

APPROCHE METHODOLOGIQUE POUR LA RECHERCHE DES CAUSES DE LA RUPTURE D'UN BARRAGE ET L'ELABORATION DE L'ERC1 RUPTURE BARRAGE.

Methodological approach for dam failure analysis.

Patrick DIVOUX, Frederic LAUGIER, Marie CUBAYNES

EDF-CIH, 4 allée du lac de Tignes 73290 LA MOTTE SERVOLEX

patrick.divoux@edf.fr ; frederic.laugier@edf.fr ; marie.cubaynes@edf.fr ;

MOTS CLEFS

Rupture barrage ; arbre des causes ; cotation des événements ; modes de défaillance

KEY WORDS

Dam failure; cause tree; events notation; failure modes

RÉSUMÉ

L'Évènement « Rupture barrage » est désigné Evènement Redouté Central 1 (ERC1) dans les Etudes De Dangers (EDD) des barrages. C'est l'évènement le plus redouté et le plus important en termes d'enjeux.

A l'origine de la rupture d'un barrage, il y a soit un défaut de résistance (une Défaillance), soit un excès de sollicitation (une Agression). Par analogie, une personne peut être victime d'une Maladie ou d'un Accident. On ne recherche pas les causes d'une Défaillance (Maladie) comme on recherche les causes d'une Agression (Accident).

Les barrages sont des structures complexes et toutes différentes avec des points communs :

Ils ont deux fonctions principales :

- Retenir une grande quantité d'eau grâce à une structure solidaire de sa fondation
- Faire passer de l'eau (débit d'équipement, crue, vidange, débit réservé, ...) au travers de circuits hydrauliques dédiés

Ils sont dimensionnés pour une Cote des Plus Hautes Eaux (PHE ou ZQATB).

Ils sont soumis aux mêmes agressions.

En s'appuyant sur ces points communs, il est possible de structurer l'arbre des causes de l'ERC1.

Cet article présente la méthodologie conduisant à l'établissement d'un arbre des causes « guide ». Il constitue un cadre de cohérence rigoureux, mais non rigide. Il laisse de l'espace à la réflexion et l'intelligence collective du groupe de travail. L'établissement d'un guide de cotation et l'utilisation de la barrière de prévention « abaissement de la retenue » sont aussi présentés.

ABSTRACT

The 'dam failure' event is designated as a Central Feared Event n°1 in the safety analysis of dams. It is the most feared event and the most important in terms of issues.

The dam failure is either cause by a resistance issue or an excess of force (an Aggression). By analogy, a person can be the victim of an illness or an accident. We do not look for the causes of a Failure (Illness) in the same way as we look for the causes of an Aggression (Accident).

Dams are complex structures, all different but with some points in common:

They have two main functions:

- *To retain a large quantity of water,*
- *To allow water to pass through dedicated hydraulic circuits (spillway, bottom outlet, water intake, ...).*

They are sized for a maximum water level (MWL).

Based on these common points, it is possible to structure the ERC1 cause tree.

This article presents the methodology used to draw up a dam failure cause tree. It provides a rigorous but not rigid framework for consistency.

1. INTRODUCTION – CONTEXTE

La réglementation française a introduit en 2007 [1] l'obligation de réaliser des analyses de risques pour les grands barrages¹ à travers les études de dangers (EDD). L'EDD constitue une base de travail dans l'élaboration des stratégies de prévention. Elle s'attache à identifier les risques, quantifier leur occurrence et leurs conséquences et expliquer comment sont gérés les risques d'accidents majeurs associés au barrage.

Les EDD exigées par la réglementation française se réfèrent explicitement à l'analyse de risques [2, 3, 4]. Les méthodes d'analyse, incluant l'évaluation de la sûreté et des enjeux, sont laissées au choix du responsable de l'ouvrage et de son chargé d'études, en fonction des caractéristiques de l'ouvrage. Les EDD dont les grandes étapes sont présentées en figure 1 comprennent notamment :

- Une analyse fonctionnelle des ouvrages concernés,
- Une analyse préliminaire des risques et des modes de défaillances,
- La construction d'un arbre des causes de la défaillance ou de la rupture potentielle.

A l'issue de l'analyse préliminaire des risques, la rupture du barrage ou d'une partie significative du barrage ressort de manière systématique comme l'évènement le plus redouté. Il est désigné Evènement Redouté Central n°1 ou ERC1.

Le retour d'expérience des premières d'EDD menées par EDF a mis en évidence le besoin d'une approche méthodologique plus précise pour plus de cohérence lors de la construction de l'arbre des causes de l'ERC1 « Rupture barrage ». Cet article présente l'approche méthodologique développée par EDF et déployée lors des EDD2 [9].

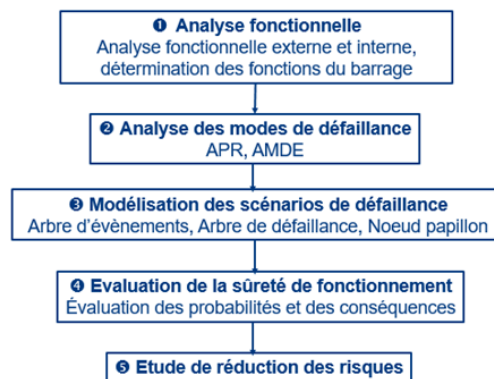


Figure 1 : La démarche des EDD en France [5]

¹ La réglementation française couvre les barrages et les digues de canaux qui, dans la suite de l'article, sont dénommés sous le terme générique barrages

2. LES POINTS COMMUNS A TOUS LES BARRAGES

Tous les barrages sont différents et sont autant d'histoires particulières. Un barrage et sa fondation constituent un ensemble complexe dont la résistance est particulièrement difficile à appréhender. L'incertitude sur le niveau de chargement est forte également. Mais les barrages ont des points communs et ont en général deux fonctions principales :

- Retenir un grand volume d'eau ;
- Faire transiter de l'eau (débit d'équipement, crues, vidange, débit réservé, ...).

Ces fonctions sont assurées par des composants principaux :

- Une structure solidaire de sa fondation retient le grand volume d'eau ;
- Des circuits hydrauliques dédiés font passer de l'eau (évacuateur de crues, prise d'eau, circuit de vidange, dispositif de restitution du débit réservé, ...).

Les barrages sont dimensionnés pour un niveau d'eau amont (et parfois aval) maximal nommé Cote des Plus Hautes Eaux (PHE² ou ZQATB). Jusqu'à cette cote, ils doivent fonctionner normalement.

Ils doivent tous résister aux mêmes agressions extérieures :

- Celles qui conduisent à atteindre la cote des PHE ;
- Le séisme et ses conséquences post-sismiques ;
- Les autres agressions involontaires (chutes de blocs sur le barrage, choc de bateau, ...) ;
- Les agressions délibérées (celles de l'homme mal intentionné)³.

L'idée est de s'appuyer sur ces points communs à tous les barrages pour structurer la recherche des causes principales de rupture.

3. LA NOTION DE RUPTURE - DEFAILLANCE OU AGRESSION

La rupture d'un barrage est fonction de la résistance R du barrage et de sa fondation et de la sollicitation F qui s'applique sur le barrage et sa fondation. En l'absence d'incertitude, la rupture se produit très exactement lorsque $F > R$. La résistance R et la sollicitation F ont des valeurs précises mais qui ne sont pas connues précisément. Notre niveau de connaissance de l'ouvrage est incomplet et donne à la notion de rupture une nature probabiliste.

Il faut donc considérer (voir Figure 2) :

- Une fonction de probabilité de résistance (R),
- Une fonction de probabilité de sollicitation (F),
- Un aléa de rupture (M) (surface d'intersection entre (R) et (F)) caractérisé, de manière quantitative, par une probabilité de rupture P_f .

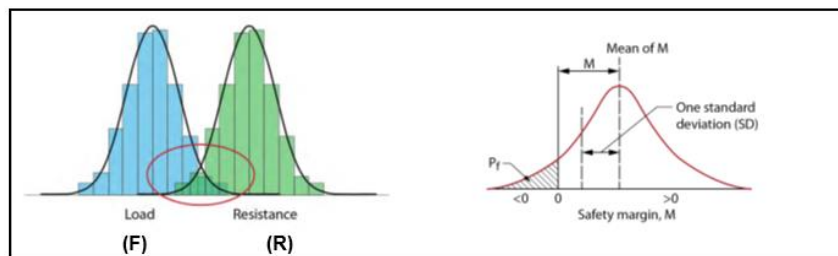


Figure 2 : Probabilité de rupture – Extraits de Lacasse & Hoeg [10]

² Cette cote est la cote de dimensionnement faisant référence dans l'Arrêté Technique Barrage de 2018 (ATB). A ne pas confondre avec les PHE d'usage, mentionnées ou non dans les cahiers de concession, et représentées sur les plans d'origine des ouvrages.

³ Cette dernière catégorie d'agressions n'a pas été inclus dans le périmètre des EDD par le législateur.

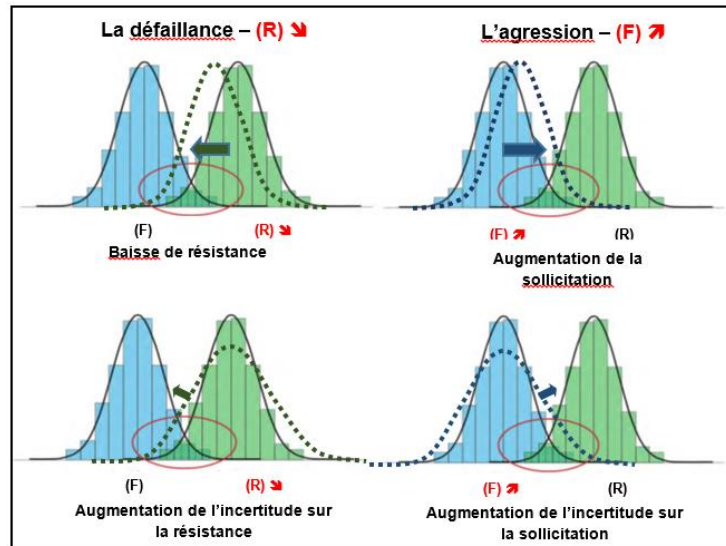


Figure 3 : Augmentation de l'aléa de rupture (défaillance et agression)

Il s'agit ainsi de rechercher ce qui fait augmenter l'aléa de rupture.

L'aléa de rupture augmente lorsque la surface d'intersection entre les courbes des probabilités de résistance et de sollicitation augmente (voir Figure 3) :

- Une baisse de la résistance probable : (R) ⬇️
- Une augmentation de la sollicitation probable : (F) ⬆️

L'augmentation de l'aléa de rupture peut faire suite à :

- Une Défaillance consécutive à :
 - La baisse de la résistance
 - L'augmentation de l'incertitude sur la résistance
- Une Agression consécutive à :
 - L'augmentation de la sollicitation
 - L'augmentation de l'incertitude sur la sollicitation

4. METHODOLOGIE DE RECHERCHE DES EVENEMENTS INITIATEURS (EI)

La recherche des événements initiateurs s'appuie sur les notions de défaillance et d'agression (voir Figure 4).

La méthodologie de recherche des événements initiateurs doit être adaptée au type de rupture. On ne recherche pas les causes d'une Défaillance comme on recherche les causes d'une Agression car la cause originelle est différente. Par analogie, une personne peut être victime d'une maladie ou d'un accident. On ne recherche pas les causes d'une maladie comme on recherche les causes d'un accident.

Dans un cas, la défaillance (maladie), on se tourne en priorité à l'intérieur de l'ouvrage (de la personne) pour rechercher ce qui est fragile. Dans l'autre cas, l'agression (l'accident), on observe d'abord l'environnement extérieur pour rechercher ce qui peut arriver et comment.

4.1. Recherche des Evénements Initiateurs d'une rupture par Défaillance

L'analyse des risques de rupture par Défaillance est menée en se tournant vers l'intérieur du barrage et de sa fondation et comprend 5 étapes :

1. Etude des modes de rupture possibles
2. Choix de la sollicitation de référence (en crue, hors-crue, pour des conditions d'ouverture des vannes particulières, ...)
3. Recherche des Evénements Initiateurs (défauts de résistance, problème de conception, ...)

4. Définition des scénarios de rupture par Défaillance. Un scénario de rupture par défaillance comprend un mode de rupture, une sollicitation de référence et un évènement initiateur.
5. Evaluation de la marge (aléa de rupture) pour les scénarios de rupture retenus

4.2. Recherche des Evènement Initiateurs d'une rupture par Agression

L'analyse des risques de rupture par Agression est menée en se tournant vers l'extérieur du barrage et comprend 4 étapes.

1. Recherche des agressions potentielles
2. Etude des modes de rupture possible
3. Définition d'un niveau de sollicitation acceptable pour l'ouvrage
4. Evaluation de l'occurrence de dépassement du niveau de sollicitation acceptable

5. LES MODES DE RUPTURE D'UN BARRAGE

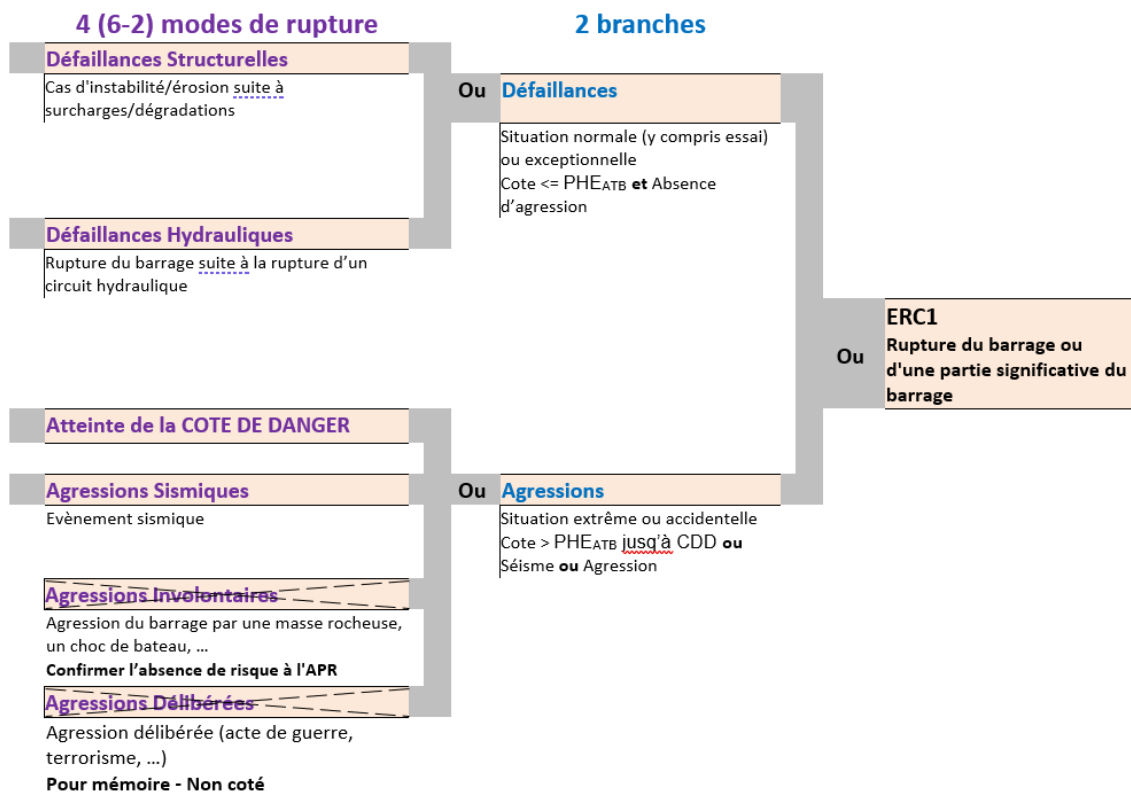


Figure 4 : Causes de la rupture d'un barrage – Défaillance ou Agression

5.1. Les causes de ruptures par défaillance d'un barrage

L'ouvrage se rompt dans une situation qualifiée de normale ou exceptionnelle de crue (cote $\leq$ PHE). Les sollicitations sont connues et auraient dues être supportées sans dommage. L'analyse des risques de rupture par défaillance est menée en analysant les caractéristiques du barrage et de sa fondation et en recherchant les scénarios de rupture potentiels.

Qu'est-ce qui est fragile dans l'ouvrage ? Il peut être victime de la perte d'une de ses fonctions principales, ce qui conduit à distinguer :

- La défaillance structurelle ou la perte de la fonction « retenir l'eau »,
- La défaillance (d'un circuit) hydraulique ou la perte de la fonction « faire transiter l'eau ». Cela se produit lorsque la défaillance d'un circuit hydraulique entraîne la rupture du barrage, ce qui n'est pas systématique.

L'arbre des causes présentera chacun des scénarios de « défaillance » qui aura été identifié.

La défaillance structurelle

Une partie de la structure, de sa fondation ou de l'interface structure-fondation n'assure pas son rôle dans la fonction « retenir l'eau ». La défaillance structurelle regroupe les notions « Instabilité barrage » et « Instabilité fondation ».

La rupture trouve sa cause dans des défauts structurels ou Evénements Initiateurs (EI) tels qu'un défaut de conception (cas de charge oublié ou mal appréhendé, mauvais dimensionnement, ...), un défaut de réalisation et/ou un défaut d'entretien et maintenance (dégradations et/ou vieillissement).

Ces défauts génèrent un scénario de défaillance structurelle et chaque scénario comprend :

- Des événements initiateurs ;
- Un contexte de référence (ensemble de sollicitations) considéré comme défavorable (en crue, hors crue, vannes ouvertes, vannes fermées, ...) ;
- Un mécanisme de rupture.

Pour les barrages, une défaillance structurelle est susceptible d'engendrer des mécanismes de rupture de type :

- Instabilité mécanique d'ensemble ;
- Érosion interne ;
- Contraintes excessives.

Le groupe des défaillances structurelles comprend, par exemple, les ruptures historiques du barrage de Gleno (Italie -1923), du barrage de Malpasset (France - 1958) ou du barrage de Teton (Etats-Unis - 1976). Elles se produisent majoritairement lors de phases de mise en eau (lorsque l'incertitude sur le niveau de résistance est plus grande) ou pour des structures vieillissantes (lorsque la résistance diminue).



Figure 5 : Exemple de défaillance structurelle – Ruine du barrage de Malpasset

La défaillance (d'un circuit) hydraulique

Ce type de rupture est associé à un circuit hydraulique qui n'assure plus la fonction « faire transiter l'eau ». Un scénario de « défaillance hydraulique » est caractérisé par :

- Un circuit hydraulique (évacuateur de crues, vidange de fond, ...) ;
- Des conditions de fonctionnement particulières ;
- Un mécanisme de défaillance du circuit hydraulique ;
- Un mécanisme de rupture du barrage consécutif à la défaillance du circuit hydraulique.

La plupart des défaillances hydrauliques sont causées par la rupture d'un composant de l'évacuateur de crues (y compris dissipation aval) mais les autres circuits hydrauliques (vidange de fond, prise d'eau, ancienne dérivation provisoire, ...) peuvent aussi engendrer ce type de défaillance.



Figure 6 : Exemple de défaillance hydraulique – Barrage d'Oroville (USA) – Février 2017 – Défaillance des EVCs

Les événements et dégradations survenues sur les barrages d'Oroville (Etats-Unis - 2017), de Toodbrook (Royaume-Uni - 2019) ou de Guatajaca (Porto Rico - 2017) illustrent le risque de défaillance hydraulique. Ils montrent également que la rupture du barrage n'est pas systématique en cas de rupture d'un circuit hydraulique. Ce risque est majoritairement lié à des difficultés d'appréhension de certains phénomènes hydrauliques (dissipation d'énergie, pression dynamique, ...) dans des conditions de fonctionnement peu ou pas éprouvées par le passé. Mais les circuits hydrauliques vieillissants (avec des aciers corrodés ou des bétons altérés) peuvent aussi conduire vers ce type de rupture. Cet événement initiateur est nommé « défaillance transfert et dissipation » dans notre méthodologie (voir la représentation d'exemples d'ERC au chapitre 6).

5.2. Les ruptures de barrage suite à une agression

L'analyse des risques de rupture par agression est menée en se tournant vers l'extérieur du barrage. La situation à la rupture est extrême ou accidentelle. Le terme « extrême » est habituellement utilisé dans les études de comportement en France pour désigner les cas de charge sismiques.

Qu'est-ce qui peut venir mettre en danger l'ouvrage et comment ? Les agressions extérieures peuvent être classées en 4 catégories :

- Exhaussement du plan d'eau (dépassement de PHE ou ZQATB) ;
- Agression sismique ;
- Autre agression involontaire ;
- Agression délibérée (Hors périmètre EDD).

L'approche méthodologique introduit la notion de « situation de danger ». Dans un premier temps, il s'agit de définir le niveau de sollicitation pour lequel le risque de rupture est jugé trop important pour l'ouvrage dans son état actuel. Cette situation dite « situation de danger » est considérée comme inacceptable. Dans un deuxième temps, l'analyse de risque recherche l'occurrence des agressions qui mènent à cette situation. C'est une approche qui peut être mise en cause dans le sens où la définition d'une situation de danger conduit à définir une résistance donnée pour l'ouvrage et à ne pas pleinement tenir compte des incertitudes sur cette résistance. En contrepartie, cette approche est facilement compréhensible, pragmatique et peut être qualifiée de robuste.

L'analyse d'une agression comprend trois étapes :

1. Analyse et recherche des agressions potentielles comme un séisme ou un dépassement de la cote des PHE ;
2. Définition de la situation de danger correspondante ;
3. Evaluation de la sûreté au travers de l'évaluation de l'occurrence d'atteinte de la situation de danger.

Dépassement de la cote PHE – Atteinte de la cote de danger (CDD)



Figure 7 : Atteinte de la cote de danger

Taum Sauk (USA) – Décembre 2005

Barrage de Palagedra (Portugal) – 7 Août 1978

Le barrage se rompt suite au dépassement de la cote de danger (cf. la définition et son application dans l'article CFBR « REX de la détermination des CDD pour 65 barrages en béton – estimations et modes de défaillance associés » [11]). Les ruptures après dépassement de cette cote comprennent, entre autres, l'ensemble des ruptures par surverse sur les barrages en remblai, l'ensemble des ruptures consécutives à des embâcles de l'évacuateur de crues et l'ensemble des ruptures consécutives à des ondes de submersion et niveaux de crue difficiles à appréhender.

Les cas de rupture de barrage par exhaussement de la cote de retenue au-delà de la cote des PHE sont analysés à partir d'une étude préalable dont l'objectif est de définir la cote de danger (CDD) de l'ouvrage. L'analyse se concentre alors sur l'occurrence d'atteinte de la CDD.

La cote de danger peut être atteinte dans les conditions suivantes :

- Hors-crue (exemple du barrage de Taum Sauk – USA – 2005) ;
- En crue en tenant compte des risques d'embâcles et de dysfonctionnement des vannes (exemple du barrage de Spencer – USA – 2019) ;
- En cas d'onde de submersion provoquée par des glissements dans la retenue, des événements naturels dans la vallée plus en amont (glissement de terrain, avalanches, débâcles glaciaires, ...) ou par la rupture d'un barrage existant plus en amont.

Sur cette base, un arbre des causes type, identifiant chacun des événements initiateurs pouvant conduire à l'atteinte de la cote de danger, est élaboré.

Agression sismique



Figure 8 : Agression sismique - Barrage de Shih-Kang (Taïwan) - Séisme du 21 septembre 1999

La rupture du barrage est la conséquence d'un séisme. Lors de l'analyse, il faut différencier :

- La rupture immédiate lors du séisme ;
- La rupture post-sismique.

Les cas historiques de rupture de barrage suite à un séisme sont plutôt rares comparativement aux autres types de rupture. Cette catégorie comprend par exemple les ruptures du barrage de Shih-Kang (Taïwan - 1999) ou celle du barrage de Van Norman (Etats-Unis - 1971 – Séisme de San Fernando).

L'analyse du risque de rupture par agression sismique est particulièrement complexe. Malgré le développement de modèles de plus en plus sophistiqués, les incertitudes sur l'aléa sismique, sur les caractéristiques des matériaux et sur les comportements non linéaires des ouvrages soumis à de forts séismes restent élevées. L'évaluation des scénarios et de la sûreté sera principalement qualitative et menée à partir d'une appréciation croisée des éléments suivants :

- L'étude de l'aléa sismique ;
- La sensibilité du barrage ;
- Les calculs et études spécifiques de la résistance au séisme de l'ouvrage ;
- Le retour d'expérience international sur la résistance aux séismes des barrages.

Autre agression involontaire

Une agression involontaire autre qu'un séisme ou un dépassement de la cote PHE est caractérisée par un choc sur le barrage qui engendre sa destruction comme par exemple la chute d'une grosse masse rocheuse sur l'ouvrage ou un choc de bateau (Voir Article CFBR [12]).

Le risque de rupture consécutif à une autre agression involontaire est très faible mais il doit néanmoins être recherché et analysé au cas par cas avant d'être éliminé.

Agression délibérée

Il s'agit de rupture liée à des actes terroristes, actes de guerre, ... L'analyse des agressions délibérées sort du périmètre des EDD. Ces analyses sont menées par ailleurs avec le degré de confidentialité adéquat.

6. SYNTHÈSE ET DECLINAISON AUX DIFFÉRENTS TYPES DE BARRAGE

Les notions développées précédemment permettent de structurer l'arbre des causes général de l'ERC1 « Rupture barrage » et d'identifier les principaux événements initiateurs.

La méthodologie est ensuite déclinée pour obtenir trois arbres types en fonction des principaux types de barrages (1. Remblais/enrochements, 2. Voute/voute avec culées, 3. Poids béton ou maçonnerie). Ceci permet d'homogénéiser nos pratiques, notamment sur le grain et la sémantique compte tenu de l'attendu important chaque année de réaliser 15 à 20 EDD sur le parc EDF.

Au groupe de travail ensuite de se l'approprier et de l'adapter à l'ouvrage, sa conception, ses sensibilités, son historique afin d'obtenir une individualisation de l'analyse de risques.

Des exemples d'ERC types sont présentés ci-après.

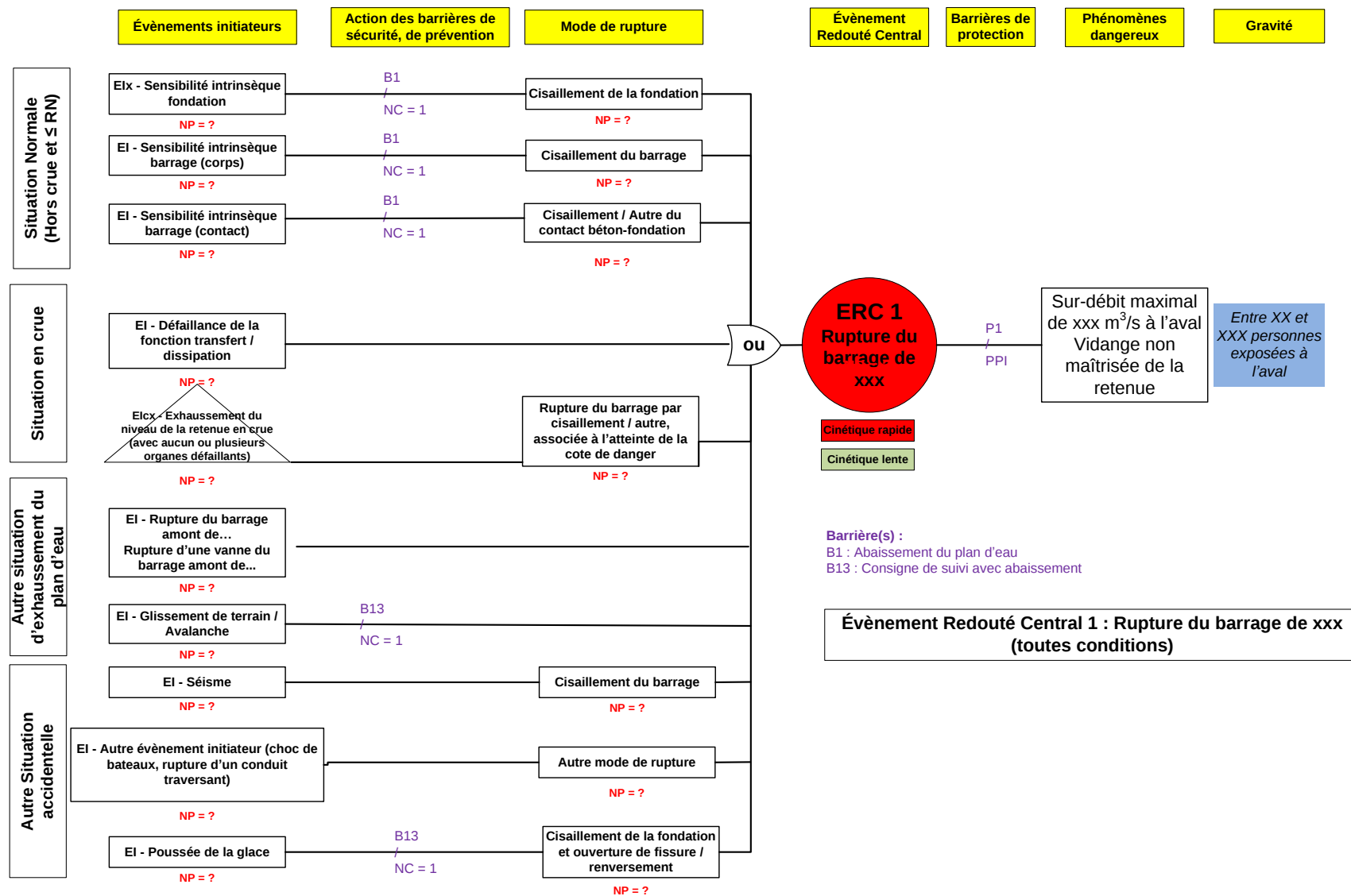


Figure 9. ERC1 – Barrage poids béton ou maçonnerie

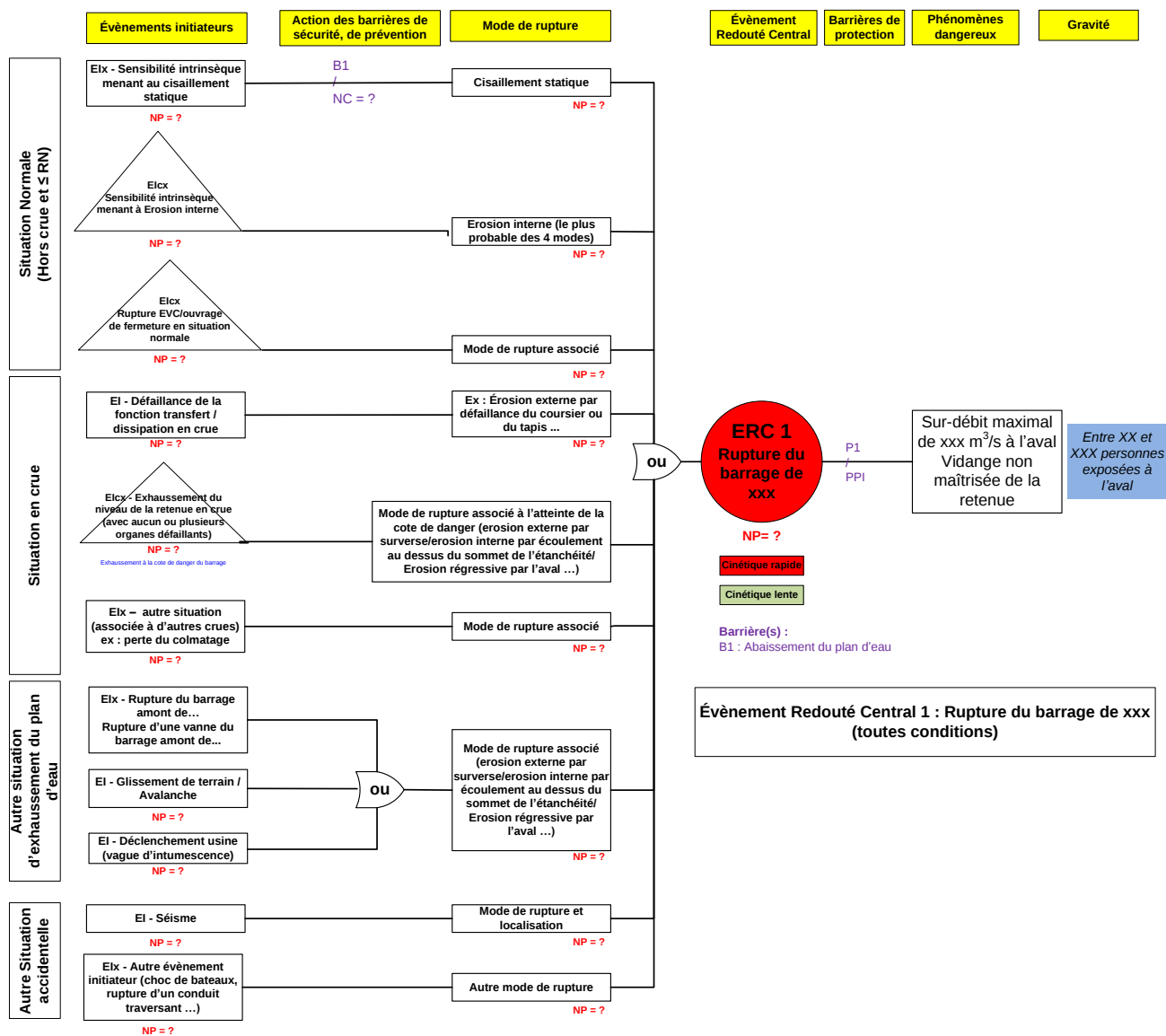


Figure 10. ERC1 – Barrage en remblais ou en enrochements

7. COTATION DES EVENEMENTS INITIATEURS DE L'ERC1

A EDF-CIH, l'analyse de risques est semi-probabiliste et la quantification des occurrences est réalisée suivant l'échelle suivante :

Classe d'occurrence (niveau de fréquence)	E Inférieur à 10-5 Possible* mais extrêmement peu probable	D De 10-4 à 10-5 Très improbable	C De 10-3 à 10-4 Improbable	B De 10-2 à 10-3 Probable	A2 De 10-1 à 10-2 Courant	A1 De 1 à 10-1 Très Courant
Définition qualitative	N'est pas impossible au vu des connaissances actuelles mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années installations	S'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité	Un événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité	S'est déjà produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation	Se produit une à plusieurs fois dans la vie de nombreux ouvrages similaires	Se produit très régulièrement dans la vie de pratiquement tous les ouvrages similaires $0.1 < p < 1$

* au sens : « physiquement possible », « ne peut être exclu ».

La cotation des événements initiateurs de l'ERC1 est un exercice à fort enjeux compte tenu des conséquences potentielles de ce scénario. Elles sont toujours établies en groupe, de façon collégiale avec notamment un géologue, un ingénieur auscultation, un génie civiliste connaissant le barrage de façon approfondie, un hydraulicien et un ingénieur structure ainsi que les personnes en charge de la rédaction et de la vérification de l'étude de dangers. Les experts génie civil ou sûreté peuvent être mobilisés au besoin.

La cotation n'est pas envisagée comme une cotation « automatique » puisqu'elle est adaptée à l'ouvrage, mais le groupe de travail de l'EDD a à sa disposition un guide de cotation permettant une certaine homogénéité des pratiques (à EDF-CIH, des dizaines de personnes de sites différents contribuent aux EDD).

La cotation intègre les éléments suivants et tous les argumentaires sont détaillés dans un tableau sous l'arbre des causes dans l'EDD au chapitre 8 :

- Les principes de conception du barrage (ses sensibilités et sa robustesse)
- La qualité de sa fondation et des modalités et qualité de réalisation de l'interface barrage-rocher
- Le vieillissement et l'état actuel de l'ouvrage (avec notamment le rapport du diagnostic exhaustif)
- Le comportement du barrage (s'appuyant sur les mesures d'auscultation et la surveillance de l'ouvrage)
- Les études de stabilité disponibles et l'analyse du comportement
- Le REX accidentologique mondial d'ouvrages comparables (voir Article CFBR [10])

Le groupe de travail analyse ces différentes composantes et utilise des critères du guide de cotation pour établir la cotation la plus pertinente pour chaque événement.

Par exemple, pour un barrage poids en béton dans un état satisfaisant avec des robustesses de conception et une qualité avérée de construction, qui respecte les marges des recommandations de la profession, le groupe de travail sera guidé pour une cotation en E pour la sensibilité intrinsèque.

Une évolution de l'état ou une pathologie avérée entraîneront le groupe de travail vers une cotation C ou plus critique en fonction des éléments à leur disposition.

Les cotations sont réputées être valables jusqu'à la prochaine actualisation de l'EDD ; les facteurs de vieillissement et d'évolution de pathologies connues sont donc pris en compte lors de la cotation.

8. BARRIERES PRINCIPALEMENT UTILISEES DANS L'ERC1

8.1. Critères de validité d'une barrière de prévention

Les barrières de prévention sont nommées « BX », sont représentées en violet sur les chemins où elles sont utiles. Leurs niveaux de confiance sont aussi justifiés dans un tableau. Les barrières de prévention ont pour objet d'éviter que l'accident (ERC) se produise, et ainsi d'en réduire la probabilité d'occurrence. Une barrière est caractérisée par sa fonction de sécurité, qui doit être assurée avec une performance spécifiée en termes d'efficacité, de fiabilité et de temps de réponse par rapport à la cinétique du scénario d'accident.

En tant que dispositif de sécurité, une barrière doit satisfaire à un certain nombre d'exigences :

- Elle est conçue pour la sécurité, c'est-à-dire qu'elle est :
 - Indépendante des événements initiateurs dont elle protège, et des autres barrières activées sur le même scénario d'accident ;
 - Testée et maintenue de sorte à être conservée opérationnelle dans la durée, ou éventuellement à sécurité positive (défaillance de la barrière > mise en sécurité).
- Elle est en mesure d'assurer la fonction de sécurité spécifiée
 - En totalité (efficacité) pour stopper le déroulement accidentel ;
 - Dans un délai compatible avec la cinétique de l'accident (temps de réponse).

La fiabilité de la barrière se mesure par le niveau de confiance, qui est une notion indépendante de l'efficacité et du temps de réponse. Une barrière d'un niveau de confiance 1 permet de décoter d'un niveau ; une barrière de confiance 2 permet de décoter de deux niveaux (Exemple : une barrière de niveau de confiance 1 permet de coter un événement initiateur coté initialement en C en D). C'est le groupe de travail de l'EDD qui propose le niveau de confiance de la barrière suite à l'analyse des quatre critères.

8.2. Barrière de prévention « abaissement du plan d'eau »

Concernant la barrière « abaissement de la retenue », certains principes sont à respecter :

- Cette barrière n'est jamais retenue en crue, post-crue, ou post-séisme. Elle est limitée à la situation en conditions normales
- Dans le cas où la barrière est constituée par la VDF : Par défaut, les durées de baisse de plan d'eau sont calculées sans apport et sans turbinage (ces derniers étant censés se compenser). Une analyse de sa pertinence/efficience, sera à mener au regard des débits d'apports moyens selon la saison et des capacités de turbinage. A titre d'exemple, pour certains barrages et durant certaines périodes de l'année, les apports moyens peuvent être supérieurs aux capacités de la VDF ; ce qui met en cause l'efficacité de la barrière.

Exemple de rédaction dans une EDD :

Réf	Intitulé de la barrière	Critères	Validité	Justifications
B1	Abaissement du niveau de la retenue par ouverture du système de vidange de fond	Indépendance	OUI	L'abaissement du niveau de la retenue peut être réalisé par une ouverture de vannes. Cette barrière est indépendante de l'Ei « sensibilité intrinsèque ».
		Efficacité	OUI	Cette barrière fait suite à la détection d'une anomalie de comportement (détection par le dispositif d'auscultation et/ou les examens visuels). Elle correspond à : - Des actions de mise en sécurité immédiate dans le cas où l'anomalie le nécessite (DMP de restriction de cote de retenue pouvant aller jusqu'à la vidange de la retenue dans de rares situations ultimes), - Des travaux ou actions de maintenance spécialisée adaptés aux pathologies détectées, dans un délai pendant lequel le DMP est maintenu si nécessaire. Le niveau d'envasement de la retenue est très faible et ne peut empêcher cet abaissement rapide, si nécessaire. Les examens et diagnostics récents sur le génie civil, l'entonnement et le matériel mécanique du dispositif de vidange de fond permettent de juger de la bonne efficacité du système.
		Temps de réponse	OUI	En considérant une vidange par le dispositif de vidange de fond uniquement, et sans apport de la retenue, il est possible de baisser en quelques jours la retenue de plusieurs mètres, et ainsi de décharger l'ouvrage pour le mettre en sécurité dans des durées compatibles avec la cinétique des phénomènes.
		Test, maintenance	OUI	Essais d'ouverture fréquents selon consignes d'exploitation. Pas de problème rencontré lors de ces essais.
		Niveau de confiance	1	

8.3. Organe valorisé autre que la vidange de fond dans la barrière « Abaissement du plan d'eau » : exemple du barrage de Pinet

La barrière abaissement du plan d'eau peut être appliquée sans faire intervenir le système de vidange de fond. Dans l'exemple du barrage de Pinet, sur le Tarn, équipé de clapets de tailles importantes, ce sont les EVC qui ont été valorisés dans cette barrière, pour la sensibilité intrinsèque du barrage, lors de l'EDD 2021. En effet, les calculs de sensibilité de stabilité de ce barrage poids démontrent que si la charge est abaissée jusqu'aux seuils des clapets, le barrage est en sécurité, même avec des fissures traversantes à différents niveaux de l'ouvrage sans aucune résistance à la traction ni cohésion. La fonction abaissement du plan d'eau peut donc, dans certains cas, être assurée par un autre organe que l'organe de fond. Seule une étude spécifique au barrage peut permettre de déterminer le scénario avec le niveau de confiance approprié.

8.4. Barrière de protection : Cas Particulier des barrières PPI

Les barrières de protection ont pour objet de réduire les conséquences de l'accident s'il se produit, et ainsi d'en réduire la gravité et/ou la probabilité d'occurrence. Un barrage PPI (Plan Particulier d'Intervention) dispose d'un plan d'alerte permettant une mise en sécurité de la population aval. Ce système sera évidemment favorable à la réduction du nombre de personnes exposées par l'évènement. Les barrières PPI sont indiquées dans le nœud papillon pour information, mais ne sont pas valorisées en termes de Niveau de Confiance car, même si l'efficacité est jugée satisfaisante, EDF Hydro n'en a pas la responsabilité de mise en œuvre ou de bonne application (rôle de la Préfecture). A ce titre, la chaîne de traitement associée n'est pas dans le périmètre de l'étude de dangers et le nombre de personnes exposées affiché dans l'EDD ne prend en compte aucune évacuation de personnes.

9. CONCLUSION

9.1. Sur la construction de l'arbre des causes de l'ERC1 "Rupture barrage"

La réalisation des EDD des barrages est venue compléter de manière significative la connaissance des risques majeurs et autres risques liés à l'exploitation des barrages. Le retour d'expérience des premières EDD a conduit vers des développements méthodologiques pour une approche plus cohérente et plus structurée notamment pour la construction de l'arbre des causes de l'ERC1 « Rupture barrage ».

Un arbre des causes « guide » de la rupture d'un barrage est proposé et permet de couvrir les risques de :

- Défaillances structurelles
- Défaillances hydrauliques
- Exhaussement du plan d'eau au-delà de la cote ZQATB (ou PHE au sens de l'ATB)
- Agression sismique
- Autres agressions involontaires

Une manière de valider les développements méthodologiques proposés pour construire l'arbre des causes de l'ERC1 « Rupture barrage » consiste à regarder si les ruptures historiques trouvent leur place dans l'arbre type proposé. C'est le cas pour celles mentionnées dans cet article à titre d'exemple. Ces développements méthodologiques s'inscrivent néanmoins dans une démarche de progrès pour laquelle le retour d'expérience des études et la continuité de la veille sur les accidents et incidents sont très utiles.

Cependant, pour un barrage donné, l'application stricte d'un arbre type ne suffit pas ; une réflexion poussée et ouverte sur la recherche des causes de rupture doit être systématiquement menée en tenant compte des spécificités de l'ouvrage (réflexion menée collégalement avec des contributeurs de métiers différents). La cotation des événements initiateurs et le niveau de confiance des barrières de prévention sont spécifiques à l'ouvrage et argumentés en fonction des connaissances, du REX et du contexte de l'ouvrage.

La méthodologie proposée pour l'ERC1 peut se décliner à tous les autres ERC en recherchant et en analysant séparément les modes de rupture par défaillance et les modes de rupture par agression. Les défaillances se produisent dans la gamme de fonctionnement prévue pour l'ouvrage. Les agressions sont les sollicitations extérieures excessives et considérées inacceptables pour l'ouvrage.

9.2. Sur la cotation des événements initiateurs et la définition de barrières

La cotation des événements initiateurs et la définition des barrières sont des exercices à fort enjeu à mener de manière concertée au sein du groupe de travail de l'EDD. Une approche générale est proposée pour guider leurs réflexions concernant la cotation des événements initiateurs et la validation du niveau de confiance des barrières de protection sans aucun « automatisme » pour permettre de prendre en compte les spécificités et sensibilités de l'ouvrage. L'organisation du retour d'expérience et son utilisation sont très importantes pour consolider ces démarches et assurer la cohérence entre les différentes EDD.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (2007). Décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques. J. O. 13/12/2007.
- [2] Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (2012). Dam Risk Assessment Guidelines. Last Update: August 2012- English translation: February 2015. https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/risk_assessment_french_guidelines.pdf
- [3] Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (2015). Décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques. J. O. 14/05/2015.
- [4] Norme NF EN 31010 « Gestion des risques - Techniques d'évaluation des risques », Juillet 2010
- [5] CIGB/ICOLD (2005). Bulletin n° 130 – Evaluation du risque dans la gestion de la sécurité du barrage.
- [6] CIGB/ICOLD (1995). Bulletin 99: Dam Failures – Statistical Analysis. Paris.
- [7] CFBR (2020). Pratiques françaises de l'analyse de risques et de l'évaluation de la sûreté des barrages. Juin 2020.
- [8] Divoux P., Méthodologie des EDD – L'ERC1 Rupture barrage – L'arbre des causes – EDF – Juin 2020.
- [9] Lacasse S., Höeg K., Reliability and risk approach for the design and safety evaluation of dams - Approche fiabilité et risque pour la conception et l'évaluation de la sécurité des barrages – NGI - Norway – ICOLD 2019.
- [10] CFBR 2025 : Comment est construit et valorisé le REX accidentologique dans la rédaction d'une EDD, M.CUBAYNES.
- [11] CFBR 2025: REX de la détermination des CDD pour 65 barrages en béton – estimations et modes de défaillance associés, S.BALE .
- [12] CFBR 2025 : Etudes des chutes de blocs sur les ouvrages hydrauliques dans le cadre des études de dangers, N.BAGNEUX.