

LEÇONS TIRÉES DES RUPTURES DE BARRAGES LATÉRAUX

LESSONS FROM CASE STUDIES OF CANAL EMBANKMENT FAILURES

Jean-Robert COURIVAUD, Olivier BORY

EDF-CIH - 4, allée du Lac de Tignes, 73290 La Motte Servolex, France

jean-robert.courivaud@edf.fr ; olivier.bory@edf.fr

MOTS CLEFS

Canaux, barrages latéraux, rupture, études de cas.

KEY WORDS

Canal embankments, failure, case studies.

RÉSUMÉ

Les barrages latéraux sont des ouvrages en remblai qui présentent des similitudes mais aussi des différences significatives par rapport aux barrages en remblai de réservoir. Leur fonctionnement hydraulique comme la variabilité de la nature de leur fondation ou de leur conception, le long de leur linéaire qui peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres par bief, conduit à certaines spécificités dans l'analyse de leur sûreté. Dans ce contexte, il est utile de disposer d'une bonne connaissance des ruptures qui se sont déjà produites sur des ouvrages de ce type, de manière à en tirer des leçons qui serviront aux études de sûreté des ouvrages existants comme aux études de conception d'ouvrages neufs ou de confortement.

Cet article s'appuie sur les données collectées dans la base de données EDF de cas de ruptures de barrage (ruptures au sens de la définition CIGB de vidange incontrôlée du volume d'eau stocké en amont de l'ouvrage), pour présenter les leçons que l'on peut tirer des ruptures de barrages latéraux en remblai. Sans prétendre à une collecte exhaustive de tous les cas de rupture de canaux qui se sont produits dans le monde jusqu'à présent, cette base de données contient néanmoins les principaux cas de rupture de canaux connus et documentés. A partir de la documentation de trente cas de rupture de canaux, dont les principales références bibliographiques sont fournies dans cet article, les leçons qui peuvent en être tirées en termes d'âge, de conception et de conditions des ouvrages, de conditions et de processus de rupture sont présentées.

Ces éléments pourront être particulièrement utiles pour la rédaction du chapitre 7 des EDD de barrages latéraux, ce chapitre portant sur le retour d'expérience accidentologique d'ouvrages de même type.

ABSTRACT

Canal embankments are structures that are similar to, but also significantly different from, reservoir embankment dams. Their hydraulic operation, as well as the variability in the nature of their foundations and their design along their length, which can be several tens of kilometres per reach, leads to certain specificities in the analysis of their safety. In this context, it is useful to have a good knowledge of the failures that have already occurred on structures of this type, so as to draw lessons that can be used in safety studies of existing structures as well as in design studies for new structures or reinforcement.

This article is based on the data collected in the EDF database of dam failures (failures in the sense of the ICOLD definition of uncontrolled release of the volume of water stored upstream of the structure), to present the lessons that can be learned from the failures of canal embankments. Without claiming to be an exhaustive collection of all the cases of canal failure that have occurred in the world to date, this database nevertheless contains the main case studies of canal failure that are known and documented. Based on the documentation of thirty cases of canal failure, the main bibliographical references of which are provided in this article, the lessons

that can be drawn from them in terms of age, design and conditions of structures, conditions and mechanism of failure are presented.

These elements may be particularly useful in drafting Chapter 7 of the EDDs for canal embankments, as this chapter deals with accidental feedback from structures of the same type.

1. INTRODUCTION

EDF est maître d'ouvrage en France d'un linéaire d'environ 500 km de barrages latéraux. Ces ouvrages sont situés principalement sur le Rhin, entre Bâle et Strasbourg, sur la Durance, entre le barrage de Serre-Ponçon et l'étang de Berre, mais ils se situent aussi sur la Garonne, le Rhône ou l'Arc. Leur fonction principale est d'être des canaux d'amenée ou des canaux de fuite d'aménagements hydroélectriques, mais certains d'entre eux, notamment sur la Durance, ont aussi des fonctions d'approvisionnement en eau potable, d'eau pour l'irrigation ou encore pour la navigation sur le Rhin. Selon la réglementation française, ce sont des barrages de classe A, B ou C.

Dans le cadre des études d'évaluation de la sûreté de ces ouvrages, menées dans le cadre de leurs EDD pour ceux qui sont classés A ou B et en dehors du cadre des EDD pour ceux sont classés C, le retour d'expérience sur l'accidentologie de ce type d'ouvrage est une donnée d'entrée importante. Ce retour d'expérience apporte en effet des éléments sur les scénarios de rupture les plus fréquents et permet de confirmer le réalisme de certaines hypothèses sur l'enchaînement de mécanismes de rupture imaginés dans les études de sûreté. Il permet surtout d'identifier les conditions les plus à risque vis-à-vis de la rupture et les localisations les plus fréquentes des brèches dans ces ouvrages de grand linéaire.

Un tel travail de retour d'expérience sur les ruptures de barrages latéraux n'ayant pas encore été publié à ce jour, EDF a entrepris de collecter les données disponibles dans sa base de données de cas de ruptures de barrage, et de les analyser pour en tirer les principaux enseignements. Cet article présente une synthèse de ce travail.

Après avoir présenté les données collectées et la typologie d'ouvrage qui en a été déduite, les mécanismes de rupture associés aux situations de chargement sont exposés. Puis deux cas de rupture qui illustrent les principaux risques pour les grands canaux sont présentés un peu plus en détail. Enfin, les principales leçons et remarques tirées de cette analyse sont résumées en conclusion.

2. COLLECTE DES DONNÉES

Les données collectées ne concernent que des ouvrages correspondant à la définition française des barrages latéraux, à savoir des ouvrages hydrauliques de grand linéaire constamment soumis à un chargement hydraulique, dont l'axe longitudinal est parallèle à la direction de l'écoulement. Ces ouvrages peuvent être, ou pas, soumis à des crues.

Les données collectées ne concernent que des ouvrages ayant subi une rupture au sens de la CIGB, à savoir la vidange incontrôlée du volume d'eau stocké dans le bief. Pour les cas où une ou plusieurs brèches ont été formées dans le remblai d'un barrage latéral par un écoulement de surverse de l'extérieur vers l'intérieur du canal, seuls les cas qui ont présenté des conséquences pour la sûreté (inondations de zones habitées notamment) ont été considérés.

A ce jour, les données de 30 cas de rupture de barrages latéraux ont été collectées. Les données collectées en France peuvent être considérées comme pratiquement exhaustives, grâce aux travaux du CETMEF [1] et à la connaissance des trois principaux maîtres d'ouvrage français de barrages latéraux (VNF, EDF et CNR). Cependant, rien qu'en Angleterre, 380 cas de rupture de canaux ont été recensés entre 1770 et 2012, d'après l'article de Dun et Wicks de 2013 [2], avec une moyenne de 4 à 5 ruptures par an entre 2004 et 2011. Seuls deux cas de rupture sur ces 380 ont, pour l'instant, été implémentés dans la base de données d'EDF. Il peut être toutefois remarqué que toutes ces ruptures en Angleterre

concernent des ouvrages qui présentent une certaine homogénéité : homogénéité de la période de construction, allant de la fin du XVIIIème siècle à la fin du XIXème siècle, homogénéité des matériaux constitutifs des remblais et de leur fondation, principalement des argiles, limons et tourbes, homogénéité de l'usage de ces canaux, dédiés au transport de marchandise.

Il apparaît donc qu'au niveau mondial, il ne s'agit pas de quelques dizaines, mais bien de plusieurs centaines, voire de plusieurs milliers de cas de rupture de barrages latéraux. Les leçons tirées des 30 cas de rupture collectés et présentés dans cet article doivent donc être relativisées par rapport à tous ces cas non collectés ou inconnus. Malgré tout, des premières conclusions, qui font sens, peuvent déjà être tirées.

La liste des trente cas de rupture de barrages latéraux collectés dans la base de données EDF est présentée dans le Tableau 1 ci-après. Lorsqu'elle existe et qu'elle est communicable, une référence bibliographique est associée dans le chapitre Références.

Nom de l'ouvrage	Pays	Année de construction	Année de rupture	Fonction de l'ouvrage
Rigole de l'Arroux – Digoïn [1]	France	1867-1869	2001	Navigation
Canal de Briare – Montambert [1]	France	1605-1642	2002	Navigation
Canal de Briare – Montambert [1]	France	1605-1642	2016	Navigation
Canal latéral à la Loire – Micaudière [1]	France	1822-1838	2000	Navigation
Canal du Rhône au Rhin – Allenjoie [1]	France	1821-1833	2005	Navigation
Canal de Roanne à Digouin – Briennon [1]	France	1830-1836	2007	Navigation
Canal de Berry [3]	France	1809-1841	2011-2021	Navigation
Canal des Ardennes	France	?	2021	Navigation ?
Canal du Midi	France	1660-1682	2018	Navigation
Canal de la Marne au Rhin	France	1850	2019	Navigation
Canal du Loing	France	?	2016	Navigation ?
Canal d'Aragon et Catalogne [4]	Espagne	1896-1906	2019	Ressource en eau
Canal de Dortmund EMS [5]	Allemagne	1899	2005	Navigation
Canal de Llangollen [6]	Angleterre	1793-1809	2004	Navigation
Canal de Bridge Water [20]	Angleterre	1761	1971	Navigation
Canal de Truckee [7]	USA	1903-1906	2008	Ressource en eau
Canal de Columbia [8]	USA	1824	2015	Hydroélectricité
Canal de Bansagar [9]	Inde	2017	2022	Ressource en eau
Canal du Nord – Mœuvres [1]	France	1960-1965	2003	Navigation
Canal latéral de l'Elbe [10]	Allemagne	1968-1976	1976	Navigation
Canal de Formin [11]	Slovénie	1978	2012	Hydroélectricité
Canal de Kutch [12]	Inde	2016	2022	Ressource en eau
Canal Main Danube (MDK) [13]	Allemagne	1960	1979	Navigation
Canal de Nagarjunasagar [14]	Inde	1950	2022	Ressource en eau
Canal de Ruahihi [15]	Nouvelle-Zélande	1981	1981	Hydroélectricité
Canal de Swift n°2 [16]	USA	1959	2002	Hydroélectricité
Canal de Rangitaiki [17]	Nouvelle-Zélande	1982	1982	Hydroélectricité
Digue de Wilnis [18]	Pays-Bas	1981	2003	Drainage de polder
Canal de Lower Quail [19]	USA	1981	1984	Ressource en eau
Canal de Murcia	Espagne	?	2019	Ressource en eau

Tableau 1 : Liste des cas de rupture de barrages latéraux collectés dans la base de données EDF

3. TYPOLOGIE DES CAS DE RUPTURE DE CANAUX

Les 30 cas de rupture de barrages latéraux ont été divisés en deux catégories, afin de mener des analyses sur des ensembles de cas mieux adaptés pour mener des comparaisons :

- les cas de rupture de canaux construits du XVIIème siècle jusqu'au tout début du XXème siècle. Ils sont caractérisés, du fait de l'époque à laquelle ils ont été construits, par l'absence de moyens mécaniques de compactage des remblais et des connaissances d'ingénierie très

limitées sur la conception et les modes de défaillance. L'absence de moyens mécanique de compactage induit de facto une densité du sol constitutif du remblai qui est faible et en conséquence, une faible résistance mécanique et à l'érosion interne de ce matériau. Les barrières de défense des barrages en remblai (étanchéité, drainage, filtration, résistance mécanique, protection des talus, évacuation, surveillance, intervention) sont souvent mal identifiées, insuffisamment dimensionnées (ou avec des critères obsolètes) voire absentes. Ce groupe d'ouvrages sera appelé dans la suite de cet article « les vieux canaux » ;

- les cas de rupture de canaux construits après 1945. Ils sont caractérisés par l'usage généralisé à travers le monde de moyens mécaniques de compactage des remblais (même si, dans des pays comme la Chine ou l'Inde, les moyens mécaniques de compactage étaient encore peu utilisés dans les années 1950), une meilleure conception et de meilleures méthodes de réalisation. Les sols constitutifs des remblais de ces ouvrages bénéficient donc généralement d'une bonne densité, et donc d'une meilleure résistance mécanique que les « vieux canaux ». Les barrières de défense des barrages en remblai sont souvent mieux identifiées et dimensionnées, bien que les justifications soient parfois lacunaires. Ce groupe d'ouvrages sera appelé dans la suite de cet article « les canaux modernes ».

Il est à noter que dans la liste de cas de rupture collectés, il n'y a pas (encore) d'ouvrages construits entre les deux guerres mondiales. Ces ouvrages sont intermédiaires entre les « vieux canaux » et les « canaux modernes », à la fois du point de vue des moyens de compactage utilisés pour la réalisation des remblais et des connaissances d'ingénierie en phase de conception et de réalisation.

4. MECANISMES DE RUPTURE

Le Tableau 2 ci-dessous présente les 17 cas de rupture de « vieux canaux », en indiquant le mécanisme de rupture principal et la situation de chargement associée à la rupture.

Barrages latéraux construits du XVII ^e siècle jusqu'au début du XX ^e siècle (« vieux canaux »)					
Nom de l'ouvrage	Pays	Année de construction	Année de rupture	Mécanisme de rupture	Situation de chargement
Rigole de l'Arroux – Digoïn	France	1867-1869	2001	Erosion interne	Crue
Canal de Berry	France	1809-1841	2011-2021	Erosion interne	Situation normale d'exploitation
Canal de Briare - Montembert	France	1605-1642	2002	Erosion interne	Situation normale d'exploitation
Canal de Briare - Montembert	France	1605-1642	2016	Erosion interne	Crue historique
Canal de Roanne à Digouin – Briennon	France	1830-1836	2007	Erosion interne	Situation normale d'exploitation
Canal latéral à la Loire – Micaudière	France	1822-1838	2000	Erosion interne	Situation normale d'exploitation
Canal du Rhône au Rhin – Allenjoie	France	1821-1833	2005	Erosion interne	Situation normale d'exploitation
Canal des Ardennes	France	?	2021	Erosion par surverse	Crue
Canal du Midi	France	1660-1682	2018	Erosion par surverse	Crue
Canal du Loing	France	?	2016	Erosion par surverse	Crue
Canal de la Marne au Rhin – bief n°47	France	1850	2019	Erosion interne	Situation normale d'exploitation
Canal d'Aragon et Catalogne	Espagne	1896-1906	2019	Erosion interne	Situation normale d'exploitation
Canal de Dortmund EMS	Allemagne	1899	2005	Erosion interne	Situation normale d'exploitation
Canal de Llangollen	Angleterre	1793-1809	2004	Erosion interne	Situation normale d'exploitation

Canal de Bridge Water	Angleterre	1761	1971	Erosion interne	Situation normale d'exploitation
Canal de Truckee	USA	1903-1906	2008	Erosion interne	Crue
Canal de Columbia	USA	1824	2015	Erosion interne suivie d'une érosion par surverse	Crue

Tableau 2 : Mécanismes de rupture et situations de chargement rencontrés dans le groupe des « vieux canaux »

Dans le groupe « vieux canaux », le mécanisme de rupture dominant est l'érosion interne (14 cas sur 17), les trois autres cas étant l'érosion par surverse. Les situations de chargement associées à ces ruptures se partagent équitablement entre la crue (7 cas) et la situation normale d'exploitation (10 cas). Dans ce groupe, le faible niveau d'ingénierie de conception et de réalisation, lié à l'âge de ces ouvrages, est l'une des principales raisons des ruptures. Il est à noter, cependant, que plusieurs canaux ont connu des ruptures sur des secteurs récemment confortés (canal de Berry, canal de Briare). Les zones de transition font partie des localisations les plus fréquentes des brèches. Par ailleurs, des événements hydro-météo exceptionnels récents (Aude en 2018, Loing en 2016, Aisne en 2021, ouragan Joaquin en 2015) ont généré des ruptures par surverse, parfois multiples sur un même canal, avec des écoulements pouvant aller de l'extérieur vers l'intérieur du canal, ou à l'inverse, de l'intérieur vers l'extérieur.

Le Tableau 3 ci-dessous présente les 13 cas de rupture de « canaux modernes », en indiquant le mécanisme de rupture principal et la situation de chargement associée à la rupture.

Barrages latéraux construits après 1945 (« canaux modernes »)					
Nom de l'ouvrage	Pays	Année de construction	Année de rupture	Mécanisme de rupture	Situation de chargement
Canal de Bansagar	Inde	2017	2022	Erosion par surverse	Ruptures en cascade
Canal du Nord	France	1960-1965	2003	Erosion interne	Situation normale d'exploitation
Canal latéral de l'Elbe	Allemagne	1968-1976	1976	Erosion interne	Situation normale d'exploitation (juste après première mise en eau)
Canal de Formin	Slovénie	1978	2012	Erosion par surverse	Crue
Canal de Kutch	Inde	2016	2022	Erosion interne	Crue
Canal Main-Danube	Allemagne	1960	1979	Erosion interne	Situation normale d'exploitation
Canal de Nagarjunasagar	Inde	1950	2022	Erosion interne	Situation normale d'exploitation
Canal de Ruahihi	Nouvelle Zélande	1981	1981	Erosion interne	1 ^{ère} mise en eau
Canal de Swift n°2	USA	1959	2002	Erosion interne	Situation normale d'exploitation
Canal de Rangitaiki	Nouvelle Zélande	1982	1982	Erosion interne	1 ^{ère} mise en eau
Digue de Wilnis	Pays-Bas	1981	2003	Cisaillement statique	Situation normale d'exploitation
Canal de Lower Quail	USA	1981	1984	Erosion interne	Remise en eau
Canal de Murcia	Espagne	?	2019	Erosion interne	Crue

Tableau 3 : Mécanismes de rupture et situations de chargement rencontrés dans le groupe des « canaux modernes »

Dans le groupe des « canaux modernes », le mécanisme de rupture largement dominant est également l'érosion interne, avec 10 cas sur 13. Il est à noter que le seul cas où le mécanisme de rupture est le cisaillement statique, qui est la digue de Wilnis aux Pays-Bas, correspond à un cas très particulier d'un

remblai construit en tourbe. Suite à une succession de périodes sèches et humides, la densité de la tourbe constitutive du remblai est devenue proche de 1, ce qui a entraîné une instabilité par cisaillement sur un plan horizontal à l'interface entre le remblai et sa fondation.

Les situations de chargement correspondant à ces ruptures, sont, en revanche, variées et relativement équiréparties : première mise en eau ou remise en eau (4 cas), situation normale d'exploitation (5 cas), événement hydro-météo majeur ayant entraîné une crue (4 cas).

De manière générale, les ruptures appartenant au groupe des « canaux modernes » montrent que ces défaillances sont en grande majorité liées à des singularités mal identifiées, et/ou mal traitées par la conception. Deux grandes causes de rupture ressortent au sein de ce groupe :

- les zones de transition remblai / ouvrage GC rigide mal protégées contre des écoulements préférentiels et une érosion interne à l'interface entre le remblai et la structure rigide ;
- les pièges dans la fondation non envisagés en phase de conception ni en phase de réalisation, constitués par des matériaux de fondation favorisant l'érosion interne par leurs propriétés et/ou leur comportement en cas de fuites venant du canal.

Pour les deux groupes « vieux canaux » et « canaux modernes », les données disponibles selon les ouvrages sont encore trop hétérogènes pour pouvoir discriminer ces cas de rupture en fonction du mécanisme d'initiation de l'érosion, notamment pour l'érosion interne. Pour autant, un tel travail est important pour tirer toutes les leçons de ces cas de rupture et il est en cours, progressant au fur et à mesure que des nouvelles données peuvent être récupérées sur ces cas. De même, des analyses des longueurs de brèche et des conséquences aval des ruptures, qui sont des éléments essentiels pour les EDD, restent à mener, nécessitant encore de collecter des données spécifiques sur un certain nombre de cas.

5. ETUDES DE CAS

Deux études de cas de rupture de « canaux modernes », assez représentatives des principales situations les plus à risque pour la rupture de ces ouvrages, sont présentées brièvement ci-après. La première, Lower Quail canal, correspond au cas de canaux fondés sur des matériaux de fondation compressibles, tandis que la seconde, le canal latéral de l'Elbe, illustre les ruptures au droit de zones de transition.

5.1 Lower Quail canal – California aqueduct

Le canal de Lower Quail, qui fait partie du « California aqueduct », constitue un chaînon d'un vaste système de transfert d'eau depuis les montagnes de la Sierra Nevada et des vallées du nord et du centre de la Californie vers le sud de la Californie, alimentant notamment la région de Los Angeles (Figure 1). Il a été construit par étapes de 1967 à 1981.

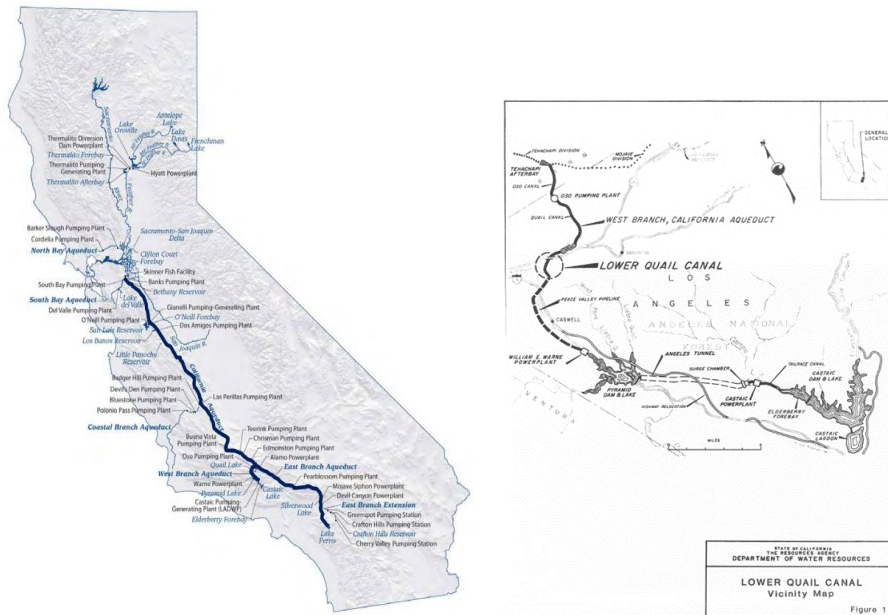


Figure 1: Localisation du canal de Lower Quail

Le canal de Lower Quail a une longueur de 3,2 km, un volume de bief de 1,4 Mm³, un débit maximum de 88 m³/s. Ses remblais ont une hauteur au-dessus du TN aval de 12 à 15 m et une largeur au radier de 7,3 m. Les remblais sont constitués de sols homogènes (non zonés) et sont étanchés par un masque amont en dalles de béton de ciment non armées. Le canal a été construit en parallèle de la vallée, en déblai en rive gauche et en remblai en rive droite. Il est fondé en partie sur des matériaux alluvionnaires et en partie sur des grès (fondation rocheuse). La construction a été conçue pour équilibrer déblais et remblais. Une couche d'argile de 61 à 92 cm d'épaisseur a été mise en place en sous-face des dalles béton du masque amont.

Dans la zone où la brèche s'est produite, la fondation présente une transition entre un secteur de fondation compressible, où le remblai rive droite repose sur une épaisse couche alluvionnaire, principalement limoneuse, et un secteur de fondation résistante, où cette couche alluvionnaire surmontant le substratum en grès est très peu épaisse (cf. Figure 2).

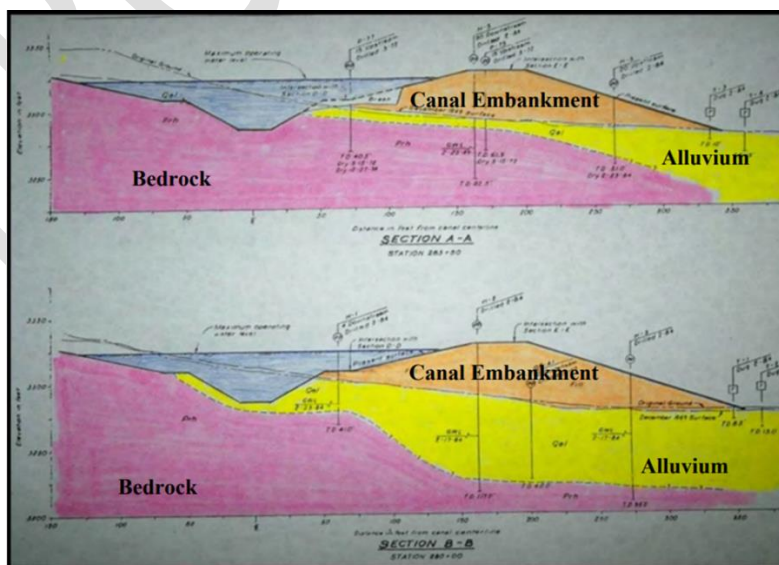


Figure 2 : Stratigraphie de la fondation dans le secteur de la brèche

La rupture du canal de Lower Quail a lieu au cours d'une phase de remplissage. Jusqu'au 26/12/1983, la hauteur d'eau dans le canal n'avait pas dépassé 8,20 m. Entre le 26/12/1983 et le 11/01/1984, la hauteur d'eau a augmenté par paliers jusqu'à 11,30 m, et elle est restée à cette valeur jusqu'au jour de la rupture, le 16/01/1984. La longueur de la brèche était de 12,20 m, une valeur à peu près égale à la hauteur d'eau et la hauteur du remblai (Figure 3).



Figure 3 : Brèche du canal Lower Quail

Les conclusions fournies par le panel d'experts chargé d'enquêter après cette rupture permettent d'identifier le scénario de rupture suivant :

- des limons compressibles étaient présents en fondation, dans l'horizon d'alluvions. Le risque lié à ces limons n'avait pas été correctement appréhendé en phases de conception et de réalisation du canal.
- Ces limons ont tassé lors de la construction du remblai du canal et les tassements différentiels induits dans les secteurs de transition, entre fondation compressible et fondation résistante, ont généré des fissures dans les limons du corps de remblai et de fondation.
- Des fuites à travers le masque étanche en béton de ciment ont généré de l'érosion interne dans ces fissures préexistantes (érosion de conduit). Cette érosion interne a généré des cavités sous les dalles en béton du masque.
- Les dalles béton ont fini par s'effondrer au droit des plus grandes cavités, entraînant la formation d'une brèche.

La présence de sols à la fois compressibles et très peu résistants à l'érosion interne, en fondation, mais aussi très probablement dans le remblai (remblai construit avec le souci d'équilibrer déblais et remblai avec les matériaux du site), dont le risque pour la sûreté de l'ouvrage n'a pas été bien estimé par les concepteurs et constructeurs, est donc, dans ce cas, la principale cause de la rupture.

Cette étude de cas illustre l'une des principales causes de ruptures des « canaux modernes », que l'on retrouve aussi sur les cas de rupture du canal de Swift n°2, de Ruahihi et de Rangitaiki, qui est la présence de pièges en fondation, générés, par exemple, par des matériaux effondrables ou présentant des conduits d'érosion préexistants (cas des basaltes de la fondation de Swift n°2).

5.2 Canal latéral de l'Elbe (Elbe Seitenkanal)

Le canal latéral de l'Elbe est un canal de 115 km de longueur, situé en Basse Saxe, en Allemagne, qui a été construit de 1968 à 1976, en parallèle de l'Elbe, dans un secteur où ce cours d'eau est peu navigable. Sa fonction est le transport de marchandises par voie fluviale entre le nord et le sud de l'Allemagne.

Dans le secteur où s'est produit la rupture, les données de géométries de cet ouvrage sont les suivantes :

- hauteur des remblais : environ 5 m ;
- hauteur entre crête et radier : 5,65 m ;
- hauteur d'eau : 4,15 m ;
- fruit du parement amont : 3 et 2 ;
- fruit du parement aval : 2 et 4 ;
- largeur en crête : 6 m ;
- largeur du radier : 29 m ;
- volume d'eau dans le bief : 4 Mm³.

Le matériau constitutif du corps du remblai est un sable uniforme fin à moyen, dont la granulométrie est présentée sur la Figure 4.

L'étanchéité du parement amont est assurée par (de l'extérieur vers l'intérieur) :

- une couche de 10 cm de béton bitumineux de protection ;
- une couche de 6 cm de béton bitumineux étanche ;
- une couche de 30 cm de sable bitumineux (couche support).

L'étanchéité du radier est assurée par (de l'extérieur vers l'intérieur) :

- une couche de 8 cm de béton bitumineux de protection ;
- une couche de 6 cm de béton bitumineux étanche ;
- une couche de 32 cm de sable bitumineux (couche support).

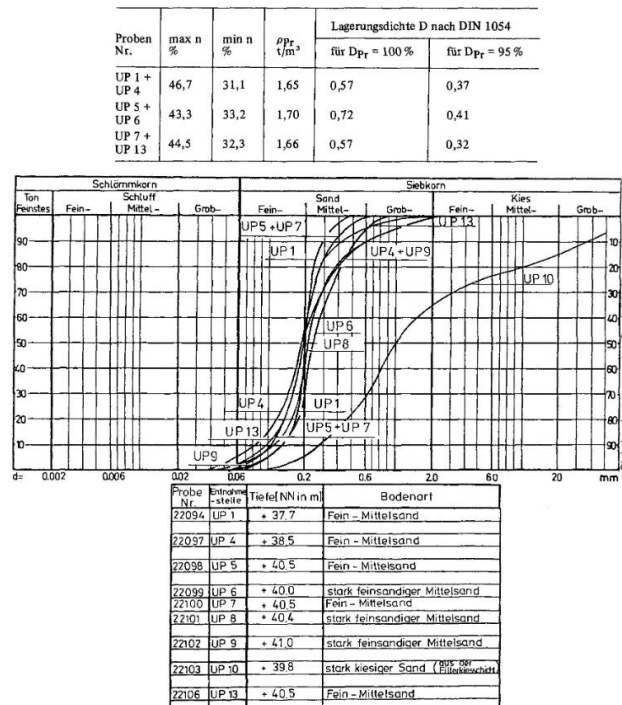


Figure 4 : Granulométrie du matériau constitutif du corps du remblai

Ce canal s'est rompu le 18/07/1976, entre 10h00 et 10h30, seulement 33 jours après sa première mise en eau, en situation normale d'exploitation. La brèche s'est formée au niveau de la transition entre le

remblai du canal et un ouvrage traversant en béton, dont la structure est représentée par la Figure 5. La longueur de la brèche était de 15 m et sa hauteur de 5 m (Figure 7).

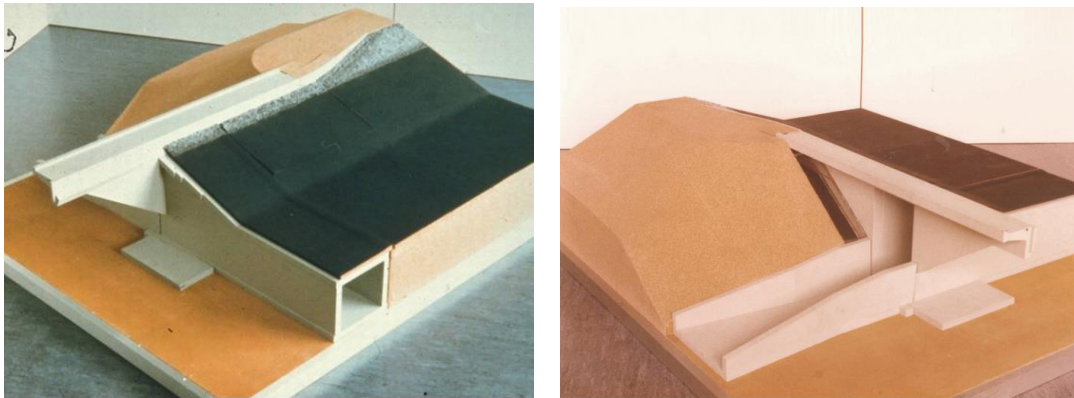


Figure 5 : Maquette du canal représentant l'ouvrage traversant, vu de l'intérieur du canal (photo de gauche) et vu de l'extérieur du canal (photo de droite)

L'interprétation des phénomènes ayant conduit à la rupture conduit à considérer le scénario suivant :

- présence d'un défaut d'étanchéité au droit de la transition remblai du canal / structure en béton de l'ouvrage traversant. La présence d'un défaut précisément à cette interface n'est généralement pas un hasard. L'ouvrage traversant est souvent positionné au droit d'un thalweg ou d'un point bas, donc souvent associé à une plus grande hauteur de remblai et/ou une fondation (en nature ou en épaisseur) un peu différente, et ainsi pouvant générer des tassements différentiels. Ensuite, le compactage du remblai est difficile au contact de la structure rigide, ce qui peut favoriser aussi les tassements différentiels. Enfin, les jonctions entre deux types d'étanchéité (par exemple entre béton bitumineux étanche et béton de ciment) sont des singularités difficiles à réaliser (compactage difficile, géométrie complexe, faible tolérance aux déformations si mal conçu) donc potentiellement source de défaut ;
- écoulement dans le matériau de remblai le long de cette transition. Ce matériau est un sable uniforme, très susceptible vis-à-vis du mécanisme d'initiation de l'érosion interne de type érosion régressive de conduit ;
- érosion interne le long de ce chemin d'écoulement (très probablement, érosion régressive de conduit) ;
- développement d'un conduit d'érosion amenant à un sous-cavage du masque amont en béton bitumineux, puis effondrement de ce masque et brèche, comme le montre la Figure 6.



Figure 6 : Erosion interne au niveau de la transition remblai/structure GC de l'ouvrage traversant

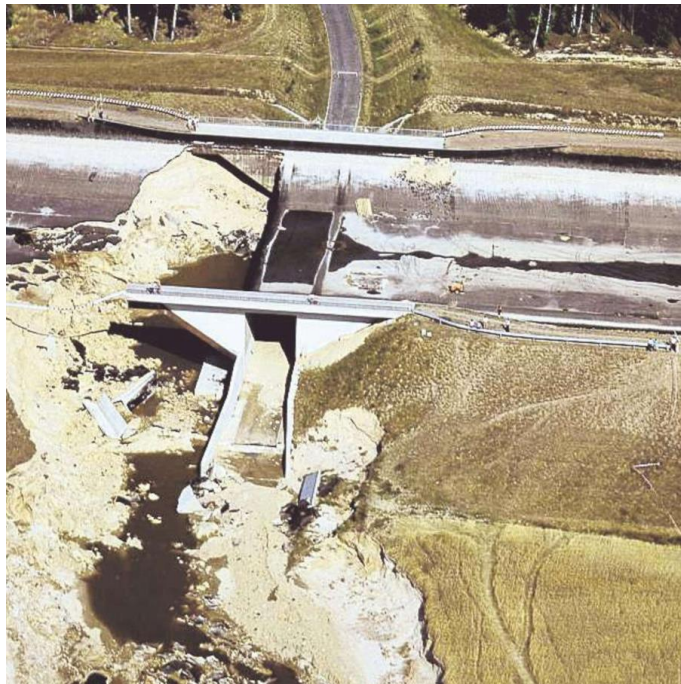


Figure 7 : Vue générale de la brèche du canal latéral de l'Elbe

Cette étude de cas illustre une autre des principales causes de rupture des « canaux modernes », qui est la mauvaise conception des zones de transition entre matériaux de remblai et structures rigides traversantes (béton ou acier). Ces singularités sont souvent difficiles à bien étancher, quelle que soit la nature du masque amont, et constituent donc des zones privilégiées pour les fuites. Les matériaux meubles en contact avec les structures rigides sont souvent difficiles à compacter, à cause de la proximité de la structure, et sont donc moins résistants. Enfin il est aussi courant qu'un ouvrage traversant soit positionné dans une zone singulière de la fondation, par exemple lorsqu'il est placé dans l'axe d'un thalweg franchit par le canal, donc pouvant être le siège de tassement différentiels notamment. Dans le cas du canal latéral de l'Elbe, il y a eu la conjonction, dans cette zone de transition, entre trois facteurs :

- un défaut de l'étanchéité, qui a permis un écoulement de fuite en arrière du masque étanche ;
- un matériau constitutif du remblai particulièrement vulnérable à un mécanisme d'érosion interne : le sable fin à moyen uniforme est très vulnérable à l'érosion régressive de conduit, et son compactage a pu être difficile au contact de la structure rigide ;
- l'absence de la barrière de défense filtration, dont le rôle aurait été d'arrêter l'érosion interne une fois initiée.

6. PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS TIRÉS ET CONCLUSION

L'échantillon de cas de rupture de barrages latéraux qui a été collecté par EDF (30 cas) reste encore très faible par rapport au nombre de cas présumés à travers le monde depuis l'ère préindustrielle (au minimum plusieurs centaines, probablement plusieurs milliers). Malgré tout, des enseignements et conclusions qui semblent faire sens peuvent déjà être tirés de ces trente cas.

Tout d'abord, il y a lieu de distinguer les barrages latéraux en fonction de leur époque de construction, car l'époque de construction est caractéristique d'un niveau de connaissance sur les modes de défaillance, les méthodes de conception et les moyens de réalisation. Pour les ouvrages hydrauliques en remblai, les moyens avec lesquels les matériaux, mis en œuvre par couches horizontales successives, ont été compactés, donnent beaucoup d'indication sur la qualité de ce compactage, d'où

résulte en grande partie leur résistance mécanique et leur résistance à l'érosion interne. De ce fait, l'échantillon de 30 cas de rupture a été scindé en deux groupes : les « vieux canaux », construits avant la première guerre mondiale, sans moyen mécanique de compactage des terres et avec des connaissances d'ingénierie très limitées et les « canaux modernes », construits après la seconde guerre mondiale, avec la généralisation de l'utilisation de moyens mécaniques lourds pour le compactage des terres et des connaissances d'ingénierie plus élaborées.

Dans ces deux groupes, l'érosion interne ressort comme le mécanisme de rupture dominant. Cette tendance pourrait cependant devenir moins nette au fil des ans, du fait de la multiplication des événements hydro-météo exceptionnels qui génèrent plus de crues et ainsi de risque de rupture par surverse. Ainsi, sur les 11 cas de rupture de barrages latéraux qui se sont produits depuis 2015, parmi les 30 cas collectés, 8 ont eu lieu en situation de crue. Parmi ces 8 cas, 4 sont dus à un mécanisme de rupture par érosion par surverse, 3 par érosion interne, et un est dû à une combinaison de ces deux mécanismes.

Pour les « vieux canaux », les ruptures peuvent survenir, hors zones confortées avec des méthodes à l'état de l'art, en situation normale d'exploitation et potentiellement en tout point de l'ouvrage. Les méthodes sommaires de construction de ces ouvrages très anciens ne permettent généralement pas de garantir a priori que tel ou tel secteur est à l'abri d'une rupture. Cependant, des reconnaissances et études peuvent permettre de cibler les zones les plus à risque.

Pour les « canaux modernes », les ruptures sont généralement localisées, au contraire, dans des secteurs bien particuliers : les singularités. Deux grandes familles de singularité ont été identifiées comme particulièrement sensibles : les fondations complexes et les zones de transition entre structure en matériaux meubles et structure rigides traversantes. Il n'est pas évident de considérer que des analyses de risque de rupture, du même type que les EDD, auraient forcément conclu à une non-conformité ATB pour les deux ouvrages présentés dans cet article, le canal de Lower Quail et le canal latéral de l'Elbe. C'est seulement grâce à des reconnaissances géotechniques approfondies de la fondation du canal de Lower Quail, mettant en évidence la présence de sols effondrables sur une partie du linéaire, et grâce à l'identification de sables très uniformes non filtrés dans la zone de transition entre remblai et ouvrage traversant sur le canal latéral de l'Elbe, que des marges de sécurité insuffisantes vis-à-vis du risque d'érosion interne auraient pu être identifiées. Les deux cas de rupture présentés dans cette communication conduisent à mettre en avant trois recommandations importantes pour l'analyse de la sûreté des remblais latéraux de grand linéaire :

1. la nécessité d'acquérir, grâce aux documents de conception et de construction, et le plus souvent, grâce à des reconnaissances topographiques, géophysiques et géotechniques complémentaires, une connaissance approfondie des sols constitutifs de la fondation de ces ouvrages ;
2. la nécessité d'analyser finement les zones de transition, en faisant le lien entre la caractérisation de défauts avérés ou potentiels de l'étanchéité, la susceptibilité à l'érosion interne des sols situés à l'interface remblai/structure rigide et la présence, ou l'absence, d'une barrière filtration efficace ;
3. l'intérêt de chercher à renforcer les différentes barrières de défense (étanchéité, filtration, drainage, surveillance, intervention principalement) au moins sur les zones sensibles : ouvrages traversants et fondations douteuses ou à doter l'ouvrage de certaines de ces barrières si elles n'étaient pas prévues à la conception.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] « Digue et berges des voies navigables. Retour d'expérience sur les désordres et les réparations ». CETMEF, juin 2010.
- [2] « Canal breach risk assessment for improved asset management ». Richard W. Dun, Jon M. Wicks. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. ICE Publishing. <http://dx.doi.org/10.1680/wama.12.00060>
- [3] « Drevant : le canal de Berry éventré », M. Benoit, France Bleu, France 3.
- [4] « Mantenimiento y conservacion de infraestructuras hidraulicas – Canal de Aragon y Cataluna. Présentation PPT d'Altius le 20/09/2023.
- [5] « Aktueller Stand und Herausforderungen der Geotechnik im Verkehrswasserbau », Proceedings du colloque BAW de Karlsruhe du 24/09/2009.
- [6] "An improved understanding of canal hydraulics and flood risk from breach failures", R.W.A. Dun MCIWEM, Water and Environment Journal, 2007, N°21, pp.9-18.
- [7] "Potential failure modes for the Truckee Canal at Fernley Nevada", J. Cyganiewicz, J. France, D. Paul, C. Slaven, ASDSO annual conference, Indian Wells, California, USA, September 2008, pp. 591-614.
- [8] "The Hydraulic and Geotechnical Aspects of the South Carolina Floods of October 1-5, 2015 Related to Offshore Hurricane Joaquin", GEER Association Report No. GEER-052, December 19, 2016.
- [9] « Bhopal Breach in Ban Sagar dam canal, no loss to life and property », Free Press Journal.
- [10] "Der Schadensfall an der Unterführung Lüneburg-Nutzfelde des Elbe-Seitenkanals und Folgerung" E. Lackner, M. Hager, Jachbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, 1980, Vol. 37, pp. 199-220.
- [11] "Floods on Drava River Basin November 2012 in Slovenia – Lessons learned" M. Slokar, J. Papez. Contribution of PLANALP members from Slovenia on « Water and Risk Management facing climate change: towards the local adaptation », Brescia, 10/10/2013.
- [12] "Kutch Branch Canal develops breach during maiden testing". The Indian Express. 08/07/2022.
- [13] "The BAW codes of practice to ensure the bank stability of German inland waterways". Workshop on Seepage Induced Geotechnical Instability, B. Odenwald. Publication Imperial College, London, UK. 31/08-1/09/2017.
- [14] "Nagarjunasagar left canal breaches", The New Indian Express. 8/09/2022.
- [15] "Canal failure – Ruahihi hydro-electric power scheme, Bay of Plenty." Proceedings of the 5th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics. L. E. Oborn. The Institution of Engineers, Australia, Sydney.
- [16] [16] "Failure of Swift n°2 Forebay Dam; The Sustainability of Experience – Investing in the Human Factor", P.J. Regan, G. Huhta, W.N. Lagnion, 28th Annual USSD Conference, Portland, Oregon, April 28-May 2, 2008.
- [17] [17] "Canal failure on Wheao Power Scheme". O.T Jones, Proceedings of the 5th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics. The Institution of Engineers, Australia, Sydney, 1988, pp. 561-566.
- [18] "Dutch Dike Breach, Wilnis 2003", S. Van Baars. Proceedings of the 5th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, New York, 2004, Paper n° 2.84.
- [19] "Seepage Distress and Canal Repairs on the California Aqueduct. It's a Small World-Managing Our Water Resources". L.F Harder, J. Kuttel, J. Royer, T. Wehling, J. Burke, R. Black, M. Driller, C. Kashiwada, R. Barry, R.A. Torres. Proceedings of the 37th Annual Conference of United States Society on Dams, Anaheim, California, 2017, pp. 1279-1346.

[20] https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Bridgewater_Canal&oldid=1223662031

PROVISoire