

COMMENT EST CONSTRUIT ET VALORISE LE REX ACCIDENTOLOGIQUE DANS LA REDACTION D'UNE EDD

How built and use historical dam safety feedback

Marie CUBAYNES, Nicolas HUMBERT, Marielle MONTERYMARD

EDF CIH et EDF DTG

marie.cubaynes@edf.fr ; nicolas.humbert@edf.fr; marielle.monterymard@edf.fr

MOTS CLEFS

Mode de défaillance, REX, accidentologie, EDD

KEY WORDS

Failure mechanism, feedback, accidentology, Risks Assessment

RÉSUMÉ

Le REX accidentologique du parc EDF, du parc français, et des ouvrages à l'international s'enrichit :

- *pour alimenter le chapitre 7 des EDD,*
- *pour analyser et lister les différents modes de défaillance des organes et ouvrages et ainsi nourrir l'analyse de risques de l'Etude de dangers dans le chapitre 8.*

Il sert aussi la méthodologie globale et notamment les guides de cotations en appui des contributeurs métiers pour caractériser l'occurrence des événements nécessaire à la rédaction de l'analyse de risques.

Contrairement à la pratique de la première génération d'EDD, les EDD post2018 exploitent pour chaque ouvrage des données d'accidentologie par similitude avec l'ouvrage étudié afin de permettre au groupe de travail de l'étude de dangers d'identifier les incidents et accidents potentiels. L'analyse de l'incidentologie constitue une source d'information de l'analyse de risques et est susceptible de dégager les « précurseurs » de ces phénomènes et les barrières susceptibles d'en réduire le risque. L'analyse des phénomènes pour le barrage étudié alimente l'argumentaire de cotation ou l'argumentaire de non-retenu de l'évènement.

Après avoir rappelé l'exigence réglementaire du contenu du chapitre 7, l'article présente la méthode utilisée par EDF-CIH pour construire et rédiger ce chapitre de l'EDD. Il zoome ensuite sur trois sujets de REX particuliers (érosion aval, risque sismique des barrages voutes et défaillance des vannes) avec la veille réalisée sur les sujets et l'analyse concrète, adaptée aux ouvrages, reportée dans le chapitre 7.2 des EDD. Enfin, il fait le lien avec l'analyse de risques du chapitre 8 alimentée en partie par ces REX. Il conclut sur les pistes d'amélioration concernant la veille et le REX sur tous les métiers.

ABSTRACT

The historical dam safety feedback is used to:

- *Write the chapter 7 of the periodic risks assessment,*
- *Find and analyse the different failure mechanisms,*
- *Enrich the risks analysis.*

This feedback helps the global methodology, especially notation guides used by the multi-disciplined teams who built the risks analysis. Contrary to practice of the first generation, the risks assessments use more accidentology informations to find warning signs, failure mechanism and barriers which reduce the risk.

1. EXIGENCES REGLEMENTAIRES

L'arrêté de septembre 2018 définissant le contenu d'une Etude De Dangers (EDD) [1] demande de consacrer le chapitre 7 de l'EDD à « L'étude accidentologique et au retour d'expérience ».

Ce chapitre doit s'intéresser en premier lieu au barrage et à ses organes en retraçant pour chaque événement les causes, les circonstances, les conséquences réelles et potentielles ainsi que les mesures d'améliorations que leur analyse a conduit à mettre en œuvre. Cela permet notamment de revenir sur les événements connus par l'ouvrage et sur le traitement des PSH (Précurseur Sureté Hydraulique) et EISH (Evènement Important pour la Sureté Hydraulique). L'arrêté indique que les thèmes suivants sont à évoquer dans ce chapitre : le génie civil, les organes d'évacuation des eaux, le contrôle-commande, les télécommunications ou l'alimentation électrique, la retenue, les berges.

Dans un second temps, ce chapitre doit aussi s'appuyer sur le REX accidentologique d'autres ouvrages pour identifier des scénarios analogues qui pourraient se produire sur l'ouvrage étudié.

2. APPROPRIATION PAR EDF-CIH

L'objectif de ce chapitre 7 est de décrire les scénarios de défaillance pouvant potentiellement affecter l'ouvrage étudié :

- soit parce qu'ils se sont déjà produits sur le site, et n'auraient pas fait (ou pas pu faire) l'objet d'un traitement satisfaisant pour qu'ils ne se reproduisent pas ;
- soit parce qu'ils se sont déjà produits sur des ouvrages similaires, et que le retour d'expérience de ces événements n'aurait pas été totalement pris en compte localement.

Le chapitre 7 a donc été divisé en deux :

- 7.1 Accidentologie du barrage étudié
- 7.2 Analyse d'évènements portant sur des ouvrages similaires

Les paragraphes suivants détaillent l'organisation et la méthodologie pour rédiger ce chapitre 7.

2.1. Méthodologie EDF-CIH des EDD : construction du chapitre 7.1

Pour rédiger ce sous-chapitre, la participation de la MOA est particulièrement importante. L'ensemble des données et analyses des événements survenus sur l'ouvrage doivent être mis à la disposition du groupe de travail de l'EDD par l'exploitant. Les événements concernés sont tous les événements mettant en cause le génie civil, les organes de sécurité, le contrôle commande, les télécommunications ou l'alimentation électrique ainsi que l'exploitation de l'ouvrage, et toutes les situations qui ont pu concerner le barrage, la retenue et les berges et qui ont eu (ou aurait pu avoir ?) une incidence sur la sécurité des personnes et des biens.

Le groupe de travail prend ensuite le temps de faire une analyse de leurs causes et circonstances, ainsi que de leurs conséquences, réelles et potentielles. Une attention particulière doit être portée à décrire les causes des incidents, mettre en regard les mesures mises en œuvre, et conclure sur la possibilité qu'un tel incident se produise à nouveau.

Concrètement, les éléments de type EISH et PSH qui sont survenus depuis la dernière EDD sont listés de façon exhaustive. D'autres événements sur cette même période peuvent être listés et analysés sommairement (synthèse des causes, mesures correctives et préventives) quand ils donnent des indications sur la sensibilité particulière de certains matériels. Si une série d'incidents similaires concerne le même organe, une analyse plus approfondie doit être menée sur la série.

Exemple de tableaux intégrés à ce sous-chapitre :

Évènement	Date	Organe ou barrière impacté	Actions mises en place
PSH : Non démarrage groupe électrogène barrage	10/01/2022	<u>Description :</u> Lors de la tournée mensuelle, le groupe électrogène (GE) ne démarre pas lors du test de son bon fonctionnement. L'Exploitant identifie immédiatement que le problème vient du démarreur (cloche cassée, empêchant le démarreur de lancer le moteur du G.E.). <u>Conséquences :</u> Non disponibilité du GE en cas de perte d'alimentation ENEDIS au barrage. <u>Organe ou barrière impacté :</u> Vanne de réglage aval de la vidange de fond.	<u>Analyse :</u> Le non-démarrage du groupe électrogène provient d'une pièce HS du démarreur (cloche). <u>Actions réalisées :</u> 12/01/2022 : Mise à disposition du GE mobile sur site. 25/01/2022 : Remplacement du démarreur par un neuf et requalifications de mise en service du GE. 25/01/2022 : Réparation de l'ancien démarreur et stockage en pièce de rechange en magasin.
Le PSH est soldé. La situation est améliorée car la pièce qui a empêché le démarrage du groupe est neuve et une pièce de rechange est maintenant disponible sur place. Aucune autre suite n'est nécessaire.			

De plus, les événements significatifs survenus depuis la mise en eau de l'ouvrage sont aussi détaillés quand ils font état d'événements importants permettant d'apprécier ensuite les argumentaires et les modes de défaillance indiqués dans l'analyse de risques du chapitre 8 (par exemple un comportement à la mise en eau ou à jeune âge du barrage).

Une attention est portée à éviter les redondances dans l'EDD car des Rex sont déjà demandés au 5.2.2 concernant « le comportement de l'ouvrage lors d'aléas naturels » ou peuvent aussi apparaître au 5.2.1 « Conception initiale du barrage et des organes annexes, construction et travaux importants ». Le lien est alors fait avec ces différentes parties.

2.2.Méthodologie EDF-CIH des EDD : construction du chapitre 7.2

L'analyse de l'incidentologie du parc français et à l'international constitue une source d'information de l'analyse de risques et est susceptible de dégager les « précurseurs » de ces phénomènes et les barrières susceptibles d'en réduire le risque. Elle est réalisée à partir du REX du parc EDF, de la veille organisée au sein de notre unité EDF-CIH, et de différentes sources et bases de données comme le CIGB, le CFBR, la base ARIA, le site de l'ASDSO ... (Cependant, elle n'est pas complète. Il n'est pas

toujours possible d'obtenir des informations détaillées des incidents et accidents notamment à l'international. Ce REX est particulièrement pauvre coté hydromécanique et contrôle-commande.)

Il ne s'agit pas de dresser une liste exhaustive de tous les accidents ou incidents survenus, mais d'analyser si la conception du barrage tient compte de l'accidentologie, ce qui doit réduire la sensibilité de l'ouvrage.

En complément de cette liste de scénarios potentiels, sans en tirer des données statistiques, la fréquence des incidents au niveau mondial peut être aussi une indication pour la cotation des événements initiateurs (cotation de l'occurrence).

Le retour d'expérience français et international montre une résilience de certains types de barrages vis-à-vis de certains aléas ; ces informations aussi sont valorisées dans les analyses, argumentaires et cotations.

Ce travail alimente ensuite la préparation de l'analyse de risques, détaillée dans le chapitre 8 de l'EDD. EDF-CIH réalise cette analyse en groupe de travail avec les différents contributeurs métiers.

Pour chaque thème sont décrits :

1. Le ou les incidents
2. Les enseignements retenus
3. Une analyse du phénomène pour le barrage étudié avec en conclusion si le risque est retenu ou pas à l'ADR avec un argumentaire associé.

Une démarche de progression est en cours pour couvrir la totalité du périmètre demandé par la réglementation. D'abord seul le REX GC a été réalisé. Il est récemment complété d'un REX sur certains types de vannes. Le travail de capitalisation du REX se poursuit pour couvrir plus de technologies. Les parties contrôle-commande sont en cours de construction.

2.3. Exemple de rédaction du 7.2 concernant la fissuration dans le corps d'une voûte mince

Le développement de fissures (hors pied amont) est en général lié à la hardiesse de la conception et / ou par une prise en compte insuffisante des effets thermiques. En dehors de ces causes, le gonflement du béton (Réaction Alcali Granulats ou autres) génère également des fissurations.

1. Accidents

Les concepteurs de barrages voûte ont dessiné dans les années 50 des voûtes très minces pour optimiser le taux de travail du matériau béton mais n'ont pas prévu les effets défavorables liés à la géométrie, aux contrastes de raideur entre structure et fondation et aux effets thermiques.

Ainsi le barrage du Gage I (France) a dû être abandonné suite à l'apparition d'une fissure traversante avec rejet. Un nouveau barrage plus épais a été construit à l'amont immédiat (Gage II). De même, au barrage des Plats (France) construit dans une vallée large, une fissure traversante en pied de voûte a conduit à la transformation de cette voûte en barrage poids par construction d'un massif en béton contre le parement aval de la voûte. A Tolla (France), les fissures apparues à la première mise en eau, et principalement sous effets thermiques, ont également conduit à renforcer la voûte en l'appuyant sur des anneaux horizontaux épais.

Le gonflement du béton d'un barrage voûte pourrait conduire à terme, à une déstabilisation des culées (Maury, France) ou à une déstructuration locale de la structure par des réseaux de fissures (Bimont, France). Les travaux de confortement consistent généralement à essayer de limiter la poursuite de la

réaction (étanchéité), à essayer de réduire l'état de contrainte (sciage de saignées verticales comme au barrage de Piantello en Italie) et renforcer la stabilité des culées si elles existent (mise en place de tirants). Dans certains cas, il a été jugé préférable / plus économique d'abandonner certains barrages et de les remplacer par des barrages en aval (Serra en Suisse, Alto Ceira au Portugal).

2. Enseignements

Les exemples d'accidents mentionnés ci-dessus ne peuvent pas être considérés comme des ruptures car il n'y a pas eu de relâchement incontrôlé d'eau de la retenue. Les voûtes sont en effet des structures hautement hyperstatiques qui permettent une redistribution des efforts avant d'arriver à la rupture. D'autre part, les comportements pathologiques se manifestent par des indices très facilement observables et permettent des interventions de mise en sécurité. Pour autant, certains de ces accidents ont donné lieu à de très lourds travaux de réhabilitation voire l'abandon du barrage.

3. Analyse pour le cas du barrage étudié

En ce qui concerne le barrage concerné, les contraintes dans l'ouvrage sont modérées et inférieures aux résistances supposées des bétons. Les reconnaissances concernant le béton ont montré d'excellentes propriétés physiques et n'ont montré aucun signe de gonflement. L'occurrence de ce phénomène pourra donc être faible avec une potentielle valorisation de la barrière abaissement du plan d'eau vu la cinétique de dégradation.

2.4. Autres sujets détaillés dans l'article

Dans la suite de l'article, **trois thèmes de retour d'expérience** sont détaillés pour en faire ressortir des enseignements et des applications aux barrages étudiés dans les EDD (Erosion aval, risque sismique sur les voutes et défaillance de vannes).

Le choix de ces trois thèmes permet de montrer :

- d'un côté un thème ayant une accidentologie récente qui a poussé à traiter ce sujet plus en profondeur dans les EDD (Erosion aval).
- puis un thème où le REX international est positif et permet de s'y appuyer pour relativiser le risque de défaillance sous séisme sous certaines conditions.
- Enfin un thème autour de la partie hydromécanique pour partager certaines avancées en dehors des REX du génie civil.

Dans le chapitre 6, un lien est fait avec l'apport de ces enseignements lors de la réalisation de l'analyse de risques.

3. APPLICATION AU REX EROSION AVAL

La connaissance des phénomènes de défaillance en lien avec le transfert des écoulements et la dissipation d'énergie aval en crue s'est enrichie ces dernières années grâce aux REX de différents événements internationaux et aux recherches en cours sur le sujet. L'événement d'Oroville en 2017 notamment a marqué les esprits de toute la communauté Hydro.

L'EDD est le moment idéal pour se questionner ou se requestionner sur les fonctions de transfert et dissipation d'énergie des évacuateurs de crues et plus largement des autres ouvrages annexes (vannes de fond, déchargeurs usines...), ainsi que de la sensibilité éventuelle d'une surverse ou d'un contournement par des crues extrêmes. C'est le choix que fait EDF-CIH en traitant ce point en plusieurs étapes durant le processus de l'EDD pour affiner l'analyse et les conclusions de tous les modes de défaillance possibles (exemples : érosion par cavitation, soulèvement d'un tapis par des pressions ...).

3.1. Les événements de référence et leurs enseignements

Le tableau ci-dessous donne une liste non exhaustive d'exemples utilisés par EDF-CIH pour cette analyse du risque « défaillance transfert et dissipation » des écoulements d'une crue.

Type de barrage / Phénomènes	Exemples étudiés	Enseignements
Barrages voutes, érosion aval et fosses ultimes d'érosion	Barrage de Kariba : Le barrage de Kariba sur le Zambèze est une illustration d'un cas de fosse à la fois très importante, mais au mécanisme de formation graduelle, qui aura permis l'analyse et la mise en place de mesures de mitigation. En effet, il connaît depuis les années 60, un approfondissement progressif de sa fosse d'érosion aval. Barrage haut de 130 m, la fosse créée en aval a dépassé 80 m sans rupture du barrage ou de sa fondation avant de réaliser des travaux en 2022.	Pour les puissances de déversement importantes, la cinétique de formation des fosses joue un rôle important. La bibliographie (notamment bulletin CIGB) indique que les fosses ultimes d'érosion sont en général atteintes pour des temps de déversement de 100 à 300 h en pointe. Pour des crues courtes, le profil d'érosion ultime, dans le cas d'un rocher compétent, est en général loin d'être atteint. Les crues petites ou intermédiaires que subissent les ouvrages permettent également de jauger les capacités de dissipation d'énergie et constituent des précurseurs permettant de prendre d'éventuelles mesures de confortement. Le suivi de l'évolution est nécessaire pour identifier les évolutions.
Surverse d'un barrage voute	Barrage de Gibson (USA) Le barrage Gibson (61 m de haut) a connu une crue exceptionnelle en juin 1964. Cette dernière a entraîné une surverse par-dessus la crête durant plus de 20 heures avec une lame d'eau maximale de près d'un mètre. Fondé sur un rocher relativement compétent, aucun dommage notable n'a été constaté sur la voûte ou la fondation. Un tapis de réception aval a tout de même été construit in fine.	Le retour d'expérience français et international montre une résilience certaine des barrages voutes vis-à-vis des phénomènes d'érosion aval. Construits en général sur des fondations rocheuses compétentes, ces dernières présentent une certaine résistance intrinsèque aux phénomènes d'érosion rocheuse.
Tapis de réception	Barrage de Grangent Le barrage de Grangent a connu deux crues importantes en 1963, puis 1966. La première crue semble avoir fragilisé le tapis existant sans dégât étendu hormis le constat de fissures traversantes du tapis béton. La seconde crue de 1966, quoique d'intensité inférieure, a créé des dégâts sensiblement plus importants. Une partie du tapis a été disloquée. En partie centrale, une fosse de 7 m a été créée, environ 5 m en rive droite. Les crues de 1963 et 1966 au barrage de Grangent ont duré plusieurs jours avec des volumes évacués d'un autre ordre de grandeur. Malgré ces dégâts, le comportement du barrage de Grangent	Les tapis de réception et les coursiers peuvent ne pas être bien dimensionnés, conçus ou réalisés. Les épaisseurs de béton, ancrages, compétence du rocher, ferrailage, nature des joints, fonctionnement du système de drainage sont autant de paramètres qui peuvent entraîner la ruine de l'ouvrage en crue ou après une succession de crues. L'analyse de l'adéquation des charges, vitesses, puissances avec l'ouvrage en place est primordiale. La non-maintenance peut aussi entraîner une défaillance. Le REX montre qu'un suivi de l'état est important et peut permettre de faire des alertes en prévention de la défaillance. Le diagnostic exhaustif

	n'a pas montré de signe anormal. Un tapis imposant a été reconstruit en 1967-68.	demandé par l'arrêté EDD permet de dresser le bilan d'état de ces ouvrages.
--	--	---

3.2. Organisation interne EDF

Dans le processus de l'EDD, le groupe de travail de l'EDD, constitué de référents des différents domaines, fait appel à un groupe dont les membres permanents sont des experts de géologie, hydraulique et stabilité. La conception et l'état de l'ouvrage, l'historique des crues passées, l'hydrologie, les cotes atteintes et tous les calculs associés au transfert et à la dissipation d'énergie (cavitation, trajectoires de jet, énergie à dissiper ..), ainsi que les calculs de stabilité du barrage et de ses ouvrages de dissipation sont partagés et analysés. Les comparaisons avec les ouvrages du parc, le REX international et la littérature récente sur le sujet permettent de conclure collégialement sur :

- la conformité de l'ouvrage au « passage de la crue sans dommage » de l'Arrêté Technique Barrage,
- la cotation des événements en lien avec le transfert et la dissipation de l'énergie et les argumentaires associés,
- la valeur minimale de la cote de danger de l'ouvrage étudié en lien avec l'érosion par surverse, contournement ou endommagement des ouvrages EVC.

4. APPLICATION AU REX SISMIQUE POUR LES BARRAGES VOUTES

4.1. Contexte mondial

Les cas de rupture de barrages associés aux séismes sont extrêmes rares. La littérature ne relate la rupture que d'un grand barrage béton sous séisme extrême : le BMR de Shih Kang en 1997 lors du séisme de ChiChi [7] : le barrage a été cisailé par la faille débouchant sous le barrage et créant un ressaut de 8.8m en vertical (On peut se référer à la base de données ICOLD des ruptures de barrages [6] qui recense une seule rupture de barrage béton sous séisme).

Ce paragraphe se focalise sur le comportement des barrages voutes, pour lesquels aucune rupture au séisme n'est identifiée à l'échelle mondiale. Malgré ce bon comportement, les guides internationaux continuent de recommander des démonstrations calculatoires au séisme sur les voutes, posant des difficultés par le simple fait qu'aucun mode de rupture n'a été observé suite à un séisme. De plus, ces démonstrations nécessitent fréquemment des calculs transitoires coûteux en moyens numériques et en temps d'étude. Le très bon retour d'expérience des barrages voutes synthétisé ci-dessous pose question sur la nécessité de ces démonstrations numériques particulièrement complexes sur les voutes. Leur apport à la sûreté des installations est questionné, dès lors que le bon comportement des voutes sous chargement statique a été démontré.

4.2. Evidences du bon comportement des barrages voute au séisme

Le retour d'expérience du comportement des barrages-voûtes au séisme apparaît très favorable. Seules des dégradations localisées en crête d'ouvrage au voisinage des culées et des augmentations transitoires de débits de drainage ont été jusqu'à présent observées.

Les cas les plus connus sont ceux du barrage de Pacoima situé en Californie (USA), haut de 113 m, construit en 1929, qui a subi les séismes de San Fernando en 1971 (magnitude 6,6, 5 km de l'épicentre) et de Northridge en 1994 (magnitude 6,7, 18 km de l'épicentre). Pour ce dernier séisme, des accélérations maximales de 1,76 g en horizontal et de 1,6 g en vertical ont été enregistrées au sommet de l'appui rive gauche. L'ouvrage n'a connu dans les deux cas que des dégâts mineurs avec des ouvertures et fermetures du joint vertical en rive gauche au contact entre la voûte et la culée-poids

d'une amplitude de 5 cm. A noter cependant que le niveau de la retenue était bas lors de ces deux séismes, ce qui ne permet pas de préjuger du comportement de la voûte à retenue pleine. La charge hydrostatique limitée peut cependant également s'avérer défavorable au séisme en limitant l'état de compression des joints verticaux et donc favoriser leur ouverture.

Les barrages-voûtes de Rapel (109 m de hauteur) et d'Ambiesta (59 m de hauteur) au Chili ont subi respectivement en 1985 et 1976 des séismes de magnitude 7,7 et 6,5 à des distances épicentrales de 45 et 22 km. Des accélérations maximales comprises entre 0,3 et 0,4 g ont été enregistrées au niveau des appuis. Ces deux ouvrages n'ont pas été endommagés au cours de ces séismes. Des dégradations ont été observées sur le barrage de Rapel au niveau de la prise d'eau et de l'évacuateur de crues dans les parties non liées au barrage, en raison des déphasages entre les mouvements de ces structures annexes et le barrage. Il faut noter que le barrage de Rapel comporte une ceinture antisismique. Le barrage de Rapel a subi le 27 février 2010 le séisme de Cauquenes, d'une magnitude 8,8 à une distance épicentrale de 60 km. Les accélérations enregistrées étaient comprises entre 0,14 g et 0,21 g suivant les directions. On a noté un déplacement relatif de 0,5 mm entre deux plots de la rive gauche, situés à proximité d'une faille de la fondation et une augmentation des fuites de 13 l/s à 40 l/s.

Lors du séisme de Wenchuan (Chine) du 12 mai 2008, le barrage voûte de Shapai de 130 m de hauteur (plus haute voûte du monde construite en Béton Compacté au Rouleau (BCR), mise en eau en 2003) a été soumis à de très fortes secousses. Le barrage est situé à 30 km de l'épicentre, et pendant le séisme, le réservoir était à sa cote maximale. La conception sismique du barrage a été basée sur une accélération horizontale maximale du sol de 0,138 g, alors que l'accélération ressentie a dû être de 0,5 g. Aucun dommage n'a été observé sur la voûte. Par contre, le bâtiment en béton armé situé sur la crête et les superstructures de la tour de prise ont subi des déformations irréversibles mais réparables.

On peut enfin noter le cas du barrage voute à double courbure Teché, d'une hauteur de 183 mètres et disposant d'un joint « pulvino » en pied. Bien que l'ouvrage ait été conçu en utilisant un coefficient pseudo-statique de 0,15g, il a résisté au séisme de Chi-Chi de 1999 avec 0,86 g enregistrée en crête (soit près de 6 fois l'accélération de dimensionnement). Aucun dommage n'a été observé sur les bétons du barrage. Il n'y avait aucun signe de mouvements verticaux au niveau des joints. Quelques fissures mineures ont été observées sur la bordure de la route d'accès. Les débits des drains ont augmenté dans les jours suivant le séisme, mais sont ensuite revenus à la normale. Le niveau du réservoir a été abaissé de 3 mètres par mesure de précaution.

4.3. Actions EDF afin de mieux caractériser le risque sismique

EDF participe à des campagnes de reconnaissances post sismique dans le cadre de l'association française de parasismique (AFPS) afin de compléter son REX positif et sa compréhension du bon comportement des barrages aux séismes. La voute de Teché citée plus haut est un premier exemple de REX positif obtenu dans ce cadre (AFPS 2000 [10]). Plus récemment EDF a participé à deux campagnes au Japon dans la péninsule de Noto (AFPS 2024 [9]) et en Turquie (AFPS 2023 [8]) à la suite des deux séismes de magnitudes Mw 7,8-7,5 qui se sont produits le 6 février 2023 dans les régions de Kahramanmaraş et ont touché de nombreux barrages. Cette dernière campagne a permis de mettre en évidence le très bon comportement du barrage voute de Berke, localisé au plus près de la faille. Cette voute de 201 m de haut n'a présenté aucun dommage visible. De plus, tous les vannes en crête sont demeurées fonctionnelles et le portique de crête n'a subi aucun dégât visible.

Le bon comportement global au séisme des barrages-voûtes peut s'expliquer par le fait que ces structures sont dimensionnées pour supporter des efforts horizontaux (poussée de la retenue) et capables de résister aux suppléments transitoires d'efforts horizontaux liés au séisme. Ce qui n'est pas

le cas des bâtiments, dimensionnés principalement pour les efforts verticaux. Ce sont aussi des ouvrages hyperstatiques qui peuvent fissurer sans risquer de rupture fragile.

4.4. Application de ce REX dans les EDD

Les guides de cotation utilisés lors de l'analyse de risques vont pouvoir s'appuyer sur tout ce REX positif pour permettre les choix les plus justes des niveaux de fréquence des événements en lien avec le séisme sur les barrages voutes.

5. APPLICATION AU REX DES VANNES

L'analyse de l'accidentologie des vannes de barrage sur le parc mondial permet de déterminer les principaux modes et faits générateurs de défaillances associés aux trois grands risques : rupture, non ouverture et ouverture intempestive. Ce rex a ainsi permis de construire les arbres de défaillance type des Evénements Redoutés Centraux (ERC) relatifs aux vannes. L'analyse de l'accidentologie et de l'incidentologie sur le parc EDF a également permis d'alimenter les modèles statistiques et probabilistes sur lesquels se basent le guide de cotation des événements initiateurs en lien avec l'hydromécanique (sensibilité intrinsèque de la vanne, défaillance de la chaîne cinématique...). On se reportera à l'article sur le guide de cotation [4] pour plus de détails.

Un certain nombre de cas de défaillances emblématiques ont également été analysés et lorsque les vannes traitées dans l'EDD présentent des similitudes techniques avec ces vannes accidentées, l'EDD vient expliciter si l'accident survenu ailleurs pourrait avoir lieu sur l'ouvrage ou dans le cas contraire, quels sont les éléments de conception, de maintenance ou d'exploitation qui permettent d'être rassurant et de minimiser l'occurrence d'un tel événement sur l'ouvrage traité.

Deux exemples de valorisation du REX de cas emblématique de défaillance de vannes à flotteur sont présentés ci-dessous et complétés par un REX sismique.

5.1. Saint Marc (1995) : Non ouverture puis ouverture et refermeture brutale intempestive d'une vanne segment automatique à flotteur et contrepoids.

1. Accident/incident

A l'occasion d'une crue en décembre 1995, deux des trois vannes de crue automatiques (n°2 et n°3) restent bloquées en position fermée alors que les puits de leurs flotteurs débordent. La troisième vanne (n°1) s'ouvre normalement. Afin de permettre le passage de la crue, l'exploitant décide d'ouvrir les vannes de fond. Moins d'une heure après, les vannes n°2 et n°3 s'ouvrent brutalement entraînant un fort surdébit à l'aval (d'environ 290 m³/s). Les conséquences sont heureusement réduites grâce à la présence en aval d'un barrage de démodulation (surdébit réduit à 170 m³/s) en aval duquel la surélévation du niveau d'eau atteint 10 cm.

Après son ouverture brutale, la vanne n°3 fonctionne correctement. La vanne n°2 reste, quant à elle, bloquée en pleine ouverture puis chute brutalement quelques heures plus tard alors que les puits à flotteur sont vides. Cette chute engendre des déformations plastiques sur la structure de la vanne et la désolidarisation partielle des flotteurs et des bras les reliant à la vanne (due à la chute des flotteurs dans les puits vides).

Aucun dommage n'est à déplorer à l'aval, mais la vanne n°2 est fortement endommagée et ne peut plus assurer sa fonction.

2. Enseignements

L'analyse de cet événement a montré que les événements initiateurs de la non-ouverture de ces vannes, puis leur ouverture intempestive et la dégradation de la vanne 2, sont d'une part liés au dispositif automatique à flotteur et contrepoids qui est par conception très sensible aux augmentations d'efforts de manœuvre et donc à toute modification de conception lors de travaux (ajout de masse, modification de type d'étanchéité, ...) décalant le point d'équilibre, et d'autre part liés à une pathologie de gonflement du béton du barrage, ce qui a conduit à un rétrécissement des pertuis et qui a entraîné une augmentation des frottements lors des manœuvres.

À la suite de cet événement, une motorisation électrique et des crémaillères ont été installées sur la vanne n°2.

3. Analyse pour le cas de la vanne du barrage étudié

Dans le cas de la vanne de X, ce mode de défaillance a été pris en compte dans l'analyse de risques avec une cotation en B (probable) de la sensibilité intrinsèque des vannes. Il faut également garder en mémoire que ce type de problématique a commencé à être observée sur la vanne X en 1995, l'évacuateur de crues étant soumis également à la pathologie de gonflement béton. Suite à cet événement, une attention particulière a été portée à ce sujet, avec un suivi du resserrement des passes par l'auscultation tous les 15 jours et la mesure de jeu lors des essais d'ouverture totale des vannes. Enfin, suite à la présente étude, des recommandations ont été aussi intégrées au §9.2 de l'EDD afin d'augmenter la sûreté de l'ouvrage.

5.2. Barrage de Ganivet (2001) : Non ouverture d'une vanne segment automatique à flotteur, puis ouverture intempestive

1. Accident/incident

Le 08 mars 2001 à 13h, l'exploitant constate que la cote de la retenue est anormalement élevée (R.N. + 45cm) : les deux vannes automatiques de l'évacuateur de crues du barrage, bloquées en position fermée, n'assurent plus leur fonction.

Il abaisse alors progressivement le plan d'eau par ouverture maxi de la vanne de débit réservé et ouverture de la vanne qui permet de dériver les apports de la Colagne vers un affluent de la Truyère jusqu'à la limite possible imposée par la contrainte de débit. À 23h, la RN est retrouvée mais à ce moment, la vanne EVC R.G s'ouvre brutalement provoquant un sur-débit à l'aval pendant quelques minutes puis se referme et reprend la régulation du plan d'eau.

Les deux vannes ont été submergées par une lame d'eau de 20cm. De plus, l'ouverture brutale de la vanne RG a provoqué pendant quelques minutes un sur-débit à l'aval.

Bien que la route bordant le barrage ait été inondée, aucun dégât n'a été constaté sur les biens ou sur l'environnement situés à l'aval et à l'amont de ce barrage.

2. Enseignements

L'analyse de cet événement pointe la perte d'étanchéité des flotteurs qui n'ont pas été maintenus correctement les années précédentes et qui ont dérégulé l'équilibre du dispositif automatique à flotteurs, et la défaillance du dispositif de surveillance du niveau de la retenue.

3. Analyse pour le cas de la vanne du barrage étudié

Dans le cas du barrage de Y, des nombreuses opérations de maintenance ont été réalisées en 2022, et l'expertise réalisée la même année atteste du bon état général des deux vannes avec une défaillance jugée improbable.

5.3. Application au REX sismique pour les Vannes

Une synthèse bibliographique du retour d'expérience international dans le domaine hydraulique, menée sur environ 250 sources d'informations a montré qu'aucun aménagement n'a eu à subir une vidange du fait d'un endommagement majeur direct d'une vanne.

L'article du colloque CFBR 2024 sur « les vannes de barrages et séismes » [4] détaille ce travail de synthèse bibliographique et apporte des explications sur les incohérences observées entre ce que les approches calculatoires laissent présager et l'absence de REX de défaillance.

Il ressort de cet article la conclusion suivante : sous réserve que l'EDD montre que les vannes aient été conçues et réalisées selon des standards reconnus et que leur bilan d'état et de fonctionnement soit satisfaisant, dans le contexte de sismicité modéré français, le REX positif peut être valorisé pour justifier du bon comportement des vannes aux séismes, sans utiliser de calcul.

6. UTILISATION DANS L'ANALYSE DE RISQUES DU CHAPITRE 8 DE L'EDD

Même si le chapitre 7 ne permet pas d'avoir une liste exhaustive de tous les accidents et incidents, le groupe de travail se sert des exemples choisis, car les plus pertinents, pour alimenter la préparation de l'analyse de risques : identifier des événements initiateurs et les modes de rupture associés, avoir des indications concernant les cotations de ces événements et identifier les barrières potentielles.

EDF-CIH, compte tenu du nombre de barrages de classe A et B à traiter à EDF Hydro, a fait le choix de construire des ERC type (Evénements Redoutés Centraux) à adapter aux spécificités de l'ouvrage par le groupe de travail de l'EDD (Voir article CFBR 2025 sur la construction des ERC1 [2]). Ces ERC sont notamment construits avec le REX accidentologique et les modes de défaillance issus de son analyse. Ainsi, plusieurs ERC1 type (ERC rupture barrage) sont à disposition des groupes de travail en fonction du type d'ouvrage puisque les événements initiateurs amenant à la rupture d'un barrage en remblai (Voir article CFBR 2025 rex de l'érosion interne [3]) sont très différents de ceux amenant à la rupture d'un barrage voute ou encore d'un barrage poids béton. De plus, les argumentaires des cotations s'appuient aussi sur le REX réalisé dans le chapitre 7 tant au niveau du barrage lui-même que du REX national et international.

De même, les guides de cotation développés par EDF-CIH s'appuient sur les spécificités des barrages ayant subi des accidents ou incidents pour donner des critères objectifs permettant au groupe de travail de l'EDD de choisir les classes d'occurrence des différents événements initiateurs.

7. CONCLUSION

A EDF, une veille existe, en interne, depuis des années pour collecter des informations sur les ouvrages hors du parc EDF, en France et à l'international et faire des fiches synthétiques pour informer la direction et intégrer ces éléments dans les EDD.

D'autres bureaux d'études, maitrises d'ouvrages et organismes agréés font aussi leur veille interne.

Des informations sont plus largement disponibles dans des bulletins CIGB, des bulletins accidentologiques du CFBR, la base ARIA ou des communications et articles dans les colloques et congrès ou revues spécialisées ; sans pour autant permettre une veille commune, partagée et exhaustive.

Une construction d'un REX commun a été réalisée sur des vannes récemment via le CFBR. Cette pratique pourrait être généralisée. Le CFBR pourrait par exemple prendre en charge la compilation d'un REX inter-exploitants et d'un suivi accidentologique plus global.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Arrêté du 3 septembre 2018 modifiant l'arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu, 5 septembre 2018
- [2] CFBR 2025 : Approche méthodologique pour la recherche des causes de la rupture d'un barrage et l'élaboration de l'ERC1 rupture barrage, P.Divoux.
- [3] CFBR 2025 : Enseignements pour l'étude du comportement des barrages en remblais, du retour d'expérience accidentologique et incidentologique liés aux mécanismes d'érosion interne, N.Lebrun
- [4] CFBR 2024 : Les vannes de barrage et séismes : éléments de l'état de l'art et perspectives pour la France et les pays faiblement à modérément sismique, D.Graveleine.
- [5] CFBR 2025 : Comment sont construits les arbres de défaillance de vannes et le guide de cotation hydromécanique des EDD barrages, M.Monterymard.
- [6] ICOLD Incident database Bulletin 99 update Statistical analysis of dam failures - ICOLD – 2019
- [7] USCOLD – Observed performance of dams during earthquakes (Vol I vol II & VolIII)
- [8] AFPS- Rapports de missions post sismiques - 2023 KAHRAMANMARAS (TURQUIE) - 6 février 2023
- [9] AFPS - Rapports de missions post sismiques du séisme du 1er Janvier 2024 de Noto (Japon)
- [10] AFPS – Rapport de la mission AFPS - Séisme de Chi-Chi -(Taiwan) du 21 septembre 1999