

ENSEIGNEMENTS POUR L'ETUDE DU COMPORTEMENT DES BARRAGES EN REMBLAIS, DU RETOUR D'EXPERIENCE ACCIDENTOLOGIQUE ET INCIDENTOLOGIQUE LIES AUX MECANISMES D'EROSION INTERNE

Lessons learnt for safety analysis from internal erosion accidents and incidents on embankment dams

Nicolas LEBRUN, Olivier BORY, Jean-Robert COURIVAUD
EDF CIH, 4, allée du Lac de Tignes 73290 La Motte Servolex

nicolas-nicolas-jean-claude.lebrun@edf.fr ; olivier.bory@edf.fr ; jean-robert.courivaud@edf.fr

Alexius VOGEL

RISK ASSESSMENT- RAI, Vienne, Autriche
vogel@risk-assessment.at

MOTS CLEFS

barrage en remblai, érosion interne, retour d'expérience, accident, étude de sûreté

KEY WORDS

embankment, internal erosion, feedback accident, safety analysis

RÉSUMÉ

Le présent article se base sur l'analyse du retour d'expérience d'accidents et d'incidents liés à l'érosion interne, et permet de contribuer à la caractérisation de ces mécanismes, fournissant des enseignements pour les études de sûreté des barrages en remblais. Les analyses d'une base de données des cas de ruptures mondiaux a conduit, entre autres, à l'établissement d'un logigramme des scénarios de rupture des barrages en remblais par érosion interne. L'étude d'incidents survenus sur le parc de EDF, permet de mettre en lumière l'incidence favorable d'une structure résistante, présente sur le chemin d'érosion, vis-à-vis de la cinétique des phénomènes, et de l'efficacité de la barrière surveillance/intervention.

ABSTRACT

The present article is based on the analysis of lessons learnt from accidents and incidents related to internal erosion, to contribute to the characterization of these mechanisms, providing lessons for embankment dam safety studies. Analyses of a database of worldwide failure cases led, among other things, to the establishment of a chart of internal erosion failure scenarios for embankment dams. A study of incidents that have occurred on EDF dams has highlighted the positive impact of a resistant structure in the erosion path on the kinetics of the phenomena, and the effectiveness of the detection/intervention barrier.

1. CONTEXTE

L'analyse du retour d'expérience des accidents et des incidents survenus sur les barrages en remblais est fondamentale pour l'identification des mécanismes et des scénarios pouvant conduire ce type d'ouvrage à la rupture. Cette connaissance peut en particulier être valorisée dans le cadre des analyses de risques réalisées pour les études de dangers. Ce constat général, s'applique pleinement en ce qui concerne les mécanismes d'érosion interne, qui sont à l'origine d'environ 40% des cas de rupture de grands barrages en remblais [1].

Le présent article s'attache à décrire les enseignements qui peuvent être tirés, en ce qui concerne les analyses de sûreté des barrages en remblais, du retour d'expérience accidentologique et incidentologique, lié aux mécanismes d'érosion interne à partir de deux approches différentes et complémentaires :

- l'analyse des scénarios généraux de rupture des barrages en remblais, réalisée à partir des informations contenues dans une base de données comprenant de très nombreux cas de rupture ou de quasi rupture à l'échelle mondiale, développée depuis plus de 10 ans par RAI AUSTRIA et EDF ;
- l'analyse d'incidents survenus sur le parc de EDF, en lien avec un mécanisme commun spécifique.

2. ANALYSE DU REX ACCIDENTOLOGIQUE ET INCIDENTOLOGIQUE MONDIAL

2.1. Présentation de la base de données

La base de données [2] est développée depuis 2013 par Risk Assessment RAI et EDF et concerne les ruptures et incidents majeurs survenus sur les barrages à travers le monde. Elle regroupe à ce jour environ 500 cas, dont 350 de barrages en remblais. Plus de 3000 documents de nature variée (articles scientifiques, rapports d'expertise, articles de journaux...) concernent ces événements, anciens ou récents.

Avant son intégration à la base de données, la fiabilité de chaque document est vérifiée et celui-ci est analysé. Il est ensuite référencé et archivé au format PDF.

Pour chaque nouveau cas de rupture, une première étape consiste en une recherche internet sur les sites d'informations afin de confirmer l'événement et collecter les premières données le concernant. La seconde étape consiste à rechercher, sur internet et dans des bibliothèques de documents internationales, des publications contenant des données techniques sur l'accident. Enfin, après 1 ou 2 ans, une nouvelle recherche de rapports d'investigations et d'analyses est réalisée.

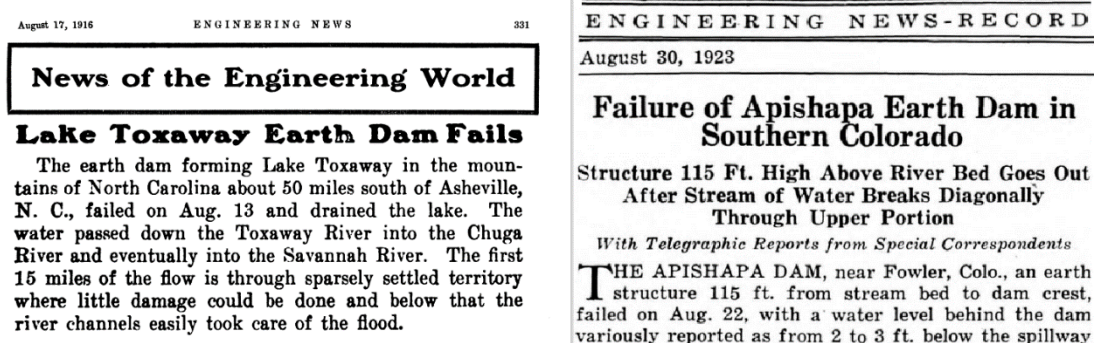


Figure 1 : Extraits de documents contenus dans [2]

Environ 110 cas de rupture (ou quasi rupture) par érosion interne sont recensés dans cette base de données et font l'objet des analyses présentées dans le présent article.

2.2. Liste des barrages étudiés

Nom du barrage	Rupture	Code(1)	Autre info. (2)	Nom du barrage	Rupture	Code(1)	Autre info. (2)	Nom du barrage	Rupture	Code(1)	Autre info. (2)
Aiai-ike	1905	NA		Fred Burr	1948	NA		Morwell fire service reservoir	1968	100	
Alto Pass reservoir	1965	100		French landing	1925	100	FC	Mud Pond	1886	NA	
Anaconda	1938	NA		Frenchman Creek	1952	100		Nishinotani Ike	2011 et 2016	NA	
Anita	1997	100		Gararda	2010	100		Otago 3	2011 et 2016	100	
Annapolis maul	1993	100		Graham Lake	1923	NA		Patel Milmet Dam	2018	1011	
Apertadinho	2008	100		Greenlick (Scottsdale)	1904	110		Piketberg	1986	100	
Apishapa	1923	100		Handlock pond	2005	1000	T	Pleasant valley (Scotfield)	1928	100	
Artik	1994	1100	FC	Happy Hollow	2019	NA		Poolburn farm (Otago 1)	2015	100	
Avalon 2	1904	1111		Hatchtown	1914	1011	T	Portlang (Munjoy hill reservoir)	1893	100	
Baldwin hills	1963	1110		Hebron	1914	NA		Prospect	1980	1000	T
Beaver lake dam	1983	NA		Horse Creek	1914	100		Quail creek dike	1989	110	FC
Beldon Pond lake dam	1999	NA		Ibra	1975	110		Ravensthorpe	1955	1111	
Beloeil	1985	1100	FC	Ivanovo	2012	1011		San Juan reservoir	2001	110	FC
Bent tree dam	1999	NA		Jackson Buff	1957	1100	C	Santa Helena	1985	1111	
Big Bay	2004	1110		Jennings Creek watershed n°16	1964	100	FC	Sardoba	2020	100	
Bischel	1988	NA		Jennings Creek watershed n°3	1963	100	FC	Sheep creek	1970	100	
Black rock (Zuni)	1908	100	FC	Julesburg (Jumbo)	1910	1111	FC	Smartt Syndicate	1961	1000	T
Blairtown	1888	NA		Kelly Barnes	1977	1011	C	Snake ravine	1898	110	C
Boyd	1995	1011		Kondinin	1928	100		Sparmos	2016	1111	
Brown Bridge	2012	1000	T	Kukerin	?	100		Spioenkop (Kruin)	1994	1001	
Bullock draw dyke	1971	NA		La Escondida	1972	100		Stockton creek	1950	100	
Campbelltown golf house	1974	NA		La Laguna	1969	1100	FC	Swift No2	2002	1100	FC
Caulk Lake	1973	NA	C	Lake Francis 1	1899	100		Swinehopdehead dam	1964	1011	
Cedar Lake	1986	1100		Lake Grace	1958	100		Table rock cave	1927	110	
Centennial Narrows Dam	1997	1011		Lake Latonka	1966	NA		Tacoma	1892	100	
Colorado Springs	1912	1100	C	Lake Toxaway	1916	1100	FC	Takayama ike	2011	1100	C
Corpus Cristi	1930	100		Lawn Lake	1982	1011		Terrace	1957	1110	C
Cristal lake	1961	NA		Little deer creek	1963	NA		Teton	1976	100	
Crump reservoir	1980	NA		Liveringa	1957	100		Tivare	2019	1011	
CSC Orchards Frost	1995	100		Long Tom	1916	1000	T	Toreson	1953	1001	
Dalton	1912	100		Lyman	1915	0		Tupelo bayou site 1	1973	100	
Davis (Turlock lake)	1914	111		Manuelote	2010	1111		Turkey Creek	1910	NA	
Dennery lake	2005	1011		Masterson	1951	100		Upper Kohanza (Danbury)	1869	NA	
East Liverpool	1901	100		Meadow pont	1995	100		Upper Shelton	1930	1011	
Emery	1966	1011		Melville	1909	111		Wadi Qattarah (Gattarah)	1977	100	
Empire CO	1909	100		Mohawk 2	1915	110		Washington county	1962	100	
Fontenelle	1965	110		Morasuap	2019	NA					

(1) cf. §2.4, NA = Non analysé, faute de données suffisantes

(2) FC= fondation complexe cf. §2.5.1, T=rupture suite à travaux cf. §2.5.2, C=rupture probable en cisaillement cf. §2.5.3

2.3. Principes d'analyse

Le travail réalisé se base, pour chacun des cas de rupture, sur la lecture et l'analyse des documents contenus dans la base de données et vise à déterminer le scénario qui s'est déroulé depuis la construction de l'ouvrage jusqu'à sa rupture. Dans un premier temps, les critères suivantes sont déterminés :

- Age de l'ouvrage, depuis sa mise en eau, lors de la rupture : $<$ ou $>$ à 5 ans.
- Existence ou non d'un défaut de conception (ou de réalisation) critique : sont considérés comme critique, les défauts qui à eux seuls peuvent expliquer la rupture, ou qui sont largement prépondérants dans les causes de la rupture. L'absence d'un filtre conforme aux règles de l'art n'est pas considérée comme une erreur critique. L'efficacité de cette barrière, mise en lumière par le travail de REX du projet ERINOH [4], n'est pas analysée dans le présent article.
- Existence ou non d'au moins un signe précurseur majeur : sont considérés comme majeurs les signes précurseurs évidents survenus suffisamment longtemps avant la rupture (au moins plusieurs mois). Du point de vue de l'exploitant du barrage, les signes précurseurs majeurs auraient permis, pour une exploitation (surveillance, auscultation, maintenance, conduite) conforme aux règles de l'art actuelles, de déclencher des actions conduisant à une mise en sécurité de l'ouvrage et éviter la rupture.
- Existence ou non d'au moins un défaut de maintenance : les défauts de maintenance correspondent aux cas d'ouvrages abandonnés ou ayant fait l'objet d'une surveillance et/ou d'une maintenance manifestement insuffisante.

Finalement, les ouvrages sont caractérisés suivant 4 critères, ce qui conduit à les regrouper selon 16 (2^4) scénarios différents.

Outre la définition de ces scénarios, les informations complémentaires suivantes sont recensées : mode et mécanisme de rupture principal le plus probable, événement initiateur de la rupture (mise en eau, crue, travaux, vieillissement etc.), nature des signes précurseurs, nature des défauts de conception.

2.4. Scénarios de rupture

Chacun des 16 scénarios est représenté par un code binaire à 4 chiffres, renvoyant dans l'ordre aux 4 critères décrits au §2.2 : [âge depuis la mise en eau à la rupture : 0 si ≤ 5 ans, 1 sinon]&[Erreur critique de conception ou de réalisation : 0 si aucune identifiée, 1 sinon]&[Signe précurseur majeur : 0 si aucun identifié, 1 sinon]&[Défaut de maintenance : 0 si non identifié, 1 sinon].

Pour 87 ouvrages, les informations disponibles ont permis de déterminer le scénario de rupture :

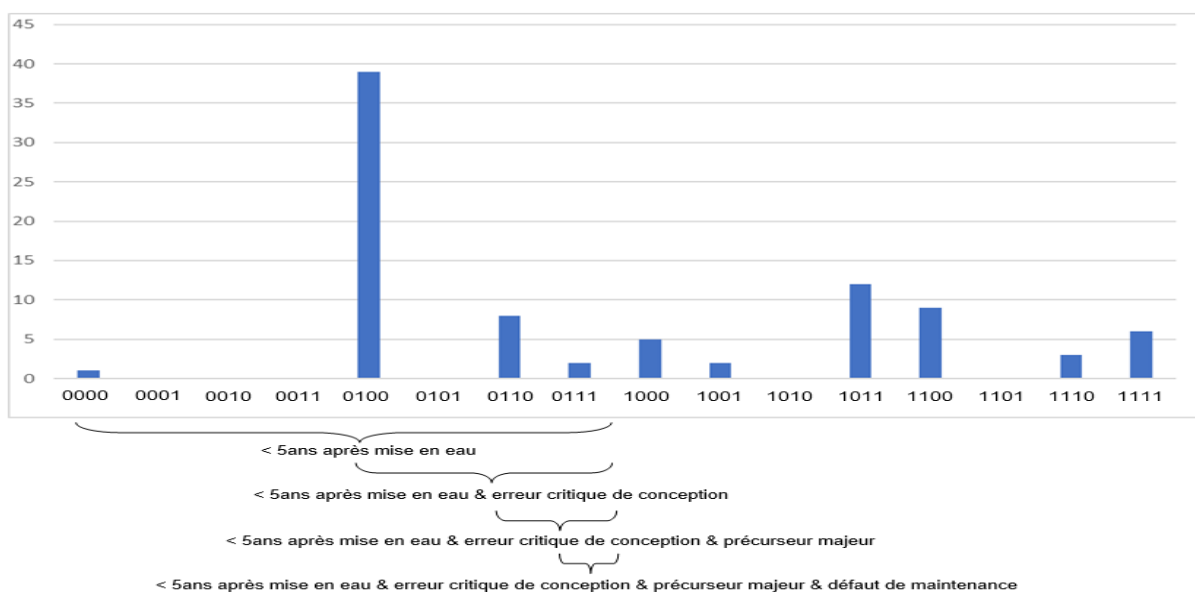


Figure 2 : nombre de cas par scénario de rupture

Les occurrences des scénarios sont très différentes (entre 39 et 0 cas). Certains scénarios correspondant à un nombre significatif de cas de rupture peuvent être détaillés :

0100 : rupture moins de 5 ans après la mise en eau d'un ouvrage présentant un défaut critique de conception ou de réalisation, sans signe précurseur majeur ni défaut de maintenance (39 cas) : ce scénario correspond au cas d'ouvrages présentant une conception ou une réalisation inadaptée et ayant rompu très majoritairement consécutivement à leur mise en eau (34 sur 39 cas). Le scénario « 0110 » (8 cas) regroupe des ouvrages à l'histoire similaire.

1011 : rupture après plus de 5 ans d'un ouvrage ne présentant pas de défaut critique de conception ou de réalisation, avec au moins signe précurseur majeur et défaut de maintenance (12 cas) : ce scénario correspond à des cas où la rupture est notablement due à un défaut de surveillance et/ou maintenance. Le scénario « 1111 » (6 cas) regroupe des ouvrages à l'histoire similaire.

1100 : rupture après plus de 5 ans d'un ouvrage présentant au moins un défaut critique de conception ou de réalisation, sans un signe précurseur majeur ni de défaut de maintenance (9 cas) : ces cas de rupture sont potentiellement problématiques pour l'exploitant de barrages en remblais, car l'absence de signe précurseur et de défaut de maintenance avéré implique qu'ils sont difficiles à anticiper. La majorité de ces cas (6) correspond à des ruptures dans des fondations qualifiées de complexes. Les 3 autres cas correspondent à des mécanismes de ruptures ayant probablement mis en jeu ces mécanismes de cisaillement en situation de crue et précipitations importantes.

1000 : rupture après plus de 5 ans d'un ouvrage ne présentant pas de défaut critique de conception ou de réalisation, ni signe précurseur majeur ou défaut de maintenance (5 cas) : les 5 ouvrages concernés ont rompu consécutivement à des travaux. Ces cas sont riches d'enseignement, puisque ces ouvrages se comportaient a priori correctement et c'est une intervention sur ceux-ci qui les a conduit à la rupture.

1110 : rupture après plus de 5 ans d'un ouvrage présentant au moins un défaut critique de conception ou de réalisation, au moins un signe précurseur majeur mais pas de défaut de maintenance (3 cas) : les ouvrages concernés étaient fortement pathologiques et ont fini par rompre malgré des travaux de maintenance importants. Ils montrent que pour des ouvrages présentant des défauts de conception majeurs et fortement pathologiques, la maintenance peut ne pas être une parade suffisante, dans de rares cas.

2.5. Analyses complémentaires spécifiques

L'analyse des scénarios de rupture fait apparaître des caractéristiques communes aux ouvrages d'un même scénario, conduisant à ces analyses complémentaires.

2.5.1. Ouvrages présentant une fondation ou un appui géologiquement complexe

Sont considérées comme complexes, les fondations ou les appuis présentant à grande échelle une bonne résistance mécanique et une faible perméabilité, mais une grande variabilité de ces paramètres selon une distribution les rendant très difficile, voire impossible, à cartographier même ou détecter.

Les matériaux concernés sont divers : roche fracturée ou à conduits (basaltes ou karst), imbrication complexe de sols hétérogènes (tuffs volcaniques etc.), rochers altérés (grès), matériaux solubles (gypses).



Figure 3 : gauche : Swift n°2 (USA), conduit basaltique / droite : Quail Creek (USA), roche stratifiée avec gypse [2]

Les fondations géologiquement complexes semblent susceptibles de causer des ruptures d'ouvrage à court mais aussi, compte-tenu de leur potentiel évolutif par dissolution ou érosion, à long terme sans signe précurseur majeur, ni défaut de maintenance. 12 cas d'ouvrages pour lesquelles une fondation géologiquement complexe a joué un rôle important dans la rupture ont été identifiés, dont 6 plus de 5 ans après la mise en eau.

2.5.2. Rupture consécutive à des travaux

Six cas de rupture consécutive à des travaux ont été identifiés. Les travaux avaient pour objectif la sûreté (3), l'exploitation (2) ou la déconstruction (1). La rupture s'est produite entre 5 ans et quelques jours après les travaux, pour des ouvrages qui, pour 5 d'entre eux, n'avaient pas connu de désordres majeurs avant les travaux.

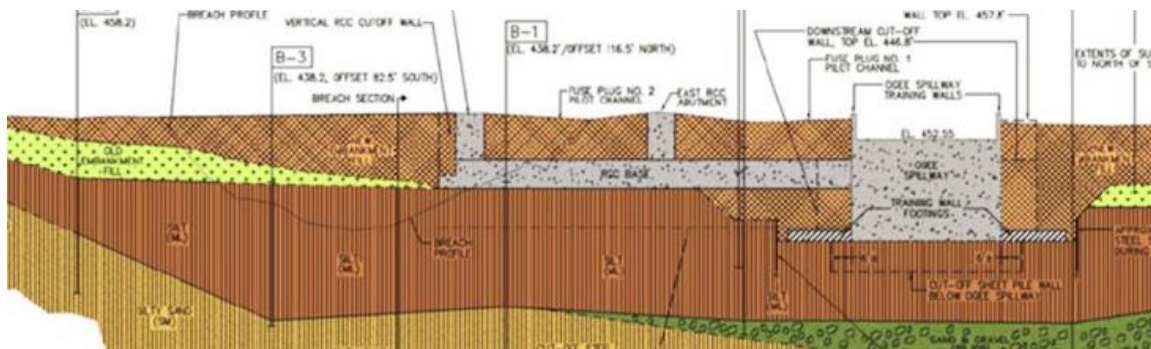


Figure 4 évacuateur de crue secondaire du barrage de Hadlock pond (USA), ayant causé la rupture 3 mois après construction [2]

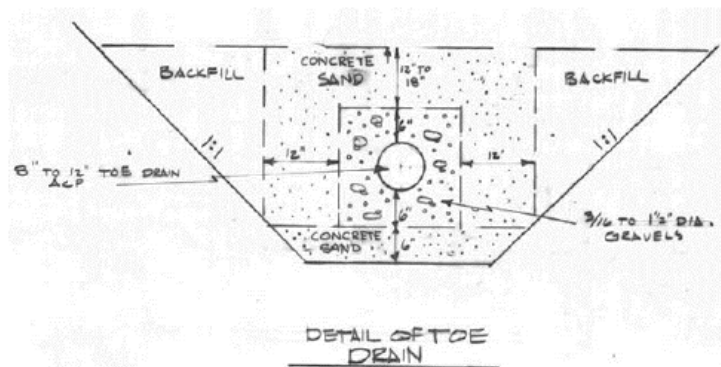


Figure 5 drain de pied aval du barrage de Prospect (USA), ayant causé la rupture 5 ans après sa mise en œuvre [2]

Ces observations conduisent à conclure que la réalisation de travaux sur un ouvrage en exploitation peut conduire à des opérations potentiellement sensibles du point de vue du risque érosion interne. Elles doivent donc être associées à une analyse de risque de sûreté, aussi bien pour la phase provisoire de réalisation des travaux, que pour la phase définitive de vie de l'ouvrage modifié.

2.5.3. Ouvrages pour lesquels le cisaillement est possiblement le mode principal de rupture

Pour 7 cas, la réanalyse de la rupture, conduit à penser, que le cisaillement a en réalité pu être le mécanisme majeur ayant conduit à la rupture. La rupture en cisaillement a pu être causée en partie par une diminution de la succion, suite à une hausse de la saturation de l'ouvrage et/ou être caractéristique du phénomène de liquéfaction statique. Les paramètres suivants apparaissent de manière récurrente dans les scénarios de rupture et confortent l'hypothèse d'une rupture par cisaillement :

- ouvrage présentant des remblais lâches (au moins 4 cas sur 7)
- précipitations importantes avant la rupture (au moins 4 cas sur 7)
- rupture rapide sans signe précurseur majeur (au moins 4 cas sur 7)

Pour le dernier point, les analyses développées dans le présent article, montrent que pour des ouvrages assez anciens, la rupture rapide par érosion sans signe précurseur majeur n'est pas un scénario commun et concernent principalement la fondation. Ce constat conforte également l'hypothèse d'une rupture par cisaillement pour les différents ouvrages évoqués dans ce paragraphe.

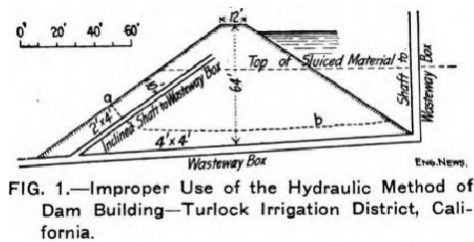


Figure 6 : gauche : barrage de Snake Ravine (USA), ouvrage en remblais hydrauliques ayant rompu brutalement à la mise en eau / droite : barrage de Takayama Ike (Japon), rupture rapide consécutive à des précipitations exceptionnelles, associée au mécanisme d'érosion régressive de talus aval (mixte cisaillement-érosion interne) [2]

2.6. Logigramme des cas de rupture

Sur la base des analyses développées précédemment, il est possible de placer le scénario de 87 cas de rupture de barrages en remblais, référencé par érosion interne dans la base Risk Assessment RAI-EDF, selon le logigramme suivant (pour les cas restants, trop peu d'informations sont disponibles) :

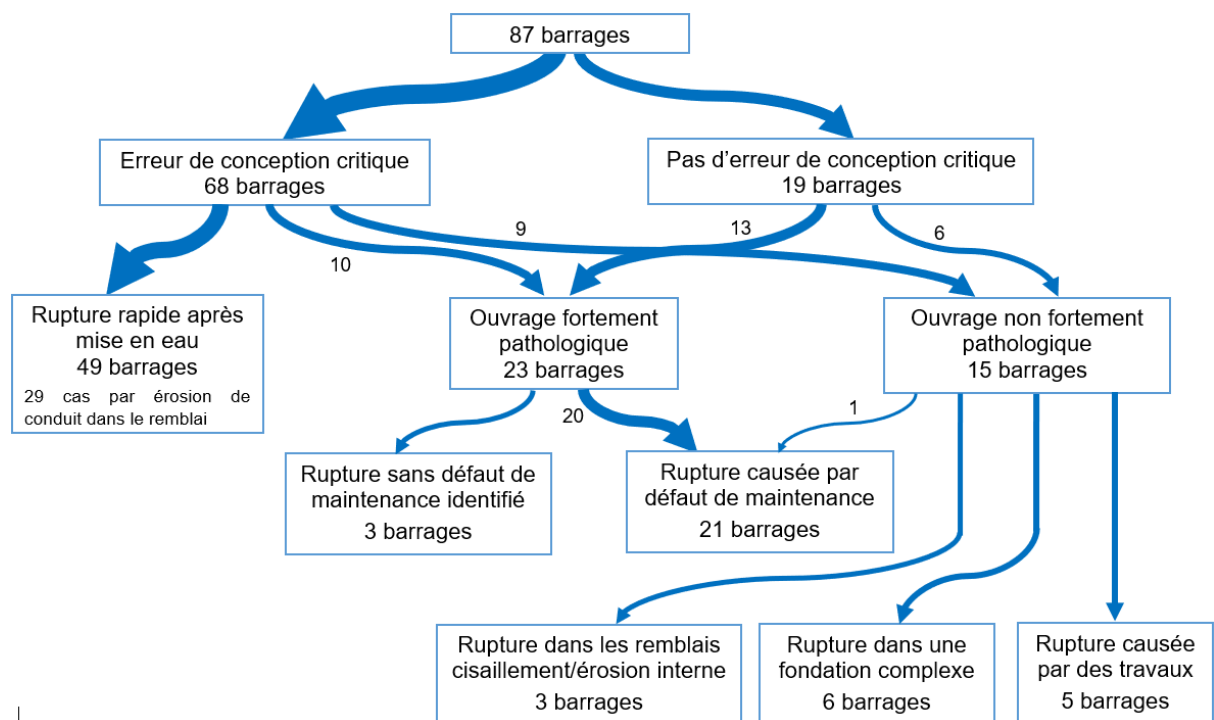


Figure 7 : logigramme de 87 cas de rupture

Sur la base de ce logigramme, il est possible de constater que les cas de ruptures d'ouvrages âgés de plus de 5 ans après leur mise en eau, non fortement pathologiques et exploités conformément aux règles de l'art actuelles, correspondent à au plus 20% des cas de ruptures. Parmi ces cas (14 au total), 5 ont subi une rupture consécutive à des travaux, 6 ont connu une rupture dans une fondation géologiquement complexe et pour 3 d'entre eux, le cisaillement plutôt que l'érosion interne est le mécanisme de rupture principal probable. Ces 14 cas correspondent donc à des spécificités discutées dans le présent article.

L'importance de l'analyse comportementale dans les études de sûreté apparaît également. En effet, environ 60% des ruptures à long terme concernaient des ouvrages fortement pathologiques. Cette analyse fournit évidemment des informations directes sur les situations déjà vécues par l'ouvrage. Mais il apparaît possible de considérer qu'elle fournit, dans une certaine mesure, également des informations sur le risque de rupture pour

des situations projetées et non vécues par l'ouvrage jusque-là, et notamment en crue. En effet les ruptures d'ouvrage sains, dont certaines se sont bien produites lors de crues ou d'épisodes combinant crue et précipitations intenses sur l'ouvrage (cette dernière situation s'applique en particulier aux 3 cas de rupture « mixtes cisaillement/érosion interne »), concernent très majoritairement des mécanismes et localisations spécifiques qui ont pu être identifiées.

En dehors de ces configurations, les ruptures en crue par érosion interne concernent donc en premier lieu des ouvrages déjà fortement pathologiques. Ce constat fait écho à la notion de « facteur d'inquiétude », pour les ouvrages ayant déjà subi des incidents, mentionnée dans [5].

3. ANALYSE D'INCIDENTS SURVENUS SUR LE PARC DE EDF QUANT A L'EFFICACITE DE LA SURVEILLANCE POUR LES MECANISMES D'EROSION RAPIDES

3.1. Principe de justification des barrages à l'érosion

Le Groupe de Travail CFBR « Erosion » a proposé dans le projet de rapport [3] un principe de justification de l'érosion basé sur une analyse des lignes de défense mobilisées pour lutter contre ces phénomènes :

- fonctions actives : évacuation, étanchéité, résistance, filtration, drainage, protection ;
- fonctions passives : surveillance (ou détection), intervention.

La méthodologie présentée invite à suivre sept étapes. Après le choix du niveau de détail de l'étude (étape 0), l'appropriation des données (étape 1), l'identification des profils et chemins potentiels d'érosion (étape 2), l'élaboration des modèles de l'ouvrage (étape 3), la définition des situations de projet (étape 4), l'ingénieur doit analyser l'état des différentes lignes de défense pour chaque chemin d'érosion et situation (étape 5). Puis une évaluation globale intégrant l'analyse comportementale peut être menée (étape 6), avant la synthèse de l'évaluation (étape 7).

3.2. Cas particulier de la ligne de défense « surveillance »

A l'étape 5 de l'analyse du risque d'érosion, l'ingénieur doit évaluer la présence et l'efficacité des lignes de défense de l'ouvrage, dont notamment la « surveillance ».

La ligne de défense « surveillance » comprend les examens visuels et leur analyse, les mesures d'auscultation et leur interprétation. Elle est pratiquée et adaptée aux différentes phases de vie de l'ouvrage : construction, première mise en eau, exploitation. Pour les examens visuels comme pour les mesures d'auscultation, la fréquence des observations et des mesures doit être adaptée à la cinétique des processus d'érosion redoutés.

Parmi les différents mécanismes d'érosion interne, deux sont réputés pour leur développement potentiellement rapide :

- l'érosion de conduit sans filtration ;
- l'érosion régressive dans certaines circonstances.

Pour se protéger de ces phénomènes, les lignes de défense passives sont les plus efficaces. L'analyse de l'efficacité de la surveillance est délicate à mener, car les cinétiques des mécanismes d'érosion rapides peuvent apparaître très supérieure aux vitesses de détection et d'intervention.

Les paragraphes suivants présentent et analysent plusieurs retours d'expérience afin d'apporter des éléments de réponse à la question : la surveillance peut-elle être efficace pour les mécanismes d'érosion rapides ?

3.3. Retours d'expérience sur l'efficacité de la barrière surveillance pour des mécanismes d'érosion rapides

Le parc de EDF a connu plusieurs événements qui, s'ils ont le plus souvent été loin de mener un ouvrage à la rupture, permettent de tirer des enseignements sur la cinétique et l'efficacité de la surveillance et des moyens de mise en sécurité d'un ouvrage (ligne de défense « intervention » : abaissement, confortement...).

- Canal de Sisteron – incident de Fontchaude (1980)

L'incident de « Fontchaude » est un incident majeur qui s'est produit sur le canal de Sisteron en 1980, soit 3 ans après la mise en eau. La conception du canal est la suivante : digues homogènes en remblai, avec un masque amont en béton bitumineux étanche, drainé en sous-face par un béton bitumineux drainant et un réseau de collecteur permettant une mesure de débit de fuite par tronçon.

Alors que le canal était en exploitation, l'augmentation du débit des drains sur la zone dite de « Fontchaude » a conduit l'exploitant à augmenter la fréquence des mesures (de bimensuelle à hebdomadaire, puis quotidienne) et des examens visuels. Le débit de fuite était passé le 01/07/1980 d'un débit très faible et stable (< 1 l/s), à des valeurs singulières (quelques 1 l/s) avec une tendance continue à la hausse, jusqu'au 02/10/1980, quand le débit a brutalement augmenté (quelques 10 l/s) et des venues d'eau importantes ont été observées dans les talus des digues en remblai. Un tassement était également visible en crête. Il a été alors décidé de mettre en sécurité le canal par un abaissement rapide du plan d'eau. Au cours de la vidange, un vortex a été observé sur le parement, laissant ensuite apparaître deux zones où le revêtement s'était effondré (Figure suivante). Le remblai et le masque ont été réparé, et le canal a pu être remis en service.

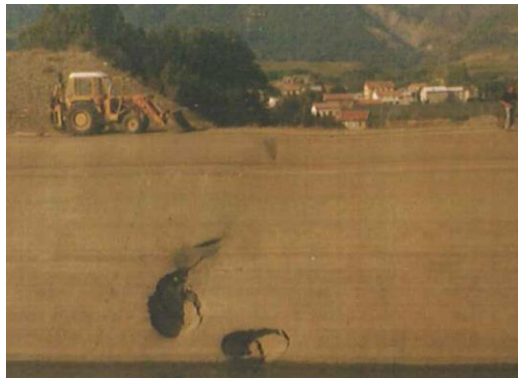


Figure 8 : Affaissement du masque en béton bitumineux lors de l'incident du Fontchaude en 1980 © EDF

L'analyse de cet événement a conclu que des tassements différentiels causés par une fondation hétérogène ont conduit à des fissures du revêtement et probablement également du remblai et/ou de sa fondation, permettant à l'érosion de conduire de s'initier. La cinétique de l'érosion était d'abord relativement lente avant d'accélérer soudainement : 2 mois se sont écoulés entre la détection d'un comportement pathologique et son accélération. Ce délai a été suffisant pour permettre aux lignes de défense actives « surveillance » et « intervention » d'être efficaces et éviter une potentielle évolution non maîtrisable des phénomènes.

- Barrage des Marquisades – incident du D600 (2019)

Le barrage des Marquisades est un barrage en remblai zoné, avec un masque amont en béton bitumineux étanche, drainé en sous-face par un béton bitumineux drainant et un réseau de collecteur permettant une mesure de débit de fuite par secteur. Il constitue le bassin supérieur de la STEP de Revin. La mise en eau s'est terminée en 1977.

A partir de septembre 2018, plusieurs mesures du comportement hydraulique (débit de drainage et cellules de pression) ont montré un comportement singulier sur le secteur du drain D600, conduisant l'exploitant à augmenter la fréquence de la surveillance ainsi que d'abaisser le niveau maximal d'exploitation. Le débit du drain D600 était passé d'un comportement stable et modéré (de moins de 100 l/min) à une tendance continue à la hausse pour atteindre de l'ordre de 500 l/min en juillet 2019. Un abaissement du niveau de la retenue a alors

été décidé, pour réaliser des examens et des reconnaissances. Des zones d'affaissements et des fissures ouvertes ont été observées sur le revêtement (Figure 9). Après ouverture du masque, un conduit d'érosion a été observé dans le béton bitumineux drainant (Figure 10).



Figure 9 : affaissements et fissures constatés sur le masque amont © EDF



Figure 10 : conduit d'érosion formé dans le béton bitumineux drainant © EDF

L'analyse de cet évènement est le suivant : le masque s'est fissuré localement, notamment au droit d'un drain de construction de diamètre 4 cm situé sous le parement amont, vraisemblablement par vieillissement, ce qui a généré des fuites d'abord faibles. Ces fuites ont initié une érosion des matériaux meubles sous-jacent, limité par l'ouverture des fissures du masque rigide. Des vides ou des zones lâches dans les matériaux supports ont commencé à se former (Figure 8). L'augmentation progressive des fuites a conduit l'exploitant à déclencher une intervention : abaissement du plan d'eau, examen visuel du parement, détection de la zone pathologique, puis réparation.

Il s'est passé 6 mois entre la détection d'un comportement pathologique et son accélération. Ce délai a été suffisant pour permettre aux lignes de défense actives « surveillance » et « intervention » d'être efficaces et éviter ainsi une potentielle évolution non maîtrisable des phénomènes. Le scénario redouté (mais non vécu), si les lignes de défenses « surveillance » et « intervention » n'avaient été efficaces, aurait consisté à l'amplification du phénomène avec une potentielle accélération des cinétiques par exemple si des sous-cavages formés par érosion interne avaient conduit à des effondrements du masque.

- Autres incidents

Cinq autres barrages de conception proche (barrage en remblai, homogène ou zoné, avec un masque amont rigide) ont connu des épisodes marquants similaires : barrages de l'Etang et de Monnès, canal de Saint Estève (zone de Castillon 0), barrage de La Coche (zone du C16).

La surveillance a permis de détecter des comportements pathologiques précocement. Soit dès l'apparition des fuites (moteur de l'érosion interne) avant l'initiation d'une éventuelle érosion : Etang et Monnès en 2000 et 2019, ou La Coche en 2023. Soit après l'initiation d'un mécanisme d'érosion potentiellement rapide, mais dont la vitesse était bridée (au moins dans un premier temps) par l'ouverture du défaut sur une structure rigide placée sur le chemin d'écoulement (Castillon 0 en 2019). La surveillance a pu être adaptée, et des interventions ont pu être réalisées pour mettre en sécurité l'ouvrage.

3.4. Analyse et enseignements

L'analyse de ces incidents a permis de constater que les lignes de défense « surveillance » et « intervention » peuvent être efficaces également pour des mécanismes d'érosion à cinétique réputée potentiellement rapide, dans certaines configurations particulières :

- Une structure résistante, en général l'étanchéité rigide, pouvant présenter des défauts (initiaux, ou de vieillissement) ;
- un plan de surveillance conforme aux règles de l'art : des examens visuels, un dispositif d'auscultation, des tournées et des analyses avec des fréquences adaptées ;

- des possibilités d'intervention avec des délais réduits : abaissement du niveau de la retenue et/ou confortement.

La présence d'une structure résistante sur le chemin d'érosion permet de limiter la vitesse de développement d'un mécanisme d'érosion rapide dans un premier temps, car la débitance est bornée et contrôlée par la géométrie des défauts. C'est dans ce délai, qui peut aller de quelques semaines à quelques mois ou années, que la surveillance et l'intervention peuvent être efficaces. Si elles ne sont pas organisées convenablement, le risque est alors qu'un effondrement de la structure rigide augmente brutalement la cinétique et conduise à des phénomènes non maîtrisables voire la rupture de l'ouvrage.

4. ENSEIGNEMENT POUR LES ETUDES DE DANGER

Les analyses développées dans les sections précédentes peuvent être prises en compte dans les Etudes De Danger (EDD) à plusieurs niveaux, notamment :

- De manière directe, elles comportent des informations pouvant être intégrées dans le chapitre 7 d'une EDD (Etude accidentologique et retour d'expérience).
- Pour l'analyse de risques (chapitre 8) et en particulier l'estimation des probabilités d'occurrence, une définition de classes de probabilités similaires à celles de l'arrêté ICPE de 2005 peuvent être utilisées :

Classe de probabilité Type d'appréciation	E	D	C	B	A
qualitative ¹ (les définitions entre guillemets ne sont valables que si le nombre d'installations et le retour d'expérience sont suffisants) ²	« événement possible mais extrêmement peu probable » : <i>n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles, mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années installations.</i>	« événement très improbable » : <i>s'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité.</i>	« événement improbable » : <i>un événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité.</i>	« événement probable » : <i>s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation.</i>	« événement courant » : <i>s'est produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installations, malgré d'éventuelles mesures correctives.</i>
semi-quantitative	Cette échelle est intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative, et permet de tenir compte des mesures de maîtrise des risques mises en place, conformément à l'article 4 du présent arrêté				
Quantitative (par unité et par an)		10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²

Figure 11 : classes de probabilité de l'arrêté du 29 septembre 2005, annexe 1

L'appréciation qualitative de la classe se réfère aux événements observables survenus ou non sur des installations, à condition que l'installation étudiée soit « semblable aux installations composant l'échantillon sur lequel ont été observées les données de retour d'expérience ». De manière générale, la question du caractère similaire des installations considérées est délicate quand on traite de barrages d'âge, de conception, de qualité de réalisation et d'état très variables.

Les scénarios de rupture définis au chapitre 2.4, et le logigramme de la Figure 7 : logigramme de 87 cas de rupture, sont construits sur la base de critères constituant une grille d'analyse pouvant contribuer à déterminer la similarité du barrage étudié avec l'échantillons d'ouvrages ayant rompu par érosion interne, analysé dans le présent article.

- Pour, l'analyse de risques toujours, le paragraphe 3 justifie une valorisation spécifique de l'efficacité de la barrière constituée par la surveillance et l'intervention, dans le contexte spécifique considéré dans ce

paragraphe, par rapport au contexte générique d'un mécanisme d'érosion interne connu pour présenter potentiellement une cinétique rapide.

5. CONCLUSION

Les analyses développées dans le présent article se basent sur le REX d'événements survenus sur des barrages uniquement. Par conséquent, les conclusions tirées s'appliquent à ce type d'ouvrage, et pas directement aux digues de protection contre les inondations :

- La conception de l'ouvrage selon les règles de l'art récentes est sans surprise une très bonne protection (barrières étanchéité et résistance) : 80 % des ruptures étudiées font apparaître des erreurs de conception critiques, qui ont majoritairement conduit à la rupture rapidement à jeune âge (moins de 5 ans après la fin de la mise en eau).
- La surveillance apporte un deuxième niveau de protection pour détecter l'apparition des pathologies, si elle est combinée à maintenance effective : 90 % des cas étudiés avec une forte pathologie n'auraient probablement pas rompu avec une surveillance et une maintenance adaptées.
- Dans le cas particulier des ouvrages présentant une structure résistante (masque amont rigide etc.) sur le chemin d'érosion, plusieurs expériences ont montré l'efficacité de la surveillance et l'intervention, si elles sont correctement réalisées, y compris pour les mécanismes d'érosion à cinétique rapide. Ces expériences illustrent par ailleurs la pertinence de la notion de chemin d'érosion pour l'étude des mécanismes d'érosion interne **Erreur ! Source du renvoi introuvable..**
- L'analyse comportementale produit des informations précieuses pour les études de sûreté des ouvrages existants : 60% des cas de rupture plus de 5 ans après la mise en eau ont concerné des ouvrages fortement pathologiques. Cette analyse fournit évidemment des informations directes sur les situations déjà vécues par l'ouvrage, mais les considérations développées dans le présent article montrent qu'elle peut fournir également, dans une certaine mesure, des informations sur le risque induit par des situations non vécues jusque-là, et notamment de crue (cf. §0).
- A l'occasion des études de sûreté, il semble nécessaire de bien identifier les cas avec une fondation présentant une géologie complexe et sensible : soit mal reconnue à la construction (modèle géologie incertain), soit bien reconnue mais mal protégée.
- Par ailleurs, ces analyses de sûreté doivent être menées dès lors qu'un ouvrage subi des travaux significatifs, quelle qu'en soit la motivation. Plusieurs ruptures d'ouvrage sains ont été consécutives à des travaux (30% des ruptures d'ouvrages non fortement pathologiques).

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] ICOLD Incident database – Bulletin 99 update – Statistical analysis of dam failures
- [2] Database of dam incidents and failures. EDF - RAI - Database of dam incidents and failures (dfdb.eu)
- [3] CFBR, Groupe de Travail « Erosion », projet de rapport « Justification de la tenue à l'érosion des barrages et des digues fluviales en remblai, Recommandations, Bonnes pratiques, Approches nouvelles », version mars 2024 (document non finalisé)
- [4] ERINOH – EROsion INterne dans les Ouvrages Hydrauliques – Volume 3 – Guide ingénierie
- [5] Tenir compte de l'histoire dans les justifications de stabilité : l'approche Bayésienne – ISL&EDF- Colloque CFBR 2019