



De l'EDD des digues en France aux travaux de l'ILH sur les mécanismes élémentaires et les scénarios de défaillance

R. Tourment, B. Beullac, Y. Deniaud, J. Simm, M. Wallis, M. Sharp, R. Pohl, H. van Hemert

► To cite this version:

R. Tourment, B. Beullac, Y. Deniaud, J. Simm, M. Wallis, et al.. De l'EDD des digues en France aux travaux de l'ILH sur les mécanismes élémentaires et les scénarios de défaillance. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions - 2ème colloque national - Dignes2013, Jun 2013, Aix-en-Provence, France. pp.289-297. <hal-01122357>

HAL Id: hal-01122357

<https://hal.science/hal-01122357v1>

Submitted on 3 Mar 2015

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

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



HAL Authorization

De l'EDD des digues en France aux travaux de l'ILH sur les mécanismes élémentaires et les scénarios de défaillance.

From French Edd (levee hazard survey) to the ILH works on failure scenarios and individual deterioration and damage mechanisms

Rémy Tourment¹, Bruno Beullac¹, Yann Deniaud², Jonathan Simm³, Michael Wallis³, Michael Sharp⁴, Reinhard Pohl⁵, Hank van Hemert⁶

¹ Irstea, Centre d'Aix en Provence, 3275 route Cézanne, CS 40061,
13182 AIX EN PROVENCE Cedex 5, France,

e-mail: remy.tourment@irstea.fr & bruno.beullac@irstea.fr

² CETMEF, Technopôle Brest-Iroise, BP5 - 155 rue Pierre Bouguer, 29280 Plouzané,
e-mail: Yann.Deniaud@developpement-durable.gouv.fr

³ HR Wallingford, Wallingford, Oxfordshire OX10 8BA, United Kingdom,
e-mail: J.Simm@hrwallingford.com & M.Wallis@hrwallingford.com

⁴ USACE, Engineer Research & Development Center, 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, MS, 39180, USA,
e-mail: Michael.K.Sharp@erdc.dren.mil

⁵ Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik,
George-Bähr-Straße 1, 01062 Dresden, Deutschland,
e-mail: reinhard.pohl@tu-dresden.de

⁶ H&k Waterkeringbeheer BV, Gemini 68, 3769 KW SOESTERBERG, Netherlands,
e-mail: vanhemert@waterwerken.nl

Mots-clés : digues, diagnostic, défaillance, analyse de risque, étude de dangers de digues.

Résumé

Les activités liées au diagnostic des digues de protection, sont nécessairement liées à la notion de possible défaillance de ces ouvrages. Le résultat d'un diagnostic ou d'une analyse de risques dépend donc des modes de défaillance qui y sont pris en considération, ce qui plaide pour une démarche fiable de détermination et d'analyse de ces modes.

L'International Levee Handbook (ILH) est un projet international de rédaction d'un guide relatif à l'ensemble des aspects touchant aux digues de protection contre les inondations fluviales et les submersions marines. Le concept de « failure mode » y occupe une place centrale, celui-ci constituant le fil rouge de nombreuses de ses parties. Un travail spécifique sur ce sujet a ainsi été entrepris pour déboucher sur l'adoption d'un vocabulaire commun associé à une approche analytique des phénomènes liés aux défaillances de digues.

La méthodologie d'analyse fonctionnelle et d'analyse des modes de défaillance proposée aboutit à la détermination des scénarios de défaillance envisageables pour les systèmes d'endiguement.

Cette communication présente successivement, dans le contexte décrit ci-dessus :

- le contenu du guide ILH, et son lien avec les

défaillances de digue,

- la terminologie et la typologie adoptée dans ce projet pour décrire les défaillances de digues,
- une démarche d'analyse fonctionnelle et d'analyse des modes de défaillance associée, permettant d'aboutir, sans a priori, à la détermination des scénarios de défaillance possibles sur un système donné de digues,
- le lien avec les études de dangers de digues.

Abstract

Activities related to the diagnosis and assessment of protection dikes are necessarily related to the possible failure of these levees. The result of an assessment or risk analysis depends on the considered failure modes, which calls for a reliable approach to identify and analyze these modes.

The ambitious international project to develop a guide covering all aspects of levees for protection against river floods and coastal flooding, the International Levee Handbook (ILH), quickly identified the topic of "failure modes" as a central and major subject running through many parts of the guide. Specific work on this subject has been undertaken and has resulted in the adoption of a common vocabulary, combined with an analytical approach of the phenomena related to levees failures.

The proposed analysis methodology for levee functions and failure modes leads to the determination of possible failure

scenarios for levee system.

This paper present in succession, in the context described above:

- the contents of the ILH guide, and its link with levee failures,
- terminology and typology adopted in this project to describe levee failures,
- a functional analysis method and the associated analysis of failure modes, leading without a priori assumption to the determination of the possible failure scenarios or breaches in a given levee system
- the link with the French levee regulatory risk studies.

Introduction

Du fait de la menace qu'elles font peser, en cas de défaillance, sur les territoires qu'elles sont sensées protéger, les digues de protection contre les inondations constituent un enjeu central de la gestion des territoires concernés. En effet, de la maîtrise de leur sûreté de fonctionnement dépend notamment celle du risque d'inondation pour les zones qu'elles protègent.

La bonne connaissance de ces ouvrages et la justesse de leur diagnostic conditionne la qualité de leur gestion. Les activités liées au diagnostic des digues de protection, qu'il s'agisse d'une « simple » évaluation de leur performance ou bien d'une analyse de risques plus complète, telles les Études de Dangers réglementaires en France, sont nécessairement liées aux modes de défaillance possibles sur ces digues. La justesse du résultat d'un diagnostic ou d'une analyse de risques pour un système d'endiguement donné dépend donc de la qualité de l'identification des modes de défaillance envisageables pour celui-ci, ce qui plaide pour le développement d'une démarche fiable de détermination et d'analyse de la défaillance.

Classiquement, en France, quatre « modes de rupture » sont envisagés pour les digues fluviales (érosion par surverse, érosion interne, érosion externe, glissement de talus) [1]. Dans d'autres approches nationales ou spécifiques, cette liste de modes de rupture peut être légèrement différente (peut par exemple inclure le soulèvement hydraulique aval¹). Les "modes de rupture" classiques s'apparentent le plus souvent à des scénarios de brèches qui enchaînent plusieurs mécanismes élémentaires et sont baptisés du nom du mécanisme initiateur ou prépondérant du scénario considéré. En effet, les ruptures d'ouvrages sont rarement le fait d'un seul mécanisme.

L'ambitieux projet international de rédaction d'un guide couvrant l'ensemble des aspects relatifs aux digues de protection contre les inondations fluviales et les submersions marines, International Levee Handbook (ILH), a rapidement identifié le sujet des « failure modes » comme un sujet central, fil rouge de nombreuses parties du guide. Ce terme

anglais implique des ambiguïtés en français (failure = défaillance OU rupture) et un travail spécifique sur ce sujet a été nécessaire pour déboucher sur l'adoption d'un vocabulaire commun. Sur proposition d'Irstea qui avait commencé à élaborer une approche analytique des phénomènes liés aux défaillances de digues, ont ainsi été mis en évidence et définis les concepts de défaillance structurelle (conduisant à la brèche) et de défaillance hydraulique (conduisant à l'inondation).

L'analyse de la défaillance des systèmes d'endiguements peut paraître a priori déroutante du fait qu'elle doit prendre en compte des approches à la fois fonctionnelles et physiques. La démarche analytique proposée permet de clarifier cela, en intégrant les interactions entre dégradations ou défaillances de fonctions et détériorations ou ruines de composants physiques. Contrairement aux « modes de rupture » classiques, cette méthode d'analyse a pour objectif d'identifier tous les scénarios de défaillances structurelles et hydrauliques possibles pour un système d'endiguement donné, et non une collection prédéfinie de « modes de défaillance ».

L'analyse des modes de défaillance, tant structurelle qu'hydraulique, est facilitée par des tableaux d'exemples de mécanismes et de fonctions. Une distinction est faite entre mécanismes lents et rapides, comme entre défaillances lentes, soudaines ou binaires. La méthodologie proposée pour l'analyse fonctionnelle et l'analyse des modes de défaillance aboutit à la détermination des scénarios de défaillance envisageables, en fonction des composants du système d'endiguement.

Enfin, en conclusion, l'article explicite le lien qui existe entre son contenu et les études de dangers (EdD) de digues qui constituent une obligation réglementaire depuis le décret du 11 décembre 2007 sur la sécurité des ouvrages hydrauliques [2] précisé par l'arrêté du 12 juin 2008 [3] et par le guide de lecture du 16 avril 2010 [6]. L'EdD de digue relève d'une démarche d'analyse de risques au sein de laquelle les possibles modes de défaillance de digues jouent un rôle central puisqu'ils constituent la donnée sur laquelle repose l'estimation de l'aléa d'inondation par défaillance du système d'endiguement.

Les chapitres de l'ILH et leurs liens avec les modes de défaillance

L'ILH est un ambitieux projet international² de guide couvrant l'ensemble des aspects relatifs aux digues de protection contre les inondations fluviales et les submersions marines. Il est composé de dix chapitres dont nous allons décrire les contenus en termes d'objectifs et de liens avec la notion de défaillance de digue.

¹ voir " Les scénarios de défaillance structurelle "

² France, Royaume-Uni, USA, Allemagne, Pays-Bas, Irlande

Chapitre 1 : Introduction

Chapitre 2 : Concepts généraux

Ce chapitre présente les concepts et les principes de gestion des risques d'inondation, des systèmes de gestion des risques inondation et de leurs composants. Il introduit également les notions de cycle de vie de la gestion des ouvrages, de modes de défaillance, d'analyse des risques ainsi que les effets potentiels du changement climatique.

Le vocabulaire et les principes liés aux modes de défaillance des digues sont introduits, de façon générale, dans ce chapitre.

Chapitre 3 : Types et fonctions des digues

Ce chapitre présente une vue d'ensemble des fonctions des digues dans un système de gestion des risques d'inondation et l'interaction de la digue avec son environnement. Il présente les formes de digues classiques et les structures associées au système de défense contre les inondations, introduisant divers mécanismes de détérioration et d'endommagement des digues. Ce chapitre explique le processus de défaillance des digues et présente divers points de vue et méthodes utilisées permettant de l'analyser.

Chapitre 4 : Exploitation et entretien

Ce chapitre traite du fonctionnement et de l'entretien des digues. Il aborde les principaux défis à relever pour le gestionnaire d'ouvrage, propose des mesures de prévention et des techniques de réparation, et conseille quant au besoin de faire appel à un expert en conception de digues.

Le chapitre 4 s'intéresse aux notions de défaillance de digue au travers du lien qui doit être fait entre les « modes de défaillance » et la sûreté de fonctionnement. Il y a un lien direct entre les observations (faites lors des inspections) et certains mécanismes conduisant à la défaillance des digues et les actions correctives à apporter en termes de maintenance.

Chapitre 5 : Évaluation de l'état des digues: inspection, diagnostic et surveillance

Ce chapitre présente les concepts et les principes d'analyse des risques et d'évaluation des digues, y compris la production de données et les processus de gestion de données associés. Ces concepts sont liés aux modes de défaillance des digues, à une approche à plusieurs niveaux de détail et au système de gestion du cycle de vie des digues.

Le chapitre 5 est directement lié aux notions de défaillance de digue.

Chapitre 6 : Planification de la gestion de la crise

Ce chapitre présente les concepts et les principes associés à la préparation aux situations d'urgence, à l'intervention, à la résilience et à l'atténuation du risque.

Comme le chapitre 4, ce chapitre s'intéresse aux notions de défaillance de digue au travers du lien qui doit être fait entre les « modes de défaillance » et la sûreté de fonctionnement. Il

y a un lien direct entre les observations (faites lors des inspections) et certains mécanismes conduisant à la défaillance des digues et les actions préventives ou correctives en situation d'urgence.

Chapitre 7 : Caractérisation du site et données requises

Le chapitre 7 présente les concepts et les principes de la caractérisation du site d'implantation du système de digues, et l'ensemble des données utiles à ce travail. Cela comprend la caractérisation des contextes hydrauliques, morphologiques et géotechniques de l'ouvrage.

Ce chapitre est lié aux notions de défaillance par le fait qu'il décrit ce qui peut caractériser une charge sur la digue (solicitations et conditions externes) ainsi que les paramètres des matériaux utilisés dans la digue afin d'être en mesure de caractériser la détérioration/ruine des composants de digues.

Chapitre 8 : Phénomènes physiques et outils pour la conception de digues

Ce chapitre présente des outils morphologiques, hydrauliques et géotechniques qui permettent d'évaluer la performance d'une section de digue pour différents processus physiques (les mécanismes élémentaires) qui pourraient entraîner sa détérioration ou ruine.

Chapitre 9 : Conception

Ce chapitre a pour objectif d'expliquer le processus de conception de digues en intégrant les principes et procédures d'ingénierie qui peuvent y être impliqués. Le processus de conception y est décrit en détails au travers de différents exemples de bonnes et mauvaises pratiques.

La défaillance de digue est prise en compte dans ce chapitre du fait qu'elle conditionne grandement les principes de conception qui doivent permettre d'en diminuer l'occurrence ou d'en empêcher l'apparition.

Chapitre 10 : Construction

Ce chapitre décrit les principes et les enjeux de la construction de digues. Il se focalise sur la conceptualisation du projet et sa planification, ainsi que sur les méthodes de construction et la de gestion des données. Des méthodes et des exemples sont donnés pour illustrer les bonnes et les mauvaises pratiques de construction pour différents pays.

La défaillance des systèmes d'endiguement

La défaillance se définit comme l'incapacité d'atteindre un seuil de performance défini pour une fonction donnée, ici la protection contre les inondations. Elle peut concerner un système de protection contre les inondations ou un tronçon de digue ou un composant d'un tronçon de digue.

La plupart des activités liées au diagnostic des digues, à leur entretien ou à leur conception sont en lien direct avec les éventuelles défaillances structurelles et hydrauliques des systèmes de digues. Dans ce cadre, l'analyse des modes de

défaillance est donc un processus qui vise à analyser, identifier et représenter les scénarios de défaillance afin d'améliorer l'évaluation de la sécurité des digues et l'estimation du risque.

L'analyse des modes de défaillance peut être basée sur une analyse fonctionnelle qui décrit le système de digues étudié en termes de fonctions. Une analyse fonctionnelle de système d'endiguement peut être abordée à trois granularités différentes [4] :

- Granularité 1 : le système d'endiguement dans son ensemble et donc ses fonctions principales et techniques du fait de son environnement (milieu extérieur eau, milieu extérieur zone protégée) ;
- Granularité 2 : les ouvrages fonctionnellement homogènes qui composent le système d'endiguement et donc les fonctions hydrauliques de ces sous-systèmes (digues, déversoirs, batardeau, ...) ;
- Granularité 3 : les éléments structurels qui composent les sous-systèmes de digues et donc les fonctions géotechniques des composants des sections de digues (organe de protection contre l'érosion, corps de digue, filtre, drain, recharge...).

La fonction principale d'un système d'endiguement est la protection contre les inondations. Sa défaillance peut donc être définie comme l'inondation non souhaitée de la zone protégée (défaillance du système d'endiguement). Cette situation peut se produire soit par entrée d'eau avant que le niveau de protection³ prévu ne soit atteint, soit par une brèche dans le système d'endiguement. Le premier cas peut être considéré comme défaillance hydraulique et le second comme le résultat d'une défaillance structurelle. Comme le montre la figure 1, ces deux cas de figure ne sont pas nécessairement indépendants puisque chacun des deux peut se produire seul, ou conduire à l'autre.

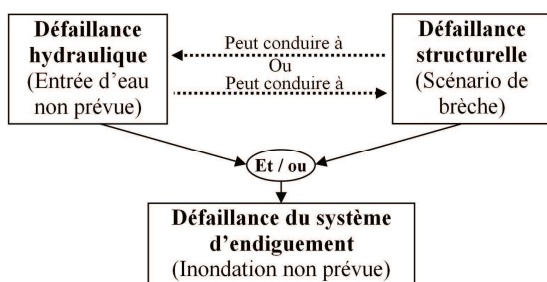


FIGURE 1 : La défaillance des systèmes d'endiguement

Les systèmes d'endiguement de protection contre les inondations peuvent contenir des tronçons de digues et d'autres ouvrages (murs, déversoirs, vannes, ...). Afin d'analyser les défaillances hydrauliques, nous devons

considérer l'ensemble de ces sous-systèmes de digues. Pour les aspects structurels, nous nous concentrerons sur l'analyse des digues en remblais.

La défaillance hydraulique

Les scénarios de défaillance hydraulique

Les défaillances hydrauliques peuvent résulter soit :

- d'erreurs dans les processus de conception de la digue ;
- de modifications dans l'environnement du système de digues (par exemple une élévation du lit du fleuve, du ségonnal ou de l'estran, ou un tassement sous la digue conduisant à un débordement pour un niveau de crue inférieur à la condition initiale) ;
- d'une défaillance d'opération (par exemple un batardeau qui n'est pas fermé lors d'un événement, du fait d'une défaillance humaine ou un mauvais entretien entraînant l'impossibilité de le fermer) ;
- d'une brèche résultant d'un scénario de défaillance structurelle.

Un scénario de défaillance hydraulique est une succession d'événements conduisant à l'événement ultime que constitue l'inondation de la zone protégée.

Ces événements consistent successivement en :

- l'évènement hydraulique initiateur (crue ; tempête) ;
- les sollicitations hydrauliques sur le système d'endiguement, transformées par des éléments présents côté cours d'eau (épis, digues, barrages,...) ;
- les défaillances hydrauliques des sous-systèmes de digues ;
- l'inondation de la zone protégée.

Il est à noter qu'une inondation de la zone protégée causée par une crue plus élevée que le niveau de protection de conception du système d'endiguement n'est pas une défaillance hydraulique. En effet, dans ce cas de figure, la fonction de protection est bien remplie jusqu'à ce que le niveau de protection défini et choisi soit dépassé.

La défaillance des fonctions hydrauliques des sous-systèmes de digues

Pour un système d'endiguement donné, l'analyse fonctionnelle de granularité 2 conduit à la mise en évidence des fonctions hydrauliques des sous-systèmes de digues qui le composent (tronçons de digues, déversoirs, batardeaux, ouvrages de vidange, ...). Un même sous-système de digues peut porter plusieurs fonctions hydrauliques. A chacune des fonctions hydrauliques est associé un mode de défaillance. Le tableau 1 liste les principales fonctions hydrauliques et défaillances associées envisageables pour les sous-systèmes de digues.

³ Le niveau de protection est le niveau de crue jusqu'auquel le système d'endiguement doit empêcher l'eau d'entrer dans la zone protégée.

TABLEAU 1 : LES FONCTIONS HYDRAULIQUES ET MODES DEFAILLANCES ASSOCIES

| N° | Fonction hydraulique | Type de sous-système | Cause de la défaillance (Etat structurel, opérationnel, morphologique) | Mode de défaillance (conséquence hydraulique) | Effets de la défaillance (Conséquence structurelle, opérationnelle, morphologique) |
|----|---|----------------------|---|---|--|
| 1 | Empêcher l'entrée d'eau dans la zone située en arrière du sous-système, jusqu'au niveau de crête | Linéaire | - Défaillance structurelle : disparition totale ou partielle du sous-système - Modification morphologique : abaissement relatif du niveau de crête | Ecoulement d'eau dans la surface en arrière du sous-système, avant le niveau de crête | - Défaillance du sous-système de stockage amont - Possible défaillance structurelle des sous-systèmes en contact avec la surface aval |
| 2 | Contrôler le déversement de l'eau dans la zone située en arrière du sous-système, au-delà du niveau de crête (résistance à la surverse) | Linéaire | - Défaillance structurelle : disparition totale ou partielle du sous-système - Modification morphologique : abaissement relatif du niveau de crête | Ecoulement d'eau incontrôlé dans la surface en arrière du sous-système (après ou avant le début de la surverse) | - Défaillance du sous-système de stockage amont - Possible défaillance structurelle des sous-systèmes en contact avec la surface aval |
| 3 | Ecrêter les crues (résistance à la surverse) | Linéaire | - Obstruction de la crête : élévation relative du niveau de crête du sous-système - Modification morphologique : élévation relative du niveau de crête du sous-système | Non abaissement ou abaissement moins important des lignes d'eau sur les sous-systèmes de même rang situés en aval | - Possible défaillance structurelle des sous-systèmes de même rang |
| 4 | Permettre le reversement (évacuation) de l'eau d'inondation (résistance à la surverse) vers l'extérieur de la zone protégée | Linéaire | - Obstruction de la crête : élévation relative du niveau de crête du sous-système - Modification morphologique : élévation relative du niveau de crête du sous-système | Elévation non prévue (plus importante) du niveau d'eau dans le sous-système surfacique en contact | - Possible défaillance structurelle des sous-systèmes en contact avec le sous-système surfacique concerné |
| 5 | Empêcher l'entrée d'eau dans la zone située en arrière du sous-système, jusqu'à un niveau de crête fixe, prévu pour être élevé temporairement jusqu'à un niveau de crête amovible | Linéaire / Ponctuel | - Défaillance opérationnelle : non mise en place de la partie amovible - Défaillance structurelle : disparition totale ou partielle de la partie amovible | Ecoulement d'eau dans la surface en arrière du sous-système, dès le niveau de crête fixe | - Défaillance du sous-système de stockage amont - Possible défaillance structurelle des sous-systèmes en contact avec la surface aval |
| 6 | Fractionner hydrauliquement la zone protégée, jusqu'à la crête du sous-système | Linéaire | - Défaillance structurelle : disparition totale ou partielle du sous-système - Modification morphologique : abaissement relatif du niveau de crête | Ecoulement d'eau dans la surface en arrière du sous-système, avant le niveau de crête | - Défaillance du sous-système de stockage amont - Possible défaillance structurelle des sous-systèmes en contact avec la surface aval |
| 7 | Permettre un écoulement d'eau ponctuel, d'un côté à l'autre d'un sous-système de digues linéaire | Ponctuel | - Défaillance opérationnelle : obstruction totale ou partielle de l'ouverture | Ecoulement nul ou moins important que prévu | - Défaillance du sous-système d'écoulement gravitaire amont |
| 8 | Maîtriser un écoulement d'eau ponctuel (débit, sens d'écoulement, niveau d'écoulement) | Ponctuel | - Défaillance opérationnelle - Défaillance structurelle | Ecoulement d'eau non maîtrisé dans la surface en arrière du sous-système | - Défaillance du sous-système d'écoulement gravitaire amont - Défaillance du sous-système de stockage amont |
| 9 | Stocker les écoulements d'eau jusqu'au niveau de crête ou d'écoulement des sous-systèmes en contact | Surface | Défaillance des sous-systèmes en contact : le stockage est partiellement ou totalement impossible | Ecoulement non prévu dans la surface en aval de la zone de stockage | - Possible défaillance structurelle des sous-systèmes en contact avec la surface aval |
| 10 | Permettre un écoulement gravitaire des eaux de surface | Surface | Défaillance du sous-système exutoire de la surface d'écoulement : l'écoulement est partiellement ou totalement impossible | Stockage d'eau non prévu dans la zone d'écoulement gravitaire | - Possible défaillance structurelle des sous-systèmes en contact |

La construction des scénarios de défaillance hydraulique

La construction des scénarios de défaillance hydraulique est classiquement menée au travers de la réalisation d'une analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) [5].

TABLEAU 2 : EXTRAIT DE TABLEAU D'AMDE HYDRAULIQUE

| N° | Sous-systèmes | Contacts | Fonctions | Cause de la défaillance (Etat structurel, opérationnel, morphologique) | Mode de défaillance (conséquence hydraulique) | Effets de la défaillance (Conséquence structurelle, opérationnelle, morphologique) |
|----|---------------|-----------------|---|---|--|---|
| A | Digue | Cours d'eau ; F | 1. Empêcher l'entrée d'eau dans F, jusqu'à Q150 | - Défaillance structurelle A (disparition totale/partielle de A) - Modification morphologique (abaissement relatif du niveau de crête A) | Ecoulement d'eau dans F, avant Q150 | - Possible défaillance structurelle de D |
| B | Déversoir | Cours d'eau ; F | 1. Empêcher l'entrée d'eau dans F, jusqu'à Q100 | - Défaillance structurelle B (disparition totale/partielle de B) - Modification morphologique (abaissement relatif du niveau de crête B) | Ecoulement d'eau dans F, avant Q100 | - Possible défaillance structurelle D |
| | | | 2. Contrôler déversement dans F, dès Q100 | - Défaillance structurelle B (disparition totale/ partielle de B) - Modification | Ecoulement incontrôlé dans F (> ou < Q100) | - Possible défaillance structurelle de D |

| | | | | | |
|--|--|--|--|---|--|
| | | | morphologique (abaissement relatif du niveau de crête B) | | |
| | | 3. Ecrêter les crues, à partir de Q100 | - Obstruction de la crête (élévation relative du niveau de crête de B) - Modification morphologique (élévation relative du niveau de crête B) | Non abaissement ou abaissement moins important des lignes d'eau sur C | - Possible défaillance structurelle de C |

Le tableau 2 consiste en un extrait de tableau d'AMDE hydraulique. Il donne un exemple d'analyse pouvant être réalisée pour caractériser la possible défaillance des fonctions hydrauliques de différents types de sous-systèmes de digues. Il met ainsi en évidence les relations de causes de défaillances de fonction à effets de défaillances de fonction, en se basant sur l'identification des contacts entre sous-systèmes de digues. Les contacts d'un sous-système de digue correspondent aux sous-systèmes de digues ou éléments extérieurs au système d'endiguement qui constituent les bordures du sous-système considéré. Les scénarios de défaillance hydraulique sont alors construits sur la base de ce tableau, en suivant les différents enchaînements possibles de relations de causes à effets de défaillances de fonction hydrauliques.

La figure 2 montre l'enchaînement d'évènements formant un scénario de défaillance hydraulique. Celui-ci démarre avec une sollicitation hydraulique externe (crue, tempête, ...) et conduit le système d'endiguement à un nouvel état de stabilité dans lequel certain de ses sous-systèmes sont défaillants.

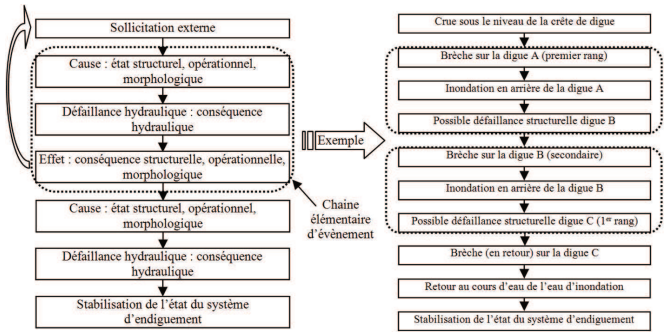


FIGURE 2 : Les scénarios de défaillance hydraulique

La première défaillance hydraulique entraîne généralement une inondation dans tout ou partie de la zone protégée. Toutefois, les systèmes d'endiguement pouvant être d'une organisation relativement complexe, l'identification de l'ensemble des scénarios de défaillances hydrauliques envisageables permet de connaître les différentes formes d'inondation possible (par exemple l'ordre d'inondation des différents casiers hydrauliques de la zone protégée), ce qui facilite le travail d'estimation du risque d'inondation.

L'analyse de la défaillance structurelle

Les scénarios de défaillance structurelle

Un scénario de défaillance structurelle conduit à la rupture de la digue et consiste en un processus (traditionnellement appelé «mode de rupture») qui implique des phénomènes à la fois physiques et fonctionnels (figure 3).

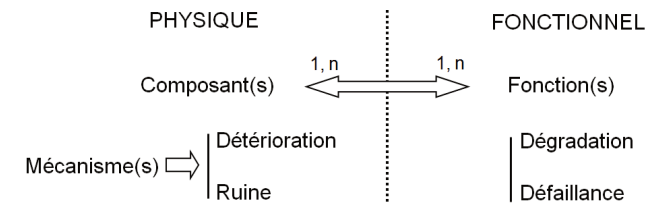


FIGURE 3 : Les aspects physiques et fonctionnels de l'analyse des scénarios de défaillance

Les premiers mécanismes d'un scénario de défaillance structurelle sont initiés par des sollicitations ou conditions externes. Ceux-ci 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 aux dits composants.

La dégradation ou défaillance d'une fonction peut alors initier

ou aggraver des mécanismes, et entraîner la création de nouvelles chaînes élémentaires d'événements. Pour certains mécanismes, ces initiations ou aggravations sont également conditionnées par la nature des sollicitations externes.

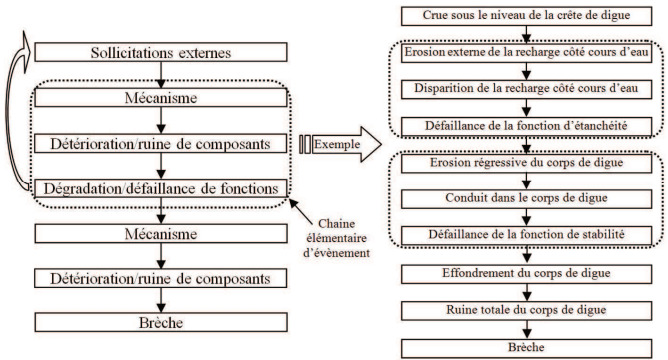


FIGURE 4 : Le scénario de défaillance structurelle

La figure 4 illustre la notion de scénario de défaillance qui consiste en une chaîne d'événements comprenant des mécanismes, des détériorations ou ruines de composants et des dégradations ou défaillances de fonctions pouvant déboucher sur la formation de brèches.

Le mode de rupture dénommé "soulèvement hydraulique aval" cité dans l'introduction est en fait un scénario qui enchaîne le claquage d'une couche cohésive du terrain superficiel en aval de la digue, suivi d'une érosion interne régressive se propageant vers l'amont, suivi à terme d'une érosion de conduit, pouvant conduire à un effondrement.

Un scénario peut s'arrêter lorsque la sollicitation externe (inondations ou tempêtes, sécheresse, les animaux, la végétation, les activités humaines, ...) ou le mécanisme à l'œuvre s'arrête. L'état de la digue est alors détérioré (ce qui signifie que les fonctions de certains de ses composants sont dégradées ou défaillantes), mais pas nécessairement ruiné. Le scénario peut alors redémarrer avec une nouvelle sollicitation pouvant cette fois conduire les composants de la digue à la ruine et donc à la création d'une brèche.

Les mécanismes, leurs causes et leurs conséquences

Les mécanismes sont des processus ou phénomènes, physiques ou chimique, affectant les composants d'une digue. Ces mécanismes et leurs conséquences sur l'état physique d'un composant de digue peuvent être progressifs (processus de détérioration pouvant progressivement conduire à la ruine) ou brutaux (rupture soudaine entraînant la ruine) (figure 5).

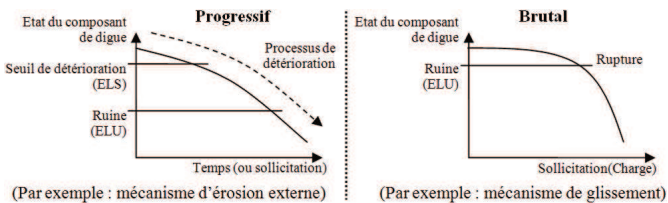


FIGURE 5 : Les mécanismes progressifs et brutaux

Un mécanisme peut s'arrêter si ses causes (solllicitations externes) s'arrêtent. L'état du composant de digue impacté est alors détérioré, mais pas nécessairement ruiné. Le mécanisme et le processus de détérioration peuvent reprendre avec de nouvelles solllicitations, et ainsi conduire à la ruine du composant de digue considéré (figure 6).

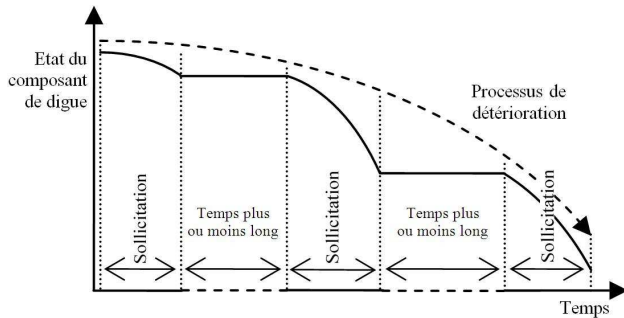


FIGURE 6 : Les phases de détérioration au cours du temps

Le tableau 3 donne un exemple de différents types de mécanismes pouvant être considérés pour le cas des composants granulaires qui constituent les digues en remblais.

TABLEAU 3 : EXEMPLES DE MECANISMES ET DETERIORATIONS/ RUINES RESULTANTS POUR LES COMPOSANTS DE DIGUES

| Mécanismes | Type de mécanisme | Etat possible au seuil de détérioration (ELS) | Etat possible au seuil de ruine (ELU) |
|---------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------------|
| Affouillement | Progressif | Disparition partielle | Disparition totale |
| Erosion externe | Progressif | Disparition partielle | Disparition totale |
| Erosion de surverse | Progressif | Disparition partielle | Disparition totale |
| Erosion interne | Progressif | Disparition de particules | Conduit, cavité |
| Glissement | Brutal (ou progressif) ⁴ | Ruine partielle | Ruine totale |
| Effondrement | Brutal | Ruine partielle | Ruine totale |
| Colmatage | Progressif | Obstruction partielle | Obstruction totale |

La défaillance des fonctions géotechniques

Même si des composants non granulaires peuvent entrer dans la composition d'un profil en travers de digue en remblai (exemple : composants rigides, géosynthétiques, ...), les fonctions des composants de ce type de digues de granularité 3 sont géotechniques.

Comme le montre la figure 7, le processus de défaillance des fonctions peut être progressif, brutal, ou binaire.

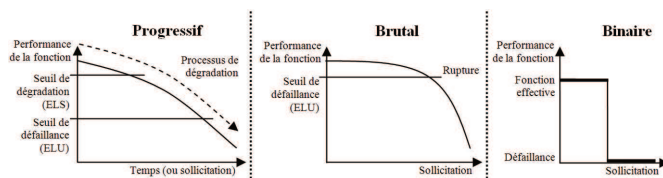


FIGURE 7 : Les processus de défaillance de fonctions

Le tableau 4 donne un exemple des différents types de fonctions pouvant être associées aux composants granulaires des digues en remblais.

TABLEAU 4 : EXEMPLES DE FONCTIONS GEOTECHNIQUES ET DEGRADATION/DEFAILLANCE ASSOCIEES

| N° | Fonctions | Type de fonction | Dégradation de la fonction | Défaillance de la fonction |
|----|-----------------|------------------|---|--|
| 1 | Stabilité | Brutal | | Perte de stabilité |
| 2 | Imperméabilité | Progressive | Perméabilité supérieure au seuil de dégradation | Perméabilité supérieure au seuil de défaillance |
| 3 | Drainage | Progressive | Débit de drainage inférieur au seuil de dégradation | Débit de drainage inférieur au seuil de défaillance |
| 4 | Filtration | Binaire | | Possible migration des particules d'un composant vers un autre |
| 5 | Auto-filtration | Binaire | | Possible migration des particules au sein d'un composant |
| 6 | Protection | Progressive | Protection affaiblie | Plus de protection |

La construction des scénarios de défaillance structurale

La construction des scénarios de défaillance structurale est également menée au travers de l'AMDE [4].

Elle consiste en la construction d'un tableau exprimant l'ensemble des chaînes élémentaires d'événements possibles (mécanismes => détérioration ou ruine de composants => dégradation ou défaillance de fonctions) (tableau 5).

Les différentes étapes pour remplir ce tableau 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 modifications des conditions internes et mécanismes possibles pour chaque composant ;
- Étape 3 : identification des éventuelles détériorations/ruines associées à chaque mécanisme ;
- Étape 4 : identification des liens entre détériorations/ruines de composants et dégradations/ défaillance de fonctions. Les détériorations/ruines de composants sont les causes des dégradations/défaillances de fonctions. Leurs liens sont indiqués dans le tableau AMDE par les expressions entre parenthèses associées aux détériorations/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.

⁴ brutal pendant ou après une crue, progressif le reste du temps

TABLEAU 5 : EXTRAIT DE TABLEAU D'AMDE STRUCTURELLE

| N° | Composant | Possibles mécanismes | Causes des dégradations/défaillances de fonctions | | Fonctions | Dégradations/défaillances des fonctions | | Conséquences des dégradations/défaillances de fonctions (mécanismes) |
|-----|------------------|--|---|----------------------------|---------------|---|-------------------------|---|
| | | | Détérioration | Ruine | | Etat | Caractérisation | |
| A | Surface enherbée | - Erosion de surverse - Erosion externe | - Disparition partielle (A6a) | - Disparition totale (A6b) | 6. Protection | a) Dégradé | - Protection détériorée | Selon le niveau de crue : - Erosion externe A - Erosion de surverse A |
| | | | - Disparition partielle (A6a) | - Disparition totale (A6b) | | b) Défaillant | - Plus de protection | Selon le niveau de crue : - Erosion externe B - Erosion de surverse B |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

La représentation graphique des scénarios de défaillance structurelle

Pour une meilleure lisibilité, les scénarios de défaillance structurelle peuvent être représentés graphiquement sous la forme d'arbres 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 étudié, les sollicitations ou conditions 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.

Le tableau 6 donne des exemples de sollicitations ou conditions externes et de mécanismes associés pouvant affecter les digues.

TABLEAU 6 : EXEMPLES DE SOLLICITATIONS ET CONDITIONS EXTERNES ET MECANISMES RESULTANTS POSSIBLES

| Sollicitations ou conditions externes | Mécanismes résultants possibles |
|---------------------------------------|---|
| Crue inférieure à la crête de digue | Erosion externe ; Affouillement ; ... |
| Crue supérieure à la crête de digue | Erosion externe ; Erosion de surverse ; Affouillement ; ... |
| Décru | Glissement côté cours d'eau (si cohésion perdue) ; ... |
| Régime fluvial normal | Affouillement ; ... |
| Activité humaine sur l'ouvrage | Erosion externe ; ... |
| Présence d'animaux fouisseurs | Creusement de galeries ; ... |
| Présence de végétation | Développement de racines ; ... |

Partant des sollicitations ou conditions 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 8).

Conclusion et lien avec les EdD de digues

L'étude de dangers de digues repose sur une démarche d'analyse de risque. L'objectif de cette démarche est l'estimation du risque associé à différents scénarios de défaillance envisageables pour un système d'endiguement. Dans l'EdD, cette estimation du risque est ensuite utilisée pour en évaluer la criticité afin de proposer des mesures de

gestion de l'ouvrage adaptées pour réduire le risque.

La qualité d'une telle étude dépend donc en grande partie de la pertinence de la méthode mise en œuvre pour identifier les scénarios de défaillance du système d'endiguement. Par leur aspect analytique et leur recherche d'exhaustivité, la terminologie relative à la notion de défaillance de digue développée dans le cadre de l'ILH et la méthode IRSTEA d'analyse fonctionnelle et d'analyse des modes de défaillance de digues, peuvent constituer une base solide pour réaliser une étude de dangers de digues.

La figure 9 illustre le déroulement de la démarche d'analyse de risque pouvant être mise en place dans le cadre d'une EdD de digues. En caractères gras, on y retrouve les étapes relatives aux principes présentés dans le présent document.

La méthodologie de réalisation des EdD de digues et plus généralement d'analyse de risque des digues est actuellement en cours de rédaction par IRSTEA sous la forme d'un guide technique dont la publication est prévue courant 2013.

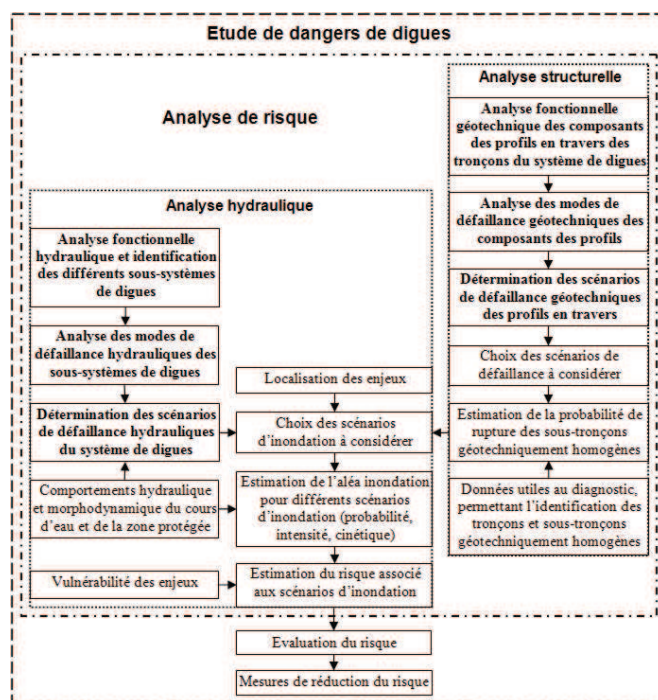


FIGURE 8 : Application à l'étude de dangers de digues

