

ETUDES DES CHUTES DE BLOCS SUR LES OUVRAGES HYDRAULIQUES DANS LE CADRE DES ETUDES DE DANGERS

Study of falling boulders on hydraulic structures

Nicolas BAGNEUX, Nikita BONDAREV, Fabien CHAMINADE, Patrick DIVOUX, Sébastien DOMITILE

EDF CIH, La Motte Servolex / Toulouse, FRANCE

nicolas.bagneux@edf.fr, nikita.bondarev@edf.fr, fabien.chaminade@edf.fr, patrick.divoux@edf.fr,
Sébastien.domitile@edf.fr

Cédric DAVENNE, Timothée SERRA, Jean-Marc VEZIN

SIXENSE NECS, 196 rue Houdan, 92330, Sceaux, France

cedric.davenne@necs.fr, timothee.serra@necs.fr, jean-marc.vezin@necs.fr

Bruno APRILE, Evan MONROIG

STABILIS, 15 rue Louis et Auguste Lumière, 01630 St Genis Pouilly

evan.monroig@stabilis.fr, bruno.aprile@stabilis.fr

Nicolas Van DORSELAER, Tess LEGAUD, Victor POULHIER

DYNASPLUS, 5 avenue Didier Daurat, 31400 Toulouse

n.van-dorselaer@dynasplus.com, t.legaud@dynasplus.com, v.poulhier@dynasplus.com

MOTS CLEFS

Chutes de blocs, analyse en dynamique rapide, calcul explicite, béton, protection, trajectographie, enjeu, aléa, risque, propagation.

KEY WORDS

Falling boulders, explicit dynamics, impact, concrete, protection, rockfall trajectory, issue, hazard, risk, propagation.

RÉSUMÉ

Les aménagements hydrauliques sont des ouvrages qui s'insèrent dans les paysages naturels. Plus qu'aucun autre ouvrage de génie civil, ils sont soumis à la plupart des aléas naturels : crues bien sûr, mais aussi, séismes, avalanches, gels sévères, mouvements de terrain et chutes de blocs.

Les études de dangers conformes à la dernière réglementation de 2018 intégrant l'arrêté technique « barrages » imposent d'envisager tous les risques encourus par les ouvrages retenant de l'eau. Cela conduit à un plus grand recours à des études poussées décrivant les phénomènes naturels : cartes d'aléas sismiques, études des bassins versants, études d'ondes de submersion, modèles numériques de terrain pour les bathymétries ou le zonage avalancheux, études trajectographiques de chutes de blocs.

Concernant les risques de chutes de blocs rocheux, les pratiques récentes dans le domaine de l'estimation de l'aléa et du risque font l'objet d'approches variées et hétérogènes. Les études sont en général conduites par des bureaux d'études spécialisés à partir de méthodologies développées en interne. Centrées sur la probabilité d'atteinte d'un secteur ou d'une cible (l'aléa), ces études appréhendent souvent moins bien la connaissance de l'enjeu (humain, matériel, fonctionnel), de son exposition et des risques associés.

D'autre part, la plupart du temps les études de chutes de blocs servent à sécuriser les ouvrages par une protection à l'amont des ouvrages : purges, confortement des parois rocheuses par clouages, installations de filets, voire de merlons. Une inspection régulière permet d'assurer un suivi efficace.

Dans les cas les plus extrêmes, il se peut qu'une chute de bloc atteigne les ouvrages hydrauliques, que ce risque soit jugé non négligeable, qu'il n'y ait pas de possibilité de l'atténuer et que les énergies en jeu soient considérables et en mesure d'affecter la sûreté de l'ouvrage.

Le CIH (Centre d'Ingénierie Hydraulique) d'EDF Hydro a été confronté ces dernières années à des cas pour lesquels le recours à des simulations numériques en formulation explicite a permis de mieux appréhender la capacité des ouvrages à reprendre ces impacts d'énergie et de conséquences très variables. Dans certains cas, le CIH est allé jusqu'à concevoir des confortements sur les ouvrages.

Cet article traitera donc du sujet de chutes de blocs sous deux aspects :

Une présentation d'une méthodologie pour une politique homogène de gestion du risque « chutes de blocs » à EDF-HYDRO. Cette méthodologie a pour objectif de clarifier le rôle des différents acteurs et de faire en sorte que les solutions de sécurisation retenues correspondent à des choix justifiés, pertinents et raisonnables. Elle s'est avérée utile pour solutionner des problématiques complexes.

Une présentation de cas d'études numériques de simulation d'impacts rocheux sur les ouvrages hydrauliques (barrages et ouvrages annexes). Ces modélisations de calculs en dynamique rapide sont peu documentées dans la littérature dans le cas d'aménagements hydrauliques. Elle permettra de faire part à la communauté des résultats obtenus et des ordres de grandeur à garder en mémoire.

ABSTRACT

Hydraulic structures are integrated into natural landscapes. More than any other civil engineering structure, they are subject to most natural hazards: floods of course, but also earthquakes, avalanches, severe frosts, ground movements and falling boulders.

The new generation of hazard studies in France, commonly known as EDD2, require that all risks involved by water-retaining structures be considered. This leads to a systematization of studies describing the phenomena: seismic hazard maps, watershed studies, submersion wave studies, digital terrain models for bathymetry or avalanche zoning, and rockfall trajectory studies.

Regarding the risks of falling boulders, recent practices in the field of hazard and risk estimation are subject to varied and heterogeneous approaches. Studies are usually conducted by specialized design firms using internal methodologies. Focusing on the probability of reaching an area or target (the hazard), these studies often provide less knowledge about the issue (human, material, functional), its exposure and associated risks.

On the other hand, most of the time the studies of falling blocks enable to secure the structures by a protection upstream of the structures: purges, mountain rock wall strengthening by nailing, dynamic rockfall barriers or even rockfall embankments. Regular inspection ensures effective follow-up.

In the most extreme cases, it is possible that a rock fall reaches the hydraulic structures, that this risk is considered probable, that there is no possibility of mitigating it and that the energies involved are considerable and capable of affecting the safety of the structure.

In recent years, EDF CIH has carried out numerical simulations with explicit dynamics calculations. These simulations allow a better understanding of the behavior of structures subjected to low or high energy impacts with varied consequences. In some cases, EDF CIH has even designed a specific reinforcement of the structure.

This article will deal with the subject of falling boulders in two ways:

A presentation of a methodology developed by EDF-HYDRO for a homogeneous risk management policy for "falling boulders". The goal of this methodology is to clarify the role of the various actors and to ensure that the security solutions chosen correspond to justified, relevant and reasonable choices. It has proven useful in solving complex problems.

A presentation of case studies of numerical simulation of rock impacts on hydraulic structures (dams and other structures). These numerical models with explicit dynamics calculations are seldom documented in the literature for hydraulic structures. It will allow the community to share the results achieved and the orders of magnitude to keep in mind.

1. METHODOLOGIE POUR UNE POLITIQUE HOMOGENE DE GESTION DU RISQUE « CHUTES DE BLOCS »

Cette première partie présente une nouvelle méthodologie pour une politique de gestion responsable des risques de chutes de blocs développée par EDF et partagée dans le cadre du projet national de recherche C2ROP (Chutes de Blocs, Risques Rocheux et Ouvrages de Protection) entre 2014 et 2022 - <https://c2rop.fr/>.

La gestion cohérente du risque “chute de blocs” a nécessité la mise en place de ce cadre commun. Pour les barrages pouvant être impactés par les chutes de blocs, les analyses de risque sont intégrées aux Etudes De Dangers (EDD).

1.1. Les acteurs

Les acteurs impliqués dans un cas de « chute de blocs » et leur rôle au sein de l’organisation EDF Hydro sont :

Acteurs		A EDF
	Le Maître d’Ouvrage – MOA	EDF Hydro
	Le Maître d’œuvre ou l’Assistant au Maître d’Ouvrage – AMOA	EDF-CIH
	Le Bureau d’Études spécialisé – Géologue/Géotechnicien	EDF-TEGG sollicité dès le départ / BE spécialisés dans les études d’aléa et la sécurisation des falaises
	Les Entreprises spécialisées dans les travaux de sécurisation en falaises	Les Entreprises spécialisées dans les travaux de sécurisation en falaises

Tableau 1 : les acteurs d’une affaire « chutes de blocs » et leur déclinaison à EDF Hydro

1.2. Réglementation française

En France, les problèmes de chute de blocs doivent être gérés conformément aux :

- Principes généraux de prévention : Les employeurs ont un devoir de sécurité envers leurs employés.
- Norme NF P 94 500 - Génie géotechnique.

1.3. Les principaux concepts

Les principaux concepts sont :

- Zone d’étude ou périmètre d’étude : Aire géographique dans laquelle est menée l’étude. Elle inclut les zones de départ, les zones de propagation et les enjeux.
- Enjeu : Personne, bien, activité, moyen, patrimoine, etc. susceptible d’être affecté directement ou indirectement par un phénomène naturel. Une distinction est faite entre les questions humaines, fonctionnelles et matérielles.
- Zone cible : Zone où le problème pourrait être situé.
- Aléa (sous-entendu aléa résultant) : phénomène incertain pouvant causer des dommages (dans le cas des éboulements, arrivée ou passage d’un bloc en un point donné). Il résulte d’un aléa de départ (ou de rupture) et d’un aléa de propagation, d’où l’expression aléa résultant.
- Risque : Conséquences d’un aléa sur un enjeu. Une distinction est également faite entre le risque humain, fonctionnel et matériel.

La Figure 1 illustre la différence fondamentale entre le risque et l’aléa. Un aléa, même important, ne génère pas nécessairement de risque.

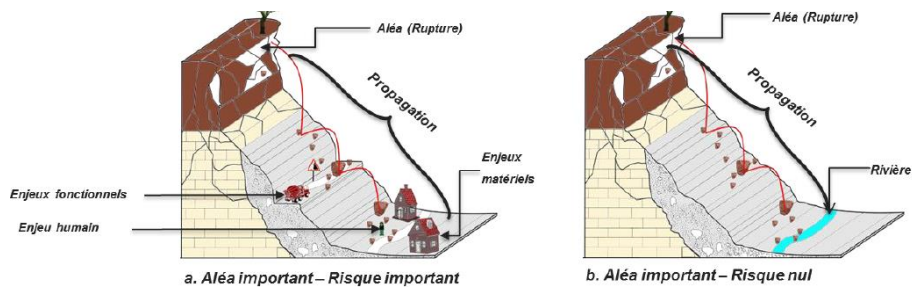


Figure 1 - Différence entre un scénario d'aléa avec risque (a), et sans risque (b)

1.4.Principales étapes de la gestion des risques de chute de blocs

Il y a 5 étapes principales dans le processus de gestion du risque de chute de blocs :

1. Définir les enjeux, le périmètre de l'étude et les zones de départ
2. Évaluation de l'aléa et du risque initial,
3. Étudier comment réduire le risque (si nécessaire)
4. Réduction des risques
5. Surveillance et entretien

1.5.Définir les enjeux et le périmètre géographique de l'étude

Les informations acquises lors de la première visite sur le site devraient aider à définir les limites géographiques de l'étude.

L'identification précise des enjeux menacés est la première étape fondamentale dans l'évaluation du risque « chutes de blocs ».

Il convient de distinguer les enjeux par leur nature :

- Les enjeux matériels : des biens sont potentiellement impactés ;
- Les enjeux humains : des personnes sont menacées ;
- Les enjeux fonctionnels : des fonctions peuvent être dégradées. Les enjeux fonctionnels peuvent entraîner des conséquences dites structurelles lorsqu'une organisation (une structure) est perturbée.

Lors de l'établissement de la liste des enjeux, il faut bien faire la différence entre les personnes, les biens et les fonctions menacés. Par exemple, le cycliste $\neq$ la structure de la route $\neq$ la liaison routière ou l'exploitant $\neq$ la structure de l'évacuateur de crue $\neq$ la capacité d'évacuer les crues.

Un fois les enjeux identifiés, on s'interrogera sur leur présence permanente ou temporaire, fixe ou mobile.

1.6.Évaluation de l'aléa

L'évaluation de l'aléa se base sur une visite de site par un géologue chargé d'apprécier l'instabilité d'une masse rocheuse et sa propagation jusqu'à la cible.

- L'aléa de départ :

Le niveau d'aléa de départ évalue la potentialité de départ des masses rocheuses au sein d'une période de référence de 30 ans. On distingue 4 niveaux dans le cas d'un aléa de départ ponctuel (« Faible », « Moyen », « Élevé » et « Très élevé ») et seulement 2 niveaux dans le cas d'un aléa de départ diffus (« Faible » et « Très élevé », selon l'activité de la zone de départ, respectivement non significative ou significative). L'appréciation du niveau d'aléa de départ peut être objectivée autant que possible par le géologue sur le terrain, en s'appuyant sur une description géologique des facteurs déterminants de départ : pente, gélivité des faciès, structuration du massif rocheux, présence d'eau ou de végétation, historique des instabilités...

- L'aléa de propagation :

L'étude de l'aléa de propagation vise à caractériser les trajectoires des masses rocheuses en mouvement. Le niveau d'aléa de propagation évalue la potentialité d'atteinte de la cible par les masses rocheuses en mouvement selon 3 niveaux (« Faible », « Moyen » et « Élevé »).

- L'aléa résultant :

L'aléa résultant constitue la donnée d'entrée de l'étude de risque. Le niveau d'aléa résultant correspond au produit entre le niveau d'aléa de départ et le niveau d'aléa de propagation. Il peut être défini comme suit :

Niveau d'aléa résultant	Définition
Faible	Probabilité faible qu'un bloc atteigne la cible pendant la période de référence considérée (30 ans ou 5 ans)
Moyen	Probabilité moyenne qu'un bloc atteigne la cible pendant la période de référence considérée (30 ans ou 5 ans)
Elevé	Probabilité forte qu'un bloc atteigne la cible pendant la période de référence considérée (30 ans ou 5 ans)
Très élevé	Probabilité très forte qu'un bloc atteigne la cible dans un délai probablement court par rapport à la période de référence considérée (30 ans ou 5 ans).

Tableau 2: Définitions des niveaux d'aléa résultant

Dans le cas d'un aléa de départ ponctuel, l'aléa résultant est fourni par la matrice suivante :

Niveau d'aléa résultant ponctuel		Aléa de départ ponctuel			
		Très élevé	Elevé	Moyen	Faible
Aléa de propagation	Elevé	Très élevé	Très élevé	Elevé	Moyen
	Moyen	Elevé	Moyen	Moyen	Faible
	Faible	Moyen	Moyen	Faible	Faible

Tableau 3 : Matrice de l'aléa résultant dans le cas d'un aléa de départ ponctuel

1.7. Evaluation du risque

Considérons un enjeu avec une valeur et une unité de mesure. Cet enjeu positionné dans une zone à risque voit sa valeur diminuer puisqu'il risque d'être détérioré. Le risque représente la dévalorisation de l'enjeu ; c'est une part de l'enjeu directement dépendante :

- De la probabilité qu'un événement pouvant détériorer l'enjeu se produise ;
- Des taux d'exposition et de dommage de l'enjeu en cas d'évènement.

L'équation du risque peut s'écrire de la façon suivante : $Risque = P_{Résult} * T_{Exp} * T_{Dommage} * Enjeu$ avec :

- Enjeu : Valeur de l'enjeu et son unité de mesure
- $P_{Résult}$: Aléa résultant (probabilité d'atteinte de la cible pendant la durée d'analyse) qui est lui-même le produit de l'aléa de départ et de l'aléa de propagation : $P_{Résult} = P_{Départ} * P_{Propa}$ avec :
 - $P_{Départ}$: aléa de départ (probabilité de départ pendant la durée d'analyse)
 - P_{Propa} : aléa de propagation (probabilité d'atteinte de la cible en cas de départ)
- T_{Exp} : Taux d'exposition pour les enjeux mobiles (probabilité d'atteinte de l'enjeu en cas d'entrée dans la cible)
- $T_{Dommage}$: Taux de dommage en cas d'atteinte (taux de dommage - ou dévalorisation - de l'enjeu en cas d'atteinte)

Pour réduire le risque « chutes de blocs », il y a toujours 4 facteurs :

1. Réduire l'Aléa de départ $P_{Départ}$: Parades actives
2. Réduire l'Aléa de propagation P_{Propa} : Parades passives
3. Réduire le Taux d'exposition T_{Exp} : Prévenir/Diminuer la présence
4. Réduire le Taux des Dommages $T_{Dommage}$: Améliorer les protections

Cependant, tous les paramètres de l'équation du risque ne peuvent pas être quantifiés. À partir d'une approche qualitative, l'équation du risque devient : $\text{Risque} = \text{Niveau d'aléa} * \text{Niveau d'exposition} * \text{Dommage en cas d'impact}$.

Trois niveaux de risque sont retenus, définis dans le tableau ci-après :

Niveau de risque	Définition
Risque Elevé à Très Elevé (TE/E)	Risque élevé à très élevé qui impose de définir des mesures rapides de réduction des risques, le temps d'étudier et de mettre en place des solutions pérennes. Dans le cas d'un risque Très Elevé, la définition et la mise en œuvre des mesures de réduction doivent être immédiates.
Risque Modéré (M)	Risque modéré nécessitant l'engagement rapide d'une étude de solutions de réduction du risque. Avec ce niveau de risque, la poursuite des activités dans la zone cible peut être tolérée : - si les solutions génèrent un risque de niveau Modéré ou supérieur ; - ou si les passages dans la zone cible répondent à des enjeux importants de sûreté, contrôle ou autre. Le niveau de risque est mentionné à tout intervenant dans le secteur.
Risque Limité (L)	Risque limité mais non nul nécessitant un niveau de vigilance et des mesures de suivi adaptées.

Tableau 4 : Définitions des niveaux de risque

1.8.Évaluation du risque fonctionnel pour les ouvrages hydrauliques

L'évaluation du risque fonctionnel pour les ouvrages hydrauliques consiste à étudier leur capacité à conserver leurs fonctions principales qui sont :

- Soit retenir une grande quantité d'eau (barrage),
- Soit permettre le passage de l'eau (évacuateur de crue, vidange de fond, prise d'eau, ...).

La valeur de l'enjeu fonctionnel dépend des conséquences consécutives à la perte d'une fonctionnalité (capacité d'évacuer des crues, rupture du barrage, ...). Elle est exprimée de manière qualitative.

Niveau de valeur de l'enjeu fonctionnel	Définition
Très Elevé (TE)	La perte de la fonctionnalité peut engendrer des sur-conséquences(*) graves.
Elevé (E)	La perte de la fonctionnalité a des conséquences fortes sur la durée, sans sur-conséquence grave.
Moyen (M)	Un dispositif ou organisation de remplacement de la fonctionnalité a été étudié et accepté. Il n'est pas opérationnel.
Faible (F)	Un dispositif et/ou une organisation de remplacement sont opérationnels.

(*) Sur-conséquence : Par exemple, la rupture d'un barrage qui serait consécutive à la rupture d'un évacuateur de crue.

Tableau 5 : Valeur qualitative d'un enjeu fonctionnel

L'ouvrage hydraulique est fixe et le taux d'exposition est égal à 1. L'étude du risque fonctionnel considérera la résistance des ouvrages en cas d'impact. La résistance (Taux de dommage) est estimée sur la base d'une approche simplifiée.

$T_{\text{Dommage}} > 0,1$	Absence de résistance	La valeur de la fonction est égale à la valeur de l'enjeu.
$0,001 < T_{\text{Dommage}} \leq 0,1$	Résistance probable	La valeur de la fonction correspond à la valeur de l'enjeu abaissée d'un niveau.
$T_{\text{Dommage}} \leq 0,001$	Bonne résistance	La valeur de la fonction correspond à la valeur de l'enjeu abaissée de 2 niveaux.

Tableau 6 : Evaluation de la résistance de l'enjeu

L'équation du risque peut s'écrire de la façon suivante : $\text{Risque} = P_{\text{Résult}} * T_{\text{Dommage}} * \text{Enjeu}$ avec :

- Enjeu : Valeur de l'enjeu
- $P_{\text{Résult}}$: Aléa résultant
- T_{Dommage} : Taux de dommage en cas d'atteinte

Une matrice permet d'évaluer le risque à partir de la connaissance du niveau d'aléa et de la valeur qualitative de l'enjeu et de sa résistance.

		Aléa résultant			
		TE	E	M	F
Valeur qualitative de l'enjeu fonctionnel	Enjeu TE sans résistance	TE	TE	E	M
	Enjeu E sans résistance	E	E	L	L
	Enjeu TE + résistance probable	E	E	L	L
	Enjeu M sans résistance	E	M	L	L
	Enjeu E + résistance probable	E	M	L	L
	Enjeu TE + bonne résistance	E	M	L	L
	Enjeu F sans résistance	F	L	L	L
	Enjeu M + résistance probable	F	L	L	L
	Enjeu E + bonne résistance	F	L	L	L

Tableau 7 : Matrice d'évaluation d'un risque fonctionnel

Pour les barrages impactés, le niveau de risque constitue une information importante à prendre en considération dans l'EDD.

2. ETUDES NUMERIQUES DE SIMULATION D'IMPACTS ROCHEUX SUR LES OUVRAGES HYDRAULIQUES

Deux ouvrages ont récemment fait l'objet d'étude d'impact rocheux dans le cadre de leurs Etudes De Dangers, désignés par la suite par A pour le 1^{er} et B pour le 2^{ème}. Pour ces deux barrages de type poids, le couronnement est impacté en rive. Le local vanne en pied du barrage A est aussi impacté. Deux types d'ouvrages sont donc soumis à des impacts : les ouvrages massifs (couronnement du barrage A et B) et des ouvrages flexibles (local de vanne de fond).

Ces études sont inhabituelles dans le sens où en principe les solutions de sécurisation tels que la purge, les filets ou les merlons permettent d'éviter toutes chutes sur les ouvrages hydrauliques.

Dans les deux cas présentés, les études trajectographiques ont identifié des blocs de gros volume ne pouvant être stoppés par des dispositifs de sécurisation courants. L'intervention d'équipe spécialisée pour poser des dispositifs de sécurisation est jugée aussi trop risquée, après discussion avec des entreprises spécialisées et en application de la démarche développée ci-dessus. C'est donc dans ce contexte, que des études d'impact sur les ouvrages ont été demandées afin de répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les désordres engendrés sur les ouvrages ?
- Existe-t-il un risque de brèche pouvant occasionner un lâché incontrôlé d'eau à l'aval ?
- Pour l'ouvrage A, concevoir une solution de confortement si nécessaire.

2.1. Caractéristiques des impacts

Le tableau suivant récapitule les données des impacts les plus défavorables sur les ouvrages :

	Barrage A	Barrage B
Volume de blocs rocheux max [m ³]	30 m ³	60 m ³
Énergie maximale déployée [MJ]	19.5 MJ sur le barrage, 36 MJ sur le local vanne de fond	47.7 MJ

Tableau 8 : Données sur les impacts pour les ouvrages A et B

Les énergies maximales à reprendre par les ouvrages dépassent les capacités dissipatives de protections contre les chutes de blocs ; pour information le lecteur trouvera ci-dessous un graphique reliant le type de protection et le niveau d'énergie auquel il peut être soumis (les énergies ont été mises à jour en 2010) :

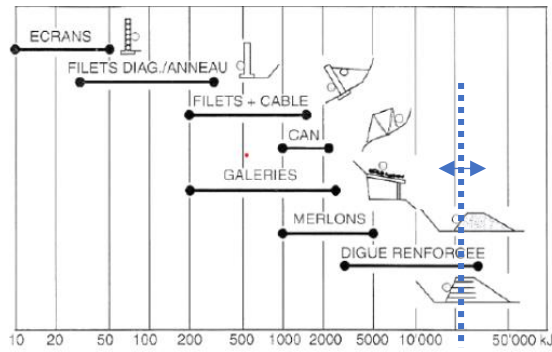


Figure 2 - Capacité dissipative de protections contre les chutes de blocs selon le LCPC 0, 0

Type d'ouvrages	Nouvelles énergies (kJ)
Ecrans Pare-pierre	200
Ecrans de filets pare-blocs (avec dissipateurs)	5 000
Galeries en béton	10 000
Galeries en béton (avec dissipateurs)	15 000
Merlons en sols renforcé	150 000

Tableau 9 : Energies mises à jour

Des calculs analytiques ont été réalisés pour évaluer la capacité de la dalle existante du local vanne de fond : le constat est sans appel, la résistance de la dalle supérieure est évaluée à 300 kJ soit nettement moins que les 36 MJ d'énergie cinétique de l'impacteur (pour information, la dalle ne peut encaisser qu'un bloc maximal de 0.25m³ lancé à 31 m/s, ce qui est très bas par rapport aux 30m³). Le renforcement de cette structure flexible est extrêmement compliqué tant les énergies à reprendre sont démesurées. La rupture de la vidange de fond correspond à un événement redouté central (ERC) de l'analyse de risques effectuée sur le barrage A. L'EDD retient un ERC dans cette situation : l'ERC "rupture d'un organe de vidange de fond".

2.2.Organisation des études et précision sur les modélisations

Le CIH s'est entouré de trois bureaux d'études pour réaliser les études numériques sur chacune des deux affaires (NECS pour barrage A et STABILIS / DYNAS+ pour le barrage B). En parallèle, le CIH a réalisé des contre-modèles pour pouvoir mieux suivre les études de ces différents bureaux d'études.

Pour le barrage A, les calculs numériques ont été effectués avec le logiciel Radioss en utilisant la loi de comportement n°24, basée sur un modèle de plasticité à écrouissage non uniforme de Han & Chen (1985) et également inspirée des travaux de Drucker Prager. La rupture est obtenue soit par fissuration en traction (rupture fragile), soit par écrasement en compression. NECS a proposé deux types de calculs complémentaires :

- Un calcul n'intégrant pas l'érosion, c'est-à-dire que les éléments finis dégradés au cours du calcul conservent une rigidité résiduelle au cours des simulations.
- Un calcul plus complexe prenant en compte un phénomène d'érosion, d'endommagement (perte totale de rigidité des mailles dégradées), couplé à l'utilisation de particules SPH pour permettre d'en conserver la masse et d'observer les trajectoires et interactions des projectiles ainsi formés (SOL2SPH). Dans chaque maille, huit particules SPH sont intégrées et libérées lorsque la maille s'érode et s'éjecte du modèle en fonction d'un critère de déformation en traction.

Pour le barrage B, le bureau d'études a réalisé ses calculs sur le logiciel LS Dyna d'Ansys avec l'utilisation de la loi de comportement n°159 CSCM (Continuous Surface Cap Model). Inspirée des travaux de Han & Chen ainsi que Drucker-Prager, cette loi s'appuie sur une surface de rupture pour décrire les conditions de déformation plastique du matériau et inclut la gestion de l'endommagement pour simuler la perte des propriétés mécaniques. Les critères d'érosion et les particules SPH n'ont pas été intégrés dans ces calculs pour garantir la robustesse des résultats.

Le CIH a réalisé ses contre modèles sur le logiciel LS Dyna avec la même loi CSCM.

Pour le barrage A, en béton cyclopéen sans armatures, le plot de rive a été modélisé soit une longueur de 40 m pour une hauteur maximale de 18 m. Il n'est pas évident de connaître la situation d'impact la plus pénalisante c'est pourquoi plusieurs scénarios ont été étudiés, basés sur l'expérience et les études trajectographiques. Le plus défavorable à ce jour est un impact latéral orienté de l'amont vers l'aval (dans le plan horizontal) localisé à 5 m environ sous la crête du barrage et avec un angle de 25° par rapport à la normale au parement amont. Un maillage lagrangien hexaédrique de taille de l'ordre de 40 cm a été retenu soit environ 36 000 éléments. Pour le modèle de type SOL2SPH, un réseau de de particules SPH de type cubique à face centrée est généré au sein de chacune des mailles d'éléments solides du barrage, lesquelles pourront être libérées en cas d'impact à forte

pénétration et/ou rupture d'éléments en béton. Environ 264 000 particules SPH sont alors générées. La taille des mailles de l'ordre de 40 cm est définie de façon à obtenir le meilleur compromis entre précision des résultats et temps de résolution global des différentes simulations. Une analyse de sensibilité a été réalisée avec des mailles solides réduites à 20 cm. Les résultats restent de l'ordre de grandeur demandé.

Le barrage B en béton est armé localement au niveau du couronnement et de sa galerie. Les armatures ont été prises en compte dans le calcul et modélisées en éléments barres. Trois plots de rive ont été modélisés soit une longueur de 49.50 m pour une hauteur maximale de 25 m. Des contacts frottants ont été considérés entre chaque plot ainsi qu'entre le barrage et le rocher impactant. Un seul scénario d'impact a été considéré avec un impact centré en face aval. Un maillage lagrangien hexaédrique de taille de l'ordre de 13 cm a été retenu soit environ 2 800 000 éléments (pas de modèle avec particules SPH associées ce qui permet de mailler plus finement).

Pour les deux barrages, le rocher impactant a été représenté par une sphère élastique (barrage A) ou une sphère rigide (barrage B) : dans tous les cas, aucun comportement non linéaire ni érosion du projectile en lui-même n'est considérée lors des impacts sur le barrage.

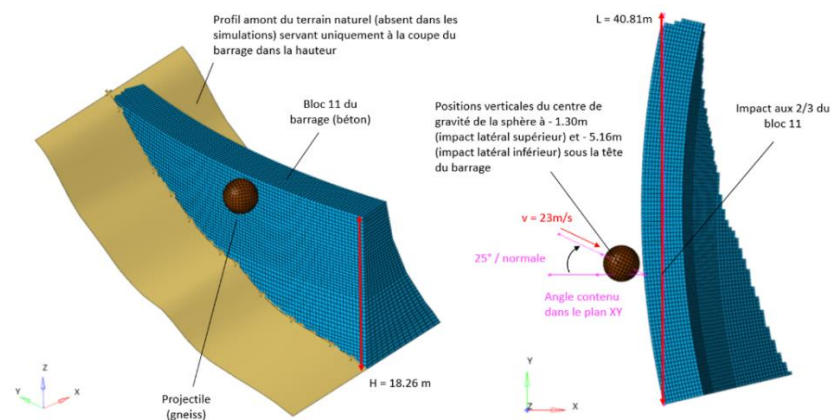


Figure 3 - Visualisation du modèle numérique et de l'impact sur le barrage A

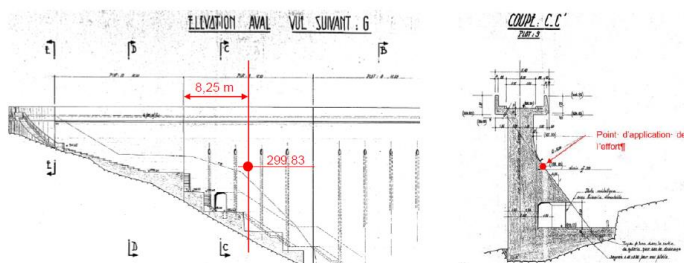


Figure 4 - Localisation de l'impact sur le barrage B

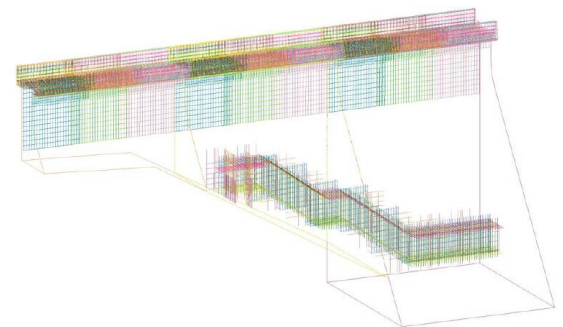


Figure 6 - Visualisation du ferrailage – Barrage B

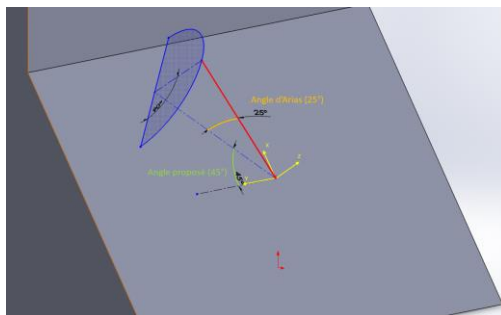


Figure 5 - Orientation de l'impact sur le parement aval – Barrage B



Figure 7 - Visualisation du maillage – plot central – Barrage B

2.3. Résultats

• Barrage A

Les profils de déplacements et d'endommagement donnent les résultats suivants :

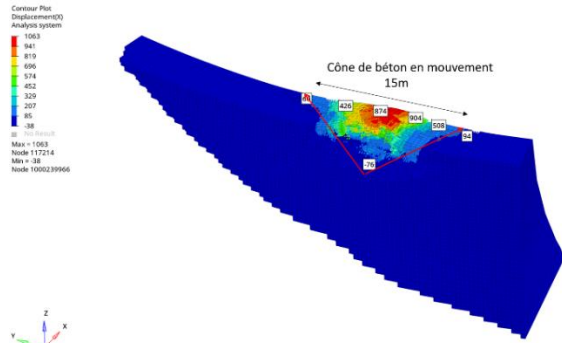


Figure 8 - Cartographie des déplacements [mm] – modèle avec maillage lagrangien du BE

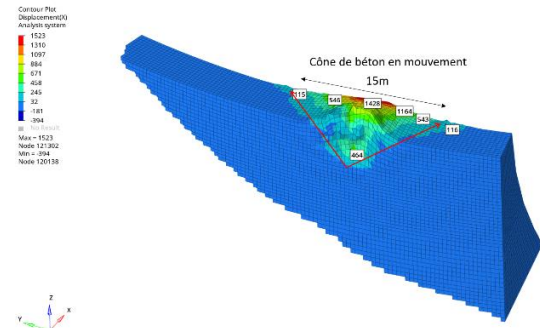


Figure 10 - Cartographie des déplacements [mm] – modèle de type SOL2SPH du BE

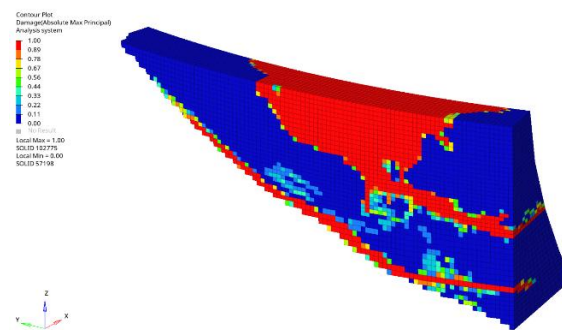


Figure 9 - cartographie d'endommagement - modèle avec maillage lagrangien par le BE

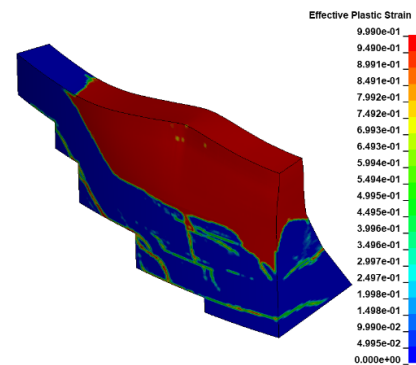


Figure 11 - Déformation plastique effective (plastification des mailles) en % à 1000ms – résultat obtenu sur le modèle CIH

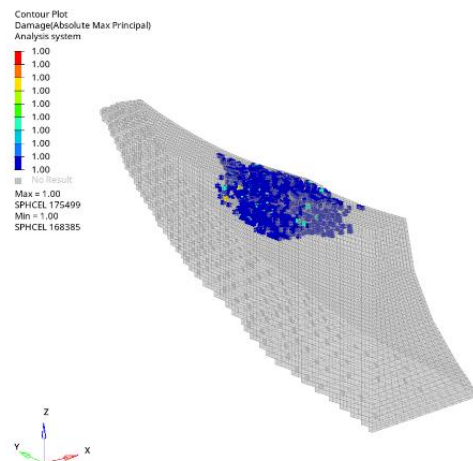
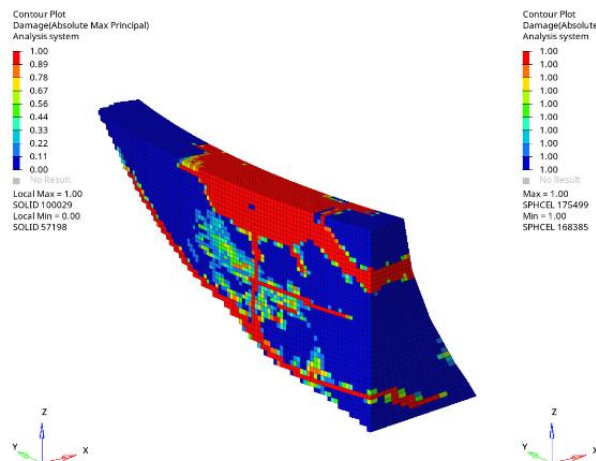


Figure 12 - cartographie d'endommagement - modèle de type SOL2SPH par le BE – résultats dans les mailles solides (gauche) et les mailles SPH (droite)

Les trois modélisations donnent des résultats globalement concordants. Les résultats des simulations numériques suggèrent qu'une brèche potentielle pourrait mesurer jusqu'à 4,5 m de haut sur 15 m de long en forme de cône. Les cartographies de déplacements font apparaître des déplacements métriques à pluri-

métriques au droit du cône d'éjection laissant peu de doute sur le mécanisme de rupture. La brèche peut se développer due à :

- L'importance de l'effort et de l'énergie à dissiper,
- La sollicitation du barrage dans sa petite inertie,
- La localisation de l'effort à proximité d'un bord libre,
- Et bien sûr l'absence de ferrailage dans le barrage.

Le bilan énergétique du système est le suivant :

- L'énergie cinétique initiale du projectile est bien proche de 19.5 MJ
- Après impact, celle-ci chute à 3.5 MJ, et il emmagasine 0.1 MJ sous forme d'énergie interne.
- L'énergie transmise au barrage est donc d'environ 15.9 MJ.
- Le bloc du barrage emmagasine cette énergie sous forme de déplacement avec un pic d'énergie cinétique identifié à 0.1 MJ, et d'une énergie interne de 15.5 MJ, soit un total de 15.6 MJ.
- L'énergie de contact dissipe de son côté 0.3 MJ soit 1.5% de l'énergie totale du système. Cette valeur reste en dessous de 5% ce qui témoigne d'un comportement correct de l'interface.
- Des éléments finis pleinement intégrés étant utilisés, aucune énergie n'est dissipée numériquement par d'éventuels modes de déformation de Hourglass. Il n'y a donc pas d'erreur énergétique numérique de Hourglass au cours de la simulation (énergie de Hourglass = 0 MJ).
- Le bilan des énergies citées ($3.5 + 0.1 + 15.6 + 0.3 + 0$) = 19.5 MJ permet bien de retrouver toute l'énergie initiale de notre système.

La brèche engendrée par la chute d'un bloc correspond à un évènement redouté central de l'analyse de risques effectuée sur le barrage A. L'EDD retient ainsi notamment l'ERC « rupture partielle de la fermeture rive gauche du barrage » et estime les conséquences aval avec la brèche potentielle calculée.

Afin d'éviter la formation d'une brèche, une mesure de confortement a été étudiée (Figure 13). La solution consiste en l'ajout d'une structure en forme de U inversé, réalisée en béton fortement armé de section $4\text{m} \times 4\text{m} \times 0.5\text{m}$. Des tirants passifs verticaux ont aussi été rajoutés pour maintenir en place tout risque de départ de blocs de béton.

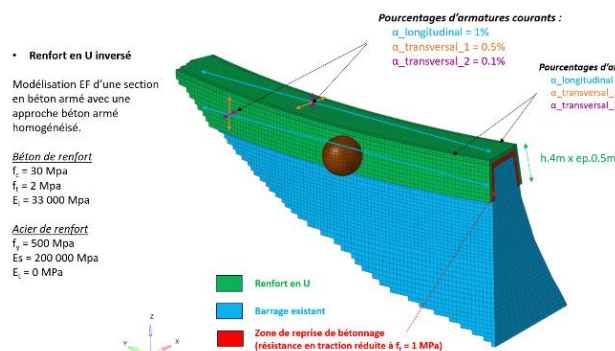


Figure 13 - Visualisation de la modélisation avec son confortement

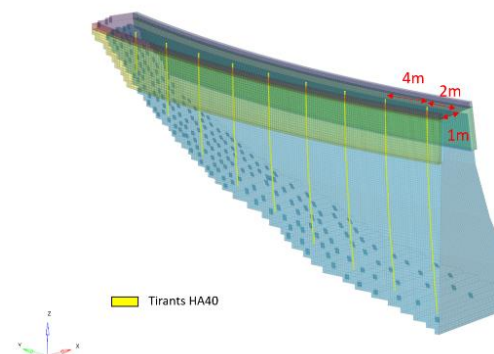


Figure 14 : Visualisation de la modélisation avec son confortement et les tirants passifs

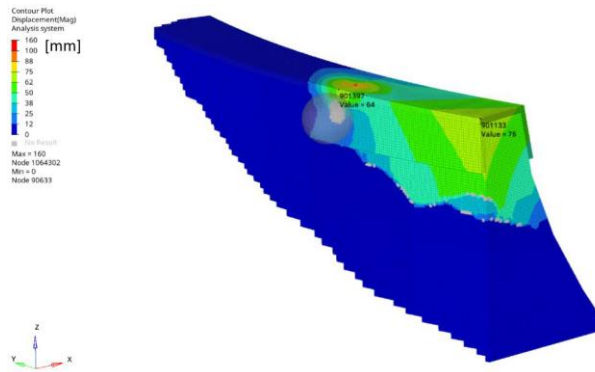


Figure 15 - Cartographie des déplacements – vue sur la face amont

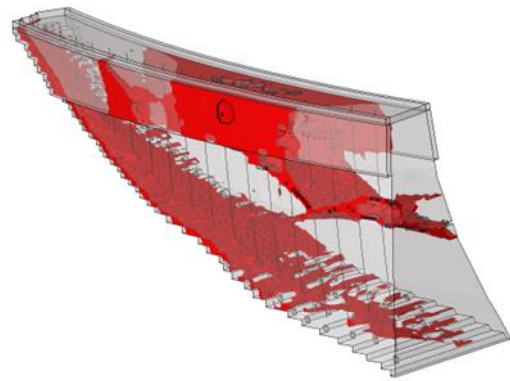


Figure 16 - Cartographie d'endommagement >99% vue sur la face amont

La mise en place du confortement évite la formation d'une brèche et le projectile est désormais stoppé : les déplacements maximaux observés sont désormais pluri centimétriques. Néanmoins, l'endommagement reste important, la fissuration se développe sous le renforcement et reste traversante avec une ouverture maximale évaluée à 4 cm. La couture de cette fissure traversante est assurée par les tirants verticaux qui limitent l'ouverture de fissure et qui atteignent une déformation maximale de 7,5%.

- Barrage B

Les profils de déplacement et d'endommagement donnent les résultats suivants :

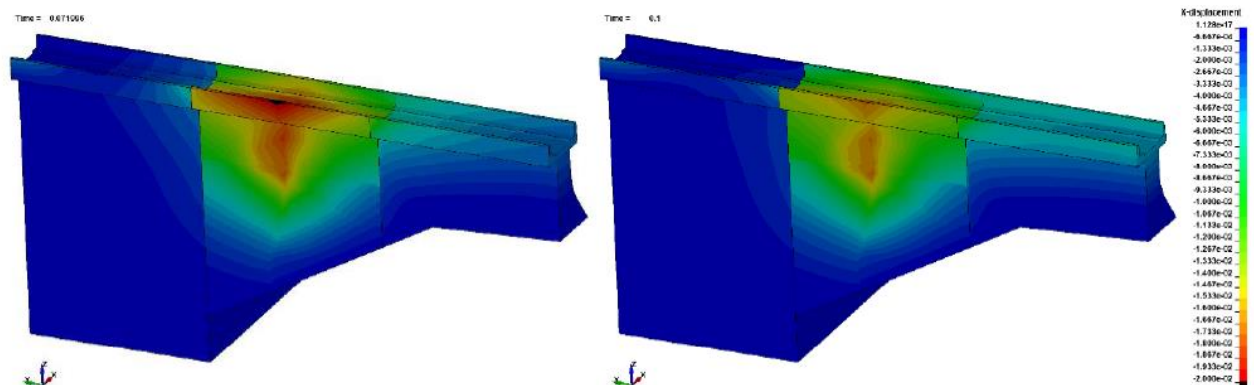


Figure 17 - Déplacement dans la direction X de la structure génie civil à deux instants (t=72 ms et t=100 ms, instant final de la simulation) en [m]

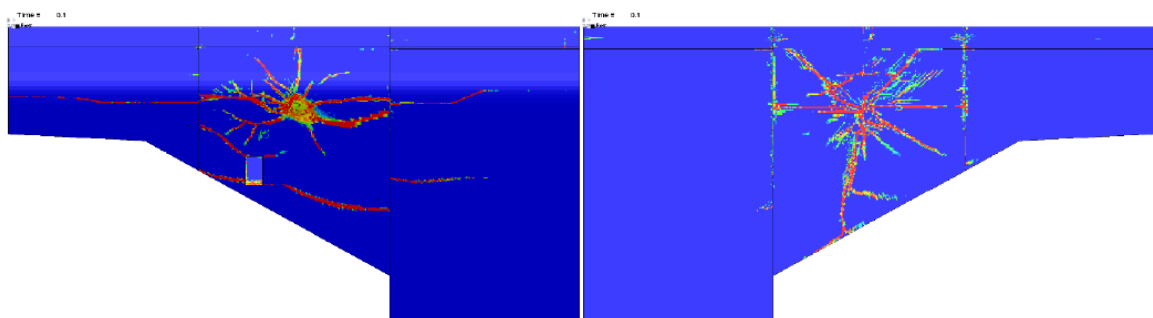


Figure 18 - Vue d'Aval et Amont du Plot 9 - Endommagement du béton

Les cartographies de déplacement indiquent des déplacements maximaux au droit de l'impact de l'ordre de 2 cm et globalement circonscrits au plot central. En comparaison avec le barrage A, l'effort impacteur est nettement plus important sur le barrage B mais l'orientation de l'effort est plus favorable à l'ouvrage. En effet, le barrage B n'est pas sollicité dans sa petite inertie, l'impact se fait loin du couronnement, et l'angle d'impact est plus favorable (65° par rapport à la normale au parement au lieu de 25°). Ainsi l'ouvrage supporte mieux cet impact.

C'est pourquoi il serait intéressant, à l'avenir, de se demander en amont des calculs quelle serait la situation la plus impactante, malgré qu'il soit très difficile de le savoir sans réaliser de nombreux calculs.

L'endommagement se concentre sur le plot central, et les plots adjacents sont peu affectés. Une fissure traversante horizontale au droit de l'impact traverse tout le plot central. On ne peut pas parler ici de brèche mais plutôt d'une fissuration très marquée et préjudiciable pour l'ouvrage. La question de la stabilité du bloc central situé au-dessus du plan de fissuration horizontale n'est à ce jour pas encore tranchée.

Le bilan énergétique du système est le suivant :

- L'énergie cinétique initiale du projectile est bien proche de 47.7 MJ
- Après impact, celle-ci chute à 27 MJ. Le projectile rebondit sur le parement avec une vitesse de 20.3 m/s.
- L'énergie dissipée par le contact entre la cible et le projectile est égale à 5 000 kJ ce qui représente 25% de l'énergie perdue par le projectile ou 10% de son énergie cinétique initiale. Il s'agit essentiellement de frottement.
- Une énergie de 14 500 kJ environ est finalement transmise au barrage, ce qui représente 30% de l'énergie cinétique initiale du projectile. Cette énergie est transmise à 98,85%, soit presque intégralement, au plot N° 9 et elle est presque intégralement dissipée sous forme d'endommagement du béton. Très peu d'énergie est dissipée par le frottement avec les blocs adjacents.
- L'énergie d'Hourglass présente dans le modèle en raison du choix d'intégration réduite pour la modélisation du béton est négligeable devant l'énergie interne du modèle. En effet, l'énergie d'Hourglass du béton (seule composante en intégration réduite) reste inférieure à 4 % de son énergie interne au cours du calcul (à l'exception d'un pic initial où la quantité d'énergie interne n'est pas significative). S'accordant généralement un ratio maximal de 10 % de l'énergie interne, on peut considérer que les effets des phénomènes d'Hourglass sont négligeables dans le modèle et qu'ils n'affectent pas les résultats.
- Le bilan des énergies citées ($27 + 14.5 + 5.0 + 1.2$) = 47.7 MJ permet bien de retrouver toute l'énergie initiale de notre système.

3. CONCLUSION

Ces dernières années, le CIH d'EDF Hydro a tenté de mieux appréhender la thématique chute de blocs dans ses études de danger. Deux fronts ont été investigués : celle de la méthodologie de l'aléa et du risque et celle du calcul sur les ouvrages hydrauliques.

L'absence de méthodologie commune et cohérente d'évaluation de l'aléa et du risque « chutes de blocs » a régulièrement généré des difficultés pour les personnes en charge de gérer ces problématiques et décider pour le compte des MOA, MOE, bureaux d'études et entreprises. La nouvelle méthodologie proposée prétend à homogénéiser, clarifier et objectiver les pratiques, qu'il s'agisse de l'estimation de l'aléa ou de la prise en compte des enjeux jusqu'alors peu considérés ou mal appréhendés. Elle a pour objectif de clarifier le rôle des différents acteurs et d'aider le Maître d'Ouvrage dans sa politique de gestion des risques et du patrimoine, en adoptant une démarche cohérente et rationnelle, pour faire en sorte que les solutions de sécurisation retenues correspondent à des dépenses justifiées, pertinentes, s'inscrivant dans une démarche objective d'analyse des risques. Cette nouvelle méthodologie constitue une avancée significative dans le domaine de la compréhension et de l'appréhension des effets complexes que peuvent générer de simples chutes de blocs. Elle est cependant encore toute jeune et nouveau-née. Elle a été testée et s'est avérée utile pour appréhender quelques problématiques récentes. Les prochaines années devront être mises à profit pour la mettre à l'épreuve et l'enrichir.

Les études de chutes de blocs rocheux et de dynamique rapide réalisées sur les deux ouvrages présentés, sont les premières de ce type à être engagées par le CIH. Elles ont permis au CIH de mieux appréhender et d'évaluer les effets d'impact violents très énergétiques sur les ouvrages de génie-civil. Les simulations permettent de tester différentes configurations et d'établir à moindre frais celles qui sont le plus défavorables. Le choix des paramètres et des lois matériaux retenus dans ces études font appel à l'expertise de bureaux d'études avancées

pour proposer une approche globale pertinente permettant de dégager des ordres de grandeurs cohérents faute de données d'entrées exactes sur les matériaux mis en jeux. Concernant le barrage A dont les études sont les plus avancées, ces résultats ont permis d'orienter les études et d'objectiver les meilleurs scénarios à mettre en œuvre. La solution de confortement telle que présentée dans cet article n'est à ce jour pas retenue. En effet, en situation post impact, la solution permettrait de garantir la fonction « maintenir l'eau » mais le barrage étant fortement endommagé, il faudrait prévoir de nouveaux travaux lourds pour sa remise en état. Il sera notamment nécessaire de vider en partie le barrage pour le remettre en sécurité. D'autre part la réalisation de ce confortement est complexe à mettre en œuvre et pose toujours la question de la sécurisation du site pour les intervenants. Aussi, une solution de micro-minage des blocs de 10 à 30 m³ paraît aujourd'hui la solution la plus pertinente. C'est pourquoi, en attendant des solutions concrètes, des dispositifs de surveillance ont été mis en place. Les mouvements des blocs sont alors surveillés par un doppler et un tachéomètre. Un drone est également utilisé pour réaliser de la photogrammétrie, ce qui permet d'estimer la taille des blocs ayant chuté.

RÉFÉRENCES

- [1] Bishop AW (1971) The influence of progressive failure on the choice of the method of stability analysis. *Geotechnique* 21, 168-172.
- [2] Hendron AJ & Patton FD (1985) The Vaiont slide, a geotechnical analysis based on new geologic observations of the failure surface. Technical Report GL -85-5. Department of the US Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- [3] 13th ICOLD International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams – September 2015 – “Modelling of rock fall on the dam of Place Moulin” – Frigerio/Artaz.
- [4] *Journal of mountain science* – November 2020 – Vol 17 – “Dynamic response analysis of blocks-combined dam under impact load” – GAO/TIAN.
- [5] *Journal of mountain science* – October 2022 – Vol 19 – “Dynamic impact of boulders on different types of concrete dam” – Feng/Wang/Ran.
- [6] Descoeurdes, F. (1997). Aspects géomécaniques des instabilités de falaises rocheuses et des chutes de blocs. *Publications de la société suisse de mécanique des sols et des roches*, 135, 3-11.
- [7] Durville, J. L., Guillemain, P., Berthet-Rambaud, P., & Subrin, D. (2010). Etat de l'art sur le dimensionnement des dispositifs de protection contre les chutes de blocs. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)*.