

Spécificités des systèmes d'endiguement et de l'analyse de risque en contexte torrentiel

Specificities of embankment systems and risk analysis in torrential context

Y. Queffélec¹, S. Carlados¹, G. Piton², D. Kuss³, M. Fouquet³, R. Tourment⁴

¹ ONF / DFRN / Département Risques Naturels – Pôle RTM, Grenoble, yann.queffelec@onf.fr

² Univ. Grenoble Alpes, IRSTEA – UR ETNA - Centre de Grenoble, guillaume.piton@irstea.fr

³ ONF / Services Départementaux RTM de l'Isère et des Hautes-Alpes, damien.kuss@onf.fr

⁴ IRSTEA – UR RECOVER - Centre d'Aix-en-Provence, remy.tourment@irstea.fr

Résumé

Lorsqu'ils sont situés en bordure de torrents ou de rivières torrentielles, les systèmes d'endiguement sont soumis à des aléas naturels violents caractérisés par un fort transport solide (charriage, voire laves torrentielles). Ces phénomènes torrentiels sont susceptibles de provoquer des évolutions morphologiques importantes du lit durant les crues et sur ses berges en cas de débordements. Elles sont liées aux divagations, à l'engravement, aux érosions, ou encore aux flottants qui modifient fortement les conditions d'écoulement et rendent souvent inopérantes les approches hydrauliques classiques et l'utilisation de modèles numériques 2D à géométrie fixe. Les approches expertes basées sur les analyses historiques, géomorphologiques et les retours d'expériences restent indispensables pour bien comprendre les phénomènes et qualifier les aléas, notamment via les étapes incontournables que sont l'analyse du (des) profil(s) en long et les reconnaissances de terrain. Les méthodes les plus adaptées pour évaluer les conditions d'écoulement dans le chenal endigué sont présentées, ainsi que les limites actuelles de l'appréciation des aléas en dehors de son lit ordinaire.

Les différents modes de rupture des digues sont passés en revue. Les érosions externes et les affouillements des ouvrages restent de loin les mécanismes de dégradation prédominants des digues torrentielles. Enfin, les spécificités des potentiels de danger des digues torrentielles par rapport aux digues fluviales sont présentées, ainsi que des éléments d'appréciation sur l'analyse de risque. Pour évaluer les conséquences des débordements vers la zone protégée, une approche "sécuritaire" est proposée. Elle consiste à délimiter les zones maximales d'extension des crues en se basant sur la démarche de qualification et quantification des aléas développée dans le guide « Plan de prévention des risques naturels - Cours d'eau torrentiels ».

Mots-Clés

Digues torrentielles, aléas torrentiels, mode de rupture, potentiel de danger.

Abstract

When located along torrents or torrential rivers, embankment systems experience violent natural hazards characterized by intense sediment transport (bedload or even debris flows). These torrential phenomena are likely to cause significant morphological evolutions of the bed during the floods - and of the river banks in case of overflows. The latter are related to streambed displacements, accretions, erosions or/and woody debris which strongly modify the flow conditions. Conventional hydraulic approaches and the use of 2D numerical models are often inoperative because they do not take into account these evolutions. Expert approaches based on historical, geomorphological analysis and lessons learned from past disasters, are essential to understand phenomena and qualify the related hazards, taking into account: analysis of bed longitudinal profile(s) and field reconnaissance. The most proven methods for assessing flow conditions in embanked channels are presented, as well as current limits for assessing hazards outside of the regular bed.

The different dike failure modes are reviewed. External erosions and scouring of structures remain by far the predominant degradation mechanisms of torrential dikes. Finally, the specificities of the hazard potentials of torrential dikes compared to river dikes are presented, as well as elements on risk analysis and assessment.

To assess the consequences of overflows towards the protected area, a "safe" approach is proposed. It consists in delimiting maximum areas of flood extension based on an approach similar to the one described in the guide on "torrential stream" natural hazard prevention plans.

Key Words

Torrential dikes, torrential hazards, breaking mode, danger potential.

Introduction

À l'instar des digues fluviales, les digues torrentielles ont pour fonction principale d'empêcher les débordements des écoulements torrentiels vers les zones protégées, au minimum jusqu'au niveau de protection.

Se faisant elles limitent, parfois fortement, les divagations du cours d'eau et doivent résister aux différents mécanismes de dégradation auxquels elles sont soumises (impacts, érosions externes, incision généralisée du lit, affouillements localisés, impacts et chocs localisés, surverse, etc.). Elles sont ainsi exposées à des actions violentes résultant notamment du fort transport solide qui caractérise les écoulements torrentiels, mais aussi potentiellement à d'autres phénomènes spécifiques du milieu montagneux (avalanches, mouvements de terrain).

Pour certaines digues torrentielles, la fonction de protection contre les érosions et reculs de berge peut même être la fonction principale.

Spécificités des digues torrentielles

Préambule sur la terminologie

Le terme « digues torrentielles » s'applique aussi bien aux digues situées en bordure de torrents que de rivières torrentielles. Il sera néanmoins souvent nécessaire de distinguer une « digue de torrent » d'une « digue de rivière torrentielle » en raison des contraintes et sollicitations appliquées à l'ouvrage et au « sur-aléa » potentiel en cas de rupture qui ne sont pas les mêmes selon l'importance du transport solide.

Généralités sur les digues torrentielles

Historiquement, de nombreuses digues torrentielles ont été implantées dans des zones propices à l'engravement (zones de réduction de pente).

Sur les torrents, un système d'endiguement est généralement constitué de tronçons de digues de faible hauteur (< 2 à 3 m) et de longueur relativement courte (allant de quelques dizaines à quelques centaines de mètres selon l'étendue du cône de déjection). Il peut s'agir d'un ouvrage linéaire d'un seul tenant ou d'une succession non continue d'ouvrages linéaires (tronçons de digues pouvant se raccorder en un ou plusieurs points à des éléments topographiques naturels).

Du fait de la topographie convexe des cônes de déjection et de la tendance des torrents à déposer leurs matériaux aux ruptures de pentes, le lit et les systèmes d'endiguement sont parfois perchés. Cette configuration avec des (lits et) systèmes de protection surélevés résulte aussi parfois d'aménagements créés par l'homme : réduction abusive du lit torrentiel, adaptation du profil en long induisant une tendance au dépôt au croisement avec d'autres réseaux (canaux, routes, voies ferrées).

Les matériaux constitutifs des digues en remblai ont majoritairement été prélevés dans les anciens dépôts

torrentiels. Il s'agit généralement de matériaux grossiers, hétérogènes et plutôt perméables. Les crues étant plus courtes que dans les grands fleuves, il est rare que l'on ait cherché à rendre ces ouvrages « imperméables ».

Les digues de rivières torrentielles sont généralement plus longues (de la centaine de mètres à plusieurs kilomètres), entrecoupées par les confluences des torrents affluents.

Certaines digues peuvent présenter de très fortes hauteurs, parce qu'elles assurent une fonction complémentaire, parfois la fonction principale : paravalanche, pare-blocs ou pour prendre en compte l'existence d'un glissement de terrain.

Qualification et quantification des aléas naturels

Les phénomènes naturels qui sont pris en compte sont les crues torrentielles caractérisées par un fort transport solide.

Quand faut-il prendre en compte le transport solide ?

Il est difficile de donner une limite inférieure de pente à partir de laquelle il faudrait systématiquement prendre en compte le transport solide et ses conséquences. Pour des pentes supérieures à 1 %, les précautions propres au domaine torrentiel doivent systématiquement être prises en compte ; les pentes inférieures à 0,1 %, correspondent usuellement au domaine fluvial. Dans la gamme de pentes intermédiaires, le chargé d'étude devra déterminer à travers des indices historiques et géomorphologiques si les spécificités du domaine torrentiel concernent le site.

Types d'écoulement

Deux principaux types d'écoulements avec transport solide intéressent les cours d'eau torrentiels [6] :

- les laves torrentielles, qui sont un phénomène tout à fait spécifique des torrents à forte pente ;
 - le charriage (concentration solide en débits de quelques pour-cent à 25-30 %), voire le charriage hyper-concentré (concentration encore plus forte pouvant atteindre 40-50 %).
- Ce mode de transport solide est celui qui doit être pris en compte le plus souvent. L'autre mode de transport, la suspension, n'a d'influence sur les rivières à forte pente que lorsque la concentration est considérable comme dans les terres noires des Alpes du Sud par exemple. Elle peut toutefois jouer un rôle essentiel dans la formation des lits majeurs et des terrasses alluvionnaires élevées.

Dans certains bassins à forte pente, la majeure partie des crues se produisent sous forme de laves torrentielles. Dans d'autres bassins de superficie plus étendue et à pente plus faible, on peut observer un fonctionnement mixte avec alternance de crues avec charriage et de laves torrentielles.

Dans tous les cas, une étude du bassin versant amont est nécessaire pour déterminer quels types d'écoulement doivent être considérés et estimer leurs caractéristiques principales. Les facteurs aggravants potentiels doivent alors être recensés : flottants pouvant constituer des embâcles, risque

de rupture ou de dépassement d'ouvrages situés en amont (correction active, plage de dépôt, etc.).

Différentes approches envisageables

« Les aléas torrentiels peuvent être quantifiés ou au moins qualifiés à partir de différentes approches : historique, hydrogéomorphologique, voire hydrologique - hydraulique.

Pour chaque site, il faut trouver un optimum entre les moyens d'étude mis en œuvre et l'importance des aléas, des enjeux ou des incertitudes. (...) Dans de nombreuses situations, l'association des approches historique et hydrogéomorphologique avec des éléments simplifiés d'hydrologie et d'hydraulique peut suffire pour qualifier des aléas torrentiels » [2].

Dans tous les cas, il faut déployer les approches géomorphologiques, voire historiques d'abord à l'échelle du bassin versant global, puis de la zone d'étude. À l'échelle du bassin versant, l'analyse permet d'estimer le potentiel de production sédimentaire (exercice toujours difficile), de déterminer la granulométrie des matériaux provenant de l'amont, les prédispositions du bassin à générer des laves torrentielles et/ou des embâcles par flottants. Les autres aléas de montagne (glissements, chutes de blocs, avalanches, etc.) sont également analysés car ils peuvent avoir un effet sur les systèmes d'endiguement (création d'embâcles, augmentation massive de la charge sédimentaire, etc.). Il convient d'être particulièrement vigilant à l'apparition ou à la réactivation de "nouveaux" phénomènes dans le bassin versant (glissement de terrain, débâcles glaciaires, etc.) qui peuvent ainsi modifier grandement les caractéristiques des aléas torrentiels (par exemple, l'écroulement de Bondo en Suisse en 2017).

L'analyse du tracé du (des) profil(s) en long et son interprétation sont incontournables. Le profil en long permet de déterminer la pente caractéristique des apports, d'évaluer le risque de contournement du système depuis l'amont, de mettre en évidence des influences extérieures (gorges, pavage, apports des affluents, ouvrages et aménagements, etc.), de retracer l'historique des évolutions du fond, de prendre en compte l'effet des zones de régulation amont et les influences aval (engravement régressif depuis la zone de confluence, présence d'une singularité en aval, etc.), de souligner et d'expliquer d'éventuelles discontinuités.

L'objectif final est de prévoir les évolutions futures du profil en long et les conséquences prévisibles sur le tracé en plan.

Détermination des niveaux en crue à fort charriage

En contexte torrentiel, une des principales difficultés est d'estimer de façon fiable le niveau atteint en crue par les écoulements. Les conséquences du transport solide en termes de types d'écoulement et d'évolutions morphologiques (incision ou exhaussement du fond du lit, modifications des sections d'écoulement durant la crue, etc.) influencent directement et indirectement le niveau d'écoulement dans des proportions considérables. Le calcul d'écoulement classique en ne tenant compte que du débit liquide sur une topographie fixe perd alors tout son sens.

Le niveau pouvant être atteint par les eaux dépend de trois paramètres (figure 1) : 1- l'évolution systématique du fond, 2- les respirations du lit durant la crue et 3- la hauteur d'eau.

Les trois hauteurs ou épaisseurs correspondantes ne doivent pas être directement cumulées, car certains phénomènes se succèdent dans le temps plus qu'ils ne se superposent. Dans les zones d'engravement par exemple, ce niveau maximum est généralement atteint plutôt durant la décrue.

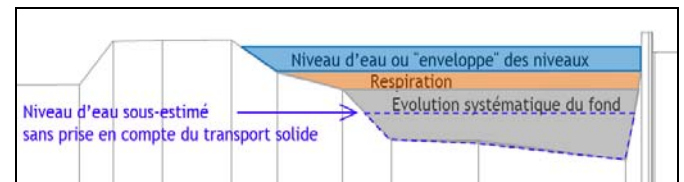


FIGURE 1 : ILLUSTRATION DE L'ESTIMATION DU NIVEAU ATTEINT EN CRUE AVEC CHARRIAGE.

1- L'évolution systématique du fond résulte de la variation de la capacité moyenne de transport. Ces variations du fond sont d'abord liées aux irrégularités du profil en long, mais peuvent aussi être provoquées par les apports des affluents et une obstruction éventuelle du lit (embâcles...).

Le recours à des modèles numériques spécifiques en 1D est relativement courant de nos jours pour évaluer, à partir de formules de transport solide, l'évolution du lit durant les crues. Comme pour tout modèle, leur utilisation doit rester critique (pratiquer des tests de sensibilité) et venir en appui du dire d'expert et non l'inverse.

2- La respiration du lit durant la crue regroupe toutes les variations temporaires et souvent chaotiques du niveau du lit dues aux irrégularités de la fourniture en matériaux et au caractère intrinsèquement instable du charriage torrentiel (divagations, antidunes, effet des contractions marquées, etc.). Son estimation reste délicate et repose essentiellement sur l'expérience et l'observation détaillée du lit.

3- La hauteur d'eau est elle-même généralement influencée par une série de phénomènes : faible submersion relative, fort transport solide, modifications géométriques du lit durant la crue, présence de bras multiples, turbulence des écoulements, obstacles éventuels, etc. Étant données les fortes rugosités de fond, la submersion relative est en général faible et l'équation de Manning-Strickler n'est plus valable (validité limitée à une submersion relative ($\text{hauteur d'eau}/D_{84}) > 7$ [6]).

Des observations et mesures poussent à considérer que les écoulements à forte pente sur lit mobile ont tendance à modifier la morphologie du lit en maintenant des écoulements proches du régime critique. Dans les lits contraints (protections adaptées ou roche mère), les écoulements peuvent par contre être supercritiques (Nb. de Froude > 1).

Les instabilités de la surface libre peuvent être fortes. L'analyse des conditions d'écoulement doit donc intégrer à la fois les hauteurs d'écoulement et de charge, en particulier à proximité d'obstacles dans le lit. Ainsi, la détermination des

hauteurs d'écoulement est plutôt appréciée en régime critique et par application d'équations adaptées, notamment celle de Ferguson (chapitre 3 du guide [6]). Évidemment, ces hypothèses simplifiées ne sont valables que pour des sections simples. Toute singularité pouvant créer un remous liquide devra faire l'objet d'analyses et de calculs spécifiques.

Cas des lits endigués étroits

Si les sections d'un lit endigué étroit sont relativement fixes latéralement, il est essentiel de prendre en compte les éventuelles évolutions du fond du lit durant la crue. La faible largeur du chenal endigué peut favoriser un dépavage et une incision marquée du fond du lit en crue à l'origine d'un effondrement de la structure et/ou un glissement du remblai de la digue coté torrent.

Lorsqu'une réduction de pente existe sur le profil en long, un dépôt de matériaux est probable et, selon son importance, peut être à l'origine d'une surverse. Les deux phénomènes peuvent d'ailleurs se succéder durant la même crue (incision du lit à la montée de crue, puis exhaussement à la décrue) ou lors de crues successives plus ou moins chargées en matériaux.

Un dépôt de matériaux est par ailleurs souvent observé à l'aval immédiat des endiguements étroits (zone où le lit s'élargit). Ce dépôt peut provoquer un engravement régressif dans le cours aval de l'endiguement qu'il faut prendre en compte. Un basculement de pente peut alors s'observer sur les chenaux ou tronçons endigués étroits avec un enfouissement du lit dans la partie amont et un dépôt dans la partie aval. Le basculement de pente est d'autant plus important que la surface du parement de digue est lisse (fixation de l'écoulement contre le parement). À l'aval, la probabilité de surverse est amplifiée ; en amont, l'enfoncement du lit peut menacer la stabilité de l'ouvrage.

Cas des lits endigués larges (lits divagants)

Dans le cas d'un système de protection laissant un réel espace de divagation, les écoulements ne s'étalent pas forcément sur toute la largeur du lit et vont se concentrer en un ou plusieurs bras, et en changer pendant la durée de la crue. La détermination précise d'une hauteur d'écoulement, basée sur des profils établis à un instant donné est donc inadaptée. Il convient plutôt de définir une enveloppe des niveaux atteints lors de la crue en considérant une section d'écoulement réduite qui peut se déplacer au gré des dépôts dans le système de protection et/ou entre les berges (figure 2).

Dans cette section, le rapport de la largeur de l'écoulement sur sa hauteur (L/h) est souvent compris entre 15 à 40. Des expérimentations et observations ont en effet montré que, si un écoulement peut divaguer, ce rapport est rarement inférieur à 15 dans un lit naturel, et exceptionnellement supérieur à 40 si seul le bras vif est considéré.

Par précaution, dans le cas de lits larges et divagants, un rapport L/h compris entre 15 et 20 est retenu pour estimer la

hauteur d'eau. Les niveaux ainsi obtenus peuvent correspondre à une section très importante, mais qui ne sera pas entièrement occupée par l'écoulement à un instant donné. En termes d'évolution du lit, une attention particulière doit par ailleurs être portée aux ouvrages de franchissement. Ils peuvent réduire fortement la largeur du lit et provoquer des surverses localisées et, en amont, un dépôt important.

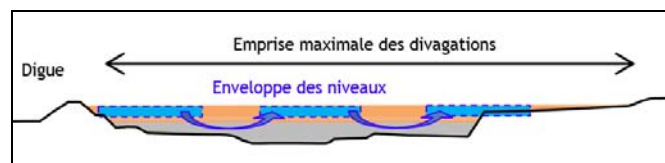


FIGURE 2 : ILLUSTRATION DE LA DÉTERMINATION DE L'ENVELOPPE DES NIVEAUX (CAS D'UN LIT DIVAGANT)

Modes de rupture prépondérants

Probabilité annuelle de destruction de digues torrentielles

Une analyse accidentologique [1] a été réalisée dans le cadre de l'étude de danger du torrent de La Salle [3]. À partir de la base de données des services de Restauration des Terrains en Montagne (ONF-RTM) établie sur 11 départements alpins et pyrénéens, cette étude recense 1481 événements ayant provoqué des désordres aux digues sur une période de 300 ans. Le nombre de surverses référencé reste faible (49) tout comme le nombre d'événements par affouillements de digues (70). Le nombre d'événements avec des digues partiellement (543) ou "totalement" détruites (819) est important.

L'exercice de l'estimation de la "probabilité de rupture" a été réalisé sur le seul département des Hautes-Alpes à partir du nombre total de tronçons de digues recensés dans la base de données "BarDignes" [4]. Il en ressort que la probabilité annuelle de "destruction" (rupture partielle, brèche, etc.) de digues torrentielles est de $1,6 \cdot 10^{-3}$ (sur 300 ans) et $1,8 \cdot 10^{-3}$ (au cours du 20^e siècle). Au vu des incertitudes sur les données d'entrée, on retient un ordre de grandeur qui serait de 10^{-3} .

Cette probabilité ne prend pas en compte l'état général de la digue avant rupture. Elle devrait être plus forte si la digue est en mauvais état, non protégée et exposée à de fortes contraintes, et plus faible si elle est robuste et bien entretenue.

Érosions externes (figure 3)

Les dégradations observées sur les digues torrentielles résultent majoritairement d'érosions du parement coté cours d'eau, pouvant s'étendre à l'ensemble du corps de digue.

Les érosions externes sont principalement dues à :

- des divagations, notamment dans les zones de dépôt ;
- la présence d'obstacle(s) dans le lit (arrêt intempestif de flottants, basculement d'arbres dans le lit, débris, etc.) ;
- la déviation des écoulements depuis la rive opposée où existe un "point dur" (versant, affleurement rocheux, végétation, etc.) ;

- un rétrécissement excessif du chenal endigué.

En divaguant, l'orientation des écoulements peut être modifiée et venir impacter perpendiculairement le parement de digue. Les contraintes sur la structure sont alors beaucoup plus fortes avec possibilité d'apparition d'un d'affouillement au droit et à l'aval immédiat du "point d'impact".

Les érosions sont paradoxalement moins marquées avec des laves torrentielles boueuses. Ce sont plutôt les écoulements plus liquides qui suivent les bouffées de laves et génèrent du charriage, qui sont généralement à l'origine des érosions.



FIGURE 3 : LARGE BRECHE DUE A UNE EROSION EXTERNE SANS DEBORDEMENT - VAR - GUILLAUMES (06) - 1994 (ONF)

Incision du lit – affouillement des ouvrages (figure 4)

L'affouillement des ouvrages est une des causes principales d'effondrement d'ouvrages rigides (bien plus que les chocs et impacts dynamiques) et de déstabilisation des carapaces de protection en enrochements. Il apparaît préférentiellement :

- à l'extrados des coudes ;
- à la chute d'un seuil transversal ("fosse" d'affouillement) ;
- suite à une incision généralisée du lit (érosion régressive) ;
- dans des zones de survitesses (rétrécissements marqués ou le long d'ouvrages au parement lisse).



FIGURE 4 : AFFOUILLEMENT DU PIED DE DIGUE - LA VALLOIRETTE - VALLOIRE (73) - MAI 2008 (ONF-RTM)

Comme indiqué précédemment, l'incision généralisée du lit peut être une conséquence morphologique d'un endiguement trop étroit.

Quelques cas de fontis sont apparus à l'arrière de perrés béton par propagation des fosses d'affouillement sous les fondations de l'ouvrage, notamment sur les endiguements à biefs affouillables. Ils ne doivent pas être confondus avec les fontis résultant d'une érosion interne, même si les

conséquences s'en rapprochent.

Surverse (figures 5 et 6)

Les débordements par surverse se produisent plutôt sur les zones propices au dépôt (cône, zone de confluence, etc.) suite à l'engravement partiel ou total du lit. La surverse ne provoque pas forcément l'ouverture d'une brèche en cas d'apport massif de matériaux (figure 5).

Dès qu'une fraction significative du débit liquide déborde en dehors du lit endigué, la capacité de transport solide est fortement réduite, ce qui amplifie le dépôt de matériaux et augmente d'autant le débit débordant. Le phénomène peut s'emballer rapidement conduisant à un engravement total du chenal et à un changement de lit. Tout le débit peut alors déborder en dehors du chenal endigué.



FIGURE 5 : SURVERSE SANS RUPTURE SUITE A L'ENGRAVEMENT DU LIT - CHAGNON - VARS (05) - 1957

Ce phénomène peut se produire également dans des parties chenalisées (sans digue) en amont ou en aval d'un système d'endiguement, avec pour conséquences, un contournement amont du système ou une aggravation du dépôt régressif.

Dans les zones favorables à l'engravement, les surverses se produisent plutôt (mais pas toujours) à la décrue, quand le chenal endigué est partiellement ou totalement engravé et que les hauteurs d'eau sont relativement modérées. La brèche ne s'ouvre alors, pas forcément jusqu'au fond du lit initial, d'autant plus qu'il n'est pas rare qu'un dépôt de matériaux se produise immédiatement à l'aval de la brèche limitant ainsi son ouverture. Ce dépôt peut être potentiellement dommageable pour les enjeux à proximité. Une partie des matériaux contenus à l'arrière de la brèche est remobilisée, mais le débit en baisse ne peut en général pas reprendre tous les matériaux préalablement déposés.

Les extrémités aval des digues, notamment en présence d'un élargissement brusque du lit à l'aval, sont également plus propices à la surverse puisque les phénomènes d'engravement y sont plus marqués par dépôt régressif.

Lors des crues des Pyrénées de 2013, deux secteurs équipés de digues de faible hauteur ont également été submergés : en bordure du Bastan à Luz-St-Sauveur (65) et en bordure rive gauche du Gave de Cauterets à Pierrefitte (65). Dans les deux cas, il s'agissait de la zone d'élargissement du lit à

l'extrémité aval d'une chenalisation ou d'un endiguement étroit.

Le débordement par surverse de la digue de Pierrefitte (65) est intéressant car elle souligne le caractère non univoque des crues. La crue d'octobre 2012 "plutôt liquide" a affouillé les fondations de la digue et l'eau a inondé la zone protégée en passant par dessous ce mur. Par la suite, en juin 2013, les apports solides ont été massifs. Ils se sont déposés dans cette zone où le lit s'élargit après un passage très contraint en amont, provoquant un engravement total du lit et une surverse par-dessus la digue (figure 6).

Les débordements limités de laves torrentielles par-dessus les digues sont en général peu pénalisants pour le remblai. Les écoulements plus liquides qui suivent les bouffées de laves, et qui peuvent divaguer suite à l'obstruction du chenal sont plus érosifs. Cependant, leur débit reste relativement faible.



FIGURE 6 : SURVERSE SUR LA DIGUE - GAVE DE CAUTERETS - PIERREFITTE (65) - JUIN 2013 (SOURCE SMDRA)

Actions ou impacts dynamiques

Les cas de destruction de digues suite à un impact dynamique restent marginaux, puisque ces ouvrages sont longitudinaux à la direction des écoulements. Une digue en remblai, protégée ou non par des enrochements, qui est le type d'ouvrage majoritaire en bordure de torrent à laves, résiste bien mieux à ces impacts dynamiques qu'un ouvrage rigide en béton.

Les impacts concernent surtout les ouvrages transversaux susceptibles de subir un choc frontal, à savoir les ouvrages associés au système d'endiguement (seuils de stabilisation du lit, radiers parafouille, épis transversaux, etc.) et les ouvrages de franchissement. Leur destruction est bien plus fréquente.

Rupture brutale (figure 7)

Elle concerne essentiellement les ouvrages rigides. Quelques cas de ruptures brutales de digues en maçonnerie, gabions, voire en béton, ont été recensés, résultant souvent de l'affouillement, voire du sous-cavage de leur fondation.

L'effondrement du mur-digue en béton en rive gauche du Gave de Cauterets (figure 7) est survenu hors crue, suite au fort sous-cavage de ses fondations lors de la crue de 2013.



FIGURE 7 - RUPTURE ET REPARATION D'URGENCE D'UNE DIGUE - GAVE DE CAUTERETS - PIERREFITTE (65) - 2013 (ONF-RTM)

Déstabilisation des talus

La déstabilisation d'un parement de digue par glissement, notamment du talus côté zone protégée en crue, voire du talus côté torrent à la décrue, résulte en général d'une érosion externe préalable ou d'un affouillement des fondations, susceptibles de générer des talus érodés subverticaux fortement instables.

La forte perméabilité des matériaux constitutifs des digues torrentielles limite le risque de glissement de talus.

Érosion interne

Aucune rupture de digues par érosion interne n'a été recensée en bordure de torrents. Cela peut s'expliquer par les durées de crues et de mise en charge des remblais qui sont relativement courtes et qui limitent le temps de saturation des sols. Sur des torrents à laves torrentielles, ce risque peut d'emblée être écarté étant donnée la brièveté des phénomènes.

Pour les digues en bordure de rivières torrentielles, il convient d'être plus prudent, notamment pour les digues dont le corps et/ou la fondation sont constitués de matériaux sablo-limoneux. On peut alors se rapprocher d'un contexte de digues fluviales tant du point de vue géotechnique qu'en termes de durée des crues.

Facteur aggravant : les flottants

Lors de fortes crues, il est fréquent que de grandes quantités de bois soient arrachées et transportées par flottaison. Au passage de sections étroites ou de ponts, ces flottants peuvent former des embâcles, provoquant ou aggravant parfois très fortement les débordements et les évolutions morphologiques du cours d'eau.

Les crues récentes des Pyrénées en juin 2013 ou celles des Alpes Maritimes en octobre 2015 ont, une nouvelle fois, mis en évidence l'impact important et néfaste de ces flottants.

L'arrêt de flottants s'accompagne en général d'un amoncellement de matériaux à l'arrière (ce qui peut augmenter notablement l'aggradation du lit) et/ou de survitesses amplifiant les phénomènes d'affouillement.

De plus, les arbres sur les digues peuvent être arrachés et créer des amorces de brèche, parfois de tailles importantes.

Le comportement des flottants est très aléatoire d'une crue à l'autre. Il est donc difficile à quantifier précisément et, de

surcroît, à modéliser. L'appréciation des probabilités de formation d'embâcles reste donc relativement subjective mais des outils commencent à être disponibles (modélisation 2D [8]). Même s'il est illusoire d'anticiper toute la complexité de la nature, certaines configurations défavorables doivent être repérées : ponts étroits, surbaissés ou avec piles, méandres brusques, seuils ou barrages, contractions brusques du lit, etc.

Synthèse sur les modes de rupture

En conclusion, les ruptures de digue torrentielle par érosion externe et par affouillement paraissent prépondérantes.

Des surverses peuvent également se produire, notamment sur les zones propices au dépôt après engrèvement partiel ou total du lit, mais la rupture de digue n'est pas systématique si les apports en matériaux sont massifs (tendance à l'engrèvement de toute la zone).

Spécificités des potentiels de danger des digues torrentielles par rapport aux digues fluviales

Du fait de la taille réduite des bassins, des fortes pentes, du transport solide induit, voire des facteurs aggravants, il existe des différences fondamentales, synthétisées dans le tableau 1, entre les potentiels de danger induits par la présence d'un endiguement implanté en bordure d'un torrent ou en contexte

fluvial.

À l'exception des zones proches des pieds de talus, les ruptures des digues le long des torrents créent généralement peu de « sur-aléa », c'est-à-dire qu'il y a peu d'augmentation des aléas par rapport à des débordements qui se produiraient en l'absence de digues, suite notamment à un changement naturel de lit.

L'objectif ici n'est pas de nier les risques induits par une telle rupture, car les vitesses des écoulements torrentiels restent toujours très élevées du fait des fortes pentes, même sans rupture de digue.

Lorsqu'elles se produisent, les brèches provoquent une arrivée brutale des écoulements sur la zone protégée (si du moins le niveau d'eau dépasse à cet instant le niveau du terrain naturel derrière la digue). Les délais de propagation sont de toute façon très brefs (au plus quelques minutes).

Si la présence de la digue réduit la probabilité de débordement, qui serait inéluctable en cas d'apport de matériaux sur le cône, elle n'augmente ainsi que de façon marginale les contraintes hydrauliques. Ceci se vérifie d'autant plus en présence d'un système d'endiguement peu contraignant (rapport L/H > 30-40 en crues rares) où les écoulements ne s'étalent pas forcément sur l'ensemble de cet espace de mobilité.

TABLEAU 1: COMPARAISON DES POTENTIELS DE DANGERS DES DIGUES FLUVIALES VERSUS DIGUES DE TORRENT

	Digue fluviale	Digue de torrent
dans le bief endigué	<ul style="list-style-type: none"> - transit d'un débit fort à très fort (grand bassin versant) - faibles vitesses d'écoulement du fait des faibles pentes du lit (<< 1 %) - hauteur d'eau résultante importante - hauteur de digue cotée zone protégée généralement importante - grand volume d'eau stocké derrière les digues - écoulement en régime fluvial 	<ul style="list-style-type: none"> - transit d'un débit faible à moyen (bassin versant plus réduit) - fortes vitesses d'écoulement du fait des fortes pentes du lit (> 6 %, voire sur le cône 2-3 %) - hauteur d'eau résultante réduite qui s'accompagne en général d'un engrèvement du fond du lit - hauteur de digue côté zone protégée généralement faible (≤ 2-3 m, sauf en cas de lit perché) - faible volume d'eau stocké derrière les digues - écoulement proche du régime critique
au droit de la brèche	<ul style="list-style-type: none"> - grande hauteur de brèche en général - apparition d'une fosse d'affouillement à l'aval - faible abaissement de la ligne d'eau à l'arrière, suite à l'ouverture de la brèche - augmentation importante des vitesses, beaucoup plus fortes au droit de la brèche avec passage d'un régime fluvial à un régime torrentiel 	<ul style="list-style-type: none"> - faible hauteur de brèche - dépôt de matériaux parfois à l'aval immédiat réduisant l'ouverture verticale de la brèche - comparativement peu d'augmentation de vitesses : maintien d'un régime d'écoulement proche du régime critique au droit de la brèche
côté zone protégée en cas de rupture	<ul style="list-style-type: none"> - très grand débit sortant - aux abords de la brèche et dans la zone proche : grandes vitesses et hauteurs d'écoulement - plus en retrait de la brèche : étalement de la lame d'eau et vitesses se réduisant rapidement - hauteurs d'eau potentiellement moyennes à fortes en cas d'existence de "casiers" ou de zones en dépression 	<ul style="list-style-type: none"> - débit sortant pouvant atteindre celui du torrent - faible diminution de vitesses, même loin de la brèche tant que les pentes restent fortes - écoulements proches du régime critique - pas d'étalement systématique sur tout l'espace disponible - creusement d'un ou plusieurs nouveaux chenaux - lissage de la pente par des matériaux
comparaison	- très forte réduction du lit majeur et de la zone	- réduction relative du lit avec souvent, une réduction

par rapport à une configuration sans digue	d'expansion de crue - augmentation très forte des contraintes hydrauliques au droit et proche de la brèche - probabilité forte de dégâts aux biens dans ce secteur proche - probabilité faible de victimes du fait du délai important d'anticipation	des zones de dépôt et de régulation du transport solide (absence en revanche de zones favorisant l'expansion de crues, qui sont sans effet à cause des fortes pentes) - pas ou peu d'augmentation des contraintes hydrauliques, qui restent très fortes - probabilité forte de dégâts aux biens sur tout le cheminement aléatoire des écoulements - délai d'anticipation réduit
--	---	--

Cas particuliers des lits fortement perchés sur leur cône

Les conclusions ci-dessus ne sont pas transposables dans le cas de lits fortement et "artificiellement" perchés ou en présence de digues de grande hauteur, où il peut s'avérer nécessaire de tenir compte d'un sur-aléa sur une bande plus large à proximité de l'ouvrage.



FIGURE 8 : MAISON ENGRAVÉE SUITE À UNE BRÈCHE DANS LA DIGUE - DOMENON - DOMÈNE (38) - 2005 (ONF-RTM)

Par exemple, lors de la crue du Doménon (38) en août 2005 (figure 8), la rupture de la digue en rive gauche a engendré un engrèvement de la zone située en contrebas de la brèche. En l'absence de digue, les débordements avec des intensités équivalentes se seraient sans doute produits plus en amont du cône. La création de l'endiguement a ainsi décalé le risque d'engrèvement vers l'aval.

Cas des digues de rivières torrentielles

De nombreux éléments présentés précédemment restent valables pour les digues de rivières torrentielles, notamment en cas de fortes divagations et de transport solide intense. En revanche, les débits, les durées, le volume de crue, mais aussi les hauteurs de digues, peuvent être bien plus élevés en bordure de rivières torrentielles que de torrents. Dans ces conditions, on ne peut exclure le fait qu'une rupture de digues engendre un sur-aléa qu'il convient d'apprécier avec grand soin selon le contexte et la configuration du site, à l'instar des endiguements fluviaux. Il faut donc conserver une bande de recul suffisante pour prendre en compte ce sur-aléa.

Analyse de risque

La démarche d'analyse de risque proposée par l'IRSTEA [7] peut s'appliquer aux digues torrentielles, même si beaucoup d'éléments d'appréciation reposent encore sur une évaluation

qualitative déterminée essentiellement à dire d'expert. Ne pouvant rentrer dans sa description complète, nous nous focalisons dans cette partie sur quelques spécificités torrentielles lors de certaines étapes clés de la démarche.

Étape 1 : Analyses préalables historiques et hydrogéomorphologiques

L'intérêt des approches historiques et géomorphologiques, menées à l'échelle globale du bassin versant, puis au niveau du système d'endiguement a été mis en avant précédemment pour analyser les aléas torrentiels (qualification et quantification) avec les étapes incontournables que sont l'analyse du profil en long et les reconnaissances de terrain. Les recherches historiques permettent de retrouver les caractéristiques des ouvrages (plans), les niveaux atteints et les défaillances éventuellement observées (REX sur les crues).

Les analyses morphologiques permettent de relever les traces des événements passés (et ce, même en l'absence de données historiques) et les situations propices à des débordements ou à des défaillances. Les relevés LIDAR apportent maintenant un gain indéniable dans ce domaine, en complétant efficacement les reconnaissances de terrain et les recherches historiques.

Étape 2 : Analyse des aléas torrentiels et des niveaux de contraintes associés

L'analyse des aléas torrentiels s'appuie sur la définition de plusieurs scénarios qui dépendent des types de phénomènes (charriage, lave), des paramètres hydrologiques (débit de pointe, durée de crue), des facteurs aggravants (flottants, etc.) et des points singuliers favorables aux débordements (ponts, etc.). Concernant les paramètres hydrologiques, la durée de la crue conditionne le volume de matériaux transportés. En cas de réduction de pente entre l'amont et l'aval du système d'endiguement, elle influe donc sur l'ampleur des évolutions altimétriques du profil en long durant la crue. Pourtant il n'existe aucun document pour guider au choix de ce paramètre. Il est alors recommandé de retenir plusieurs durées de crues, dans une gamme cohérente avec l'hydrologie régionale et locale, le(s) type(s) de temps auxquels le bassin est exposé et les durées observées lors des événements passés.

Pour chaque bief hydrauliquement homogène et chaque scénario retenu, les niveaux de contraintes sont ensuite évalués qualitativement selon une échelle à quatre voire cinq niveaux (négligeable, faible, moyen, fort, voire très fort) pour

chaque mécanisme de détérioration (érosion externe, incision, surverse, érosion interne, etc.). Parfois, certains mécanismes peuvent d'emblée être écartés du fait de leur très faible probabilité d'apparition (par exemple : l'érosion interne).

La localisation des points de débordement par surverse est basée sur l'évaluation des niveaux d'écoulement dans le chenal endigué, développée précédemment. Un même niveau atteint en crue peut alors correspondre à plusieurs scénarios, ce qui complexifie l'estimation de la probabilité de débordement. Par exemple, une crue avec un débit de pointe de fréquence centennale et une durée caractéristique de 5 h peut être équivalente, en termes de hauteur maximale atteinte, à une crue avec un débit de pointe de fréquence vicennale et une durée de 15 h.

Pour les autres mécanismes de rupture (érosion externe, incision, etc.), l'évaluation du potentiel associé repose essentiellement sur une approche experte qui s'appuie sur les analyses historiques et morphodynamiques, sur les reconnaissances de terrain et sur l'évaluation de quelques grandeurs caractéristiques (rapport L/H, contrainte tractrice, gradient hydraulique, etc.). Repérer tous les points singuliers du milieu extérieur qui peuvent avoir un impact sur les écoulements permet d'identifier les zones où l'ouverture d'une brèche par érosion externe est la plus probable.

Étape 3 : Évaluation des niveaux de résistance

L'évaluation, également qualitative, des niveaux de résistance (très fort, fort, moyen, faible, très faible), déterminée par tronçon de digue homogène, repose essentiellement sur le diagnostic approfondi de la digue (diagnostic visuel et géotechnique, enseignements historiques). Étant donné la prépondérance des défaillances par érosion ou affouillement, l'inspection visuelle de l'état de la protection du parement et du parafeuille revêt à ce niveau une très grande importance.

Difficultés et incertitudes géotechniques :

Les remblais des digues torrentielles sont constitués majoritairement de matériaux grossiers à très grossiers. La caractérisation de ces sols, délicate par des méthodes « classiques », amène souvent à sous-estimer leurs caractéristiques mécaniques, ce qui conduit dans de nombreux cas à remettre en cause leur stabilité. Des appareils spécifiques de grandes dimensions existent, mais sont encore peu utilisés. Ces essais sont coûteux et ne sont pas forcément "normés". Pourtant, ils paraissent les plus adaptés aux sols grossiers. Quelques retours d'expérience sur leurs mises en œuvre tendraient à mettre en évidence que les hypothèses géotechniques retenues sont parfois trop pessimistes.

Un maître d'ouvrage a tout intérêt à utiliser des méthodes de reconnaissances et d'investigations relativement simples (à compléter au besoin sur certains sites selon la complexité et l'hétérogénéité géotechnique), mais comparables pour pouvoir repérer parmi son parc d'ouvrages, ceux qui sont les plus instables et dont le renforcement est prioritaire.

Étape 4 : Évaluation de la probabilité de défaillance

Dans un contexte torrentiel où de très nombreux paramètres ne sont pas maîtrisés ou maîtrisables, il paraît très difficile, voire impossible, de donner des probabilités chiffrées de rupture de l'ouvrage, notamment par érosion. Il est donc proposé de retenir une approche d'évaluation qualitative de la probabilité de défaillance de la digue, basée sur le croisement des niveaux de contrainte et de résistance. Les "seuils" de probabilité résiduelle définis par l'arrêté du 7 avril 2017 (inférieur à 5 % pour le(s) scénario(s) 1 « niveau de protection » et supérieure à 50 % pour le(s) scénario(s) 3 « niveau de danger ») évolueraient donc vers une définition qualitative avec le premier correspondant à un scénario « très improbable » et le second à un scénario « probable ».

Les largeurs de brèche peuvent varier fortement selon leur mode d'ouverture (surverse ou érosion externe). Ces dernières peuvent être bien plus grandes selon l'ampleur des divagations. L'ouverture des brèches par attaques du cours d'eau n'engendre toutefois pas systématiquement de venues d'eau dans la zone protégée, si le niveau d'eau ne dépasse pas le niveau des terrains derrière la digue (figure 3).

Étape 5 : Évaluation des conséquences des débordements torrentiels sur la zone protégée

Dans le cas des inondations de plaine, l'intensité du phénomène est classiquement traduite par les caractéristiques physiques de l'écoulement (hauteur, vitesse, durée) liées à la submersion des terrains. Cette approche est peu pertinente dans le contexte torrentiel en raison de la multiplicité des processus d'endommagement (engravement, affouillement, impacts [5]). En outre, il persiste de grandes difficultés à caractériser la physique des écoulements, les directions prises lors des divagations, l'ajustement vertical de la topographie liée au lissage de la pente et les interactions avec les obstacles rencontrés (bâties, infrastructures, voitures, etc.).

Dans les zones à fortes pentes, les vitesses d'écoulement dépassent souvent des valeurs de quelques mètres par seconde. La spécificité torrentielle réside alors dans leur capacité à éroder, déposer et impacter leur environnement. Les critères de hauteur d'engravement ou de profondeur des érosions susceptibles de se produire localement ont été retenus pour qualifier l'aléa torrentiel pour les PPRN [2]. Dans ce contexte de fortes incertitudes, ils ne peuvent, pour l'heure, être estimés qu'à dire d'expert.

Étant donné le caractère chaotique des cheminements torrentiels, l'influence des flottants et du transport solide sur la répartition spatiale des dommages, il est illusoire de vouloir délimiter de façon précise l'emprise de la zone impactée suite à une défaillance du système de protection. Ainsi, nous proposons une approche très sécuritaire qui consiste à délimiter approximativement les « zones maximales d'extension des crues », i.e. l'enveloppe de crues « 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. » [3].

Quid de l'utilisation des outils de modélisation 2D

Les écoulements torrentiels en sortant de leur lit peuvent modifier fortement la topographie des terrains submergés. En déposant leur charge sédimentaire, les eaux redeviennent agressives et creusent de nouveaux lits. Dans ces conditions, l'utilisation d'outils de modélisation numériques 2D à géométrie fixe, conçus pour le fluvial, n'est pas adaptée pour les cônes de déjection ou le lit majeur de certaines rivières torrentielles. Ils pourraient conduire à modéliser un étalement à forte vitesse sur une faible hauteur et une grande surface, alors que les écoulements tendent plutôt à se concentrer en un ou plusieurs bras fortement mobiles ravinant les terrains alentours. Si de tels modèles sont utilisés, un premier contrôle de pertinence consiste à vérifier que la gamme de vitesses obtenue est compatible avec l'hypothèse de non-érosion des terrains sur lesquels ils s'écoulent. En première approximation, elles ne devraient pas dépasser 2 à 3 m/s (à adapter selon la nature du terrain), ce qui est rarement le cas avec de fortes pentes. Leur utilisation devrait donc être exclue sur les cônes de déjection et en bordure de rivières torrentielles dès lors que les pentes dépassent 1,5-2 %.

Certains modèles numériques 2D couplent la résolution des équations de Saint-Venant et celles d'Exner pour modifier la géométrie du terrain durant la crue en fonction du transport solide. Bien que prometteurs, nous manquons encore de validations probantes de ces outils dans des contextes de fortes pentes où le caractère chaotique et aléatoire des divagations s'oppose parfois aux évolutions systématiques simulées par les modèles bidimensionnels. Leur utilisation devrait pour l'heure être réservée à des cas à très forts enjeux justifiant une calibration sérieuse de ces outils et des études de sensibilités poussées.

En zone d'étalement de laves torrentielles, l'utilisation de modèle numérique 2D peut également aider à évaluer l'aléa.

Malgré toutes les incertitudes qui persistent, leur utilisation paraît moins problématique qu'en charriage, puisqu'en s'étalant les laves torrentielles sont peu érosives et ne modifient donc pas la topographie initiale des terrains.

Il existe plusieurs outils de modélisation qui n'utilisent pas les mêmes lois de comportement. Leur comparaison sur plusieurs cas réels bien documentés reste le seul moyen de connaître leur pertinence selon le type de laves torrentielles. Comme pour tout modèle, il est conseillé de recourir à une analyse de sensibilité sur les différents paramètres de calage (débit, volume, caractéristiques rhéologiques, etc.).

Conclusion

L'étude des écoulements torrentiels reste très complexe étant donné le caractère chaotique de certains phénomènes (respirations, divagations, érosions des terrains parcourus, effets des flottants, cheminement aléatoire, etc.).

Si l'estimation de certains paramètres peut être maintenant correctement approchée, notamment l'engravement systématique du lit à partir de formules de transport solide, la détermination d'autres paramètres reste bien plus incertaine et fait encore une large place à l'expertise. Dans ces conditions, il est souvent illusoire de déterminer les hauteurs d'écoulement avec une grande précision. Il n'est d'ailleurs pas souvent justifié de rechercher une telle précision. Les vitesses des écoulements torrentiels restent toujours très élevées du fait des fortes pentes, largement supérieures aux valeurs limites de déplacement des personnes.

Les approches historiques, hydrogéomorphologiques, l'analyse du profil en long, les reconnaissances de terrain et les retours d'expériences (observations d'écoulement en crue et des dégâts post-crues) restent la base de toute étude en contexte torrentiel. A temps d'étude "contraint", nous considérons donc plus pertinent de mettre en œuvre une approche experte poussée et de se limiter à une utilisation simple des modèles numériques que le contraire.

Tout ceci explique pourquoi il est parfois difficile de répondre, en toute honnêteté et dans l'état actuel des connaissances, à toutes les « exigences » réglementaires et pourquoi on doit parfois se contenter d'une évaluation plus qualitative que quantitative des probabilités d'occurrence associées à certains phénomènes.

Il paraît aussi opportun de conserver un certain pragmatisme et d'adapter le niveau et la teneur des études à la classe du système d'endiguement. Le contenu des études de dangers devrait ainsi être mieux adapté, voire simplifié selon le contexte (notamment en bordure de torrents) et selon l'importance de la digue (pour les classes C, majoritaires en zone de montagne). À défaut, on risque d'aboutir à l'effet inverse de celui recherché qui est d'avoir un gestionnaire, une surveillance et des ouvrages en bon état. Certains maîtres d'ouvrage préféreront ne pas s'occuper de certaines digues, puisque les études réglementaires pourraient coûter plus cher que les travaux de confortement des ouvrages.

Un bon diagnostic simplement basé sur un examen visuel détaillé, une analyse historique et géomorphologique, des investigations géotechniques simples et la modélisation des écoulements dans le lit mineur permet déjà de repérer tous les points critiques et de définir les mesures à prendre.

La plupart des digues de torrent n'engendrant pas de « sur-aléa » (comparaison entre une configuration avec et sans digue), nous proposons que l'analyse des conséquences des débordements sur la zone protégée se base sur la même démarche de qualification et quantification des aléas que celle développée dans le guide PPRN « cours d'eau torrentiels » [2]. À notre sens, la modélisation 2D devrait ainsi être réservée aux systèmes de protection à forts enjeux et, dans l'état actuel des connaissances, au contexte où elle est pertinente (c'est-à-dire aux pentes de lit majeur inférieures à environ 1,5-2 %).

Références

- [1] I. Boncompain et al. (2011) – Accidentologie des ouvrages hydrauliques RTM & Retours d'expériences – ONF-Direction technique RTM
- [2] Guide méthodologique PPRN “Cours d'eau torrentiels” – MTES (à paraître)
- [3] P. Mériaux, D. Richard, H. Félix, D. Laigle, M. Bon, G. Astier, I. Boncompain, Y. Quefféléan. (2013), 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. 2nd colloque national – Dignes2013, MEDDTL / CFBR / Irstea, Dignes Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions, Aix-en-Provence, 2013, 164-175
- [4] P. Mériaux, R. Tourment, M. Wolff – Le patrimoine de digues de protection contre les inondations en France d'après la base de données nationale des ouvrages – Ingénierie N° spécial 2005- p. 15 à 21
- [5] C. Peteuil, M. Givry (2011) – Guide “Construire en montagne - La prise en compte du risque torrentiel” - MEDDTL.
- [6] A. Recking, D. Richard, G. Degoutte (2013) Torrents et rivières de montagne – Dynamique et aménagement - Editions Quae nov. 2013, 334 p
- [7] R. Tourment, B. Beullac (coord.), Inondations : analyse de risque des systèmes de protection - Application aux études de dangers - 2018 – Edition Lavoisier (en cours de parution)
- [8] Ruiz-Villanueva, V., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A. et al. “Large wood transport as significant influence on flood risk in a mountain village.” Nat Hazards (2014) 74: 967. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1222-4>