

EROSION EXTERNE DES BARRAGES ET DES DIGUES

External erosion of dams and dikes

Jean-Robert COURIVAUD

EDF – CIH- Savoie Technolac – 4 allée de Lac de Tignes - 73290 LA MOTTE SERVOLEX

jean-robert.courivaud@edf.fr

Luc DEROO

ISL, 4 Boulevard Marius Vivier Merle - 69485 LYON

deroo@isl.fr

Stephane BONELLI

Irstea et Aix-Marseille Université, 3275 route de Cézanne - 13182 Aix-en-Provence

stephane.bonelli@irstea.fr

MOTS CLEFS

Barrages, digues fluviales de protection, digues de canaux, érosion par surverse, analyse de risque

KEY WORDS

Dams, levees, flood protection fluvial dikes, canal dikes, overflowing erosion, risk analysis

RÉSUMÉ

Cette communication dresse tout d'abord un panorama des données sur les ruptures par surverse des barrages en remblai et des digues, ainsi que les actions menées récemment au niveau national et international pour synthétiser et faire progresser l'état de l'art : GT CFBR, Workshop International d'Aussois de 2017, European Working Group on Overflowing and Overtopping Erosion. Elle propose ensuite une méthodologie d'analyse de ce mode de rupture et l'état de l'art associé à chaque étape. Enfin, elle présente la pratique et le retour d'expérience d'EDF dans l'analyse du risque d'érosion par surverse des barrages en remblai et des digues et pointe les lacunes de l'état de l'art actuel et les besoins de recherche et développement associés.

ABSTRACT

This communication presents firstly an overview of statistics on embankment dam and levee failures by overflowing erosion, as well as recent actions conducted at a national or an international level to summarize and improve the state of the art: CFBR Working Group, 2017 Aussois International Workshop, European Working Group on Overflowing and Overtopping Erosion. A methodology for the analysis of this failure mode and the state of the art associated at each stage is then proposed. Finally, this communication presents the EDF practice and feed-back in the field of embankment dams and levees overflowing erosion risk analysis and it points out the gaps to be filled and the associated needs in research and development.

1. INTRODUCTION

1.1. Statistiques sur la rupture par surverse des barrage et des digues

Les statistiques les plus récentes concernant les ruptures de barrages sont issues de 1443 cas dans 50 pays (dont les USA, l'Inde, le Royaume-Uni et la Chine). Approximativement 90% de ces ruptures concernent des barrages en remblai. Pour ces derniers, la plupart des réservoirs ont une capacité inférieure à 10^8 m³. La moitié des barrages en remblai ayant rompu ont une hauteur inférieure à 15 m, et le quart une hauteur comprise entre 15 et 30 m. La plupart des ruptures se produisent pendant les 5 premières années de vie du barrage. Les statistiques les plus récentes concernant les digues sont issues de 1004 cas de ruptures de digues (digues fluviales et digues de canaux), essentiellement de la Hongrie, de l'Allemagne, de la Chine, des USA et des Pays-Bas. La majorité des digues ont une hauteur comprise entre 2 et 4 m.

L'analyse de ces statistiques mondiales montre que la surverse est la première cause de rupture des barrages en remblai, et des digues fluviales de protection et des digues de canaux (Figure 1). Ce sont essentiellement les barrages en remblai qui sont concernés, et non les barrages en enrochements (Tableau 1). Nous n'avons pas connaissance de statistiques par type de digues. Concernant les digues, il est frappant de constater la corrélation de l'augmentation de la fréquence des ruptures par surverse avec l'observation dans le monde de l'augmentation des valeurs extrêmes des crues à partir des années 1980 (Figure 2).

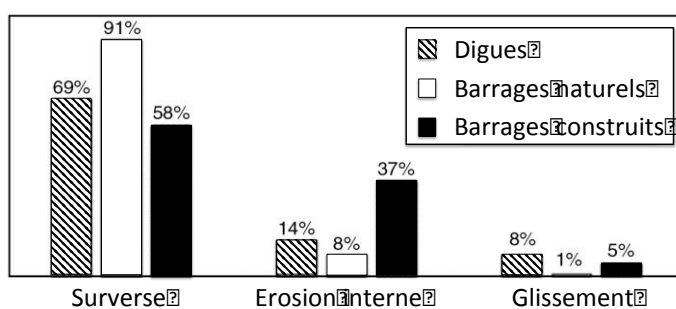


Figure 1 : Statistiques de rupture des barrages et des digues par mode de rupture [1]

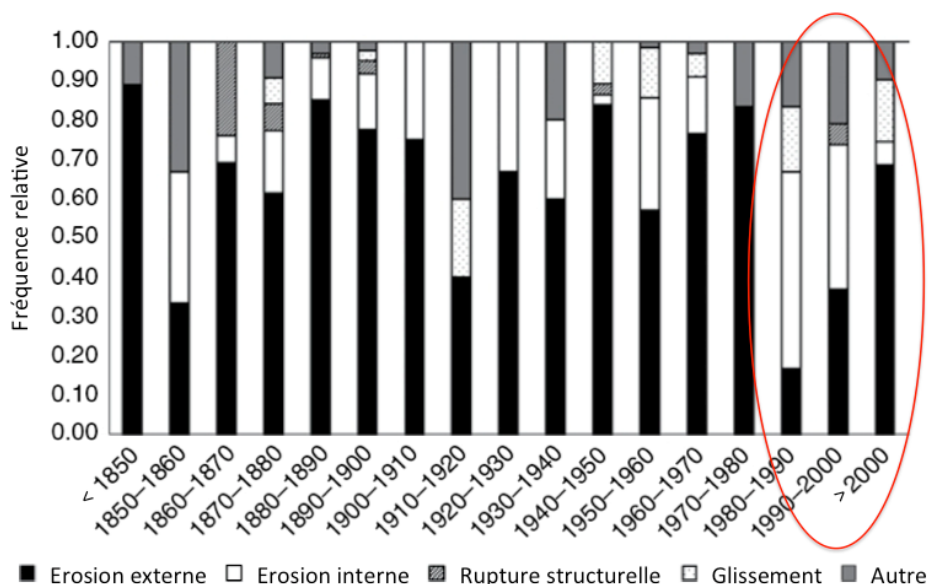


Figure 2 : Variation des fréquences des mécanismes de rupture avec le temps [1].

Type de barrage	Surverse	Erosion interne	Autre	Total
Barrage homogène	23 39.7%	26 44.8%	9 15.5%	58
Barrage en terre avec zones	18 42.9%	17 40.5%	7 16.7%	42
Barrage en terre avec noyau central	13 61.9%	6 28.6%	2 9.5%	21
Barrage en enrochements masque à mont		2 100.0%		2

Tableau 1 : Causes de rupture par type de barrage en remblai [1]

1.2. Quelques repères

Les ouvrages de synthèse relatifs aux barrages n'abordent pas tous la rupture par érosion externe. Notamment, le Bulletin ICOLD n°155 concernant les modèles numériques dans l'ingénierie des barrages ne traite pas ce sujet [3]. Le document de référence de type « Dam-Break analysis » pour les barrages est le Bulletin ICOLD n°111 [2]. Le document de référence pour les digues est l'ILH [4] ; il contient l'état de l'art actuel.

1.3. Le Workshop International d'Aussois « Overflow erosion of embankment and concrete dams » (2017)

Le Workshop International « Overflow erosion of embankment and concrete dams » de décembre 2017 a été organisé par EDF-CIH à Aussois. Il a rassemblé 60 participants de 15 pays. Il a été constitué de deux sessions.

1.3.1. Session érosion par surverse des barrages en remblai et des digues

Il y a eu une vingtaine d'exposés, abordant le point de vue des gestionnaires (Hydro Quebec, UK Environment Agency, EDF, ENGIE, USACE, Bavarian Environment, Flanders Agency, SYMADREM, Rijkswaterstaat), l'état de l'art, les recherches en cours (ARS-HERU Stillwater, DGSIG project et USBR, USACE-ERDC, University of Madrid, Hydro Quebec, CIMNE Madrid, NTNU, Irstea, EDF/Geophyconsult), ainsi que des exposés de fond.

La physique n'est pas encore connue de manière satisfaisante, notamment pour les sols à forte granulométrie. La méthodologie de caractérisation expérimentale, que ce soit par des essais de laboratoire ou des essais de terrain, n'est pas mure. Actuellement, l'essai le plus utilisé est le Jet Erosion test (JET), mais celui-ci a été surtout développé pour représenter l'érosion par surverse des remblais en sols cohésifs (appelée en anglais Head-Cut Migration) et ne représente pas le mécanisme d'érosion de surface (mécanisme d'érosion par surverse dans les sols pulvérulents). En ce qui concerne les codes de calcul pour l'ingénierie, le DSIG (Dam Safety Interest Group) de CEATI a produit un rapport [3] dont la conclusion est que les deux codes actuellement les plus complets pour l'ingénierie sont : WINDAM-C (free software, NRCS 2018) et EMBREA (commercialisé par HRW, code qui succède à HR Breach).

1.3.2. Session érosion de la fondation rocheuse par surverse des barrages en béton

Il y a eu une trentaine d'exposés, sur de nombreux retours d'expérience, essentiellement des USA (dont Oroville) et France (EDF), sur le point de vue des gestionnaires (Hydro Quebec, USACE, EDF, Alpiq, SHEM, USBR, Verbund, ENEL, Vietnam, Norvège, British Dam Society), l'état de l'art, les recherches en cours (Université de Pise, EPFL, USACE, EDF, Université de Cartagène, Université de Berkeley, USBR, UNSW) ainsi que plusieurs exposés de fond.

Les thématiques des recherches en cours incluent : l'hydraulique des jets plongeants à l'aval des barrages en béton et l'érosion des rochers, une meilleure estimation de la puissance hydraulique pour la méthode d'indice d'érodabilité d'Annandale, le head-cutting et l'érosion régressive des fondations rocheuses en partie aval et les conséquences pour la stabilité de la structure, la connaissance de la cinétique des phénomènes d'érosion avec l'intégration du facteur temps pour passer de la puissance du jet à son énergie et enfin, la recherche d'études de cas documentées, notamment pour valider les codes de calcul.

1.4. Le GT Eurcold « Overflowing and overtopping erosion »

A l'issue du workshop d'Aussois de 2017, il a été décidé de créer le groupe de travail international « European Working Group on Overflowing and Overtopping Erosion ». C'est un GT Eurcold du Club Européen de la CIGB (<http://cnpgeb.apambiente.pt/IColdClub/index.htm>). Il est animé par J.-R. Courivaud (EDF), et est ouvert aux maîtres d'ouvrage et gestionnaires, aux ingénieurs des bureaux d'étude et aux scientifiques du milieu académique. Ses objectifs sont de rassembler l'état de l'art des connaissances, des pratiques, et des études de cas, ainsi que de faciliter les collaborations internationales et les montages de projets. La réunion de lancement s'est tenue à Ottawa lors de la 87^{ème} réunion annuelle de la CIGB en juin 2019. Il fera le point tous les 6 mois et se réunira physiquement tous les 2 ans au moment des « International Seminar on Dam Protection against Overtopping », le prochain événement étant en novembre 2020 à Madrid. Ce groupe de travail est structuré en quatre sous-groupes :

- Surverse des barrages en remblai et des digues fluviales ;
- Erosion en aval des barrages en béton et surverse des évacuateurs ;
- Franchissement et submersion des digues maritimes ;
- Technologies de protection contre la surverse des barrages en remblai et des digues fluviales.

1.5. Le groupe de travail CFBR « Recommandations pour la justification de la tenue à l'érosion des barrages et des digues en remblai »

Le groupe de travail du Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) dédié à la justification de la stabilité des barrages et digues en remblais, a produit un guide de recommandations [6], validé par la Commission Exécutive du CFBR et a reçu mandat d'établir des « Recommandations pour la justification de la tenue à l'érosion des barrages et des digues fluviales en remblai ». Les digues maritimes ne sont pas dans le champ du GT. Le travail a commencé en 2017 et le groupe, qui rassemble 25 représentants des maîtres d'ouvrage (barrages et digues), de l'ingénierie, de l'administration et de la recherche, s'est réuni en moyenne quatre fois par an. Il a été décidé d'avancer en deux sous-groupes : le premier consacré à l'érosion interne, le second dédié à l'érosion externe.

Concernant l'érosion externe, les recommandations vis à vis des modes de ruptures doivent, d'après le mandat, s'appuyer sur l'état de l'art des connaissances et sur les méthodes utilisées actuellement dans l'ingénierie afin d'en extraire les bonnes pratiques pour la justification des barrages et digues en remblai. La synthèse bibliographique et celle des pratiques, normes ou recommandations étrangères constitueront une annexe du guide. Le présent article présente quelques éléments relatifs à la production du sous-groupe « érosion externe ».

2. ELEMENTS DE METHODOLOGIE

2.1. Différences entre barrages et digues

Avant la publication de l'ILH [4], les méthodes et outils disponibles pour les barrages étaient souvent utilisés, par défaut, pour les digues. L'augmentation des connaissances et l'amélioration des pratiques s'appuient désormais sur une analyse plus fine et une bonne représentation des phénomènes. L'identification d'une méthodologie commune passe par la prise en compte des différences importantes entre barrages et digues (Tableau 2). Les différences essentielles proviennent :

- De la différence de l'hydraulique amont, en terme de quantité d'eau et de vitesse longitudinale ; ceci impacte l'hydrogramme de brèche, ainsi que son élargissement qui est non symétrique pour les digues ;
- De la différence de la qualité de la fondation pour les petits ouvrages, les fondations de barrages étant le plus souvent de meilleure qualité que les fondations de digues ; les fosses d'érosion de digues peuvent atteindre le double de la hauteur de l'ouvrage ;
- Des grandes variabilités de hauteur pour les barrages qui induisent des effets d'échelle ;
- Des grandes variabilités de largeur de brèche pour les digues.

	Barrages	Digues
Alimentation du débit de brèche	Piloté par les conditions météorologiques et hydrologiques et influencé par le volume du réservoir	Piloté par les conditions météorologiques et hydrologiques
Contrôle de l'inondation	Présence de déversoirs	Absence de déversoir sur la plupart des digues
Fosse de fondation	Fondations de bonne qualité Fosse d'érosion en fondation surtout fonction de la hauteur de l'ouvrage	Fondations de qualité très variable Fosse d'érosion en fondation pouvant être plus grande que la hauteur de la digue
Hauteur de brèche	H < 15 m pour 50% des barrages H = 15 à 20 m pour 26% des barrages Hauteur H jusqu'à 100 m (effet d'échelle) Hauteur de brèche < Hauteur du barrage	H < 5 m Hauteur de brèche jusqu'à 3 fois la hauteur de digue
Largeur de brèche	Quelques dizaines de mètres De nombreuses formules empiriques	Jusqu'à plusieurs centaines de mètres Paramètres critique Peu de formules empiriques
Vitesse côté amont	Réservoir Pas de vitesse longitudinale	Rivière ou canal Vitesse longitudinale avec angle d'incidence possible (dans les courbes) Erosion longitudinale côté levee/canal
Développement de la brèche	Le plus souvent symétrique (fonction des conditions de site)	Toujours non symétrique à cause de la vitesse de la rivière/canal

Tableau 2: Différences entre barrages et digues

2.2. Méthodologie d'analyse du risque d'érosion externe

La méthodologie d'analyse du risque d'érosion externe peut s'inspirer de celle qui a été élaborée pour l'érosion interne [7]. On en déduit six étapes pour être amené à conclure sur le risque d'érosion externe de l'ouvrage (Tableau 3). Cette analyse est à mener à l'aune de la connaissance de la physique des phénomènes, et de la connaissance de l'ouvrage lui-même. Ceci est illustré dans le Tableau 4.

N°	Etape	Question
1	Sollicitation	Quelles sont les sollicitations ?
2	Protection	Y-a-t-il une protection de surface ? Quelle est son efficacité ?
3	Localisation	Quelles sont les localisations possibles d'initiation de l'érosion ?
4	Initiation	Quels sont les mécanismes possibles d'initiation de l'érosion ?
5	Formation de la brèche	Quels sont les mécanismes de formation de la brèche ?
6	Développement de la brèche	Quels sont les mécanismes de développement de la brèche ?

Tableau 3 : Les questions des six étapes possibles de l'analyse de risque de rupture par érosion externe

N°	Etape	Physique des phénomènes
1	Sollicitation	Écoulements à surface libre, fortement turbulent et aérés sur forte rugosité (skimming flows), Jet impactants. Calcul de la contrainte hydraulique.
2	Protection	Seuil d'érodabilité (en contrainte limite ou en vitesse limite) de la protection de surface en fonction du temps (durée de la sollicitation)
3	Localisation	A analyser en fonction du type d'ouvrage et du type de sol
4	Initiation	Connaissance de la contrainte critique du sol (seuil d'érosion)
5	Formation de la brèche	Fonction du type d'ouvrage et du type de sol
6	Développement de la brèche	Cinétique de brèche pilotée par le coefficient d'érosion Couplage entre érosion et stabilité mécanique Prise en compte de l'incidence éventuelle de la vitesse du fleuve ou du canal Prise en compte éventuelle de la fosse d'érosion

Tableau 4 : Quelques éléments relatifs aux six étapes possibles de l'analyse de risque de rupture par érosion externe

2.3. Mécanismes d'initiation de l'érosion

Le GT a identifié quatre mécanismes d'initiation de l'érosion (Tableau 5). Le premier mécanisme, la surverse, est le mécanisme majeur et concerne tous les types d'ouvrage. Il inclut l'affouillement en pied aval. Le second mécanisme, l'affouillement longitudinal côté amont, concerne essentiellement les digues de protection et les digues de canaux (c'est à dire côté fleuve ou côté canal). Le troisième mécanisme, les affouillements locaux, est divisé en trois parties : i) l'affouillement de la fondation rocheuse par surverse des barrages en béton ; ii) l'érosion dans les fosses de dissipation et l'érosion provoquée par le fonctionnement des évacuateurs (qu'ils soient saturés ou pas) ; iii) l'affouillement par jet plongeant au droit des parapets. Le quatrième mécanisme concerne les vagues : batillage, run-up et franchissement, et vague solitaire provoquée par un glissement dans la retenue (barrages).

La surverse des remblais de barrages ou de digues (mécanisme M1) est relative à une typologie d'érosion susceptible d'être globale (crête, talus aval, pied de talus) et complexe (combinaison d'érosion de surface, d'instabilités mécaniques et d'érosion par head-cut), au contraire des affouillements locaux (mécanisme M3).

Les trois premiers mécanismes peuvent conduire à la rupture de l'ouvrage. L'initiation de l'érosion est à étudier en tenant compte de la présence d'une protection de surface, de ses caractéristiques, et de l'occurrence de l'initiation de l'érosion du corps de l'ouvrage lui-même si cette protection vient à ne plus remplir sa fonction.

En ce qui concerne les vagues, l'étude d'une occurrence de rupture n'est pas prévue. En effet, le batillage d'une part, et le run-up et franchissement d'autre part, provoquent essentiellement des dégradations. Au contraire, on supposera qu'une vague solitaire provoquée par un glissement dans la retenue conduira toujours à la rupture du barrage, s'il est en remblai ; cette posture est cohérente avec la pratique actuelle qui est de considérer qu'une surverse franche d'un barrage en remblai conduira toujours à sa rupture.

2.4. Mécanismes de formation de brèche

L'analyse de la littérature indique quatre mécanismes de formation de brèche, selon la nature du matériau constituant l'ouvrage (Tableau 6) :

- Remblai constitué de sols fins cohésifs ; le mécanisme est celui du « Head-Cut », ou formation progressive à partir du pied aval de marches avec alternance d'érosion par jet impactant et détachement par blocs ;
- Remblai constitué de sols granulaire à granulométrie fine (sableux) ; érosion répartie sur l'ensemble de l'ouvrage (crête et talus aval) ;
- Remblai constitué de sols granulaires à forte granulométrie ; ce mécanisme fait actuellement l'objet de recherches, ou de projets d'actions de recherches, il n'est pas encore connu ;
- Barrage en enrochement ; ce mécanisme est caractérisé par le couplage entre écoulement de surface et écoulement interne.

Mécanisme d'initiation	Mécanisme conduisant à la rupture
M1. Surverse des remblais	
Erosion par surverse du remblai et brèche (y/c affouillement en pied de talus aval)	oui
M2. Affouillement longitudinal	
par écoulement longitudinal côté amont (y/c iou en pied de talus aval)	oui
M3. Affouillements locaux	
M3.1. Affouillement de la fondation rocheuse par surverse des barrages en béton	oui
M3.2. Fosses de dissipation, débordement d'évacuateur (y/c jet plongeant)	oui
M3.3. Affouillement au droit des parapets	oui
M4. Vagues	
M4.1. Batillage	non
M4.2. Run-up et franchissement	non
M4.3. Vague solitaire provoquée par un glissement dans la retenue	oui

Tableau 5 : Les quatre mécanismes d'initiation d'érosion externe proposés par le GT CFBR.

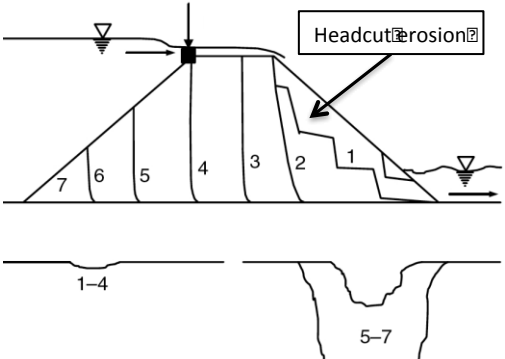
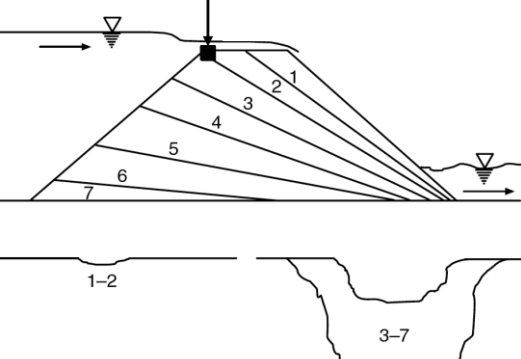
<p>1. Sol cohésif</p> 	<p>2. Sol granulaire à granulométrie fine</p> 
<p>3. Sol granulaire à forte granulométrie Mécanisme méconnu</p>	<p>4. Enrochements Statistique : rupture peu probable</p>

Tableau 6 : Les quatre mécanismes de formation de brèche

2.5. Structuration de la synthèse des connaissances et des pratiques

Les éléments les plus récents et les références bibliographiques permettant de répondre aux six étapes du Tableau 3 seront organisés, pour la synthèse de l'état de l'art, et pour les recommandations de bonnes pratiques, suivant six axes :

- 1. *Statistiques* ; statistiques les plus récentes sur des cas documentés de rupture de barrages et des digues par érosion externe ;
- 2. *Physique des phénomènes* ; processus physiques concernés (couplant hydraulique, géotechnique et structures) ; c'est ici que l'on trouvera les équations permettant des calculs et les formules empiriques donnant les ordres de grandeur ;
- 3. *Essais de laboratoire* ; Jet Erosion Test (JET), Erosion Function Apparatus (EFA), Canaux Hydrauliques, ... ;
- 4. *Essais de terrain* ; Jet Erosion Test, Essais de surverse in situ, Expérimentation à grande échelle, ... ;
- 5. *Codes de calcul* ; informations relatives aux codes de calculs validés disponibles.
- 6. *Evaluation de la sûreté* ; pratiques internationales référencées.

3. PRATIQUE ET REX D'EDF SUR L'ANALYSE DU RISQUE DE RUPTURE PAR SURVERSE DES BARRAGES EN REMBLAI ET DES DIGUES

3.1. Les deux questions qui peuvent être posées à l'ingénieur

L'ingénieur peut être concrètement confronté à deux types de questions relatives au risque de surverse des ouvrages hydrauliques en remblai :

- Lorsque qu'un écoulement de surverse caractérisé par un limnigramme a été mis en évidence pour l'une des situations de chargement étudiée pour un ouvrage donné, quel va être le comportement de cet ouvrage face à cette sollicitation ? L'érosion va-t-elle se développer jusqu'à la rupture (rupture selon la définition de la CIGB : vidange incontrôlée partielle ou totale du volume d'eau stocké à l'amont de l'ouvrage) ? Quelle va être la cinétique du processus d'érosion ? Pour ce type de questions, la formation d'une brèche et la rupture et ne sont pas supposées a priori. Le processus d'érosion peut ne pas s'initier malgré la surverse ou s'initier puis s'arrêter avant qu'il n'y ait formation d'une brèche sur toute la hauteur du remblai.
- Dans le cadre d'une Etude de Dangers ou d'une étude de plan d'alerte, on souhaite déterminer l'hydrogramme de brèche correspondant à une situation de chargement donnée, afin d'utiliser ensuite cet hydrogramme de brèche comme condition limite amont d'un calcul d'onde de rupture dans la vallée à l'aval du barrage ou dans la zone protégée par la digue. Pour ce type de question, la formation d'une brèche et la rupture sont supposées a priori et l'on cherche à déterminer l'hydrogramme de brèche le plus réaliste possible pour calculer ensuite la propagation de l'onde de rupture.

La pratique et le REX d'EDF pour traiter ces deux types de questions sont présentés ci-après. Le premier type de questions est traité dans le paragraphe intitulé « Analyse du risque de rupture par surverse ». Le second type de questions est traité dans le paragraphe intitulé « Estimation de l'hydrogramme de brèche ».

3.2. Analyse du risque de rupture par surverse

L'étude d'évaluation de la sûreté d'un ouvrage permet de mettre en évidence si l'ouvrage peut être soumis à une surverse parmi les situations de chargement étudiées. Lorsqu'une situation de surverse est mise en évidence, en étant caractérisée par un ensemble de limnigrammes définis au droit de chaque section transversale de l'ouvrage soumise à surverse, deux stratégies d'ingénierie peuvent être envisagées :

- Soit l'on considère que la surverse est une situation interdite et l'étude d'évaluation de la sûreté s'arrête là en concluant à des marges de sécurité insuffisantes vis-à-vis du risque de surverse, conduisant très probablement le maître d'ouvrage à engager des travaux de confortement ;
- Soit l'on souhaite poursuivre l'analyse en évaluant le comportement de l'ouvrage au cours de la surverse, pour déterminer notamment si une rupture aurait lieu ou pas et pour déterminer l'ampleur du processus d'érosion et sa cinétique. Cette deuxième stratégie pourrait s'envisager pour des ouvrages à enjeu de sûreté aval faible ou modéré et s'applique également si l'on cherche à évaluer le comportement de l'ouvrage au-delà des situations de chargement réglementaires.

Lorsque cette deuxième stratégie d'évaluation du processus d'érosion par surverse est retenue, deux approches sont actuellement utilisables par l'ingénieur :

- L'utilisation de critères empiriques à dire d'expert, utilisables pour tout type d'ouvrage en remblai ;
- Un calcul déterministe, basé sur la physique, du processus d'érosion à l'aide du code WinDAM C (NRCS) ou du code EMBREA (HR Wallingford). L'utilisation de ces codes est pour l'instant uniquement réservée aux remblais homogènes et de géométrie simple (i.e. sans risberme) constitués de matériaux fins cohésifs.

3.2.1. Critères empiriques à dire d'expert

Très peu d'éléments existent dans la littérature pour définir les conditions de surverse sur un ouvrage hydraulique en remblai qui conduisent à la formation d'une brèche.

Toutefois, il est bien évident qu'un écoulement de surverse d'une hauteur de moins de 5 cm au-dessus de la crête de l'ouvrage et d'une durée de quelques minutes ne présente aucun risque de formation d'une brèche dans un barrage ou une digue de plusieurs mètres de hauteur, si l'on exclut tout processus d'érosion interne. La surverse n'implique donc pas systématiquement la rupture d'un ouvrage en remblai et définir des conditions de surverse en-deçà desquelles un écoulement de surverse ne présente pas de risque de rupture pour l'ouvrage a donc bien un sens et une réalité physique.

Les critères de surverse utilisés jusqu'à présent à EDF sont ceux généralement admis par la profession comme des conditions en-deçà desquelles l'ouvrage ne risque pas de rompre. Ces critères sont :

- Hauteur de surverse au-dessus de la crête de l'ouvrage inférieure à 20 cm

Et

- Durée de surverse inférieure à 20 minutes.

Ces critères sont à dire d'expert. Ils sont issus d'un retour d'expérience non formalisé des cas de surverse de barrages en remblai. Leur niveau de justification est donc faible. Ils reposent néanmoins sur le retour d'expérience de nombreux cas de barrages en remblai qui ont surversé et qui n'ont pas rompu (barrage de Trairi au Brésil, nombreux cas documentés aux USA, barrage de l'Etang de Neuve Forge ayant résisté à une surverse de 10 cm pendant 24h en 2011, barrages ayant surversé sans rompre durant les crues de l'Aude en 2018, ...). Ils pourront être amenés à être confirmés ou à être modifiés en fonction des progrès à venir de l'état de l'art dans le domaine. Ces critères sont utilisables pour tout type d'ouvrage en remblai (barrages ou digues).

3.2.2. Calcul du processus d'érosion avec les codes WinDAM C ou EMBREA

Dans le cas d'un barrage homogène, de géométrie simple (talus amont et aval sans risberme et de fruit homogène sur tout le parement) et constitué d'un matériau homogène, fin et cohésif, l'érosion par surverse peut être modélisée à l'aide de deux logiciels représentant chacun les mêmes processus physiques. Ces deux logiciels sont bien adaptés à une activité d'ingénierie (simplicité et rapidité d'exécution) et ont fait l'objet d'une validation internationale (cf. [5]). Ces deux logiciels sont :

- WinDAM C, développé par l'USDA-ARS et distribué par le NRCS, code gratuit, utilisant le système d'unités impériales.
- EMBREA, développé et vendu par HR Wallingford et qui reprend la même modélisation physique que WinDAM. Utilise le système d'unités SI.

Ces deux logiciels ont été validés dans le cadre d'un projet international piloté par le DSIG, auquel EDF a contribué activement. Les données de validation utilisées provenaient d'essais expérimentaux à grande échelle, menés au laboratoire HERU de l'ARS (remblais de 2 m de hauteur) et en Norvège (remblais de 5 m de hauteur), ainsi que sur des cas réels de rupture de barrage en remblai. Ce travail d'évaluation et de validation, qui a été réalisé conjointement par les modélisateurs des logiciels et par des ingénieurs utilisateurs et non modélisateurs, de différentes organisations et pays, a conclu à des performances satisfaisantes de ces deux logiciels (cf. [5]).

3.3. Estimation de l'hydrogramme de brèche

3.3.1. Le problème posé et les trois approches utilisables

Le problème posé est de calculer l'inondation consécutive à la rupture d'un barrage ou d'une digue au travers d'une étude d'onde de rupture. La condition aux limites amont de ce calcul d'onde de rupture est l'hydrogramme de brèche, c'est-à-dire l'évolution du débit s'écoulant à travers la brèche en fonction du temps.

Trois approches sont utilisables pour déterminer l'hydrogramme de brèche :

- Estimation du débit maximum de brèche à l'aide d'une formule empirique, puis construction d'un hydrogramme de brèche simplifié (généralement triangulaire) ;
- Estimation du débit maximum de brèche à l'aide d'une loi de seuil et d'une estimation de la largeur maximale de la brèche, puis construction d'un hydrogramme de brèche simplifié se basant sur une vitesse moyenne d'élargissement de la brèche ;
- Calcul déterministe de l'hydrogramme de brèche à l'aide du code WinDAM C ou EMBREA, réservé pour l'instant uniquement aux remblais homogènes et de géométrie simple constitués de matériaux fins cohésifs.

3.3.2. Formules empiriques de débit maximum de brèche

Les formules empiriques de brèche disponibles ont été conçues pour estimer de manière très rapide le débit maximum de brèche dans les barrages en remblai. Elles sont mal adaptées pour être utilisées sur des digues ou des remblais de canaux.

Les formules empiriques de brèche utilisées classiquement par la profession ne prennent en compte qu'au plus deux paramètres pour déterminer un débit maximum de brèche : le volume du réservoir et la hauteur du barrage. Elles ont été établies par des régressions linéaires basées sur ces deux paramètres et utilisant des bases de données de cas réels de rupture plus ou moins étendues. En ne tenant pas compte de la résistance à l'érosion du matériau constitutif du remblai, la plupart de ces formules négligent un paramètre essentiel du processus d'érosion et par conséquent du débit qui passe à travers la brèche.

L'ingénieur doit garder à l'esprit que ces formules ne sont capables au mieux que de fournir des ordres de grandeur. Leur utilisation n'assure pas l'obtention de débits maximum de brèche conservatifs, excepté la formule CLF qui a toujours conduit jusqu'à présent à des résultats conservatifs. Il convient d'utiliser l'ensemble des formules présentées ci-dessous et de ne jamais fournir une estimation qui serait le résultat d'une seule formule. Après avoir utilisé plusieurs formules, l'ingénieur doit faire son propre jugement de la plage de valeurs de débit maximum de brèche à retenir.

Les formules qu'il est recommandé de prendre en compte sont les suivantes :

Formule de Froehlich (1995)

Cette formule à 2 paramètres a été établie sur la base d'une vingtaine de cas de rupture.

$$Q_p = 0,607 (V_r)^{0,295} (H_w)^{1,24}$$

H_w est la hauteur d'eau au-dessus du fond de la brèche, exprimée en mètres. A défaut d'être connu précisément, ce paramètre est souvent pris égal à la hauteur du barrage.

V_r est le volume du réservoir avant la rupture, exprimé en m^3 .

Formule de Costa (1985)

Cette formule à 2 paramètres a été établie sur la base d'une trentaine de cas de rupture.

$$Q_p = 0,981 (H_d V_r)^{0,42}$$

H_d est la hauteur du barrage, exprimée en mètres.

Formules de Molinaro (1989)

Ces deux formules à 2 paramètres ont été établies à l'aide de la base de données utilisée par Costa et d'une analyse dimensionnelle.

La première formule s'applique à des matériaux de remblai résistant relativement bien à l'érosion, tels que des argiles bien compactées d'un barrage en terre homogène ou d'un noyau central épais.

$$Q_p = 0,116 (g H)^{0,5} H^2 (V/H^3)^{0,22}$$

H étant la hauteur du barrage, en mètres et V , le volume de la retenue avant la rupture, en m^3 .

La seconde formule s'applique à des matériaux granulaires fins sans cohésion.

$$Q_p = 0,07 (g H)^{0,5} H^2 (V/H^3)^{0,5}$$

Formule CLF (Courivaud, Lempérière, Fry) (2006) [8]

Cette formule à 4 paramètres n'a pas fait pour l'instant l'objet d'un ajustement par régression linéaire.

$$Q_p = a (H_d)^2 + c H_d (V_r)^{0,5}$$

H_d est la hauteur du barrage, V_r est le volume du réservoir.

a est un paramètre pris jusqu'à présent égal à 1, mais qui pourra faire ultérieurement l'objet d'ajustement.

c est un paramètre représentant de manière empirique la cinétique d'érosion du remblai, dépendant du type d'ouvrage de la manière suivante :

- $c = 0,15$ pour les ouvrages en terre peu ou mal compactés ;
- $c = 0,1$ pour les ouvrages compactés avec des moyens modernes, en terre homogène, en matériaux alluvionnaires à masque amont ou les ouvrages zonés munis d'un noyau faiblement résistant à l'érosion ;
- $c = 0,01$ pour les ouvrages modernes zonés et bien compactés, munis d'un noyau résistant relativement bien à l'érosion.

Formule de Xu et Zhang (2009) [9]

Cette formule à 4 paramètres a été établie à partir d'une base de données de 41 cas de rupture, dont 23 par surverse, le reste étant des cas de rupture par érosion interne.

$$Q_p = 0,133 (g (V)^{5/3})^{0,5} (V^{1/3} / H)^{-1,276} e^{FM+ER}$$

V représente le volume d'eau au-dessus de la brèche, H représente la hauteur d'eau au-dessus de la brèche. FM est un paramètre dépendant du mode de rupture :

- FM = -0,788 si rupture par surverse
- FM = -1,232 si rupture par érosion interne.

ER est un paramètre représentant l'érodabilité :

- ER = -0,089 pour une érodabilité élevée ;
- ER = -0,498 pour une érodabilité moyenne ;
- ER = -1,433 pour une érodabilité faible.

La dispersion des résultats fournis par ces quatre formules est illustrée sur les deux graphiques suivants. Pour ces deux graphiques, les formules CLF et de Xu & Zhang ont été utilisées en prenant en compte une faible érodabilité du matériau constitutif du remblai.

Ces deux graphiques présentent les résultats obtenus pour un cas test hypothétique d'un barrage en faisant varier sa hauteur de 20 à 50 m (Figure 3) ou son volume du réservoir de 50 à 100 hm³ (Figure 4).

A partir du majorant et du minorant choisis pour encadrer le débit maximum de brèche, un hydrogramme de brèche triangulaire (Figure 5) peut être défini par les trois points suivants :

- (T₀, Q_p = 0) : point origine de l'hydrogramme ;
- (T₁, Q = Q_{max}) : point du pic de débit. T₁ est estimé égal à T₀ + d, d étant la durée de montée du débit jusqu'au pic. Cette valeur de d est estimée à dire d'expert, dans une plage de valeurs variant généralement d'environ 30 minutes à quelques heures, en fonction des informations disponibles sur la hauteur de l'ouvrage, sa section transversale et la connaissance que l'on a de la résistance à l'érosion des matériaux qui le constituent.
- (T₂, Q = 0) : point de fin de l'hydrogramme (retour à un débit nul). T₂ est déterminé de manière à ce que l'intégrale de l'hydrogramme soit égale au volume du réservoir.

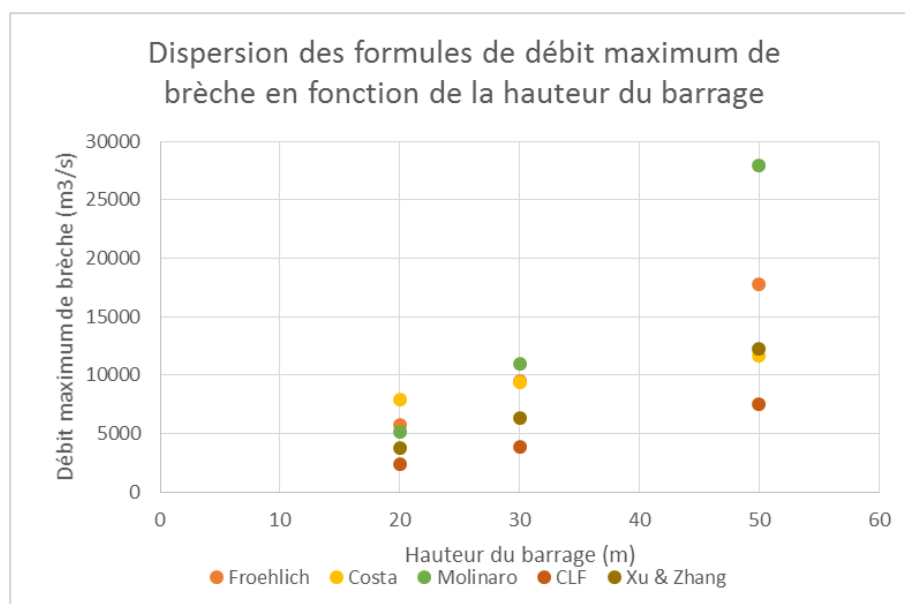


Figure 3 : Dispersion des formules de débit maximum de brèche en fonction de la hauteur du barrage

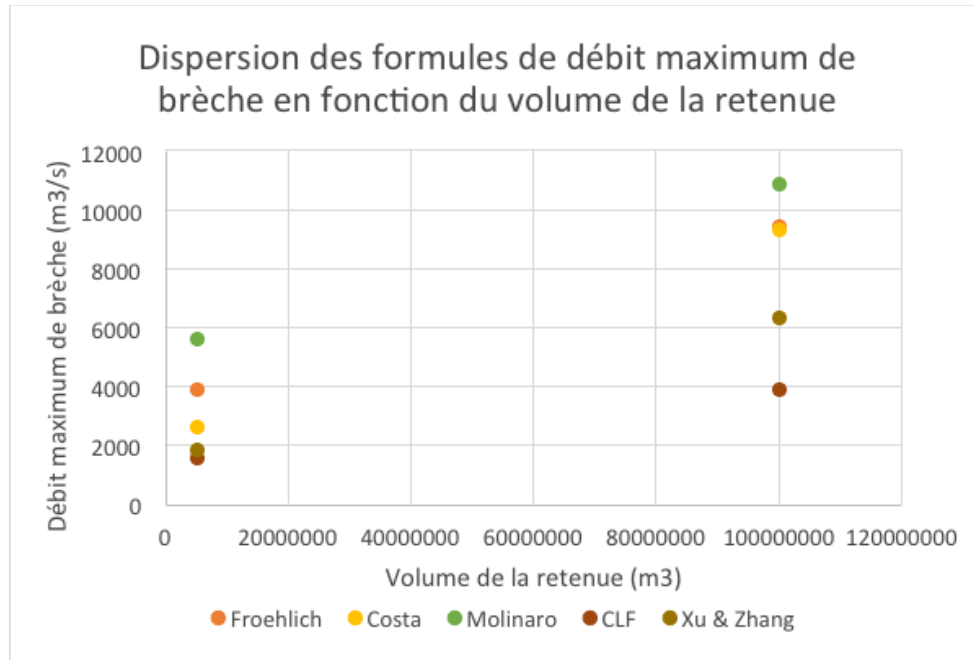


Figure 4 : Dispersion des formules de débit maximum de brèche en fonction du volume de la retenue

3.3.3. Estimation du débit maximum de brèche par une loi de seuil

Cette approche a été développée plus spécifiquement pour les digues, pour lesquelles les formules empiriques de débit maximum de brèche présentées ci-dessus ne sont pas bien adaptées.

Le débit maximum de brèche peut être estimé à partir d'une largeur maximale de brèche et de l'application d'une loi de débit de seuil. Dans cette approche, l'incertitude provient principalement de l'estimation de la largeur maximale de brèche et cette incertitude est importante.

Trois approches peuvent être considérées, selon la configuration de l'ouvrage étudié :

1. La partie en remblai qui est soumise à un écoulement de surverse est encadrée par des frontières inérodables (structures génie civil rigides) relativement proches (quelques dizaines à centaines de mètres). Dans ce cas, la largeur maximale de brèche peut être, en première approche et de manière conservative, considérée comme la distance entre les deux structures rigides.
2. La largeur maximale de brèche peut être estimée à l'aide d'une formule empirique.
3. La largeur maximale de brèche peut être estimée à partir d'une vitesse d'élargissement de brèche et de la durée de la surverse.

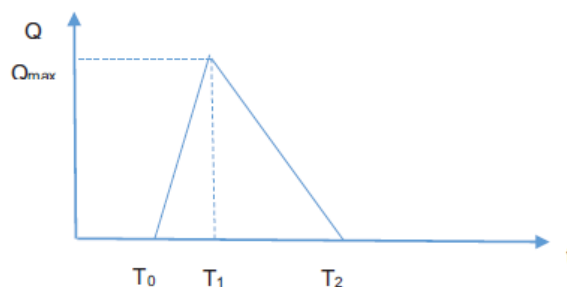


Figure 5 : Construction d'un hydrogramme de brèche simplifié

Lorsque la première approche n'est pas applicable (cas le plus fréquent), il est recommandé d'utiliser conjointement les approches 2 et 3 et de retenir une plage de valeurs à partir de l'analyse des résultats fournis par ces deux approches.

Les formules empiriques à utiliser pour estimer la largeur maximale de brèche sont présentées ci-après. B désigne la largeur maximale de brèche. H représente la hauteur entre le niveau d'eau en amont de la brèche et le fond de la brèche. V désigne le volume du réservoir, en m³.

Formule de la FERC

- Valeurs les plus probables : $2 \times H \leq B \leq 4 \times H$
- Valeurs extrêmes : $H \leq B \leq 5 \times H$

Formule de l'USBR

$$B = 3 \times H$$

Formule de Froehlich

$B = 0,1803 \times K_0 \times V^{0,32} \times H^{0,19}$ avec $K_0 = 1,4$ pour les ruptures par surverse.

Une représentation de l'incertitude associée à ces formules (FERC valeurs les plus probables mini et maxi et Froehlich) est représentée sur le graphique ci-dessous, où les résultats de ces formules ont été comparés aux données de largeur de brèche observées sur 29 cas de rupture de barrage réservoir documentés.

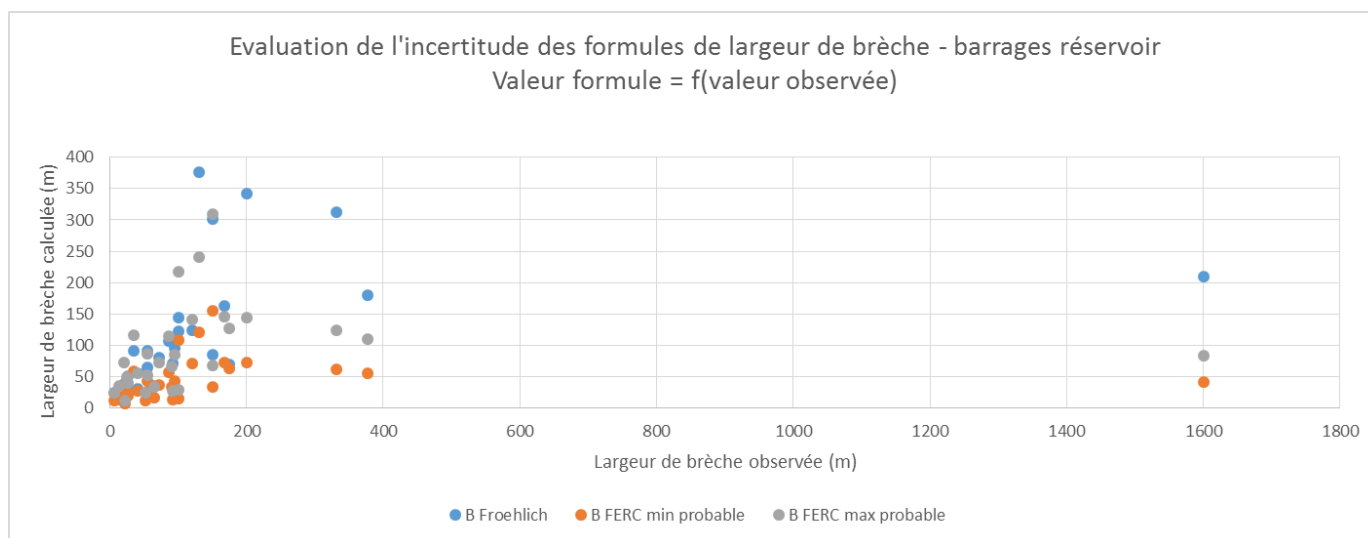


Figure 6 : Evaluation de l'incertitude des formules de largeur de brèche

La largeur maximale de brèche peut également être estimée en multipliant la durée de surverse ou de formation de brèche par la vitesse d'élargissement de brèche.

Les ordres de grandeur de vitesse d'élargissement de brèche suivants, issus des données de rupture collectées par EDF, peuvent être utilisés :

- Barrages anciens constitués de matériaux très érodables (compactés sans moyen mécanique) : 10 à 15 m/min.
- Barrages modernes (compactés avec des moyens mécaniques) mais constitués de matériaux érodables à très érodables : 0,5 à 3 m/min.
- Barrages modernes constitués d'un corps homogène ou d'un noyau moyennement résistant à l'érosion : 0,1 à 0,5 m/min.
- Barrages modernes constitués de matériaux très résistants à l'érosion : 0,01 à 0,1 m/min.

Si la durée de surverse n'est pas connue, la durée de formation de brèche (T_f exprimée en heure) peut être estimée à l'aide des formules empiriques ci-après :

Formule de la FERC

- Remblais compactés : $0,1 \leq T_f \leq 1$
- Remblais peu compactés : $0,1 \leq T_f \leq 0,5$

Formule de l'USBR

$$T_f = 0,011 B$$

Formule de Froehlich

$$T_f = 0,002254 \times V^{0,53} \times H^{0,9}$$

B représente la largeur de la brèche, exprimée en mètres.

V représente le volume du réservoir à l'amont de la brèche, exprimé en m^3 .

H représente la hauteur entre le niveau d'eau amont et l'altitude du fond de la brèche, en mètres.

La formule de débit de seuil qu'il est recommandé d'utiliser est la formule utilisée dans le code WinDAM, à savoir :

$$Q_{\max} = g^{1/2} L (2H/3)^{3/2}$$

Q_{\max} est le débit maximum de brèche, en m^3/s ; L est la largeur de brèche en mètres, H est la hauteur entre le niveau d'eau à l'amont de la brèche et le niveau d'eau aval, en mètres.

3.3.4. Calcul de l'hydrogramme de brèche avec le code WinDAM ou le code EMBREA

Un calcul déterministe à l'aide d'une modélisation basée sur la physique validée au niveau international est recommandé, avec la mise en œuvre du code WinDAM C ou du code EMBREA, dans les conditions suivantes :

- L'ouvrage est un barrage réservoir ou le barrage latéral d'un canal ou d'un bief de fleuve endigué ;
- L'ouvrage peut être considéré comme étant constitué d'un matériau homogène fin et cohésif ;
- Les parements amont et aval peuvent être considérés par un fruit constant sur chaque face ;
- La condition de chargement hydraulique amont peut être représentée par une courbe de capacité de la retenue, une condition initiale de cote du plan d'eau et un hydrogramme de crue entrant défini à partir de l'instant initial de la modélisation ;
- Le sol constitutif du remblai a été caractérisé par sa densité humide, sa cohésion non drainée (Cu) et les deux paramètres de résistance à l'érosion mesurés par des essais de Jet Erosion Test : K_D (qui représente la cinétique de l'érosion) et T_{auc} (qui représente la contrainte de cisaillement critique à partir de laquelle débute l'érosion).

Ces deux codes mettent en œuvre une modélisation physique conceptuelle 3D du processus d'érosion de type « Head Cut Migration ». Ils se basent sur une représentation 2D verticale de la géométrie du remblai, des caractéristiques géotechniques du matériau constitutif du remblai et des conditions hydrauliques amont et aval. Ils prennent également en compte la résistance à l'érosion par surverse due au type de revêtement sur la face aval et sur la crête de l'ouvrage : enherbement, rip-rap. Ils fournissent comme résultats l'hydrogramme de l'écoulement qui franchit l'ouvrage (qu'il y ait formation de brèche ou pas) ainsi que la géométrie de la zone érodée (largeur, profondeur).

3.4. Besoins d'amélioration de la boîte à outils de l'ingénieur

Pour les barrages en remblai, les principales lacunes de l'état de l'art actuel sont les suivantes :

- Physique non décrite et donc non modélisée pour l'érosion par surverse des ouvrages en remblai constitués de matériaux sablo-graveleux et de manière plus générale, constitués de matériaux alluvionnaires à granulométrie étalée ;
- Représentation de l'érosion de corps de barrages en remblai zonés ;
- Représentation de géométries 2D verticales complexes (fruits variables sur le parement, présence de risbermes,...).

Pour les digues, les principales lacunes de l'état de l'art actuel sont les suivantes :

- Non prise en compte de la dissymétrie d'élargissement de la brèche ;
- Non prise en compte de l'érosion de la fondation (souvent plus érodable que le corps de la digue) ;
- Physique non décrite et donc non modélisée pour l'érosion par surverse des digues constituées de matériaux sablo-graveleux et de manière plus générale, constitués de matériaux alluvionnaires à granulométrie étalée.

Comblent ces lacunes va demander des années d'efforts soutenus de recherche et développement et de collaboration internationale. Mais ces efforts sont indispensables pour améliorer notre maîtrise d'une des deux principales causes de rupture des barrages et des digues.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Zhang L., Pend M., Chang D., Xu Y., *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment*, Wiley, 499 p., 2016.
- [2] ICOLD, *Etude d'onde rupture de barrage, Synthèse et recommandations*, Bulletin n°111, 1998.
- [3] ICOLD, *Du bon usage des modèles numériques dans l'ingénierie des barrages*, Bulletin n°155, 2013.
- [4] ILH, *International Levee Handbook*, CIRIA, 2015.
- [5] DSIG, *Evaluation of Numerical Models for Simulating Embankment Dam Erosion and Breach Processes*, DSO-2017-02, USBR, août 2017.
- [6] CFBR, *Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai*, Edition CFBR, oct 2015.
- [7] ICOLD, *Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations*, Bulletin n°164, 2015.
- [8] Courivaud J.-R., Lempérière F., Fry J.-J., A new analysis of embankment dam failures by overtopping. *22^{ème} Congrès International de la CIGB, Barcelone, 16-23 juin 2006*, Q. 86 – R. 66.
- [9] Xu Y., Zhang L., Breaching parameters for earth and rockfill dams, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 12, 2009.

