

## PRISE EN COMPTE DE L'ALÉA « CHUTE DE BLOCS » DANS L'ANALYSE DE RISQUES D'UNE ÉTUDE DE DANGERS

### *Rock falls hazard in risk analysis of dams Safety Review Risk Assessments*

Mathilde CORDIER, Gaëtan DAUTOIS, Robin CANAC

ARTELIA, 4 rue Germaine Veyret-Verner – 38130 Échirolles

[mathilde.cordier@arteliagroup.com](mailto:mathilde.cordier@arteliagroup.com) ; [gaetan.dautois@arteliagroup.com](mailto:gaetan.dautois@arteliagroup.com) ; [robin.canac@arteliagroup.com](mailto:robin.canac@arteliagroup.com)

#### MOTS CLEFS

Chute de blocs, effondrement, éboulement, blocs rocheux, falaise, aléa, vagues, franchissement, barrage, retenue, Etude de Dangers, analyse de risques

#### KEY WORDS

Rockfall, collapse, rockslide, stones, cliff, hazard, waves, overtopping, dam, reservoir, dams Safety Review, Risk Assessments

#### RÉSUMÉ

Artelia a réalisé l'Étude de Dangers (EDD) d'un barrage français en béton de classe A, d'une hauteur d'environ 50 m, implanté dans une vallée encaissée. Le réservoir d'une longueur de l'ordre de 3 km est bordé de nombreuses falaises d'une hauteur de 10 à 20 m. Une première inspection des berges du réservoir menée en prévision de l'EDD avait permis d'estimer que, si les glissements de terrain de grande ampleur étaient peu probables au vu de la configuration du site, le risque d'effondrement de blocs rocheux était important. L'aléa « chute de blocs » a donc été considéré dans le cadre de l'EDD.

Un diagnostic visuel initial par un ingénieur géologue a été inclus dans l'Étude de dangers. Les observations ont permis de qualifier les secteurs sensibles à l'effondrement en termes de volume de blocs concernés, hauteur de chute, pente de versant. Également, chacun des scénarios de chutes de blocs ainsi établis a fait l'objet d'une détermination préliminaire de sa probabilité d'occurrence. La méthodologie proposée par le guide technique du LCPC [1] repose sur l'estimation « à dire d'expert », à l'aide d'une échelle qualitative de probabilité d'occurrence et d'une échelle temporelle, d'un couple probabilité/délai dont les deux composantes sont indissociables.

Les scénarios de chutes de blocs caractérisés géologiquement ont ensuite fait l'objet de modélisation numérique hydraulique, afin de déterminer la hauteur et la période des séries de vagues que l'effondrement de chaque volume dans la retenue est susceptible de provoquer. Finalement, une étude de franchissement menée suivant les recommandations EurOtop II [3], habituellement utilisées dans le domaine maritime, a permis d'estimer en première approche un débit franchissant la crête du barrage. L'évènement Redouté Central associé à l'aléa naturel « chute de blocs » conduit ainsi au Phénomène Dangereux « relâchement d'un débit non-maîtrisé à l'aval ».

Selon le guide du LCPC, la probabilité d'occurrence de l'ERC est caractérisée selon des échéances temporelles relativement courtes (inférieures à 100-150 ans, soit une probabilité d'occurrence annuelle ramenée à  $10^{-2}$ ). Ainsi, l'analyse de risques aboutit à qualifier l'évènement comme « courant », avec des conséquences « sérieuses », c'est-à-dire à un risque inacceptable. Le site étudié n'est pas particulièrement exposé au risque de chute de blocs par rapport à d'autres sites de retenues de barrages implantés dans des vallées encaissées. Le présent article soulève une discussion relative à la méthodologie de caractérisation de cet aléa dans le cadre des Etudes de Dangers.

## ABSTRACT

Artelia conducted the Safety Review (EDD) of a French concrete dam of class A, approximately 50 m high, located in a narrow valley. The reservoir, about 3 km-long, is bordered by numerous cliffs 10 to 20 m-high. A preliminary inspection of the reservoir banks conducted in anticipation of the EDD allowed for an estimate that, although large-scale landslides were unlikely given the site configuration, the risk of rock block collapse was significant. The "rockfall" hazard was thus considered within the framework of the EDD.

A preliminary visual assessment was conducted as part of the Safety Review by a geological engineer. Observations enabled the identification of areas sensitive to collapse in terms of the volume of blocks involved, fall height, and slope gradient. Furthermore, each of the rockfall scenarios thus established was the subject of a preliminary determination of its probability of occurrence. The methodology proposed by the LCPC technical guide [1] relies on an expert estimation using a qualitative occurrence probability scale and a temporal scale, resulting in an inseparable probability/time couple.

The rockfall scenarios geologically characterised were then subject to hydraulic numerical modelling to determine the height and period of the wave series that the collapse of each volume into the reservoir was likely to cause. Finally, an overflow study conducted according to the EurOtop II recommendations [3], usually used in the maritime field, allowed for a preliminary estimate of a flow crossing the crest of the dam. The Central Expected Event (ERC) associated with the natural hazard "rockfall" thus leads to the Dangerous Phenomenon (PhD) "release of uncontrolled downstream flow".

According to the LCPC guide, the probability of occurrence of the ERC is characterised by relatively short timeframes (less than 100-150 years, or an annual occurrence probability reduced to  $10^{-2}$ ). Thus, the risk analysis qualifies the event as "common" with "serious" consequences, that is, an unacceptable risk. The studied site is not particularly exposed to the risk of rockfall compared to other dam reservoir sites located in narrow valleys. This article raises a discussion about the methodology for characterising this hazard within the framework of Hazard Studies.

### 1. CONTEXTE

Artelia a réalisé la seconde Étude de Dangers (EDD), selon l'arrêté du 3 septembre 2018, d'un barrage français en béton de classe A, d'une hauteur d'environ 50 m, implanté dans une vallée encaissée. Le réservoir d'une longueur de l'ordre de 3 km est bordé de nombreuses falaises d'une hauteur de 10 à 20 m.

Dans le cadre du bilan de conception de l'ouvrage, la conformité de l'ouvrage à l'arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages doit être vérifiée. Dans le cas de notre barrage de classe A, c'est l'annexe I de l'arrêté qui est applicable. Elle définit notamment les situations de projet qu'il convient d'étudier.

Afin d'estimer le risque d'un effondrement de terrain dans la retenue, situation accidentelle identifiée à l'alinéa 26 de l'annexe I de l'arrêté, un premier diagnostic géologique avait été réalisé l'année précédant la rédaction de l'EDD. Il s'agissait d'un examen visuel des versants mené depuis une embarcation sur la retenue. Ce pré-diagnostic écartait l'occurrence des glissements de terrain de volumes importants, mais évaluait une « forte potentialité » de détachement et d'effondrement de grands blocs, depuis les falaises situées en bordure de retenue. Les volumes des blocs pouvant être impliqués dans un processus d'effondrement étaient estimés de  $100 \text{ m}^3$  à  $2000 \text{ m}^3$ . La situation accidentelle d'effondrement de terrain dans la retenue a donc été retenue pour l'analyse de risques de l'étude de dangers.

Il n'existe pas de recommandations relatives à la caractérisation de l'aléa « chute de blocs » dans les études de dangers. Le présent article détaille la méthodologie qui a été développée et appliquée pour l'analyse de risques sur ce barrage en particulier.

### 2. DIAGNOSTIC GEOLOGIQUE INITIAL

Un diagnostic géologique complémentaire, que l'on appellera « diagnostic géologique initial » dans le cadre de l'analyse de risques, a été réalisé par Artelia. Son objectif était de caractériser l'aléa « chute de blocs », comptant parmi les Evénements Initiateurs (EI) d'un Evénement Redouté Central (ERC) « surverse du barrage » qui sera étudié dans l'analyse de risques.

Les observations ont porté en particulier sur la présence de discontinuités dans le massif, de signes récents d'instabilités, de végétation dans les falaises, de blocs déjà éboulés, avec pour objectifs l'identification des blocs susceptibles de se détacher des falaises et la précision des points suivants :

- Localisation des zones instables : établissement d'une cartographie des départs potentiels,
- Volume des blocs rocheux susceptibles de se détacher,
- Hauteurs de chute,
- Pentés du terrain à ces emplacements critiques.

Ce diagnostic a permis la constitution d'un panel de scénarios de chutes de blocs, couvrant des blocs de volumes allant de 20 à 2000 mètres cubes. En parallèle de cette caractérisation des blocs instables, l'échéance d'occurrence des différents scénarios a été déterminée selon la méthodologie du LCPC [1] présentée ci-dessous.

Celle-ci repose sur l'estimation « à dire d'expert » d'un couple probabilité/délai dont les deux composantes sont indissociables : l'éventualité d'occurrence de chute est évaluée suivant une échelle qualitative de probabilité d'occurrence (cinq catégories de « très élevée » à « très faible »), et le délai significatif à l'intérieur duquel le phénomène peut se produire suivant une échelle temporelle (cinq catégories de « imminent – dans les prochains jours, semaines, mois » à « long terme – échéance de l'ordre de 100 à 150 ans »). La probabilité d'occurrence est estimée avant le délai, évitant ainsi d'obtenir des couples de probabilité très faible à de courtes échéances. Le couple probabilité/délai est destiné à être réestimé périodiquement.

Pour qualifier la probabilité d'occurrence et l'échéance temporelle, les « facteurs déterminants » que le LCPC propose de caractériser sont la description du compartiment rocheux, son processus d'évolution, ses mécanismes de rupture, sa fragmentation dans la phase d'écroulement.

Les échelles de probabilité d'occurrence et temporelle proposées sont les suivantes :

Très élevée (te)	L'occurrence du phénomène est normale. Sa non-occurrence serait exceptionnelle.	La probabilité est appréciée en fonction des facteurs déterminants (présence et/ou intensité).
Elevée (e)	L'occurrence du phénomène est plus envisageable que sa non-occurrence.	
Modérée (m)	L'occurrence du phénomène est équivalente à sa non-occurrence.	
Faible (f)	La non-occurrence du phénomène est plus envisageable que son occurrence.	
Très faible (tf)	La non-occurrence du phénomène est normale. Son occurrence serait exceptionnelle.	

Tableau 1 : Echelle qualitative de probabilité d'occurrence [1]

Imminent (i)	Prise en compte immédiate (le délai se compte en heures, jours, semaines ou mois).
Très court terme (tct)	2 ans environ.
Court terme (ct)	10 ans environ.
Moyen terme (mt)	De l'ordre de 30 à 50 ans.
Long terme (lt)	De l'ordre de 100 à 150 ans.

Tableau 2 : Echelle temporelle [1]

### 3. ETUDE DE GENERATION DE VAGUE DUE A L'EFFONDREMENT D'UN BLOC ROCHEUX DU VERSANT

A l'issue du diagnostic géologique initial, une étude hydraulique menée par Artelia a eu pour objectif de caractériser l'onde due à l'impact d'un bloc chutant dans la retenue, et notamment la hauteur de la vague initiale.

Cette étude s'est appuyée sur les travaux du laboratoire de Génie Hydraulique, Hydrologie et Glaciologie (VAW ETH Zürich) et de Valentin Heller [2], notamment expérimentaux, portant sur l'impact hydraulique d'un glissement de terrain dans une retenue.

Ces travaux étant applicables initialement à des glissements de terrain, l'étude hydraulique a tout d'abord consisté en l'analyse de la sensibilité des différents paramètres, afin de vérifier l'applicabilité à des éboulements

rocheux. Une étude numérique a notamment été menée (code Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) : DualSPHysics version 5.0.5), modélisant la chute d'un bloc rocheux et la propagation de la vague.

L'élévation du plan d'eau suite à l'impact du bloc est très similaire selon les deux approches, analytique et numérique. Il a donc été considéré que les formules analytiques permettraient de caractériser l'onde générée.

L'approche analytique est basée sur deux configurations 2D (barrage situé en face du glissement de terrain, propagation linéaire de l'onde) et 3D (barrage situé d'un côté ou de l'autre du glissement de terrain, propagation circulaire de l'onde) selon le plan d'eau considéré, et des formules sont proposées, permettant la détermination de la génération et la propagation de la vague principale (celle de plus grande amplitude).

Les paramètres d'entrée qui ont un effet sur le calcul des principales caractéristiques de la vague générée par une chute de blocs, en 2D ou 3D, sont les suivants :

- Vitesse d'entrée du bloc,
- Volume du bloc,
- Epaisseur du bloc,
- Largeur du bloc/canal,
- Masse volumique du bloc,
- Porosité du bloc,
- Angle de la pente,
- Profondeur de l'eau.

Dans le cas de chute de blocs rocheux, les paramètres les plus significatifs sont le volume et la masse du bloc, et la hauteur de chute et la pente du versant, desquelles dépend la vitesse d'entrée dans l'eau du bloc.

Cette approche analytique permet la description de l'onde générée, en 2D ou en 3D, selon les paramètres suivants :

- Hauteur totale de la vague,
- Elévation du plan d'eau,
- Abaissement du plan d'eau,
- Période de l'onde,
- Longueur d'onde,
- Célérité de l'onde.

#### **4. ETUDE DE FRANCHISSEMENT DE VAGUE DUE A L'EFFONDREMENT D'UN BLOC ROCHEUX DU VERSANT**

La vague générée par l'impact d'un bloc rocheux, se propageant jusqu'au barrage, est susceptible de franchir la crête de l'ouvrage et de libérer un débit non-contrôlé à l'aval.

Les débits franchissants ont été évalués par Artelia à partir de la hauteur de vague et de la période de l'onde, selon la méthodologie appliquée en génie maritime et définie dans le manuel EurOtop [3].

Il est à noter que cette méthodologie permet initialement l'évaluation, à partir de formules empiriques, de débits moyens franchissant un ouvrage au cours d'un épisode de houle (tempête). Elle est dans la présente étude appliquée à la hauteur de la vague initiale générée par l'impact d'un bloc rocheux. Le débit estimé n'est donc pas un débit moyen mais un débit soudain, dû à l'arrivée du front d'onde sur le barrage. La durée de déversement est brève (sauf scénario d'effondrements en chaîne, non-retenu dans le cadre de la présente étude).

Le niveau d'eau considéré est la cote de retenue à RN. Les estimations de débits de franchissement reposent sur la définition des paramètres suivants :

- Revanche de crête : distance entre le niveau d'eau et le niveau de crête de l'ouvrage ;
- Hauteur significative de la houle en pied d'ouvrage ;
- Hauteur d'eau en pied d'ouvrage ;
- Pente des fonds devant l'ouvrage.

## 5. ANALYSE DE RISQUES

### 5.1.Principe

Le principe de l'analyse de risques menée consiste à identifier et caractériser, pour un Evènement Redouté Central (ERC) donné :

- Les Evènements Initiateurs (EI) impliquant l'Evènement Redouté Central, en termes de probabilités d'occurrence,
- Les barrières de sécurité qui, si elles sont fiables, peuvent réduire la probabilité d'occurrence de l'Evènement Redouté Central à partir d'un même Evènement Initiateur,
- Les conséquences de l'Evènement Redouté Central : Phénomène Dangereux (PhD).

Dans notre étude, l'Evènement Redouté Central « Surverse du barrage » est dû à l'Evènement Initiateur « Effondrement d'un bloc rocheux dans la retenue » et implique le Phénomène Dangereux « Relâchement d'un débit non-maîtrisé à l'aval ».

Un arbre de défaillance combine ensuite Evènement Initiateur, barrières de sécurité, Evènement Redouté Central, pour obtenir la probabilité d'occurrence du Phénomène Dangereux. En fonction de cette probabilité, et du niveau de gravité des conséquences du Phénomène Dangereux, l'ERC est finalement placé dans une matrice de criticité, permettant de conclure sur la maîtrise ou non des risques associés à l'ouvrage.

### 5.2.Conversion de l'échelle géologique à l'échelle probabiliste

Le choix de l'utilisation de la méthodologie proposée par le LCPC, pour estimer les probabilités d'occurrence des scénarios de chute de blocs identifiés lors du diagnostic géologique, repose sur la volonté d'objectiver au mieux le « jugement d'expert ». En effet, pour les chutes de blocs, la grille couramment utilisée pour coter les probabilités d'occurrence des autres EI sur les barrages, ne permet pas de prendre en compte les spécificités du mécanisme :

Classe de Probabilité Type d'appréciation	Possible mais extrêmement peu probable	Très improbable	Improbable	Probable	Courant
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 évènement 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 produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation.	S'est produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installation, malgré d'éventuelles mesures correctives.
Quantitative		$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$

Tableau 3 : Grille de probabilité d'occurrence couramment utilisée dans les analyses des risques

*Nota : La probabilité d'occurrence est bornée à  $10^{-6}$  dans l'analyse, même si certains événements ont en théorie une probabilité d'occurrence encore plus faible.*

A l'issue du diagnostic géologique initial, chaque scénario de chute de bloc est ainsi associé à un couple probabilité/délai d'effondrement selon les échelles du LCPC. Il convient pour les besoins de l'analyse de risques de convertir ce couple probabilité/délai, dont la probabilité est qualitative donc non-applicable sans conversion

à l'analyse de risques, en probabilité d'occurrence quantitative d'un EI « Effondrement d'un bloc rocheux dans la retenue ».

L'échelle de conversion proposée pour les besoins de l'étude, part de la définition qualitative proposée par le LCPC de la probabilité d'occurrence « modérée » : « l'occurrence du phénomène est équivalente à sa non-occurrence », qui donne mathématiquement une probabilité de 0,5.

Les délais associés aux probabilités d'occurrence sont compris entre « imminent – dans les prochains jours, semaines, mois » et « long terme – échéance de l'ordre de 100 à 150 ans ». Traduit en probabilités, l'échelle va de  $1 \text{ à } 10^{-2}$ . Pour un délai « moyen terme », l'échéance est de 30 à 50 ans, soit une probabilité de  $2.10^{-2}$  à  $3.10^{-2}$ .

En croisant les couples probabilité/délai selon cette translation déduite, nous obtenons pour un effondrement de chute de blocs auquel est associé le couple probabilité/délai « probabilité modérée-délai moyen terme » une probabilité mathématique de  $1.10^{-2}$  à  $1,5.10^{-2}$ .

### 5.3. Arbre de défaillance sans barrière de prévention

Disposant de la probabilité d'occurrence de l'évènement initiateur, il convient d'estimer la fiabilité d'éventuelles barrières de prévention à mettre en place. En première approche, on ne considère aucune barrière de prévention. La probabilité d'occurrence de l'ERC est égale à celle de l'EI.

Il devient alors possible d'établir l'arbre de défaillance conduisant à la définition de la probabilité d'occurrence de l'ERC « Surverse du barrage » :

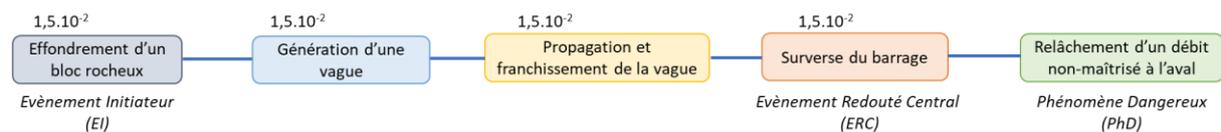


Figure 1 : Arbre de défaillance de l'ERC « Surverse du barrage »

### 5.4. Matrice de criticité sans barrière de prévention

A l'issue de l'étude hydraulique de génération de vagues et de l'étude de franchissement, chaque scénario de chute de bloc (EI) est associé à une hauteur de vague et période desquelles découlent un débit de franchissement.

Ce débit de franchissement est comparé aux débits caractéristiques de l'ouvrage (capacités d'évacuation du barrage : vidange, évacuateur de crues ; débit des crues de projet ; etc.). L'intensité de ce franchissement, c'est-à-dire le débit relâché, est donc déduite par comparaison aux autres PhD « Relâchement d'un débit non-maîtrisé à l'aval » étudiés sur l'ouvrage.

La cinétique du franchissement est rapide.

La grille permettant finalement d'établir la gravité des conséquences en fonction du nombre de personnes exposées, est la suivante :

Niveau de gravité des conséquences	Nombre N de personnes exposées en zone à cinétique rapide	Nombre N de personnes exposées en zone à cinétique graduelle
5 désastreux	$N \geq 1000$	$N \geq 10\ 000$
4 catastrophique	$100 \leq N < 1000$	$1000 \leq N < 10\ 000$
3 important	$10 \leq N < 100$	$100 \leq N < 1000$
2 sérieux	$1 \leq N < 10$	$10 \leq N < 100$
1 modéré	0	$1 \leq N < 10$

Tableau 4 : Grille de classification de la gravité des conséquences en fonction du nombre de personnes exposées

Le barrage étant localisé dans des gorges étroites fréquentées par des pêcheurs, le nombre de personnes potentiellement exposées lors de l'augmentation brutale du débit du cours d'eau est compris entre 1 et 10.

La connaissance de la probabilité de l'ERC et des conséquences induites permet finalement de placer l'ERC dans la matrice de criticité. L'appréciation d'une probabilité d'occurrence de  $1,5 \cdot 10^{-2}$  conduit à placer l'ERC parmi les événements courants :

Occurrence \ Gravité		10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>
		Possible mais extrêmement peu probable	Très improbable	Improbable	Probable
5	Désastreux				
4	Catastrophique				
3	Important				
2	Sérieux				ERC
1	Modéré				

Tableau 5 : Matrice de criticité utilisée pour l'analyse de risques

Nota : la criticité associée à chacune des trois zones est la suivante :

- Zone rouge (forte probabilité, gravité importante) : risque inacceptable, nécessitant des mesures de réduction ;
- Zone jaune (probabilité intermédiaire, gravité importante) : risque à surveiller, pouvant être réduit par des mesures à définir ;
- Zone verte (probabilité faible et gravité intermédiaire ou probabilité moyenne et gravité modérée) : risque acceptable.

Les couples probabilité/délai associés au phénomène géologique « Effondrement de blocs rocheux » conduisent à situer tous les ERC « Surverse du barrage » dus à la chute de blocs en bordure de retenue en colonnes « probable » et « courant » de la matrice de criticité, c'est-à-dire en zone « orange : risque à surveiller, pouvant être réduit par des mesures à définir » dès que les conséquences du relâchement d'un débit sont « sérieuses ».

Toutefois, le site étudié n'est pas particulièrement exposé à un risque chute de bloc par rapport à d'autres sites de barrages en vallées encaissées. Dans la vie de l'ouvrage, l'exploitant n'a jamais constaté d'événements de chutes de blocs d'ampleur comparable à celle des scénarios étudiés. La conversion proposée de l'échelle géologique qualitative vers des probabilités quantitatives pour les besoins de l'analyse de risques est ainsi peu satisfaisante.

Il est identifié un besoin d'uniformisation de la méthodologie de prise en compte de l'aléa « chute de blocs en bordure de retenue » dans le cadre des Etudes de dangers. Le risque est présent, et s'il ne peut être ignoré ou minimisé, il convient toutefois de le mettre en perspective avec la caractérisation de l'acceptabilité des risques selon l'EDD.

Pour notre étude, il est proposé de définir des Mesures de Réduction des Risques. Dans notre cas : des actions à mettre en place sur les événements dont l'échéance d'occurrence est définie comme « imminente » ou « très court terme » (inférieure à 2 ans), et des mesures de surveillance sur les autres événements.

### 5.5. Définition des Mesures de Réduction des Risques

Afin de décaler la probabilité de l'ERC par rapport à celle de l'EI, et de maîtriser le risque associé à l'aléa « chute de blocs », il convient que ces Mesures de Réduction des Risques fonctionnent comme des barrières de prévention fiables.

Une première mesure consiste à prendre en compte des dispositions de protection pour les scénarios dont l'échéance est estimée à « imminent » et « très court terme » telles que : purge, protection des falaises par des

filets, ancrages, comme celles mises en œuvre en surplomb des axes de circulation, dispositif pare-vagues, abaissement du plan d'eau. Cette barrière, à définir selon chaque configuration (hauteur de vague potentielle, etc.) est considérée comme fiable et permet de décoter la probabilité d'occurrence de l'ERC. La décote est définie en fonction du système de protection.

Une seconde mesure, pour les scénarios jugés non-imminents, consiste à surveiller le phénomène d'effondrement par la réalisation, à chaque Etude de dangers (soit tous les 10 ans pour un barrage de classe A), d'un diagnostic géologique de suivi des berges. Le diagnostic géologique de suivi constituant la Mesure de Réduction des Risques est distinct du diagnostic géologique initial qui a permis de caractériser l'aléa « chute de blocs ». Le couple probabilité-délai est réactualisé lors du diagnostic géologique de suivi pour chacun des scénarios, car le phénomène d'instabilité est évolutif. Le diagnostic géologique de suivi peut également permettre d'identifier de nouveaux compartiments potentiellement instables et de les caractériser. Cette barrière de prévention est considérée comme fiable, et permet de décoter la probabilité d'occurrence de l'ERC. La décote proposée est de 0,01 (niveau de confiance 2) pour la Mesure de Réduction des Risques de surveillance du phénomène : en effet, cette mesure permet de réestimer à fréquence régulière le couple probabilité-délai de tous les scénarios dont le délai était au moins « court terme », et de s'assurer, si le délai se réduit, de la mise en œuvre de l'autre Mesure de Réduction des Risques : dispositions de protection telles que proposées ci-avant. La temporalité est donc adaptée à la cinétique du phénomène.

Les ERC classés « courants » dans la matrice de criticité, par exemple les scénarios d'effondrement dont le couple probabilité-délai était « probabilité modérée-délai moyen terme », passent en catégorie « improbable » : le risque est considéré comme acceptable.

Occurrence		10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>
		Possible mais extrêmement peu probable	Très improbable	Improbable	Probable
5	Désastreux				
4	Catastrophique				
3	Important				
2	Sérieux		ERC	ERC ←	ERC
1	Modéré				

Tableau 6 : Matrice de criticité résiduelle après Mesure de Réduction des Risques

## 6. DISCUSSION

De très nombreuses retenues de barrage sont bordées de falaises de hauteur modérée, susceptibles de présenter un risque d'effondrement de blocs rocheux. L'exemple présenté dans cet article montre que l'application de la méthodologie d'estimation des probabilités d'occurrence de la chute de blocs rocheux dans la retenue, associée à l'application de la méthodologie de l'analyse de risques d'une étude de dangers, aboutit à une criticité non-acceptable de l'Évènement Redouté Central « Surverse du barrage » dû à l'effondrement de blocs en berges de retenue. En effet, l'échelle des « temps géologiques » et les probabilités d'occurrence qualitatives proposées par le LCPC, converties en probabilités quantitatives pour les besoins de l'analyse de risques, conduisent à des probabilités d'occurrence de l'aléa relativement importantes (événement courant, probable).

Or, dans la vie de l'ouvrage, l'exploitant n'a jamais constaté d'évènements de chutes de blocs d'ampleur comparable à celle des scénarios étudiés. La conversion proposée de l'échelle géologique vers des probabilités quantitatives est ainsi peu satisfaisante. De plus, pour des scénarios d'effondrement dont le couple probabilité-délai est par exemple « probabilité modérée-délai moyen terme », malgré une criticité non-acceptable des ERC associés, il n'est pas envisageable de mettre en place de manière systématique des mesures de protection telles que des filets, ancrages, dispositifs pare-vagues.

Pour notre étude, il a été choisi de proposer deux Mesures de Réduction des Risques consistant, pour les scénarios jugés non-imminents, à effectuer à fréquence régulière un diagnostic géologique et actualiser les couples probabilité-délai qualifiant les scénarios d'instabilité, et pour les scénarios dont l'échéance est « imminente » ou « très court terme », à mettre en place des dispositions de protection. Ces barrières combinant action et surveillance, à une temporalité adaptée à la cinétique du phénomène, permet de décoter la probabilité d'occurrence de l'Évènement Redouté Central d'au moins 0,01, et le risque est finalement considéré comme acceptable.

Il est toutefois identifié, à la suite de cette étude, un besoin d'uniformisation de la méthodologie de prise en compte de l'aléa « chute de blocs en bordure de retenue » dans le cadre des Etudes de dangers.

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux, Guide technique, Collection environnement, ISSN 1151-1516, Laboratoire Central de Ponts et Chaussées, Juin 2004
- [2] Landslide-generated Impulse Waves in Reservoirs – F. M. Evers, V. Heller, H. Fuchs, W. H. Hager, R. M. Boes – Zürich – 2019
- [3] EurOtop – Manual on wave overtopping of sea defences and related structures (Second edition 2018)