotechniques et hydrauliques du matériau constitutif du corps de digue influencent considérablement la conception de la digue et sa composition en composants. Dans certains cas, quand les matériaux constitutifs sont peu perméables, le corps de digue peut jouer un rôle d'étanchéité.

**Crête de digue** : Surface de la partie supérieure, sub-horizontale de la digue (par extension la couche de couverture, qui peut être, ou non, carrossable).

**Crue** : Élévation du niveau d'un cours d'eau résultant de l'arrivée d'une grande quantité d'eau par suite de précipitations ou de fonte des neiges ou des deus, dans le bassin-versant. Une crue peut aussi avoir une cause moins naturelle, comme dans le cas d'une rupture de barrage ou de manœuvre intempestive d'une vanne. Toutes les crues ne provoquent pas d'inondation (si elles ne sont pas débordantes) et toutes les inondations ne sont pas provoquées par des crues. Mais, lorsque crue et inondation affectent toutes deux un territoire, la crue est la cause, l'inondation est la conséquence. On distingue classiquement les crues lentes qui affectent des cours d'eau importants aux vastes bassins-versants, et les crues rapides, provoquées par des pluies très violentes et localisées. Dans certains cas, la crue peut être causée depuis l'aval (crue de remous

d'un affluent, montée du niveau d'un fleuve côtier ou d'un estuaire due à un niveau marin élevé).

**Crue torrentielle** : Crue à fort transport solide. Concerne les **torrents** et **rivières torrentielles** (*voir* ces termes), éventuellement les thalwegs en zone montagneuse. Ne pas confondre avec crue soudaine ou crue-éclair.

**Danger** : Propriété intrinsèque d'une substance dangereuse ou d'une situation physique de pouvoir provoquer des dommages pour la santé humaine et/ou l'environnement [Directive n° 96/82 du 9 décembre 1996]. Pour les systèmes endigués : la potentielle libération d'eau liée à la défaillance du système de protection et sa capacité à produire des dommages dans la zone protégée.

**Défaillance** : Cessation de l'aptitude d'une unité fonctionnelle à accomplir une fonction requise ou à fonctionner comme prévu (NF EN 61508). Altération ou cessation de l'aptitude d'un système à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques (Afnor, 2001).

**Défense contre les inondations** : *Voir Protection contre les inondations.*

**Dégradation (d'une fonction)** : Catégorie de perte de performance, correspondant à une diminution de la performance d'une fonction, restant néanmoins supérieure au seuil fonctionnel (Cremona, 2002).

**Désordre** : Signe (observable ou quantifiable) d'une détérioration de l'état initial d'un ouvrage, ou de l'un de ses composants.

**Détérioration (d'un composant)** : État dégradé ou comportement defectueux d'un ouvrage (ou composant) du point de vue de sa sécurité et de performances (ICOLD, 1983).

**Déversoir** : D'une manière générale, organe intégré à un ouvrage hydraulique, dont le radier est calé à une cote inférieure à celle de la crête de l'ouvrage, et par-dessus lequel l'eau s'écoule sans dommages, en situation ordinaire ou à partir d'un certain niveau de crue. Dans le cas des digues, il s'agit d'un tronçon résistant à la surverse pouvant servir à réduire :

- le risque de défaillance du système d'endiguement en réduisant la charge hydraulique et la fréquence des débordements sur d'autres parties de l'ouvrage ;
- le risque dans la zone protégée potentielle par la maîtrise des entrées d'eau et des écoulements dans celle-ci.

**Déversoir fusible** : Déversoir ou partie de déversoir qui est censé s'effacer sous l'action de l'eau ; on distingue les cordons fusibles en terre ou en graviers qui s'effacent par érosion (par surverse ou interne), les plaques de béton maintenues par un cordon de gravier et qui basculent lorsque le déversement érode le cordon, et enfin les hausses fusibles qui basculent sous l'effet de la poussée de l'eau.

**Diagnostic** : Identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test (Afnor, CEI).

**Digue** : Ouvrage dont la longueur est grande devant les autres dimensions, surélevé par rapport au terrain naturel et destiné à faire obstacle au passage de l'eau (digue de protection contre les inondations de cours d'eau ou contre les submersions marines) ou à la canaliser (canal de navigation, production d'hydroélectricité ou navigation fluviale). Le corps de digue et la fondation qui le supporte sont les deux principaux composants de la digue (en volume).

**Digue résistante à la surverse :** Digue (ou tronçon de digue) dont la pérennité n'est pas affectée par des déversements. Ce peut être une digue en béton ou en maçonnerie. Ce peut aussi être une digue en terre caparaçonnée, c'est-à-dire revêtue d'un matériau qui résiste au passage de l'eau, par exemple un perré en pierres maçonnées ou des enrochements bétonnés. Dans les deux cas, le terrain situé au pied de la digue côté zone protégée doit résister à l'érosion, soit par sa nature (rocher) soit par prolongement du revêtement, soit par aménagement spécifique.

**Domage :** Blessure physique ou atteinte à la santé des personnes ou atteinte aux biens ou à l'environnement (NF EN 61508).

**Drain :** Permet, dans une digue, d'intercepter et d'évacuer l'eau infiltrée dans le corps d'ouvrage ou sa fondation lors d'une crue (ou autre événement de mise en charge) de façon à en canaliser l'écoulement. Un drain peut être composé d'un matériau granulaire perméable ou d'un géocomposite de drainage. Un drain est généralement associé à un (ou à plusieurs) **filtre(s)**, ayant pour rôle d'empêcher la migration des particules fines. La structure de la digue est ainsi préservée (*voir Érosion interne*).

**Drainage :** Contrôle de l'écoulement de l'eau dans le sol, en captant les eaux en excès en vue de leur évacuation plus en aval.

**Duit ou Dhuit :** Ouvrage de navigation (petite digue submersible) édifié dans le lit mineur, parallèlement à l'écoulement souvent formé de pieux et d'enrochement ; variante de « chevrette ».

**Durabilité :** Aptitude d'une entité (système, ouvrage, composant, etc.) à accomplir une (des) fonction(s) requise(s) dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à ce qu'un (des) état(s) limite(s) soit (soient) atteint(s) (Afnor, 1988).

**Écran étanche :** Élément ou ensemble d'éléments mis en place dans la digue en couche mince pour empêcher ou limiter les circulations d'eau au travers du corps de digue et/ou de sa fondation. Il existe différents types d'écrans : palplanche, paroi moulée, mélange en place, etc.

**Écrêtement des crues :** Phénomène qui réduit le débit maximal de la crue soit par inondation d'espaces naturels en lit majeur (zone d'expansion de crues), soit par dérivation d'une partie de l'eau pour la diriger vers une retenue (barrage ou bassin).

**Effet domino :** Action d'un phénomène dangereux affectant une ou plusieurs installations d'un établissement qui pourrait déclencher un autre phénomène sur une installation ou un établissement voisin, conduisant à une aggravation générale des effets du premier phénomène (Effet domino = « accident » induit par un « accident »). Pour les systèmes endigués : effet d'une inondation sur des éléments de la zone protégée qui peut déclencher la réalisation d'un nouveau phénomène dangereux directement associé à l'élément impacté par l'inondation. Exemple : arrivée d'eau dans une station d'épuration, transport des eaux souillées et pollution d'un captage en eau dans la zone protégée qui alimente des populations en dehors de la zone protégée.

**Effondrement (mécanisme) :** Mouvement d'une masse de terrain plutôt verticale ou en surplomb qui s'effondre brutalement sous son propre poids. Il peut se produire à la suite d'un affouillement du pied de la digue ou en présence de vide dans la digue ou la fondation (fontis).

**Effondrement karstique :** Effondrement dû à la dissolution chimique de roches sédimentaires (karsts), à l'origine de vides dans la fondation.

**Embâcle :** Amoncellement d'objets flottants (arbres, blocs de glace, déchets, etc.) emportés par le courant puis bloqués dans une portion du lit mineur ou du lit majeur

(en cas de débordement). L'embâcle peut barrer tout ou partie du lit. On en rencontre dans les tronçons courants de rivière et également de manière privilégiée en amont des ponts ou des seuils à l'occasion des fortes crues. La débâcle est la rupture d'un embâcle.

**Enjeux** : Personnes, biens, systèmes ou autres éléments présents dans les zones de risque et qui sont ainsi soumis à des dommages potentiels (Stratégie internationale de prévention des catastrophes des Nations Unies [UNISDR], Terminologie pour la prévention des risques de catastrophe, 2009).

**Enrochement** : Matériau granulaire de gros diamètre, naturel, utilisé dans les ouvrages de génie civil. Sur les digues, les enrochements sont utilisés, par exemple, pour renforcer la base de la digue (ou pied) contre l'érosion par le cours d'eau et pour casser l'énergie des vagues et protéger l'ouvrage contre l'action de la houle en contexte maritime.

**Entretien/Maintenance** : Toutes les activités destinées à maintenir ou rétablir un système dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise (NF X60-010).

**Épi** : En cours d'eau fluvial ou torrentiel, ouvrage sécant avec la direction du courant permettant d'orienter ce dernier (à des fins de protection contre l'érosion ou de navigation). Dans le cas de la navigation, il peut être placé en lit mineur. Dans le cas de l'érosion, il peut être placé en lit majeur. En contexte maritime, les épis transversaux protègent les plages par arrêt d'une partie du transit littoral, lorsque les mouvements de sable s'effectuent préférentiellement parallèlement au rivage. Ils permettent de cloisonner le littoral en secteurs, dans le but d'y stabiliser la plage.

**Érosion (mécanisme)** : Action d'arrachement et de transport de particules de sol ou de rocher du fait de l'action d'écoulements superficiels ou internes, du vent, des vagues, de la pluie, de la fonte des neiges, des cycles gel dégel et des activités humaines, ou par des mécanismes de glissements de terrain, d'éboulements, d'avalanches, de laves torrentielles. Dans un lit mineur de cours d'eau, l'érosion peut être localisée (érosion de berge dans un coude ou à l'aval d'un seuil, etc.) ou bien elle peut être généralisée (érosion régressive ou progressive).

**Érosion concentrée ou érosion de trou** : Un des mécanismes de la famille « **érosion interne** » (*voir* ce terme).

**Érosion de contact** : Un des mécanismes de la famille « **érosion interne** » (*voir* ce terme).

**Érosion externe (mécanisme)** : Regroupe tous les mécanismes qui provoquent des départs de matériaux sous l'effet des actions s'appliquant à la surface extérieure de la digue ou de sa fondation. Dans le cas des digues, elle a lieu lorsque les matériaux (ou composants) de surface de la digue ou de sa fondation ne sont pas suffisamment résistants pour faire face aux agressions issues de l'environnement. Ces départs de matériaux au long de la vie de l'ouvrage peuvent induire une diminution de la section de la digue, un raidissement des talus et contribuent à saper sa résistance mécanique (stabilité) et à l'érosion interne. Les principales causes d'érosion externe sont les mouvements d'eau directement au contact des digues ou de leur fondation (par exemple, berge proche de la digue). Les actions de l'eau liées au courant, aux vagues et, en moindre mesure, aux marées sont donc les principaux facteurs d'initiation ou d'aggravation de l'érosion externe. Toutefois, le vent, les précipitations, la végétation ligneuse ou encore l'activité animale et humaine peuvent jouer un rôle majeur dans l'apparition du mécanisme d'érosion externe.

**Érosion interne (mécanisme)** : Liée à l'ensemble des processus qui impliquent le détachement et le transport des particules de sol par l'écoulement d'infiltration dans

un barrage une digue, ou sa fondation. Ces processus peuvent aboutir à l'instabilité de l'ouvrage hydraulique. Quatre mécanismes de base sont identifiés dans la définition générale de l'érosion interne :

- érosion régressive : détachement des particules du sol lors de sorties d'infiltration sur une surface non filtrée et menant à la formation régressive de conduits et de sand boils ;
- érosion de trou : détachement de particules de sol selon un chemin préexistant dans le remblai ou la fondation ;
- suffusion : érosion sélective des fines particules à partir de la matrice de particules grossières ;
- érosion du contact : érosion sélective des particules fines en contact avec une couche grossière.

**Érosion interne régressive** : Un des mécanismes de la famille **érosion interne** (*voir* ce terme).

**Érosion par surverse ou franchissement (mécanisme)** : Lorsque la **surverse** ou le **franchissement** (*voir* ces termes) se produit sur une section non prévue à cet effet, elle est un des facteurs d'érosion externe les plus importants et les plus dévastateurs. Le débordement d'eau par-dessus la crête de la digue conduit à des écoulements à forte vitesse sur la crête, le versant aval de la digue (côté zone protégée : val ou terre) et le terrain naturel en pied de digue du même côté. Cet écoulement incontrôlé génère une érosion régressive du talus pouvant rapidement conduire à la brèche. À partir du moment où la crête est érodée sur toute la largeur, le phénomène devient de plus auto-accélérateur. Les franchissements d'une digue par des vagues (que ce soit en milieu fluvial ou marin) conduisent également au même type de résultat, avec un mécanisme plus complexe à analyser, à cause de son intermittence et aussi de phénomènes liés à l'impact et à la turbulence.

**Estimation du risque** : Résultat du processus de quantification des probabilités et des conséquences pour l'ensemble des scénarios de défaillance jugés pertinents dans l'**analyse de risque**, dont elle est la phase finale et l'objet. Ne pas confondre avec « **évaluation du risque** » (*voir* ce terme).

**Estuaire** : Partie terminale plus ou moins évasée d'un fleuve, caractérisée par la prédominance des phénomènes marins sur les phénomènes fluviaux.

**Étanchéité** :

1. Caractère de ce qui est naturellement imperméable (par extension très peu perméable), qui ne laisse pas (par extension très peu) pénétrer ou s'écouler les fluides.
2. Fonction d'un ouvrage hydraulique ou d'un ou de plusieurs de ses composants.

**Étendue d'eau** : Espace naturel de l'écorce terrestre, couvert d'eau tel qu'un océan, une mer, un lac, un cours d'eau, etc.

**Étude de dangers** : À l'origine, concept issu de la sécurité industrielle, développé dans le cadre de la réglementation sur les installations classées pour la protection de l'environnement (décret n° 77-1133 du 21 septembre 1977 pris pour l'application de la loi n° 76-663 relative aux ICPE). Ce type d'étude consiste d'abord à dresser l'inventaire des éléments et dangers intrinsèques associés à l'objet d'étude, puis à analyser les risques qu'ils impliquent (scénarios pouvant aboutir à des événements non souhaités), avant de définir des mesures dont la mise en place peut permettre d'améliorer la maîtrise du risque.

**Évaluation du risque** : Processus de comparaison du risque estimé (*voir* **Estimation du risque**) avec des critères de risque donnés pour déterminer l'importance du risque (ISO/CEI 73). La comparaison peut être menée par rapport à un référentiel préétabli dans l'objectif de permettre la prise de décision vis-à-vis de l'acceptation du risque ou de la nécessité de son traitement. Elle peut considérer le coût, les avantages, les préoccupations



des parties prenantes, et d'autres variables requises selon le cas pour l'évaluation du risque (FD ISO/CEI Guide 73). Ne pas confondre avec « **estimation du risque** ».

**Événement initiateur** : Événement, courant ou anormal, interne ou externe au système, situé en amont de l'événement redouté central dans l'enchaînement causal et qui constitue une cause directe dans les cas simples ou une combinaison d'événements à l'origine de cette cause directe. Pour les systèmes endigués : l'événement de crue ou de tempête qui va solliciter la digue.

**Événement redouté central** : Événement conventionnellement défini, dans le cadre d'une analyse de risque, au centre de l'enchaînement accidentel. Généralement, il s'agit d'une perte de confinement pour les fluides et d'une perte d'intégrité physique pour les solides. Les événements antérieurs sont conventionnellement appelés « phase pré-accidentelle » et les événements postérieurs « phase post-accidentelle ». Pour les systèmes endigués :

- la rupture d'une partie du système de protection ;
- le dysfonctionnement ou la rupture d'un organe (vanne, etc.) du système de protection.

**Filtration** : Fonction qui permet d'éviter le départ de matériaux les plus fins à l'interface entre deux couches de granulométries très différentes, tout en laissant passer l'eau. Entre autres, elle permet d'éviter le colmatage des drains par des grains du sol situé en amont par rapport au sens d'un écoulement interne. Suivant la granulométrie respective de deux couches de matériaux granulaires, la filtration est assurée naturellement ou nécessite l'interposition d'un **filtre** (*voir ce terme*). L'auto-filtration est la propriété d'un matériau granulaire qui permet d'éviter la migration des particules les plus fines de ce matériau à travers les plus grossières (*voir Suffusion*).

**Filtre** : Composant d'une digue ou de sa fondation, dont le rôle est d'assurer la **filtration** entre deux couches de matériau de granulométries différentes.

**Fines** : Plus petits grains constitutifs d'un sol pouvant être emporté par l'eau. En géotechnique sont considérés comme fines les matériaux d'un diamètre inférieur à 80 µm.

**Fissure** : Fente, discontinuité affectant un volume considéré d'un sol ou d'un solide.

**Fonction** : Actions d'un produit ou de l'un de ses constituants exprimée exclusivement en termes de finalité (Afnor, NF X50-150). Cette notion s'intègre dans une démarche d'analyse fonctionnelle qui consiste à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions d'un système (Afnor, 1996) et de ses composants.

**Fonction contrainte** : Réponses que doit apporter le système pour faire face aux contraintes qui lui sont imposées par son environnement, et ainsi permettre la réalisation de ses fonctions principales et garantir sa pérennité. Les fonctions contraintes sont principalement le reflet des interactions qui existent entre le système et ses milieux extérieurs : les actions imposées par les milieux physiques dans lesquels le système s'inscrit (actions hydrauliques, morphodynamique, animaux fouisseurs, activités humaines, etc.), les diverses réglementations auxquelles le système doit s'adapter, le budget dont dispose le maître d'ouvrage, la nécessité de surveillance et d'entretien qui s'impose au système, etc.

**Fonction de sécurité** : Traduisent les actions de sécurité qui permettent de prévenir les défaillances des fonctions techniques des composants d'un système, en évitant qu'elles ne se produisent, ou de les relayer, en y apportant des solutions de substitution. Les fonctions de sécurité ne participent pas directement au fonctionnement normal du système ni à la réalisation de ses fonctions principales et fonctions techniques associées. Elles ont pour objectif de favoriser le bon fonctionnement du système et l'accomplissement de ses fonctions principales, en limitant ou corrigeant les dérives envisageables

dans la réalisation des fonctions techniques des composants du système. Les fonctions de sécurité sont assurées au travers de barrières de sécurité.

**Fonction principale** : Traduit l'objet de l'action d'un système. Par exemple, les fonctions principales d'un système d'endiguement sont généralement :

- la protection d'un territoire contre les inondations avec un objectif (niveau) de protection donné ;
- le contrôle de la morphologie du milieu eau en interaction avec ce système (selon les cas).

**Fonction technique** : Traduit les objectifs techniques auxquels doivent répondre les composants du système pour permettre la réalisation des fonctions principales du système au travers de la prise en compte des fonctions contraintes.

**Fondation** : Terrains d'assise du corps d'une digue (ou d'un barrage). La fondation d'un ouvrage est composée du substratum de formation ancienne située à plus ou moins grande profondeur, surmontée de sa zone d'altération et d'une couverture de terrain de formation plus récente. La fondation participe à la stabilité, à l'étanchéité de l'ouvrage hydraulique et éventuellement à sa résistance à l'érosion externe (par exemple, berge protégée à proximité d'un remblai de digue). Elle peut être l'objet de traitement ou de travaux (dans le but d'améliorer étanchéité, drainage, filtration, etc.).

**Fontis** : Effondrement localisé de forme généralement circulaire en surface. Le phénomène se développe verticalement depuis une cavité souterraine (pouvant avoir pour cause un phénomène d'érosion interne, des cavités souterraines, le pourrissement d'une souche, etc.), donnant lieu à la formation d'une cloche de fontis qui peut remonter jusqu'à la surface.

**Fosse d'érosion** : Érosion du terrain naturel (de la fondation sous la digue ou des terrains environnants) consécutive à une brèche. Les fosses d'érosion peuvent avoir un volume très important, jusqu'à plusieurs fois le volume érodé de la digue.

**Franc-bord** : Portion du lit majeur située entre le cours d'eau (lit mineur) et une digue. Ces terrains sont donc destinés à rester inondables (synonyme de **ségonnal**).

**Franchissement** : Passage d'eau intermittent au-dessus de l'ouvrage, lié à l'action de vagues. Ne pas confondre avec la « **surverse** » (*voir ce terme, voir aussi Érosion par surverse ou franchissement*).

**Fruit** : Pour un talus ou le parement d'un ouvrage, inverse de la **pente** (*voir ce terme*).

**Géotechnique** : Ensemble des activités liées aux applications de la mécanique des sols, de la mécanique des roches et de la géologie de l'ingénieur. Elle englobe l'étude des propriétés mécaniques et physico-chimiques des sols et de l'interaction entre les terrains et les ouvrages environnants d'une part, l'ouvrage objet de la prestation du fait de sa réalisation et/ou de son exploitation d'autre part. La géotechnique s'appuie principalement sur deux sciences :

- la géologie qui retrace l'histoire de la terre, précise la nature et la structure des matériaux et leur évolution dans le temps ;
- la mécanique des sols et des roches qui modélise leur comportement en tant que déformabilité et résistance des matériaux.

L'eau contenue ou circulant dans le sol a une importance fondamentale sur ses propriétés et son évolution, en particulier en ce qui concerne la géotechnique appliquée aux ouvrages hydrauliques (barrages et digues).

**Glissement (mécanisme)** : Mouvement d'un volume limité de terrain le long d'une surface de rupture.

**Glissement de talus (mécanisme) :** Côté zone protégée ou côté eau, conséquence de l'instabilité d'un talus due à la forte pente et à l'éventuelle saturation en eau des matériaux de la digue. Les caractéristiques géotechniques des matériaux jouent un rôle important dans le phénomène. Le glissement du talus côté zone protégée d'une digue se produit le plus souvent lors de la crue (ou autre événement e sollicitation), alors que côté eau, il se produit lorsque le niveau d'eau décroît (la décrue, etc.).

**Granularité :** Finesse « d'un grain » d'un modèle mathématique ou logique. La granularité spatiale est la résolution spatiale de description d'un système ; la granularité temporelle est la finesse du pas de temps dans la description d'une chronologie. Par extension, les granularités définissent les différentes résolutions d'analyse fonctionnelle des systèmes.

**Gravité :** La gravité des conséquences potentielles prévisibles sur les personnes d'un phénomène dangereux résulte de la combinaison, en un point de l'espace, de l'intensité des effets du phénomène et de la vulnérabilité des personnes (et plus largement de tous les types d'enjeux) potentiellement exposées. On distingue l'intensité des effets d'un phénomène dangereux de la gravité des conséquences découlant de l'exposition de cibles de vulnérabilités données à ces effets. Pour les systèmes de protection, la gravité correspond principalement en première approche à l'estimation du nombre de victimes pour un scénario d'inondation donné.

**Hydraulique :** Qui est relatif à l'eau, à la circulation, aux mouvements de l'eau.

**Hydrogramme :** Représentation, sous forme de courbe (le plus souvent) ou série de nombres ou de fonction, de la variation des débits d'un cours d'eau en un point donné au cours du temps (*voir* aussi **Limnigramme** et **Marégramme**).

**Hydrologie :** Étude des propriétés physiques, chimiques et biologiques des eaux situées à la surface de la Terre et au-dessous de cette surface, en particulier du point de vue de leur formation, de leur déplacement, de leur répartition dans le temps et l'espace et de leur interaction avec l'environnement inerte et vivant. L'hydrologie continentale étudie les cours d'eau, plans d'eau et milieux humides, les eaux souterraines et les étendues d'eau solide des terres émergées (d'après Météo France).

**Incision :** Abaissement du fond du lit du cours d'eau (ou de la plage en milieu marin). Pour les cours d'eau, ce phénomène entraîne l'abaissement de la ligne d'eau à l'étiage mais pas nécessairement en crue (par exemple, végétalisation non maîtrisée du lit exondé).

**Indicateur/Indicateur d'état :** Paramètre ou valeur calculée à partir de paramètres donnant des indications sûres, ou décrivant l'état d'un phénomène, de l'environnement ou d'une zone géographique et d'une portée supérieure aux informations directement liées à la valeur d'un paramètre (OCDE, 1993).

**Indicateur de performance :** Information devant aider un acteur, individuel ou plus généralement collectif, à conduire le cours d'une action vers l'atteinte d'un objectif ou devant lui permettre d'en évaluer le résultat (Bonnefous et al., 2001).

**Infiltration :** Écoulement d'eau dans les interstices des matériaux constitutifs de la digue ou de sa fondation. Les écoulements non prévus et non contrôlés conduisent à des désordres, ils sont notamment à l'origine de l'érosion interne.

**Inondation :** Submersion temporaire d'une superficie plus ou moins importante de terrains habituellement hors d'eau. Elle est provoquée par des phénomènes naturels (crue, niveau marin important et/ou des vagues, ruissellement, remontée de nappes souterraines, etc.), ou par des phénomènes artificiels (rupture d'un ouvrage hydraulique : barrage, digue, canalisation, dysfonctionnement d'un organe de manœuvre, etc.).

**Karst** : Structure géomorphologique (superficielle et souterraine) résultant de l'érosion hydrochimique et hydraulique de toutes roches solubles, principalement de roches carbonatées dont essentiellement des calcaires. Par extension, dans le langage courant, le terme karst désigne les cavités karstiques.

**Karstification (mécanisme)** : Processus se mettant en place au sein de roches solubles carbonatées. Les structures karstiques sont caractérisées par des formes d'érosion de surface, mais aussi par le développement de cavités dues à des circulations d'eaux souterraines.

**Lave torrentielle** : boueuse et rocailleuse pouvant se déclencher dans certains torrents de montagne, notamment à la faveur d'événements pluviométriques intenses. Elles sont généralement constituées d'écoulements transitoires par « bouffées » de mélanges eau – matériau solide de très forte concentration (typiquement de l'ordre de  $\frac{3}{4}$  de solide pour  $\frac{1}{4}$  d'eau, en volume) et de granulométrie très étendue (des argiles à des blocs de plusieurs mètres de diamètre) (Hung, 2005).

**Levée** : Se dit d'une digue construite en terre par élévations successives (terme couramment employé sur la Loire). La levée naturelle est le bourrelet alluvionnaire créé par le dépôt des sédiments charriés par le cours d'eau sur la berge, consécutif à l'abaissement de la vitesse de l'eau au débordement. Le mot, introduit à la Nouvelle Orléans par les colons français, a donné le terme « levee » ; ce terme est désormais couramment utilisé en anglais à l'échelle internationale, depuis la rédaction de l'International Levee Handbook.

**Ligne de défense (de protection) principale** : Linéaire de protection de référence pour le gestionnaire du système de protection (généralement en 1<sup>er</sup> rang par rapport aux « étendues » d'eau susceptibles d'inonder la zone protégée).

**Limnigramme** : Représentation, sous forme de courbe (le plus souvent) ou série de nombres ou de fonction, de la variation des niveaux d'un cours d'eau en un point donné au cours du temps (*voir* aussi **Hydrogramme** et **Marégramme**).

**Lit majeur** : Plaine inondable d'un cours d'eau, délimité par les plus hautes eaux. Il est limité par des terrasses anciennes ou les versants de la vallée.

**Lit mineur** : Espace occupé par l'écoulement d'un cours d'eau pour des débits courants et des crues courantes et séparé du reste du lit majeur par les berges.

**Lit vif** : Section du fleuve en eau ou en grève de sable toute l'année.

**Marégramme** : Représentation, sous forme de courbe (le plus souvent) ou série de nombres ou de fonction, de la variation du niveau de la mer en un point donné au cours du temps (*voir* aussi **Limnigramme**).

**Mécanisme** : Processus physique (mécanique, chimique, hydraulique, etc.) comprenant un enchaînement de causes et d'effets qui conduisent à la dégradation des caractéristiques des matériaux et des propriétés des ouvrages (ICOLD, 1993). Exemples de mécanismes élémentaires conduisant à la détérioration des ouvrages en remblai : **érosion externe**, **érosion interne**, **glissement**, **effondrement**, etc. (*voir* ces termes).

**Milieux extérieurs** : Milieux localement en interaction avec le système d'endiguement objet de l'analyse fonctionnelle. Ce sont principalement le(s) milieu(x) extérieur(s) « eau » source des actions hydrauliques principales (crues, tempêtes, marées, etc.) et le milieu extérieur « zone protégée » que le système d'endiguement protège des inondations.

**Mode de défaillance** : Non-réalisation d'une fonction quelconque dans des conditions prévues : pas de fonction, perte de fonction, dégradation de fonction, fonction intempestive (ISDF).

**Morphodynamique** : Concernant les cours d'eau ou les milieux littoraux, étude des rapports entre les forces, les mouvements, les formes et leurs évolutions.

**Muret** : *Voir Banquette.*

**Niveau** : En relation avec les définitions des niveaux limites : niveau de danger, niveau de protection, de niveau de protection apparent, de niveau de sécurité des personnes et de niveau de sûreté (*voir* ces termes), ces niveaux sont appréciés comme le niveau d'eau au droit de l'ouvrage.

**Niveau de danger (du système, d'un tronçon)** : Niveau (*voir* ce terme) à partir duquel la probabilité de défaillance du système d'endiguement (ou un de ses tronçons) est très élevée à certaine, pour les différents modes de rupture auxquels il est potentiellement exposé. C'est notamment 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 protection** : Niveau (*voir* ce terme) jusqu'auquel il n'y a pas d'entrée d'eau (issue de la ou des « étendues » d'eau contre lesquelles le système de protection protège : mer, fleuves, rivières, torrents, lacs, etc.) dans la zone protégée, ou dans une quantité limitée et acceptable par le système d'assainissement et de drainage de la zone protégée (par exemple, par des embruns ou faibles franchissements en milieu maritime).

**Niveau de protection apparent** : Sur un système de protection existant pour lequel on ne connaît a priori pas le niveau de sûreté, niveau de protection (*voir* ce terme) « géométrique » que procure le système, du fait de l'altitude de la crête de ses ouvrages, en prenant l'hypothèse que celui-ci ne rompe pas avant la surverse, ou avant le fonctionnement du ou de ses éventuels déversoirs de sécurité.

**Niveau de sécurité des personnes** : Peut être considéré comme le niveau (*voir* ce terme) en dessous duquel une personne résidant dans la zone protégée se trouve en sécurité. C'est une donnée utile pour la gestion du risque d'inondation et l'aménagement du territoire. Sa connaissance doit constituer un objectif de l'EdD. Il est déterminé à partir des autres niveaux (protection, sûreté, danger), de la connaissance des scénarios d'inondation et des leurs phénomènes dangereux associés (hauteur, vitesses, temps d'arrivée), et de la connaissance de l'occupation du sol de la zone protégée. Selon les cas, il se classe différemment vis-à-vis des autres niveaux : par exemple, il peut être inférieur ou supérieur au niveau de sûreté ou de danger de la digue.

**Niveau de sûreté (des ouvrages, du système, d'un tronçon)** : Niveau (*voir* ce terme) jusqu'auquel le système d'endiguement ou un de ses tronçons est sûr, c'est-à-dire que sa probabilité de défaillance est négligeable pour les différents modes de rupture auxquels il est potentiellement exposé.

**Objectif de protection** : Objectif recherché par le maître d'ouvrage en termes de niveau(x) de protection (*voir* ce terme) offert(s) par le système d'endiguement.

**Organe** : Composant de la digue (par exemple, organe d'étanchéité, de drainage, fondation, corps de digue, etc.).

**Ouvrages de protection contre les inondations** : Ouvrages dont la vocation est de diminuer l'aléa d'inondation en termes de probabilité, d'intensité, de durée ou de

temps d'arrivée. Les catégories d'ouvrages les plus courantes sont les digues et systèmes de protection et les barrages ou bassins écrêteurs de crues.

**Ouvrages secondaires** : Ouvrages du système d'endiguement n'appartenant pas à la ligne de défense principale (*voir* **Ligne de défense principale**).

**Palplanche** : Profilé métallique que l'on enfonce progressivement dans le sol, un par un, par battage ou par fonçage. Chaque palplanche est accrochée à la précédente sur toute sa hauteur, grâce à la forme des profilés. Les palplanches étaient autrefois en bois. Concernant les digues et leurs fondations, elles sont particulièrement utilisées comme moyen de défense contre l'érosion externe et contre la circulation d'eau dans les ouvrages (*voir* **Écran étanche**).

**Parafouille** : Composant dont la fonction est la protection de la fondation superficielle d'un barrage ou d'une digue.

**Parement** : Face extérieure visible de l'ouvrage (barrage, seuil ou digue).

**Pente** : Pour un talus, une berge ou un parement de digue, rapport entre la différence de cote de la base et du sommet (leur différence d'altitude) et la distance horizontale, cartographique, entre ces deux points. C'est donc un rapport d'une mesure verticale sur une mesure horizontale. Trop souvent, on dit l'inverse. C'est un abus de langage et cela conduit à quelques aberrations consistant par exemple à dire qu'une pente de 3/1 est inférieure à une pente de 2/1. Même l'ajout des lettres H et V ne corrige pas cette erreur. La pente classique d'un talus de digue en terre est par exemple de 1/2 (ou de 1V/2H), jamais de 2/1 (ni même de 2H/1V). L'inverse de la pente est appelé **fruit** (*voir* ce terme).

**Performance** : Aptitude d'une structure à remplir les fonctions pour lesquelles elle a été conçue. Par extension, on parle de performance d'une fonction pour indiquer l'état de réalisation de la fonction (Cremona, 2002).

**Perré** : Revêtement de digues ou berges d'un cours d'eau ou d'un canal, constitué de pierres jointoyées ou non. Si ce revêtement est vertical ou subvertical, on parle d'un « mur ».

**Phénomène dangereux ou redouté** : Libération de tout ou partie d'un potentiel de danger, la concrétisation d'un aléa (Ineris – Glossaire grand public, 2004). Pour les systèmes endigués : caractéristiques (vitesses et hauteurs d'eau, cinétique, durée) de la libération d'eau liée à un scénario donné de défaillance du système de protection. Il s'agit donc des caractéristiques d'un événement d'inondation de la zone protégée.

**Pieu** : Pièce longue cylindrique parallélépipédique ou prismatique en bois, métal ou béton armé enfoncé ou coulé dans le sol. Dans les levées de la Loire, par exemple, on en trouve en pied de perrés côté cours d'eau pour les soutenir.

**PK (PM)** : Point kilométrique (point métrique) relatif à un système de repérage s'appliquant à une digue. Par exemple, PK 1,750/PM 1750.

**Plan communal de sauvegarde (PCS)** : En France, outil réalisé à l'échelle communale, sous la responsabilité du maire, pour planifier les actions des acteurs communaux de la gestion du risque (élus, agents municipaux, bénévoles, entreprises partenaires) en cas d'événements majeurs naturels, technologiques ou sanitaires. Il a pour objectif l'information préventive et la protection de la population et s'intègre dans l'organisation générale des secours. L'article 13 de la loi n° 2004-811 du 13 août 2004 de modernisation de la sécurité civile, codifié à l'article L.731-3 du Code de la sécurité intérieure, prévoit l'obligation pour une commune, dotée d'un plan de prévention des risques naturels prévisibles approuvé ou comprise dans le champ d'application d'un plan particulier d'in-

tervention, d'être pourvue d'un plan communal de sauvegarde. Le décret d'application n° 2005-1156 du 13 septembre 2005, relatif au plan communal de sauvegarde fixe les modalités d'élaboration du plan communal de sauvegarde.

**Plan de prévention des risques (PPR) :** Institué par la loi du 2 février 1995, permet de prendre en compte l'ensemble des risques naturels prévisibles, inondations, avalanches, mouvements de terrain, incendies de forêt, séismes, etc. Le PPR relève de la responsabilité de l'État. Il contient des mesures d'interdiction et des prescriptions d'occupation des sols pour les zones exposées en tenant compte de la nature et de l'intensité du risque ainsi que pour les zones non directement exposées mais où des réalisations pourraient aggraver des risques ou en provoquer de nouveaux. Après enquête publique, avis des conseils municipaux concernés, puis approbation préfectorale, il devient une servitude d'utilité publique impliquant des possibilités de sanctions pénales.

**Potentiel de danger :** Système (naturel ou créé par l'homme) ou disposition adoptée et comportant un (ou plusieurs) « danger(s) » (Ineris – Glossaire grand public, 2004). Pour les systèmes endigués, le système de protection mis en charge est porteur du danger lié à la potentielle libération de l'eau dans la zone protégée.

**Prévention des inondations :** Ensemble d'actions et de stratégies en interaction permettant de réduire et contrôler le risque inondation afin de limiter les dommages et les pertes potentiels. Les sept piliers complémentaires de la prévention des risques sont :

- la connaissance des aléas et des enjeux ;
- la surveillance, la prévision, la vigilance et l'alerte ;
- l'éducation et la formation préventive des citoyens ;
- la maîtrise de l'urbanisation du bâti par la réglementation ;
- la réduction de la vulnérabilité des enjeux ;
- la protection des personnes ;
- la préparation aux situations d'urgences et le retour d'expérience.

**Protection :** Opération ou dispositif par intervention sur les milieux ou constitution d'ouvrages en vue de réduire l'extension ou l'enchaînement des aléas (Commission interministérielle de l'évaluation des politiques publiques. Commissariat Général du Plan [1997] – La prévention des risques naturels, rapport d'évaluation. La documentation Française).

**Protection contre les inondations :** La protection (ou défense) contre les inondations d'une ou plusieurs « étendues » d'eau (mer, fleuves, rivières, torrents, lacs, etc.), par des ouvrages, peut s'envisager soit comme complète (absence d'inondation jusqu'à un niveau d'événement défini), soit de manière relative, c'est-à-dire comme une diminution de l'aléa d'inondation en termes de probabilité, d'intensité, de durée et/ou de temps d'arrivée (également jusqu'à un niveau d'événement défini). La protection est une des composantes de la **prévention** (*voir ce terme*) des inondations qui comprend de nombreux autres outils plutôt organisationnels que matériels.

**Protection indirecte :** Ouvrages et éléments naturels, situés côté eau, ayant pour effet de diminuer les actions (hydrauliques, transport solide, etc.) sur les linéaires de protection (par exemple, épis, seuils, plages, etc.).

**Protection secondaire :** Linéaires d'ouvrages, éléments naturels et zones de stockage ou de transfert des eaux de crues, généralement situés dans la zone protégée et assurant une protection contre les inondations en complément de l'action de la ligne de défense principale.

**Ralentissement dynamique des crues :** Concept dont l'objet est d'atténuer les crues d'un cours d'eau en freinant les écoulements avant leur arrivée dans le cours d'eau, en mobilisant les capacités d'amortissement offertes par le lit majeur et en stockant temporairement une



partie des volumes de crue dans des ouvrages spécifiques. Les actions ou aménagements qui concourent au ralentissement dynamique des crues sont des actions diffuses dans le bassin-versant (pratiques culturales, haies, etc.), dans le milieu urbain (chaussées à structure réservoir, etc.), en lit mineur ou majeur (augmentation de la rugosité, etc.) ou des ouvrages hydrauliques (bassins, barrages à pertuis ouvert, etc.) (Chastan et al., 2004).

**Renforcement** : Type de travaux mis en œuvre pour remédier à une défaillance constatée ou redoutée. S'applique à des travaux préventifs ou curatifs. Synonyme de « confortement ».

**Résilience (d'un système)** : Capacité d'un système à récupérer un fonctionnement et développement normal après avoir subi une perturbation importante.

**Revanche** : Différence d'altitude entre la crête d'un ouvrage (barrage, digue, canal) et le plan d'eau ou la ligne d'eau pour la situation considérée.

**Reversoir** : Dans un système de protection, déversoir de restitution, conçu pour déverser de la zone protégée vers le cours d'eau.

**Risberme** : Partie plate horizontale ménagée dans le talus d'un ouvrage côté zone protégée ou côté cours d'eau. Dans le cas d'une rivière calibrée, une risberme peut être installée pour ne pas diminuer la hauteur d'eau à l'étiage et pour constituer une piste d'entretien.

**Risque** : Mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences (Villemeur, 1988). Le risque peut être décomposé selon les différentes combinaisons des trois composantes que sont l'intensité, la vulnérabilité et la probabilité :

- Intensité × Vulnérabilité = Gravité des dommages ou conséquences
- Intensité × Probabilité = Aléa
- Risque = Intensité × Probabilité × Vulnérabilité = Aléa × Vulnérabilité = Conséquences × Probabilité

Pour les systèmes endigués, il résulte de l'association de la probabilité de réalisation d'un scénario d'inondation donné (phénomène dangereux avec ou sans rupture de digue) avec la gravité des dommages potentiellement infligés, par ce phénomène, aux enjeux présents dans la zone protégée.

**Risque résiduel** : Risque subsistant après le traitement du risque (ISO/CEI 73). Risque subsistant après que des mesures de prévention aient été prises (ISO/CEI 51).

**Rivière** : En hydrographie, cours d'eau au débit moyen à modéré ( $> 2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) qui s'écoule sous l'effet de la gravité. La pente d'une rivière est inférieure à 1 % (C. Bernard, 1925).

**Rivière torrentielle** : En région montagneuse, forme les affluents principaux des rivières. Comparées à ces dernières, leurs vallées sont moins longues et plus resserrées et les variations de leur pente sont plus rapides (inspiré de Surell, 1841). Leur pente est généralement comprise entre 1 et 6 % (C. Bernard, 1925). Les rivières torrentielles se caractérisent également par un fort transport solide par charriage.

**Rôle (d'un ouvrage)** : Par convention, traduit la fonction de l'ouvrage du point de vue de l'analyse que l'on mène (dans notre cas, du point de vue hydraulique lié à la protection contre les inondations). Par exemple, du point de vue de l'analyse du risque d'inondation, un remblai routier peut jouer un rôle de protection contre les inondations lorsqu'il traverse une zone naturellement inondable. Ne pas confondre avec la « vocation (d'un ouvrage) ».

**Rupture (de digue)** : Mouvement d'une partie d'une digue ou de sa fondation tel que l'ouvrage ne puisse plus retenir l'eau. En général, le résultat sera une « lâchure » d'un

volume d'eau important. La rupture de digue correspond à l'ouverture d'une **brèche** (*voir ce terme*) pouvant conduire à l'inondation de la zone protégée (ICOLD, 1995). En mécanique, la rupture d'un matériau est la séparation, partielle ou complète, en deux ou plusieurs pièces sous l'action d'une contrainte.

**Scénario** : Ensemble d'événements reconstitués par les différents mécanismes mis en jeu dans un phénomène tel qu'une brèche ou une inondation. Un scénario est construit à partir d'un diagnostic ou d'une AMDE.

**Scénario d'accident (majeur)** : Enchaînement d'événements conduisant d'un événement initiateur à un accident (majeur), dont la séquence et les liens logiques découlent de l'analyse des risques. En général, plusieurs scénarios peuvent mener à un même phénomène dangereux pouvant conduire à un accident (majeur) : on dénombre autant de scénarios qu'il existe de combinaisons possibles d'événements y aboutissant. Les scénarios d'accident obtenus dépendent du choix des méthodes d'analyse des risques utilisées et des éléments disponibles.

**Scénario de défaillance** : Combinaison unique d'états des composants du système ou de son environnement définissant une suite de circonstances pertinentes pour la phase d'estimation des risques, pouvant conduire à un ou plusieurs phénomènes dangereux. De manière générale, pour un ouvrage hydraulique, on peut dire également qu'un scénario de défaillance peut être la combinaison d'un mode de rupture et d'une circonstance. On parle de scénario d'accident dès lors qu'un scénario de défaillance peut conduire à un accident majeur et que l'on s'intéresse à ses conséquences.

**Sédiments** : Dépôts solides ayant été transportés par l'eau.

**Ségonnal (ou ségonal)** : *Voir Franc bord.*

**Seuil** : En rivière, ouvrage, généralement de faible hauteur de chute, fixe ou mobile, qui barre tout ou partie du lit mineur.

**SIRS Dignes** : Système d'information utilisant un SIG et une base de données alphanumérique, dédié à la gestion des digues de protection. Il permet de gérer les informations sur les différents composants d'un système de « digue » : structure et géométrie de la digue et du lit du cours d'eau, organes hydrauliques, réseaux de communication, de flux, d'énergie, désordres, historique des crues, parcellaire foncier, travaux et études, organismes et intervenants. La première version a été développée sur la base de travaux du Cemagref (aujourd'hui Irstea), pour le compte de l'AD Isère, le Symadrem et la DREAL Centre – Val-de-Loire, et financé par ces quatre structures. La deuxième version est désormais la responsabilité de l'association France Dignes.

**Sol** : Milieu composé d'une matrice solide (grains) et de vides remplis d'une proportion variable d'air et d'eau. Les ouvrages hydrauliques en remblai sont principalement composés de sol (une nature pour les ouvrages homogènes, plusieurs natures pour les ouvrages zonés).

**Sollicitation** : Contraintes qui naissent sur ou au sein d'un ouvrage du fait de l'application d'actions (*voir Action*). Au-delà de certains seuils de résistance de l'ouvrage, les sollicitations peuvent engendrer des mécanismes de détérioration de celui-ci.

**Soulèvement hydraulique** : La déstabilisation de la fondation par « soulèvement hydraulique côté zone protégée » peut se produire lorsque les terrains de fondation de la levée sont constitués d'une couche très perméable surmontée d'une couche imperméable. La pression hydrostatique de l'eau dans la fondation perméable peut être susceptible de soulever la couche imperméable, et provoquer un claquage de celle-ci.

**Soutènement** : Soutien et maintien en équilibre mécanique des terres en dénivellation par résistance à leur poussée.

**Stabilité** : État d'équilibre mécanique d'un ouvrage (la digue ou sa fondation) vis-à-vis de(s) mode(s) de rupture (par glissement, érosion, liquéfaction, etc.) sous l'action des efforts résultants de l'action de l'eau (pression hydrostatique, sous-pressions, écoulements internes ou externes), du poids propre de la digue et des sollicitations exceptionnelles (séisme, etc.).

**Substratum** : Socle rocheux sain, recouvert d'une épaisseur variable de sédiments ou de couches d'altération.

**Suffusion (mécanisme)** : Un des mécanismes de la famille « **érosion interne** » (*voir ce terme*). Entraînement sélectif, par les circulations d'eau, des petites particules les plus instables d'un sol dans les espaces intergranulaires de celui-ci.

**Sûreté de fonctionnement** : En tant que discipline, science des défaillances, incluant leur connaissance, leur évaluation, leur prévision et leur maîtrise (Villemeur, 1988). Aptitude d'une entité à accomplir une ou plusieurs fonctions requises, dans des conditions données. La sûreté de fonctionnement est caractérisée par différents concepts, notamment la fiabilité et la durabilité (Villemeur, 1988).

**Surverse** : Écoulement d'eau par-dessus la crête d'une digue, sur un secteur non prévu à cet effet (par opposition au déversement sur un déversoir). Ne pas confondre avec le « **franchissement** » (*voir ce terme, voir aussi Érosion par surverse*).

**Système d'endiguement** : Ensemble de digues et autres ouvrages, à l'exclusion de tout élément naturel, qui protège une zone exposée aux inondations (définition réglementaire introduite par le décret n° 2015-526 du 12 mai 2015). Ne pas confondre avec « **système de protection contre les inondations** » et « **système endigué** » (*voir ces termes*).

**Système de protection contre les inondations** : Ensemble d'ouvrages et parfois d'autres éléments naturels (dunes, tertres, pitons rocheux, etc.) 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, etc.). Ne pas confondre avec « **système d'endiguement** » et « **système endigué** » (*voir ces termes*).

**Système endigué** : Ensemble formé par le système de protection contre les inondations et la zone qu'il protège (*voir Zone protégée*). Ne pas confondre avec « **système de protection contre les inondations** » et « **système d'endiguement** » (*voir ces termes*).

**Tassement (mécanisme)** : Diminution de volume d'un terrain (par exemple, la fondation d'un ouvrage) ou d'un ouvrage en remblai sous l'effet d'une charge (surcharge ou charge propre), ou de vibrations dans le cas des sables, par expulsion d'eau interstitielle ou réarrangement de sa texture. Par extension, abaissement de la crête d'un ouvrage sous l'effet des charges et/ou de la déformation du sol qui le supporte (fondation).

**Tertre** : Butte ou large partie de terrain (naturelle ou en remblai) non inondable (ou très rarement), faisant partie du système de protection, et présentant un risque de brèche généralement négligeable du fait de sa grande largeur.

**Torrent** : Coule dans une vallée très courte, qui morcelle les montagnes en contreforts ; quelquefois même, dans de simples dépressions. Leurs crues sont courtes et presque toujours subites. La pente des torrents excède 6 %, sur la plus grande longueur de leur cours : elle varie très vite et ne s'abaisse pas au-dessous de 2 %. Ils ont une propriété tout à fait spécifique : ils affouillent dans la montagne, ils déposent dans la vallée et ils divaguent ensuite, par suite de ces dépôts (inspiré de Surell, 1841).

**Tronçon de digue** : Portion de digue qui présente une certaine homogénéité de conception (même type d'ouvrage, de matériaux, etc.), de fonction (résistant à la surverse, déversoir, etc.), d'état ou de gestion. Le découpage d'une digue en tronçons est subjectif et peut être effectué de différentes manières, en fonction des acteurs et de leurs objectifs.

**Val** : Notion géographique, représente l'ensemble de la vallée d'un fleuve. Par extension (en Loire Moyenne), zone située entre le système d'endiguement et la limite de la zone inondable définie par les plus hautes eaux connues (PHEC) ou par la limite du coteau (donc la **zone protégée**, voir ce terme).

**Vanne** : Appareillage permettant la fermeture d'un ouvrage hydraulique de transport de l'eau (canalisation, canal). Dans le cas des digues, une vanne permet d'autoriser ou d'empêcher le passage de l'eau ou l'évacuation de celle-ci à travers la digue ou sa fondation.

**Vocation (d'un ouvrage)** : Par convention, raison première de la création d'un ouvrage. Par exemple, la vocation d'une digue de protection contre les inondations est de protéger contre les inondations, celle d'un remblai routier est de supporter une infrastructure routière. Ne pas confondre avec le « rôle (d'un ouvrage) ».

**Vulnérabilité (des enjeux)** : Niveau de conséquences prévisibles d'un aléa sur les enjeux. La vulnérabilité mesure « les conséquences dommageables de l'événement sur les enjeux concernés » (Dictionnaire de l'environnement, 1991). La vulnérabilité est la mesure des dommages de toutes sortes rapportée à l'intensité de l'aléa (Commissariat général du plan 1997). La vulnérabilité peut être humaine, socio-économique et environnementale (Y. Veyret – Les risques – Dossiers des images économiques du monde. SEDES, 2004). Les trois composantes principales de la vulnérabilité sont : l'exposition, la sensibilité et l'adaptation (Liverman, 1990 ; Downing, 1991 ; Kelly et Adger, 2000 ; Kaspersen, 2001 ; McCarthy et al., 2001 ; Parry, 2001 ; Turner et al., 2003 ; Schröter et al., 2005, Smit et al., 1999 ; Finan et al., 2002).

**Zone protégée** : Zone du territoire naturellement inondable (par une ou plusieurs « étendues » d'eau : mer, fleuves, rivières, torrents, lacs, etc.), qui se trouve protégée contre les inondations par un système de protection contre les inondations, jusqu'aux différents niveaux de protection qui caractérisent ce système.

# Annexes

**Annexe 1** : Descriptions des interactions et flux de données entre études élémentaires de réalisation d'une analyse de risque de système de protection contre les inondations

**Annexe 2** : Principaux textes réglementaires relatifs aux digues

**Annexe 3** : Proposition de cahier des charges pour la réalisation d'une étude de dangers de système d'endiguement

**Annexe 4** : Études hydrauliques pour l'analyse de risque des systèmes de protection contre les inondations en contexte fluvial

**Annexe 5** : Retour d'expérience de la DREAL Centre – Val-de-Loire sur la rédaction des EdD au format « réglementation 2007 »

## ANNEXE 1

# Réalisation de l'analyse de risque de système de protection contre les inondations

## *Descriptions des interactions et flux de données entre études élémentaires*

Voir Figure 5-3. pour une décomposition de l'analyse de risque en études élémentaires

### Étude 0 – Étude accidentologique du système endigué

Liens avec les autres études élémentaires : voir Figure 5-5

Flux de données : voir Figure 5-6

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires (dans le cas d'une étude accidentologique sous forme de synthèse finale)	<b>2. Analyse de la gestion de la sécurité</b> Description des conséquences positives ou négatives, du point de vue du risque, des différentes mesures de gestion de la sécurité appliquées jusqu'à aujourd'hui.
		<b>4. Hydraulique globale (niveaux/événements)</b> Description des différents événements hydrauliques ayant impacté le système de protection ou des systèmes de protection similaires.
		<b>6. Comportement morphodynamique local du milieu eau</b> Description des différents phénomènes morphodynamiques ayant impacté le système de protection ou des systèmes de protection similaires
		<b>9. Autres actions et facteurs aggravants</b> Description des différents phénomènes physiques ayant impacté le système de protection ou des systèmes de protection similaires.
		<b>C. Analyse de la défaillance du système de protection</b> Description des différents mécanismes de détérioration observés sur le système de protection ou des systèmes de protection similaires ; description des défaillances non structurelles observées dans le passé.
		<b>13. Caractérisation des brèches</b> Caractérisation en termes de géométrie, dynamique et hydraulique.



Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires (dans le cas d'une étude accidentologique sous forme de synthèse finale)	<p><b>E. Intensité et cinétique des scénarios d'inondation</b> Description des phénomènes d'inondation passés.</p> <p><b>F. Vulnérabilité des enjeux</b> Description des accidents ayant touché les enjeux, du fait de la propagation d'inondations dans les zones protégées considérées.</p>
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	Retours d'expériences d'événements passés sur le système de protection étudié.
	Données externes	Retours d'expériences d'événements passés sur d'autres systèmes de protection similaires.
	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	Recherches d'archives : retours d'expériences d'événements passés sur le système de protection étudié ou sur d'autres systèmes de protection similaires.
Alimentation d'autres études élémentaires (dans le cas d'une étude accidentologique préliminaire)		<p><b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b> Lorsqu'elle est menée au début de l'analyse de risque, l'étude accidentologique constitue une première source d'information pour l'identification des risques.</p> <p><b>2. Analyse de la gestion de la sécurité</b> Description des conséquences positives ou négatives, du point de vue du risque, des différentes mesures de gestion de la sécurité appliquées jusqu'à aujourd'hui.</p> <p><b>4. Hydraulique globale (niveaux/événements)</b> Description des différents événements hydrauliques ayant impacté le système de protection ou des systèmes de protection similaires.</p> <p><b>6. Comportement morphodynamique local du milieu eau</b> Description des différents phénomènes morphodynamiques ayant impacté le système de protection ou des systèmes de protection similaires</p> <p><b>9. Autres actions et facteurs aggravants</b> Description des différents phénomènes physiques ayant impacté le système de protection ou des systèmes de protection similaires.</p> <p><b>C. Analyse de la défaillance du système de protection</b> Description des différents mécanismes de détérioration observés sur le système de protection ou des systèmes de protection similaires. Description des défaillances non structurelles observées dans le passé.</p> <p><b>13. Caractérisation des brèches</b> Caractérisation en termes de géométrie, dynamique et hydraulique.</p> <p><b>E. Intensité et cinétique des scénarios d'inondation</b> Description des phénomènes d'inondation passés.</p> <p><b>F. Vulnérabilité des enjeux</b> Description des accidents ayant touché les enjeux, du fait de la propagation d'inondations dans les zones protégées considérées.</p>

## 1. Topographie

Liens avec les autres études élémentaires : voir Figure 5-8

Flux de données : voir Figure 5-9

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<p><b>A. Définition du système</b></p> <p>Détermination des éléments du périmètre de l'étude qui requièrent une caractérisation topographique spécifique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- le système de protection,</li> <li>- les facteurs aggravants pour le système de protection (végétation ligneuse, terriers d'animaux, ouvrages inclus, etc.), etc.</li> </ul>
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	<p><b>Données topographiques existantes relatives à l'ouvrage ou son environnement</b></p> <p>Plans cotés de travaux et aménagements, fichiers de points (x, y, z) (attention au système de projection et au référentiel altimétrique).</p>
	Données externes	<p><b>Cartes IGN</b></p> <p>Différents types de données topographiques sont distribués par l'IGN (Scan 25°, Scan 100°). Le 1 : 25 000 avec des courbes de niveau tous les 10 m correspond au format le plus précis disponible.</p>
		<p><b>BD ALTI® IGN</b></p> <p>Gamme complète de modèles numériques de terrain (MNT) qui décrivent la forme du terrain à différentes échelles.</p> <p>La BD ALTI® est disponible à différents pas : 25, 50, 75, 100, 250, 500, 1 000 m. Produit livré sous forme de MNT ou de courbes de niveau.</p> <p>Sa précision altimétrique est métrique (de généralement 2 m, elle peut aller jusqu'à 6 m dans certaines zones du territoire).</p>
Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	<p><b>Résultat de levés Lidar</b></p> <p>Méthode de levé topographique par laser aéroporté ou terrestre.</p> <p>Permet une acquisition à très grand rendement de la topographie sur de grandes surfaces et avec une grande densité de points. La précision et la résolution des résultats peuvent être relativement élevées (précision jusqu'à 3 cm en altitude et 5 cm en planimétrie, résolution entre 80 et 120 points/m<sup>2</sup>).</p> <p>Peut permettre de réaliser des levés bathymétriques, mais uniquement pour des faibles profondeurs et des faibles turbidités de l'eau.</p> <p><b>Avantage</b></p> <p>Permet un très haut rendement d'acquisition d'une forte densité de points cotés sur des zones géographiques étendues.</p> <p>Rentable pour le levé de systèmes de protection étendus.</p> <p>Permet l'acquisition des couleurs, de vidéos et de photographies de grande résolution.</p> <p><b>Limites</b></p> <p>Pour le levé d'un système de protection, le coût de l'opération ne devient intéressant qu'à partir d'environ 60 km de linéaire.</p> <p>La résolution planimétrique et la précision altimétrique des levés Lidar doivent être connues pour l'analyse.</p> <p>La précision et la résolution du levé sont directement inversement proportionnelles à l'altitude du vol qui réalise le levé. Elles conditionnent donc l'emprise du levé (la largeur de la bande de levée lors d'un passage).</p> <p>Forte influence des conditions climatiques sur la qualité des mesures.</p> <p>La présence de végétation peut fortement diminuer la résolution des mesures au sol.</p> <p>Peu adaptée aux levés bathymétriques (limites dues à la profondeur, la turbidité de l'eau, etc.)</p>	

<p>Données d'entrée pouvant être utiles</p>	<p>Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques</p>	<p><b>Bibliographie</b></p> <p>Clément A., Mériaux P. (2007). La télédétection LiDAR : projet « FliMap-Digues » et derniers développements de l'utilisation de méthodes à haut rendement pour la reconnaissance des digues fluviales françaises. <i>Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection</i>, 186, pp. 87-91.</p> <p>Mériaux P., Auriou L., Maurin J., Boulay A., Lacombe S., Marmu S. (2013). La télédétection LiDAR hélicoptérée haute résolution, un outil efficace pour étudier la topographie et contribuer au diagnostic des digues de protection. 2<sup>e</sup> colloque national – Digues, MEDDTL/CFBR/Irstea, Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions, Aix-en-Provence, pp. 335-344.</p> <p>Panissod F., Bailly J.S., Durrieu S., Jacome A., Mathys N., Cavalli M., Puech C. (2010). Qualification de modèles numériques de terrain LiDAR pour l'étude de l'érosion : application aux badlands de Draix. <i>Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection</i>, 192, pp. 50-57.</p> <p>Royet P., Palma-Lopes S., Fauchard C., Mériaux P., Auriou L., (2013). Rapid and cost-effective dike condition assessment methods : geophysics and remote sensing. FloodProBE Report Number WP3-01-12-20, 136 p.CETE Méditerranée, 2001. Catalogue de techniques d'acquisition de données topométriques pour les études hydrauliques.</p> <p>Vennetier M., Mériaux P., Busset F., Felix H., Lacombe S. (2010). Utilisation de la télédétection LiDAR aéroportée haute définition pour la caractérisation de la végétation des digues. <i>Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection</i>, n° 191.</p>
		<p><b>Résultat de levés bathymétrique par sondeur acoustique</b></p> <p>Un sondeur acoustique est un appareil servant à mesurer la profondeur et donc la topographie des fonds subaquatiques (bathymétrie). La profondeur est déduite de la mesure du temps de trajet d'un signal acoustique réfléchi par le fond.</p> <p>Grande précision altimétrique et résolution planimétrique possible.</p> <p><b>Avantages</b></p> <p>Permet l'acquisition de points subaquatiques.</p> <p>Permet un haut rendement d'acquisition de points cotés sur des zones géographiques relativement étendues.</p> <p><b>Limites</b></p> <p>Spécifique à la bathymétrie.</p> <p>Doit être recalé par rapport à la topographie terrestre (berges notamment).</p> <p>Peu adapté aux fonds très vaseux, aux fonds très accidentés, aux fonds de très faible profondeur, aux cours d'eau non navigable.</p>
		<p><b>Résultat de levés topographiques de géomètre</b></p> <p>Levé par GPS différentiel (DGPS), théodolite ou tachéomètre laser.</p> <p><b>Avantages</b></p> <p>Grande précision altimétrique.</p> <p>Grande précision planimétrique (levé ponctuel).</p> <p><b>Limites</b></p> <p>Une précision fine en altimétrie n'est pas valorisée si la précision en planimétrie n'est pas suffisante.</p> <p>Méthode d'acquisition lente et contraignante (point par point), peu adaptée pour créer des maillages de forte résolution sur de grandes surfaces.</p> <p>Contraintes liées à la météo, à l'accès au terrain étudié, à la réception des signaux des satellites pour le DGPS.</p>

**A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque**

La topographie du terrain naturel et des ouvrages permet de définir les périmètres de l'étude. En effet, elle conditionne en grande partie le fonctionnement hydraulique du territoire et donc les limites des périmètres du système de protection, du milieu eau et de la zone protégée.

Une représentation cartographique de précision altimétrique moyenne mais avec une assez forte résolution spatiale (un levé type Lidar semble le plus adapté), sur l'ensemble de la zone d'étude, peut suffire pour satisfaire les besoins en données topographiques de cette étude élémentaire.

**5. Caractérisation géotechnique et structurelle du système de protection**

Permettre la définition de la géométrie des sections en travers types des différents tronçons du système de protection : production de profils en travers du système de protection.

Une forte précision altimétrique est requise et notamment concernant la cote des points hauts (crête). Le levé à grand rendement de type Lidar présente des avantages pour les linéaires importants (temps, densité de points). Le levé topographique de géomètre classique est toutefois bien adapté aux linéaires de moindre importance.

Permet la localisation des composants de digues au sein des sections en travers types du système de protection : cotation des points caractéristiques utiles à leur localisation en altitude.

Une forte précision altimétrique est requise (le levé topographique de géomètre est le plus adapté).

**6. Comportement morphodynamique local du milieu eau**

La connaissance de la topographie terrestre et subaquatique (bathymétrie) du milieu eau est une donnée indispensable pour la caractérisation du comportement morphodynamique local (au niveau du système de protection) du milieu eau.

En effet, elle donne une lecture de la morphologie locale du milieu eau à l'instant du levé topographique, permet de comprendre la dynamique sédimentaire au niveau du système de protection, et donc de prévoir les évolutions futures et les zones sensibles.

Une topographie de précision moyenne mais avec une assez forte résolution spatiale sur l'ensemble du milieu eau suffit à cet exercice (un couplage de levés type Lidar et bathymétrie par sondeur acoustique semble le plus adapté).

**7. Comportement hydraulique local du milieu eau**

La topographie terrestre et subaquatique (bathymétrie) du milieu eau est indispensable pour la caractérisation du comportement hydraulique local (au niveau du système de protection) de ce dernier.

En effet, un écoulement d'eau sur une surface étant directement conditionné par la forme de cette dernière, il est nécessaire de connaître le relief du milieu eau avec suffisamment de précision altimétrique et planimétrique pour être capable d'en prévoir (modéliser) le comportement hydraulique (niveaux d'eau, débits, volumes).

Une topographie de précision moyenne mais avec une assez forte résolution spatiale sur l'ensemble du milieu eau suffit à cet exercice (un couplage de levés type Lidar et bathymétrie par sondeur acoustique semble le plus adapté).

**8. Ouvrages inclus dans le système de protection**

La topographie permet la localisation en altitude des ouvrages inclus : cotation des points caractéristiques utiles à leur localisation en altitude.

Une forte précision altimétrique est requise (le levé topographique de géomètre est le plus adapté).

Alimentation d'autres études élémentaires	<p><b>9. Autres actions et facteurs aggravants</b></p> <p>La topographie peut être utile à la caractérisation de certaines actions ou facteurs aggravants. Par exemple :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- localisation en altitude et en plan (cotation de points caractéristiques) de la végétation ligneuse présente sur les digues,</li> <li>- localisation en altitude et en plan (cotation de points caractéristiques) des terriers d'animaux, etc.</li> </ul> <p>Une forte précision altimétrique est requise (le levé topographique de géomètre est le plus adapté).</p>
	<p><b>B. Analyse fonctionnelle du système de protection</b></p> <p>La donnée topographique permet la définition de la géométrie du système de protection (profils en travers et profils en long).</p> <p>Une forte précision altimétrique est requise et notamment concernant la cote des points hauts (crête). Le levé à grand rendement de type Lidar présente des avantages pour les linéaires importants (temps, densité de points). Le levé topographique de géomètre classique est toutefois bien adapté aux linéaires de moindre importance.</p>
	<p><b>E. Intensité et cinétique des inondations</b></p> <p>La topographie de la zone protégée est une donnée indispensable à la caractérisation de son fonctionnement hydraulique en cas d'inondation.</p> <p>En effet, l'écoulement de l'eau sur une surface étant directement conditionné par la forme de cette dernière, il est nécessaire de connaître le relief de la zone protégée avec suffisamment de précision altimétrique et planimétrique pour être capable d'en prévoir (modéliser) le comportement hydraulique (hauteurs d'eau, vitesses horizontales, vitesses verticales, temps de propagation) en cas d'inondation.</p>

## A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque

Liens avec les autres études élémentaires : voir [Figure 5-11](#)

Flux de données : voir [Figure 5-12](#)

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<p><b>0. Étude accidentologique du système endigué</b></p> <p>Lorsqu'elle est menée au début de l'analyse de risque, l'étude accidentologique constitue une première source d'information pour l'identification des risques.</p>
		<p><b>1. Topographie</b></p> <p>La topographie du terrain naturel et des ouvrages permet de définir les périmètres de l'étude. En effet, elle conditionne en grande partie le fonctionnement hydraulique du territoire et donc les limites des périmètres du système de protection, du milieu eau et de la zone protégée.</p> <p>Une représentation cartographique de précision altimétrique moyenne mais avec une assez forte résolution spatiale (un levé type Lidar semble le plus adapté), sur l'ensemble de la zone d'étude, peut suffire pour satisfaire les besoins en données topographiques de cette étude élémentaire.</p>
		<p><b>4. Hydraulique globale (niveaux/événement)</b></p> <p>La connaissance du comportement hydraulique du milieu extérieur eau permet de valider le périmètre du milieu eau.</p>
		<p><b>7. Comportement hydraulique local du milieu eau</b></p> <p>La connaissance du comportement hydraulique du milieu extérieur eau permet de valider le périmètre du système de protection.</p>

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<p><b>E. Intensité et cinétique des inondations</b></p> <p>La connaissance du comportement hydraulique de la zone protégée permet de valider le périmètre de ce dernier ainsi que du système de protection.</p>
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	<p><b>Historiques des crues et inondations</b></p> <p>Donne un point de vue hydraulique qui alimente d'un côté l'identification du risque (dommages sur les enjeux, etc.) et de l'autre la définition du périmètre de l'étude (localisation des écoulements).</p>
		<p><b>Historique des brèches et désordres</b></p> <p>Donne un point de vue structurel qui alimente l'identification des risques (conditions ayant entraîné la rupture du système de protection).</p>
		<p><b>Historique des ouvrages</b></p> <p>Indications sur la construction et la modification des ouvrages.</p>
	Données externes	<p><b>Cartes IGN :</b></p> <p>Permet l'identification de certains éléments du périmètre de l'étude :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- enjeux,</li> <li>- ouvrages,</li> <li>- ouvrages inclus, etc.</li> </ul>
<p><b>Documents administratifs</b></p> <p>Définissent les responsabilités et l'organisation des acteurs du territoire (gestion des ouvrages, gestion de crise, etc.). Alimentent l'identification du risque et plus particulièrement les aspects liés à la gestion de la sécurité.</p>		
<p><b>Documents réglementaires sur le risque</b></p> <p>PCS, PPR, etc. Alimentent l'identification du risque et plus particulièrement les aspects liés à la gestion de la sécurité.</p>		
Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	<p><b>Recherches d'archives</b></p> <p>Historique des brèches et désordres, historiques des crues et inondations, historique des ouvrages, etc.</p>	
Alimentation d'autres études élémentaires	<p><b>1. Topographie</b></p> <p>Détermination des éléments du périmètre de l'étude qui requièrent une caractérisation topographique spécifique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- le système de protection,</li> <li>- les facteurs aggravants pour le système de protection (végétation ligneuse, terriers d'animaux, ouvrages inclus, etc.), etc.</li> </ul>	
	<p><b>2. Analyse de la gestion de la sécurité (eau, endiguement, zone protégée)</b></p> <p>Définit le périmètre de l'étude et identifie les acteurs ou objets dont doivent être étudiées les mesures de contrôle de la sécurité.</p>	
	<p><b>3. Morphodynamique globale</b></p> <p>Définit le périmètre de l'étude.</p>	
	<p><b>4. Hydraulique globale (niveaux/événement)</b></p> <p>Définit le périmètre de l'étude.</p>	
	<p><b>5. Caractérisation géotechnique et structurelle du système de protection</b></p> <p>Définit les ouvrages pour lesquels une étude de caractérisation géotechnique et structurelle doit être menée.</p>	
	<p><b>6. Comportement morphodynamique local du milieu eau</b></p> <p>Définit le périmètre de l'étude.</p>	

Alimentation d'autres études élémentaires	<b>7. Comportement hydraulique local du milieu eau</b> Définit le périmètre de l'étude.
	<b>8. Ouvrages inclus dans le système de protection</b> Définit le périmètre de l'étude élémentaire et liste les types d'ouvrages inclus à étudier.
	<b>9. Autres actions et facteurs aggravants</b> Identifie les éventuels facteurs aggravants et actions à caractériser de manière approfondie et le périmètre de leur étude.
	<b>10. Recensement des enjeux</b> Définit le périmètre de l'étude d'enjeux et les types d'enjeux à caractériser
	<b>B. Analyse fonctionnelle du système de protection</b> Définit l'objet de l'analyse fonctionnelle (le système de protection) et les milieux extérieurs en interaction à caractériser en termes fonctionnels.
	<b>E. Intensité et cinétique des inondations</b> Définit la zone (périmètre de la zone protégée) sur laquelle doit être menée l'étude élémentaire, et les phénomènes hydrauliques à caractériser

## 2. Analyse de la gestion de la sécurité (eau, endiguement, zone protégée)

Liens avec les autres études élémentaires : voir [Figure 5-14](#)

Flux de données : voir [Figure 5-15](#)

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<b>0. Étude accidentologique du système endigué</b> Description des conséquences positives ou négatives, du point de vue du risque, des différentes mesures de gestion de la sécurité appliquées jusqu'à aujourd'hui.
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	<b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b> Définit le périmètre de l'étude et identifie les acteurs ou objets dont doivent être étudiées les mesures de contrôle de la sécurité.
		Documents traitant de la planification de la gestion de la sécurité : consignes de surveillance et d'entretien, existantes ou identifiables. Retours d'expériences.
	Données externes	Documents traitant de la planification de la gestion de la sécurité : PCS, autres plans de gestion de crise, etc. Retours d'expériences.
		Retours d'expériences.
Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	Retours d'expériences.	
Alimentation d'autres études élémentaires		<b>0. Étude accidentologique du système endigué</b> Description des conséquences positives ou négatives, du point de vue du risque, des différentes mesures de gestion de la sécurité appliquées jusqu'à aujourd'hui.
		<b>B. Analyse fonctionnelle du système de protection</b> La gestion de la sécurité du système de protection est traitée dans l'analyse fonctionnelle externe de ce dernier. Elle se caractérise par la mise en évidence de barrières de sécurité participant à la sûreté de l'ouvrage.



Alimentation d'autres études élémentaires	<p><b>4. Hydraulique globale (niveaux/événement)</b></p> <p>La gestion de la sécurité dans le milieu eau consiste notamment en des mesures ou installations qui contrôlent le comportement hydraulique du système hydrographique (barrages écrêteurs de crues, etc.). Ces dernières ont un impact direct sur la nature de l'aléa hydraulique (probabilité, cinétique et intensité des événements hydrauliques) et doivent être prises en compte dans sa caractérisation.</p>
	<p><b>11. Probabilités conditionnelles de défaillance</b></p> <p>La politique de gestion du système de protection a un impact direct sur la sûreté de ce dernier. En effet, les caractéristiques et l'efficacité des mesures d'entretien et de gestion de l'ouvrage en crise conditionnent en partie la sûreté de ce dernier et doivent ainsi être intégrées à la démarche d'estimation des probabilités conditionnelles de défaillance du système de protection.</p>
	<p><b>F. Vulnérabilité des enjeux</b></p> <p>La gestion de la sécurité dans la zone protégée conditionne en partie la vulnérabilité des enjeux. En effet, les mesures de gestion de la prévention et de la protection des enjeux présents dans la zone protégée, telles que par exemple celles de la mise en sécurité des populations, ont un impact direct sur la gravité des conséquences des inondations potentielles.</p>

## 2.a. Analyse de la gestion de la sécurité dans le milieu eau

Figure A1-1 : Liens avec les autres études élémentaires (Source : B. Beullac).

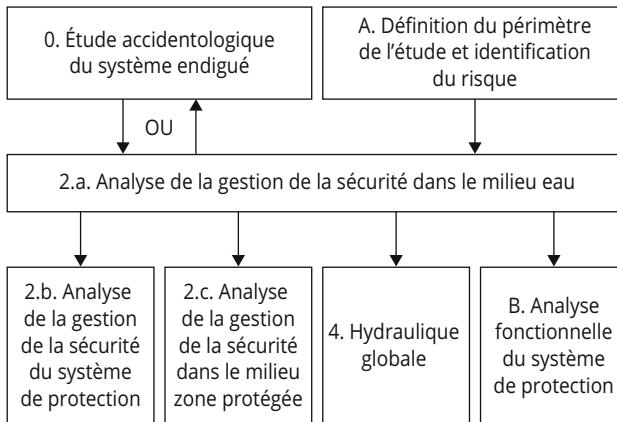
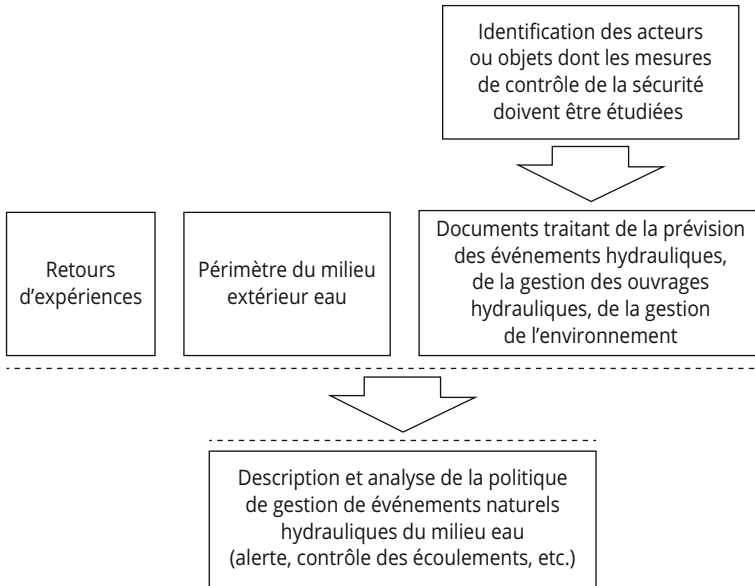


Figure A1-2 : Flux de données (Source : B. Beullac).



Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<p><b>0. Étude accidentologique du système endigué</b> Description des conséquences positives ou négatives, du point de vue du risque, des différentes mesures de gestion de la sécurité appliquées jusqu'à aujourd'hui.</p> <p><b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b> Définit le périmètre de l'étude et identifie les acteurs ou objets dont doivent être étudiées les mesures de contrôle de la sécurité.</p>
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	<p><b>Consignes existantes ou identifiables</b> Consignes écrites relatives à l'entretien du milieu eau.</p> <p>Retours d'expériences.</p>
	Données externes	<p>Documents traitant de la planification de la gestion du milieu eau et de ses composantes (gestion des ouvrages hydrauliques, prévision des événements hydraulique : crues, tempêtes, etc., gestion de l'environnement du milieu eau : géomorphologie, etc.).</p> <p>Retours d'expériences.</p>
	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	Retours d'expériences.
Alimentation d'autres études élémentaires		<p><b>0. Étude accidentologique du système endigué</b> Description des conséquences positives ou négatives, du point de vue du risque, des différentes mesures de gestion de la sécurité appliquées jusqu'à aujourd'hui.</p> <p><b>2.b. Analyse de la gestion de la sécurité du système de protection</b> Des interdépendances sont possibles. Par exemple, l'alerte liée au niveau d'eau dans le milieu eau, et donc issue de la gestion de la sécurité dans le milieu eau, peut être prévue comme le déclencheur d'actions de gestion de la sécurité du système de protection (surveillance, confortement d'urgence, etc.).</p>

Alimentation d'autres études élémentaires	<p><b>2.c. Analyse de la gestion de la sécurité dans le milieu zone protégée</b></p> <p>Des interdépendances sont possibles. Par exemple, l'alerte liée au niveau d'eau dans le milieu eau, et donc issue de la gestion de la sécurité dans le milieu eau, peut être prévue comme le déclencheur d'actions de gestion de la sécurité dans le milieu zone protégée (mise en sécurité des populations, etc.).</p>
	<p><b>4. Hydraulique globale (niveaux/événement)</b></p> <p>La gestion de la sécurité dans le milieu eau consiste notamment en des mesures ou installations qui contrôlent le comportement hydraulique du système hydrographique (barrages écrêteurs de crues, etc.). Ces dernières ont un impact direct sur la nature de l'aléa hydraulique (probabilité, cinétique et intensité des événements hydrauliques) et doivent être prises en compte dans sa caractérisation.</p>
	<p><b>B. Analyse fonctionnelle du système de protection</b></p> <p>La gestion de la sécurité du milieu eau est traitée dans l'analyse fonctionnelle externe du système de protection.</p> <p>Elle se caractérise par la mise en évidence de barrières de sécurité participant au contrôle et à l'identification des événements extrêmes.</p>

## 2.b. Analyse de la gestion de la sécurité du système de protection

Figure A1-3 : Liens avec les autres études élémentaires (Source : B. Beullac).

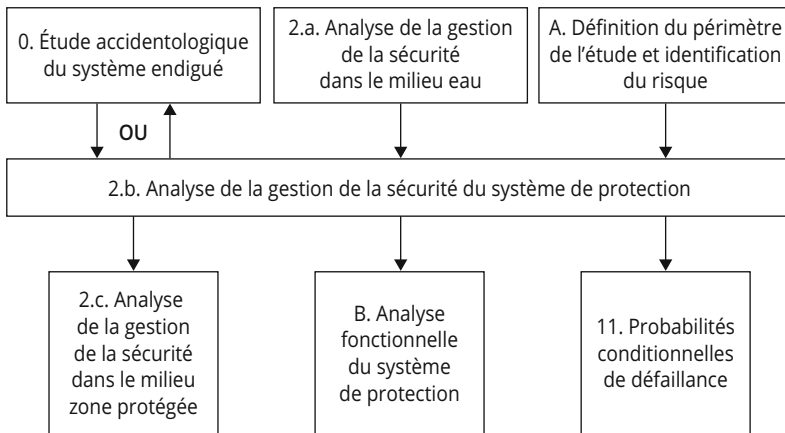
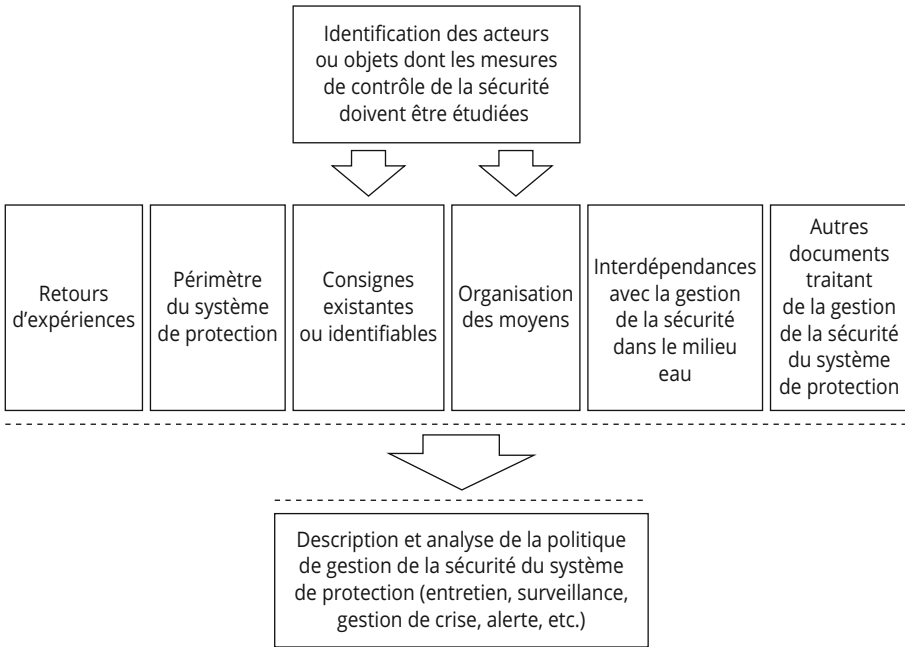


Figure A1-4 : Flux de données (Source : B. Beullac).



Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<b>0. Étude accidentologique du système endigué</b> Description des conséquences positives ou négatives, du point de vue du risque, des différentes mesures de gestion de la sécurité appliquées jusqu'à aujourd'hui.
		<b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b> Définit le périmètre de l'étude et identifie les acteurs ou objets dont doivent être étudiées les mesures de contrôle de la sécurité
		<b>2.a. Analyse de la gestion de la sécurité dans le milieu eau</b> Des interdépendances sont possibles. Par exemple, l'alerte liée au niveau d'eau dans le milieu eau, et donc issue de la gestion de la sécurité dans le milieu eau, peut être prévue comme le déclencheur d'actions de gestion de la sécurité du système de protection (surveillance, confortement d'urgence, etc.)
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	<b>Consignes existantes ou identifiables</b> Définissent en partie la politique de gestion de la sécurité du système de protection.
		<b>Organisation des moyens</b> Définit en partie la politique de gestion de la sécurité du système. Retours d'expériences.
	Données externes	Autres documents traitant de la gestion de la sécurité du système de protection : PCS, etc. Dans certains cas, des acteurs autres que le gestionnaire de digues peuvent intervenir sur le système de protection (par exemple, ouverture/fermeture des vannes en crise gérée par la commune, etc.).
		Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques Retours d'expériences.

Alimentation d'autres études élémentaires	<p><b>0. Étude accidentologique du système endigué</b></p> <p>Description des conséquences positives ou négatives, du point de vue du risque, des différentes mesures de gestion de la sécurité appliquées jusqu'à aujourd'hui.</p>
	<p><b>B. Analyse fonctionnelle du système de protection</b></p> <p>La gestion de la sécurité du système de protection est traitée dans l'analyse fonctionnelle externe de ce dernier. Elle se caractérise par la mise en évidence de barrières de sécurité participant à la sûreté de l'ouvrage.</p>
	<p><b>2.c. Analyse de la gestion de la sécurité dans le milieu zone protégée</b></p> <p>Des interdépendances sont possibles. Par exemple, l'alerte liée à la potentielle défaillance du système de protection, et donc issue de la gestion de la sécurité du système de protection, peut être prévue comme le déclencheur d'actions de gestion de la sécurité dans le milieu zone protégée (mise en sécurité des populations, etc.).</p>
	<p><b>11. Probabilités conditionnelles de défaillance</b></p> <p>La politique de gestion du système de protection a un impact direct sur la sûreté de ce dernier. En effet, les caractéristiques et l'efficacité des mesures d'entretien et de gestion de l'ouvrage en crise conditionnent en partie la sûreté de ce dernier et doivent ainsi être intégrées à la démarche d'estimation des probabilités conditionnelles de défaillance du système de protection.</p>

## 2.c. Analyse de la gestion de la sécurité dans la zone protégée

Figure A1-5 : Liens avec les autres études élémentaires (Source : B. Beullac).

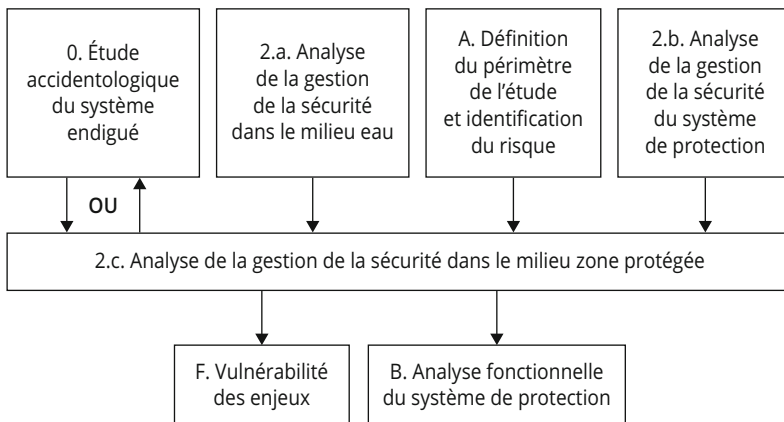
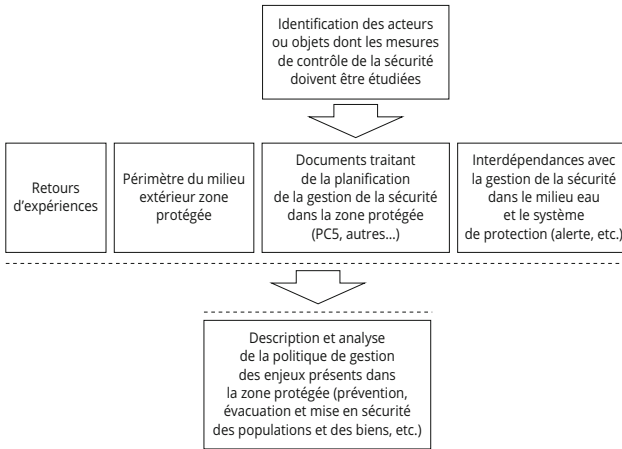


Figure A1-6 : Flux de données (Source : B. Beullac).



Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<b>0. Étude accidentologique du système endigué</b> Description des conséquences positives ou négatives, du point de vue du risque, des différentes mesures de gestion de la sécurité appliquées jusqu'à aujourd'hui.
		<b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b> Définit le périmètre de l'étude et identifie les acteurs ou objets dont doivent être étudiées les mesures de contrôle de la sécurité.
		<b>2.a. Analyse de la gestion de la sécurité dans le milieu eau</b> Des interdépendances sont possibles. Par exemple, l'alerte liée au niveau d'eau dans le milieu eau, et donc issue de la gestion de la sécurité dans le milieu eau, peut être prévue comme le déclencheur d'actions de gestion de la sécurité dans le milieu zone protégée (mise en sécurité des populations, etc.).
		<b>2.b. Analyse de la gestion de la sécurité du système de protection</b> Des interdépendances sont possibles. Par exemple, l'alerte liée à la potentielle défaillance du système de protection, et donc issue de la gestion de la sécurité du système de protection, peut être prévue comme le déclencheur d'actions de gestion de la sécurité dans le milieu zone protégée (mise en sécurité des populations, etc.).
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	Retours d'expériences.
Données externes	PCS, autres plans de gestion de crise, etc.	
	Retours d'expériences.	
Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	Retours d'expériences.	
Alimentation d'autres études élémentaires		<b>0. Étude accidentologique du système endigué</b> Description des conséquences positives ou négatives, du point de vue du risque, des différentes mesures de gestion de la sécurité appliquées jusqu'à aujourd'hui.

Alimentation d'autres études élémentaires

**F. Vulnérabilité des enjeux**

La gestion de la sécurité dans la zone protégée conditionne en partie la vulnérabilité des enjeux. En effet, les mesures de gestion de la prévention et de la protection des enjeux présents dans la zone protégée, telles que par exemple celles de la mise en sécurité des populations, ont un impact direct sur la gravité des conséquences des inondations potentielles.

**3. Morphodynamique globale**

Liens avec les autres études élémentaires : voir Figure 5-17

Flux de données : voir Figure 5-18

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b> Définit le périmètre de l'étude morphodynamique globale. Il correspond au périmètre des milieux eau.
		<b>4. Hydraulique globale (niveaux/événement)</b> La morphodynamique globale et l'hydraulique globale sont interdépendantes. En effet, les écoulements d'eau dans le milieu eau ont un impact direct sur la morphologie de ce dernier qu'ils viennent modifier et en particulier lors d'événements hydrauliques d'intensité exceptionnelle. En retour, la modification de la morphologie du milieu eau modifie les écoulements qui s'y déroulent.
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	<b>Études morphodynamiques passées</b>
		<b>CR visites de terrain passées</b>
		<b>Photos aériennes</b> Google Earth, géoportail, etc.
	Données externes	<b>Cartes géologiques</b> Cartes géologiques BRGM.
		<b>Topographie</b> Cartes IGN, BD Alti IGN, etc.
Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	<b>Végétation dans le système hydrographique (forêt alluviale, etc.)</b> Elle a un impact direct sur la dynamique sédimentaire.	
	<b>Activités humaines dans le système hydrographique (extraction de matériaux, etc.)</b> Peuvent influencer la dynamique sédimentaire.	
Alimentation d'autres études élémentaires	<b>6. Comportement morphodynamique local du milieu eau</b> La connaissance du comportement morphodynamique global (dynamique sédimentaire, etc.) permet de mieux appréhender les tendances morphodynamiques locales susceptibles de se dérouler au contact du système de protection (localisation et intensité des érosions de berges/pieds de digues et dépôts de sédiments).	
	<b>4. Hydraulique globale (niveaux/événement)</b> La morphodynamique globale et l'hydraulique globale sont interdépendantes. En effet, les écoulements d'eau dans le milieu eau ont un impact direct sur la morphologie de ce dernier qu'ils viennent modifier et en particulier lors d'événements hydrauliques d'intensité exceptionnelle. En retour, la modification de la morphologie du milieu eau modifie les écoulements qui s'y déroulent.	



## 4. Hydraulique globale (niveaux/événement)

Liens avec les autres études élémentaires : voir [Figure 5-23](#)

Flux de données : voir [Figure 5-24](#)

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<b>0. Étude accidentologique du système endigué</b> Description des différents événements hydrauliques ayant impacté le système de protection ou des systèmes de protection similaires.
		<b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b> Définit le périmètre de l'étude, c'est-à-dire celui des milieux eau.
		<b>2a. Analyse de la gestion de la sécurité dans le milieu eau</b> La gestion de la sécurité dans le système hydrographique consiste notamment en des mesures ou installations qui contrôlent le comportement hydraulique du système hydrographique (barrages écrêteurs de crues, etc.). Ces dernières ont un impact direct sur la nature de l'aléa hydraulique (probabilité, cinétique et intensité des événements hydrauliques) et doivent être prises en compte dans sa caractérisation.
		<b>3. Morphodynamique globale</b> La morphodynamique globale et l'hydraulique globale sont interdépendantes. En effet, les écoulements d'eau dans le milieu eau ont un impact direct sur la morphologie de ce dernier qu'ils viennent modifier et en particulier lors d'événements hydrauliques d'intensité exceptionnelle. En retour, la modification de la morphologie du milieu eau modifie les écoulements qui s'y déroulent.
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	<b>Études existantes sur les niveaux marins</b> Probabilité des niveaux, en conditions « normales », lors d'événements rares et exceptionnels (tempêtes, tsunamis, etc.).
		<b>Études hydrauliques d'ensemble existantes</b> Éventuelles modélisations hydrauliques dont les résultats permettent de disposer d'hydrogrammes pour différentes simulations et en tout point du cours d'eau considéré.
		<b>Études hydrologiques d'ensemble existantes</b> Études qui déterminent au droit des stations hydrométriques des débits historiques, des analyses statistiques ou des hydrogrammes.
	Données externes	<b>Relevés de stations de mesures</b> Données limnimétriques et débitmétriques au droit de stations de mesures pour caractériser les hydrogrammes de crue. Données sur les niveaux marins.
		<b>Topographie</b> Cartes IGN, BD Alti IGN, etc.
	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	
Alimentation d'autres études élémentaires	<b>0. Étude accidentologique du système endigué</b> Description des différents événements hydrauliques ayant impacté le système de protection ou des systèmes de protection similaires.	
	<b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b> La connaissance du comportement hydraulique du système hydrographique permet de valider le périmètre du milieu eau.	

Alimentation d'autres études élémentaires	<b>3. Morphodynamique globale</b> La morphodynamique globale et l'hydraulique globale sont interdépendantes. En effet, les écoulements d'eau dans le milieu eau ont un impact direct sur la morphologie de ce dernier qu'ils viennent modifier et en particulier lors d'événements hydrauliques d'intensité exceptionnelle. En retour, la modification de la morphologie du milieu eau modifie les écoulements qui s'y déroulent.
	<b>7. Comportement hydraulique local du milieu eau</b> La connaissance (probabilités, intensité, cinétique) des phénomènes hydrauliques, sources de sollicitations sur le système de protection, envisageables dans le milieu eau constitue la donnée permettant de définir la nature et l'intensité des sollicitations hydrauliques correspondantes sur le système de protection (ligne d'eau de sollicitation, cinétique, vitesses, etc.)

## 5. Caractérisation géotechnique et structurelle du système de protection

Liens avec les autres études élémentaires : voir Figure 5-26

Flux de données : voir Figure 5-27

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b> Définit les ouvrages pour lesquels une étude de caractérisation géotechnique et structurelle doit être menée.
		<b>1. Topographie</b> Permettre la définition de la géométrie des sections en travers types des différents tronçons du système de protection : production de profils en travers du système de protection. Une forte précision altimétrique est requise et notamment concernant la cote des points hauts (crête). Le levé à grand rendement de type Lidar présente des avantages pour les linéaires importants (temps, densité de points). Le levé topographique de géomètre classique est toutefois bien adapté aux linéaires de moindre importance. Permet la localisation des composants de digues au sein des sections en travers types du système de protection : cotation des points caractéristiques utiles à leur localisation en altitude. Une forte précision altimétrique est requise (le levé topographique de géomètre est le plus adapté).
		<b>Études de conception existantes</b> Plans et informations existants relatifs à la conception ou aux travaux sur les ouvrages.
		<b>Études géophysiques existantes</b> Résultats de reconnaissances géophysiques passées.
		<b>Études géotechniques existantes</b> Résultats de reconnaissances géotechniques passées.
		<b>Diagnostics antérieurs</b> CR visites de terrain passées. Identification et caractérisation de composants (VTA).
		<b>Données issues de bases de données</b> Base de données du sous-sol (BSS) développée par le BRGM.
		<b>Cartes géologiques (BRGM)</b> Pour caractériser les fondations.
		<b>Recherches historiques</b> Pour acquérir une connaissance des conditions et matériaux de construction de l'ouvrage.
		Données externes
	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	

Données d'entrée pouvant être utiles	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	<p><b>Reconnaisances géotechniques</b></p> <p>Pour définir les caractéristiques physiques (granulométrie, pourcentage d'argile, teneur en eau, perméabilité, etc.) et mécaniques (résistance au cisaillement, compressibilité, sensibilité à la dessiccation, etc.) des matériaux constitutifs de l'ouvrage.</p>
		<p><b>Reconnaisances géophysiques</b></p> <p>Pour identifier et cartographier la nature et la distribution des matériaux au sein de l'ouvrage étudié. Le choix quant à la méthode à appliquer et à l'interprétation des résultats est étroitement dépendant de la géométrie de l'ouvrage et de la nature supposée des matériaux. L'interprétation des résultats n'est vraiment pertinente que lorsqu'elle est croisée avec des données géotechniques. Sur cette base, les résultats peuvent ou non être extrapolés sur d'autres parties de l'ouvrage.</p>
Alimentation d'autres études élémentaires		<p><b>B. Analyse fonctionnelle du système de protection</b></p> <p>La définition des sections en travers types de tronçons de digues (nature et localisation des composants de digues) est la base sur laquelle est menée l'analyse fonctionnelle structurelle des tronçons de digues.</p>
		<p><b>6. Comportement morphodynamique local du milieu eau</b></p> <p>Les caractéristiques géotechniques et structurelles du système de protection sont à prendre en compte dans l'analyse du comportement morphodynamique local du milieu eau car elles conditionnent en partie la morphodynamique locale (érosion externe, etc.).</p>
		<p><b>11. Probabilités conditionnelles de défaillance du système de protection</b></p> <p>Les caractéristiques géotechniques et structurelles du système de protection constituent une donnée de base pour l'estimation de la performance des composants de digues et donc de la probabilité de réalisation des différents scénarios de défaillance structurelle des tronçons de digues.</p>
		<p><b>13. Caractérisation des brèches</b></p> <p>Les caractéristiques géotechniques et structurelles d'une digue et de sa fondation ont un impact direct sur leur résistance mécanique à l'érosion et leur comportement lors de l'élargissement d'une brèche. Pour cette raison, ces informations doivent être prises en compte dans la démarche de détermination de la géométrie et de la dynamique des brèches envisageables sur un système de protection.</p>

## 6. Comportement morphodynamique local du milieu eau

Liens avec les autres études élémentaires : voir [Figure 5-29](#)

Flux de données : voir [Figure 5-30](#)

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<p><b>0. Étude accidentologique du système endigué</b></p> <p>Description des différents phénomènes morphodynamiques ayant impacté le système de protection ou des systèmes de protection similaires.</p>
		<p><b>1. Topographie</b></p> <p>La connaissance de la topographie terrestre et subaquatique (bathymétrie) du milieu eau est une donnée indispensable pour la caractérisation du comportement morphodynamique local (au niveau du système de protection) du milieu eau.</p> <p>En effet, elle donne une lecture de la morphologie locale du milieu eau à l'instant du levé topographique, permet de comprendre la dynamique sédimentaire au niveau du système de protection et donc de prévoir les évolutions futures et les zones sensibles.</p> <p>Une topographie de précision moyenne mais avec une assez forte résolution spatiale sur l'ensemble du milieu eau suffit à cet exercice (un couplage de levés type Lidar et bathymétrie par sondeur acoustique semble le plus adapté).</p>

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b> Définir le périmètre de l'étude.
		<b>3. Morphodynamique globale</b> La connaissance du comportement morphodynamique global (dynamique sédimentaire, etc.) permet de mieux appréhender les tendances morphodynamiques locales susceptibles de se dérouler au contact du système de protection (localisation et intensité des érosions de berges/pieds de digues et dépôts de sédiments).
		<b>5. Géotechnique du système de protection</b> Les caractéristiques géotechniques et structurelles du système de protection sont à prendre en compte dans l'analyse du comportement morphodynamique local du milieu eau car elles conditionnent en partie la morphodynamique locale (érosion externe, etc.).
		<b>7. Comportement hydraulique local du milieu eau</b> L'hydraulique locale et la morphodynamique locale sont interdépendantes. En effet, les sollicitations hydrauliques sont la cause principale des modifications morphologiques du milieu eau et dans le même temps, les modifications morphologiques modifient le comportement hydraulique du milieu eau. L'hydraulique locale (niveau d'eau, vitesses et cinétique des écoulements au contact ou à proximité immédiate du système de protection) est donc une information indispensable pour l'étude de la morphodynamique locale.
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	<b>Études morphodynamiques locales passées</b>
		<b>CR visites de terrain passées</b>
	Données externes	<b>Retours d'expériences</b> Observation de modifications morphologiques passées.
		<b>Photos aériennes</b> Google Earth, géoportail, IGN, issues de vols Lidar, etc.
		<b>Cartes géologiques BRGM.</b> <b>Cartes hydrogéologiques BRGM.</b>
	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	<b>Visites de terrain</b>
		<b>Recherches d'archives</b>
	Alimentation d'autres études élémentaires	<b>0. Étude accidentologique du système endigué</b> Description des différents phénomènes morphodynamiques ayant impacté le système de protection ou des systèmes de protection similaires.
<b>7. Comportement hydraulique local du milieu eau</b> L'hydraulique locale et la morphodynamique locale sont interdépendantes. En effet, les sollicitations hydrauliques sont la cause principale des modifications morphologiques du milieu eau et dans le même temps, les modifications morphologiques modifient le comportement hydraulique du milieu eau. La morphodynamique locale (bilan et prévision des évolutions morphologiques verticales et latérales du milieu eau en interaction directe avec le système de protection) est donc une information indispensable pour l'étude de l'hydraulique locale.		
<b>B. Analyse fonctionnelle du système de protection</b> La morphodynamique locale consiste en des phénomènes externes pouvant menacer la pérennité du système de protection ou en modifier le fonctionnement, elle conditionne donc les fonctions portées par ce dernier (exemples de fonctions liées à la morphodynamique : protection contre l'érosion, maîtrise de la divagation du cours d'eau, fixation du trait de côte, etc.). La morphodynamique locale doit donc être prise en considération dans l'analyse fonctionnelle externe du système de protection.		

Alimentation d'autres études élémentaires	<p><b>11. Probabilités conditionnelles de défaillance</b></p> <p>Les phénomènes morphodynamiques au contact ou à proximité immédiate du système de protection sont source de sollicitations sur ce dernier. Ils constituent ainsi un facteur aggravant pour la sûreté du système de protection et doivent être pris en compte pour estimer la potentialité de défaillance des composants et sous-systèmes qui composent le système de protection.</p> <p>Les paramètres caractérisant ce type de sollicitations sont principalement ceux qui définissent la dynamique sédimentaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la quantification de l'action érosive locale envisageable</li> <li>- la quantification du dépôt de sédiments (colmatage) local envisageable, etc.</li> </ul>
---	--

## 7. Comportement hydraulique local du milieu eau

Liens avec les autres études élémentaires : voir [Figure 5-36](#)

Flux de données : voir [Figure 5-37](#)

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<p><b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b></p> <p>Définit périmètre de l'étude.</p>
		<p><b>1. Topographie</b></p> <p>La topographie terrestre et subaquatique (bathymétrie) du milieu eau est indispensable pour la caractérisation du comportement hydraulique local (au niveau du système de protection) de ce dernier.</p> <p>En effet, un écoulement d'eau sur une surface étant directement conditionné par la forme de cette dernière, il est nécessaire de connaître le relief du milieu eau avec suffisamment de précision altimétrique et planimétrique pour être capable d'en prévoir (modéliser) le comportement hydraulique (niveaux d'eau, débits, volumes).</p> <p>Une topographie de précision moyenne mais avec une assez forte résolution spatiale sur l'ensemble du milieu eau suffit à cet exercice (un couplage de levés type Lidar et bathymétrie par sondeur acoustique semble le plus adapté).</p>
		<p><b>4. Hydraulique globale (niveaux/événement)</b></p> <p>La connaissance (probabilités, intensité, cinétique) des phénomènes hydrauliques, sources d'actions sur le système de protection, envisageables dans le milieu eau, constitue la donnée permettant de définir la nature et l'intensité des actions hydrauliques correspondantes sur le système de protection (ligne d'eau, cinétique, vitesses, etc.).</p>
		<p><b>6. Comportement morphodynamique local du milieu eau</b></p> <p>L'hydraulique locale et la morphodynamique locale sont interdépendantes. En effet, les actions hydrauliques sont la cause principale des modifications morphologiques du milieu eau et dans le même temps, les modifications morphologiques modifient le comportement hydraulique du milieu eau. La morphodynamique locale (bilan et prévision des évolutions morphologiques verticales et latérales du milieu eau en interaction directe avec le système de protection) est donc une information indispensable pour l'étude de l'hydraulique locale.</p>
		<p><b>9. Autres actions et facteurs aggravants</b></p> <p>Certains facteurs aggravants peuvent influencer les hauteurs d'eau (vent, houle, embâcle de glace, embâcle, végétation, etc.). Ils doivent donc être pris en compte dans l'estimation des caractéristiques hydrauliques des écoulements au contact du système de protection.</p>

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<b>13. Caractérisation des brèches</b> La nature des actions hydrauliques (niveaux, vitesse, cinétique, charge sédimentaire, etc.) sur un tronçon de digue conditionne directement les détériorations correspondant à l'élargissement d'une brèche.
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	<b>Études hydrauliques locales existantes</b>
	Données externes	
	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	
Alimentation d'autres études élémentaires		<b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b> La connaissance du comportement hydraulique du milieu extérieur eau permet de valider le périmètre du système de protection.
		<b>B. Analyse fonctionnelle du système de protection</b> Les résultats de l'étude de l'hydraulique locale permettent la caractérisation des fonctions hydrauliques (en termes de niveaux d'eau) des ouvrages de protection directement connectés au milieu extérieur eau. Ils permettent in fine la détermination du niveau de protection du système de protection.  De plus, l'hydraulique locale étant une action pouvant menacer la pérennité du système de protection, elle conditionne les fonctions portées par ce dernier et doit être prise en compte dans l'analyse fonctionnelle externe du système de protection.
		<b>6. Comportement morphodynamique local du milieu eau</b> L'hydraulique locale et la morphodynamique locale sont interdépendantes. En effet, les actions hydrauliques sont la cause principale des modifications morphologiques du milieu eau et dans le même temps, les modifications morphologiques modifient le comportement hydraulique du milieu eau. L'hydraulique locale (niveau d'eau, vitesses et cinétique des écoulements au contact ou à proximité immédiate du système de protection) est donc une information indispensable pour l'étude de la morphodynamique locale.
		<b>11. Probabilités conditionnelles de défaillance</b> Les conditions hydrauliques envisageables au contact du système de protection (probabilité, intensité et cinétique des scénarios d'actions hydrauliques) sont des paramètres indispensables pour le calcul des probabilités de défaillance du système de protection. En effet, la charge hydraulique, la vitesse d'écoulement au contact ou encore le temps de mise en charge sont des phénomènes pouvant produire des détériorations sur le système de protection.
		<b>13. Caractérisation des brèches</b> Les caractéristiques hydrauliques des entrées d'eau dans la zone protégée ont un impact direct sur l'intensité (niveaux notamment) des actions sur le système de protection.
	<b>D. Probabilités des inondations</b> Les probabilités d'occurrence des inondations sont en partie conditionnées pas la probabilité des phénomènes hydrauliques rares et exceptionnels au contact du système de protection.	

## 8. Ouvrages inclus dans le système de protection

Liens avec les autres études élémentaires : voir Figure 5-43

Flux de données : voir Figure 5-44

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<p><b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b></p> <p>Définit le périmètre de l'étude élémentaire et liste les types d'ouvrages inclus à étudier.</p> <p><b>1. Topographie</b></p> <p>La topographie permet la localisation en altitude des ouvrages inclus : cotation des points caractéristiques utiles à leur localisation en altitude.</p> <p>Une forte précision altimétrique est requise (le levé topographique de géomètre est le plus adapté).</p>
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	Bilans passés
		Résultats d'études géophysiques existantes
		Plans divers
	Données externes	Comptes rendus de visites de terrain passées (VTA, etc.)
Cartes IGN		
Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	Photos aériennes	
Alimentation d'autres études élémentaires	Google Earth, géoportail, IGN, issues de vols Lidar, etc.	
	<b>Reconnaisances spécifiques :</b>	
	Géotechnique, visites de terrain, etc.	
		<p><b>B. Analyse fonctionnelle du système de protection</b></p> <p>L'identification, la localisation et la description des ouvrages inclus jouant un rôle hydraulique dans la protection contre les inondations (vannes, clapets, ouvrages de vidange, etc.) permettent de prendre en compte et d'analyser ces ouvrages dans l'analyse fonctionnelle en tant que sous-systèmes participant au fonctionnement du système de protection.</p> <p>Les ouvrages constituant des facteurs aggravant pour la sûreté du système de protection (canalisations, bâti encastré, etc.) correspondent à des éléments externes pouvant favoriser l'initiation de détériorations du système de protection. Ils doivent être pris en compte dans l'analyse fonctionnelle externe du système de protection.</p> <p><b>11. Probabilités conditionnelles de défaillance</b></p> <p>Les ouvrages constituant des facteurs aggravant pour la sûreté du système de protection (canalisations, bâti encastré, etc.) correspondent à des éléments externes pouvant favoriser l'initiation de détériorations du système de protection. Ils ont donc un impact sur la sûreté des composants de digues dans lesquels ils sont inclus et dont ils diminuent généralement la performance. Pour cette raison, ils doivent être pris en compte dans l'estimation de la probabilité de défaillance du système de protection.</p>



## 9. Autres actions et facteurs aggravants

Liens avec les autres études élémentaires : voir Figure 5-51

Flux de données : voir Figure 5-52

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<b>0. Étude accidentologique du système endigué</b> Description des différents phénomènes physiques ayant impacté le système de protection ou des systèmes de protection similaires.
		<b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b> Identifie les éventuels facteurs aggravants et actions à caractériser de manière approfondie et le périmètre de leur étude.
		<b>1. Topographie</b> La topographie peut être utile à la caractérisation de certaines actions ou facteurs aggravants. Par exemple : – localisation en altitude et en plan (cotation de points caractéristiques) de la végétation ligneuse présente sur les digues, – localisation en altitude et en plan (cotation de points caractéristiques) des terriers d'animaux ; etc.). Une forte précision altimétrique est requise (le levé topographique de géomètre est le plus adapté).
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	Dépend des facteurs aggravants identifiés.
	Données externes	Dépend des facteurs aggravants identifiés.
Alimentation d'autres études élémentaires	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	Visites de terrain (selon le sujet d'étude).  Recherches d'archives (selon le sujet d'étude).
		<b>0. Étude accidentologique du système endigué</b> Description des différents phénomènes physiques ayant impacté le système de protection ou des systèmes de protection similaires.
		<b>7. Comportement hydraulique local du milieu eau</b> Certains facteurs aggravants peuvent influencer les hauteurs d'eau (vent, houle, embâcle de glace, embâcle, végétation, etc.). Ils doivent donc être pris en compte dans l'estimation des caractéristiques hydrauliques des écoulements au contact du système de protection.
		<b>B. Analyse fonctionnelle du système de protection</b> Les diverses actions et facteurs aggravants envisageables sur un système de protection peuvent menacer la pérennité du système de protection. Elles conditionnent donc les fonctions que doit porter le système de protection pour leur résister afin d'assurer son rôle de protection.  Ces phénomènes doivent donc être pris en considération dans l'analyse fonctionnelle externe du système de protection.
	<b>11. Probabilités conditionnelles de défaillance</b> Les facteurs aggravants et actions identifiés peuvent favoriser ou causer la détérioration du système de protection. Ils ont donc un impact sur la sûreté des composants de digues dont ils diminuent généralement la performance. Pour cette raison, ils doivent être pris en compte dans l'estimation de la probabilité de défaillance du système de protection.	

### 9.a. Végétation sur et à proximité des digues

Figure A1-7 : Liens avec les autres études élémentaires (Source : B. Beullac).

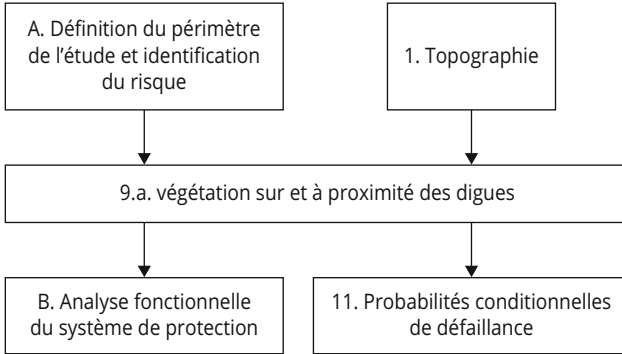
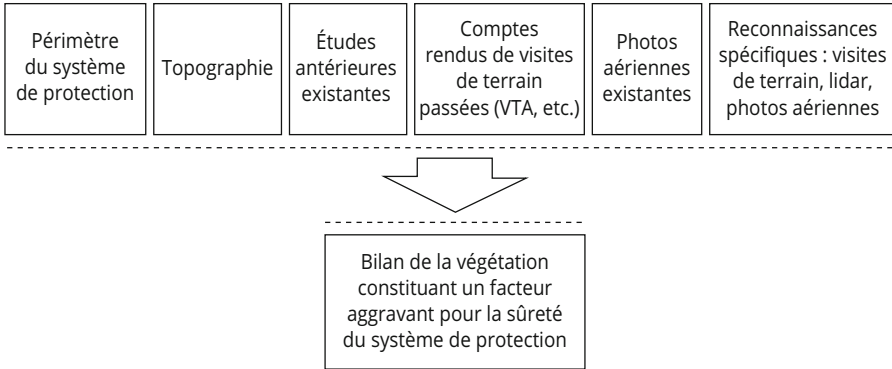


Figure A1-8 : Flux de données (Source : B. Beullac).



Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b> Identifie les éventuels facteurs aggravants et sollicitations externes à caractériser de manière approfondie et le périmètre de leur étude.
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	<b>1. Topographie</b> Un levé topographique spécifique peut permettre de localiser en altitude et en plan la végétation ligneuse présente sur les digues. Une forte précision altimétrique est requise (le levé topographique de géomètre est le plus adapté).
		<b>CR visites de terrain (VTA)</b> Études antérieures éventuelles
	Données externes	<b>Photographies aériennes</b> Google Earth, Géoportail, IGN, issues de vols Lidar, etc.
Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	<b>Reconnaisances spécifiques</b> Visites de terrain, lidar, photos aériennes, etc.	

Alimentation d'autres études élémentaires	<p><b>B. Analyse fonctionnelle du système de protection</b>          La végétation ligneuse sur un système de protection peut menacer la pérennité du système de protection. Elle conditionne ainsi les fonctions que doit porter le système de protection pour assurer son rôle de protection.</p> <p>Ce facteur aggravant doit donc être pris en considération dans l'analyse fonctionnelle du système de protection.</p>
	<p><b>11. Probabilités conditionnelles de défaillance</b>          La végétation ligneuse sur et à proximité des digues peut favoriser ou causer la détérioration du système de protection. Elle a donc un impact sur la sûreté de certains composants de digues dont elle diminue généralement la performance. Pour cette raison, elle doit être prise en compte dans l'estimation de la probabilité de défaillance du système de protection.</p>

## 9.b. Sismicité

Figure A1-9 : Liens avec les autres études élémentaires (Source : B. Beullac).

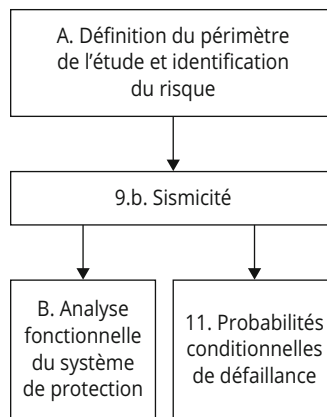
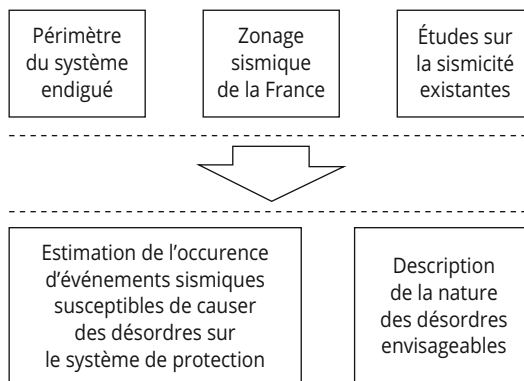


Figure A1-10 : Flux de données (Source : B. Beullac).



Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<p><b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b></p> <p>Identifie les éventuels facteurs aggravants et sollicitations externes à caractériser de manière approfondie et le périmètre de leur étude.</p>
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	<p><b>Études sur la sismicité existantes sur le système de protection</b></p>
	Données externes	<p><b>Zonage sismique de la France</b> (<a href="http://www.planseisme.fr">http://www.planseisme.fr</a>)</p>
		<p><b>Études sur la sismicité existantes</b></p> <p>Sur d'autres systèmes de protection similaires/issues de la recherche.</p>
Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	<p><b>Recherches historiques</b></p>	
Alimentation d'autres études élémentaires		<p><b>B. Analyse fonctionnelle du système de protection</b></p> <p>Les événements sismiques peuvent menacer la pérennité du système de protection. Ils conditionnent ainsi les fonctions que doit porter le système de protection pour assurer son rôle de protection. Cette sollicitation externe doit donc être prise en considération dans l'analyse fonctionnelle externe du système de protection.</p> <p><b>11. Probabilités conditionnelles de défaillance</b></p> <p>Les événements sismiques peuvent causer la détérioration du système de protection. Ils ont donc un impact sur la sûreté du système de protection dont elle peut diminuer généralement la performance. Pour cette raison, ils doivent être pris en compte dans l'estimation de la probabilité de défaillance du système de protection.</p>

### 9.c. Activité des animaux fousseurs

Figure A1-11 : Liens avec les autres études élémentaires (Source : B. Beullac).

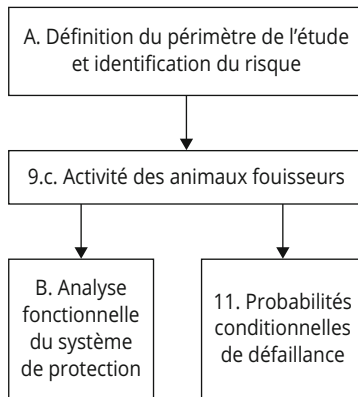
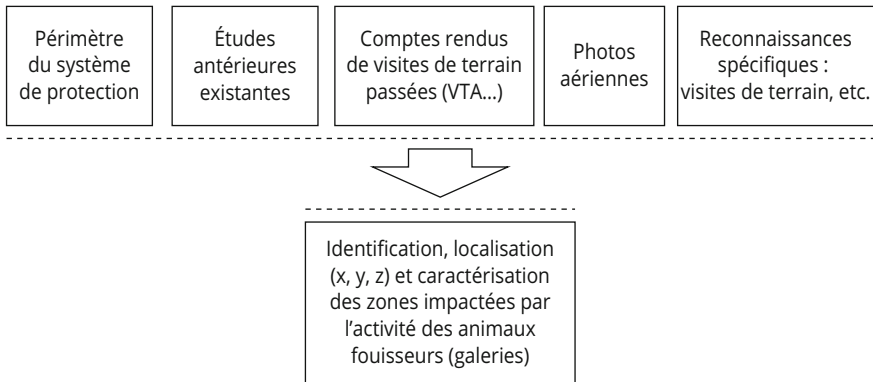


Figure A1-12 : Flux de données (Source : B. Beullac).



Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<p><b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b></p> <p>Identifie les éventuels facteurs aggravants et sollicitations externes à caractériser de manière approfondie et le périmètre de leur étude.</p> <p><b>1. Topographie</b></p> <p>Un levé topographique spécifique peut permettre de localiser en altitude et en plan les galeries d'animaux présentes dans les digues.</p> <p>Une forte précision altimétrique est requise (le levé topographique de géomètre est le plus adapté).</p>
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	<p><b>CR visites de terrain passées (VTA)</b></p> <p><b>Études antérieures éventuelles</b></p>
	Données externes	<p><b>Photographies aériennes</b></p> <p>Google Earth, Géoportail, IGN, issues de vols Lidar, etc.</p>
	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	<p><b>Reconnaitances spécifiques</b></p> <p>Visites de terrain, etc.</p>
Alimentation d'autres études élémentaires		<p><b>B. Analyse fonctionnelle du système de protection</b></p> <p>L'activité des animaux fouisseurs sur un système de protection peut menacer la pérennité du système de protection. Elle conditionne ainsi les fonctions que doit porter le système de protection pour assurer son rôle de protection.</p> <p>Ce facteur aggravant doit donc être pris en considération dans l'analyse fonctionnelle du système de protection.</p> <p><b>11. Probabilités conditionnelles de défaillance</b></p> <p>L'activité des animaux fouisseurs sur et à proximité des digues peut favoriser ou causer la détérioration du système de protection. Elle a donc un impact sur la sûreté de certains composants de digues dont elle diminue généralement la performance. Pour cette raison, elle doit être prise en compte dans l'estimation de la probabilité de défaillance du système de protection.</p>

## 10. Recensement des enjeux

Liens avec les autres études élémentaires : voir Figure 5-53

Flux de données : voir Figure 5-54

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b> Définit le périmètre de l'étude d'enjeu et les types d'enjeu à caractériser.
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	Études d'enjeu existantes
		Retour d'expérience d'événements passés
	Données externes	<b>Bases de données</b> Insee, SIRENE, fichiers fonciers de la DGFIP, BD TOPO, etc.
		Google Street View, photos aériennes, etc.
Documents d'urbanisme, d'aménagement du territoire, etc.		
Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	<b>Cartes IGN</b> Scan 25®, Corine Land Cover, etc.	
Lien avec les autres études élémentaires		<b>B. Analyse fonctionnelle du système de protection</b> Les enjeux de la zone protégée sont des éléments externes qui conditionnent la nature de la fonction principale de protection du système de protection. Leur identification et leur caractérisation doivent donc être prises en compte dans la phase d'analyse fonctionnelle externe du système de protection.
		<b>F. Vulnérabilité des enjeux</b> Le recensement et la caractérisation des enjeux déterminent les orientations méthodologiques pour l'évaluation de la vulnérabilité des enjeux aux inondations

## B. Analyse fonctionnelle du système de protection

Liens avec les autres études élémentaires : voir Figure 5-55

Flux de données : voir Figure 5-56

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b> Définit l'objet de l'analyse fonctionnelle (le système de protection) et les milieux extérieurs en interactions à caractériser en termes fonctionnels.
		<b>1. Topographie</b> La donnée topographique permet la définition de la géométrie du système de protection (profils en travers et profils en long). Une forte précision altimétrique est requise et notamment concernant la cote des points hauts (crête). Le levé à grand rendement de type Lidar présente des avantages pour les linéaires importants (temps, densité de points). Le levé topographique de géométrie classique est toutefois bien adapté aux linéaires de moindre importance.

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<p><b>2. Analyse de la gestion de la sécurité (milieu eau, système de protection, zone protégée)</b></p> <p>La gestion de la sécurité du système de protection est traitée dans l'analyse fonctionnelle externe de ce dernier.</p> <p>Elle se caractérise par la mise en évidence de barrières de sécurité participant à la sûreté de l'ouvrage.</p> <p><b>5. Caractérisation géotechnique et structurelle du système de protection</b></p> <p>La définition des sections en travers types de tronçons de digues (nature et localisation des composants de digues) est la base sur laquelle est menée l'analyse fonctionnelle structurelle des tronçons de digues.</p> <p><b>6. Comportement morphodynamique local du milieu eau</b></p> <p>La morphodynamique locale consiste en des phénomènes externes pouvant menacer la pérennité du système de protection ou en modifier le fonctionnement, elle conditionne donc les fonctions portées par ce dernier (exemples de fonctions liées à la morphodynamique : protection contre l'érosion, maîtrise de la divagation du cours d'eau, fixation du trait de côte, etc.).</p> <p>La morphodynamique locale doit donc être prise en considération dans l'analyse fonctionnelle externe du système de protection.</p> <p><b>7. Comportement hydraulique local du milieu eau</b></p> <p>Les résultats de l'étude de l'hydraulique locale permettent la caractérisation des fonctions hydrauliques (en termes de niveaux d'eau) des ouvrages de protection directement connectés au milieu extérieur eau. Ils permettent in fine la détermination du niveau de protection du système de protection.</p> <p>De plus, l'hydraulique locale étant une action pouvant menacer la pérennité du système de protection, elle conditionne les fonctions portées par ce dernier et doit être prise en compte dans l'analyse fonctionnelle externe du système de protection.</p> <p><b>8. Ouvrages inclus dans le système de protection</b></p> <p>L'identification, la localisation et la description des ouvrages inclus jouant un rôle hydraulique dans la protection contre les inondations (vannes, clapets, ouvrages de vidange, etc.) permettent de prendre en compte et d'analyser ces ouvrages dans l'analyse fonctionnelle en tant que sous-systèmes participant au fonctionnement du système de protection.</p> <p>Les ouvrages constituant des facteurs aggravant pour la sûreté du système de protection (canalisations, bâti encastré, etc.) correspondent à des éléments externes pouvant favoriser l'initiation de détériorations du système de protection. Ils doivent être pris en compte dans l'analyse fonctionnelle externe du système de protection.</p> <p><b>9. Autres actions et facteurs aggravants</b></p> <p>Les diverses actions et facteurs aggravants envisageables sur un système de protection peuvent menacer la pérennité du système de protection. Elles conditionnent donc les fonctions que doit porter le système de protection pour leur résister afin d'assurer son rôle de protection.</p> <p>Ces phénomènes doivent donc être pris en considération dans l'analyse fonctionnelle externe du système de protection.</p> <p><b>10. Recensement des enjeux</b></p> <p>Les enjeux de la zone protégée sont des éléments externes qui conditionnent la nature de la fonction principale de protection du système de protection. Leur identification et leur caractérisation doivent donc être prises en compte dans la phase d'analyse fonctionnelle externe du système de protection.</p>
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	



Données d'entrée pouvant être utiles	Données externes	
	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	
Alimentation d'autres études élémentaires		<p><b>C. Analyse de la défaillance du système de protection</b></p> <p>L'analyse fonctionnelle est la base sur laquelle repose l'analyse de la défaillance du système de protection. En effet, la décomposition fonctionnelle du système de protection permet d'en comprendre le fonctionnement et donc d'en identifier les dysfonctionnements possibles, ceux-ci correspondant à des défaillances de fonctions.</p>

### C. Analyse de la défaillance du système de protection

Liens avec les autres études élémentaires : voir [Figure 5-57](#)

Flux de données : voir [Figure 5-58](#)

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<p><b>0. Étude accidentologique du système endigué</b></p> <p>Description des différents mécanismes de détérioration observés sur le système de protection ou des systèmes de protection similaires.</p> <p>Description des défaillances non structurelles observées dans le passé.</p> <p><b>B. Analyse fonctionnelle du système de protection</b></p> <p>L'analyse fonctionnelle est la base sur laquelle repose l'analyse de la défaillance du système de protection. En effet, la décomposition fonctionnelle du système de protection permet d'en comprendre le fonctionnement et donc d'en identifier les dysfonctionnements possibles, ceux-ci correspondant à des défaillances de fonctions.</p>
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	
	Données externes	
	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	
Alimentation d'autres études élémentaires		<p><b>0. Étude accidentologique du système endigué</b></p> <p>Description des différents mécanismes de détérioration observés sur le système de protection ou des systèmes de protection similaires.</p> <p>Description des défaillances non structurelles observées dans le passé.</p> <p><b>11. Probabilités conditionnelles de défaillance</b></p> <p>Les scénarios de défaillances identifiés lors de l'analyse de la défaillance du système de protection constituent la base sur laquelle sont ensuite calculées les probabilités conditionnelles de défaillance du système de protection.</p> <p>En effet, les probabilités de réalisation de chacune des étapes des scénarios de défaillance peuvent alors être estimées afin d'aboutir à la probabilité de réalisation de chacun des scénarios de défaillance retenus pour l'analyse.</p>

## 11. Probabilités conditionnelles de défaillance

Liens avec les autres études élémentaires : voir Figure 5-59

Flux de données : voir Figure 5-60

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<p><b>C. Analyse de la défaillance du système de protection</b></p> <p>Les scénarios de défaillances identifiés lors de l'analyse de la défaillance du système de protection constituent la base sur laquelle sont ensuite calculées les probabilités conditionnelles de défaillance du système de protection.</p> <p>En effet, les probabilités de réalisation de chacune des étapes des scénarios de défaillance peuvent alors être estimées afin d'aboutir à la probabilité de réalisation de chacun des scénarios de défaillance retenus pour l'analyse.</p>
		<p><b>2. Analyse de la gestion de la sécurité du système de protection</b></p> <p>La politique de gestion du système de protection a un impact direct sur la sûreté de ce dernier. En effet, les caractéristiques et l'efficacité des mesures d'entretien et de gestion de l'ouvrage en crise conditionnent en partie la sûreté de ce dernier et doivent ainsi être intégrées à la démarche d'estimation des probabilités conditionnelles de défaillance du système de protection.</p>
		<p><b>5. Caractérisation géotechnique et structurelle du système de protection</b></p> <p>Les caractéristiques géotechniques et structurelles du système de protection constituent une donnée de base pour l'estimation de la performance des composants de digues et donc de la probabilité de réalisation des différents scénarios de défaillance structurelle des tronçons de digues.</p>
		<p><b>6. Comportement morphodynamique local du milieu eau</b></p> <p>Les phénomènes morphodynamiques au contact ou à proximité immédiate du système de protection ont un impact sur ce dernier. Ils constituent ainsi un facteur aggravant pour la sûreté du système de protection et doivent être pris en compte pour estimer la potentialité de défaillance des composants et sous-systèmes qui composent le système de protection.</p> <p>Les paramètres caractérisant ce type de phénomènes sont principalement ceux qui définissent la dynamique sédimentaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la quantification de l'action érosive locale envisageable,</li> <li>- la quantification du dépôt de sédiments (colmatage) local envisageable, etc.</li> </ul>
		<p><b>7. Comportement hydraulique local du milieu eau</b></p> <p>Les conditions hydrauliques envisageables au contact du système de protection (probabilité, intensité et cinétique des scénarios d'actions hydrauliques) sont des paramètres indispensables pour le calcul des probabilités de défaillance du système de protection. En effet, la charge hydraulique, la vitesse d'écoulement au contact ou encore le temps de mise en charge sont des phénomènes pouvant produire des détériorations sur le système de protection.</p>
		<p><b>8. Ouvrages inclus dans le système de protection</b></p> <p>Les ouvrages constituant des facteurs aggravant pour la sûreté du système de protection (canalisations, bâti encastré, etc.) correspondent à des éléments externes pouvant favoriser l'initiation de détériorations du système de protection. Ils ont donc un impact sur la sûreté des composants de digues dans lesquels ils sont inclus et dont ils diminuent généralement la performance. Pour cette raison, ils doivent être pris en compte dans l'estimation de la probabilité de défaillance du système de protection.</p>

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<b>9. Autres actions et facteurs aggravants</b> Les facteurs aggravants et actions identifiés peuvent favoriser ou causer la détérioration du système de protection. Ils ont donc un impact sur la sûreté des composants de digues dont ils diminuent généralement la performance. Pour cette raison, ils doivent être pris en compte dans l'estimation de la probabilité de défaillance du système de protection.
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	<b>Diagnostics de digues existants</b>
	Données externes	
	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	
Alimentation d'autres études élémentaires		<b>12. Choix des scénarios d'inondation</b> L'estimation des probabilités conditionnelles (pour différents niveaux d'eau, durée, etc.) de défaillance du système de protection (brèche ou non) est une donnée importante pour le choix des scénarios d'inondation les plus probables.

## 12. Choix des scénarios d'inondation à caractériser

Liens avec les autres études élémentaires : voir [Figure 5-63](#)

Flux de données : voir [Figure 5-64](#)

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<b>10. Recensement des enjeux</b> La nature et la localisation des enjeux permettent d'identifier les scénarios susceptibles de causer des accidents.
		<b>C. Analyse de la défaillance du système de protection</b> Les résultats de l'analyse de la défaillance du système de protection, et plus particulièrement l'ensemble des scénarios d'inondation envisageables, constituent la base sur laquelle est fait le choix des scénarios d'inondation à caractériser.
		<b>11. Probabilités conditionnelles de défaillance du système de protection</b> L'estimation des probabilités conditionnelles (pour différents niveaux d'eau, durée, etc.) de défaillance du système de protection (brèche ou non) est une donnée importante pour le choix des scénarios d'inondation les plus probables.
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	
	Données externes	
	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	
Alimentation d'autres études élémentaires		<b>13. Caractérisation des brèches</b> Le choix des scénarios d'inondation définit les brèches qui seront à caractériser dans la suite de l'étude.
		<b>D. Probabilité des scénarios d'inondations</b> Le choix des scénarios d'inondation à caractériser décrit les spécificités des scénarios d'inondation qui sont à considérer.
		<b>E. Intensité et cinétique des inondations</b> Le choix des scénarios d'inondation à caractériser définit les scénarios d'inondation qui sont à considérer et leurs spécificités.

### 13. Caractérisation des brèches (géométrie, dynamique, hydraulique)

Liens avec les autres études élémentaires : voir Figure 5-67

Flux de données : voir Figure 5-68

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	0. Étude accidentologique du système endigué Description des brèches du passé.
		5. Caractérisation géotechnique et structurelle du système de protection Les caractéristiques géotechniques et structurelles d'une digue et de sa fondation ont un impact direct sur leur résistance mécanique à l'érosion et leur comportement lors de l'élargissement d'une brèche. Pour cette raison, ces informations doivent être prises en compte dans la démarche de détermination de la géométrie et de la dynamique des brèches envisageables sur un système de protection.
		7. Comportement hydraulique local du milieu eau La nature des actions hydrauliques (niveaux, vitesse, cinétique, charge sédimentaire, etc.) sur un tronçon de digue conditionne directement les détériorations correspondant à l'élargissement d'une brèche.
		12. Choix des scénarios d'inondation à caractériser Le choix des scénarios d'inondation définit les brèches qui seront à caractériser dans cette étude élémentaire.
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	Retours d'expériences d'événements passés sur le système de protection étudié.
	Données externes	Recherche : publications scientifiques.
	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	Recherches d'archives : retours d'expériences d'événements passés sur d'autres systèmes de protection similaires.
Alimentation d'autres études élémentaires		E. Intensité et cinétique des scénarios d'inondation La géométrie et la cinétique d'élargissement des brèches définissent en partie les caractéristiques hydrauliques des écoulements d'eau dans les brèches et donc de certaines des entrées d'eau dans la zone protégée

### D. Probabilités des inondations

Liens avec les autres études élémentaires : voir Figure 5-74

Flux de données : voir Figure 5-75

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	7. Comportement hydraulique local du milieu eau Les probabilités d'occurrence des inondations sont en partie conditionnées pas la probabilité des phénomènes hydrauliques rares et exceptionnels au contact du système de protection.
		11. Probabilité conditionnelle de défaillance Estimation des probabilités conditionnelles (pour différents niveaux d'eau, durée, etc.) de défaillance du système de protection (brèche ou non).
		12. Choix des scénarios d'inondation à caractériser Le choix des scénarios d'inondation à caractériser décrit les spécificités des scénarios d'inondation qui sont à considérer.
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	
	Données externes	

Données d'entrée pouvant être utiles	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	
Alimentation d'autres études élémentaires		<p><b>H. Estimation du risque d'inondation</b></p> <p>La probabilité de l'inondation est l'une des deux composantes du risque (risque = probabilité × gravité des conséquences). Elle est donc indispensable à son estimation.</p>

## E. Intensité et cinétique des inondations

Liens avec les autres études élémentaires : voir Figure 5-76

Flux de données : voir Figure 5-77

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<p><b>0. Étude accidentologique du système endigué</b></p> <p>Description des inondations du passé.</p>
		<p><b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b></p> <p>Définit la zone (périmètre de la zone protégée) sur laquelle doit être menée l'étude élémentaire et les phénomènes hydrauliques à caractériser.</p>
		<p><b>1. Topographie</b></p> <p>La topographie de la zone protégée est une donnée indispensable à la caractérisation de son fonctionnement hydraulique en cas d'inondation.</p> <p>En effet, l'écoulement de l'eau sur une surface étant directement conditionné par la forme de cette dernière, il est nécessaire de connaître le relief de la zone protégée avec suffisamment de précision altimétrique et planimétrique pour être capable d'en prévoir (modéliser) le comportement hydraulique (hauteurs d'eau, vitesses horizontales, vitesses verticales, temps de propagation) en cas d'inondation.</p>
		<p><b>13. Caractérisation des brèches</b></p> <p>La connaissance des caractéristiques hydrauliques des brèches est une information indispensable pour l'estimation de l'intensité et de la cinétique des inondations qui se déroulent dans la zone protégée.</p>
		<p><b>12. Choix des scénarios d'inondation à caractériser</b></p> <p>Le choix des scénarios d'inondation à caractériser décrit les spécificités des scénarios d'inondation qui sont à considérer.</p>
		<p><b>F. Vulnérabilité des enjeux</b></p> <p>Pour faciliter l'estimation de la gravité des conséquences des inondations, il est indispensable que les classes d'intensité de l'aléa d'inondation et les classes de vulnérabilité des enjeux présents dans la zone protégée soient compatibles.</p> <p>En effet, la gravité des scénarios d'inondation correspond au croisement entre intensité de l'aléa d'inondation et vulnérabilité des enjeux.</p>
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	
Données externes		
Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques		
Alimentation d'autres études élémentaires		<p><b>A. Définition du périmètre de l'étude et identification du risque</b></p> <p>La connaissance du comportement hydraulique de la zone protégée permet de valider le périmètre de ce dernier ainsi que du système de protection.</p>

Alimentation d'autres études élémentaires	<p><b>F. Vulnérabilité des enjeux</b></p> <p>Pour faciliter l'estimation de la gravité des conséquences des inondations, il est indispensable que les classes d'intensité de l'aléa d'inondation et les classes de vulnérabilité des enjeux présents dans la zone protégée soient compatibles.</p> <p>En effet, la gravité des scénarios d'inondation correspond au croisement entre intensité de l'aléa d'inondation et vulnérabilité des enjeux.</p>
	<p><b>G. Gravité des conséquences</b></p> <p>La gravité des conséquences d'un scénario d'inondation correspond au croisement entre l'intensité de l'aléa d'inondation propre à ce scénario d'inondation et la vulnérabilité des enjeux présents dans la zone protégée.</p>

## F. Vulnérabilité des enjeux aux inondations

Liens avec les autres études élémentaires : voir Figure 5-78

Flux de données : voir Figure 5-79

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<p><b>0. Étude accidentologique du système endigué</b></p> <p>Description des accidents ayant touché les enjeux, du fait de la propagation d'inondations dans les zones protégées considérées.</p>
		<p><b>2. Analyse de la gestion de la sécurité</b></p> <p>La gestion de la sécurité dans la zone protégée conditionne en partie la vulnérabilité des enjeux. En effet, les mesures de gestion de la prévention et de la protection des enjeux présents dans la zone protégée, telles que par exemple celles de la mise en sécurité des populations, ont un impact direct sur la gravité des conséquences des inondations potentielles.</p>
		<p><b>10. Recensement des enjeux</b></p> <p>Le recensement et la nature des enjeux définissent les types d'enjeux devant être caractérisés en termes de vulnérabilité aux inondations.</p>
		<p><b>E. Intensité et cinétique des inondations</b></p> <p>Pour faciliter l'estimation de la gravité des conséquences des inondations, il est indispensable que les classes d'intensité de l'aléa d'inondation et les classes de vulnérabilité des enjeux présents dans la zone protégée soient cohérentes.</p> <p>En effet, la gravité des scénarios d'inondation, qui est l'étape suivante, correspond au croisement entre intensité de l'aléa d'inondation et vulnérabilité des enjeux.</p>
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	Éventuelles études de vulnérabilité antérieures, étude d'enjeux PPRI ou TRI, REX d'accidents.
Données externes	Publications scientifiques, méthodes.	
Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	Visites de terrain (hauteur premier plancher habitable, etc.).	
Alimentation d'autres études élémentaires	<p><b>G. Gravité des conséquences</b></p> <p>La gravité des conséquences d'un scénario d'inondation correspond au croisement entre l'intensité de l'aléa d'inondation propre à ce scénario d'inondation et la vulnérabilité des enjeux présents dans la zone protégée.</p>	

Alimentation d'autres études élémentaires	<p><b>E. Intensité et cinétique des inondations</b></p> <p>Pour faciliter l'estimation de la gravité des conséquences des inondations, il est indispensable que les classes d'intensité de l'aléa d'inondation et les classes de vulnérabilité des enjeux présents dans la zone protégée soient compatibles.</p> <p>En effet, la gravité des scénarios d'inondation correspond au croisement entre intensité de l'aléa d'inondation et vulnérabilité des enjeux.</p>
---	--

## G. Gravité des conséquences

Liens avec les autres études élémentaires : voir [Figure 5-80](#)

Flux de données : voir [Figure 5-81](#)

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<p><b>E. Intensité et cinétique des inondations</b></p> <p>La gravité des conséquences d'un scénario d'inondation correspond au croisement entre l'intensité de l'aléa d'inondation propre à ce scénario d'inondation et la vulnérabilité des enjeux présents dans la zone protégée.</p>
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	<p><b>F. Vulnérabilité des enjeux</b></p> <p>La gravité des conséquences d'un scénario d'inondation correspond au croisement entre l'intensité de l'aléa d'inondation propre à ce scénario d'inondation et la vulnérabilité des enjeux présents dans la zone protégée.</p>
	Données externes	
	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	
Alimentation d'autres études élémentaires		<p><b>H. Estimation du risque d'inondation</b></p> <p>La gravité des conséquences est l'une des deux composantes du risque (risque = probabilité × gravité des conséquences). Elle est donc indispensable à son estimation.</p>

## H. Estimation du risque d'inondation

Liens avec les autres études élémentaires : voir [Figure 5-82](#)

Flux de données : voir [Figure 5-83](#)

Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<p><b>D. Probabilités des inondations</b></p> <p>La probabilité de l'inondation est l'une des deux composantes du risque (risque = probabilité × gravité des conséquences). Elle est donc indispensable à son estimation.</p>
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	<p><b>G. Gravité des conséquences</b></p> <p>La gravité des conséquences est l'une des deux composantes du risque (risque = probabilité × gravité des conséquences). Elle est donc indispensable à son estimation.</p>
	Données externes	



Données d'entrée pouvant être utiles	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	
Alimentation d'autres études élémentaires		<b>I. Évaluation du risque d'inondation</b> L'évaluation du risque consiste à attribuer un niveau d'acceptabilité au risque précédemment estimé. L'estimation du risque en est donc une étape préliminaire.

## 14. Acceptabilité du risque d'inondation

Figure A1-13 : Liens avec les autres études élémentaires (Source : B. Beullac).

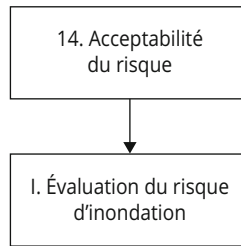
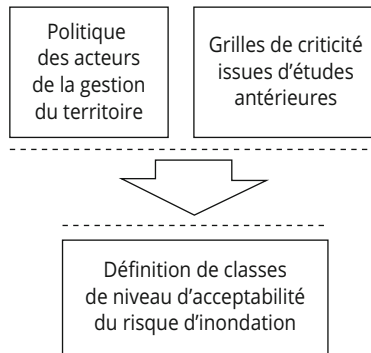


Figure A1-14 : Flux de données (Source : B. Beullac).



Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	Grilles de criticité issues d'études antérieures.
	Données externes	Politique des acteurs responsables de la gestion du territoire.
		Grilles de criticité issues d'études antérieures.
Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques		
Alimentation d'autres études élémentaires		<b>I. Évaluation du risque d'inondation</b> La définition des niveaux d'acceptabilité permet l'évaluation du risque précédemment estimé.

## I. Évaluation du risque d'inondation

Figure A1-15 : Liens avec les autres études élémentaires (Source : B. Beullac).

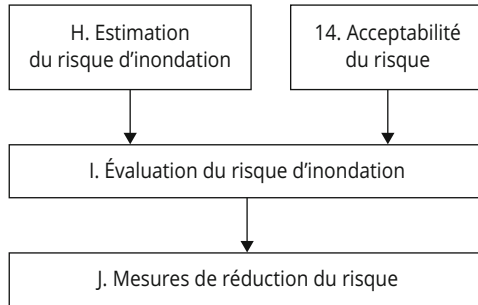
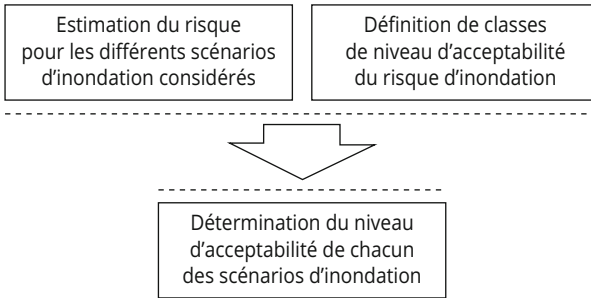


Figure A1-16 : Flux de données (Source : B. Beullac).



Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<b>14. Acceptabilité du risque</b> La définition des niveaux d'acceptabilité permet l'évaluation du risque précédemment estimé.  <b>H. Estimation du risque d'inondation</b> L'évaluation du risque consiste à attribuer un niveau d'acceptabilité au risque précédemment estimé. L'estimation du risque en est donc une étape préliminaire.
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	
	Données externes	
	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	
Alimentation d'autres études élémentaires		<b>J. Mesures de réduction du risque</b> La priorisation des mesures de réduction du risque dépend directement des résultats de l'évaluation du risque.

## J. Mesures de réduction du risque d'inondation

Figure A1-17 : Liens avec les autres études élémentaires (Source : B. Beullac).

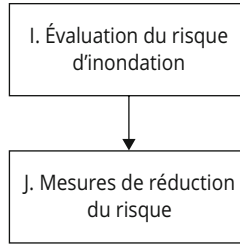
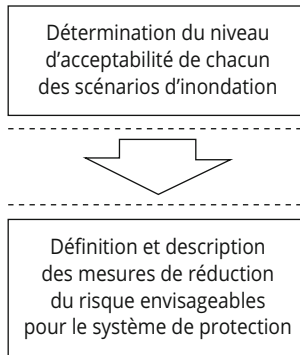


Figure A1-18 : Flux de données (Source : B. Beullac).



Données d'entrée pouvant être utiles	Résultats d'études élémentaires	<b>I. Évaluation du risque d'inondation</b> La priorisation des mesures de réduction du risque dépend directement des résultats de l'évaluation du risque.
	Données disponibles auprès du gestionnaire de digues	
	Données externes	
	Données issues de reconnaissances ou recherches spécifiques	
Alimentation d'autres études élémentaires		



## ANNEXE 2

# Principaux textes réglementaires relatifs aux digues



### *Recueil et historique des principaux textes réglementaires relatifs aux digues de protection contre les inondations (version actualisée de juin 2017)*

(1) Circulaire interministérielle du 24 janvier 1994 relative à la prévention des inondations et à la gestion des zones inondables

Volonté de durcissement de la politique de l'État en matière de gestion des zones inondables, autour de trois principes : interdiction de toute construction nouvelle dans les zones inondables, contrôle strict de l'extension de l'urbanisation en zones d'expansion des crues, limitation des endiguements et remblaiements nouveaux. La cartographie des zones inondables (atlas, PER, PSS, carte R111-3, etc.) constitue le moyen à privilégier pour la mise en œuvre de cette politique.

(2) Circulaire Interministérielle du 17 août 1994 relative aux modalités de gestion des travaux contre les risques d'inondation

Consécutives aux inondations « médiatiques » de la Camargue au cours de l'hiver 1993-1994. Il s'agit du premier texte demandant aux préfets de dresser un inventaire des structures gestionnaires des digues et, si possible, des ouvrages eux-mêmes.

(3) Circulaire DE/SDGE/BPIDPF-MPN/n° 629 du 28 mai 1999 du ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, relative au recensement des digues de protection des lieux habités contre les inondations fluviales et maritimes

Lancement de l'inventaire national des digues, de leurs gestionnaires et des zones protégées, à l'appui du logiciel « DIGUES ». Lettre MEDD-DE du 7 août 2002 de « relance » auprès des DIREN.

(4) [Pour mémoire, le décret 93-743 ayant été abrogé] Décret n° 2002-202 du 13 février 2002 modifiant le décret n° 93-743 du 29 mars 1993 relatif à la nomenclature des opérations soumises à autorisation ou déclaration en application de l'article 10 de la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau

Insertion, dans la nomenclature, de la rubrique « 2.5.4. Installations, ouvrages, digues ou remblais, d'une hauteur maximale supérieure à 0,50 m au-dessus du niveau du terrain naturel dans le lit majeur du cours d'eau ». Par ce décret, ces installations (dont les digues) devenaient désormais **soumises à autorisation ou à déclaration** en fonction de la surface et/ou de la largeur occupée dans le lit majeur.

(5) Arrêté du 13 février 2002 [modifié par l'arrêté du 27 juillet 2006] fixant les prescriptions générales applicables aux installations ou ouvrages soumis à déclaration en application des articles L. 214-1 à L. 214-6 du code de l'environnement et relevant de la rubrique 2.5.4 (2° et 3°) de la nomenclature annexée au décret n° 93-743 du 29 mars 1993 modifié

Ainsi que le stipule la **circulaire (7)** ci-dessous, ces prescriptions générales applicables aux remblais soumis à **déclaration** doivent constituer des bases minimums de prescriptions pour les arrêtés spécifiques à faire prendre pour les remblais soumis à **autorisation**.

*[La modification de juillet 2006 réduit le champ d'application de l'arrêté de février 2002 aux remblais en lit majeur (rubrique 3220). Elle comprend des précisions sur la distinction digues/remblais, ne fait plus mention du caractère obligatoire de déversoirs, et ne fixe plus de valeur minimale pour la crue de surverse (aujourd'hui crue de danger)].*

(6) Circulaire interministérielle MATE/SDPGE/BPIDPF/CCG et METL n° 234 du 30 avril 2002 relative à la politique de l'État en matière de risques naturels prévisibles et de gestion des espaces situés derrière les digues de protection contre les inondations et les submersions marines

Rappel des principes de la politique de l'État en matière du risque de submersion marine ou d'inondation, et formulation de sa position en ce qui concerne l'urbanisation dans les zones endiguées, notamment dans le cadre de l'élaboration des plans de prévention des risques d'inondation (PPRI). Elle traite en particulier des conditions à respecter pour autoriser des constructions en arrière des digues (à titre indicatif, interdiction à moins de 50 m ou si plus d'un mètre d'eau en cas de brèche).

(7) Circulaire DE/SDGE/BPIDPF-CCG/n° 426 du 24 juillet 2002 du ministère de l'Écologie et du Développement durable relative à la mise en œuvre du décret n° 2002-202 du 13 février 2002

Détaille les conditions d'application de la rubrique 2.5.4 (introduite par le décret de février 2002) de la nomenclature, notamment la transparence hydraulique.

(8) [Pour mémoire, abrogée] Circulaire interministérielle DE/SDGE/BPIDPF-CCG/n° 8 du 6 août 2003 du ministère chargé de l'Intérieur et du ministère de l'Écologie et du Développement durable, relative à l'organisation du contrôle des digues de protection contre les inondations fluviales intéressant la sécurité publique

Instaure un dispositif de contrôle visant les digues « intéressant – ou susceptibles d'intéresser – la sécurité publique » (à l'instar de celui qui existait pour les barrages), avec définition des obligations qui incombent aux gestionnaires et/ou aux propriétaires, d'une part, aux services de contrôle (en l'occurrence, services chargés de la police de l'eau), d'autre part. Les ouvrages concernés sont : les digues de protection contre les débordements de cours d'eau, y compris torrentiels, ainsi que les digues construites dans le cadre d'aménagements de « ralentissement dynamique ».

(9) Lettre-circulaire interministérielle du 21 janvier 2004 du ministère chargé de l'Équipement et du ministère de l'Écologie et du Développement durable, relative à la maîtrise de l'urbanisme et à l'adaptation des constructions en zone inondable et à destination des préfets des départements 07, 11, 13, 26, 30, 34, 48, 66 et 84.

À la suite des retours d'expériences apportés par les crues de la dernière décennie, mise en œuvre d'un plan d'actions concernant la gestion de l'urbanisme en zone inondable et fondé sur 4 axes :

- la maîtrise du développement urbain ;
- l'adaptation des constructions ;
- la gestion des ouvrages de protection ;
- l'organisation des actions et des moyens.

Relativement à l'axe « gestion des ouvrages de protection », rappel de la nécessité de ne pas augmenter la vulnérabilité derrière les digues et de prendre en compte l'hypothèse de la rupture des ouvrages de protection.

(10) [Circulaire notablement modifiée par celle du 8 juillet 2010] Circulaire interministérielle du 26 novembre 2004 des ministères chargés de l'Intérieur, de la Santé, de l'Équipement, de l'Agriculture et du ministère de l'Écologie et du Développement durable, relative à la déclinaison de la politique de l'État en département dans le domaine de l'eau et à l'organisation de la police de l'eau et des milieux aquatiques

Définition d'une nouvelle organisation de la police de l'eau devant aboutir, à l'échéance du 1<sup>er</sup> janvier 2007, à la désignation par le préfet d'un service départemental **unique** chargé de la police de l'eau, dont le personnel devra être regroupé. Cette réforme vise à une meilleure lisibilité et efficacité du dispositif. Les moyens affectés aux missions de police devront être, a minima, maintenus, avec obligation de mobiliser des agents à temps plein. Les DIREN assurent l'animation et la coordination des services de police de l'eau. La police de l'eau des grands axes hydrauliques du DPF (fleuves et canaux) relève d'une organisation particulière. La circulaire comporte trois annexes :

- l'annexe I concerne la mise en place du service unique de l'eau ;
- l'annexe II a trait aux missions interservices de l'eau (MISE) ;
- l'annexe III précise le rôle des DIREN et de l'échelon régional.

L'importance des missions de contrôle de sécurité des digues et des barrages y est explicitement rappelée.

(11) [Pour mémoire, abrogés] Décrets n° 2006-881 et 2006-880 du 17 juillet 2006 modifiant les décrets n° 93-743 et 93-742 du 29 mars 1993 relatifs à la nomenclature et aux procédures applicables aux opérations soumises à autorisation ou déclaration en application de l'article 10 de la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau

En application de ces décrets, **toutes les digues** « de protection contre les inondations et submersions » relèvent désormais du régime de l'**autorisation**.

*[Ces décrets ont été abrogés par le décret de codification de la partie réglementaire du code de l'environnement. La nomenclature figure désormais au tableau de l'article R. 214-1 du code de l'environnement, la procédure est définie aux articles R. 214-2 à R. 214-56 du Code de l'environnement.]*

(12) Décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques et modifiant le code de l'environnement (JO du 13 décembre 2007)

Concerne les barrages et les digues, et introduit les nouvelles notions de visite technique approfondie, revue de sûreté, étude de dangers, agrément des organismes intervenant pour le compte du maître d'ouvrage (maître d'œuvre, bureau d'études, etc.),



diagnostic sur les garanties de sûreté, incidents et événements devant être déclarés, etc.  
Pour les digues :

- introduction de 4 classes de digues (D, C, B, A) – selon les enjeux croissants de vulnérabilité concernés (nombre d’habitants dans le val protégé) – avec définition de contraintes croissantes pour les obligations des gestionnaires ;
- fourniture d’un diagnostic initial de sûreté pour toute digue A, B ou C ;
- consultation du CTPB(OH) pour les projets portant sur les digues de classe A.

**(13)** Lettre-circulaire aux préfets de département du 6 février 2008 du ministère de l’Écologie, du Développement et de l’aménagement durables (MEDAD), fournissant les premières instructions relatives à l’application du décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007

Précise aux préfets certains points du décret et rappelle les principales échéances (barrages et digues).

**(14)** Arrêté du 29 février 2008 fixant des prescriptions relatives à la sécurité et à la sûreté des ouvrages hydrauliques – **modifié** par l’arrêté du 16 juin 2009

Précise certaines dispositions du décret du 11 décembre 2007 pour ce qui est des obligations des gestionnaires des ouvrages hydrauliques (barrages et digues), et notamment pour les digues : le contenu du « diagnostic initial de sûreté » que tout gestionnaire de digue de classe A, B ou C doit produire avant le 31 décembre 2009 (article 16 du décret).

L’**arrêté modificatif du 16 juin 2009** allège principalement le contenu minimum du « diagnostic initial de sûreté » des digues (art. 16 du décret et art. 9 de l’arrêté).

**(15)** Arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l’étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu

Rappel : la notion d’étude de dangers (à effectuer par un organisme agréé sous la responsabilité du gestionnaire) a été introduite par l’article 1<sup>er</sup> du décret du 11 décembre 2007 (art. R. 214-115 à R. 214-117 du Code de l’Environnement). Pour les digues, le gestionnaire doit la réaliser si son ouvrage est de classe A, B ou C, avec les échéances maximales suivantes : 31 décembre 2012 si la digue est de classe A, 31 décembre 2014 si elle est de classe B ou C.

**(16)** [Circulaire notablement modifiée par celle du 8 juillet 2010] Circulaire ministérielle du 8 juillet 2008 du ministère de l’Écologie, de l’Énergie, du Développement durable et de l’Aménagement du territoire (MEEDDAT), relative au contrôle de sécurité des ouvrages hydrauliques au titre des dispositions mises en place par le décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 (art. R. 214-112 à R. 214-147 du Code de l’environnement)

Annule et remplace les circulaires interministérielles du 14 août 1970 et du 6 août 2003 qui portaient sur le même objet, respectivement pour les barrages et les digues. Rappelle et précise le rôle des préfets et des services déconcentrés de l’État en matière de contrôle de la sécurité des digues et barrages.

**(17)** Circulaire interministérielle du 31 juillet 2009 du ministère de l’Écologie, de l’Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM), du ministère de l’Intérieur, de l’Outre-Mer et des Collectivités territoriales et du ministère de l’Agriculture, de l’Agriculture et de la Pêche, relative à l’organisation du contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques

Fixe le cadre général d’une réorganisation du service de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques, indique les principales voies qui paraissent devoir être explorées

afin de définir l'organisation la plus pertinente pour chaque région, dans le but d'en assurer la cohérence et l'efficacité.

**(18)** Arrêté du 18 février 2010 précisant les critères et catégories des agréments des organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques ainsi que l'organisation administrative de leur délivrance.

Définit les justificatifs à fournir par les organismes pour postuler à 5 catégories d'agrément :

- agrément Dignes et barrages – études et diagnostics ;
  - agrément Dignes et barrages – études, diagnostics et suivi des travaux ;
  - agrément Auscultation ;
  - agrément Dignes et petits barrages – études et diagnostics ;
  - agrément Dignes et petits barrages – études, diagnostics et suivi des travaux ;
- Agréments délivrés pour une durée de 5 ans. Possibilité d'obtenir un agrément provisoire de 18 mois.

**(19)** Circulaire du 16 avril 2010 relative aux études de dangers des digues de protection contre les inondations fluviales

Précise les obligations de réalisation d'une étude de dangers par les responsables des digues et introduit le guide de lecture des études de dangers à l'intention des services de contrôle, annexé à la circulaire.

**(20)** Arrêté du 21 mai 2010 définissant l'échelle de gravité des événements ou évolutions concernant un barrage ou une digue ou leur exploitation et mettant en cause ou étant susceptibles de mettre en cause la sécurité des personnes ou des biens et précisant les modalités de leur déclaration

Définit les notions d'événements importants pour la sûreté hydraulique (EISH) et précurseurs pour la sûreté hydraulique (PSH : pour barrages A et B uniquement), et leurs modalités de déclaration au préfet et, pour les EISH (barrage ou digue), de classification selon trois niveaux de gravité : accidents, incidents graves et incidents.

**(21)** Circulaire du 8 juillet 2010 relative à la mise en œuvre de la nouvelle organisation du contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques en France métropolitaine.

Confie la mission technique de « contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques » aux DREAL et, faisant suite à la consultation des préfets par la lettre-circulaire du 31 juillet 2009 suscitée, en précise l'organisation :

- 10 DREAL aux effectifs spécialement renforcés apportent leur appui à 12 DREAL adjacentes ;
  - la mission de contrôle reste exercée sous l'autorité fonctionnelle des préfets de département concernés ;
  - les services en charge de police de l'eau sont associés à la mission de contrôle, notamment pour le recensement des ouvrages et l'identification de leur propriétaire.
- Date de mise en application de la circulaire : 1<sup>er</sup> janvier 2011.

**(22)** Décret n° 2011-27 du 2 mars 2011 relatif à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation

Avec la loi du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement (LENE), transpose la directive européenne inondation du 23 octobre 2007. Détermine les actions à mener et leurs responsables : évaluation préliminaire des risques inondations dans chaque district hydrographique, sélection des territoires à risque d'inondation important, cartographie des surfaces d'inondation, plans d'action locaux de gestion des risques inondation. Vise explicitement la sécurité des infrastructures existantes de

protection contre les inondations, partie intégrante de l'évaluation préliminaire du risque inondation.

**(23)** Arrêté du 7 avril 2011 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques

Première liste des entreprises et organismes agréés « ouvrages hydrauliques », parue en application de l'article R. 214-148 du Code de l'environnement. Les organismes y sont classés selon les cinq catégories d'agrément « Digués et barrages. – Études et diagnostics », « Digués et barrages. – Études, diagnostics et suivi des travaux », « Auscultation », « Digués et petits barrages. – Études et diagnostics » et « Digués et petits barrages. – Études, diagnostics et suivi des travaux », avec les durées de validité correspondantes (5 ans ou 18 mois).

**(24)** Circulaire du 12 mai 2011 relative à la labellisation et au suivi des projets PAPI 2011 et opérations de restauration des endiguements PSR

Précise les modalités de suivi des projets relatifs aux programmes d'actions de prévention des inondations (PAPI) et l'instruction des projets éligibles au plan submersions rapides (projets PSR). Définit le rôle des acteurs de l'État dans le cadre de ces deux démarches et précise l'articulation entre celles-ci, notamment pour ce qui concerne leur labellisation.

**(25)** Circulaire du 5 juillet 2011 relative à la mise en œuvre de la politique de gestion des risques d'inondation

Précise les modalités de mise en place d'une gouvernance de bassin pour la conduite de la politique de gestion des risques d'inondation à cette échelle. Propose des modalités d'animation et d'association des parties prenantes, qui concernent notamment la mise en œuvre de la directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation (dite directive « inondation »). Concernant la directive « inondation », la présente circulaire rappelle son calendrier de mise en œuvre et son pilotage à l'échelle du bassin. Elle précise également ce qu'est un territoire à risque particulier d'inondation, ce que sa sélection implique et, enfin, le processus d'identification de ces territoires avec les parties prenantes.

**(26)** Instruction du gouvernement du 20 octobre 2011 relative aux ouvrages de protection contre les inondations et les submersions, à leurs enjeux de protection et à leur efficacité

Résumé : dans le cadre du plan submersions rapides initié après la tempête Xynthia, les services de l'État ont mené un important travail de recensement des systèmes d'endiguement (maritimes et fluviaux), en bonne voie d'achèvement. La présente instruction demande aux préfets d'établir un programme de travail pour parfaire d'ici à la fin 2012 ce recensement et identifier les gestionnaires des digues les plus importantes en termes d'enjeux. De plus, un effort particulier sera consacré aux zones protégées à forts enjeux de sécurité, dans le cas où le gestionnaire de la digue ne sera pas identifié, sera défaillant ou ne disposera pas de la capacité d'assumer ses responsabilités. Des concertations seront alors engagées, en particulier avec les collectivités locales, pour faire émerger un gestionnaire solide.

**(27)** Arrêté du 15 novembre 2011 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques

Deuxième liste des entreprises et organismes agréés « ouvrages hydrauliques », parue en application de l'article R. 214-148 du Code de l'environnement. Annexe I : rappel

des organismes précédemment agréés avec date d'échéance de leur agrément. Annexe II : liste de nouveaux organismes agréés avec les durées de validité correspondantes (5 ans ou 18 mois).

**(28)** Décret n° 2011-2019 du 29 décembre 2011 portant réforme des études d'impact des projets de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements

Réforme le contenu et le champ d'application des études d'impact sur l'environnement des projets de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements. Désormais, seuls sont soumis à étude d'impact les projets mentionnés en annexe à l'article R. 122-2 du Code de l'environnement. En fonction de seuils qu'il définit, le décret impose soit une étude d'impact obligatoire en toutes circonstances, soit une étude d'impact au cas par cas, après examen du projet par l'autorité de l'État compétente en matière d'environnement.

Les barrages de retenue et digues de canaux soumis à autorisation (classe A, B et C), au titre de l'article R. 214-1 du Code de l'environnement, et les aménagements côtiers dont les digues maritimes d'une emprise totale égale ou supérieure à 2 000 m<sup>2</sup> sont soumis à étude d'impact (analyse « au cas par cas » lorsque la surface est inférieure au seuil de 2 000 m<sup>2</sup>).

**(29)** Arrêté du 30 mai 2012 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques

Troisième liste des entreprises et organismes agréés « ouvrages hydrauliques », parue en application de l'article R. 214-148 du Code de l'environnement. Annexe I : rappel des organismes précédemment agréés avec date d'échéance de leur agrément. Annexe II : liste de nouveaux organismes agréés avec les durées de validité correspondantes (5 ans ou 18 mois).

**(30)** Arrêté du 15 novembre 2012 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques

Quatrième liste des entreprises et organismes agréés « ouvrages hydrauliques », parue en application de l'article R. 214-148 du Code de l'environnement. Annexe I : rappel des organismes précédemment agréés avec date d'échéance de leur agrément. Annexe II : liste de nouveaux organismes agréés avec les durées de validité correspondantes (5 ans ou 18 mois).

**(31)** Arrêté du 29 mai 2013 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques

Cinquième liste des entreprises et organismes agréés « ouvrages hydrauliques », parue en application de l'article R. 214-148 du Code de l'environnement. Annexe I : rappel des organismes précédemment agréés avec date d'échéance de leur agrément. Annexe II : liste de nouveaux organismes agréés avec les durées de validité correspondantes (5 ans ou 18 mois).

**(32)** Arrêté du 13 décembre 2013 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques

Sixième liste des entreprises et organismes agréés « ouvrages hydrauliques », parue en application de l'article R. 214-148 du Code de l'environnement. Annexe I : rappel des organismes précédemment agréés avec date d'échéance de leur agrément. Annexe II : liste de nouveaux organismes agréés avec les durées de validité correspondantes (5 ans ou 18 mois).

**(33)** Loi n° 2014-58 du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles (dite loi MAPTAM)

Crée aux articles 56 à 59 la compétence « Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations » (GEMAPI). Attribue cette compétence de plein droit au bloc communal (communes, EPCI à fiscalité propre – EPCI-FP) à compter du 1<sup>er</sup> janvier 2016. Cette compétence comprend les missions définies aux 1<sup>o</sup>, 2<sup>o</sup>, 5<sup>o</sup> et 8<sup>o</sup> de l'article L. 211-7 du Code de l'environnement :

- 1<sup>o</sup> L'aménagement d'un bassin ou d'une fraction de bassin hydrographique ;
- 2<sup>o</sup> L'entretien et l'aménagement d'un cours d'eau, canal, lac ou plan d'eau, y compris les accès à ce cours d'eau, à ce canal, à ce lac ou à ce plan d'eau ;
- 5<sup>o</sup> La défense contre les inondations et contre la mer ;
- 8<sup>o</sup> La protection et la restauration des sites, des écosystèmes aquatiques et des zones humides ainsi que des formations boisées riveraines.

**(34)** Arrêté du 13 juin 2014 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques

Septième liste des entreprises et organismes agréés « ouvrages hydrauliques », parue en application de l'article R. 214-148 du Code de l'environnement. Annexe I : rappel des organismes précédemment agréés avec date d'échéance de leur agrément. Annexe II : liste de nouveaux organismes agréés avec les durées de validité correspondantes (5 ans ou 18 mois).

**(35)** Décret n° 2014-751 du 1<sup>er</sup> juillet 2014 d'application de l'ordonnance n° 2014-619 du 12 juin 2014 relative à l'expérimentation d'une autorisation unique pour les installations, ouvrages, travaux et activités soumis à autorisation au titre de l'article L. 214-3 du Code de l'environnement

S'applique aux entreprises, porteurs de projet et services de l'État, vise l'expérimentation d'une autorisation unique pour les projets relevant de la législation sur l'eau et les milieux aquatiques dans les régions Rhône-Alpes et Languedoc-Roussillon.

L'autorisation unique rassemble ainsi, outre l'autorisation délivrée au titre de la loi sur l'eau, l'autorisation de modification de l'état d'une réserve naturelle nationale, l'autorisation de modification de l'état des lieux ou de l'aspect d'un site classé (sauf, dans ces deux derniers cas, lorsqu'une autorisation d'urbanisme est requise), l'autorisation de défrichement et la dérogation à l'interdiction de porter atteinte aux espèces et habitats protégés. Le porteur de projet peut ainsi obtenir, après une seule demande, à l'issue d'une procédure d'instruction unique et d'une enquête publique, une autorisation unique délivrée par le préfet, couvrant l'ensemble des aspects du projet.

**(36)** Arrêté du 18 décembre 2014 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques

Huitième liste des entreprises et organismes agréés « ouvrages hydrauliques », parue en application de l'article R. 214-148 du Code de l'environnement. Annexe I : rappel des organismes précédemment agréés avec date d'échéance de leur agrément. Annexe II : liste de nouveaux organismes agréés avec les durées de validité correspondantes (5 ans ou 18 mois).

**(37)** Décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques

Modifie et complète le décret du 11 décembre 2007. Il mentionne deux catégories d'ouvrages : les systèmes d'endiguement et les aménagements hydrauliques. Il revoit toutes les classes de digues (C : de 30 à 3 000 personnes ; B : de 3 000 à 30 000 personnes ; A : au-delà de 30 000 personnes), et supprime la classe D. Tous les ouvrages dont la hauteur est inférieure à 1,5 m ne sont plus considérés comme des

digues au sens du décret. Il est toutefois possible pour les collectivités de demander un surclassement en C.

Le décret indique que le gestionnaire devra définir la zone protégée ainsi que le niveau de protection de son ouvrage. Cela n'implique pas la réalisation de travaux pour le gestionnaire. Si le niveau de protection correspond par exemple à une crue/submersion vicennale pour une digue classée C, le gestionnaire n'a pas l'obligation de faire des travaux pour augmenter ce niveau de protection (digue existante). En revanche, pour les digues nouvelles, des niveaux de protection standards ont été inscrits dans le décret : 1/200 pour les digues de classe A, 1/100 pour les digues de classe B, 1/50 pour les digues de classe C.

**(38)** Loi n° 2015-991 du 7 août 2015 portant nouvelle organisation territoriale de la République (dite loi NOTRe)

- Implique plusieurs nouveautés relatives à la compétence GEMAPI :
- la date butoir d'entrée en vigueur de la compétence est reportée au 1<sup>er</sup> janvier 2018 ;
- la compétence GEMAPI fait l'objet d'un transfert en totalité et de façon automatique des communes vers l'échelon intercommunal. La loi MAPTAM avait déjà acté ce transfert automatique et complet en faveur des communautés d'agglomérations, les communautés urbaines et les métropoles, mais ne l'avait pas prévu pour les communautés de communes. Ces dernières devaient au préalable distinguer les travaux qui méritaient d'être traités à l'échelon intercommunal de ceux qui devaient rester du ressort des communes. La loi NOTRe rend ce transfert également automatique et complet pour les communautés de communes ;
- la loi introduit une procédure simplifiée de création des établissements publics territoriaux de bassin (EPTB) et des établissements publics d'aménagement et de gestion des eaux (EPAGE) ;
- la clause de compétence générale des départements est supprimée, mais ceux-ci conservent des capacités d'action en termes de solidarité territoriale.

**(39)** Arrêté du 13 août 2015 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques

- Neuvième liste des entreprises et organismes agréés « ouvrages hydrauliques », parue en application de l'article R. 214-130 du Code de l'environnement. Annexe I : rappel des organismes précédemment agréés avec date d'échéance de leur agrément. Annexe II : liste de nouveaux organismes agréés avec les durées de validité correspondantes (5 ans ou 18 mois).

**(40)** Arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers des digues organisées en systèmes d'endiguement et des autres ouvrages conçus ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions

Rappel : cet arrêté s'applique à l'étude de dangers (à effectuer par un organisme agréé sous la responsabilité du gestionnaire) telle que décrite par l'article 18 du décret du 12 mai 2015 (art. R. 214-115 à R. 214-117 du Code de l'environnement). Une étude de dangers doit être réalisée pour les systèmes d'endiguement de classes A, B et C.

#### Voir aussi les notes techniques PATOUH

- Détermination de la hauteur et de la zone protégée d'une digue en vue de son classement pour l'application du décret du 11 décembre 2007. P. Ledoux, R. Tourment, G. Degoutte, 10 avril 2009.

- Application du décret du 11 décembre 2007 aux digues de protection contre les submersions marines (détermination de la hauteur et de la zone protégée). P. Ledoux, R. Tourment, 28 juillet 2010.

**Auteurs et contributeurs des différentes versions**

Bruno Beullac (Irstea)

Gérard Degoutte (Irstea-CGAAER)

Patrice Mériaux (Irstea) – Entre autres, auteur de la version initiale et des premières mises à jour

Nicolas Monié (Ministère en charge de l'environnement – DGPR)

Yann Quefféléan (ONF-DFRN/Département risques naturels – Pôle RTM)

Rémy Tourment (Irstea)



## ANNEXE 3

# Modèle de cahier des charges pour la réalisation d'une étude de dangers de système d'endiguement

Ce modèle de cahier des charges s'inscrit dans le cadre méthodologique d'analyse de risque présenté en [Partie II](#). Il repose également sur le retour d'expérience de la DREAL Centre – Val-de-Loire dans la réalisation des études de dangers des digues domaniales de la Loire et de ses principaux affluents.

En tant qu'organisme public soumis au code des marchés publics et compte tenu du nombre important d'études à réaliser (plus de 40 systèmes de protection représentant près de 500 km de digue), la DREAL Centre – Val-de-Loire a opté en 2012 pour le lancement d'un accord-cadre visant à retenir un nombre limité de bureaux d'études privés agréés pour réaliser les EdD. Cinq lots ont été constitués, liés à un découpage géographique des systèmes de protection du bassin de la Loire.

Un cahier des charges unique a été rédigé à cette occasion. Le cahier des charges proposé dans cette annexe s'inspire en grande partie de cette expérience.

Ce cahier des charges intègre également la réalisation de la visite technique approfondie (VTA) du système de protection, celle-ci constituant une donnée d'entrée intéressante pour l'EdD ; une VTA est impérative pour la réalisation d'un diagnostic approfondi, ce dernier constituant lui-même une donnée d'entrée d'une EdD format « 2007 » et obligatoire pour une EdD format « 2015 ».

### Remarque

Dans le présent modèle de cahier des charges, les inscriptions en « *caractères gras italiques* » correspondent à des informations à l'attention du rédacteur d'un cahier des charges. Les inscriptions en « caractères normaux » constituent des propositions de rédaction du cahier des charges.

## Chapitre I. Contexte

### Article I-01 : Contexte réglementaire

La réglementation française impose aux gestionnaires de digues de réaliser des études de dangers (EdD) et des visites techniques approfondies (VTA) pour les digues de classes A, B et C.

*Rappel des textes en vigueur : Code de l'environnement, arrêté ministériel, arrêtés préfectoraux, ces derniers pouvant imposer des échéances pour la remise de l'EdD.*

## Article I-02 : Objet du marché

Le présent marché vise à faire réaliser par un bureau d'études, agréé au titre des articles R. 214-129 à R. 214-132 du Code de l'environnement.

- Préciser le type d'EdD attendu (tel que défini au Chapitre 5).
- Déterminer les objectifs de l'étude (tels qu'évoqués au paragraphe 2. du Chapitre 4).

## Article I-03 : Site d'étude

- Présentation d'une carte synthétisant les connaissances actuelles du système à étudier : limite du système de protection, approche des limites de la zone protégée, milieu eau, système de protection proche pouvant influencer sur le système étudié, remblais pouvant influencer les écoulements en cas d'entrée d'eau dans la zone protégée, etc. Cette carte est indicative, l'organisme agréé qui sera retenu devra préciser ces éléments.
- Présentation de la liste de communes concernées par l'ensemble de ces objets.

*Les limites du système d'endiguement, de sa zone protégée et des ouvrages secondaires et de protection indirecte qui le composent sont données à titre indicatif. Ces limites seront à repréciser et justifier sur la base d'une analyse topographique et hydraulique dans le cadre de l'étude de dangers (voir II-03.5).*

# Chapitre II. Contenu des études

## Article II-01 : Visite technique approfondie

*Nous conseillons de faire réaliser la visite technique approfondie (VTA) par le titulaire du marché. Elle permet d'acquérir une bonne connaissance du système de protection, de s'approprier le contenu des rapports des VTA antérieures et d'avoir un œil critique sur les désordres déjà recensés et leur évolution.*

- La VTA de l'ensemble du système d'endiguement, englobera les points suivants :
  - examen visuel de la digue et des ouvrages englobés : structure et géométrie de la digue (inspection à pied de l'ensemble de l'ouvrage : talus et pied de talus côté zone protégée, crête, talus et pied de talus côté eau afin d'évaluer l'état de l'ouvrage en première approche) ;
  - identification des éventuels points singuliers et désordres observés (végétation, traces d'animaux fouisseurs, détérioration des voiries supportées par l'ouvrage, présence d'ouvrages implantés dans la digue ou la traversant, dégradations de l'ouvrage, etc.) et détermination de leurs origines possibles ;
  - description des suites à donner en matière de surveillance, d'exploitation, d'entretien, d'auscultation, de diagnostic ou de confortement (définition au cas par cas des actions permettant de corriger les désordres et d'assurer la sécurité de l'ouvrage).
- La phase terrain consiste en une reconnaissance visuelle approfondie des ouvrages et l'alimentation de fiches d'inspection, ainsi qu'en d'éventuels levés spécifiques que le titulaire devra définir dans son offre.

## II-01.1 - Analyse du dossier d'ouvrage

Dans le but de préparer le travail de terrain et les analyses qui en découleront (pour apporter des conclusions vis-à-vis des observations faites dans le cadre de la VTA), le titulaire du marché devra en premier lieu analyser l'ensemble des données disponibles sur l'ouvrage (rapports de visites de l'ouvrage, dossiers de travaux, plans, etc.) pour établir un historique de la vie de l'ouvrage (conception initiale, modifications ultérieures, entretien et réparations) et faire le bilan de son état connu avant de réaliser la VTA incluse dans le présent marché. Ce travail s'appliquera à la digue ainsi qu'aux ouvrages de protection indirects de son environnement proche (épis, enrochements, etc.). Ce point devra faire l'objet d'un chapitre spécifique du rapport de la VTA.

### II-01.2 - Reconnaissance physique des ouvrages

- La reconnaissance s'effectuera à pied et à un moment où l'état de la végétation et la saison permettront une visibilité maximale des talus (absence de neige, développement minimal de la végétation, faible couverture foliaire au sol, etc.). Par ailleurs, le gestionnaire de l'ouvrage veillera à ce que l'entretien de la végétation sur la digue soit réalisé peu de temps avant la visite.
- La reconnaissance portera sur les talus de digues côté zone protégée et côté eau (fondations comprises) ainsi que sur la crête des ouvrages. L'observation devra porter sur la morphologie apparente des ouvrages et sur les anomalies ou désordres constatés. Une attention particulière sera portée aux ouvrages inclus : bâtiments, ouvrages vannés, barbacanes et clapets associés, éventuelles canalisations, etc.
- Pour des raisons de sécurité, cette visite sera impérativement menée par deux personnes (au minimum). Elles présenteront l'une et/ou l'autre des compétences en hydraulique, morphodynamique, géotechnique et génie civil (*voir III-03.3*).
- L'inspection du talus côté eau pourra être complétée si nécessaire par une reconnaissance en bateau, dont l'organisation sera à la charge du prestataire qui devra faire parvenir une demande motivée au maître d'ouvrage pour acceptation.
- Le bureau d'études devra se munir d'un appareil photo indexé GPS de façon à repérer les clichés avec précision. La direction de chacune des prises de vues devra également être renseignée.
- Le titulaire de l'étude préviendra le gestionnaire d'ouvrage du démarrage de l'opération d'inspection suffisamment en avance, afin que ce dernier puisse s'organiser pour son ou ses technicien(s) y participe, et pour que l'entretien de la végétation sur l'ouvrage puisse être réalisé à temps.
- Les objectifs de la VTA, sur la base de la topographie fournie et de l'analyse du dossier d'ouvrage (*voir II-01.1*), sont :
  - repérer, décrire et localiser précisément les indices de désordres sur les ouvrages ;
  - décrire l'état des protections de talus et de pied des parements côtés eau et zone protégée ;
  - décrire la nature et l'état des ouvrages singuliers ;
  - repérer et caractériser les ouvrages inclus dans les digues ;
  - repérer et caractériser la végétation ligneuse sur les ouvrages ;
  - repérer les caractéristiques morphologiques et morphodynamiques de l'environnement immédiat de l'ouvrage (estran/franc-bord, zone protégée).
- Le relevé de l'ensemble de ces informations sur le terrain s'effectuera par l'alimentation de fiches papier spécifiques. Pour cela, le titulaire devra proposer un ou plusieurs modèles de fiche. Ces modèles seront construits par le titulaire sur la base des différents modèles qui lui seront mis à disposition par le gestionnaire du système de protection.

Le Comité de pilotage de l'étude de dangers validera avant la visite le(s) modèle(s) de fiche proposé(s) par le titulaire.

- L'ensemble des éléments qui seront décrits par le bureau d'études devra être géolocalisé en utilisant un système de repérage qu'il aura proposé et qui aura été validé par le gestionnaire d'ouvrage. Les relevés seront effectués par tout moyen permettant de localiser précisément les observations dans ce système de repérage.

### II-01.3 – Rapport de visite technique approfondie

- La visite technique approfondie donnera lieu à un rapport spécifique dont le contenu sera repris par la suite dans le cadre de la réalisation de l'EdD.
- Ce rapport devra tout d'abord retranscrire l'analyse du dossier d'ouvrage qui devra avoir été réalisée préalablement à la visite (*voir* II-01.1).
- Il devra ensuite récapituler, sous la forme de fiches de visite et de cartographies, tous les points particuliers relevés et les éléments significatifs de la VTA.
- L'ensemble des relevés de terrain, les plans, descriptions géométriques des ouvrages, photos, et références bibliographiques utiles devront également être renseignés.
- Ce rapport devra conclure sur les besoins en termes de diagnostic des ouvrages et proposer des mesures à mettre en œuvre ou éventuellement des investigations complémentaires à entreprendre pour combler les possibles lacunes dans la connaissance des ouvrages et de leur environnement immédiat.
- Ce rapport devra également proposer une analyse et une mise à jour des consignes de surveillance pour ce qui concerne la question de la réalisation des futures VTA, des visites « simples » de surveillance et des visites spécifiques des ouvrages en cas d'événement rare ou exceptionnel.

### II-01.4 – Contenu minimum de la VTA

Outre les instruments de repérage que le prestataire définira dans le programme d'exécution des études, les opérateurs seront munis d'un tirage du plan topographique, d'un appareil photographique numérique ainsi que d'un jeu de fiches de relevé des désordres qu'il aura pris soin d'élaborer et de faire valider par le gestionnaire d'ouvrage.

- a) Pour ce qui concerne les caractéristiques géométriques de la digue, il s'agira de vérifier et compléter les principales informations topographiques disponibles (notamment sur la vue en plan) : cela nécessitera de se repérer sur le plan existant au fur et à mesure de la progression. Des croquis seront dessinés aux sections où il apparaît des singularités non visibles ou mal répertoriées sur le plan. On s'attachera également à indiquer les conditions météo et les niveaux d'eau constatés le jour de la visite.
- b) Pour ce qui concerne les indices de désordres, les points à observer plus particulièrement sont les suivants :
  - talus côté zone protégée :
    - végétation (nature et développement, racines et souches),
    - raideur et régularité du talus,
    - indices d'érosion ou de mouvements, amorces de glissement, ravinements (fissures, arrachements, bourrelets, arbres inclinés, etc.),
    - terriers (taille et densité),
    - débouchés de canalisation et ouvrages singuliers,
    - indices de fuite, zones humides et points d'eau, éventuels dispositifs de drainage,
    - existence, nature et état d'un éventuel confortement et/ou revêtement de protection,
    - singularités topographiques au-delà du pied de talus (indice d'ancienne brèche, dépression, fontis, fossé, canal) ;

- crête de la digue :
  - végétation (nature et développement, racines et souches),
  - voies de circulation (route, chemin) : largeurs, régularité du profil, indices de mouvements de terrain (fissurations longitudinales, fissures transversales, tassements, fontis),
  - fissures longitudinales, fissures transversales,
  - tassements, fontis,
  - terriers (taille et densité),
  - existence, nature et état du revêtement,
  - ouvrages singuliers ;
- talus côté eau :
  - raideur et régularité du talus,
  - végétation (nature et développement, racines et souches),
  - présence de vides (pierres manquantes),
  - état des éventuels joints,
  - fissures (existence relevée sur plans et fiches),
  - indices d'érosion ou de mouvements, amorces de glissement, ravinements (fissures, arrachements, arbres inclinés, etc.),
  - débouchés de canalisation et ouvrages singuliers (clapets notamment),
  - existence, nature et état de l'éventuelle protection de pied d'ouvrage,
  - singularités topographiques au-delà du pied de talus (érosions de berge/estran, dépôts de sédiments, fontis, etc.),
  - hétérogénéité des matériaux mis en œuvre (enrochements, gabions, mur de soutènement, etc.),
  - vulnérabilité des points de raccordements entre ouvrages ;
- sur l'ensemble de l'ouvrage :
  - végétation (type, densité, système racinaire fonction de la nature du sol par le biais de sondages rustiques, etc.),
  - présence de terriers (nature du sol),
  - présence d'ouvrages annexes et ouvrages singuliers (canalisations, vannes, etc.).

De façon générale, les dégradations traduisant le vieillissement des ouvrages devront être mises en évidence et notamment par l'identification et la description des indices suivants :

- pour les parties en béton : fissures, éclatements, faïençage, corrosion des armatures, dégradation de joints, etc. ;
- pour les ouvrages géotechniques (talus arrière de la digue) : érosion, affaissements, tassements, glissement, etc. ;
- pour les organes mobiles ou traversants : corrosion, fuites, déformation, etc. ;
- pour les parties en enrochement : glissement, érosion des blocs, dégradations du géotextile, etc. ;
- pour les palplanches : corrosion, déformation, défaut d'étanchéité, etc.

Parmi les ouvrages singuliers, une attention particulière mérite d'être portée aux éventuelles maisons ou constructions situées à proximité de, ou incorporées dans, le corps de digue et qui constituent des zones de faiblesse potentielle de la digue : il conviendra de les cartographier avec précision (repérage en plan et en profil), si le plan topographique disponible ne les a pas – ou incomplètement – caractérisés.

## II-01.5 - Modalités de report et de restitution des informations

- Les désordres inventoriés seront repérés et numérotés, partie par partie d'ouvrage, directement sur un tirage du plan topographique au 1/500<sup>e</sup>, en respectant un symbolisme agréé par le gestionnaire d'ouvrage. Les numéros renvoient à des lignes successives de

la fiche de relevé des désordres où seront portées les annotations de détail et où l'on codera les principales informations.

- Il sera, en outre, établi un dossier photographique complet, parfaitement légendé (position GPS des photos, repérage sur plan des photos avec direction de prise de vue) :
  - photos de désordre, référencées par le numéro de désordre, avec éléments permettant d'avoir l'échelle de la prise de vue ;
  - photos d'ensemble de la digue aux points représentatifs.
- Enfin, au terme de l'inspection, le prestataire procédera à la mise au propre de toutes les informations récoltées ainsi qu'à leur saisie informatique sur un logiciel compatible avec le logiciel Microsoft Excel.

### Remarque

*Le format de fichier de restitution est laissé à l'appréciation du gestionnaire du système d'endiguement ; ce peut être un fichier de tableur (comme suggéré ci-dessous), et/ou de traitement de texte, ou encore une saisie directe dans le système d'information du gestionnaire (comme dans le SIRS Dignes).*

## Article II-02 : Étude de dangers

Les principaux objectifs de l'étude de dangers à mener sont les suivants :

- définir le système de protection, ses limites, ses composants, son environnement spécifique constitué de la zone protégée et du (ou des) milieu(s) extérieur(s) eau et son (leur) fonctionnement ;
- identifier et estimer le risque d'inondation associé aux enjeux présents dans la zone protégée en fonction des limites du système de protection considéré et de sa possible défaillance ;
- identifier les recherches, études et reconnaissances complémentaires à mener pour améliorer la qualité et la résolution des données ou encore la performance des méthodes employées pour réaliser l'étude de dangers ;
- évaluer l'acceptabilité du risque d'inondation étant donné le système de protection ;
- proposer des mesures de gestion et d'amélioration du système de protection destinées à réduire les risques : prévention de l'érosion interne, de l'érosion externe, fréquence et nature des opérations de surveillance et d'entretien, modification du système, etc.

### Remarque

*Les deux derniers points sont parmi les finalités de la démarche de gestion des risques et donc une justification de la réalisation de l'analyse des risques. Néanmoins, dans l'arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers en application du décret de 2015, ils ne sont pas rendus obligatoires par la réglementation. On imagine mal la finalité d'une étude de dangers ne donnant pas lieu à d'éventuelles mesures complémentaires de gestion des risques (voir Chapitres 7 et 14) ; le présent modèle de CCTP est rédigé en ce sens.*

### Définitions des notions de niveaux

- **Niveau de protection (NP)** : niveau d'eau jusqu'auquel on n'a pas d'entrée d'eau dans la zone protégée (issu de la ou les étendues d'eau contre lesquelles le système de protection protège : mer, fleuves, rivières, torrents, lacs, etc.), ou dans une quantité limitée et acceptable par le système d'assainissement et de drainage de la zone protégée (par exemple, par des embruns ou faibles franchissements en milieu marin).
- **Niveau de sûreté (NS)** : niveau d'eau jusqu'auquel l'ouvrage est sûr, c'est-à-dire que sa probabilité de rupture est négligeable pour les différents modes de rupture auxquels il est potentiellement exposé.
- **Niveau de danger (ND)** : Niveau d'eau à partir duquel la probabilité de rupture de l'ouvrage est très élevée à certaine pour les différents modes de rupture auxquels il est potentiellement exposé. C'est notamment 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 à cet effet.

### Remarques

Ces définitions sont à considérer en termes fonctionnels, vis-à-vis de l'intégrité de la digue et de sa fonction de protection. La traduction de ces niveaux fonctionnels en termes d'événements hydrauliques constitue un objectif auquel devra répondre le titulaire.

Par ailleurs, il est à noter que l'adoption du décret du 12 mai 2015 impose un engagement de l'EPCI GEMAPI quant au niveau de protection des systèmes d'endiguement dont il a la responsabilité. Si cette évolution de la réglementation introduit une nouvelle responsabilité des gestionnaires de systèmes d'endiguement vis-à-vis de la protection des populations présentes dans la zone protégée, celle-ci ne remet pas en question le fait que le MO est responsable des accidents pouvant être causés dans la zone protégée, du fait de la présence de l'ouvrage, lorsque l'événement de sollicitation atteint une cote supérieure au niveau de protection affiché : le gestionnaire de l'ouvrage doit donc veiller à ce que l'ouvrage n'aggrave pas l'inondation de la zone protégée pour les événements de sollicitation dont la cote est supérieure au niveau de protection.

- Le titulaire devra particulièrement veiller à produire une étude de dangers à caractère opérationnel, permettant d'apporter au gestionnaire du système de protection les données les plus fiables possible quant au niveau de protection apporté et au risque d'inondation par dépassement ou par défaillance du système d'endiguement. Ces données pourront notamment être utiles à la gestion de la mise en sécurité des populations protégées. Il sera également important que l'étude produite puisse constituer une aide à la définition d'une stratégie pour la gestion, la surveillance, l'entretien et la réalisation de travaux de confortement et d'amélioration du système d'endiguement.
- Le plan de l'EdD devra suivre scrupuleusement le plan réglementaire de l'étude de dangers. Celui-ci permet de répondre aux attentes des services de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques en matière d'informations et de résultats à produire.

*Rappeler ici le plan réglementaire de l'EdD, pour la réglementation appliquée dans le cadre de l'EdD (voir Chapitre 11 : paragraphe 1.).*

- Ce plan devra être strictement appliqué au rendu définitif de l'étude de dangers du présent marché.



## Article II-03 : Démarche à mettre en œuvre pour l'étude de dangers de digues (ou DE système d'endiguement)

### II-03.1 – Description générale de la démarche

La réalisation d'une étude de dangers correspond essentiellement à la mise en œuvre d'une démarche d'analyse de risque, suivie d'une évaluation du risque et conduisant à la définition de mesures de réduction du risque.

Les objectifs de l'EdD sont donc respectivement :

- d'estimer le risque d'inondation impliqué par le système d'endiguement étudié ;
- d'évaluer l'acceptabilité de ce risque compte tenu du contexte local ;
- de définir les mesures de gestion, d'entretien ou de modification des ouvrages qui s'avèrent pertinentes du point de vue de la réduction du risque d'inondation.

L'Irstea a développé une méthode d'analyse de risque des systèmes de protection contre les inondations spécifiquement adaptée au contexte des EdD. Cette démarche devra être appliquée pour la réalisation de l'EdD faisant l'objet du présent marché.

Cette méthode d'analyse de risque repose sur la mise en œuvre successive des actions suivantes :

- l'analyse fonctionnelle du système d'endiguement ;
- l'analyse de la défaillance du système d'endiguement :
  - application d'une méthodologie reposant sur les principes de la méthode AMDE (analyse des modes de défaillance et de leurs effets),
  - modélisation des scénarios de défaillance du système d'endiguement en appliquant une méthodologie reposant sur la méthode des arbres d'événements ;
- l'analyse quantitative des scénarios de défaillance : évaluation en termes de probabilité d'occurrence et de conséquences pour la zone protégée.

Une analyse de risque doit consister en une démarche analytique, cohérente et rigoureuse, intégrant l'ensemble des aspects liés aux ouvrages et à leur environnement. Pour répondre à cette nécessité, la méthodologie développée par l'Irstea décompose le travail à effectuer en différentes études élémentaires dont les interrelations sont structurées afin de garantir la cohérence de l'ensemble de l'étude de dangers.

Ces études élémentaires, qui constituent des objectifs intermédiaires ou des étapes de la démarche globale, correspondent aux différents besoins en termes de données à prendre en compte, ainsi qu'aux différentes analyses et modélisations à mener pour répondre pleinement aux objectifs de l'étude de dangers.

La démarche d'analyse de risque et la nature des études élémentaires qui la composent sont détaillées dans la suite du **II.03**.

Les résultats produits dans les différentes études élémentaires devront ensuite être utilisés pour la rédaction des différents chapitres du plan réglementaire de l'EdD. L'application de cette démarche vise à favoriser la cohérence entre les différents chapitres du rapport de l'EdD produite et donc la pertinence des résultats qu'ils exposent, cela dans le but de répondre aux besoins objectifs des gestionnaires de digues en termes de connaissance de leurs ouvrages et d'estimation des risques qu'ils impliquent et de réduction et de gestion de ces risques.

Le détail des études élémentaires est décrit dans le guide Irstea « Inondations – Analyse de risque des systèmes de protection – Application aux études de dangers ». Ces informations pourront faciliter la prise en main de la méthodologie.

### II-03.2 – Objectifs et spécificités des études élémentaires à mener (voir Figure 5-3)

Les objectifs et les points particuliers des différentes études élémentaires sont décrits ici. Ces études constituent des étapes de la réalisation de l'étude de dangers. Elles devront donner lieu à la rédaction de rapports intermédiaires spécifiques dont les principaux résultats et les conclusions seront ensuite insérés dans le rapport de l'EdD et les rapports complets seront annexés au rapport de l'EdD.

*Introduire ici le diagramme de la démarche d'analyse de risque présenté au paragraphe 2.2 du chapitre 5. du guide.*

Au-delà de leurs objectifs intrinsèques, les études élémentaires correspondant à des données d'entrées de l'EdD devront être menées en suivant la démarche suivante :

1. bilan et analyse critique des informations disponibles,
2. identification des lacunes en termes de connaissance et des actualisations nécessaires compte tenu des spécificités du contexte de l'étude,
3. éventuelle réalisation de reconnaissances spécifiques,
4. analyses spécifiques propres à l'étude élémentaire.

Les soumissionnaires indiqueront dans leur offre les précisions nécessaires à la description technique de la méthodologie qu'ils emploieront pour réaliser chacune des études élémentaires présentées dans la suite de l'Article II-03.

### II-03.3 – Étude élémentaire 0 – Étude accidentologique

Cette étude consiste en l'analyse des retours d'expériences relatifs au système d'endiguement objet de l'EdD, à sa zone protégée et au milieu eau pouvant l'impacter (notamment issus du dossier de l'ouvrage et des données historiques disponibles), ainsi qu'à des systèmes endigués similaires.

Elle a pour objectif de produire une première analyse des composantes du risque d'inondation lié au système d'endiguement, au vu de l'analyse des événements passés et des retours d'expériences :

- les actions et facteurs aggravants envisageables sur les ouvrages ;
- les types de défaillances du système d'endiguement possibles ;
- les caractéristiques des brèches historiques et autres désordres ;
- les caractéristiques hydrauliques des inondations et leurs conséquences possibles des inondations dans la zone protégée ;
- l'efficacité des systèmes de gestion de la sécurité pour le système d'endiguement, la zone protégée et le milieu eau ;
- etc. (tout autre facteur de risque).

Il est rappelé aux candidats l'importance de l'analyse des archives historiques afin d'appréhender au mieux les phénomènes survenus dans le passé.

- *Préciser si une phase de recherche d'archives est demandée ou possible (sur justification de sa nécessité par le candidat), ou si seules la consultation et l'analyse des données mises à disposition sont exigées.*
- *Donner le descriptif des données existantes pouvant être mises à disposition.*

### II-03.4 – Étude élémentaire 1 – Topographie

L'étude de la topographie doit satisfaire les objectifs suivants :

- connaître la topographie (coordonnées planimétriques et altimétriques de points) du terrain naturel terrestre et subaquatique (bathymétrie), comprenant les ouvrages de protection ainsi que des ouvrages inclus, dans le périmètre présumé puis établi de l'EdD ;

- représenter graphiquement l'information topographique recueillie, sous les différentes formes utiles à la réalisation des différentes études élémentaires de la méthodologie Irstea (MNT, profils en travers, profils en long, plans cotés, etc.).

Selon la nature des études et données mises à disposition du titulaire, ce dernier devra veiller à ce que la synthèse des données topographiques permette :

- de produire 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 ;
  - de produire les profils en long des pieds de digues afin de les comparer avec les lignes d'eau et d'évaluer la charge hydraulique ;
  - de produire les profils en travers utiles pour apprécier l'aléa géotechnique : calcul de stabilité, d'érosion interne, etc. ;
  - d'établir un plan de la digue à une échelle permettant le report des observations visuelles et des ouvrages englobés dans le corps de digue ou ses fondations ;
  - de produire des coupes représentant les singularités : traversée hydraulique, batardeau, pont, etc. ;
  - de réaliser des études hydrauliques en vue de définir les sollicitations hydrauliques caractéristiques au contact de l'endiguement ainsi que de caractériser l'intensité et la cinétique des inondations dans la zone protégée ;
  - de réaliser des études morphodynamiques en vue de connaître l'évolution morphologique principale du milieu eau, en profils en long et en travers, ainsi qu'en plan ;
  - d'identifier et de caractériser des éventuels facteurs aggravant les potentiels de risque comme la végétation, les sources d'embâcles et les activités à proximité de l'endiguement.
- *Préciser si la production de nouvelles données topographiques est demandée, ou possible (sur justification de sa nécessité par le candidat), ou si seules la consultation et l'analyse des données mises à disposition sont exigées.*
  - *Donner le descriptif des données existantes pouvant être mises à disposition (MNT, plans cotés, etc.) ainsi que leurs caractéristiques (par exemple, résolution, précision altimétrique, etc.).*

### II-03.5 – Étude élémentaire A – Définition du périmètre de l'étude et identification du risque

Définition du périmètre de l'étude

Le périmètre de l'étude est défini de manière experte sur la base des données disponibles et produites dans le cadre de l'EdD, et en particulier sur une analyse de la topographie des ouvrages et de la zone protégée. Il correspond à l'enveloppe contenant le système d'endiguement étudié, sa zone protégée et le milieu eau qui les bordent.

Ces trois entités géographiques doivent avant tout traduire une cohérence en termes de fonctionnement hydraulique (du milieu eau et de la zone protégée) et hydro-sédimentaire (du milieu eau et du système d'endiguement).

Leur détermination repose principalement sur la donnée topographique (puisque celle-ci conditionne en grande partie les écoulements) et de la nature des écoulements envisageables.

Concernant le système d'endiguement, cette étude élémentaire doit identifier et valider :

- la ligne de défense (protection) principale : le linéaire de protection (ouvrages ou éléments naturels) de référence pour le gestionnaire du système d'endiguement et/ou du point de vue de la protection de la zone protégée ;
- les éléments de protection secondaire : linéaires d'ouvrages, zones et autres éléments naturels, situés côté zone protégée, assurant une protection contre les inondations en complément de l'action de la ligne de défense principale, ou influençant la propagation des inondations dans la zone protégée ;

- les éléments de protection indirecte : ouvrages et autres éléments naturels, situés côté eau, ayant pour effet de diminuer les sollicitations sur les linéaires de protection.

#### Identification du risque

L'identification du risque consiste en une description **qualitative** de toutes les composantes matérielles et organisationnelles du périmètre de l'étude qui influent sur le risque d'inondation par défaillance du système d'endiguement.

Ces composantes sont notamment :

- le milieu eau source des actions sur le système d'endiguement et ses spécificités ;
- les mesures de contrôle de la sécurité, relatives aux sollicitations du milieu eau (météo, alerte, etc.), la sûreté du système d'endiguement (surveillance, entretien, travaux et actions de prévention/protection en crise), la vulnérabilité des enjeux (alerte, évacuation des populations, protection des biens, etc.), l'identification de leurs rôles vis-à-vis de la protection contre les inondations et/ou le fonctionnement hydraulique du système endigué, et la définition de leurs implications en cas de défaillance ;
- les ouvrages inclus présents, à vocation hydraulique (de transparence, de vidange, etc.) ou constituant des facteurs aggravants pour le système de protection (canalisations, bâtiments, etc.), l'identification de leurs rôles vis-à-vis de la protection contre les inondations et/ou le fonctionnement hydraulique du système endigué, et la définition de leurs implications en cas de défaillance ;
- les autres facteurs aggravants et actions envisageables sur les ouvrages (végétation, animaux fouisseurs, séismes, karsts, précipitations, embâcles de glace, avalanches, etc.) ;
- les types d'enjeux présents dans la zone protégée (populations, logements, entreprises, agriculture, réseaux, bâtiment ou équipement public, patrimoine, milieu naturel, etc.) et la description de leur vulnérabilité aux inondations.

L'identification du risque vise donc à déterminer la nature des études élémentaires qui devront être menées dans la suite de l'étude de dangers et les compléments spécifiques que ces dernières devront comporter. Les études élémentaires ainsi définies auront alors pour objectif de caractériser de manière **quantitative** les phénomènes et autres éléments prenant place dans le périmètre de l'étude.

L'identification du risque repose en grande partie sur les résultats de l'étude accidentologique et sur une analyse du système.

### II-03.6 - Étude élémentaire 2 – Analyse de la gestion de la sécurité

Cette partie de l'étude a pour objectif, en termes de gestion, surveillance, entretien et maintenance, alerte, urgence, etc. :

- l'identification et la description des politiques de gestion de la sécurité :
  - mesures appliquées au milieu eau source de sollicitations sur les ouvrages,
  - mesures appliquées au système d'endiguement,
  - mesures appliquées à la zone protégée ;
- l'analyse et la traduction de ces mesures en termes de barrières de sécurité, en vue de leur intégration dans l'analyse fonctionnelle, puis de leur prise en compte dans l'analyse des scénarios d'inondation, de la défaillance du système d'endiguement et dans l'estimation de la vulnérabilité des enjeux.

Concernant le système d'endiguement, cette étude élémentaire doit donc **définir, décrire et analyser** la politique de prévention des accidents majeurs actuellement mise en place et le système de gestion de la sécurité qui en découle :

- organisation de l'exploitant et des éventuelles autres entités impliquées pour ce qui concerne les aspects liés à la sécurité ;

- définition des principales procédures qui encadrent l'identification et l'évaluation des risques d'accidents majeurs, la surveillance de l'ouvrage en toutes circonstances, la gestion des situations d'urgences et la gestion du retour d'expérience ;
- dispositions prises par l'exploitant pour s'assurer en permanence du respect des procédures, auditer et réviser son système de gestion de la sécurité dans le cadre de son amélioration continue.

L'analyse de ces différents types de mesures doit conduire à l'identification d'une partie (essentiellement organisationnelle) des barrières de sécurité qui s'appliquent au système endigué et à leur caractérisation (*la notion de barrière de sécurité est explicitée au paragraphe 9.2. du Chapitre 4*).

*Donner le descriptif des données existantes pouvant être mises à disposition (consignes de surveillance et d'entretien, PCS, planification des alertes du SPC, planification des alertes météo France, etc.).*

### II-03.7 – Étude élémentaire 3 – Morphodynamique globale

Cette étude a pour objectif de définir le fonctionnement morphodynamique global du système étudié, c'est-à-dire celui du milieu eau dans lequel s'inscrit localement le périmètre de l'étude.

Les points suivants doivent donc être caractérisés :

- le zonage et la caractérisation des grands ensembles morphodynamiques qui comprennent ou ont une influence sur la zone d'étude : c'est-à-dire l'identification et la délimitation des ensembles ayant un même fonctionnement morphodynamique (par exemple, secteur à méandres, secteur divagant, secteur tresses, secteur rectiligne, bancs de sable, chenaux, etc.) et la définition de la direction, de l'intensité et de la dynamique globale des transits sédimentaires (en plan et en profils) ;
- les évolutions passées des grands ensembles morphodynamiques identifiés : description des éventuelles modifications passées dans le fonctionnement sédimentaire pour aboutir à la situation actuelle (généralement du fait de la perturbation des équilibres naturels par les activités humaines) et bilan des évolutions bathymétriques observées et mesurées ;
- les évolutions futures prévisibles des grands ensembles morphodynamiques : notamment du fait de l'action anthropique sur le milieu eau (dragages, extraction, aménagements hydrauliques, etc.), des changements climatiques, etc.

Une telle étude est notamment importante du fait qu'une analyse morphodynamique trop localisée, centrée uniquement sur le système de protection peut être insuffisante, par exemple pour évaluer le risque d'un contournement du système, ou encore pour prendre en compte les effets d'éventuels engravements localisés.

*Des références méthodologiques et techniques pouvant être utilisées pour réaliser cette étude élémentaire sont présentées au paragraphe 3. du Chapitre 5.*

- *Préciser si la production de nouvelles données est demandée, ou possible (sur justification de sa nécessité par le candidat), ou si seules la consultation et l'analyse des données mises à disposition sont exigées.*
- *Donner le descriptif des données existantes pouvant être mises à disposition.*

### II-03.8 – Étude élémentaire 4 – Hydraulique globale

Cette étude a pour objectif d'identifier et de caractériser les événements hydrauliques rares et exceptionnels dont résultent les sollicitations hydrauliques sur le système d'endiguement, qui sont susceptibles de se réaliser dans le milieu eau. Le titulaire de l'étude devra veiller à ce que l'emprise de l'étude élémentaire soit suffisamment grande pour caractériser correctement la propagation des phénomènes hydrauliques rares et exceptionnels.

Ces événements hydrauliques rares et exceptionnels, qui serviront de référence dans la suite de l'étude de dangers, doivent être caractérisés en termes de probabilités de cinétiques et de caractéristiques hydrauliques.

Les caractéristiques hydrauliques des événements rares et exceptionnels devront être décomposées, calculés et justifiés en termes de :

*Décrire les paramètres concernés en fonction du contexte hydraulique (fluvial, maritime, torrentiel, etc.).*

Différentes combinaisons de ces paramètres, pour des événements de périodes de retour et de niveaux d'eau équivalents, devront être envisagés et validés par le comité de pilotage de l'étude.

Le choix des événements hydrauliques rares et exceptionnels à caractériser devra être cohérent, en relation avec l'étude hydraulique locale (voir II-03.11 – Étude élémentaire 7), avec les besoins en termes de caractérisation des niveaux de protection, sûreté et danger qui définissent le système d'endiguement (voir encadré relatif aux niveaux en début d'Article II-02).

*Des références méthodologiques et techniques pouvant être utilisées pour réaliser l'étude élémentaire sont présentées au paragraphe 3. du Chapitre 5.*

- *Préciser si la production de nouvelles données est demandée, ou possible (sur justification de sa nécessité par le candidat), ou si seules la consultation et l'analyse des données mises à disposition sont exigées.*
- *Donner le descriptif des données existantes pouvant être mises à disposition.*

### II-03.9 – Étude élémentaire 5 – Caractérisation géotechnique et structurelle du système de protection

Cette partie de l'étude a pour objectif de **définir les caractéristiques géotechniques et structurelles**, de la crête jusqu'à la fondation (les composants, comprenant la fondation et les pieds de digues, leur disposition et leurs propriétés mécaniques et géomécaniques), pour les différentes portions du système d'endiguement. Ce travail devra notamment s'appuyer sur les résultats de la VTA.

Les résultats attendus sont notamment :

- la définition des différents types de sections en travers de digues (en termes de composants, comprenant la fondation et les pieds de digues) ;
- la nature des matériaux des différents composants des tronçons de digues ;
- les caractéristiques mécaniques des composants ;
- la perméabilité des composants ;
- la sensibilité des composants aux différents mécanismes de détérioration (ces conclusions devront alimenter l'étude élémentaire 6 – morphodynamique locale).

*Des références méthodologiques et techniques pouvant être utilisées pour réaliser l'étude élémentaire sont présentées au paragraphe 3. du Chapitre 5.*

- *Préciser si la production de nouvelles données est demandée, ou possible (sur justification de sa nécessité par le candidat), ou si seules la consultation et l'analyse des données mises à disposition sont exigées.*
- *Donner le descriptif des données existantes pouvant être mises à disposition.*

### II-03.10 – Étude élémentaire 6 – Comportement morphodynamique local du milieu eau

Les objectifs de cette étude élémentaire sont :

- de faire le bilan des évolutions morphologiques passées, dans les trois dimensions de l'espace, du milieu extérieur eau (en lien avec sa topographie et sa bathymétrie) au

contact ou à proximité immédiate du système d'endiguement (dynamiques sédimentaires et érosions externes des ouvrages) du fait des actions hydrauliques (en temps normal et lors d'événements hydrauliques rares et exceptionnels) et anthropiques, et de la nature des matériaux mis en jeu ;

- de définir et localiser les évolutions morphologiques futures envisageables (y compris en situations transitoires) au contact des ouvrages (affouillement, érosion latérale, dépôt de sédiments, etc.), en cas d'événements hydrauliques rares et exceptionnels ou moyens dans le milieu eau, pour une période de 20 ans.

Cette étude devra plus particulièrement être menée et justifiée au travers des résultats de l'étude morphodynamique globale (étude élémentaire 3), de l'étude hydraulique locale (étude élémentaire 7) et de l'étude de caractérisation géotechnique et structurelle (étude élémentaire 5).

*Des références méthodologiques et techniques pouvant être utilisées pour réaliser l'étude élémentaire sont présentées au paragraphe 3. du Chapitre 5.*

- Préciser si la production de nouvelles données est demandée, ou possible (sur justification de sa nécessité par le candidat), ou si seules la consultation et l'analyse des données mises à disposition sont exigées.
- Donner le descriptif des données existantes pouvant être mises à disposition.

### II-03.11 – Étude élémentaire 7 – Comportement hydraulique local du milieu eau

Cette étude élémentaire a pour objectif l'estimation des niveaux d'eau, de l'intensité et de la cinétique des actions hydrauliques possibles au contact du système d'endiguement, pour les différents événements hydrauliques rares et exceptionnels dont la probabilité et les caractéristiques hydrauliques générales ont été préalablement définies dans l'étude hydraulique globale (voir II-03.8 – Étude élémentaire 4).

La réalisation de cette étude, qui peut notamment être menée par le biais d'une modélisation hydraulique numérique ou physique, ou d'expertise et de calculs d'hydraulique spécifiques soigneusement justifiés, reposera sur les résultats de l'étude hydraulique globale et sur la connaissance de la topographie du milieu eau et du système d'endiguement.

*Des références méthodologiques et techniques pouvant être utilisées pour réaliser l'étude élémentaire sont présentées au paragraphe 3. du Chapitre 5.*

- Préciser si la production de nouvelles données est demandée, ou possible (sur justification de sa nécessité par le candidat), ou si seules la consultation et l'analyse des données mises à disposition sont exigées.
- Donner le descriptif des données existantes pouvant être mises à disposition (notamment les éventuels modèles hydrauliques existants pour la zone d'étude).

Le postulant puis le titulaire devront clairement expliciter la méthodologie qui sera mise en œuvre pour prendre en compte les forts liens d'interdépendance qui existent entre les études élémentaires :

- morphodynamique globale (3) ;
- hydraulique globale (4) ;
- caractérisation géotechnique et structurelle du système de protection (5) ;
- comportement morphodynamique local du milieu eau (6) ;
- comportement hydraulique local du milieu eau (7).



### II-03.12 – Étude élémentaire 8 – Ouvrages inclus

Cette étude élémentaire a pour objectif l'identification, la localisation et la caractérisation des ouvrages inclus dans le système de protection (canalisations, bâtiments, autres structures anthropiques, ouvrages hydrauliques ponctuels, etc.).

Deux grands types d'ouvrages inclus peuvent être identifiés :

- les ouvrages participant au fonctionnement hydraulique du système de protection : vannes, clapets, canalisations, etc. ;
- les ouvrages constituant des facteurs aggravants pour la sûreté du système de protection : canalisations d'autres natures, bâtis encastrés, etc.
- *Préciser si la production de nouvelles données est demandée, ou possible (sur justification de sa nécessité par le candidat), ou si seules la consultation et l'analyse des données mises à disposition sont exigées.*
- *Donner le descriptif des données existantes pouvant être mises à disposition (archives disponibles, des résultats de la VTA, des DICT ayant été déposés par le passé, etc.).*

### II-03.13 – Étude élémentaire 9 – Autres actions et facteurs aggravants

Cette étude élémentaire a pour objectif l'identification, la description et la caractérisation **quantitative** des éventuels autres facteurs aggravants et sources d'actions envisageables sur le système d'endiguement. Ce travail sera notamment mené sur la base des résultats de la VTA.

Ces facteurs aggravants, qui devront avoir été préalablement identifiés dans l'étude d'identification du risque (étude élémentaire A) sont par exemple :

- la végétation ;
- les animaux fouisseurs ;
- les embâcles ;
- les séismes ;
- la circulation sur les digues ;
- les chocs liés à la navigation, etc.
- *Préciser si la production de nouvelles données est demandée, ou possible (sur justification de sa nécessité par le candidat), ou si seules la consultation et l'analyse des données mises à disposition sont exigées.*
- *Donner le descriptif des données existantes pouvant être mises à disposition.*

### II-03.14 – Étude élémentaire 10 – Recensement des enjeux

Cette étude élémentaire a pour objectif la localisation et la description de la nature des enjeux présents dans la zone protégée (populations, types d'occupation du sol, réseaux, etc.).

Ce travail doit notamment être mené sur la base des données disponibles dans les dossiers d'ouvrage, de photos aériennes, de la cartographie IGN et des différentes bases de données existantes et/ou mises à disposition.

*L'utilisation d'un SIG est avantageuse pour cette étude, on pourra y reporter chaque type d'enjeu recensé et ses différentes classes dans une couche séparée, et utiliser les fonctions du SIG pour représenter les informations de manière brute ou croisée.*

- *Préciser si la production de nouvelles données est demandée, ou possible (sur justification de sa nécessité par le candidat), ou si seules la consultation et l'analyse des données mises à disposition sont exigées.*
- *Donner le descriptif des données existantes pouvant être mises à disposition : PPR, PCS, PAPI, bases de données disponibles (BD topo, recensements Insee, etc.), etc.*

### II-03.15 – Étude élémentaire B – Analyse fonctionnelle du système d'endiguement

L'analyse fonctionnelle a pour objet la décomposition du système d'endiguement et la caractérisation de son fonctionnement, aux différentes échelles qui le caractérisent. Le fonctionnement du système d'endiguement doit être analysé du point de vue des interactions que lui impose son environnement (milieux extérieurs : milieux eau, zones protégées, autres, réglementation, état de l'art, etc.) et compte tenu des éléments qui constituent le système (les digues et autres ouvrages et leurs composants, les éventuels éléments naturels). Il doit donc être caractérisé au travers de l'identification de l'ensemble des relations fonctionnelles qui prennent place à l'extérieur du système d'endiguement (entre le système d'endiguement et les éléments de son environnement) et à l'intérieur du système d'endiguement (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 contraintes (contraintes notamment imposées par l'environnement et la réglementation) du système d'endiguement (*voir Chapitre 5 : paragraphe 1.2.* de l'ouvrage « Inondations – Analyse de risque des systèmes de protection »).

Elle consiste ensuite en une analyse fonctionnelle interne, identifiant l'ensemble des fonctions techniques (*voir Chapitre 5 : paragraphe 1.2.* de l'ouvrage « Inondations – Analyse de risque des systèmes de protection ») hydrauliques des éléments du système d'endiguement et des fonctions techniques structurelles des composants formant ces éléments.

Le niveau de raffinement de l'analyse fonctionnelle interne structurelle est déterminé et justifié en fonction des besoins ultérieurs de l'analyse de la défaillance du système endigué :

- pour les ouvrages et systèmes de génie civil, le niveau de détail de l'analyse sera le composant de génie civil étudié : par exemple, le corps de digue en remblai, le drain, le revêtement de protection, les interfaces, etc. ;
- pour les éventuels ouvrages et systèmes autres que génie civil tels que les ouvrages hydrauliques traversants (canalisations, clapets antiretour, vannes, etc.) ou les pompes, les éléments constitutifs de l'équipement susceptibles de dysfonctionnements devront être pris en compte : par exemple, les articulations, les échelons, les regards, etc.

Les éventuelles fonctions de sécurité (*voir Chapitre 5 : paragraphe 1.2.* de l'ouvrage « Inondations – Analyse de risque des systèmes de protection ») associées aux fonctions techniques identifiées et les barrières de sécurité qui les portent peuvent alors être identifiées.

Dans un système bien conçu, les fonctions techniques répondent à l'ensemble des objectifs définis au travers des fonctions principales et des fonctions contraintes identifiées lors de l'analyse fonctionnelle externe.

#### Remarque

L'analyse fonctionnelle constitue la base sur laquelle est construite l'analyse de la défaillance du système d'endiguement. Une cohérence totale doit donc exister entre l'analyse fonctionnelle et l'analyse de la défaillance. Par ailleurs, l'analyse fonctionnelle ne doit pas se limiter à une simple description du système et de ses composants mais doit constituer une analyse structurée, avec un formalisme facilitant le passage à l'étape d'analyse de la défaillance.

Les résultats de l'analyse fonctionnelle interne (les fonctions techniques structurelles et hydrauliques de chacun des sous-systèmes et des composants du système d'endiguement et les barrières de sécurité associées) doivent être exposés sous la

forme de tableaux de synthèse répertoriant les différentes granularités d'analyse du système d'endiguement.

*La mise en application de la méthode d'analyse fonctionnelle présentée au paragraphe 1. du Chapitre 9 peut être imposée pour la réalisation de cette étude élémentaire. Bien entendu, le bureau d'études aura la responsabilité d'adapter la méthode et d'utiliser de manière appropriée et cohérente les exemples de fonctions proposées.*

### II-03.16 – Étude élémentaire C – Analyse de la défaillance du système d'endiguement

Reposant directement sur les résultats de l'analyse fonctionnelle (voir II-03.15), l'objectif de cette partie de l'analyse de risque est d'évaluer la possibilité de défaillance des fonctions techniques hydrauliques des éléments qui composent le système d'endiguement et de défaillance structurelle des composants qui constituent ces éléments du système. Cette analyse doit aboutir à l'identification et à la description des différents scénarios de défaillance envisageables à l'échelle :

- du système endigué : 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 qui constituent le système d'endiguement : les scénarios de brèches pouvant résulter, pour chacun des éléments du système, de scénarios de défaillances structurelles des composants le constituant.

#### Remarque

L'analyse fonctionnelle constitue la base sur laquelle est construite l'analyse de la défaillance du système d'endiguement. Une cohérence totale doit exister entre l'analyse fonctionnelle et l'analyse de la défaillance.

*La mise en application de la méthode d'analyse de la défaillance présentée au paragraphe 2. du Chapitre 9 peut être imposée pour la réalisation de cette étude élémentaire.*

Les résultats de l'analyse de la défaillance du système d'endiguement consistent en premier lieu en des tableaux d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) récapitulants, pour chaque fonction technique (structurelles et hydrauliques) des éléments du système d'endiguement, les modes de défaillance associés, leurs causes et leurs effets (voir Tableaux 9-VII et 9-XI de l'ouvrage « Inondations – Analyse de risque des systèmes de protection »).

Ces résultats consistent ensuite en la représentation de l'ensemble des scénarios de défaillance (structurels et hydrauliques) envisageables pour le système d'endiguement. Pour permettre une meilleure lisibilité des enchaînements et combinaisons d'événements qui composent les scénarios de défaillance, ces derniers doivent être représentés sous la forme d'arbres (voir Chapitre 9 : paragraphe 3. de l'ouvrage « Inondations – Analyse de risque des systèmes de protection »). Ces représentations faciliteront ensuite l'activité de diagnostic et le calcul des probabilités de défaillance.

### II-03.17 – Étude élémentaire 11 – Probabilités conditionnelles de défaillance

Cette étude élémentaire, qui repose notamment sur les résultats de l'analyse de la défaillance structurelle, correspond au diagnostic structurel de la performance du système d'endiguement.

Ce diagnostic a pour finalité, dans le cadre d'une analyse de risque, l'estimation des probabilités conditionnelles (pour des conditions de sollicitations hydrauliques données) de la défaillance structurelle du système d'endiguement (probabilités d'ouvertures de brèches).

Les résultats à produire, pour chaque type de section en travers de digue identifiée lors de l'analyse fonctionnelle interne structurelle, sont :

1. identification et caractérisation des différents tronçons homogènes (pouvant correspondre à des points singuliers) en fonction :
    - de leur géométrie et donc leurs profils en travers (*voir II-03.4*),
    - des données géotechniques disponibles ou obtenues lors des éventuelles études complémentaires (*voir II-03.9*),
    - du comportement morphodynamique du milieu eau au droit de chacun d'entre eux : érosion, dépôt de matériaux, etc. (*voir II-03.10*),
    - des observations faites lors de la VTA,
    - de la présence d'ouvrages inclus : canalisations, bâti, etc. (*voir II-03.12*),
    - de la nature des éventuels facteurs aggravants : végétation ligneuse, terriers d'animaux fouisseurs, activités humaines, etc. (*voir II-03.13*) ;
  2. choix expert (parmi les scénarios déterminés lors de l'analyse de la défaillance) et justification des scénarios de défaillance structurelle à considérer **pour chaque tronçon homogène** préalablement identifié et en fonction de ses caractéristiques (les scénarios pourront être différents selon les tronçons) ;
  3. estimation de la performance, vis-à-vis de la défaillance structurelle (ouverture de brèche) :
    - **pour chaque tronçon homogène** préalablement identifié et caractérisé,
    - pour chaque scénario de défaillance structurelle retenu,
    - pour les différents événements hydrauliques préalablement identifiés (*voir II-03.11*).
- Différents types de résultats peuvent être produits : seuils (charges limites), coefficients de sécurité, index ou indicateurs, etc. Les méthodes envisagées seront proposées par le titulaire pour chaque mécanisme ou scénario, et validées par le comité de pilotage ;
4. estimation de l'incertitude ou de l'intervalle de confiance sur les résultats de l'estimation de la performance. La ou les méthodes envisagées seront proposées par le titulaire pour chaque mécanisme ou scénario, et validées par le comité de pilotage ;
  5. traduction des résultats de l'estimation de la performance en termes de probabilités conditionnelles, c'est-à-dire en termes de probabilité de rupture pour une intensité d'aléa donnée pour tous les scénarios envisagés (si la méthode d'estimation de la performance ne la produit pas directement) ;
  6. estimation des probabilités annuelles de défaillance pour chaque événement hydraulique de sollicitation ;
  7. détermination des niveaux de sûreté et de danger des ouvrages.

La méthode à employer sera proposée dans le cadre de l'offre, puis calibrée et calée en concertation avec le comité de pilotage de l'étude.

Ce diagnostic doit permettre d'aboutir à la détermination des niveaux de sûreté et de danger du système d'endiguement (*voir Article II-02*). Ces derniers, qui seront validés par le comité de pilotage de l'étude (*ou in fine par le gestionnaire GEMAPI*), devront être affichés dans l'EdD.

Il est attendu un rendu cartographique à une échelle adaptée de l'ensemble de ces résultats pour une meilleure compréhension et exploitation par le gestionnaire du système et par les autres entités concernées (services de l'état, services de secours, communes, etc.).

### II-03.18 – Étude élémentaire 12 – Choix des scénarios d'inondation à caractériser

Cette étude a pour objectif de choisir de manière experte, les scénarios de défaillance hydraulique ou de dépassement du niveau de protection apparent qui seront à considérer dans la suite de l'analyse de risque.

Ces scénarios sont choisis parmi les scénarios d'inondation déterminés dans la partie analyse de la défaillance hydraulique du système d'endiguement (*voir II-03.16*).

Ce sont a minima :

- le ou les scénarios d'inondation, par défaillance du système d'endiguement, **les plus probables** (selon résultats du diagnostic structurel et de l'estimation experte des probabilités de défaillance des sous-systèmes hydrauliques) ;
- un ou plusieurs scénarios d'inondation **sans défaillance du système d'endiguement**, notamment pour un niveau d'eau égal au niveau de protection du système d'endiguement (pour évaluer le fonctionnement nominal du système) et pour un niveau d'eau supérieur ou égal au niveau de sûreté (pour caractériser le risque résiduel associé au fonctionnement nominal du système de protection) ;
- le ou les scénarios d'inondation **les plus dommageables** pour les enjeux ;
- un ensemble de scénarios d'inondation permettant de **couvrir l'ensemble de la variabilité de l'aléa d'inondation** envisageable dans la zone protégée (en termes d'emprise et d'intensité des phénomènes dangereux d'inondation).

Le choix des scénarios d'inondation à considérer, dont le nombre sera au moins de (*indiquer le nombre de modélisations demandées*) devra être validé par le comité de pilotage de l'étude.

### II-03.19 – Étude élémentaire 13 – Caractérisation des brèches

L'objectif de cette partie de l'étude est de définir et de justifier les caractéristiques des brèches (y compris les fosses d'érosion) qui sont impliquées dans les scénarios d'inondation choisis dans le cadre de l'étude élémentaire 12 (*voir II-03.18*).

- Les brèches considérées doivent être caractérisées en termes de géométrie finale, de dynamique d'élargissement et d'approfondissement, ainsi que de caractéristiques hydrauliques (hydrogrammes de brèches), en fonction de la nature des actions hydrauliques issues du milieu eau (*voir II-03.11*), des caractéristiques structurelles des tronçons de digues concernés et des résultats du diagnostic de la performance de l'ouvrage (notamment la nature des scénarios d'ouverture de brèche susceptibles d'être impliqués).
- Le cas des brèches sur des éléments de protection secondaire (*voir II-03.5*) devra également être considéré.
- Une attention particulière devra entre autres être portée sur le dimensionnement de la géométrie des fosses d'érosion qui accompagnent l'ouverture des brèches, et à leurs implications hydrauliques.
- Le titulaire s'appuiera principalement sur les résultats de l'étude élémentaire accidentologique et sur une analyse bibliographique spécifique pour mener à bien cette étude élémentaire. Il pourra également intégrer des informations issues de projets de recherche et de publications ou de communications à des congrès centrés sur le sujet des brèches.

### II-03.20 – Étude élémentaire D – Probabilités des inondations

L'objectif de cette partie de l'étude est l'estimation de la probabilité de réalisation des scénarios d'inondation dont il a été choisi (*voir II-03.18*) d'estimer le risque.

Pour chaque scénario d'inondation, le calcul de la probabilité d'occurrence du scénario est mené par la combinaison :

- des **probabilités conditionnelles de défaillance structurelle** (ouverture de brèche) des tronçons de digues subissant des brèches (*voir II-03.17*) ;
- de l'estimation experte et de la justification des **probabilités conditionnelles d'occurrence des éventuelles défaillances opérationnelles** (non-fermeture de batardeau,

non-fermeture de vannes, non-fonctionnement de pompe, etc.) que comporte le scénario d'inondation considéré ;

- de la **probabilité d'occurrence de l'événement hydraulique** de sollicitation à considérer (*voir* II-03.8 et II-03.11) ;
- de la **prise en compte des éventuelles barrières de sécurité** liées à des fonctions techniques de sous-systèmes hydrauliques, dont la performance pourra être estimée dans le cadre de cette étude élémentaire.

Les probabilités des scénarios d'inondation de la zone protégée sans défaillance du système d'endiguement correspondront directement des **probabilités d'occurrence des événements hydrauliques extrêmes** de sollicitation correspondants (*voir* II-03.8 et II-03.11).

### II-03.21 – Étude élémentaire E – Intensité et cinétique des inondations

L'objectif de cette partie de l'étude est l'estimation de l'intensité (hauteur, vitesse verticale, vitesse horizontale) et de la cinétique (temps de propagation) des phénomènes d'inondation impliqués par chacun des scénarios d'inondation qui ont été choisis dans le cadre de l'étude élémentaire 12 (*voir* II-03.18).

Pour chaque scénario d'inondation ce travail est mené sur la base de la connaissance :

- de la localisation des entrées d'eau dans la zone protégée ou dans des sous-parties de celle-ci (*voir* II-03.18). Selon les scénarios d'inondation, ces entrées d'eau sont situées sur la ligne de défense principale ou sur des éléments de protection secondaire dans le cas de communication entre sous-partie de la ZP (*voir* II-03.5) ;
- de l'estimation de l'intensité et de la cinétique des entrées d'eau dans la zone protégée. Ces entrées d'eau sont généralement des brèches (*voir* II-03.19) ou des surverses sans rupture, mais peuvent également correspondre au fonctionnement (intempêtif ou non) d'ouvrages hydrauliques ponctuels (vannes, clapet, non-fermeture de batardeaux, etc.) ;
- de la topographie de la zone protégée (*voir* II-03.4).

La réalisation des études hydrauliques d'estimation de l'intensité et de la cinétique des phénomènes dangereux d'inondation impliqués par chacun des scénarios d'inondations est menée selon la démarche suivante :

- caractérisation hydraulique des entrées et transferts d'eau dans la zone protégée, pour chaque scénario d'inondation : brèches, surverses sans rupture, non-fermeture de batardeaux, etc. ;
- modélisation hydraulique de la propagation de chaque scénario d'inondation dans la zone protégée (suivant une méthode que le soumissionnaire devra expliciter et justifier dans son offre) : modélisation numérique 2D, modélisation 1D à casiers, analyse experte, etc. ;
- calcul des résultats hydrauliques pour chaque scénario d'inondation considéré :
  - hauteur d'eau,
  - vitesse horizontale,
  - vitesse verticale,
  - cinétique des scénarios (temps d'arrivée de l'onde, durée de l'inondation, temps de vidange) ;
- traduction de chaque scénario d'inondation en termes d'intensité d'aléa d'inondation par un calcul spatialisé de combinaison des résultats hydrauliques ci-dessus, réalisé en utilisant un outil SIG. En vue de l'estimation de la gravité des conséquences des scénarios d'inondation, les règles de combinaison des différents phénomènes hydrauliques (hauteurs, vitesses, etc.) et les bornes des classes d'aléa seront définies en cohérence avec la définition des classes de vulnérabilité des enjeux, et en accord avec le comité de pilotage ;

- identification des « enveloppes » de zones dangereuses, pour le cas des scénarios d'inondation par défaillance du système d'endiguement ainsi que pour le cas des scénarios d'inondation sans défaillance du système d'endiguement.

### II-03.23 – Étude élémentaire F – Vulnérabilité des enjeux

L'objectif de cette partie de l'étude est de procéder :

- au choix des types d'enjeux à considérer et de la manière de traiter leur vulnérabilité pour estimer les conséquences des scénarios d'inondation dans l'analyse de risque que l'on mène (*voir Chapitre 4 : paragraphe 8.* de l'ouvrage « Inondations – Analyse de risque des systèmes de protection ») ;
- à la définition des classes de vulnérabilité pour chaque type d'enjeu choisi et en fonction du type de vulnérabilité retenu pour l'analyse de risque : définition de l'endommagement pour chaque classe d'intensité de l'aléa d'inondation (par exemple, faible, moyen, fort, très fort), en intégrant :
  - la sensibilité à l'aléa d'inondation (intrinsèque à chaque type d'enjeu),
  - l'exposition à l'aléa d'inondation (en fonction de la localisation des enjeux),
  - l'adaptation au risque d'inondation (la réaction et la résilience) ;
- à la traduction spatiale des classes de vulnérabilité par l'utilisation d'un outil SIG.

Cette étude élémentaire devra notamment être menée sur la base des résultats de l'étude de recensement des enjeux (*voir II-03.14*) et être justifiée par un travail sur le retour d'expérience et la bibliographie.

- *Préciser si la production de nouvelles données est demandée, ou possible (sur justification de sa nécessité par le candidat), ou si seules la consultation et l'analyse des données mises à disposition sont exigées.*
- *Donner le descriptif des études et données existantes pouvant être mises à disposition.*

### II-03.23 – Étude élémentaire G – Gravité des conséquences

L'objectif de cette partie de l'étude est de procéder :

- à l'estimation des conséquences des scénarios d'inondation étudiés pour les enjeux présents dans la zone protégée ;
- au positionnement des conséquences dans des classes de gravité.

Ce travail est mené selon la démarche suivante :

- calcul des conséquences des scénarios d'inondations par croisement spatialisé de l'intensité et la cinétique des aléas d'inondations (*voir II-03.21*) avec la vulnérabilité des enjeux (*voir II-03.22*), par l'utilisation d'un outil SIG ;
- estimation de la gravité des conséquences des scénarios d'inondations sur la base d'une ou plusieurs grilles de gravité des conséquences qui seront définies en concertation avec le comité de pilotage de l'étude.

Un outil SIG croisant aléas d'inondations (*voir II-03.21*) et vulnérabilité des enjeux (*voir II-03.22*), en utilisant la ou les grilles de gravité, devra être produit par le titulaire pour permettre d'évaluer les conséquences des scénarios d'inondations étudiés.

### II-03.24 – Étude élémentaire H – Estimation du risque d'inondation

Cette partie de l'étude constitue la conclusion de l'analyse de risque. Elle fait le bilan des résultats de cette analyse en termes d'estimation du risque associé à chacun des différents scénarios d'inondation retenus dans le cadre de l'EdD. Chacun de ces scénarios d'inondation est donc caractérisé en termes de probabilité d'occurrence et de gravité des conséquences pour les enjeux de la zone protégée.



C'est sur la base de la combinaison de ces deux facteurs que sera ensuite menée l'évaluation du risque et donc la définition de l'acceptabilité de chacun des scénarios d'inondation.

### II-03.25 – Études élémentaires 14 et I – Acceptabilité et Évaluation du risque

L'évaluation du risque d'inondation a pour objectif de classer les différents scénarios d'inondation considérés par l'EdD du point de vue de leur niveau d'acceptabilité (par exemple, acceptable, préoccupant, inacceptable), en fonction de leurs niveaux de risque précédemment estimés.

L'évaluation du risque associé à chaque scénario d'inondation considéré est menée sur la base d'une grille de criticité dont les différentes classes d'acceptabilité du risque sont déterminées en concertation avec le comité de pilotage de l'étude.

L'évaluation du risque proprement dite consiste alors en le positionnement des scénarios d'inondation, en fonction de leur niveau de risque (niveaux de probabilité et de gravité), dans la grille de criticité, et en la lecture du niveau d'acceptabilité auquel correspond le risque ainsi défini.

### II-03.26 – Étude élémentaire J – Mesures de réduction du risque

Dans cette partie de l'étude, sont identifiées et caractérisées les mesures de réduction du risque qui pourront être proposées en conclusion de l'EdD. Ce travail est mené sur la base des résultats de l'estimation et de l'évaluation du risque (pour prioriser les scénarios nécessitant des mesures) et de l'analyse de risque (pour identifier les problématiques techniques et définir les mesures envisageables).

Ces mesures seront soit :

- des mesures appliquées au système d'endiguement : ces mesures sont de la responsabilité du gestionnaire du système d'endiguement. Leur objectif est d'agir sur l'efficacité de la protection, en améliorant selon les cas de figure :
  - la connaissance du système d'endiguement,
  - le fonctionnement hydraulique du système d'endiguement en termes de protection contre les inondations : définition d'un nouveau niveau pour l'objectif de protection, modifications des sous-systèmes,
  - la sûreté des tronçons du système d'endiguement : modifications/réparations (structurelles) des tronçons de digues,
  - la surveillance et l'entretien courant du système d'endiguement,
  - la gestion en crise relative au système d'endiguement ;
- des mesures appliquées au milieu eau : les résultats de l'analyse de risque peuvent mettre en évidence des modifications de la morphologie du milieu eau pouvant avoir un impact direct sur le fonctionnement hydraulique du système d'endiguement. Il peut en découler des mesures de réduction du risque visant la surveillance, ou la mise en œuvre de travaux pour la gestion ou la maîtrise de la morphologie des milieux eau ;
- des mesures appliquées à la zone protégée : ces mesures sont la responsabilité de différents types d'acteurs de la zone protégée (aménageurs, pouvoirs publics, forces de l'ordre, sécurité civile, etc.). Elles ont d'abord pour vocation de permettre le fonctionnement hydraulique prévu de la zone protégée : entretien des ouvrages de transparence, entretien des talwegs et autres canaux, etc. Elles ont également pour objectif de diminuer la vulnérabilité (en crise ou non) des enjeux présents dans la zone protégée (mise en sécurité des populations, maîtrise de l'urbanisme).

Le titulaire devra présenter une estimation du niveau de réduction du risque (en termes de probabilité) pour chaque mesure proposée, et une évaluation du niveau de risque

atteint successivement à chaque étape de la mise en œuvre des mesures de réduction du risque, en fonction du planning de mise en œuvre de ces mesures, qui devra être proposé en concertation avec le gestionnaire d'ouvrage.

Cela devra être fait au travers d'une réévaluation du risque à la suite de la prise en compte des mesures de réduction du risque, par l'intégration de ces dernières aux arbres d'événement des scénarios d'inondation (et scénarios d'ouverture de brèche associés) retenus au II-03.18, sous la forme de barrières de sécurité, et le calcul des niveaux de risque ainsi obtenus.

### II-03.27 - Rédaction du rapport de l'EdD

La rédaction du rapport de l'EdD doit être conduite sur la base de l'ensemble des résultats des études élémentaires de la méthodologie Irstea précédemment exposées et suivre le plan réglementaire des EdD présenté à l'Article II-02.

L'alimentation des chapitres du plan réglementaire de l'EdD par les résultats des études élémentaires devra se faire sur la base du tableau suivant : *insérer, en fonction du cadre réglementaire de l'EdD réalisée, l'une ou l'autre des colonnes du tableau présenté au chapitre III.5.1 du guide analyse de risque des systèmes de protection.*

L'ensemble des résultats de l'étude de dangers doivent être cartographiés et illustrés pour en faciliter la lecture et l'opérationnalité pour le gestionnaire du système d'endiguement. Ces cartes doivent illustrer les différents chapitres de l'EdD. Par ailleurs, l'intégralité de la cartographie produite ou utilisée dans le cadre de l'étude doit également se retrouver dans le chapitre 10 du plan réglementaire de l'EdD.

## Chapitre III. Déroulement des études et rendus

### Article III-01 : Pilotage des études

Un comité de pilotage sera mis en place pour le présent marché. Il traitera de l'ensemble du système d'endiguement du marché. Il aura pour mission de prendre les décisions dans la conduite de l'étude et de les valider.

La composition du comité de pilotage est la suivante : *préciser la composition du comité de pilotage.*

Chaque participant aux réunions du comité de pilotage se réserve le droit d'inviter un ou plusieurs tiers en tant que de besoin.

### Article III-02 : Principales contraintes

Échéance ou délai de réalisation

*Préciser le délai de réalisation imposé et rappeler l'échéance réglementaire, si celle-ci a été fixée par la réglementation générale ou par arrêté préfectoral ou délai de réalisation imposé.*

Taille du rapport

Afin d'optimiser le pilotage technique de l'étude et sa relecture, la taille du rapport de l'EdD ne devra pas dépasser (*préciser un nombre de pages, entre 150 et 300 pages, cohérent avec la dimension et la complexité du système objet de l'EdD*) sans les annexes. La visite technique approfondie fera l'objet d'un rapport spécifique.

## Article III-03 : Déroulement et exécution du marché

### III-03.1 – Généralités

Une visite commune des ouvrages et des points singuliers de la zone protégée et du milieu extérieur eau sera organisée dès la notification du marché.

Six réunions du comité de pilotage sont prévues pour la réalisation du marché (*proposition cohérente avec les modalités présentées au III-03.2, à adapter si besoin*). Chaque réunion se fera sur une journée entière.

Le maître d'ouvrage organise les réunions, réserve les salles, invite les participants. Le titulaire réalise les supports de réunion et rédige les comptes rendus qui devront être transmis aux différents membres du comité de pilotage au plus tard une semaine après la réunion.

### III-03.2 – Objectifs et déroulement des réunions du comité de pilotage

Le but du comité de pilotage est de valider à l'avancement, la méthodologie et les résultats produits par le titulaire du marché, sur la base des communications que ce dernier devra présenter lors de chaque réunion du comité de pilotage.

Le déroulement du marché sera rythmé par les réunions du comité de pilotage, et devra scrupuleusement s'inscrire dans le cadre méthodologique développé au chapitre II du présent document.

Il est demandé au candidat de présenter un phasage précis du déroulement de l'EdD (intégrant chacune des études élémentaires). Chaque étude élémentaire devra faire l'objet d'une première présentation et discussion lors d'une réunion, et d'une présentation pour validation lors de la réunion suivante.

Le suivi de l'étude peut être jalonné par 6 réunions (expérience DREAL Centre – Val-de-Loire) dont une proposition de contenu est définie dans le [Tableau A3-1](#).

**Tableau A3-1.** Proposition de contenu des réunions du comité de pilotage.

Réunion	Contenu	Délais
R1	<p><b>Réunion de lancement</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Présentation de la méthodologie mise en œuvre par l'organisme agréé et du calendrier prévisionnel de réalisation des prestations (EdD + études élémentaires + programmes et rapports d'investigations + VTA)</li> <li>- Point sur les données mises à disposition, les données externes à exploiter et les données à produire</li> <li>- Étude accidentologique du système endigué (0)</li> <li>- Première analyse topographique (-1)</li> <li>- Définition du périmètre d'étude et identification du risque (A)</li> <li>- Programme des éventuelles investigations complémentaires à valider</li> </ul>	1 à 2 mois après la notification pour appropriation des données transmises et exploitation des archives
R2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rapport des éventuelles investigations complémentaires</li> <li>- Première caractérisation géotechnique et structurelle (-5)</li> <li>- Topographie (1)</li> <li>- Analyse de la gestion de la sécurité (2)</li> <li>- Hydraulique globale ou diagnostic du modèle hydraulique mis à disposition pour une adaptation locale (4)</li> <li>- Programme d'investigations géotechniques à valider</li> </ul>	2 à 3 mois après R1

Tableau A3-1. (Suite).

Réunion	Contenu	Délais
R3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Caractérisation géotechnique et structurelle (5) (incluant les conclusions des éventuels rapports d'investigations complémentaires)</li> <li>- Morphodynamique locale (6)</li> <li>- Hydraulique locale (7)</li> <li>- Ouvrages inclus (8)</li> <li>- Autres sollicitations externes (y compris animaux fouisseurs et végétation) (9)</li> <li>- Recensement des enjeux (10)</li> <li>- Analyse fonctionnelle (B)</li> <li>- Analyse de la défaillance (C)</li> <li>- Rapport de VTA</li> </ul>	3 à 4 mois après R2
R4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Probabilité conditionnelle de défaillance (11)</li> <li>- Choix des scénarios d'inondation (12)</li> <li>- Caractérisation des brèches (13)</li> <li>- Probabilité des inondations (D)</li> <li>- Rapport de construction ou d'adaptation du modèle hydraulique approprié à l'analyse des inondations dans la zone protégée</li> </ul>	2 à 3 mois après R3
R5	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intensité et cinétique des inondations (E)</li> <li>- Vulnérabilité des enjeux (F)</li> <li>- Gravité des conséquences (G)</li> <li>- Estimation du risque inondation (H)</li> <li>- Acceptabilité du risque (14)</li> <li>- Évaluation du risque inondation (I)</li> <li>- Mesures de réduction du risque (J)</li> </ul>	3 à 4 mois après R5
R6	Présentation de l'étude finalisée et validation	1 à 2 mois après R5

Les rapports intermédiaires et supports de réunions produits par le titulaire devront être transmis aux différents membres du comité de pilotage, **au plus tard 15 jours avant chaque réunion**, sous peine de report des réunions concernées.

### III-03.3 - Moyens d'exécution

Les moyens d'exécution comprennent :

- les matériels : dispositifs de mesures, outils informatiques (y compris modèles et logiciels), etc.
- les personnels : chef de projet, experts, chargés d'études, entrepreneurs, opérateurs, etc.

L'ensemble des moyens affectés au marché seront décrits, phase par phase, dans l'offre produite par le soumissionnaire, que ceux-ci relèvent du soumissionnaire ou d'éventuels sous-traitants.

Le prestataire s'engage à mettre en œuvre des personnels qualifiés, expérimentés et dotés d'une compétence en rapport avec la (les) phase(s) du marché où ils interviennent et/ou avec le poste de responsabilité qu'ils occupent (fonctions d'encadrement notamment).

Les qualités et références (CV) des personnels du soumissionnaire, ainsi que celles de toutes les sociétés (cabinet de géomètres, entreprises spécialisées, laboratoire de mécanique des sols, etc.) et de leurs personnels, qui seront amenés à intervenir, sous sa responsabilité, dans le cadre de l'exécution du marché, devront être détaillées.

## Article III-04 : Rendus attendus

Le rapport de l'étude de dangers se composera :

- d'un premier volume constitué par le corps de l'étude ;
- d'un second volume qui comprendra les annexes ;
- d'une partie bibliographique qui présentera l'ensemble des sources utilisées lors de l'étude.

Le corps de l'étude reprendra le plan défini par la réglementation.

Les annexes regrouperont :

- un glossaire des termes techniques utilisés dans l'EdD ;
- la liste des intervenants dans la production de l'EdD ;
- les documents administratifs relatifs à la propriété, à la gestion et au statut réglementaire des ouvrages du système, dont les éventuels arrêtés de classement ;
- les rapports de construction du ou des modèles hydrauliques ;
- les rapports des éventuelles investigations géotechniques et géophysiques ;
- les consignes écrites ;
- les rapports de VTA ;
- les rapports de chacune des études élémentaires décrites en II-02 ainsi que tous les résultats intermédiaires nécessaires à la construction de l'étude de dangers.

Les rendus du rapport ainsi que des rapports intermédiaires se feront au format papier et au format numérique. Le nombre d'exemplaires papiers s'élèvera à trois unités pour chaque rapport.

Les titulaires fourniront un CD-Rom ou un DVD comprenant :

- le rapport de l'EdD et de chaque étude élémentaire, aux formats Microsoft Office, LibreOffice et PDF/A (ISO 19005-1) ;
- les couches SIG ayant permis de construire la cartographie aux formats ArcGis et Qgis ;
- le ou les modèles hydrauliques et les fichiers associés et notices d'utilisation ;
- les notes de calcul qui lui ont permis d'établir l'ensemble des résultats produits (modèles de calcul de l'aléa de rupture, etc.) et fichiers informatiques associés (feuille de calcul notamment) ;
- toutes les données et les résultats créés, utilisés ou trouvés dans le cadre de ce marché et notamment les références des archives et une copie au format numérique des documents utilisés (archives, etc.), les rapports des visites réalisées, toutes les sources des informations obtenues dans le cadre du marché (par exemple, les éventuels profils géophysiques, profils sonar, etc.).

Le titulaire mettra à disposition une plateforme de travail collaboratif sur Internet, pendant toute la durée de l'étude, pour faciliter les échanges numériques entre les différents intervenants.

### Observations

#### Plateforme de partage de fichier mise à disposition par le titulaire

- Le site de partage devra disposer des fonctionnalités suivantes :
  - gestion des accès,
  - stockage de fichiers (possibilité de déposer pour les utilisateurs disposant de ce droit),
  - organisation du site suivant l'arborescence logique, approuvée par le comité de pilotage,
  - gestion des droits d'accès pour les différents participants au projet,
  - sécurisation, sauvegardes.
- Le site de partage devra être accessible depuis les postes informatiques du gestionnaire de l'ouvrage (compatibilité avec les proxys respectifs).

- Le titulaire déposera sur le site de partage l'ensemble des documents produits (y compris les comptes rendus de réunion, les notes intermédiaires, les présentations, les avis de la maîtrise d'ouvrage), le site devra disposer de suffisamment d'espace mémoire pour le permettre.
- Le titulaire transmettra une copie complète du site de partage au gestionnaire d'ouvrage à l'issue des prestations incluses dans le présent marché.

#### **Données SIG/Topo**

- Les données SIG produites devront être aux formats ArcGis et Qgis.
- Les objets surfaciques devront être sous forme de polygones et non polylignes.
- Les éventuelles données topographiques produites devront être au format DWG (version 2014 Autocad) et au format libre (LibreCAD).
- Le système de projection sera le système Lambert 93.
- Les hauteurs seront données selon le système NGF/IGN69.
- Le titulaire devra transmettre les fiches de métadonnées.

### **Article III-05 : Propriété des résultats produits**

L'intégralité des données, des modèles et des résultats produits dans le cadre de la réalisation des études que comporte le présent marché ainsi que dans le cadre des éventuelles études de reconnaissances et levés spécifiques qu'elles pourraient nécessiter, sera propriété du maître d'ouvrage.

### **Article III-06 : Publications**

Les résultats issus de l'étude réalisée dans le cadre du présent marché pourront faire l'objet de publications, après accord des parties concernées.

## **Chapitre IV. Données fournies au démarrage des études**

### **Article II.1 : Données disponibles auprès du maître d'ouvrage**

Elles peuvent prendre la forme d'un tableau de données qui peut être reporté en annexe du cahier des charges et qui précisera :

- le propriétaire de la donnée ;
- le producteur de la donnée ;
- l'intitulé de la donnée ;
- la nature de la donnée ;
- le domaine technique concerné ;
- le périmètre géographique concerné ;
- le format de la donnée ;
- le référentiel utilisé (pour les données SIG) ;
- la résolution de la donnée (essentiellement pour les données topographiques) ;
- les incertitudes liées à la donnée.

## **Article II.2. Autres données**

Voici une liste non exhaustive d'autres données que le titulaire du marché pourra acquérir au cours du déroulement de l'étude et qui ne sont pas mises à disposition par le maître d'ouvrage : données Insee, données IGN, données BRGM, etc.

## **Article II.3. Bibliographie mise à disposition**

Une liste des études et ouvrages connus (incluant une description succincte du contenu) sera disponible auprès du maître d'ouvrage.



# Études hydrauliques pour l'analyse de risque des systèmes de protection contre les inondations en contexte fluvial

---

DAVID GOUTX, VANESSYA LABORIE,  
RÉMY TOURMENT, STÉPHANE DEFRAEYE

Dans le cadre de l'analyse de risque des digues de protection contre les inondations, trois études hydrauliques successives doivent être menées, d'après la méthode de décomposition en études élémentaires proposée dans ce guide :

- **étude hydraulique globale du milieu extérieur eau.** À l'échelle d'un bassin-versant, d'un sous-bassin-versant (comprenant souvent plusieurs systèmes de protection), cette étude a pour objectif de disposer, à une précision suffisante, de lignes d'eau pour des événements hydrologiques ou météo-marins de référence afin de pouvoir conduire, sur une base commune, des études hydrauliques localisées ;
- **étude hydraulique locale du milieu extérieur eau.** Au voisinage d'un système de protection, cette étude doit permettre de caractériser la protection assurée par ce dernier en déterminant la période de retour maximale de l'événement hydrologique dont il protège et en localisant les secteurs de premières surverses et les débits de celles-ci, en général en l'absence de brèche ;
- **étude des ondes d'inondation dans le milieu zone protégée.** À l'intérieur d'une zone protégée, cette étude a pour objet de déterminer l'intensité et la cinétique des inondations par défaillance du système de protection.

Ces études hydrauliques, ainsi inscrites dans la démarche de réalisation de l'analyse de risque, s'inscrivent plus largement dans un schéma de gestion des inondations. Elles peuvent donc s'appuyer sur des études déjà existantes relatives, entre autres, à la prévision et à l'annonce d'événements hydrologiques majeurs, à la détermination de l'influence d'un aménagement, à la conception de zones de ralentissement dynamique de crues. Les résultats de l'étude hydraulique locale du milieu extérieur eau sont en outre utilisés dans le cadre du diagnostic du système de protection.

## Étude hydrologique : premier volet des études hydrauliques du milieu extérieur eau

L'étude de l'hydrologie précède ou est confondue (l'hydrologie intègre la propagation des crues : transformation des pluies en débits) avec l'étude de propagation des crues dans le réseau hydrographique, en particulier le long d'un système de protection. Elle est destinée à :

- comprendre, à l'échelle du bassin-versant, les mécanismes de formation des ondes de crue dans le cours d'eau endigué ;
- déterminer les caractéristiques d'une crue pour une période de retour considérée et fournir ainsi les données d'entrée nécessaires aux simulations d'écoulement.

### Niveau de protection statistique

#### Période de retour

La période de retour est une notion statistique dont l'interprétation doit être rigoureuse, sous peine d'ambiguïtés. Déterminer, pour un système de protection, un niveau de protection avant surverse correspondant à une période de retour de T années ne garantit pas que l'ouvrage ne soit pas submergé dans les T prochaines années. Il ne s'agit pas d'une durée de garantie d'efficacité, comme peut l'être la durée de vie d'un ouvrage de génie civil par exemple, mais d'une transcription de la probabilité de non-dépassement  $P = 1 - (1/T)$ . Inversement, cela signifie que le système a, chaque année, une chance sur T d'être submergé par une crue dont le débit de pointe est équivalent ou supérieur à  $Q_T$ .

Pour sensibiliser davantage les gestionnaires et les bénéficiaires d'un système de protection à la signification réelle de la notion de période de retour associée au niveau de protection et à la persistance d'un risque d'inondation par débordement, il peut être utile de décliner le niveau de protection envisagé en probabilité de dépassement de l'endiguement pour les N années à venir.

Si, chaque année, l'endiguement a une chance sur T d'être dépassé par une crue, alors la probabilité pour qu'il ne le soit pas pendant les N prochaines années est :  $P(Q_{1, \dots, N} < Q_T) = (1 - 1/T)^N$ , ce qui conduit aux courbes de probabilité de la Figure A4-1, en supposant le contexte climatique et hydrologique stable sur les N années en question.

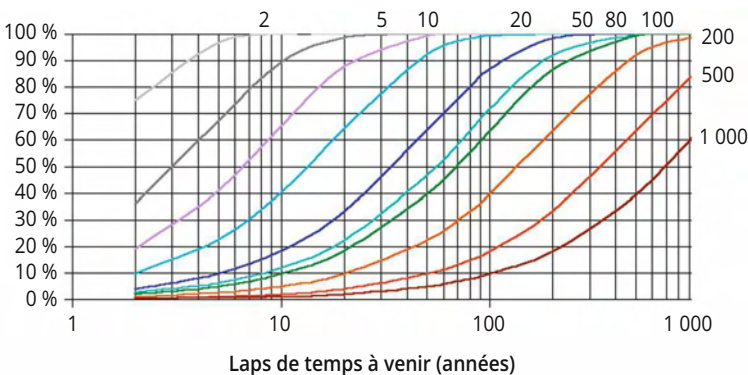


Figure A4-1. Probabilités (%) de dépassement d'une protection au cours du temps (Source : B. Beullac).

Ainsi, par exemple, un endiguement protégeant contre la crue de période de retour 50 ans a :

- 34 % de chances d'être dépassé dans les 20 années à venir ;
- 64 % de chances d'être dépassé dans les 50 années à venir.

De même, une crue millénaire a 3 % (soit près d'une chance sur 30) de chances de survenir dans les 30 prochaines années. On est donc loin d'être « à l'abri » derrière des digues ainsi dimensionnées.

## Variabilité des résultats des études hydrologiques

Deux études hydrauliques portant sur un même ouvrage et un même cours d'eau peuvent, à quelques années d'intervalle, aboutir à des périodes de retour de niveau de protection très contrastées. À méthodes d'estimation identiques et correctement mises en œuvre, ceci résulte de la prise en compte de deux chroniques hydrologiques de longueurs différentes, la plus longue incluant des événements supplémentaires qui modifient l'estimation des probabilités de dépassement.

Ainsi, un débit dont la période de retour est estimée à 30 ans en 2000 peut être caractérisé par une période de retour estimée à 20 ou 10 ans seulement en 2010, si sa valeur a été approchée ou dépassée au moins une fois entre ces deux années. À l'inverse, il peut être affecté d'une période de retour de 40 ou 50 ans en 2010, si aucune crue significative n'a eu lieu depuis 2000.

La sensibilité d'une période de retour aux nouveaux événements hydrologiques est normale pour une chronique de débits de longueur modérée, inférieure ou égale à la période de retour recherchée. Elle tend à s'atténuer significativement lorsque la longueur de la chronique considérée dépasse largement la période de retour recherchée.

## Données d'entrée nécessaires aux simulations d'écoulement

Dans le cadre de l'étude hydraulique globale du milieu extérieur eau, le volet hydrologique a pour objectif de caractériser des événements de référence (débits, durées, volumes), observés ou d'une période de retour donnée, y compris des événements extrêmes, qui seront intégrés dans le modèle numérique de propagation des crues sous forme d'hydrogrammes (régime transitoire).

## Méthodologie

### Bibliographie et études préexistantes

Comme pour chacune des étapes de l'étude hydraulique, l'étude hydrologique s'appuie de prime abord sur l'ensemble des études existantes sur le secteur d'étude et surtout, pour ce qui concerne l'hydrologie, sur son bassin-versant. Une analyse exhaustive de la bibliographie existante sur le bassin-versant d'un cours d'eau et un secteur d'études en particulier est indispensable (en même temps qu'elle constitue un préalable nécessaire à la rédaction de tout cahier des charges d'étude hydraulique à réaliser par le maître d'ouvrage ou son assistant). Cette analyse bibliographique informera sur les éléments hydrologiques (les débits de projet et hydrogrammes de crue réels reconstitués) pris en compte dans les autres études. L'exploitation et l'analyse critique de cette documentation

permettront de cerner la limite entre la réutilisation d'éléments ou de résultats préexistants et la reprise pure et simple de l'étude à zéro. Il n'est pas rare désormais (cas de la Loire, du Rhône ou de la Meuse par exemple) que des cours d'eau fassent l'objet d'études globales qui peuvent et doivent servir de base de travail. Les résultats issus de cette étude hydraulique de « référence » devront alors être synthétisés et adaptés au secteur d'étude et calés par rapport à la digue étudiée. À l'inverse, tout aménagement important, ou toute variation significative du cours d'eau (berges, fond), devra être reporté dans le modèle global.

## Détermination des événements de référence à partir de chroniques disponibles

En l'absence d'une telle étude de référence, mais toujours à la suite d'une première phase bibliographique, une véritable étude hydrologique devra être menée. Elle reposera sur la connaissance des chroniques de débit sur la rivière, relevées aux stations hydrométriques et enrichies des informations sur les crues historiques. Les données disponibles peuvent être regroupées en données hydrométriques, physiques (caractéristiques d'un bassin-versant) et climatologiques (essentiellement pluviométrie). De la disponibilité et de la qualité des données, qu'elles soient mesurées (pluviométrie, hauteurs d'eau, laisses de crue, limnigramme, géométrie et vitesse notamment en jaugeage) ou calculées (courbe intensité-durée-fréquence, coefficient de Montana, courbe de tarage, hydrogramme, traitements statistiques pour le calcul des quantiles de débit, lame d'eau, etc.), vont dépendre les méthodes utilisées pour calculer et fournir les paramètres d'entrée au modèle hydraulique.

La définition des événements de référence s'appuiera alors sur deux types d'informations et d'analyses conjointes : d'une part, sur la connaissance événementielle des configurations hydrométéorologiques caractéristiques du bassin concerné et d'autre part, sur la connaissance statistique du régime des crues, fondée sur l'analyse de longues chroniques de mesures des débits. La connaissance des événements hydrométéorologiques caractéristiques du bassin-versant est utilisée pour apprécier les effets des aménagements projetés sur le phasage des crues. Lorsque le phasage des crues est plus complexe, il convient alors de raisonner sur quelques scénarios hydrologiques de référence établis en fonction des connaissances disponibles sur les événements antérieurs répertoriés sur le bassin et sur la climatologie des précipitations.

## Prédétermination de crues en l'absence de données hydrométriques

En dehors de l'utilisation directe d'hydrogrammes de crues observés, divers outils existent pour la prédétermination des crues et le calcul des débits maxima, soit que l'on ne dispose pas de données hydrométriques à l'endroit où l'on réalise l'étude, soit que l'on souhaite obtenir des données fréquentielles ou synthétiques. La méthode débit-durée-fréquence permet par exemple de construire un hydrogramme « toutes durées » pour un temps de retour fixé. La recherche d'un hydrogramme ayant une période de retour donnée semble difficile hors des modèles débit-durée-fréquence, ce qui peut amener à préconiser cette méthode. Toutefois la complexité, l'importance des données nécessaires et la variabilité des durées caractéristiques limitent l'utilisation de cette méthode sur un plan opérationnel. On pourra utilement appliquer d'autres approches :

- semi-quantitatives comme l'appréciation de similitude entre hydrogrammes de projet et observés ;
- régionales, comme la méthode Shypre, qui s'appuie sur une modélisation de la pluie en débit et permet d'extrapoler les résultats aux bassins-versants non jaugés.

## Observations sur la mise en œuvre

Il faut également souligner que des changements significatifs dans l'occupation de l'espace sur le bassin-versant (forte urbanisation, reboisement important, etc.), une modification de la morphologie du cours d'eau (fond du lit, tracé en plan) ou des aménagements lourds en amont (barrages écrêteurs de crues, digues) sont susceptibles de modifier le régime des crues (en particulier les crues moyennes) et peuvent nécessiter une actualisation d'études hydrologiques antérieures.

Il est, par ailleurs, important de préciser que si, en basse vallée, les débits sont le plus souvent liés aux précipitations, donc à des phénomènes naturels, il n'en va pas systématiquement de même dans les hautes vallées (haute vallée de l'Isère par exemple) où, pour mener une étude hydraulique valable, il est alors nécessaire de se procurer les consignes d'exploitation des ouvrages amont (de type barrage par exemple) décidées par le gestionnaire de l'ouvrage. L'exploitation de l'ouvrage (prévue et effective en temps de crue) et les difficultés à s'en procurer la dynamique font partie intégrante des hypothèses de scénarios hydrologiques à déterminer.

## Les différents types de modélisation hydraulique

Il existe un grand nombre de types de modèles numériques : modèles à réservoirs, modèles de l'onde diffusante, modèles de Saint-Venant etc. Seuls les modèles les plus fréquemment rencontrés, ceux de Saint-Venant 1D et 2D et les modèles à casiers, seront abordés ici de manière détaillée. En pratique, c'est entre ceux-là qu'il faudra trancher lors d'appels d'offres dans le cadre d'études hydrauliques sur des digues.

## Terminologie et modélisation

Un modèle numérique est constitué par le regroupement d'un modèle mathématique, d'un code de calcul capable de « jouer » ce modèle et d'un ensemble de données « statiques » caractéristiques d'un secteur d'études. Un modèle mathématique n'est autre qu'un ensemble d'équations mathématiques qui gouvernent les écoulements en milieu naturel. Il y a toutes sortes d'équations possibles : équations aux dérivées partielles (Saint-Venant), équations différentielles, équations algébriques, etc., et plusieurs ensembles d'équations peuvent être retenus par le modélisateur selon les variables et les simplifications qu'il choisit.

Le modélisateur choisit le modèle mathématique qui, selon lui, représentera « au mieux » le système à étudier ; s'ensuit alors le choix d'un code de calcul, en réalité imposé par la pratique courante du modélisateur lui-même. Ce code de calcul réalise le traitement numérique du modèle mathématique, c'est-à-dire la résolution approchée des équations. Ce traitement repose sur des choix techniques et des simplifications qui relèvent de l'expertise du concepteur du logiciel. Le code de calcul résout donc une sous-classe plus ou moins large des équations d'origine.

Par ailleurs, un même code fondé, par exemple, sur les équations de Saint-Venant peut être utilisé pour simuler différentes rivières, caractérisées par leurs données statiques, par opposition aux données dynamiques qui vont changer au cours de l'exploitation du modèle. Ainsi, pour une étude de diagnostic de digues, dans un premier temps, la

bathymétrie et le profil en long de la digue étudiée constitueront des données statiques, alors que les apports de débit aux frontières de la zone d'étude sont des données dynamiques car on exploitera le modèle en jouant différents scénarios de crue qui permettront, par exemple, de déterminer l'événement au-delà duquel la digue subit un mécanisme de surverse pouvant conduire à sa rupture.

## Modèles hydrauliques de Saint-Venant

Les modèles dits « de Saint-Venant » reposent sur la résolution des équations de Saint-Venant mono ou bidimensionnelles. Succinctement, on distingue en pratique couramment trois types de modèles : les modèles de Saint-Venant 1D, les modèles de Saint-Venant 2D et les modèles à casiers. Chacun de ces différents types de modèle possède des champs d'application privilégiés issus directement des hypothèses mathématiques sur lesquelles ils sont fondés. Les équations de Saint-Venant modélisent des écoulements capables de propager des ondes (intumescences, ronds dans l'eau). Les modèles monodimensionnels (1D) sont utilisés lorsque le cours d'eau et son lit majeur présentent une direction d'écoulement privilégiée. On peut alors considérer que des grandeurs moyennées sur les sections droites de l'écoulement (profils en travers) sont de bonnes approximations. L'écoulement est décrit par un débit et un niveau en chaque point du linéaire. On peut aussi utiliser de façon équivalente une vitesse moyenne à la place du débit et une profondeur ou une section mouillée à la place du niveau.

Dans des configurations où l'écoulement ne présente pas de direction privilégiée ou si l'on souhaite une information précise sur la vitesse à la fois en direction et en intensité, les modèles bidimensionnels permettent de simuler les écoulements à surface libre à deux dimensions d'espace horizontales. Ils calculent la hauteur d'eau, ainsi que les deux composantes horizontales (moyennées sur la verticale) de la vitesse ( $u$ ,  $v$ ).

Le modèle à casiers est bâti à partir du couplage d'un modèle monodimensionnel qui résout les équations monodimensionnelles de Saint-Venant dans le lit mineur et d'un modèle qui gère les échanges entre lit mineur et casiers. On résout ainsi de façon monodimensionnelle les équations de Saint-Venant sur le lit mineur et les écoulements dans la plaine d'inondation (lit majeur) sont représentés à l'aide de casiers interconnectés les uns aux autres et avec le lit mineur par des relations choisies par le modélisateur (loi d'ouvrage, régime uniforme, Saint-Venant 1D, etc.). Les résultats obtenus sont donc la hauteur d'eau et la vitesse moyenne dans le lit mineur de la rivière et un niveau d'eau moyen pour chaque casier (ainsi que les flux entre casiers).

## ANNEXE 5

# Retour d'expérience de la DREAL Centre – Val-de- Loire sur la rédaction des EdD au format « réglementation 2007 »

Expérience acquise dans le cadre de la réalisation (avec un appui méthodologique et technique d'Irstea) des études de dangers des trois systèmes endigués de classe A (vals d'Orléans, de Tours et d'Authion) et de l'ensemble des 43 EdD de digues de classes B et C de la Loire moyenne, pour lesquelles la DREAL joue un rôle d'assistance à maîtrise d'ouvrage ou de maître d'ouvrage délégué vis-à-vis des DDT.

### Résumé non technique de l'étude de dangers du système de protection

- Résumé non technique présentant notamment l'ensemble des points listés au chapitre 0 du plan réglementaire des EdD, à savoir :
  - situation actuelle du système de protection résultant de l'analyse des risques
    - niveau(x) de protection réel(s) ou apparent(s), niveau(x) de sûreté, niveau(x) de dangers ;
  - intensité, cinétique et gravité des scénarios d'inondation par rupture ou surverse étudiés – a minima, scénario de rupture ou surverse le plus probable et, s'il diffère, celui de la rupture ou surverse ayant les conséquences les plus graves ;
  - évaluation de la probabilité d'occurrence de ces scénarios ;
  - principales mesures de réduction du risque prises, en indiquant celles qui le sont à titre conservatoire, ou prévues à court ou moyen terme selon un calendrier.
- Cartes, schémas et graphiques didactiques associés.

#### Remarque

Le maître d'ouvrage peut confier à une agence de communication la rédaction et la mise en page de ce résumé.



## Chapitre 1. Renseignements administratifs

- Identification du porteur de l'étude et de son rôle au regard du système de protection (propriétaire, gestionnaire ou autre).
- Identification du (ou des) propriétaire(s) des ouvrages de protection ou ayant un rôle de protection et des terrains d'assise, sans qu'il soit nécessaire de fournir une enquête parcellaire complète si le système repose sur une multitude de propriétés privées. Seule la situation administrative est recherchée, c'est-à-dire avoir une vision du nombre de parcelles et savoir s'il existe un ou plusieurs propriétaires du fond et s'ils diffèrent du (ou des) propriétaire(s) des ouvrages.
- Identification, lorsqu'il existe, du gestionnaire qui exécute ou fait exécuter pour le compte du propriétaire les travaux d'entretien ou de renforcement de l'ouvrage.
- Identification du (ou des) responsable(s) d'ouvrage du système de protection en précisant son (leur) statut : propriétaire ou gestionnaire.
- Identification des responsables de réseaux enfouis ou supportés par le système de protection et mention des réseaux sans propriétaire.
- Rappel des références de la décision de classement A, B ou C prise par le préfet et des prescriptions contenues dans l'arrêté d'origine et les éventuels arrêtés complémentaires.
- Rappel des autres actes administratifs portant sur le système de protection : références d'autorisation des ouvrages, arrêtés portant déclaration d'utilité publique (DUP) ou d'intérêt général (DIG), conventions entre les différents acteurs, notamment entre propriétaires et gestionnaires précisant les missions attribuées aux gestionnaires.
- Identification des rédacteurs et des organismes ayant participé à l'élaboration de l'EdD : nom de l'organisme agréé en charge de l'EdD, date et numéro d'agrément, nom des auteurs des études spécifiques élémentaires et du rapport de l'EdD et de la personne responsable de l'EdD au sein de l'organisme agréé, nom des organismes sous-traitants.
- Arrêtés préfectoraux de classement et, éventuellement, de prescriptions complémentaires relatifs au système de protection annexé au rapport de l'EdD.

## Chapitre 2. Objet de l'étude

- Au sein du bassin-versant, identification complète du périmètre de l'étude et de ses trois composantes : le système de protection, la zone protégée et le milieu extérieur eau. Vérification de la cohérence des limites amont et aval du système avec le fonctionnement hydraulique local. Justification de la délimitation de la zone protégée.
- Statut de l'EdD du système de protection :
  - EdD « constat » initiale (échéance pour un système de protection existant au 11 décembre 2007 imposée par décret)/de révision décennale/de mise à jour exceptionnelle ;
  - EdD « projet » de modification/de création ;
  - EdD « programme » de modification/de création.
- Articulation de l'EdD avec les autres démarches réglementaires qui concernent le système de protection (diagnostic initial de sûreté, visite technique approfondie, revue de sûreté, examen technique complet) et la prévention des inondations (éventuelles prescriptions d'un PPRN d'inondation qui s'imposent à l'ouvrage ou, plus généralement, prescription formelle lui donnant un objectif de protection comme la labellisation PAPI-PSR).
- Cartes associées.

**Remarque**

Représenter les limites de propriétés de la digue, le cas échéant.

## Chapitre 3. Analyse fonctionnelle de l'ouvrage et de son environnement

Synthèse sur l'identification, la description et la caractérisation des fonctions assurées par l'ouvrage.

### Analyse fonctionnelle externe

- Détermination des fonctions principales, dites de service, produites par l'ouvrage considéré comme une « boîte noire » en interaction avec son environnement et des barrières de sécurité en place au droit de l'ouvrage et de ses milieux extérieurs.
- Description et analyse du milieu extérieur « eau » :
  - éléments constitutifs : hydrologie et ouvrages hydrauliques (ponts, seuils, système de protection sur la rive opposée, etc.), transport solide et topographie (lits, berges, littoral), corps flottants (bois, blocs de glace, etc.), milieu naturel (végétation, animaux), activités humaines potentiellement dommageables ;
  - interactions potentielles avec le système de protection : actions hydrauliques – détermination de la crue retenue comme niveau de protection apparent ou contrôle de l'objectif de protection (ligne d'eau, débit et période de retour), détermination des crues de premières surverses des digues résistantes ou de début de fonctionnement des déversoirs (ligne d'eau, débit et période de retour), actions morphodynamiques, actions mécaniques (chocs, fouissage, déstructuration racinaire, etc.).
- Description et analyse du milieu extérieur « zone protégée » :
  - éléments constitutifs : topographie du terrain naturel (pente, talwegs), réseau hydrographique, ouvrages en remblai (routiers, autoroutiers, ferroviaires, etc.), milieu naturel (végétation, animaux), activités humaines potentiellement dommageables, enjeux humains ;
  - interactions potentielles avec le système de protection, notamment en cas de défaillance : actions hydrauliques (mise en charge côté terre et atténuation des sollicitations, brèche en retour en cas de décrue rapide, etc.), actions mécaniques (chocs, fouissage, déstructuration racinaire, etc.).
- Description des raccordements amont et aval au terrain naturel ou à d'autres ouvrages.
- Identification, description et caractérisation des fonctions principales du système permettant notamment d'identifier les ouvrages de protection indirecte, directe et secondaire.
- Identification, description et évaluation de la performance des barrières de sécurité mises en place dans les milieux extérieurs « eau » et « zone protégée » ainsi qu'au droit du système de protection.

### Analyse fonctionnelle interne

- Détermination des fonctions contraintes, dites techniques, remplies par l'ouvrage et sa fondation, considéré seul à travers sa structure et ses composants.
- Analyse des fonctions hydrauliques des sous-systèmes :
  - décomposition en sous-systèmes hydrauliques ;

- identification, description et caractérisation des fonctions hydrauliques par sous-système.
  - Analyse des fonctions géotechniques des composants de l'ouvrage et sa fondation :
- détermination des profils en travers géotechniques types ;
- identification, description et caractérisation des fonctions géotechniques par composant.
  - Appréciation de la qualité géotechnique de l'ouvrage en relevant, si possible, les écarts constatés par rapport à une situation de référence (projet, état antérieur).
  - Cartes, photos, schémas et graphiques associés.
  - Analyse fonctionnelle détaillée annexée au rapport de l'EdD.

### Remarque

Une description de l'ouvrage et de son environnement, même approfondie, ne constitue pas, en toute rigueur, une analyse fonctionnelle.

## Chapitre 4. Présentation de la politique de prévention des accidents majeurs et du système de gestion de la sécurité (SGS)

- Description et analyse de la gestion des crues dans le milieu extérieur « eau » (prévision et alerte, contrôle des débits, etc.).
- Description et analyse de la gestion des enjeux présents dans le milieu extérieur « zone protégée » (prévention, évacuation et mise en sécurité des populations et des biens en fonction de leur vulnérabilité, etc.).
- Système de gestion de la sécurité relatif au système de protection :
  - description et analyse de l'organisation du responsable d'ouvrage et des organisations des sous-traitants ainsi que de la formation des personnels pour assurer la surveillance et l'entretien du système de protection en toutes circonstances ;
  - description et analyse des procédures de gestion de la sécurité : identification et évaluation des risques d'accidents majeurs (visite technique approfondie, étude de dangers, revue de sûreté), surveillance de l'ouvrage (continue, périodique, en crue, post-crue, exceptionnelle), gestion des situations d'urgence, prise en compte du retour d'expérience (alimentation du dossier d'ouvrage) ;
  - description et analyse des dispositions prises par le responsable d'ouvrage pour s'assurer du respect des procédures, auditer et réviser son système de gestion de la sécurité dans le cadre de son amélioration continue.
- Consignes écrites annexées au rapport de l'EdD, si elles existent.

### Remarques

- Le rédacteur de l'étude dangers ne doit décrire que l'existant. Il doit ensuite, à l'issue d'une analyse, émettre un avis sur l'adéquation entre les objectifs fixés en matière de sécurité, les moyens mis en œuvre et la complexité du système de protection.
- Vérifier la cohérence entre les informations relatives aux acteurs identifiés dans ce chapitre et celles du chapitre 1.

## Chapitre 5. Identification et caractérisation des potentiels de dangers

- Identification et caractérisation des potentiels de dangers se manifestant par une entrée d'eau accidentelle dans la zone protégée à la suite de la rupture totale ou partielle d'une digue, ou du dysfonctionnement ou de la mauvaise gestion d'un ouvrage hydraulique inclus.
- Identification et caractérisation des potentiels de dangers se manifestant par une entrée d'eau non accidentelle dans la zone protégée à la suite du fonctionnement d'un déversoir ou de la surverse sans rupture d'une digue résistante, ou conduisant à une inondation par remontée de nappe ou par remous.
- Identification et caractérisation des potentiels de dangers se manifestant par un défaut, accidentel ou non, d'évacuation d'eau de la zone protégée vers le milieu extérieur « eau » conduisant à une inondation par débordement des cours d'eau ou saturation des réseaux d'assainissement.
- Cartes et graphiques associés.

### Remarques

- Classer de préférence les potentiels de dangers par ordre décroissant de gravité des conséquences du phénomène dangereux.
- La caractérisation des potentiels de dangers se manifestant en surface par une entrée d'eau non accidentelle dans la zone protégée peut être similaire à celle réalisée pour les scénarios d'inondation par défaillance du système de protection.
- Sédiments ou corps flottants transportés par l'eau libérée dans la zone protégée constituent des potentiels de dangers supplémentaires à caractériser en tant que tels.

## Chapitre 6. Caractérisation des aléas naturels

- Identification et caractérisation, à l'échelle du système hydrologique (continental ou marin), des aléas hydrauliques naturels potentiellement à l'origine d'inondations (crues, marées, tempêtes, tsunamis, etc. ou toute conjonction possible de ces événements), agissant au moins sur le milieu extérieur « eau » du système étudié : probabilités d'occurrence, caractéristiques hydrauliques (hydrogrammes, limnigrammes et vitesses de propagation, notamment), etc.
- Estimation, au droit du système de protection, de l'intensité des aléas hydrauliques naturels potentiellement à l'origine d'inondations (niveaux atteints, vitesses d'écoulement, etc.), préalablement identifiés et caractérisés de manière globale.
- Identification et caractérisation, à l'échelle du système hydrologique (continental ou marin), des aléas morphodynamiques naturels :
  - sectorisation du système hydrologique en unités morphodynamiques naturelles homogènes ;
  - identification et caractérisation des évolutions naturelles (par exemple, changement climatique) ou des perturbations anthropiques (par exemple, construction d'un barrage, d'un port), passées, présentes ou prévisibles, des équilibres sédimentaires des unités morphodynamiques naturelles.
- Estimation, au droit du système de protection, des évolutions morphologiques passées, présentes ou prévisibles du milieu extérieur « eau » et/ou du système de protection du système étudié, sous l'action morphogène continue des écoulements, des courants ou

des vagues (affouillement, érosion de berge, incision, érosion du littoral, etc. – atterrissement, dépôt, exhaussement, engraissement, etc.), préalablement identifiée et caractérisée de manière globale.

- Identification et caractérisation des autres aléas naturels auxquels le système de protection est exposé : développement d'une végétation ligneuse, installation d'animaux fouisseurs, séisme, embâcle de glace et débâcle, effondrement karstique, changement climatique, etc.
- Cartes, photos, schémas et graphiques associés.

### Remarques

- Expliciter toutes les hypothèses des études ou expertises utilisées (notamment hydrologiques, hydrauliques et morphodynamiques). Les référencer.
- Préciser l'origine et l'ordre de grandeur des incertitudes pesant sur la caractérisation des aléas naturels considérés (qualité des données, modélisation, effet des corps flottants, charriage, etc.).

## Chapitre 7. Étude accidentologique et retour d'expérience

- Description précise et la plus exhaustive possible des détériorations, accidents, incidents et évolutions lentes passés (historiques et récents), liés ou non à un événement naturel (*voir Chapitre 6 dans cette Annexe*) ou technologique (rupture de barrage, accident de transport, etc.) à décrire en tant que tel, survenus sur le système de protection ou son environnement spécifique (milieu extérieur « eau » et zone protégée) et intéressant la sûreté hydraulique de l'ouvrage et la sécurité des populations.
- Description complémentaire des événements naturels d'importance significative n'ayant entraîné aucune détérioration ou incident notable.
- Description des mesures d'amélioration du système étudié éventuellement adoptées et mises en œuvre à la suite d'un ou plusieurs événements importants pour la sûreté hydraulique et la sécurité des populations.
- Analyse experte des événements importants ci-avant décrits à la lumière des conditions actuelles de fonctionnement du système étudié (*voir Chapitre 3 dans cette Annexe*) et de gestion de la sécurité (*voir Chapitre 4 dans cette Annexe*).
- Cartes, photos, schémas et graphiques associés.

### Remarques

- Préférer les valeurs mesurées sur le terrain aux valeurs estimées.
- Citer les sources d'information et documents d'archives exploités, et inscrire leurs références complètes dans la bibliographie.
- Ne présenter le retour d'expérience d'événements importants survenus sur d'autres systèmes de protection et environnements spécifiques similaires que s'il apporte une information supplémentaire, précise et pertinente.

## Chapitre 8. Identification et caractérisation des risques en termes de probabilité d'occurrence, d'intensité et de cinétique des effets, et de gravité des conséquences

### 8.1 – Description et principes de la méthodologie utilisée

- Description théorique synthétique de la méthodologie utilisée pour identifier et analyser les risques.
- Description de l'expertise mobilisée pour mettre en œuvre la méthodologie présentée ci-dessus.
- Schémas et graphiques associés.
- Rapports détaillés sur la méthodologie utilisée et les outils mis en place annexés au rapport de l'EdD.

### 8.2 – Détermination des scénarios de défaillance

- Étude de la défaillance du système de protection.
- Description et choix des scénarios de défaillance hydraulique avec ou sans ouverture de brèche à considérer dans la suite de l'analyse des risques.
- Estimation de la défaillance hydraulique avec ouverture de brèche :
  - discrétisation en tronçons homogènes (structure, état et fonction hydraulique identiques) et identification des profils en travers singuliers ;
  - estimation de la performance de chaque tronçon homogène et profil en travers singulier, ci-avant décrits, pour les différents scénarios de défaillance structurelle et aléas hydrauliques naturels considérés, exprimée sous la forme de probabilités conditionnelles de rupture ;
  - si possible, estimation des incertitudes pesant sur les résultats du diagnostic structurel.
- Hiérarchisation des scénarios considérés de défaillance hydraulique avec ou sans ouverture de brèche.
- Localisation des principaux secteurs de défaillance du système de protection.
- Cartes de localisation, schémas et graphiques associés.

### 8.3 – Évaluation des scénarios d'accidents

- Détermination des scénarios d'inondation à évaluer, tenant compte de la localisation des principaux secteurs de défaillance du système de protection (*voir Chapitre 8.2 dans cette Annexe*) et incluant nécessairement un scénario d'inondation de toute la zone protégée ainsi qu'un scénario d'inondation particulièrement dommageable. Si possible, positionnement de la survenance du scénario de défaillance du scénario d'inondation considéré avant, pendant et après avoir atteint le niveau de protection apparent du système de protection.

- Quantification des scénarios d'inondation :
  - estimation de la probabilité d'occurrence de chaque scénario d'inondation ;
  - évaluation de l'intensité (hauteur, vitesse horizontale, temps de montée, charge solide, etc.) et de la cinétique de propagation des écoulements pour chaque scénario d'inondation.
- Étude de la vulnérabilité des enjeux :
  - choix des types d'enjeux à considérer ;
  - choix du ou des types de conséquences (paramètres de vulnérabilité) à considérer pour chaque type d'enjeux ;
  - estimation, pour chaque classe d'intensité de l'aléa d'inondation, de la vulnérabilité de chaque type d'enjeux associé à un paramètre de vulnérabilité, intégrant au mieux les notions de sensibilité des types d'enjeux à l'aléa d'inondation, d'exposition des enjeux de chaque type à l'aléa d'inondation et d'adaptation des enjeux de chaque type au risque d'inondation ;
  - agrégation éventuelle, pour chaque classe d'intensité de l'aléa d'inondation, des vulnérabilités estimées.
- Estimation de la gravité des conséquences de chaque scénario d'inondation.
- Estimation du risque lié à chaque scénario d'inondation.
- Détermination du niveau d'acceptabilité (criticité) de chaque scénario d'inondation.
- Cartes de localisation et de résultats associées.
- Positionnement des scénarios d'inondation considérés sur une grille de criticité.

### Remarque

Préciser tous les critères de définition des paramètres utilisés pour évaluer les scénarios d'accidents (probabilité d'occurrence, intensité et cinétique des effets, vulnérabilité des enjeux).

## Chapitre 9. Étude de réduction du risque

- Description par type des mesures de réduction du risque d'inondation proposées librement par l'organisme agréé en charge de l'étude de dangers au vu des résultats de l'analyse de risque et validées par le responsable d'ouvrage, qui s'engage ainsi sur des délais de mise en œuvre :
  - mesures relatives à la gestion du système de protection : révision des consignes écrites de gestion et de surveillance des digues en toutes circonstances, amélioration de leur entretien, gestion plus étroite de leurs usages, élaboration d'un plan d'actions d'urgence en crue, organisation d'exercices de gestion de crue, pérennisation du dossier d'ouvrage, etc. ;
  - mesures relatives à la gestion du territoire : si le gestionnaire du système de protection n'est pas le gestionnaire du territoire, au moins doit-il porter l'étude de dangers à la connaissance des organismes en charge de la sécurité de la population de la zone protégée (les mairies pour les plans communaux de sauvegarde, la ou les préfetures pour les plans d'organisation de la réponse de sécurité civile et les plans de prévention des risques d'inondation ou de submersion marine, le ou les services de prévision des crues ou des vagues-submersion pour la juste prise en compte des systèmes de protection dans les modélisations, le ou les services d'entretien du lit mineur pour les plans de gestion de la végétation, etc.) ;
  - mesures relatives au traitement des désordres structurels du système de protection : présentation hiérarchisée et, si possible, chiffrée de l'ensemble des travaux nécessaires



- pour garantir l'intégrité du système (par exemple, protection des pieds de berge, construction de chemins de service) ou rehausser le niveau de sûreté des digues (par exemple, étanchement du corps de digue, suppression de canalisations traversantes), et appréciation de leur efficacité ;
- mesures relatives au traitement des anomalies ou insuffisances fonctionnelles du système de protection : présentation hiérarchisée et, si possible, chiffrée de l'ensemble des travaux nécessaires pour améliorer le fonctionnement du système (par exemple, mise en place d'un système de gestion des surverses) ou rehausser le niveau de protection des digues (par exemple, résorption des points bas en crête), et appréciation de leur efficacité ;
  - mesures relatives à la connaissance des ouvrages : recherche et exploitation d'archives, investigations géophysiques et géotechniques, reconnaissances subaquatiques des pieds de digue, recherche et description approfondie des ouvrages inclus, etc. ;
  - mesures, plus générales, relatives aux recherches scientifiques à mener : évolutions hydrologiques et morphodynamiques, formation des brèches, identification et quantification des mécanismes d'érosion interne, méthodes opérationnelles d'analyse de la défaillance, etc.
- Tableau(x) de synthèse des mesures prises.

### Remarques

- L'étude de réduction du risque n'est pas un programme de travaux. Le rédacteur du chapitre n'a donc pas pour obligation de dater et d'estimer précisément le coût de la mise en œuvre des mesures retenues. Sa réflexion doit avant tout porter sur la hiérarchisation des actions à entreprendre dans une logique d'amélioration continue du système de protection. Il peut alors effectuer des recommandations sur les techniques à employer.
- Le rédacteur est invité à présenter très distinctement études à mener et travaux à réaliser. Il indiquera et justifiera également toutes les mesures prises à titre provisoire.
- L'étude de réduction du risque est un chapitre essentiel de l'étude de dangers « constat ». Elle n'a en revanche aucun sens dans une étude de dangers « projet » ou « programme ».
- Afin que le lecteur puisse commodément faire le lien entre problème/limite/manque identifié(e) et solution/recherche/investigation proposée, il est conseillé d'adjoindre à chaque mesure de réduction du risque du Chapitre 9 de cette Annexe un renvoi vers le paragraphe de l'étude de dangers qui a amené le rédacteur à s'interroger, et inversement.

## Chapitre 10. Cartographie

Recueil de l'ensemble des cartes, photos, schémas et graphiques qui illustre l'étude de dangers (hors annexes).

### Remarques

- Présenter les illustrations dans l'ordre du texte en reprenant le plan détaillé de l'étude de dangers, à une échelle de lecture ou résolution appropriée et accompagnées d'une légende précise qui renverra le lecteur à la page où est appelée l'illustration en question.
- Pour faciliter la compréhension de l'étude de dangers sans nuire à la consultation du document, il est recommandé d'afficher l'ensemble des illustrations sous forme de miniatures dans les Chapitres 1 à 9. La légende renverra alors utilement le lecteur à la page du Chapitre 10 où est présentée en détail l'illustration.



# Inondations

## Analyse de risque des systèmes de protection

Depuis 30 ans, en France, au vu des retours d'expériences des catastrophes naturelles et des inondations, les pouvoirs publics ont pris conscience qu'ils devaient non seulement approfondir leurs connaissances de l'état et du comportement des systèmes endigués, mais qu'ils devaient également les évaluer en continu.

Première méthodologie française complète de réalisation d'une étude de dangers des systèmes endigués, *Inondations – Analyse de risque des systèmes de protection* est un ouvrage de référence transdisciplinaire (hydraulique, génie civil, géotechnique...) prenant en compte l'ensemble des différentes composantes du risque, liées à la digue et à son environnement. Il permet la mise en œuvre d'une démarche d'analyse cohérente et intégratrice dont il contient les bases théoriques, techniques et pratiques. Il présente également une aide à la rédaction d'un cahier des charges et au suivi de déroulement de l'étude.

Richement illustré, l'ouvrage aborde en trois parties :

- les systèmes de protection contre les inondations ;
- l'analyse de risque de ces systèmes ;
- les études de dangers des systèmes d'endiguement et l'utilisation de l'analyse de risque.

Des annexes consultables en ligne complètent les informations du guide.

Le livre s'adresse aux collectivités locales, gestionnaires de digues, bureaux d'études, services de l'État, organismes de recherche et à l'ensemble des intervenants du domaine.

**RÉMY TOURMENT** est Ingénieur Chercheur en génie civil et Président du Comité technique sur les digues de la Commission internationale des grands barrages ; **BRUNO BEULLAC** est Ingénieur d'études. Ils sont tous deux spécialistes des ouvrages hydrauliques, barrages et digues et travaillent à l'Unité de recherche RECOVER de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (IRSTEA), Aix-en-Provence.

