



HAL
open science

Étude de dangers des digues de protection contre les crues torrentielles : présentation du cas de l'EDD des digues du torrent de La Salle, recommandations et perspectives

P. Meriaux, D. Richard, H. Félix, D. Laigle, M. Bon, A. Astier, I. Boncompain, Y. Queffélec

► To cite this version:

P. Meriaux, D. Richard, H. Félix, D. Laigle, M. Bon, et al.. Étude de dangers des digues de protection contre les crues torrentielles : présentation du cas de l'EDD des digues du torrent de La Salle, recommandations et perspectives. Colloque National Dignes Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions, Jun 2013, Aix-en-Provence, France. 11 p. hal-01551766

HAL Id: hal-01551766

<https://hal.science/hal-01551766v1>

Submitted on 30 Jun 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude de dangers des digues de protection contre les crues torrentielles : présentation du cas de l'EDD des digues du torrent de La Salle, recommandations et perspectives

Risk study on torrent dikes: case of the “La Salle” torrent in French South Alps, recommendations and perspectives

**P. Mériaux^{1a}, D. Richard^{1b}, H. Félix^{1a}, D. Laigle^{1b}, M. Bon^{2a}, G. Astier^{2a}, I. Boncompain^{2b},
Y. Queffélec^{2b}**

^{1a}Irstea - GR Ouvrages hydrauliques, Aix-en-Provence, patrice.meriaux@irstea.fr, huguette.felix@irstea.fr

^{1b}Irstea - UR Erosion torrentielle, Neige et Avalanches, Grenoble, didier.richard@irstea.fr, dominique.laigle@irstea.fr

^{2a}O.N.F. - Service Départemental RTM des Hautes-Alpes, Gap, michel.bon@onf.fr; gilles.astier@onf.fr

^{2b}O.N.F. – Direction Technique Nationale RTM, Grenoble, ingrid.boncompain@onf.fr; yann.queffelec@onf.fr

Résumé

Par rapport aux digues fluviales, les systèmes d'endiguement de protection contre les crues torrentielles présentent des spécificités qui résultent pour l'essentiel de la nature des écoulements fortement chargés en matériaux solides que les ouvrages sont censés contenir dans le lit du torrent. Réaliser l'étude de dangers afférente à de tels systèmes soulève donc des difficultés méthodologiques ayant conduit le Ministère de l'Ecologie à confier en 2010 à Irstea et à l'O.N.F une étude de dangers à vocation « prototype » sur un cas réel de torrent en terrain domaniaal. La présente communication expose la méthodologie de travail et les principaux résultats de l'étude de dangers réalisée à ce titre en 2010-2011 sur les digues de classe C du torrent de la Salle, Hautes-Alpes (05). De structure composite et cumulant 900 m de longueur en plusieurs tronçons sur 750 m de cours d'eau, ces digues ont été édifiées suite à la crue dévastatrice de 1948. A l'amont, le torrent est corrigé par 17 barrages ou seuils de correction active. L'étude de dangers a principalement abouti à (i) la caractérisation et l'analyse de 9 tronçons fonctionnels de digue et de 9 biefs hydrauliques, (ii) une étude accidentologique locale et nationale relative aux ouvrages hydrauliques de protection RTM et (iii) l'élaboration d'une méthode couplant approches quantitatives simplifiées et d'expert pour identifier, par tronçon de digue, les scénarios de défaillance les plus probables et les hiérarchiser en terme de criticité. En conclusion, sont formulées des recommandations visant à exporter la méthodologie mise au point à d'autres systèmes d'endiguement torrentiel.

Abstract

According to river dikes, protection dikes against mountainous stream floods offer specificities mainly due to

the following essential item: the nature of the solid materials carried by the flood and which must be contained in the torrent bed. The risk analysis relating to these specific protection systems raises difficulties which induce the French Ministry of Ecology to entrust in 2010 Irstea and the National Forest Office with a prototype risk study on a real case of a torrent. This article presents the methodology and the main results of the risk study realized in 2010-2011 on the class C dikes of the torrent “La Salle” (French South Alps). These heterogeneous structured dikes, which present 900 meters length in several sections on 750 meters of watercourse, have been built after the ravaging flood in 1948. At the upstream, the torrent bed is maintained with 17 active correction dams or thresholds. The risk study provided from first of all a characterization and an analysis of 9 dike sections and 9 torrent hydraulic reaches, then a local and national accidents survey on the behaviour of protection structures used for torrent control, and finally the design of a risk analysis method associating simplified quantitative approaches with expert inferences, to identify and prioritize, on each section, the most possible failure scenarios. And to end, recommendations to accommodate this method to other torrent protection systems are set up.

Introduction

Les systèmes d'endiguement de protection contre les crues torrentielles diffèrent de leurs homologues en site fluvial à plusieurs titres :

- les digues sont en général de structure composite (remblai de matériau grossier, protégé côté torrent par un mur ou une carapace en maçonnerie ou en enrochements) ;
- elles sont soumises à des sollicitations violentes résultant du fort transport solide qui caractérise les écoulements torrentiels (charriages ou laves torrentielles), lui-même sous influence d'autres aléas

de montagne (mouvements de terrain, avalanches, ...);

- leur sécurité peut dépendre de celle d'ouvrages de correction torrentielle active construits dans les bassins versants s'étendant à leur amont;
- leurs zones protégées présentent souvent une configuration topographique en toit (cône de déjection), avec des pentes élevées.

Réaliser l'étude de dangers afférente à de tels systèmes soulève donc des difficultés méthodologiques ayant conduit le Ministère de l'Ecologie à confier en 2010 à Irstea et à l'O.N.F une étude de dangers à vocation « prototype » sur un cas réel de digues bordant un torrent de montagne sis en terrain domanial : le torrent de La Salle, commune de La-Salle-Les-Alpes, Hautes-Alpes (05).

La présente communication, après avoir brièvement présenté le torrent et ses ouvrages de protection, résume cinq des principaux chapitres de l'étude de dangers :

- l'analyse fonctionnelle de l'ouvrage et de son environnement;
- l'étude accidentologique;
- la caractérisation des aléas naturels, avec un focus sur l'aléa torrentiel;
- l'identification et la caractérisation des risques;
- les mesures de réduction des risques.

La méthodologie de travail adoptée est illustrée en prenant l'exemple de l'un des neuf tronçons de digue analysés. La communication se conclut par la formulation de recommandations visant à exporter la méthodologie mise au point sur le cas des digues du torrent de La Salle à d'autres systèmes d'endiguement torrentiel.

Analyse fonctionnelle

Historique et description du torrent et des ouvrages

Le torrent de La Salle, affluent rive gauche de la Guisane qu'il rejoint quelques kilomètres en amont de Briançon, draine un petit bassin versant montagnard de 6 km², culminant au sommet du Grand Aréa (2869 m).

Les digues ont commencé à être édifiées après la crue dévastatrice de 1948, en vue d'empêcher le débordement du torrent sur son cône de déjection. En partie amont du dispositif de protection, l'endiguement a été renforcé côté torrent à la fin des années 1970 (création de murs-épîs en béton armé : Figure 1), puis complété en 1994-1995 en partie aval. Entre les cotes 1485 m et 1375 m, le système d'endiguement englobe aujourd'hui quelque 900 m de digues (digues en remblai ou à structure composite béton-remblai ou enrochement-remblai), réparties entre rives gauche et droite, le long d'environ 750 m de cours d'eau. En rive gauche, l'endiguement est quasi-continu alors qu'en rive droite il est interrompu par des tronçons de berge dépourvus de digue ou ne comportant que des « digues » de hauteur inférieure à 1 m (cordons de curage ou dépôts torrentiels naturels).



FIGURE 1. DIGUE COMPOSITE A PAREMENT EN BETON ARME EN PARTIE AMONT DU DISPOSITIF (TRONÇON 2-RG).

Les enjeux protégés par ces digues sont essentiellement situés en rive gauche, sur le cône de déjection : une centaine de maisons dont une majorité sont des résidences secondaires construites après 1960 (Figure 2). En rive droite, une vingtaine de constructions est protégée, parmi lesquelles seule une demi-douzaine de bâtiments appartient au village ancien de La Salle ou à son école. La présence de ces enjeux justifie le classement en C des digues.



FIGURE 2. PLAN DE SITUATION DES DIGUES DU TORRENT DE LA SALLE. LOCALISATION DES TRONÇONS 1 ET 2-RG, A L'AMONT DU DISPOSITIF, ET DES ENJEUX EN RIVE GAUCHE SUR LE CONE DE DEJECTION (D'APRES IGN-GEOPORTAIL, NORD EN HAUT).

A l'amont, dans son chenal d'écoulement moyen, le torrent est corrigé par une succession de 17 barrages ou seuils de correction active et ses versants ont fait l'objet de travaux de reboisement, de reverdissement sur banquettes grillagées et de drainage, en vue de limiter l'érosion des sols et de les stabiliser. On rencontre, dans les haut et moyen bassins, les aléas propres au milieu montagnard, avec notamment l'existence d'un vaste mouvement de terrain (glissement du Puy Chirouzan) sur le versant rive gauche. Heureusement peu actif, ce glissement n'en constitue pas moins une menace potentielle directe pour plusieurs barrages et seuils de correction et, par effet domino, pour le système d'endiguement lui-même.

Au 20^{ème} siècle, outre la lave torrentielle de 1948 qui a débordé en rive gauche pour envahir le hameau de La Chirouze, le torrent a connu une forte crue à charriages lors d'un orage d'été en 1988.

Méthodologie d'analyse fonctionnelle [1]

Définition du système étudié

Le système endigué étudié englobe les digues proprement dites et leurs fondations. Le bassin versant torrentiel en amont de la cote 1480 m (sommet du cône de déjection), le lit torrentiel sur son cône corrigé par des seuils ou des protections de berge, les ponts ou passerelles qui le traversent, l'extrémité aval du cours du torrent avant sa confluence avec la rivière Guisane, la Guisane elle-même au niveau et en aval de cette confluence et, enfin, les zones inondables rive gauche et rive droite du cône forment l'environnement du système.

Analyse fonctionnelle externe

La description de l'environnement du système et de ses milieux extérieurs s'inscrit dans la phase de l'analyse fonctionnelle externe. Elle vise à examiner les milieux extérieurs en interaction avec le système d'endiguement (Tableau 1) et à définir les interactions entre les milieux extérieurs et le système.

TABLEAU 1. LES MILIEUX EXTERIEURS AU SYSTEME D'ENDIGUEMENT.

Type	Milieux extérieurs
Environnement lié à l'eau et aux transports solides et/ou érosions associés	Bassins versants amont
	Lit du torrent entre ses digues et/ou ses berges, ainsi que les ouvrages de correction qui y ont été construits.
Milieux extérieurs protégés	Milieu extérieur protégé en rive droite.
	Milieu extérieur protégé en rive gauche.

Ces interactions peuvent être de différentes natures :

- les interactions hydrauliques entre le système et les milieux extérieurs :
- les interactions liées aux sollicitations mécaniques (ex : les chocs, l'usure, etc.) que l'environnement

(ex : les écoulements torrentiels) va imposer au système.

Les milieux extérieurs interagissant directement avec les digues ont été identifiés, puis décrits, par une analyse spatiale des secteurs en contact avec le système d'endiguement.

Analyse fonctionnelle interne

L'analyse fonctionnelle interne vise à étudier le fonctionnement interne du système. Elle consiste en une analyse structurelle qui permet de lister tous les ouvrages constitutifs du système d'endiguement, de repérer leur position géographique au sein de l'aménagement et de déterminer leurs interactions avec les milieux extérieurs.

Pour ce faire, on procède au découpage du système en tronçons de digue homogènes placés dans des environnements également homogènes. Une telle analyse permet de déterminer les fonctions accomplies par chaque tronçon de digue, de manière à analyser ultérieurement leurs modes de défaillance.

TABLEAU 2. LES FONCTIONS TECHNIQUES DE RESISTANCE DES TRONÇONS

Fonctions techniques	Description des fonctions techniques
Résistance à l'incision ou à un affouillement	La fondation et le pied de parement côté torrent de la digue doivent résister aux effets de l'incision ou d'un affouillement localisé.
Résistance à l'érosion latérale	Le parement côté torrent de la digue doit résister aux effets de l'érosion latérale du torrent (eaux claire, charriage ou lave).
Résistance aux chocs localisés	Le parement côté torrent de la digue doit résister aux chocs causés par les blocs et/ou les troncs d'arbres transportés par les laves torrentielles.
Résistance à la surverse	La digue résiste à un débordement fortuit par delà sa crête.
Résistance à l'érosion interne	Le corps et la fondation de la digue doivent résister à l'érosion interne, en cas de crue uniquement liquide de période de retour de même ordre de grandeur que l'événement de projet de protection.

Le principe de l'analyse fonctionnelle qui régit le découpage du système en tronçons est le suivant :

- la fonction principale tout le long d'un même tronçon est identique, c'est-à-dire que chaque tronçon est destiné à protéger un même ensemble de zones du milieu extérieur ;
- les fonctions techniques pour chaque tronçon sont identiques, i.e. le profil de la digue est structurellement homogène sur un même tronçon. Elles traduisent la réaction de l'ouvrage étudié face aux interactions avec les milieux extérieurs, autrement dit sa résistance aux mécanismes de dégradation ou de rupture (cf. Tableau 2). Elles peuvent être assurées par l'ouvrage dans son ensemble (ex : corps de digue ou fondation auto-filtrant dans leur masse pour la résistance à

l'érosion) ou par un de ses composants (ex : parement de protection côté torrent).

Le tableau 2 ci-avant résume les fonctions techniques de résistance que les tronçons de digues doivent accomplir.

Tableau de synthèse [1]

Au final, la démarche d'analyse décrite ci-dessus a conduit à distinguer et à caractériser 9 tronçons composant le système étudié (Tableau 3 et Figure 2) :

TABLEAU 3. TABLEAU DE SYNTHÈSE RESULTANT DE L'ANALYSE FONCTIONNELLE.

Nom du tronçon	Caractéristiques principales	Longueur du tronçon (m)	Rive
1-RG	Digue rehaussée enrochements	25 m	Gauche
2-RG	Mur-digue béton armé	21 m	Gauche
3-RG	Mur-digue béton armé en parement digue en caissons bois	100 m	Gauche
4-RG	Berge partiellement endiguée	131 m	Gauche
5-RG	Digue et chenal en-déblai remblai	186 m	Gauche
6-RG	Confortement de berge en enrochements maçonnés, digue large	159 m	Gauche
1-RD	Mur-digue béton armé	58 m	Droite
2-RD	Digue rehaussée et confortée côté torrent	64 m	Droite
3-RD	Digue rustique à talus côté torrent reprofilé	154 m	Droite
Total		898 m	

Dans la suite de cette communication, le tronçon 1-RG sera pris en exemple. Il est situé tout à l'amont du dispositif d'endiguement rive gauche, entre deux seuils (B13 et B14), et résulte d'un rehaussement en 1992 de la digue originelle (en béton et caissons bois) suite à la crue de 1988, au cours de laquelle le torrent avait failli déborder à cet endroit. Il s'agit d'une construction mixte en béton et enrochements (cf. Figure 4 ci-après), pour une hauteur maximale de 4,5 m côté zone protégée et de 2 m côté torrent.

Etude accidentologique

S'il existe des études en matière d'accidentologie ou des retours d'expériences sur les grands barrages, il n'en est pas de même pour les petits ouvrages hydrauliques. Or ce sont dans ces catégories d'ouvrages que l'accidentologie est

supposée être la plus importante, sans pour autant qu'aucune statistique n'ait pu être établie.

L'étude de dangers (EDD) des digues du torrent de la Salle a donc été l'occasion d'analyser plus précisément le retour d'expériences français relatif aux défaillances des ouvrages hydrauliques de protection en montagne, que sont les barrages de correction torrentielle, les digues de protection contre les crues torrentielles et les plages de dépôts.

Pour ce faire, l'étude accidentologique s'est appuyée sur les informations disponibles de la Base de Données nationale de la Restauration des Terrains en Montagne (BD RTM) de l'Office National des Forêts (ONF). En effet, avec plus de 30 000 événements recensés sur plus de 150 ans et 19 000 ouvrages enregistrés, cette base constitue en quelque sorte la mémoire des phénomènes passés et de leurs conséquences sur les territoires de montagne. Sont ainsi accessibles des descriptions sur les dégâts occasionnés, les perturbations engendrées aux ouvrages et aux voies de communication, la nature de l'évènement, les causes du phénomène ou bien encore les victimes.

L'analyse des données extraites de cette BD RTM s'est effectuée en considérant d'une part, le nombre d'ouvrages hydrauliques concernés suivant leur type, et d'autre part, les événements remarquables d'un point de vue de l'accidentologie de ces ouvrages.

Ainsi, sur les 31 313 événements que comptait la BD RTM en février 2011, 1 861 peuvent être identifiés comme étant des événements ayant eu un impact sur les ouvrages hydrauliques et cela quel que soit le phénomène en cause. Une classification de ces événements a également été réalisée où sont identifiés :

- les ouvrages détruits ou emportés ;
- les barrages ou seuils ayant subi une ruine en cascade supposée ;
- les ouvrages affouillés ;
- les ouvrages partiellement détruits ou endommagés ;
- les digues ayant été submergées ;
- les plages de dépôt fortement sollicitées ;
- et, les événements particulièrement remarquables.

Même si l'exhaustivité des événements dommageables n'est pas garantie, cette approche, basée sur une interprétation des descriptions d'évènements, permet tout de même d'établir quelques statistiques.

En ce qui concerne les barrages et seuils de correction torrentielle, majoritairement construits dans la partie haute des bassins versants, l'attention s'est portée sur les cas de ruines en cascade, générant un sur-aléa et donc susceptibles de causer les plus gros dégâts à leur aval, et notamment aux digues de protection s'il en existe. Cela est d'ailleurs illustré par l'évènement du 24 août 1987 sur le torrent du Saint-Antoine en Savoie où, suite à la rupture de 25 barrages en maçonnerie, une lave d'une ampleur historique a endommagé la zone industrielle de Modane. D'après l'analyse des événements, la probabilité annuelle de rupture en cascade pour un site torrentiel corrigé serait de 3.10^{-4} . Cette

probabilité tombe toutefois à 10^{-4} sur les 30 dernières années. Dans le cas du torrent de la Salle, aucune accidentologie de ruine en cascade n'est à signaler sur les barrages ou seuils de correction torrentielle situés dans l'environnement du système d'endiguement. Seules des pathologies d'endommagement (fissuration, affouillement,...) liées à un contexte particulier comme une poussée de berges excessive ou à des crues torrentielles remarquables (ex : crue de 1948 ou de 1988) sont observables.

Pour ce qui est des digues, les statistiques issues de la BD RTM restent sujettes à questionnement. Si l'on s'en tient aux chiffres bruts, beaucoup d'événements auraient impacté des ouvrages considérés comme des digues. Outre le fait qu'il existe parfois une erreur de terminologie (certaines protections de berge ayant été, à tort, désignées sous le vocable « digue »), il n'y a pas non plus de distinction entre digues de torrent, de rivière torrentielle ou bien même de rivière. Le recensement des digues sur la BD RTM est par ailleurs loin d'être exhaustif, puisque sa vocation première est le suivi et la gestion des ouvrages domaniaux dans les hauts bassins, où il existe très peu de digues. Il est donc impossible de donner une estimation fiable de la probabilité de rupture d'une digue de torrent à l'échelle de la France entière. Toutefois, dans le département des Hautes-Alpes, la probabilité de "destruction" (rupture partielle, brèche, ... comme celles de la Figure 3) de digues torrentielles (torrents et rivières torrentielles confondus) a pu être estimée à l'aide du nombre total de tronçons de digues recensés dans la base de données "BarDigues". L'estimation est alors de $1,6 \cdot 10^{-3}$ (établie sur 300 ans) et $1,8 \cdot 10^{-3}$ (au cours du 20^{ème} siècle). Ces statistiques sommaires doivent tout de même être considérées avec prudence vu les incertitudes persistantes sur les données.



FIGURE 3. BRECHES DANS LA DIGUE RIVE DROITE DU FOURNEL A L'ARGENTIERE-LA-BESSEE (05) EN 1928 (FOND M. HENRY).

Concernant le torrent de la Salle, il n'a connu aucune défaillance de son système d'endiguement à ce jour. Finalement, l'étude accidentologique relative à un grand parc d'ouvrages hydrauliques RTM, suivi depuis 150 ans, a

permis de fournir pour la première fois des ordres de grandeur sur l'occurrence des défaillances. Les probabilités calculées pour les digues ne sont représentatives que sur le département des Hautes-Alpes (avec la réserve émise précédemment) ; celles pour les barrages soulignent une accidentologie très faible, que confirment les dires d'experts.

Etude des aléas

Objectifs

Parmi les aléas naturels identifiés comme étant susceptibles d'interagir sur le système d'endiguement, l'aléa torrentiel tient une place prépondérante puisqu'il constitue la raison d'être de la fonction de protection des digues étudiées. Nous nous focaliserons donc, dans la présente section, sur le travail d'analyse mené sur l'aléa torrentiel, les autres aléas traités dans l'EDD n'étant que rappelés en fin de section.

L'étude de l'aléa torrentiel s'est attachée à évaluer la capacité nominale de transit du système d'endiguement du torrent sur son cône de déjection, précisant ainsi l'objectif de protection assigné au système d'endiguement. Cet objectif de protection a été caractérisé pour 9 biefs hydrauliques successifs, identifiés de façon experte comme homogènes et en prenant en compte l'ensemble des phénomènes torrentiels envisageables. Ces phénomènes sont : 1/ les crues liquides plus ou moins chargées (mais sans prise en compte dans un premier temps des changements morphologiques dans le lit, liés aux érosions et dépôts), 2/ les laves torrentielles, 3/ les phénomènes d'engravement et d'érosion et 4/ les phénomènes de transport de corps flottants. Il s'agit donc de définir les caractéristiques hydrauliques et autant que faire se peut d'évaluer la probabilité d'occurrence de phénomènes dont l'intensité se situerait en limite de la capacité actuelle du chenal, c'est-à-dire en limite de débordement hors du chenal endigué.

Méthodologie employée

Les profils en long et en travers disponibles ou levés dans le cadre de l'EDD ont permis d'évaluer pour les 9 biefs les caractéristiques géométriques que sont la pente locale, la section en travers d'écoulement, le périmètre mouillé, le rayon hydraulique et la largeur au fond ou la largeur moyenne et ceci pour un écoulement à pleins bords, i.e. en limite de débordement.

Pour les écoulements liquides faiblement chargés, nous avons calculé la vitesse moyenne d'écoulement par bief en utilisant la formule de frottement de Rickenmann [4], voir Eq. (1), donnant la vitesse moyenne U (m/s) d'un écoulement liquide chargé, connaissant la pente I (m/m), l'épaisseur du mélange (en pratique : le rayon hydraulique R_H en m) et la granulométrie (en pratique le d_{90} en m) :

$$U = 1,5 R_H \sqrt{\frac{g}{d_{90}}} I^{0,21} \quad (1)$$

Nous avons également utilisé la formule du régime critique, voir Eq. (2), donnant la vitesse moyenne d'écoulement U connaissant l'épaisseur h de celui-ci et en faisant l'hypothèse que l'écoulement est en régime critique (hypothèse assez souvent vérifiée pour un écoulement torrentiel chargé) :

$$U = \sqrt{gh} \quad (2)$$

De façon sécuritaire, nous avons systématiquement retenu la valeur la plus faible de vitesse calculée par ces deux formules. La vitesse ainsi calculée est multipliée par la section en travers pour en déduire le débit de plein bord. Les débits ainsi calculés par biefs sont ensuite comparés aux débits résultant de l'étude hydrologique afin d'évaluer la probabilité d'occurrence d'un phénomène dépassant la capacité hydraulique actuelle du chenal.

Pour les laves torrentielles, nous avons procédé de façon similaire en utilisant la formule de Coussot [2], voir Eq. (3), donnant la vitesse moyenne U d'une lave torrentielle en régime permanent, connaissant la pente I (m/m), l'épaisseur de l'écoulement h (m), le rayon hydraulique R_H (m), la masse volumique ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) et les paramètres rhéologiques τ_c (Pa) et K ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{1/3}$), alors que A est un coefficient géométrique de correction :

$$U = \left(\frac{\tau_c}{K}\right)^3 h \left[\frac{1}{A} \left(\frac{\rho g R_H \sin(I)}{\tau_c} - 1 \right) \right]^{10/3} \quad (3)$$

L'analyse est fondée sur une utilisation « experte » pour laquelle nous avons pris en compte une variabilité possible sur la nature du matériau en écoulement. En pratique, nous avons considéré les deux cas des « laves torrentielles fluides » (coulée de boue sans front granulaire), traduite arbitrairement par le jeu de paramètres rhéologiques suivants : $\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ et $K/\tau_c = 0,3 \text{ s}^{1/3}$ et des « laves torrentielles visqueuses » (lave torrentielle avec front granulaire) traduite par le jeu de paramètres : $\tau_c/\rho = 1,5 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ et $K/\tau_c = 0,3 \text{ s}^{1/3}$.

On notera qu'une étude d'hydraulique des laves torrentielles ne peut généralement être conduite sans évaluation préalable des apports potentiels en matériau solide. Une telle étude n'ayant pas été menée, il est bien difficile de se prononcer sur la fréquence d'occurrence de ces phénomènes de laves torrentielles et donc sur le niveau de risque qu'elles représentent.

Concernant les changements morphologiques dus au charriage de matériaux, deux phénomènes sont envisagés : (i) les incisions et (ii) les engravements du lit. Les incisions, si elles sont suffisamment intenses, peuvent mener à une déstabilisation des berges et/ou des digues par sapement de leur pied. Les engravements contribuent à relever le niveau du fond, diminuent de ce fait la section hydraulique disponible et peuvent entraîner des risques de débordement.

L'incision est a priori limitée sur le torrent de la Salle où de nombreux barrages et seuils de fixation du lit sont présents.

Elle est évaluée par comparaison entre les débits liquides hydrologiques et un débit-seuil de début de transport calculé par la formule de Bathurst [5], voir Eq. (4) :

$$q_c = 0,15\sqrt{g} d_{50}^{3/2} I^{-1,12} \quad (4)$$

Un phénomène d'engravement nécessite a priori une diminution de la capacité de transport en matériau solide et donc généralement une réduction de la pente en long du torrent. Nous considérons également que le dépôt se produit selon une pente de raccordement entre une pente amont plus forte et une pente aval plus faible.

Or, on constate sur le torrent de la Salle-les-Alpes que, en amont de la partie endiguée (donc en amont du barrage B13 situé à la cote 1485 m), les pentes d'atterrissement entre les seuils de correction active sont comprises entre 10% et 15,5% et ceci sur plusieurs centaines de mètres. Hypothèse est donc faite que cette zone corrigée régule le transport solide et qu'en aval un dépôt significatif ne pourra avoir lieu qu'au niveau d'une zone où la pente devient inférieure à la valeur moyenne de la pente de la zone de régulation amont (en pratique 12 %). Une telle situation ne se rencontre qu'en partie aval du cours d'eau endigué, soit dans le bief n°7 situé au droit du tronçon de digue 5-RG. Pour ce bief, une analyse approfondie du risque d'engravement a donc été conduite, en utilisant la formule simplifiée de Meunier [3] qui relie le débit solide transporté par l'écoulement au débit liquide dès lors que ce dernier est supérieur au seuil de début de transport, voir Eq. (5) :

$$Q_s/Q_l = 8,2 I^2 \quad (5)$$

où Q_s est le débit solide, Q_l le débit liquide et I est la pente (m/m).

Par calcul inverse, il a ainsi été possible de remonter de l'évaluation du volume de dépôts occasionnant un engravement potentiellement dangereux du bief à celle du volume de la crue liquide, et donc à l'intensité de la crue initiatrice.

Les limites de l'approche adoptée résultent de l'absence d'une étude détaillée des apports potentiels de transports solides en provenance du bassin versant amont.

En termes de phénomènes aggravants, le principal phénomène considéré dans l'EDD a été le transport de corps flottants et le risque d'obstruction qui en résulte notamment au niveau des ponts. Ne disposant d'aucune méthode précise d'évaluation de l'effet de ces corps flottants, le risque résultant a été évalué « à dire d'expert ».

Application de la méthode au bief n°1 bordé par le tronçon de digue rive gauche n°1-RG

Ce bief est intéressant à plus d'un titre : c'est probablement à son niveau que la lave torrentielle de 1948 a débordé en rive gauche pour envahir le hameau de La Chirouze ; lors de la crue de 1988, la digue construite depuis en rive gauche a

failli être submergée, ce qui a justifié son rehaussement ultérieur par un cordon d'enrochements (Figure 4).

Position géographique (cf. aussi Figure 2)

Le bief n°1 est délimité par deux barrages transversaux (B13 à l'amont et B14 à l'aval). Il est bordé en rive gauche par le tronçon de digue 1-RG (Figure 4), dont la structure composite est décrite plus haut, et ne présente pas d'endiguement en rive droite.



FIGURE 4. TRONÇON DE DIGUE REHAUSSEE 1-RG. PAREMENT COMPOSITE COTE TORRENT (BETON ET ENROCHEMENTS).

Description du bief

La longueur de ce tronçon est de 25 m. La section en travers considérée comme hydrauliquement limitante (susceptible de générer un débordement ponctuel) est celle du barrage aval B14.

TABLEAU 4. CARACTERISTIQUES DE PENTE DU BIEF

Pente moyenne du lit avant correction	Pente moyenne du lit du torrent après correction, à la date du levé
23%	17%

Les principaux paramètres hydrauliques ont été évalués approximativement aux valeurs suivantes :

- Section minimale mouillée à débit de plein bord : 15 m² (au barrage B14)
- Rayon hydraulique : 1,4 m
- Epaisseur d'écoulement : 2,15 m
- Pente minimale, hydrauliquement significative, sur le bief : 7,6 %
- Largeur au fond : 7 m
- Granulométrie approximative sur ce bief :
d₉₀=20 cm, d₅₀=7,5 cm

Écoulements liquides

Hypothèse d'un écoulement en régime permanent uniforme :

Vitesse U = 8,6 m/s

Débit Q = 129 m³/s

Hypothèse d'un écoulement en régime critique :

Vitesse U = 4,6 m/s

Débit Q = 69 m³/s

Quelle que soit l'hypothèse retenue, la capacité de transit de ce bief pour un écoulement liquide faiblement chargé dépasse le débit de pointe millénal de 52 m³/s évalué dans l'étude hydrologique.

Laves torrentielles

Le bief n° 1 présente actuellement un tronçon d'une quinzaine de mètres à une pente de 7,6% défavorable au transit des laves torrentielles. Celles-ci auraient tendance à déborder en rive droite, non protégée par un endiguement avec probablement un retour partiel de l'écoulement vers le lit mineur à l'aval du barrage aval B14. Du fait de la grande hauteur côté torrent de l'endiguement rive gauche (tronçon 1-RG), le débordement de laves torrentielles fluides n'est a priori pas à craindre. En revanche pour une lave torrentielle visqueuse, un débordement au-dessus de ce tronçon de digue ne peut être pas être exclu et serait particulièrement dangereux car irréversible (pas de retour possible dans le lit mineur du torrent).

En définitive, le niveau de protection offert par l'endiguement rive gauche vis-à-vis des laves torrentielles visqueuses s'avère a priori limité sachant que, compte tenu de la faible pente locale du lit, un dépôt massif de matériau en amont du barrage B14 est possible.

Changements morphologiques

Débit liquide à la limite du début de transport Q_{lim}=0,5 m³/s. Compte tenu d'une pente actuelle moyenne du bief supérieure à celle de la zone de régulation et de la présence de seuils transversaux stabilisant le lit, les phénomènes de changements morphologiques n'ont pas été jugés significatifs, tant en ce qui concerne la capacité de transit du bief, qu'en ce qui concerne le sapement du pied de la digue rive gauche.

Synthèse pour la caractérisation de l'aléa torrentiel

Concernant les crues liquides dont la charge solide ne dépasse pas 10 à 20% en volume, la capacité d'écoulement du chenal actuel endigué est a priori confortable (sous l'hypothèse de l'absence de phénomènes d'engrèvement) puisque susceptible de transiter presque partout le débit de pointe millénal résultant de l'étude hydrologique.

Concernant les laves torrentielles fluides, leur transit est a priori possible sans débordement majeur sur une grande partie du linéaire de torrent endigué. En revanche, de nombreux points ont été identifiés qui ne permettraient pas le transit sans débordement des laves visqueuses ou pourvues d'un front granulaire. Les points de franchissement tels que les passerelles et les ponts sont, sur ce point, susceptibles d'avoir une action très négative.

Concernant le transport solide par charriage et les changements morphologiques associés, seuls quelques points

ont été identifiés comme potentiellement critiques vis-à-vis des phénomènes d'incision et d'engravement. Notamment pour le bief n°7, un calcul simple a montré qu'en ordre de grandeur, une crue rare mais pas exceptionnelle pourrait provoquer un engravement susceptible de provoquer un débordement liquide, toutefois au niveau d'une berge non endiguée.

La présente synthèse met en lumière certaines limites de l'approche simplifiée qui a été menée ici. En particulier, la méconnaissance des apports sédimentaires pouvant transiter depuis le haut bassin jusqu'à l'amont immédiat du système d'endiguement est préjudiciable à la qualité et à l'étendue des résultats présentés pour ce qui concerne les laves torrentielles et les phénomènes d'engravement.

Autres aléas traités dans l'EDD

Pour mémoire, les autres aléas qui ont été traités dans l'EDD sont les suivants :

- l'aléa hydrologique (étude simplifiée de prédétermination des crues "liquides") ;
- les mouvements de terrain ;
- les avalanches ;
- les glaciers rocheux ;
- les séismes ;
- la défaillance des ouvrages amont de correction torrentielle active.

Mis à part l'aléa hydrologique et les séismes (non nécessairement inféodés aux zones de montagne), il s'agit d'aléas gravitaires « prenant naissance » dans les milieux extérieurs amont (le bassin de réception et/ou le chenal d'écoulement) et susceptibles d'impacter - surtout indirectement - le système d'endiguement installé sur le cône de déjection, en fournissant des sources supplémentaires de matériaux au torrent (aggravation de l'aléa torrentiel).

Identification et caractérisation des risques

Démarche générale

La démarche d'analyse de risques appliquée aux ouvrages hydrauliques comprend classiquement les quatre étapes suivantes issues de la sûreté de fonctionnement :

- l'analyse fonctionnelle de l'ouvrage ;
- l'analyse de ses modes de défaillance ;
- la modélisation de la sûreté de fonctionnement du système et des scénarios de défaillance ;
- l'analyse quantitative des scénarios de défaillance : évaluation en termes de probabilité d'occurrence et description qualitative des conséquences.

L'application de cette démarche intégrale aux digues de correction torrentielle se heurte à un certain nombre de difficultés ardues dès lors que l'on commence à construire les scénarios. Il nous a donc fallu adapter la méthodologie d'analyse de risques au contexte particulier des digues torrentielles.

Scénarios retenus

La déclinaison exhaustive de toutes les possibles combinaisons spatiales et temporelles des multiples processus élémentaires possibles nous a paru irréaliste. Il a donc semblé plus accessible de se ramener à la prise en compte de scénarios au niveau de chaque bief, sans se préoccuper des possibles et innombrables combinaisons de ces scénarios « locaux » qui constituent les événements initiateurs possibles. Ils reprennent la typologie simplifiée des modes d'écoulement que l'on peut observer en torrents de montagne : écoulements en eau « claire », écoulements avec transport solide par charriage, et laves torrentielles.

Nous sommes ici confrontés à ce qui représente sans doute une des difficultés majeures d'application des études de dangers aux digues torrentielles, à savoir l'obligation de tenir compte de multiples scénarios initiateurs ou aggravants dans le bassin amont, parmi lesquels des scénarios de défaillance possible d'un dispositif de correction autre que le système d'endiguement objet de l'étude. On peut toutefois considérer que la ruine d'un dispositif de correction torrentielle active régulièrement surveillé et entretenu n'intervient que lors d'un phénomène torrentiel majeur qui déborderait largement l'endiguement aval sans engendrer un sur-aléa réellement significatif compte tenu de l'importance des volumes torrentiels naturellement mis en jeu.

Pour chaque scénario ont été analysées les conséquences imaginables résultant de possibles défaillances fonctionnelles et structurelles. Les probabilités respectives d'occurrence du scénario et des désordres ont ensuite été évaluées qualitativement. Toutes les combinaisons Scénario / Défaillances n'ont pas été examinées individuellement, soit parce qu'on peut en considérer certaines comme suffisamment improbables pour être négligées, soit par manque d'éléments de connaissance suffisants pour les caractériser de façon différenciée par type de scénario.

Méthodologie d'adaptation au contexte particulier des digues torrentielles

L'objectif général de cette analyse est d'évaluer la « criticité » des situations pouvant entraîner des défaillances de composants du système d'endiguement, graves quant à leurs conséquences en termes de dommages aux personnes et aux biens. Dans notre contexte, l'évènement « redouté » peut être résumé comme une sortie de tout ou partie de l'écoulement du torrent du chenal corrigé par endiguement et/ou seuils. Il peut résulter de diverses causes :

- le débordement au-dessus de la crête de digue (ou d'une berge non endiguée), sans endommagement de la digue,
- ou le débordement au travers de brèches ouvertes dans le corps de digue, sous l'effet de différents processus causaux s'ils arrivent à leur terme :
 - o incision ou affouillement du pied de digue, provoquant son effondrement ;

- érosion latérale du parement de la digue côté torrent, puis de l'ensemble de son corps ;
- chocs dus à l'impact de blocs ou d'arbres transportés par les écoulements ;
- érosion interne du corps de digue ;
- érosion sous l'effet d'une surverse par-dessus la crête de digue.

La probabilité d'apparition de ces processus a été estimée qualitativement (négligeable, faible, modérée, forte) pour chaque bief hydraulique et chaque scénario élémentaire retenu, sur la base de l'analyse des aléas torrentiels. La capacité pour ces processus de se développer au point de produire un débordement hors du chenal endigué est déterminée par tronçon de digues à partir de l'évaluation également qualitative (excellent, fort, moyen, faible) des niveaux de résistance résultant de l'analyse fonctionnelle. Le croisement des deux donne une évaluation de la probabilité d'occurrence de la sortie de l'écoulement hors du torrent endigué.

Enfin, la combinaison de cette probabilité d'occurrence du phénomène redouté, de son intensité, et du niveau de gravité de ses conséquences, fournit une évaluation et une hiérarchisation du niveau de risque de chacune de ces situations.

Application de la méthode sur le tronçon de digue 1-RG

Nous reprenons ici le cas du tronçon de digue 1-RG qui nous a servi d'exemple d'application tout au long du présent article. On rappelle que ce tronçon borde la rive gauche du bief 1 du torrent, non endigué en rive droite.

Le tableau 5 ci-dessous récapitule les résultats de l'analyse des risques de défaillance de ce tronçon de digue pour les quatre principaux processus causaux identifiés :

TABLEAU 5. SYNTHÈSE DU RISQUE DE DÉFAILLANCE DU TRONÇON 1-RG, BIEF N°1

Processus causal	Niveau de contraintes (imposé par le bief)	Niveau de résistance du tronçon de digue	Risque de défaillance du tronçon de digue
Incision	Faible	Moyen	FAIBLE
Erosion latérale	Moyen	Excellent	FAIBLE
Choc résultant d'une lave	Fort	Excellent	FAIBLE
Surverse de lave torrentielle	Fort	Moyen	FORT

Points de débordements préférentiels

Les analyses présentées ci-dessus ont porté spécifiquement sur les neuf tronçons de digue identifiés par l'analyse structurelle et définis au sens de la réglementation. Or il se

trouve que selon cette définition, l'endiguement du torrent de La Salle est discontinu, les tronçons de digues au sens strict pouvant être séparés par des tronçons de berges non endiguées. Pour autant, ces tronçons de berges non endigués peuvent représenter des points de faiblesse vis-à-vis de l'objectif de protection globale attendu du système d'endiguement. L'analyse spécifique aux tronçons de digues stricto-sensu a donc été complétée par l'identification de points de débordements préférentiels éventuels au droit des tronçons de berges non endiguées.

Synthèse de l'évaluation des différents scénarios

En synthèse, il est clair que le scénario le plus préoccupant est celui d'une surverse à la suite d'un engrèvement d'un tronçon de chenal endigué à l'occasion d'une crue avec transport par charriage, ou par débordement d'une bouffée de lave torrentielle visqueuse. Les autres processus (incision, érosion latérale, et à un degré moindre chocs) ont une probabilité beaucoup plus faible de produire une destruction des digues lors d'une unique crue, même s'ils peuvent entraîner des endommagements critiques pour une crue suivante.

Gravité des conséquences

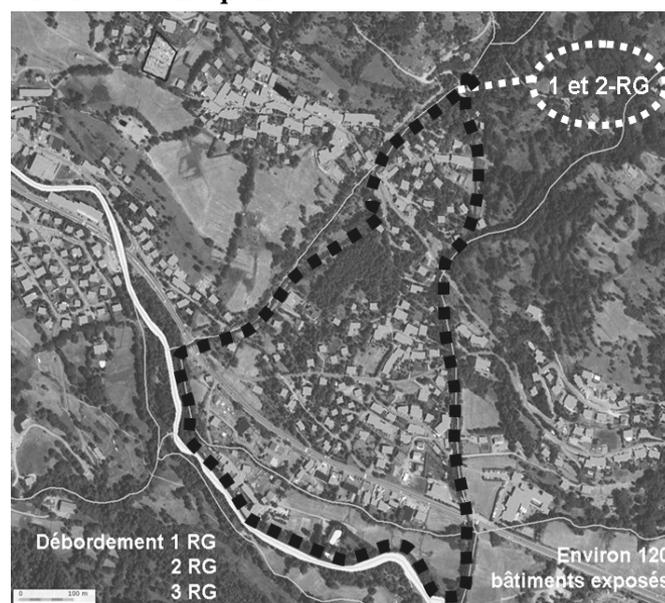


FIGURE 5. DELIMITATION DE LA ZONE EXPOSEE EN RIVE GAUCHE SUR LE CONE DE DEJECTION EN CAS DE DÉFAILLANCE DU TRONÇON DE DIGUE 1-RG OU 2-RG (D'APRES IGN-GEOPORTAIL, NORD EN HAUT).

La gravité des scénarios a été évaluée à partir d'une délimitation approximative de l'extension des écoulements en cas de défaillance d'un tronçon de digue. Les zones exposées ainsi délimitées sont des zones maximales d'extension (cf. Figure 5), qui ne seront jamais totalement concernées par les débordements d'une unique crue, compte-tenu de leurs divagations plus ou moins aléatoires, mais dont

chaque point est susceptible d'être atteint à l'occasion d'une crue ou une autre. Notre évaluation de la gravité est donc très sécuritaire, mais il est difficile de l'être moins.

Dans le cas précis, la fourchette de bâtiments concernés (10 à 100) correspondrait à une seule et même classe de gravité si on se réfère aux classes suggérées pour les digues fluviales. De façon générale, on peut penser que le critère « gravité » sera rarement opérationnel pour nuancer la criticité des scénarios dans le cas des systèmes torrentiels, sauf à avoir des bâtiments nombreux et très inégalement répartis sur le cône de déjection du torrent (ce qui pourrait alors justifier d'explorer une approche incrémentale des conséquences).

Mesures de réduction des risques

Les mesures visant à réduire les sources de danger identifiées dans les étapes précédentes de l'EDD sont définies tronçon par tronçon, de l'amont vers l'aval, pour les scénarios de défaillance dont la probabilité d'occurrence est considérée de moyenne à forte. Il s'agit essentiellement de mesures structurelles et/ou de consignes particulières de surveillance ou d'entretien. Dans la mesure du possible, des niveaux de priorité ont été indiqués, mais ne sont pas repris ici en détail par souci de concision.

Les mesures organisationnelles qui peuvent être rapidement mises en place concernent le renforcement et la coordination des opérations de surveillance et d'entretien des ouvrages. Elles concernent tant le système d'endiguement que les divers composants artificiels existant sur le bassin de réception et le chenal d'écoulement amont (poursuite du suivi régulier et post-crue, et des opérations d'entretien des ouvrages domaniaux de correction active). Une surveillance régulière, et après chaque événement notable, des aléas naturels qui affectent les milieux extérieurs amont (glissement de terrain de Puy Chirouzan, couloirs d'avalanches, glaciers rocheux) et qui peuvent impacter le système d'endiguement doit par ailleurs être instaurée.

Couplé à ces mesures de surveillance, il est demandé de mettre en place un dispositif d'intervention rapide, afin de procéder en urgence à des opérations de curage en cas d'engravement intempestif dans le lit qui réduirait la section d'écoulement et favoriserait ainsi une surverse, voire d'être en capacité de poser des enrochements pour conforter les berges en cas d'incision et/ou d'érosion latérale. Même si l'instauration d'une telle capacité d'intervention rapide ne peut, à elle seule, garantir l'absence de défaillance du système d'endiguement, étant donné l'intensité et la rapidité des phénomènes torrentiels, elle peut se révéler efficace pour de nombreux événements d'intensité faible à moyenne.

Des mesures structurelles sont aussi proposées ponctuellement sur les digues, mais également sur certains ouvrages attenants (ponts, seuils de stabilisation du lit, ...) en vue d'améliorer la sécurité de tel ou tel tronçon. La priorité est donnée aux travaux qui concernent les tronçons amont du système, puisqu'un débordement à l'apex du cône est

susceptible d'impacter un plus grand nombre de bâtiments. Il est ainsi prévu un abaissement et un lissage du profil en long en partie haute du cône (bief 1 et tronçon de digue 1-RG) pour réduire le risque de surverse et de débordement à ce niveau par une lave torrentielle ou une crue de charriage engravante. Certaines actions qui présentent un coût relativement élevé, telle que la reconstruction d'un nouveau pont sont plus difficilement acceptables financièrement par la collectivité, même si l'utilité de telle mesure est incontestable.

Enfin, on préconise des mesures sur les milieux protégés aval comprenant notamment un diagnostic de la vulnérabilité du bâti existant (construit avant l'instauration de mesures d'adaptation des constructions par le premier plan d'exposition aux risques naturels en 1993) et d'importantes mesures de sensibilisation et d'information des populations vivant sur le cône de déjection du torrent, dont le Plan Communal de Sauvegarde de La-Salle-les-Alpes doit se faire l'écho.

Une démarche d'acquisition par la Commune des terrains d'emprise des digues placées sous sa responsabilité est fortement recommandée.

Compte tenu du contexte particulier de la présente étude de dangers « prototype », les mesures de réduction des risques décrites dans le rapport n'ont encore que le statut de « propositions » puisqu'elles doivent être discutées et validées par les deux responsables d'ouvrage concernés que sont l'ONF-RTM et la Commune de La-Salle-les-Alpes. La concertation avec la commune a été engagée à l'automne 2012 afin que cette dernière détermine, parmi toutes les mesures structurelles proposées, celles qu'elle est en capacité de programmer et de réaliser à court ou moyen terme (dans une échéance de 10 ans).

Conclusion – Recommandations

D'une façon générale, l'EDD-prototype des digues du torrent de La Salle a permis de démontrer l'applicabilité de la méthodologie d'analyse de risques - maintenant éprouvée pour les barrages et les digues de plaine - au cas des endiguements des torrents de montagne. Toutefois, des hypothèses simplificatrices ont dû être adoptées et, à plusieurs reprises, des raisonnements « à dire d'expert » ont été employés. Ceci s'est avéré d'autant plus nécessaire que la structure complexe et variable des digues a conduit à identifier des tronçons fonctionnels très courts pour le système d'endiguement (de l'ordre de 100 m en moyenne, pour moins de 800 m de cours d'eau).

L'analyse des risques sur les portions non endiguées ne doit pas être occultée, car les débordements qui sont susceptibles de s'y produire peuvent contourner les tronçons endigués, et ce, notamment aux abords des ouvrages de franchissement qui constituent des points de débordement préférentiels.

Une étude de bassin torrentiel – hélas non disponible dans le cas du torrent de La Salle – est un pré-requis souhaitable

pour consolider les approches quantitatives - quand bien même simplifiées - mises en œuvre pour caractériser l'aléa torrentiel dans les secteurs endigués aval. Elle nous semblerait même incontournable pour les quelques cas de digue de protection torrentielle relevant de la classe A ou B.

L'absence d'un « diagnostic initial de digue » dans le cas du torrent de La Salle a sans doute alourdi le travail, notamment l'analyse fonctionnelle de l'ouvrage et de son environnement. Pour ce qui est de l'analyse des scénarios de défaillance, les développements proposés dans le cadre de cette première application prototype restent partiels. Le croisement des scénarios initiateurs avec l'état structurel des digues et des ouvrages de franchissement a permis de caractériser de manière qualitative le niveau de sensibilité de chacun des tronçons de digue et biefs. La définition formelle et partagée de ces indicateurs constitue un enjeu majeur pour imaginer une application homogène, transposable de la méthodologie d'un site à un autre. En effet, les situations rencontrées dans cette étude-prototype ne couvrent pas l'ensemble des configurations réelles (ex : torrents à laves torrentielles dominantes). Une extension méthodologique sera donc nécessaire pour couvrir la diversité des cas de défaillances fonctionnelles et aussi structurelles (en s'intéressant par exemple à des classes de matériaux de revêtement des berges, de corps de digue, de forme globale...).

Enfin, concernant les mesures de réduction des risques et vu le montant important de certaines mesures structurelles, il pourrait être opportun de prévoir une rédaction en deux temps, constituant deux sous-parties : la première permettrait au bureau d'études de présenter un panel « exhaustif » des mesures de réduction de risques envisageables, la seconde serait consacrée aux mesures finalement retenues et programmées à court ou moyen terme (10 ans maximum, calqué sur l'échéance de la prochaine actualisation de l'EDD) par le propriétaire de l'ouvrage. Cette décomposition permet au(x) bureau(x) d'études de proposer toutes les actions qu'ils jugent utiles sans contrainte, de ne pas imposer de mesures au(x) maître(s) d'ouvrage qui reste(nt) seul(s) décideur(s) de leur programmation et aux services de contrôle d'avoir une parfaite connaissance des mesures envisageables, mais non retenues. Chacun peut ainsi s'exprimer selon sa part de responsabilité.

Remerciements

Les auteurs remercient tous les personnels techniques et administratifs de l'ONF-RTM, d'Irstea et de la Commune de la-Salle-les-Alpes ayant contribué à l'étude de dangers des digues du torrent de La Salle, ainsi que la DGPR du MEDDE qui a soutenu ces travaux.

Références

- [1] Félix H., Beullac B., Tourment R., Mériaux P., Peyras L. (2011). *Méthodologie pour l'analyse fonctionnelle des ouvrages hydrauliques*

à grand linéaire. Colloque technique CFBR-AFEID « Sécurité des barrages et nouvelle réglementation française : pratique des études de dangers des barrages », Lyon, 21 et 22/11/2011.

- [2] Coussot, P. (1994). *Steady laminar flow of concentrated mud suspensions in open channel*. Journal of Hydraulic Research 32(4): 535-559.
- [3] Meunier, M. (1991). *Eléments d'hydraulique torrentielle. "Etudes" du Cemagref*, série Montagne n°1, 278 p.
- [4] Rickenmann, D. (1990). *Bed load transport capacity of slurry flows at steep slopes*. PhD thesis ETH Zürich, Nr. 9065. 249 p.
- [5] Bathurst, J.C., Graf, W.H. and Cao, H.H (1983). *Initiation of sediment transport in steep channels with coarse bed material*. In Sumer, B.M. and Muller, A., editors, *Mechanics of sediment transport*. Proceedings of Euromech Mechanism of sediment transport, Istanbul, July 1982.

Mots clés

Etude de dangers – Analyse de risques – Torrent – Digue de protection.