

COMMENT SONT CONSTRUITS LES ARBRES DE DEFAILLANCE DE VANNES ET LE GUIDE DE COTATION HYDROMECHANIQUE DES EDD BARRAGES CHEZ EDF

Methodological approach for dam gates failure analysis and construction of the hydromechanical rating guide for EDF Dams

Marielle MONTERYMARD

EDF DTG

marielle.monterymard@edf.fr

MOTS CLEFS

Vannes de barrage, Modes de défaillance, arbres des causes

KEY WORDS

Dam gates, failure mechanism, cause tree

RÉSUMÉ

A l'origine de la rupture ou du dysfonctionnement d'une vanne ou d'un organe mécanique, il y a soit un défaut de résistance de la structure, un défaut de dimensionnement de sa chaîne cinématique (une défaillance), soit un excès de sollicitation (une agression).

Cet article présente la méthodologie d'EDF conduisant à l'établissement des arbres des causes « guide » traitant des organes hydromécaniques. Il constitue un cadre de cohérence rigoureux, mais non rigide.

Il présente également la manière chez EDF de coter les différents Evénements Initiateurs génériques.

ABSTRACT

The origin of the failure or malfunction of a dam gate or mechanical component can be either a structural resistance defect, a design defect in its kinematic chain (a failure), or an excess of stress (an aggression).

This article presents EDF's methodology leading to the establishment of generic cause trees dealing with hydromechanical components. It constitutes a rigorous but flexible framework.

It also presents the way EDF rates the different generic Initiating Events.

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

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

l'ouvrage et de son chargé d'études, en fonction des caractéristiques de l'ouvrage. Les EDD menées chez EDF, dont les grandes étapes sont présentées en figure 1, comprennent notamment :

- Une analyse fonctionnelle des ouvrages concernés,
- Une analyse des modes de défaillances conduite à travers une analyse préliminaire des risques,
- 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 de certaines vannes, conduites ou fond plein, ou l'ouverture intempestive de vannes ressortent comme des Evénements redoutés Centraux (ERC) ou des Evénements Initiateurs Complexes d'un ERC de Rupture Barrage. La non-ouverture ou la fermeture intempestive de certaines vannes ressortent comme Evénement Initiateur Complexe d'un ERC de Rupture d'ouvrage.

Le retour d'expérience des premières d'EDD menée 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 des ERC relatifs aux vannes et autres organes mécaniques. Cet article présente l'approche méthodologique développée par EDF et déployée lors des EDD de deuxième génération.

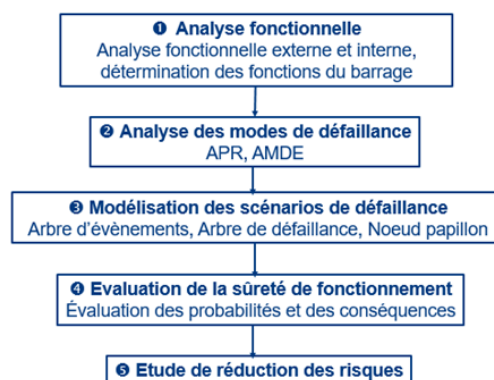


Figure 1 : La démarche des EDD en France [5]

2. CONSTRUCTION DES ARBRES DE DEFAILLANCE TYPE

La démarche globale de construction des ERC est présenté dans l'article[5].

La base de la méthode consiste à construire l'arbre des causes autour des notions de défaillance et d'agression. A l'origine de la rupture ou du dysfonctionnement d'une vanne, il y a soit un défaut de résistance de la structure, un défaut de dimensionnement de sa chaîne cinématique (une défaillance propre à une vanne), soit un excès de sollicitation (lié à une agression). Les défaillances propres se produisent dans des situations de fonctionnement normales. Les agressions sont les sollicitations extérieures excessives liées à des situations de fonctionnement exceptionnelles, extrêmes ou accidentelles.

L'analyse de l'accidentologie des vannes de barrage sur le parc mondial (liste non exhaustive sur le parc hors de France issue d'une veille technologique et du retour de la CIGB) permet de déterminer les principaux modes et faits générateurs de défaillances associés aux trois grands risques que ce sont la rupture, l'ouverture intempestive et la non ouverture/fermeture intempestive :

- Rupture :
 - Mauvais dimensionnement ou défaut de réalisation de la structure de la vanne, de son guidage, de sa chaîne cinématique ou de son ancrage.
On retrouve un Retour d'Expérience (REX) de rupture sur un défaut de conception/construction sur les cas de Polichintala [7] et Narayapur [8] par exemple. Une faiblesse de conception avait également été pointée sur la rupture d'une vanne de crue de Folsom Dam [5], menant à une révision des méthodes de conception de l'USACE.
 - Dégradation par corrosion d'un/des éléments de la structure de la vanne ou de son ancrage. Les ruptures des vannes de Tuillière [13], de Vichy [14] ou de Dunlap Dam [15] viennent illustrer ce fait générateur. Des défauts de surveillance et entretien sont associés à ces dégradations par corrosion.
 - Surcharge extérieure (exhaussement, agresseurs extérieurs, ...) ou surcharge en manœuvre liée à une augmentation des efforts de manœuvre.

On peut citer comme exemple la rupture de la vanne de la Courbaisse [11] en raison d'une surverse liée à sa non-ouverture, elle-même causée par la présence anormale de sédiment suite à une modification d'exploitation de l'ouvrage.

- Phénomènes vibratoires, hydrodynamiques.

On peut citer comme exemple la rupture du clapet de Maison du Roy [12]. Un des faits générateurs était lié à la présence d'effets hydrodynamiques mal quantifiés au-delà d'un certain débit évacué.

On notera que les ruptures peuvent résulter d'une combinaison entre différents faits générateurs. On peut également souligner que les exemples de rupture des vannes sur le parc mondial sont assez peu nombreux.

- Non ouverture et fermeture intempestive :
 - Une défaillance du mécanisme de manœuvre (fuite circuit oléohydraulique, dysfonctionnement centrale oléohydraulique, rupture d'un élément de la chaîne cinématique, sous dimensionnement, perte étanchéité de flotteurs ...)
 - Un blocage mécanique de la vanne liée à une augmentation des efforts de frottements (grippage, resserrement de passe, déformation pièces fixes ou obturateur)
 - Une surcharge extérieure (gel, coincement de corps étranger, exhaussement de la retenue, envasement, ...)
 - *Une défaillance du CC / de l'automate*
 - *Une perte de l'alimentation*
 - *Une défaillance humaine (non-intervention, manœuvre inappropriée)*
- Ouverture intempestive :
 - Une défaillance de la chaîne cinématique (rupture circuit oléohydraulique, perte du freinage, rupture élément de la chaîne cinématique...)
 - *Une défaillance du CC ou de l'automate (relais collé, perte de protection de fin de course, crantage, ...)*
 - Une surcharge extérieure sur l'actionneur (gel, embâcles, exhaussement de la retenue, ...)

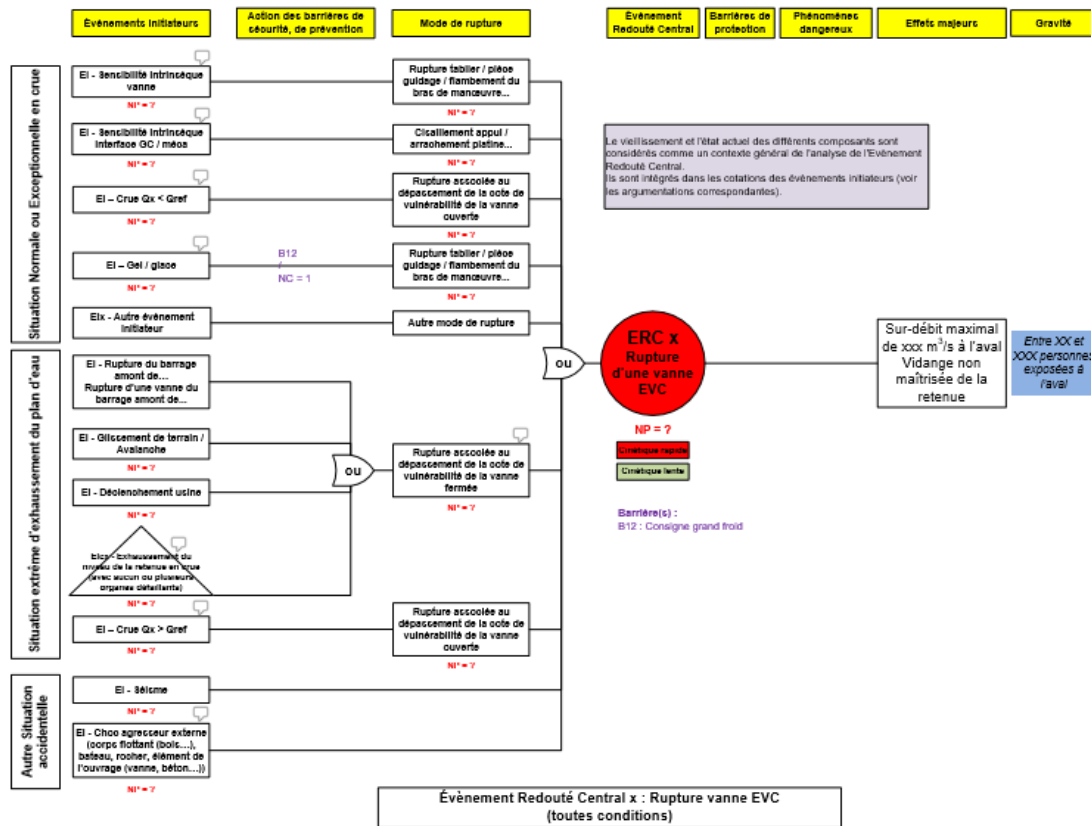
Ces faits générateurs sont ensuite organisés par Evénements Initiateurs (EI) génériques, avec des EI intrinsèques aux matériels étudiés et des EI exogènes. Ceci permet d'homogénéiser nos pratiques, notamment sur le grain et la sémantique compte tenu de l'attendu important chaque année de réaliser 15 à 20 EDD sur le parc EDF.

Cela aboutit à la création d'arbre de défaillance type. Le groupe de travail doit ensuite de se l'approprier, l'adapter au type de vanne étudié et à son environnement.

Pour chacun des ERC ou Elc (Evénement Initiateur complexe) de vanne, on scinde les arbres en deux arbres indépendants : Défaillance (NO/OI/Rupture) d'une vanne et Défaillance de toutes les vannes. Dans le premier, les EI spécifiques à une seule vanne sont retenus. Dans le second, seuls les modes communs sont retenus.

On présente ci-après, trois ERC/Elc types proposés dans le guide de construction des arbres et de cotations hydromécaniques.

Exemple ERC Rupture Vanne



On regroupe les EI selon les situations étudiées :

1/ Les EI relatifs à une situation normale d'exploitation. On retrouve les EI suivants :

- Sensibilité intrinsèque hydromécanique qui intègre les faits générateurs HM liés à un mauvais dimensionnement, à un défaut de réalisation et à la corrosion.
- Sensibilité intrinsèque du génie civil au niveau de l'interface entre la structure mécanique et le génie civil, qui intègre des problématiques de dimensionnement et de vieillissement.
- Surcharge induite par la formation de glace sur la structure et/ou sur la retenue (effet banquise)

2/ Dans les situations d'exhaussement du plan d'eau, accidentelles ou extrêmes (c'est-à-dire pour des crues supérieures à la crue de dimensionnement), on retrouve les EI suivants :

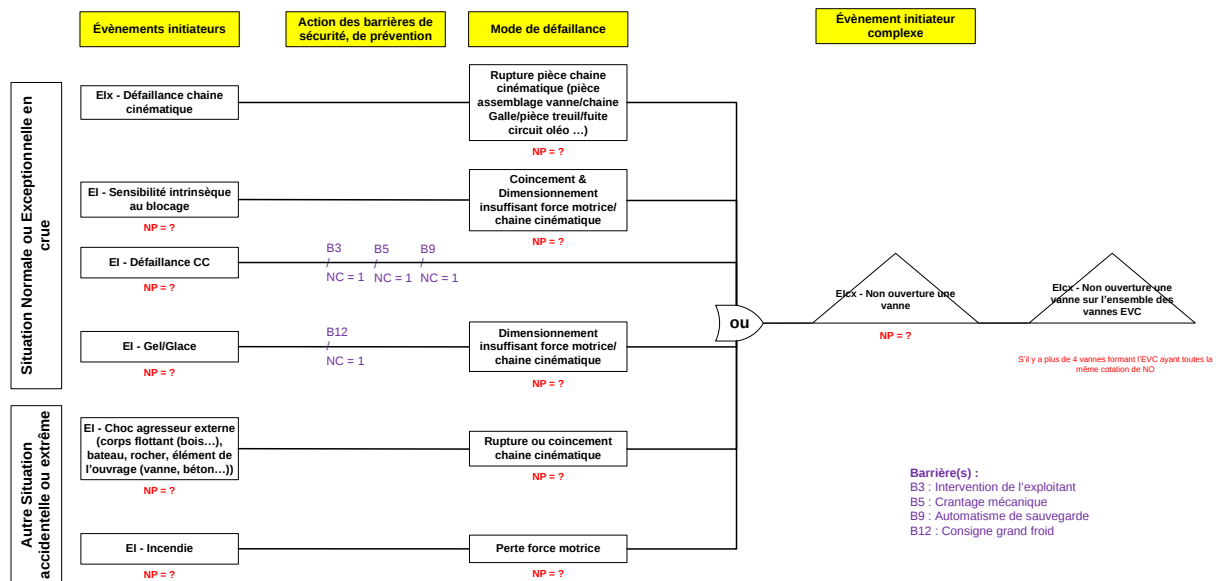
- Exhaussement de la retenue en crue dans le cas d'une défaillance d'un ou plusieurs organes, menant à la cote de vulnérabilité de la vanne fermée ;
- Exhaussement de la retenue et atteinte de la cote de vulnérabilité de la vanne fermée suite à un aléa naturel type glissement de terrain / avalanche
- Exhaussement de la retenue et atteinte de la cote de vulnérabilité de la vanne fermée suite à une rupture d'un ouvrage situé en amont (barrage, vanne, CF, ...)
- Exhaussement de la retenue sur une crue menant à la cote de vulnérabilité de la vanne ouverte ;

3/ Dans les situations accidentelles (hors crue), on retrouve les EI suivants :

- Un séisme menant à la rupture
- Un choc d'un agresseur externe (corps flottants, rocher, éléments de l'ouvrage, véhicule...)

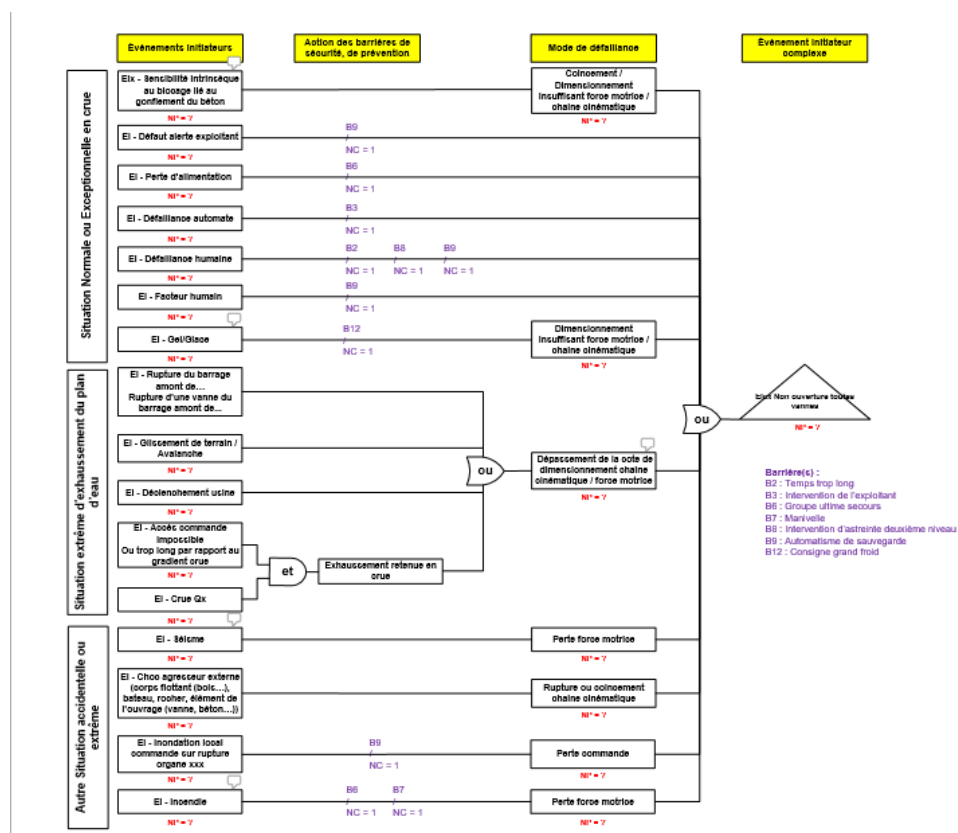
Exemple Elc Non-Ouverture d'une vanne

On décline selon le même principe que pour l'ERC Rupture vanne, en découpant en fonction de la situation étudiée les modes de défaillance issues du REX.



Exemple Elc Non Ouverture toutes les vannes :

On décline selon le même principe que pour l'ERC Rupture vanne, en découpant en fonction de la situation étudiée les modes de défaillance issues du REX.



3. COTATION DES EVENEMENTS INITIATEURS ET DES BARRIERES

Dans la pratique d'EDF, les cotations des événements initiateurs sont toujours établies en groupe, de façon collégiale avec notamment un ingénieur mécanicien et son vérificateur (pour les EI relatifs à la mécanique), un ingénieur contrôle commande et son vérificateur (pour les EI relatifs au contrôle commande), un ingénieur génie civiliste et son vérificateur (pour les EI relatifs aux ancrages au génie civil), ainsi que les personnes en charge de la rédaction et de la vérification de l'étude de dangers.

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 des guides de cotation dédiés à chacun des trois métiers (mécanique, contrôle commande et génie civil) permettant une certaine homogénéité des pratiques.

On évoque ci-dessous uniquement le guide hydromécanique.

Ce guide de cotation hydromécanique [10] traite des EI de sensibilité intrinsèque et des EI exogènes. Il a été alimenté par l'analyse de l'accidentologie et de l'incidentologie sur le parc EDF et mondial en s'appuyant sur des modèles statistiques et probabilistes. Ces analyses ont pu être menées grâce au travail précieux réalisé par EDF Hydro de capitalisation dans des bases dédiées des EISH (Evénements Importants pour la sécurité hydraulique) et ESH (Evénement de Sécurité Hydraulique). Une communication lors du colloque CFBR de 2015 avait été faite sur le sujet [9].

On présente ci-après les différents EI génériques développés dans le guide de cotation hydromécanique.

Pour les EI intrinsèques à l'organe (EI Sensibilité intrinsèque de la structure, EI Défaillance chaîne cinématique, EI Sensibilité intrinsèque au blocage mécanique), le guide [xx] propose une cotation par étapes :

1 / Une cotation générique est proposée en fonction du type d'équipement, du type de vanne, du type d'actionneur. Elle est issue de l'analyse du retour d'expérience global du parc en exploitation ;

2/ Une correction est à apporter pour tenir compte de l'état de vieillissement : est-on rentré dans la période d'usure en fin de durée de vie utile, observe-t-on des pertes de matières, des fissurations, des déformations ?

3/ Elle est ensuite ajustée pour prendre en compte :

- La confiance dans la conception – présence de note justifiant le dimensionnement des organes, des dossiers de fabrication satisfaisant, de redondance dans la chaîne cinématique, .. ?
- Les conditions d'exploitation – ont-elles évoluées depuis la conception ?
- Le retour d'expérience du site et la perte éventuelle de fiabilité de l'organe – y a-t-il un historique de dysfonctionnement sur le site, la périodicité des maintenances a-t-elle changée ?

Par exemple, pour un organe mécanique dans un état satisfaisant dont la tenue mécanique est justifiée vis-à-vis des critères de conception en vigueur sans marge importante, le groupe de travail sera guidé pour une cotation en D pour la sensibilité intrinsèque. Des marges très importantes lui permettront de coter potentiellement en E alors qu'une évolution de l'état ou une pathologie entraîneront le groupe de travail vers une cotation C ou plus critique en fonction des éléments à leur disposition.

Autre exemple, la cotation initiale de non-ouverture ou d'ouverture d'une vanne automatique à flotteur sera bien plus mauvaise que celle d'une vanne motorisée avec un treuil à chaîne ou avec un vérin hydraulique. Cette cotation sévère des vannes à flotteur retranscrit les nombreux événements de non-ouverture ou d'ouverture intempestive observés dans le REX. On peut citer les exemples de défaillance de vannes des barrages de St Marc [16], Ganivet [17], Courbaisse [11] et Baigt [18].

Les EI exogènes, relatifs aux agresseurs sont traités de la manière suivante :

1/ EI Séisme :

Le guide [10] intègre les facteurs de risque suivants pour proposer des cotations par défaut :

- La sensibilité intrinsèque de l'organe en situation normale ;
- Le niveau de sismicité de la zone géographique ;
- L'implantation sur le barrage (fond de retenue, crête d'ouvrage, en bout de conduite) ;
- La sensibilité particulière aux sollicitations sismiques (fort élançement).

2a/ Ei Blocage par la glace

Pour définir le niveau d'occurrence d'une prise en glace d'une ou plusieurs vannes, le guide [10] prend en considération :

- Le niveau d'exposition au froid de la vanne (zone géographique, exposition au vent/au soleil, marnage, la position de la vanne sur le barrage) ;
- La sensibilité de la vanne aux embruns, la présence de fuites aux étanchéités ;
- Le REX de prise en glace sur l'ouvrage.

Une barrière liée à la mise en œuvre d'une consigne d'exploitation en période de grand froid permet ensuite de décoder l'occurrence de l'EI précédemment retenu.

2b/ EI Poussée de la glace

Sur le même principe que pour l'EI Blocage par la glace, une aide à la cotation de l'EI Poussée de la glace est proposée. Cet EI prend en considération :

- Le niveau d'exposition au froid ;
- Le REX de prise en glace sur l'ouvrage ;
- Les chroniques de température relevées sur l'ouvrage ;
- La sensibilité de la vanne à la poussée d'une couche de glace.

De la même manière que pour l'EI Blocage par la glace, une barrière mise en œuvre d'une consigne grand Froid permet de décoder cette occurrence.

3/ EI Incendie

Le risque de départ d'incendie à proximité d'un organe de sécurité est coté suivant une méthodologie dédiée et explicitée dans l'article [19]. Le guide HM apporte une aide au contributeur pour déterminer si l'incendie pourra impacter une ou des fonctions sécurité de la vanne.

4/ EI Exhaussement de la retenue - atteinte de la cote de vulnérabilité

Un exhaussement important de la retenue peut conduire, sur certains ouvrages, à une surverse au niveau des matériels de vannerie. Dans ces circonstances, il convient de mener une analyse spécifique de tenue des organes mécaniques. Il s'agit d'évaluer la cote à partir de laquelle la tenue de la vanne n'est plus justifiable. Il ne s'agit pas d'une cote de fusibilité, au-delà de laquelle on postule que la vanne rompra.

Pour déterminer cette cote de vulnérabilité, on évalue :

- Si les vannes peuvent supporter une surverse. Un déversement par-dessus les vannes peut induire des phénomènes hydrodynamiques, mise en dépression et vibrations si la lame d'eau n'est pas suffisamment aérée.
- Le chargement hydrostatique limite, qui permet de justifier la tenue de la vanne en situation exceptionnelle.

Les occurrences des scénarios menant à l'atteinte de la cote de vulnérabilité de la vanne est ensuite évaluée par le contributeur hydraulique en fonction des niveaux de crues envisagés et des défaillances de vannes considérées.

5 / EI Choc éléments extérieurs

Les vannes peuvent être exposées à des chocs de bateaux ou d'embâcles venant de la retenue, ou à des chutes de bloc (rocher des appuis ou éléments de l'ouvrage).

La cotation de cet EI prend en compte la sensibilité du matériel à une surcharge externe et l'occurrence de l'aléa envisagé.

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.

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.

Le résultat de l'examen des critères de validité de la barrière et la cotation du niveau de confiance sont présentés dans l'EDD sous forme d'un tableau, avec une synthèse des arguments et justificatifs qui ont permis d'aboutir à cette cotation.

Réf	Intitulé de la barrière	Critères	Validité	Justifications	Décote
		Indépendance	OUI		1
		Efficacité	OUI	Donner des éléments sur les 4 fonctions nécessaires si barrière active : Détection : Transmission : Décision : Action : Donner des éléments sur les 2 fonctions nécessaires si barrière passive : Détection : Action :	
		Temps de réponse	OUI		
		Test & maintenance (aspect techniques) Formation & exercices (facteur humain)	OUI		
		Niveau de confiance	1	Barrière jugée efficace.	

La décote est conditionnée par la validité de chacun des 4 critères, qui s'appuie sur un argumentaire détaillé : détail des étapes de la barrière, explication des redondances et modes communs...

Sur les arbres de défaillances liés aux vannes, on pourra trouver des barrières pour pallier la défaillance de l'organe de coupure de débit ou la défaillance (ordre intempestif ou manque) de la force motrice ou la défaillance du contrôle commande ou pour prévenir l'exhaussement de la retenue. Il s'agit en général des verrous mécaniques, des Groupes Ultimes Secours, des palans de secours et dispositifs de manœuvre manuelle, des dispositifs de temps trop long, des crantages, des alarmes niveaux, des automates de sauvegarde et des dispositions associés à la mise en oeuvre d'une consigne grands froids (manœuvres, dispositifs chauffants, brise-glace, ...).

4. CONCLUSION

Le retour d'expérience des premières EDD chez EDD a montré le besoin de développer des approches plus homogènes et plus structurées des arbres de défaillances liés aux matériels hydromécaniques, en veillant à garder une cohérence avec les structures des ERC des ouvrages génie civil.

Ces arbres et EI types permettent d'être plus efficaces dans les analyses de risques et de comparer plus facilement les ouvrages du parc.

Ces développements méthodologiques s'inscrivent néanmoins dans une démarche de progrès pour laquelle le retour d'expérience des études est très utile.

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'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (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] DIVOUX (2025) ; Approche méthodologique pour la recherche des causes de la rupture d'un barrage ; Colloque CFBR *Sûreté des barrages et enjeux*
 - [6] Lessons learned from the spillway gate failure at Folsom Dam ; Jerzy Salamon, PE ; USSD 2016 Annual Conference
 - [7] Fiche Info Incident – Rupture vanne Pulichintala ; 10/08/2021
 - [8] N. Srinivas, Watre Resources Development Organization, Govt of Karnataka ; Failure of Spillway radial gate of Narayanapur Dam – a case study ; 25/03/2015 ;
 - [9] EDF ; Capitalisation du Retour d'Expérience sur les vannes de barrages ; colloque CFBR 2015 *Vantellerie, contrôle-commande, télécom et alimentations électriques pour des barrages plus sûrs*
 - [10] EDF ; Guide de cotation Hydromécanique ; référence interne EDF
 - [11] EDF ; Courbaisse – rupture de la vanne de la prise d'eau ; Analyse interne 1997
 - [12] EDF ; Rapport d'expertise sur la rupture du clapet du barrage de Maison du Roy ; 2000 ; rapport interne EDF
 - [13] EDF ; Incident de la vanne n°4 de Tuileries ; analyse des causes et enseignements ; CUTMH 2006 ; Document interne
 - [14] Publication La Montagne - https://www.lamontagne.fr/vichy-03200/actualites/ce-que-l-on-sait-apres-la-rupture-d-une-vanne-sur-le-barrage-de-vichy-allier_13975326/ ; 28/06/2021
 - [15] EDF ; Présentation interne : Dunlap Dam failure ; 2019/05/14
 - [16] CFBR ; Fiche de partage d'expérience – Bulletin, Cas 9 - St Marc - Coincement puis ouverture brutale de vannes segment à flotteurs ; avril 2017
 - [17] EDF ; Fiche d'avarie ; Non ouverture des EVC du barrage de Ganivet ; document interne ; 08/03/2001
 - [18] EDF ; Analyse d'avarie ; Rupture de la vanne de Baigts de Béarn 1952 ; Document interne
 - [19] Eric Morel ; Etudes de dangers barrages : Incendie ; Colloque CFBR 2025 *Sûreté des barrages et enjeux*