

L'analyse de risque des systèmes endigués : méthodologie et application à la réalisation des études de dangers

Risk analysis of leveed systems: methodology and application to conducting hazard studies

R. Tourment¹, B. Beullac¹, S. Patouillard², J. Maurin³, Y. Queffélec⁴

¹ Irstea, Aix en Provence, remy.tourment@irstea.fr

² DREAL Centre-Val de Loire, Orléans, sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr

³ Expert consultant, Saint Denis de l'Hôtel, jean.maurin45@gmail.com

⁴ ONF-DFRN / Dép. RN –Pôle RTM, Gap, yann.queffelec@onf.fr

Résumé

Les études de dangers de digues ont été introduites par la réglementation de 2007 sur la sécurité des ouvrages hydrauliques. Celles-ci s'appliquent aux systèmes d'endiguement depuis la publication du décret du 12 mai 2015. Ces études sont des analyses de risque dans un format particulier, défini par la réglementation. La communication présente une méthode de réalisation des études de dangers de systèmes d'endiguement basée sur une analyse de risque. Elle décrit la méthode spécifique d'analyse de risque développée pour ces systèmes et la méthode d'analyse des modes de défaillance associée. Enfin, elle présente l'intérêt de l'utilisation de l'analyse de risque indépendamment d'un cadre réglementaire fluctuant, pour l'amélioration continue des ouvrages de protection, des systèmes qu'ils forment et pour la gestion associée.

Mots-Clés

Analyse de risque, Études de dangers, Système endigué, Diagnostic, GEMAPI

Abstract

Levees hazard studies were introduced by the 2007 regulations on the safety of hydraulic structures. These studies are applied to levee systems since the publication of the decree of 12 May 2015. They are risk analyzes in a particular format, defined by the regulations. The paper presents a method for carrying out hazard studies of levee systems based on risk analysis. It describes the specific risk analysis method developed for these systems and the associated method for analyzing failure modes. Finally, it presents the interest of using risk analysis independently of a fluctuating regulatory framework, for the continuous improvement of protection structures, the systems they form and their management.

Key Words

Risk analysis, Hazard studies, Levees system, Assessment, GEMAPI

Introduction

Les Études de Dangers (EdD) de digues ont été introduites par la réglementation de 2007 sur la sécurité des ouvrages hydrauliques (arrêté du 29 février 2008), commune aux barrages et aux digues. La réglementation de 2015 a par la suite défini les études de dangers des systèmes d'endiguement (arrêté du 7 avril 2017) devant être gérés par les collectivités en charge de la nouvelle compétence GEMAPI. Ces études de dangers consistent dans les deux cas à la mise en œuvre de démarches d'analyse de risque, mais dans un format particulier défini par la réglementation. Pour autant, l'adaptation des concepts de l'analyse de risque, qui ont été développés dans le domaine de l'industrie, au domaine des ouvrages hydrauliques n'était pas chose évidente ; pour les barrages, ouvrages "ponctuels", l'adaptation a demandé un certain travail, pour les digues, compte tenu de la complexité des systèmes et du long linéaire d'ouvrages, le besoin de développements méthodologiques était encore plus important.

Principes de l'analyse de risque des systèmes endigués

L'analyse de risque d'un système endigué (système composé d'une zone protégée des inondations et du système d'endiguement qui la protège) est en fait l'analyse du risque d'inondation dans le territoire protégé, compte tenu de la présence du système d'endiguement, mais aussi des aléas pouvant résulter de la défaillance de ce système (par rupture ou autres causes) et de dépassement de son niveau de protection. Notons au passage que, par un effet pervers, le

niveau de risque derrière des digues peut parfois se révéler supérieur à celui qu'il serait en leur absence, suite à un développement des enjeux ou à une aggravation des phénomènes hydrauliques dans la zone "protégée" en cas de rupture.

Un cadre générique de cette analyse a été validé au niveau international dans l'International Levee Handbook [1], la figure 1 (adaptée par l'auteur) en représente les étapes essentielles.

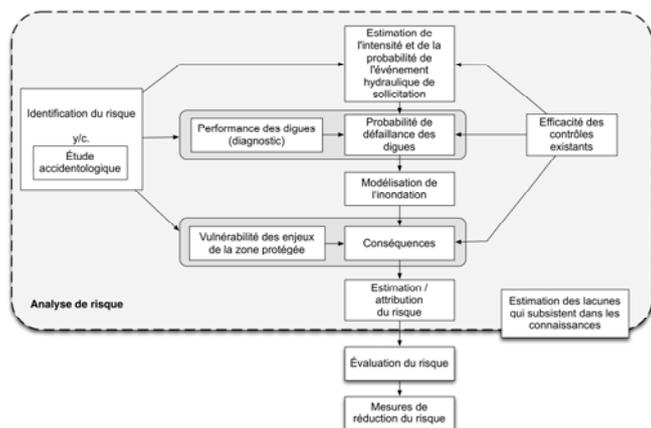


FIGURE 1 : CADRE DE L'ANALYSE DE RISQUE DES SYSTEMES ENDIGUES (D'APRES [1])

Cette analyse de risque prend en compte et caractérise les trois composantes du modèle Source-Pathway-Receptor¹ [19] :

- en termes hydrauliques et de probabilité, les aléas naturels contre lesquels les digues protègent,
- les performances des digues et en corollaire la probabilité de leur défaillance,
- et enfin les conséquences de l'inondation sur les enjeux de la zone protégée.

Le détail de chacune des étapes du graphique est explicité dans le chapitre 5 de l'ILH [1] et dans le guide Irstea sur l'analyse de risque des systèmes de protection contre les inondations [21].

Notons que dans le cas des digues de protection contre les inondations, les conséquences de la défaillance ou de la rupture du système étudié sont de même nature (une inondation) que l'aléa naturel contre lequel ces ouvrages sont censés protéger, alors que dans le cas des sites industriels ou même des barrages, les conséquences d'une défaillance sont de nature fondamentalement différente de la vocation de l'installation (mis à part les barrages écrêteurs de crue bien sûr, qui font aujourd'hui l'objet d'une catégorie réglementaire à part).

Une méthode de réalisation des Études de Dangers

Mise au point d'une méthodologie

Dès 2009, sur la base du plan réglementaire des EdD défini dans l'arrêté du 12 juin 2008, Irstea a participé avec la DREAL Centre-Val de Loire et le Cerema à la réalisation des trois EdD des digues de classe A de la Loire Moyenne² [12 ; 26]. Irstea était chargé entre autres des développements méthodologiques nécessaires ; en effet, les attendus d'une EdD de digue étaient décrits dans la réglementation, mais aucune méthode préexistante ne permettait de conduire ces études de nature fondamentalement nouvelle dans l'ingénierie des ouvrages hydrauliques. La circulaire du 16 avril 2010 et le guide de lecture associé à destination des services de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques ont permis de préciser les attendus d'une EdD de digue, mais n'apportaient encore pas d'éclairage sur le mode de réalisation. La méthodologie a donc été construite et formalisée à l'avancement de ces trois EdD.

Lors du développement de la méthodologie, il est apparu un certain nombre de points essentiels :

- Une certaine logique relie les différentes parties (chapitres et sections) du plan réglementaire de l'EdD, cette logique se retrouve dans une démarche globale d'analyse de risque.
- Pour avoir du sens, une EdD se doit d'être réalisée à l'échelle d'un système hydrauliquement cohérent (dénommé "système d'endiguement" par la réglementation de 2015 qui a ainsi formellement entériné cette échelle d'analyse).
- Une EdD nécessite énormément de données et comporte plusieurs analyses plus classiques dans le domaine de l'ingénierie des ouvrages hydrauliques : topographie, hydrologie, hydraulique, géotechnique...

On a pu s'apercevoir, à l'analyse d'un certain nombre d'EdD (version 2008) dont nous avons eu connaissance, que ces conditions étaient rarement toutes remplies. Entre autres, pour des raisons liées à la maîtrise d'ouvrage des études et de la gestion des digues, de nombreuses EdD ne portaient que sur une partie des éléments d'un système de protection. De manière très fréquente également, les chapitres d'une EdD étaient rédigés de manière indépendante, sans lien et sans cohérence, parfois par des personnes différentes. Une EdD répondant au plan réglementaire sans recul sur le sens global de l'analyse de risque n'apportait malheureusement dans ces cas que peu d'utilité à son maître d'ouvrage, si ce n'est une réponse aveugle aux obligations de la réglementation.

La figure 2 présente de manière synthétique la logique de la méthodologie développée pour conduire les EdD de manière intégrée et cohérente. On y trouve représentés les études de

¹ En français : Source-Transfert-Cible.

² Val d'Orléans, val de Tours, val d'Aauthion

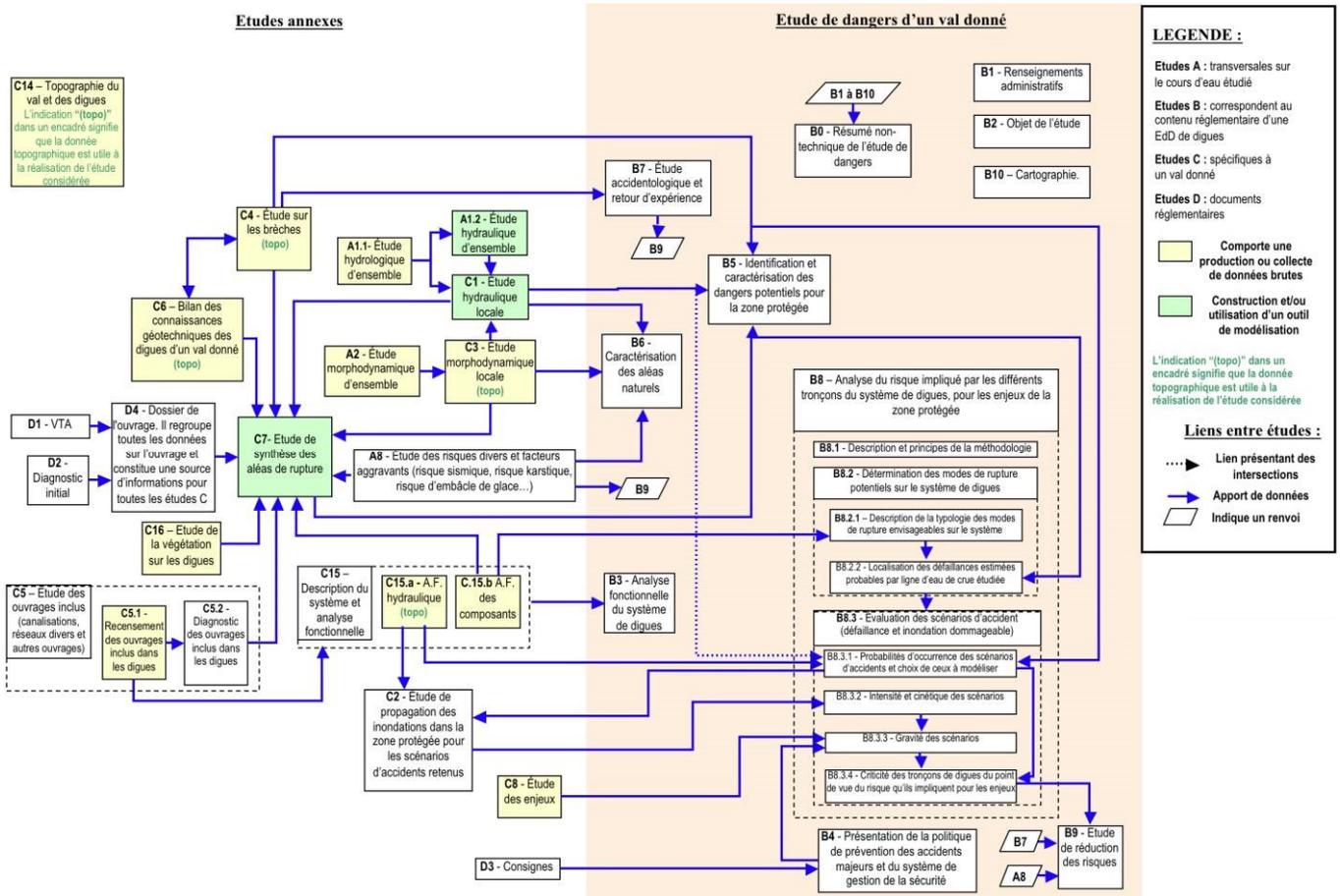


FIGURE 2 : DIAGRAMME DE LA METHODOLOGIE DE REALISATION DES ETUDES DE DANGERS DES DIGUES DE CLASSES A DE LA LOIRE MOYENNE (2012) [26]

production et de recueil de données, les flux de données qui les lient et alimentent les chapitres du plan réglementaire de l'EdD, ainsi que les interrelations nécessaires entre ces chapitres. La suite de ce chapitre explique de quelle manière cette première démarche a ensuite été restructurée, au travers de la définition d'études élémentaires en interactions, dans le but d'en simplifier l'appropriation et la mise en application.

Présentation de la méthode d'analyse de risque proposée

L'étude de dangers de digues ou de systèmes d'endiguement consiste en une analyse de risque. Pour cette raison, à la suite de nos travaux sur la Loire, nous avons choisi de développer une méthode d'analyse de risque, plutôt que d'étude de dangers. Ce choix se justifie d'abord par le fait de construire un outil générique applicable dans tout type de contexte, plus logique et modulaire que s'il était resté centré sur le plan réglementaire des EdD françaises. Ce choix permet également de s'affranchir des évolutions de la réglementation, le plan des EdD ayant été complètement modifié pendant l'écriture de la méthodologie. Enfin, il a eu pour objectif de faciliter, pour le gestionnaire, la réutilisation et l'actualisation des résultats des analyses antérieures, et donc la réévaluation

de la performance de ses ouvrages et du risque qu'ils représentent, dans le cadre de leur gestion quotidienne, et lors des actualisations réglementaires de l'étude de dangers.

L'analyse de risque et les besoins en données qui entrent en jeu dans sa réalisation peuvent être décomposés en différentes études élémentaires. Celles-ci, qui sont présentées sur la figure 3, correspondent à des étapes individualisées, pouvant chacune faire l'objet d'analyses spécifiques.

Dans la figure 3, les études identifiées par des lettres A à H correspondent aux étapes incontournables de l'analyse de risque proprement dite. Celles correspondant aux lettres I et J traitent de l'utilisation ultérieure des résultats de cette dernière. Les études numérotées de 1 à 14 définissent les différentes études de recueil ou de production de données nécessaires. Il s'agit pour la plupart d'études classiques dans l'ingénierie des ouvrages hydrauliques, qui pourraient être produites indépendamment d'un processus de réalisation d'une analyse de risque.

Ces études élémentaires doivent être abordées suivant la démarche suivante :

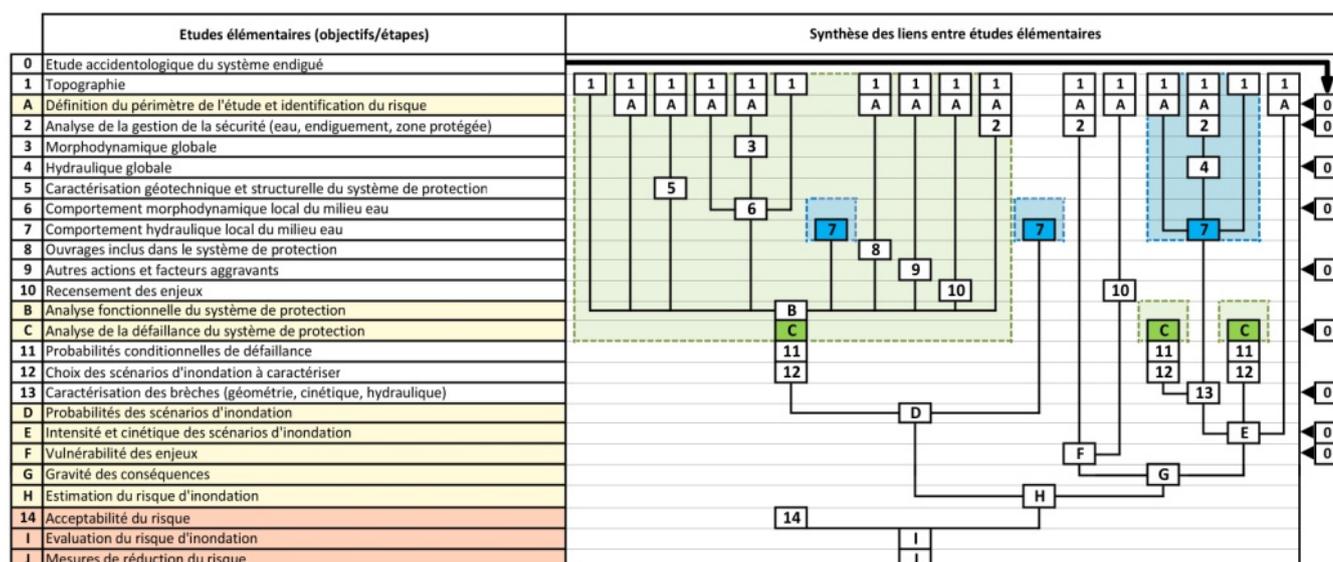


FIGURE 3 : LA DECOMPOSITION DE L'ANALYSE DE RISQUE EN ETUDES ELEMENTAIRES : LA PARTIE GAUCHE DE LA FIGURE LISTE LES DIFFERENTES ETUDES ELEMENTAIRES, LA PARTIE DROITE (QUI SE LIT DE HAUT EN BAS) DECRIT DE MANIERE SIMPLIFIEE LES RELATIONS ENTRE CES ETUDES

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.

La méthode proposée présente chacune de ces études élémentaires en termes d'objectifs, d'interactions avec les autres études élémentaires, de flux de données et de résultats en entrée et en sortie de chacune d'elle.

Les interactions et flux de données entre études élémentaires peuvent être soit simples, le résultat d'une étude étant utilisé en entrée d'une autre, soit plus complexes, avec la nécessité de réelles interactions lors de la réalisation de deux études (voir figure 4).

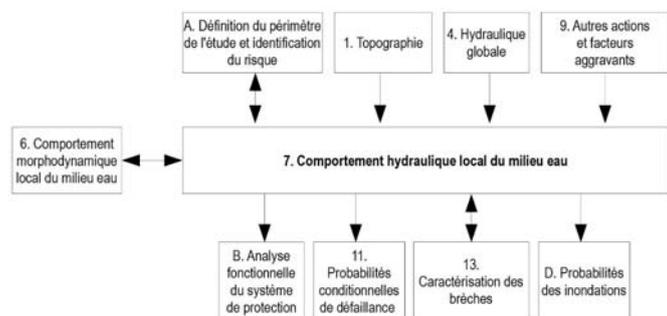


FIGURE 4 : INTERACTIONS SIMPLES ET DOUBLES ENTRE ETUDES ELEMENTAIRES

De plus, compte tenu de la globalité des phénomènes naturels auxquels les systèmes d'endiguement s'opposent et du caractère local de la protection, la méthode met en évidence la nécessité de combiner des approches globales et locales (pour l'étude de l'hydraulique et la morphodynamique) pour caractériser au mieux les événements de sollicitation des ouvrages. Les études globales devraient pour des soucis d'économie être réalisées préalablement à l'analyse de risque locale et probablement sous maîtrise d'ouvrage d'une structure à la bonne échelle (exemple EPTB).

La prise en compte de l'ensemble des études élémentaires que comporte la méthode et des enchaînements logiques qui les lient, est essentielle à la cohérence de l'estimation du risque d'inondation par dépassement ou défaillance d'un système de protection contre les inondations. Ce cadre générique est donc à appliquer de manière complète dans tous les cas lors de la réalisation d'une analyse de risque. Les adaptations éventuelles sur la densité et la complexité des reconnaissances et des modélisations jugées nécessaires en fonction de l'importance des enjeux protégés sont applicables aux études élémentaires et non à la démarche globale.

Applications ultérieures de cette méthodologie d'analyse de risque

Depuis septembre 2012, suite au travail effectué dans le cadre de la réalisation des EdD de classe A de la Loire moyenne, Irstea a continué à 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. Ces EdD, pour lesquelles la DREAL a joué un rôle d'assistance à maîtrise d'ouvrage vis-à-vis des DDT, gestionnaires locaux, ont toutes été achevées avant fin juin

2017.

Pour appliquer et valider sa méthode, Irstea s'est également impliqué, sous la forme de multiples partenariats recherche et développement, dans la réalisation d'EdD de différents gestionnaires : implication dans quatre EdD avec l'Établissement Public Loire, une avec la Communauté de Communes de l'Île d'Oléron, une avec la ville de Tours, et des études préliminaires avec le département de Seine Maritime.

Irstea a également répondu à plusieurs appels d'offres, en groupement avec des bureaux d'études privés, pour la réalisation d'EdD par l'application de sa méthodologie. Ceux-ci se sont révélés infructueux, probablement du fait de leur non compétitivité face à des offres se contentant de répondre à la réglementation sur la forme, et ne bénéficiant donc pas des autres avantages de la méthode proposée dans cet article (cohérence et facilité d'actualisation notamment).

Parution d'un guide méthodologique

Un guide de réalisation de ces études [21] a été rédigé et est en cours d'édition chez Lavoisier au moment de la rédaction de cet article. Très attendu par la profession, maîtres d'ouvrages et bureaux d'études, son contenu très complet et technique sur les principes de l'analyse de risque des systèmes de protection sera complémentaire de celui du guide sur les études de dangers de systèmes d'endiguement publié en 2018 [3], qui se veut beaucoup plus synthétique sur les aspects analyse de risque et plus axé sur les exigences réglementaires.

Une session de formation continue AgroParisTech (Réalisation des diagnostics de digues de protection) détaille la démarche d'analyse de risque et d'EdD, en montrant de quelle manière s'y intègrent le cadre méthodologique général du diagnostic des digues, les méthodes de recueil des données nécessaires, et les spécificités relatives aux contextes fluviaux, maritimes et torrentiels.

Une application à différents types d'environnements

Au sein du système hydrographique, un système de protection peut se trouver au contact de différents types de milieux eau (fluviaux, torrentiels, marins, estuariens, lacustres...) et parfois même au contact de plusieurs d'entre eux (territoire protégé contre plusieurs étendues d'eau).

Dans ces différents contextes, les fonctions principales d'un système de protection sont généralement de protéger contre les inondations et de maîtriser la morphologie des milieux eau interfacés.

La première de ces fonctions 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 leur comportement hydraulique et morphodynamique mais aussi par la nature des éventuelles activités humaines (navigation, extraction de granulats, agriculture...) et de la vie végétale et animale (végétation ligneuse, animaux fouisseurs...) qui y prennent place.

De par sa nature générique et intégratrice, et sa prise en compte des phénomènes aux échelles globale et locale, la méthode d'analyse de risque que nous proposons s'adapte à tout type de contexte hydraulique. Par ailleurs, le guide présente un éclairage technique spécifique pour chaque type de contexte fluvial, marin et torrentiel.

Limites des connaissances actuelles

La réalisation d'une analyse de risque de système d'endiguement fait appel, à des connaissances qui sont parfois encore du domaine de la recherche, mais pour lesquelles il faut néanmoins présenter des résultats. Par exemple, la question de l'ouverture d'une brèche (taille finale, dynamique d'ouverture, fosse d'érosion, paramètres influençant ces résultats) [15 ; 16], ou celle des scénarios de rupture liés à la présence de karsts en sous-sol, sont encore loin d'être totalement maîtrisées. Cette nécessité d'approfondissements scientifiques ou techniques ne doit pas être perçue comme une raison de ne pas réaliser l'analyse de risque ou de ne pas accorder de confiance à ses résultats. L'utilisation de jugements experts ou de méthodes approchées, clairement explicités ainsi que les incertitudes associées, est tout à fait recevable dans le contexte de ce genre d'études complexes. L'utilisation de méthodes innovantes doit quant à elle être justifiée par les références bibliographiques correspondantes.

Une méthode d'analyse des modes de défaillance

L'analyse fonctionnelle et l'analyse de la défaillance du système de protection sont deux étapes centrales de l'analyse de risque (voir figure 3) pour lesquelles Irstea a développé une méthodologie spécifique [9 ; 22]. Celle-ci, qui repose sur les principes de la sûreté de fonctionnement [13], et prolonge les travaux déjà menés sur les barrages [5 ; 17] comprend l'analyse des contraintes qui s'imposent au système ainsi que l'analyse des aspects hydrauliques et structurels de sa défaillance. Cette méthodologie permet tout d'abord de décomposer un système de protection en sous-systèmes (tronçons de digues, déversoirs, ouvrages vannés, pompes, ouvrages de ralentissement dynamique...) [8], et chacun de ces sous-systèmes en composants structurels (corps de digue, fondation, drain, filtre, protection contre l'érosion, organe d'étanchéité...). Elle permet ensuite d'identifier, de manière analytique et systématique, l'ensemble des scénarios de défaillance hydraulique du système de protection et de défaillance structurelle des ouvrages qui le composent. Elle facilite ainsi la réalisation du diagnostic de la performance hydraulique et structurelle des systèmes de protection,

l'analyse des scénarios possibles d'inondation et donc la conduite de leurs EdD.

Analyse de la défaillance hydraulique

La combinaison des actions des sous-systèmes qui forment les systèmes de protection permet de maîtriser l'aléa d'inondation dans les différentes parties de la zone qu'il protège (en termes de probabilité, d'intensité, de cinétique d'inondation). Un sous-système se caractérise par ses fonctions hydrauliques : faire obstacle à l'eau, la canaliser, lui permettre de s'écouler, l'évacuer, la stocker... Il est défaillant lorsqu'il est dans l'incapacité de satisfaire une ou plusieurs de ses fonctions. L'enchaînement de telles défaillances (les scénarios de défaillance hydraulique [22]), qui empêche la maîtrise de l'aléa d'inondation dans les conditions prévues, peut rendre défaillante la fonction de protection du système, et altérer le fonctionnement prévu pour le système lorsqu'il est sollicité au-delà du niveau de protection. L'analyse des scénarios hydrauliques de fonctionnement normal, dégradé ou défaillant du système endigué permet de caractériser la protection offerte par le système et les inondations susceptibles d'impacter la zone protégée en cas de défaillances. Elle permet d'optimiser la gestion de la protection contre les inondations.

Analyse de la défaillance structurelle

La combinaison des propriétés structurelles des composants d'un sous-système permet de réaliser ses fonctions hydrauliques et d'assurer sa pérennité face aux sollicitations. Les composants se caractérisent par leurs fonctions structurelles : être stable, être étanche, drainer, filtrer... Ils sont défaillants lorsqu'une ou plusieurs de leurs fonctions ne sont plus satisfaites. Les défaillances et dégradations de fonctions structurelles résultent principalement de mécanismes de détérioration (érosions externes, érosions internes, instabilités) des composants. Elles résultent également du vieillissement de ces derniers. Les scénarios de défaillance structurelle consistent donc en des successions de mécanismes de détérioration et de défaillances de fonctions [22] pouvant conduire à la formation de brèches [8, 20, 24]. L'analyse de ces scénarios permet de faciliter le travail de diagnostic de la performance structurelle des ouvrages du système.

Performances et niveaux associés du système endigué

La performance d'un système endigué vis-à-vis de son rôle de protection se traduit, entre autres, au travers de son niveau de protection [12 ; 11], c'est-à-dire du niveau d'eau en deçà duquel il n'y a pas d'entrée d'eau dans la zone protégée, ou dans une quantité limitée et acceptable par le système d'assainissement et de drainage de la zone protégée. La performance du système comprend aussi son effet sur les inondations résiduelles, contrôlées et minorées par rapport à l'inondation naturelle (sans protection). On décompose cette performance en performances hydraulique et structurelle. La performance hydraulique du système correspond à

l'analyse de la protection qu'il apporte, en l'absence de toute défaillance structurelle (rupture de digue, voire autre défaillance structurelle telle que par exemple vanne ou autre élément mobile bloqué ou rompu). Cette performance est entre autres caractérisée par son niveau de protection apparent [12 ; 11]. Celui-ci correspond au niveau de protection « géométrique » que procure le système, en prenant l'hypothèse que celui-ci ne rompt pas avant la surverse, contournement, ou fonctionnement du ou des déversoirs en fluvial.

Enfin, la performance structurelle du système se traduit en matière de niveau de sûreté [12 ; 11]. Ce dernier correspond au 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. On peut aussi aller plus loin dans la caractérisation de cette performance en estimant la probabilité de rupture (concept de courbe de fragilité) [8 ; 25] pour les différents niveaux au-delà du niveau de sûreté et jusqu'au niveau de danger [36 ; 37].

En termes techniques, le niveau de protection d'un système est donc le plus bas des niveaux de protection apparent (déterminé par le diagnostic hydraulique) et de sûreté (déterminé par le diagnostic structurel). NB : la performance du système ne se réduit pas au niveau de protection, comme explicité ci-dessus.

L'analyse de risque comme support des Études de Dangers

Développée dans le cadre de la réalisation d'EdD de digues (au format de l'arrêté de 2008), la méthodologie d'analyse de risque présentée dans cette communication est par ailleurs complètement adaptée à la réalisation d'EdD de systèmes d'endiguement (au format de l'arrêté de 2017). En effet :

- elle a intégré dès le début la nécessité d'une analyse à l'échelle d'un système hydrauliquement cohérent,
- elle permet de justifier les choix par le gestionnaire de délimitation de son système d'endiguement, de la zone protégée et du niveau de protection associés,
- elle permet enfin de renseigner les rubriques du plan réglementaire de l'EdD dans chacun des deux formats. Un tableau du guide (tableau 1) présente une correspondance entre ces rubriques et les différentes études élémentaires de la méthode.

TABLEAU 1 : LIENS ENTRE ETUDES ELEMENTAIRES ET CHAPITRES DE L'EDD REGLEMENTAIRE

Etudes élémentaires (objectifs/étapes)	Utilisation dans le rapport EdD 2007	Utilisation dans le rapport EdD 2015
0 Etude 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)
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 Evaluation du risque d'inondation	Chap. 8.3.4	
J Mesures de réduction du risque	Chap. 9	

Les mises à jour des résultats de l'analyse de risque et/ou des EdD d'un système d'endiguement sont facilitées par l'emploi d'une telle méthode indépendante du plan réglementaire, celui-ci n'étant en fait qu'une manière imposée et susceptible d'évolutions de présenter les résultats. Les mises à jour de l'analyse de risque peuvent être nécessitées par la périodicité réglementaire de l'EdD ou par un événement exceptionnel, par exemple des désordres liés à une crue. Ces mises à jour ne demandent pas autant d'effort que la première réalisation et ne remettent pas en cause l'essentiel de la démarche, mais simplement la mise à jour des données d'entrée, éventuellement l'intégration de méthodes actualisées ou innovantes de réalisation de certaines études élémentaires, et bien entendu le croisement des résultats des études élémentaires.

Intérêt de ces études pour la gestion des systèmes d'endiguement et au-delà

La réalisation d'une analyse de risque comparant le niveau de risque d'un système dans son état actuel et dans un état après travaux (de confortement ou de modification en profondeur) permet, éventuellement couplée à une analyse Coûts-Bénéfices (ACB) [10] et/ou à une analyse Multi-Critères (AMC), est un puissant outil d'aide à la décision et permet de justifier la réalisation d'un projet ou programme de travaux ou encore de choisir entre différentes options techniques [4]. La création d'un système d'endiguement pour un secteur jusqu'alors dépourvu de protection peut également être analysée par la même démarche incluant analyse de risque, ACB et AMC.

Au-delà de la conception ou de la réalisation de travaux, l'analyse de risque est également, pour le gestionnaire d'un système d'endiguement, un outil d'aide à la décision dans le cadre général de la gestion patrimoniale de ses ouvrages,

considérés comme une infrastructure³ [14]. Elle permet de décider de nécessaires actions d'entretien, de diagnostic, voire de mesures d'urgence. La figure 5 [25], présente un logigramme liant décisions et résultats de diagnostics et d'analyse de risque.

Au-delà du questionnaire du système d'endiguement, l'analyse de risque peut également aider à quantifier la réduction de risque apportée par une mesure prise dans le milieu eau ou dans la zone protégée, comme la mise en place d'épis, l'organisation d'un système de veille et d'alerte hydrométéorologique, l'alerte et la mise en sécurité des populations ou encore la diminution de la vulnérabilité des biens et personnes en zone inondable protégée. L'efficacité de toute mesure de gestion ou de réduction du risque d'inondation peut potentiellement être analysée, pour autant que cette mesure ait été identifiée et son efficacité estimée dans le processus d'analyse de risque, au sein d'une ou plusieurs études élémentaires. Ces estimations sont aujourd'hui en grande partie basées sur des analyses expertes, mais des recherches se poursuivent dans de nombreux pays, dans tous les domaines liés au risque inondation, pour mieux comprendre et estimer tous les facteurs influant sur le risque, par exemple, l'analyse des conséquences d'une inondation en termes humain et social ou encore l'efficacité des mesures d'évacuation [6]. L'identification des actions nécessaires est facilitée par l'intégration du maximum d'information de tous ordres comme données d'entrées de l'analyse de risque. Une analyse différentielle des effets des mesures permet d'aider à choisir les plus efficaces.

Les résultats de l'analyse de risque peuvent également être utilisés directement, en termes de connaissance ou de communication du risque. Par exemple, les scénarios d'inondation modélisés peuvent être utiles aux autorités et services chargés de la sécurité des populations et de la gestion de crise (maire, préfet, services de secours principalement). Lors d'une inondation par dépassement ou défaillance d'un système de protection, la disponibilité de résultats de modélisations hydrauliques sur des scénarios similaires donnera des informations en termes de hauteurs et vitesses de l'eau, de temps d'arrivée et de vitesse de montée, importantes pour planifier et organiser les secours. En amont de la crise, les informations issues de l'analyse de risque peuvent aider à mettre à jour les plans de gestion de crise, PCS [2] ou plans ORSEC.

Dans le contexte actuel de l'introduction de la compétence GEMAPI, les gestionnaires doivent définir dans un acte administratif (demande d'autorisation) et justifier sur la base de l'Étude de Dangers : le système d'endiguement, le niveau de protection et la zone protégée.

³ Les digues et ouvrages de protection contre les inondations, étant désormais considérés comme des infrastructures publiques, au même titre que les réseaux de transport, d'eau, d'énergie...

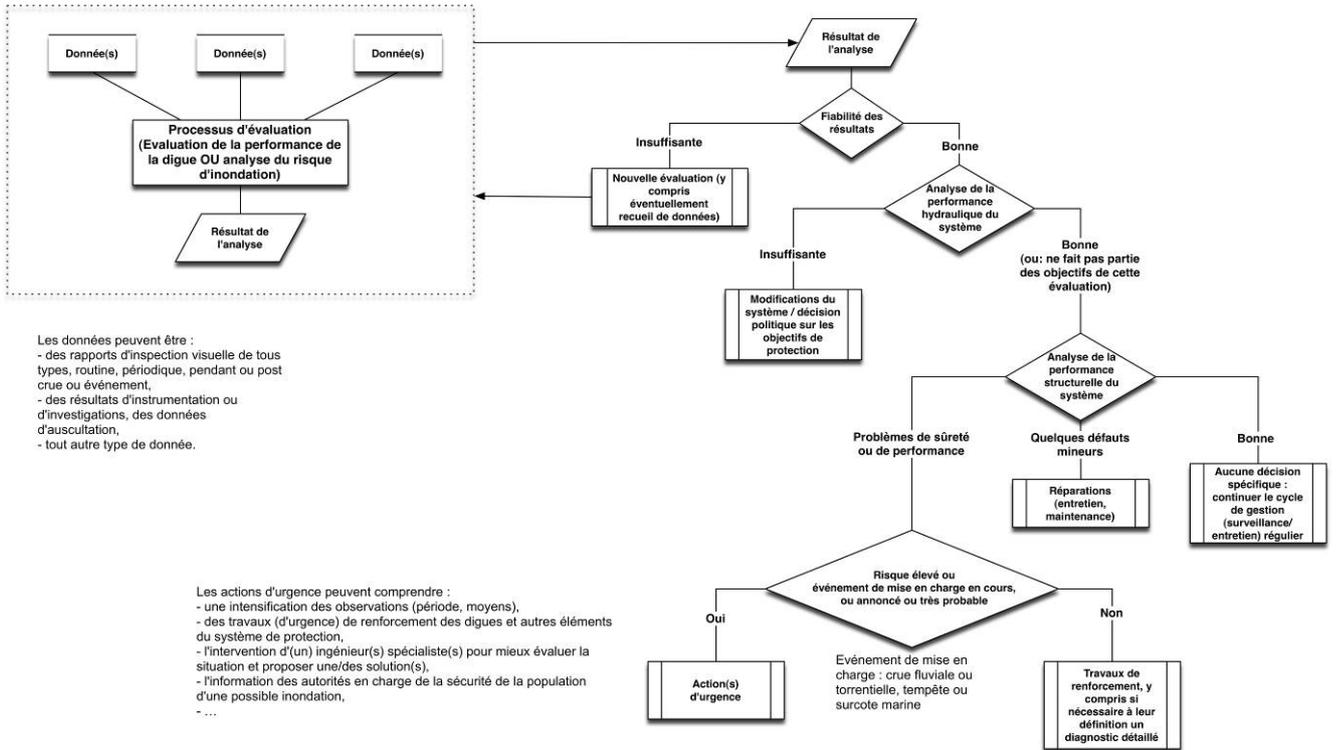


FIGURE 5 : ÉVALUATION DU RISQUE ET AIDE A LA DECISION POUR LES GESTIONNAIRES DE DIGUES [25]

Ce niveau de protection "administratif" n'est pas forcément strictement égal au niveau de protection "technique" présenté plus haut, et le gestionnaire GEMAPI a une certaine liberté sur sa définition. L'analyse de risque donne au gestionnaire tous les critères lui permettant de prendre cette décision. Nous soulignons néanmoins l'existence d'un biais possible si le niveau de protection est trop bas par rapport au niveau de la crête des ouvrages et que le gestionnaire se contente de fixer un niveau de protection inférieur ou égal au niveau de sûreté sans modifier les ouvrages ; en effet, dans ce cas un risque de rupture avec des conséquences potentiellement catastrophiques aura été identifié. Pour pallier ce risque il faut soit abaisser le niveau de crête des ouvrages pour éviter leur mise en charge au-delà du niveau de sûreté, soit les renforcer pour que le niveau de sûreté soit plus élevé (on pourra alors également relever le niveau de protection).

Conclusions

Les EdD de système d'endiguement, et plus généralement leur analyse de risque, participent d'une meilleure connaissance de ces systèmes et du risque d'inondation

résiduel (par dépassement, contournement ou défaillance) de la zone protégée. Ces études permettent une amélioration continue des systèmes et de leur gestion, et en parallèle, associées avec un système pérenne de gestion des informations, une amélioration continue des connaissances et de l'analyse de risque elle-même.

Nous espérons avoir, avec nos travaux, 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 du 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 toute 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.

Au niveau international, 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 des ouvrages hydrauliques, est de plus en plus répandue [7] 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. Le cadre général de l'analyse de risque étant bien défini et communément accepté, les collaborations au sein de cette communauté permettront, de faire progresser les méthodes spécifiques à telle ou telle étude élémentaire [23]. In fine, l'analyse de risque d'un système d'endiguement intègre potentiellement toutes les données pouvant avoir une influence sur le risque inondation, qu'elles concernent le milieu eau, les ouvrages de protection ou la zone protégée. La complexité potentielle d'une telle analyse et à pondérer par le fait que le raffinement peut (doit...) être progressif. Sur les ouvrages eux-mêmes (digues et autres), les connaissances sur les mécanismes et scénarios de défaillance sont également en amélioration, suite à de nombreux travaux de recherche en géomécanique ou en génie civil. Ceci permet, avec les avancées dans le domaine des méthodes de reconnaissance ou d'auscultation, une amélioration du diagnostic des ouvrages, celui-ci étant une des étapes essentielles de l'analyse de risque des systèmes.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des personnes et organismes, trop nombreux pour être cités ici, avec qui ils ont collaboré ou même simplement échangé sur ce sujet passionnant et qui ont permis la formalisation des concepts présentés ici et développés dans le guide. Des remerciements particuliers vont aux gestionnaires de digues et bureaux d'études qui ont pu appliquer, faire appliquer ou proposer de faire appliquer cette méthodologie.

Références

- [1] Ciria, MEDDE (Ministère de l'Ecologie du Développement durable et de l'Energie), USACE (US Army Corps of Engineers). (2013). *The International Levee Handbook*. CIRIA, London (ISBN: 978-0-86017-734-0).
- [2] Beullac, B., Tourment, R., Maurin, J. – (2015). *Les études de dangers de digues de protection contre les inondations*. Plan communaux de sauvegarde et outils de gestion de crise, Géorisques n°6, Sous la direction de Frédéric Léone et Freddy Vinet, Presses universitaires de la Méditerranée, Presses universitaires de la Méditerranée, pp.85-90
- [3] Cerema, Irstea, MTEs. (2018). *Étude de dangers de systèmes d'endiguement Concepts et principes de réalisation des études*. CEREMA, 2018, 62 p.
- [4] Cheetham, M., Tourment, R., Pelt, P. – (2016). *Risk assessment and economic appraisal of protection methods for the Tarascon-Arles railway embankment*. 3rd European Conference on Flood Risk Management FLOODrisk 2016 17/10/2016-21/10/2016, Lyon, FRA. E3S Web Conf. Volume 7, 2016. 3rd European Conference on Flood Risk Management (FLOODrisk 2016). 8 p.
- [5] CIGB ICOLD (2005). *Risk Assessment in Dam Safety Management: A Reconnaissance of Benefits, Methods and Current Applications*. ICOLD Bulletin 130. International Commission on Large Dams.
- [6] Crosby, W. et al. (2018). *U.S. Army Corps of Engineers modeling, mapping, & consequence production center processes for levee breach analysis* - Commission Internationale des Grands Barrages, Vingt Sixième Congrès, Vienne, Juillet 2018, Q103, R7, 18 p.
- [7] Den Heijer, F and Diermanse, F.L.M. (2012). *Towards risk-based assessment of flood defences in the Netherlands: an operational framework*, proceedings of the FloodRisk2012 conference in Rotterdam, November 2012
- [8] Deniaud, Y., Van Hemert, H., Mcvicker, J., Bernard, A., Beullac, B., Tourment, R. (2013). *Chapter 3 Functions, forms and failure of levees*. In: The International Levee Handbook. CIRIA, London, pp. 49-178.
- [9] Félix, H., Beullac, B., Tourment, R., Mériaux, P., Peyras, L. (2011). - *Méthodologie pour l'analyse fonctionnelle des ouvrages hydrauliques à grand linéaire*. CFBR / AFEID, Etudes de dangers.
- [10] Grelot, F., Bailly, J.S., Blanc, C., Erdlenbruche, K., Mériaux, P., Saint Geours, N., Tourment, R. (2008). *Sensibilité d'une analyse coût-bénéfice. Enseignements pour l'évaluation des projets d'atténuation des inondations*. Ingénieries - E A T, n° spécial La prévention des inondations. Aspects techniques et économiques des aménagements de ralentissement dynamique des crues, pp. 95-108
- [11] Mallet T., Degoutte G., Royet P. (2013). *Niveaux de protection, de sûreté et de danger pour les digues fluviales : définitions, conséquences et responsabilités*. 2nd colloque national – Digues2013, MEDDTL / CFBR / Irstea, Digues Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions, Aix-en-Provence, 2013, pp. 42-50.
- [12] 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*. Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions - 2ème colloque national - Digues2013 12/06/2013-14/06/2013, Aix-en-Provence, FRA. Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions - 2e colloque national - Digues2013. Coord. : Paul Royet ; Stéphane Bonelli. pp. 209-216
- [13] Modarres, M. (1993). *What every engineer should know about reliability and risk analysis*. Marcel Dekker Publisher, Inc., New York.
- [14] Nafi, A., Tourment, R. (2016). *Gestion patrimoniale : pilotage par la performance dans une optique de durabilité du service*. Sciences Eaux et Territoires, n° 20, 70-77
- [15] Paquier, A. (2010). *Failure of a Dike in a Flood Environment (Agly 1999)*, in *Practical Applications in Engineering*, Volume 4 (ed J.-M. Tanguy), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9781118557792.ch10
- [16] Paquier, A. (2015). *Comparison of three methods assessing the inundation caused by the erosion of an embankment*, La Houille Blanche, n° 4, 2015, p. 32-38, DOI 10.1051/lhb/20150043
- [17] Peyras, L., Royet, P., Boissier, D. (2006) *Dam Ageing Diagnosis and Risk Analysis: Development of Methods to Support Expert Judgment*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 43, 2006, pp. 169-186.
- [18] Royet P., Degoutte G., Peyras L., Lavabre J., Lempérière F. (2009). *Cotes et crues de protection, de sûreté et danger de rupture*. Colloque CFBR-SHF « Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues »
- [19] Samuels, P.G., Morris, M.W., Sayers, P., Creutin, J-D., Kortenhaus, A., Klijn, F., Mosselman, E., Van OS, A., Schanze, J. (2008). *Advances in flood risk management from the FLOODsite project*. In: Flood Risk Management: Research and Practice – Samuels et al. (eds) 2009 Taylors & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48507-4. pp.433-443
- [20] Simm, J.D., Wallis, M., Smith, P., Deniaud, Y., Tourment, R., Veylon, G., Durand, E., McVicker, J., Hersh-Burdick, R., Glerum, J. (2012). *The significance of failure modes in the design and management of*

levees - a perspective from the International Levee Handbook team. In FloodRisk 2012 - 2nd European Conference on FloodriskManagement. Rotterdam, Netherlands, 20th-22nd November 2012. Klijn & Schweckendiek (eds) © 2013 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62144-1.

- [21] TOURMENT, R., BEULLAC, B., (coord.), (2018), *Inondations : analyse de risque des systèmes de protection - Application aux études de dangers.* Editions Lavoisier, 2018
- [22] Tourment R., Beullac B., Degoutte G. (2015) - Etudes de dangers des systèmes de protection contre les inondations : une méthode d'analyse de la défaillance – La Houille Blanche, n°1, 41-55, 15p. DOI 10.1051/lhb/2015006.
- [23] Tourment R., Beullac B., de Leeuw A. *et al.* (2016) *The risk analysis of levee systems: a comparison of international best practices*, 3rd European Conference on Flood Risk Management, Flood Risk, Lyon, 17 October 2016, DOI: 10.1051/e3sconf/20160703009, 2016.
- [24] 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.* 2nd colloque national – Dignes2013, MEDDTL / CFBR / Irstea, Dignes Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions, Aix-en-Provence, pp. 288-297.
- [25] Tourment, R., Van Hemert, H., Neutz, C., Wallis, M., Beullac, B., Bradner, G., Raschker, S. (2013) *Chapter 5 Levee Inspection, Assessment and Risk Attribution.* In: The International Levee Handbook. CIRIA, London, pp. 299-394.
- [26] Maurin, J., Boulay, A., Tourment, T., Beullac, B., (2012). *Étude de dangers de la levée d'Orléans digues de classe A.* Dreal Centre SLBLB - 2012, Département études et travaux Loire, 244 p.