## REPORT FINALE Azione 3.2 / RAPPORT FINAL Action3.2

Progetto transfrontaliero Italia-Francia ALCOTRA Projet transfrontalier Italie-France ALCOTRA







## RISBA RISCHIO DEGLI SBARRAMENTI ARTIFICIALI RISQUES DES BARRAGES



# Etude de l'onde de rupture d'un barrage incluant le transport solide et la potentialité de formation de laves torrentielles

Dominique Laigle, Simon Carladous Irstea, centre de Grenoble, 2 rue de la papeterie, F-38402 Saint-Martin-d'Hères, dominique.laigle@irstea.fr

## 1. Les phénomènes torrentiels

Les retenues d'altitude surplombent généralement des versants montagneux à forte pente. En cas de rupture de l'ouvrage, des volumes d'eau importants sont susceptibles d'être libérés rapidement, donnant naissance à des écoulements liquides très transitoires et présentant de fort débit de pointe. De tels écoulements, qu'ils se produisent sur un versant ou dans un chenal existant, sont susceptibles de se charger très fortement en matériau solide par érosion. Il en résulte des phénomènes de propagation aux propriétés spécifiques qui ne peuvent être assimilés à des écoulements purement liquides. Ces phénomènes, de nature torrentielle, sont de deux types : le charriage torrentiel et les laves torrentielles.

Le charriage torrentiel s'apparente, en termes de mécanismes physiques, au transport de sédiment en rivière mais avec des concentrations bien supérieures et des conséquences bien plus violentes en termes de changements morphologiques (engravements qui réduisent la section hydraulique disponible et aggravent le risque de débordement, incision du lit ou des berges qui peuvent déstabiliser les bâtiments et infrastructures situés à proximité du chenal) et de risques associés.

Dans certaines conditions de forte disponibilité en matériau érodable et de pente forte, la formation d'une lave torrentielle (écoulement extrêmement concentré d'un mélange d'eau et de matériau solide aussi appelé coulée de boue) reste un phénomène plausible qu'il convient de considérer car son pouvoir destructeur est extrêmement important. Un tel phénomène ne peut être abordé qu'à l'aide d'outils et de méthodes tout-à-fait spécifiques.

## 2. Étude de l'onde de rupture d'une retenue

## 2.1 Modèle de propagation de l'onde de rupture avec prise en compte du transport solide

Sur cette problématique de l'onde de rupture, un premier objectif de l'action 3.2 du projet RISBA était de développer un modèle permettant à la fois le calcul hydraulique de la propagation de l'onde et le calcul du transport solide associé en incluant les modifications morphologiques (engravement, incision) dues à ce dernier. Il s'agit d'un modèle monodimensionnel pour lequel le chenal est saisi géométriquement à l'instant initial sous forme de biefs dont on renseigne la longueur, la pente et les sections en travers amont et aval. Ce chenal constitué de plusieurs biefs est ensuite discrétisé en mailles de calcul sur lesquelles vont s'appuyer les schémas de résolution numérique de la propagation hydraulique d'une part et du transport solide d'autre part.

Pour traiter la propagation de l'onde de rupture, nous utilisons les équations de Saint-Venant, écrites sous forme conservative. L'avantage essentiel de cette forme est de vérifier la relation de Rankine-Hugoniot (relation de bilan entre l'amont et l'aval d'une discontinuité telle qu'un ressaut pour un écoulement à surface libre). Associée à un schéma numérique approprié, lui-même qualifié de conservatif, cette formulation permet de construire un modèle numérique capable de traiter une discontinuité, telle qu'un front, comme n'importe quel point courant d'écoulement et d'en déterminer la position à chaque instant. Une telle technique permet un traitement global de tout écoulement transitoire présentant un front de propagation avec un degré de complexité et des temps de calcul raisonnables. Comme toute formulation de type Saint-Venant, le système d'équations n'est complet qu'après adoption d'une équation de fermeture traduisant la contrainte de cisaillement au fond en fonction des variables principales, qui dans ce cas sont la section en travers et le débit d'écoulement Nous adoptons une formulation classique de type Manning-Strickler. Les équations de Saint-Venant à forte pente (Berger 1994) que nous utilisons s'expriment de la façon suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} S \\ Q \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} Q \\ \delta \frac{Q^2}{S} + P(S, x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ gS\sin(\theta) - \frac{\tau_p}{\rho} P_e \end{pmatrix}$$

où S est la section d'écoulement, Q le débit,  $\theta$  l'angle de la pente, g la gravité,  $\rho$  la masse volumique de l'eau,  $P_e$  le périmètre mouillé,  $\tau_p$  la contrainte de cisaillement au fond, *h* l'épaisseur d'écoulement et *L* sa largeur. La pression est définie par :

$$P(S,x) = \int_{0}^{h} g(h-y) \cos(\theta) L(y,x) dy$$

La résolution de ce système d'équations est effectuée en utilisant un schéma numérique aux volumes finis implicite de type Muscl-Hancock (Leveque, 2002). La loi de Manning-Strickler permettant le calcul de la contrainte au fond s'exprime de la façon suivante :

$$\tau_p = \frac{\rho g U^2}{K^2 R_H^{1/3}}$$

où *U* est la vitesse d'écoulement (U=Q/S),  $R_H$  est le rayon hydraulique et *K* est un coefficient de dissipation dépendant de la rugosité de surface.

Le coefficient de frottement *K* associé à cette loi fait partie des données d'entrée du modèle. Sa valeur est prise constante par bief. Un hydrogramme (débit liquide en fonction du temps) est imposé comme condition à la limite amont.

Pour le transport solide, deux équations sont résolues. La première est un bilan de masse. Il s'agit de l'équation d'Exner qui permet un calcul de l'évolution du niveau du fond en chaque point du chenal et cela en fonction du débit solide transitant depuis l'amont et du débit solide transitant vers l'aval. Cette équation fait l'hypothèse d'un ajustement instantané du niveau du fond (par érosion ou engravement) aux conditions du transport solide. L'équation d'Exner est donnée par :

$$(1-p)\frac{\partial z_s}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0$$

où  $z_s$  est l'altitude du fond, p est la porosité du matériau du fond et  $q_s$  est le débit solide par unité de largeur du lit.

La deuxième équation concerne le débit solide en un point donné. Il est calculé par l'intermédiaire de 4 formules au choix qui font intervenir le débit liquide, la pente et éventuellement la granulométrie. Ces 4 formules sont :

La formule de Rickenmann (1990)

Le débit solide par unité de largeur est donné par :

$$q_{s} = 12.6 \cdot \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0.2} \cdot \frac{I^{2}}{(s-1)^{1.6}} \cdot (q-q_{cr})$$

Le débit liquide (par unité de largeur) critique de début de transport est donné par :

$$q_{cr} = 0,065 \cdot \left(s - 1\right)^{1,67} \cdot \sqrt{g} \cdot d_{50}^{-1,5} \cdot I^{-1,12}$$

où s est le rapport de la masse volumique du sédiment à la masse volumique de l'eau, q est le débit liquide par unité de largeur, I est la pente (m/m) du chenal,  $d_{90}$ ,  $d_{50}$  et  $d_{30}$  sont des paramètres représentatifs de la granulométrie de surface du lit.

La formule de Meunier (1991) Le débit solide total  $Q_s$  est donné par :

$$\frac{Q_s}{Q} = 6.3 I^2$$

où Q est le débit liquide total et / la pente

La formule de Lefort (1991)

Le débit solide total  $Q_s$  (relié ici au volume apparent des dépôts et érosions générés) est donné par :

$$\frac{Q_s}{Q} = 4,45 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0,2} \frac{I^{1,5}}{s-1} \left(1 - \left(\frac{Q_0}{Q}\right)^{0,375}\right)$$

Le débit liquide critique de début de transport est donné par :

$$Q_0 = 0,0776 \cdot (s-1)^{\frac{8}{3}} \cdot \sqrt{g} \cdot d_m^{2,5} \cdot I^{-\frac{13}{6}} \cdot (1-1,2 \cdot I)^{\frac{8}{3}}$$

où s est le rapport de la masse volumique du sédiment à la masse volumique de l'eau, Q est le débit liquide, I est la pente (m/m) du chenal,  $d_{90}$ ,  $d_m$  et  $d_{30}$  sont des paramètres représentatifs de la granulométrie de surface du lit. Cette formule fait l'hypothèse d'une largeur de bande active (largeur affectée par le transport solide) dépendante des conditions hydrauliques. De plus, elle donne un calcul direct des volumes d'érosion et de dépôt en faisant l'hypothèse d'une valeur fixée de porosité intégrée à la formule (la porosité p dans l'équation d'Exner doit alors être prise égale à 0 lorsqu'on utilise cette formule)

La formule de Recking (2013)

Le débit solide par unité de largeur est donné par :

$$q_s = \sqrt{g(s-1)d_{84}^3} \Phi$$

avec

$$\Phi = \frac{14 \tau_{84}^{*2.5}}{\left[1 + \left(\tau_m^* / \tau_{84}^*\right)^4\right]} \qquad \tau_{84}^* = \frac{R_H I}{(s-1)d_{84}}$$

et

$$\tau_m^* = (5I + 0.06) \left(\frac{d_{84}}{d_{50}}\right)^{4.4\sqrt{I} - 1.5}$$

où s est le rapport de la masse volumique du sédiment à la masse volumique de l'eau,  $R_H$  est le rayon hydraulique, I est la pente (m/m) du chenal,  $d_{84}$  et  $d_{50}$  sont des paramètres représentatifs de la granulométrie de surface du lit.

Le système d'équations régissant le transport solide est résolu selon un schéma implicite aux différences finies s'appuyant sur le même maillage de calcul que la

résolution hydraulique. Les conditions aux limites utilisées sont d'une part un point fixe en altitude à l'aval du domaine de calcul et d'autre part un sédimentogramme (débit solide en fonction du temps) à l'amont du domaine. Ce dernier peut être fixé en conditions d'équilibre avec le débit liquide amont.

Les résultats de calcul sont stockés sous forme de fichiers permettant ultérieurement une visualisation des principales variables hydrauliques (vitesse, épaisseur d'écoulement) ou du transport solide (niveau du fond, débit solide, pente locale). Une visualisation aisée de ces résultats est possible grâce à l'interface dont dispose le code de calcul et qui permet également la saisie des données d'entrée du modèle (profils en long et en travers, granulométrie, débits d'entrée, etc...). Dans cette interface, les résultats peuvent être affichés soit sous forme de profils à un instant donné (Figure 1), soit sous forme d'évolution temporelle en un point donné du profil en long.



Figure 1 : écran d'affichage des résultats sous forme de profils dans l'interface du modèle

#### 2.2 Collaborations RISBA : étude de la retenue de la Coche

Après la phase de développement du modèle, l'outil rentre en phase de test afin de valider la pertinence de son utilisation au terrain. Il a ainsi, dans un premier temps, fait l'objet d'une application prospective sur la retenue de la Coche sur la commune de

Cesana Torinese (région Piémont) qui a par ailleurs été étudié par les équipes de la région Piémont avec l'appui du Politecnico de Turin et a également fait l'objet d'une simulation utilisant le logiciel Castor d'Irstea. Dans un deuxième temps, le modèle avec son interface va être transféré dans une logique « recherche », visant à tester ses capacités, au Politecnico de Turin. Une convention de transfert et de partenariat va être établie avec ce partenaire.

Nous présentons ci-après le détail de l'application du modèle de propagation d'onde de rupture avec prise en compte du transport solide au cas de la retenue de la Coche.

#### 2.2.1 Hypothèses adoptées

La présente étude reste prospective et ne peut être considérée comme parfaitement représentative des phénomènes de transport solide susceptibles de se produire en cas de rupture de la retenue considérée. Il y a à cela plusieurs raisons. Tout d'abord, le modèle est intrinsèquement fondé sur l'utilisation de formules qui ont leur domaine de validité. Or, aucune de ces formules n'a été établie en régime transitoire et pour des pentes aussi fortes que celles rencontrées en pratique dans le cas traité. Il ne s'agit pas à proprement parler d'une limite du modèle mais bien de la connaissance scientifique actuelle des phénomènes considérés. Par ailleurs, les données qui ont servi de base à la présente étude étaient partielles. Elles n'incluaient pas d'information sur la granulométrie du lit ou l'épaisseur des couches érodables. Afin de néanmoins pouvoir appliquer le modèle, nous avons fait l'hypothèse d'une couche érodable de grande épaisseur et avons adopté de façon experte des valeurs moyennes de paramètres de granulométrie très grossière ( $d_{90} = 0.5$  m,  $d_{50} = 0.3$  m,  $d_{30} = 0.2$  m) en considération des pentes fortes rencontrées sur le parcours potentiel de l'onde de crue. Ces deux hypothèses sont fortes et ne traduisent sans doute que très imparfaitement la réalité du terrain. Enfin, on gardera en mémoire que le modèle est monodimensionnel et qu'il ne prend en compte que des sections en travers simples. Nous avons ainsi considéré des sections en travers de forme rectangulaire, ce qui est très schématique de la réalité de terrain.

L'étude a porté sur la même zone que celle étudiée par la région Piémont et par Irstea à l'aide du logiciel Castor. Il s'agit d'un linéaire d'environ 1950 m situé à l'aval immédiat de la retenue. Le profil en long a été considéré de façon précise sur la base des données fournies. L'hydrogramme de crue au droit de l'ouvrage n'était pas non plus connu de façon précise. En revanche, les études antérieures ont établi que le débit de pointe s'établissait à 165 m<sup>3</sup>/s. Nous avons donc considéré un hydrogramme simplifié, de forme triangulaire, avec un débit nul à l'instant initial, un débit égal à 165 m<sup>3</sup>/s à

8

l'instant t = 36 s et un débit nul à l'instant t = 410 s. Cet hydrogramme représente un volume d'eau libéré de 33 800 m<sup>3</sup>, ce qui correspond au volume de la retenue lorsqu'est atteinte sa cote de danger. Il s'agit ici d'une hypothèse de rupture très rapide assez proche de celle adoptée pour les simulations avec le logiciel CASTOR. Un débit solide nul est considéré comme condition à la limite amont du domaine considéré. Par ailleurs, nous avons de façon experte choisi une valeur du coefficient de Strickler K = 12. Cette valeur est plus faible que celle retenue dans le cadre des études antérieures. Nous justifions ce choix par les très fortes vitesses simulées dans le cadre de ces études antérieures et qui nous ont paru peu vraisemblables avec un écoulement chargé en matériau solide. Les valeurs du coefficient de Strickler et des paramètres de la granulométrie ont été considérées constantes sur le profil en long, ce qui est sans doute une simplification forte de la réalité du terrain. Les simulations ont été réalisées en utilisant la formule de Rickenmann (1990) pour le calcul du seuil de début de transport et du débit solide.

#### 2.2.2 Résultats de simulation

Les figures 2 à 10 ci-après présentent des instantanés des principales variables d'intérêt le long du profil en long et pour différents instants. Sont présentés : le profil en long du lit (initial et sa position à chaque instant), la hauteur et la vitesse d'écoulement, le débit solide, la pente locale et la variation du niveau du lit par rapport à son état initial. On notera que le point d'abscisse x = 0 correspond à l'extrémité aval du tronçon simulé tandis que l'abscisse x = 1950 m correspond à la position du barrage.



Figure 2 : état initial (t = 0 s) de la simulation avant rupture du barrage



Figure 3 : résultats de simulation à t = 54 s



Figure 4 : résultats de simulation à t = 108 s



Figure 5 : résultats de simulation à t = 180 s



Figure 6 : résultats de simulation à t = 252 s



Figure 7 : résultats de simulation à t = 324 s



Figure 8 : résultats de simulation à t = 360 s



Figure 9 : résultats de simulation à t = 540 s



Figure 10 : résultats de simulation à t = 720 s

La figure 11 présente l'évolution au cours du temps des principales variables d'intérêt au point aval du domaine considéré, soit environ 1950 m en aval du barrage.



Figure 11 : hydrogramme au point de sortie du domaine d'étude (environ 1950 m à l'aval de la retenue)

Ces différents résultats de simulation font apparaître un débit liquide de pointe de 124 m<sup>3</sup>/s à l'extrémité aval du domaine considéré et un temps de propagation de l'onde crue un peu inférieur à 6 minutes. Ils sont influencés par la valeur du coefficient de Strickler et doivent être considérés comme des ordres de grandeur. Ceci explique certaines différences par rapport aux études antérieures. L'originalité des résultats présentés est la simulation du transport solide et des évolutions associées du niveau du terrain dans la zone d'écoulement. Sur les figures 2 à 10, on observe une évolution logique du profil en long avec une tendance à l'érosion aux points où la pente se raidit et une tendance au dépôt de matériau aux points où la pente s'adoucit. On notera que les débits solides simulés peuvent être très importants dans les zones à forte pente et atteindre le même ordre de grandeur que les débits liquides (Fig. 6). Un tel débit solide paraît surestimé et sans doute peu valide sur le plan physique. Il résulte néanmoins de la stricte application de la formule de transport adoptée (Rickenmann, 1990). Cette très forte valeur de débit solide peut s'expliquer d'une part par le fait que la pente locale (abscisse environ 600 m sur la figure 6) est très forte, environ 40%, ce qui se est très supérieur à la gamme de pente sur laquelle la formule a été établie. Cette très forte

valeur peut d'autre part s'expliquer par le fait que nous avons fait l'hypothèse d'une érodabilité non limitée du profil en long. Or, cette zone à forte pente ne peut sans doute s'expliquer, d'un point de vue morphologique, que par un ensemble de limitations aux phénomènes érosifs dans cette zone, telles que par exemple la présence d'un lit rocheux. Ce point mériterait d'être précisé et éventuellement pris en compte lors de la réalisation de simulations ultérieures. La conséquence directe du très fort débit solide simulé dans cette zone est un fort dépôt de matériau à la rupture de pente qui lui fait suite à l'abscisse 550 m (Figures 7 à 10). La forte épaisseur de dépôt simulée en ce point résulte aussi d'une largeur de chenal plus faible qui accentue les variations d'altitude du lit du cours d'eau. On notera enfin que les évolutions du niveau du lit (érosions ou dépôts) sont encore très importantes après le passage du pic de crue liquide. Ceci traduit le fait que l'écoulement garde un fort pouvoir de transport et que des évolutions du niveau du lit sont à attendre tant que le débit liquide n'a pas de nouveau diminué substantiellement pour atteindre des valeurs faibles. Le niveau du lit est ainsi stabilisé après 600 à 700 s (Figures 9 et 10).

Ces différents résultats sont le fruit d'une analyse prospective. Il serait prématuré d'en tirer des conséquences opérationnelles. Toutefois, ces simulations donnent une idée assez précise des évolutions morphologiques à attendre et permettent de mieux appréhender les conséquences potentielles du transport solide en cas de rupture de l'ouvrage.

#### 2.3 Perspectives

Le projet RISBA a permis de construire une première version du modèle de calcul de l'onde de rupture avec prise en compte du transport solide. Toutefois, cette première version devra faire l'objet d'un travail de validation avant qu'il puisse être considéré comme un outil opérationnel utilisable par les praticiens de terrain. Les collaborations au sein du projet RISBA répondent pour partie à cette nécessité mais un effort supplémentaire devra porter sur ce point. On notera également que les lois de transport solide implémentées dans le modèle ont toutes été établies en régime permanent et pour des pentes ne dépassant généralement pas 10 à 15 %. Par ailleurs, la bibliographie scientifique sur le transport solide à très forte pente ou résultant d'un écoulement transitoire demeure à ce jour très pauvre. Deux axes se dégagent donc en termes de pistes futures d'investigation. Une première voie consistera à étudier tout particulièrement le transport solide au niveau d'un front d'écoulement transitoire. Une approche de laboratoire est privilégiée pour aborder ce problème. La deuxième voie concerne la validation du modèle de façon générale. Sur ce point, nous envisageons une première approche par confrontation à des expériences de laboratoire, puis une confrontation au terrain sur des sites suffisamment instrumentés.

### 3. susceptibilité à la formation de laves torrentielles

#### 3.1 Méthodologie

Un second objectif du projet RISBA en relation avec l'onde de rupture était l'évaluation de la susceptibilité à la formation de laves torrentielles. On notera d'une part que le débit de pointe d'une rupture de barrage peut être très supérieur au débit hydrologique du bassin versant dans lequel est implanté ce dernier. L'intensité des phénomènes érosifs peut donc être bien supérieure à celle généralement observée et peut potentiellement mener à la formation de laves torrentielles y compris dans des bassins versants où ce phénomène n'a pas été observé historiquement. D'autre part, la formation d'une lave torrentielle à partir d'un volume d'eau donné modifie radicalement la nature de l'écoulement. Ce dernier peut avoir un volume bien supérieur au volume d'eau qui l'a généré (Schuster, 2000). Ses propriétés mécaniques sont celles d'un mélange boueux très concentré de granulométrie étendue pouvant inclure des blocs de taille métrique ce qui lui confère une très grande capacité destructrice. En revanche, l'emprise spatiale d'une lave torrentielle reste plus limitée que celle d'un écoulement liquide. Enfin, dernier point, l'évaluation des risques inhérents à une lave torrentielle nécessite des outils et méthodes spécifiques à ce phénomène. Il s'agit donc de déterminer dans quels cas on doit y faire appel.

Chaque site présente des particularités et la méthodologie proposée reste prospective. Les outils présentés ne peuvent être considérés en l'état que comme une aide à la formalisation du raisonnement de l'expert qui sera amené à évaluer la susceptibilité à la formation de laves torrentielle en aval d'une retenue dans l'hypothèse d'une rupture. Nous présentons donc ci-après une série de critères qui, en l'état actuel des connaissances, apparaissent comme les plus pertinents. Ces critères ont été établis en capitalisant sur notre expertise du phénomène, sur la bibliographie existante et notamment sur des travaux récents concernant la susceptibilité à la formation de laves torrentielles d'origine hydrologique. Le principal apport de l'action 3.2 du projet RISBA a été d'identifier de façon experte les principaux facteurs de risque de déclenchement et de propagation de laves torrentielles associés à la rupture de barrages d'altitude et de proposer un cadre d'analyse permettant une synthèse des différents indices de susceptibilité.

#### 3.1.1 Critères à prendre en compte

Les critères de susceptibilité d'un bassin versant donné à produire des laves torrentielles hydrologiques sont maintenant assez bien identifiés mais ils ne sont pas tous transposables à la problématique de la formation en cas de libération brutale d'eau par une rupture de barrage. Certains de ces critères, tels que mis en évidence par Bertrand (2014), reposent sur la morphologie du bassin versant et résultent donc de l'histoire passée de celui-ci qui a été façonné par les laves torrentielles. On peut par contre admettre qu'un bassin versant qui produit des laves torrentielles hydrologiques présente également une susceptibilité à produire de tels phénomènes en cas de libération brutale d'eau par rupture de barrage. Il est toutefois nécessaire d'identifier les zones de formation des phénomènes d'origine hydrologique et de comparer leur position avec le point d'implantation de la retenue. En cas de rupture d'une retenue, la formation de laves torrentielles doit être envisagée y compris dans des bassins versants où la formation de laves torrentielles d'origine hydrologique n'a jamais été observée ou même suspectée. Le mode de formation des laves torrentielles que l'on peut envisager en cas de rupture d'une retenue est essentiellement une érosion intense d'un chenal préexistant ou d'un versant situé en aval de la retenue. Une analyse détaillée des mécanismes à l'œuvre lors d'une formation de lave torrentielle par ce mécanisme est notamment proposée par Takahashi (2007). Le cas d'un écoulement qui ne rejoindrait pas un chenal peut être considéré comme moins propice à une propagation sur une longue distance de la lave torrentielle. La présence d'un chenal, en concentrant les écoulements et en réduisant leur dissipation par étalement latéral peut, en revanche, être considéré comme défavorable vis-à-vis du risque généré à l'aval. Dans ce cas de figure d'un déclenchement par érosion, trois facteurs apparaissent comme déterminants et constituent les critères principaux d'une évaluation de la susceptibilité. Il s'agit de la pente, de la disponibilité en matériau érodable et de la nature de ce matériau.

Le déclenchement des laves torrentielles d'origine hydrologique requiert une pente supérieure à environ 16 – 17 % (0,16 – 0,17 m/m). Compte tenu du très fort débit liquide de pointe que peut générer une rupture de retenue, ce chiffre ne peut, en l'état actuel des connaissances, être retenu sans précaution supplémentaire. Toutefois, si une pente de cet ordre de grandeur ou supérieure est présente en aval de la retenue, celle-ci ne

22

pourra pas être considérée comme un facteur limitant et l'analyse des facteurs de prédisposition devrait être poussée plus avant.

Un autre facteur faisant intervenir la pente concerne la capacité de la lave torrentielle à se propager. Il est généralement admis pour les laves torrentielles d'origine hydrologique qu'elles commencent à se déposer lorsqu'elles rencontrent une zone de pente comprise entre 10% (0,1 m/m) et 13% (0,13 m/m) selon la nature du matériau. Il s'agit là de pentes de début de dépôt, pas d'un arrêt stricto sensu. En pratique, lorsqu'une pente inférieure à 8 - 10% est rencontrée sur la zone de parcours potentiel de la lave torrentielle, on peut considérer que la distance résiduelle qu'elle parcourra est limitée (de l'ordre de quelques centaines de mètres). L'analyse que nous avons menée n'a pas porté uniquement sur la susceptibilité à la formation de laves torrentielles mais sur leur capacité à atteindre des zones où des enjeux humains sont présents. Cette première approche est déterminante pour évaluer si une étude plus approfondie de la formation des phénomènes est utile à l'analyse de risque qui constitue l'objectif final du praticien. On gardera toutefois en mémoire que le dépôt, et donc l'arrêt des laves torrentielles, ne signifie pas forcément arrêt de tout écoulement. Celui-ci peut se poursuivre vers l'aval sous une forme plus liquide incluant probablement du transport solide par charriage.

La quantité de matériau mobilisable par érosion est un facteur important de la susceptibilité à la formation de laves torrentielles. Dans les laves torrentielles d'origine hydrologique, le rapport entre volume de matériau solide et volume d'eau varie de dans une gamme allant de 2 à 5 avec une valeur le plus souvent aux alentours de 4. Si le volume de matériau solide érodable est très important, l'hypothèse que la totalité du volume d'eau de la retenue participe à la formation d'une lave torrentielle ne peut être écartée. Le volume de lave généré peut alors atteindre 4 à 5 fois le volume d'eau. Ces chiffres sont apparemment confirmés par des expériences et observations synthétisées par Rickenamenn et al. (2003) et Meunier (1991) ou par un certain nombre d'exemples cités par Schuster (2000). En revanche, si le volume érodable ne permet pas un chargement en lave torrentielle de la totalité du volume stocké dans la retenue, on peut penser qu'un certain volume de lave torrentielle est déclenché et commence à s'écouler. L'effet de l'eau résiduelle de la retenue, donc le volume qui ne peut se charger en lave torrentielle par faute de matériau solide disponible, est difficile à appréhender. Son potentiel effet de dilution est difficile à évaluer quantitativement et à localiser spatialement dans la zone de parcours de l'écoulement. La prudence requiert

23

donc de le négliger dans un premier temps faute de connaissance scientifique actuelle suffisante. L'évaluation du volume de matériau solide érodable est donc un facteur très important de l'intensité des laves torrentielles pouvant résulter de la rupture d'une retenue. A ce jour, il n'existe que peu d'outils permettant d'évaluer un tel volume. Le meilleur outil à la disposition du praticien, même s'il reste assez imprécis et dépendant de l'interprétation de l'expert qui l'utilise, est sans doute la méthode proposée par Hungr et al. (1984). On pourra en outre se référer à Rickenmann et al. (2003). Les éléments clés de cette méthode sont synthétisés dans le tableau 1. En fonction des terrains potentiellement traversés par l'écoulement, cette méthode apporte un appui à l'expert dans l'évaluation des volumes mobilisables qui devront être effectués par tronçons suffisamment homogènes. On gardera toutefois en mémoire que cette méthode a été mise au point pour des laves torrentielles d'origine hydrologique et que le très fort débit liquide résultant de la rupture d'une retenue peut engendrer des débits liquides bien supérieurs aux débits hydrologiques du même site et donc une érosion elle-aussi plus importante.

Enfin, comme on peut le remarquer dans le tableau 1, la nature des terrains traversés n'est pas neutre. Les laves torrentielles sont constituées généralement d'un mélange d'eau et de matériau solide présentant une large étendue granulométrique. Ainsi, l'absence d'éléments fins dans le matériau solide érodable semble être un facteur limitant la probabilité de déclenchement. A contrario, certains types de terrains, tels que les dépôts morainiques par exemple, sont particulièrement propices au déclenchement de laves torrentielles car ils sont généralement épais, peu cohésifs et leur large étendue granulométrique est favorable au piégeage de l'eau à l'intérieur de la masse solide.

Pente (degrés)	Matériau du lit	Berges	Conditions de stabilité (avant évènement)	Taux d'érodabilité (m³/m)
20 – 35	Roche-mère	Non-érodable	Stable (quasi- absence de matériaux mobilisables)	0 – 5
10 – 20	Fine couche de sédiments ou de sol meuble sur la roche-mère	Non-érodable (roche-mère)	Stable	5 – 10
10 – 20	Couche meuble épaisse ou moraine	Plus de 5m de haut	Stable	10 – 15

Tableau 1 : Méthode empirique pour l'estimation du volume de matériau fourni par le chenal lors de l'écoulement d'une lave torrentielle, d'après Hungr et al., (1984)

10 – 20	Couche meuble épaisse ou moraine	Plus de 5m de haut	Pentes latérales stables	15 – 30
10 – 20	Couche meuble épaisse ou moraine	Plus de 20m de haut	Pentes latérales potentiellement instables (glissements de berge)	Jusqu'à 200 (à considérer comme une source ponctuelle)

3.1.2 Cadre de raisonnement proposé pour l'analyse du déclenchement et de la propagation de laves torrentielles

Notre objectif est ici de proposer un cadre de raisonnement permettant d'appréhender le double problème du déclenchement des laves torrentielles et de leur propagation jusqu'aux enjeux. Ce cadre est schématisé par la Figure 12.



Figure 12 : cadre général de raisonnement proposé pour l'analyse de la susceptibilité à la propagation de laves torrentielles jusqu'aux zones à enjeux

Nous proposons ici un raisonnement fondé sur l'analyse de proche en proche, de l'amont vers l'aval, de la zone d'écoulement de l'eau libérée par la rupture de barrage. En chaque point, il conviendra d'analyser la sensibilité au déclenchement selon le schéma proposé en figure 13. Si un risque de déclenchement est identifié, il conviendra alors d'analyser la propagation et l'éventuel chargement en matériau solide de la lave

torrentielle, là aussi par un raisonnement de proche en proche allant jusqu'aux zones où sont localisées les enjeux et en utilisant le schéma proposé en figure 14.

Pour l'analyse de déclenchement (figure 13) et dans le cadre d'un raisonnement de proche en proche, on s'intéresse en premier lieu à la pente. Si celle-ci est inférieure à la pente critique de déclenchement (que l'on peut situer au-delà de 16 - 17 %), le risque de formation d'une lave torrentielle reste faible. Si en revanche cette pente est localement dépassée, il convient d'analyser la disponibilité en matériau érodable et les contraintes hydrauliques s'exerçant sur ce matériau. On en déduit un volume potentiellement érodé localement et pouvant contribuer à la formation d'une lave torrentielle. Le raisonnement est alors poursuivi vers l'aval en intégrant de proche en proche le volume érodé localement et le volume mobilisé plus en amont. On compare à chaque étape le volume mobilisé à un volume critique que l'on peut considérer comme celui d'une lave torrentielle ayant acquis une certaine masse critique et donc une certaine autonomie d'écoulement. Il est bien difficile de définir une valeur précise pour ce volume critique. Toutefois, de façon experte on peut le situer aux alentours de quelques centaines à quelques milliers de m<sup>3</sup>. Si les deux critères de pente critique et de volume critique sont réunis, on pourra conclure que la zone considérée présente une sensibilité au déclenchement de laves torrentielles. Si l'un ou l'autre des deux critères n'est pas présent, on pourra conclure à une sensibilité faible au déclenchement.

Si une zone présentant une sensibilité au déclenchement est identifiée, il convient d'analyser la sensibilité à la propagation de la zone de déclenchement jusqu'à la zone à enjeux. Le cadre de raisonnement proposé est alors celui schématisé en figure 14. Le raisonnement commence là aussi par la pente. Si celle-ci est systématiquement supérieure à la pente crique de propagation (8 - 10 %), on pourra conclure que site est sensibles à la propagation de laves torrentielles jusqu'aux enjeux. Si, en revanche, la pente est localement inférieure à la pente critique entre la zone de déclenchement et la zone à enjeux, il convient d'analyser la capacité de cette zone à pente plus faible à arrêter les laves torrentielles. Pour cela, il faut s'intéresser au volume de lave torrentielle pouvant atteindre cette zone en sommant

27



Figure 13 : cadre proposé d'analyse de la susceptibilité au déclenchement de lave torrentielle en un point de la zone de propagation de l'onde de crue due à la rupture de barrage



Figure 14 : cadre proposé d'analyse de la susceptibilité à la propagation d'une lave torrentielle dès lors qu'elle s'est déclenchée

le volume déclenché et le volume érodé par la lave sur son parcours (on peut ici s'appuyer sur le tableau 1). En considérant la topographie de la zone de dépôt potentiel, on peut évaluer sa capacité à stocker ou non le volume de lave torrentiel qui l'atteint. Si cette capacité de stockage est insuffisante, on reprend le raisonnement de proche en proche sur la propagation du volume de lave torrentielle qui n'a pu être retenu par la zone de dépôt. Si la capacité de stockage est suffisante, il convient de s'assurer qu'aucune zone de déclenchement n'est présente plus en aval. Pour cela, on reprend le raisonnement de proche en proche sur la propagation schématisé en figure 13 et si nécessaire, le raisonnement sur la propagation schématisé en figure 14 autant de fois que de besoin jusqu'à atteindre la zone à enjeux.

On notera que le raisonnement sur la propagation est une première approche simple permettant une évaluation rapide du niveau de risque pour les enjeux mais qu'il est tout à fait possible de faire appel à des études et outils plus sophistiqués mais aussi plus coûteux en temps.

#### 3.1.3 Agrégation de critères permettant une évaluation synthétique

Au-delà des cadres de raisonnement présentés ci-dessus, il est possible de pousser plus avant l'emploi de méthodes d'aide à la décision pour l'analyse de notre problème. Nous avons jusqu'à maintenant présenté des critères synthétiques sans chercher à remonter à des critères plus élémentaires de raisonnement. Par exemple, l'érodabilité du matériau rencontré localement n'a pas été évaluée en faisant appel à des critères plus fins tels que la granulométrie, la cohésion ou la morphologie des dépôts locaux. Une telle analyse de critères élémentaires synthétisée ensuite en un critère unique par agrégation des critères élémentaires est possible. Différentes méthodes d'agrégation existent. Nous en donnerons ici seulement un exemple. Celui de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process). Il s'agit d'une technique structurée pour organiser et analyser une décision complexe. Elle permet d'agréger des critères élémentaires pour fournir un critère global permettant la prise de décision. Une phase d'analyse du problème à traiter amène à établir une liste de critères élémentaires et leurs interconnexions (figure 15). Les critères élémentaires sont alors comparés deux à deux (figure 16) de façon experte et leur importance relative est explicitée sous forme d'une matrice de préférences (figure 17). Sur la base de cette matrice, une étape de normalisation permet de déduire le poids affecté à chaque critère lors de l'étape d'agrégation qui permet le calcul de l'indicateur synthétique par sommation des critères pondérés (figure 15).



Figure 15 : schéma de principe de la mise en œuvre de la méthode AHP (d'après Tacnet et al. 2010)



Figure 16 : échelle qualitative de comparaison des préférences par paires de critères



Figure 17 : matrice des préférences

#### 3.2 Collaborations RISBA

Cette première version de document de synthèse sur les critères de susceptibilité et sur le système d'aide à la décision a été discutée au sein d'Irstea. Elle sera ensuite communiquée aux collègues italiens pour discussion, commentaires et amendements afin d'intégrer pleinement leur connaissance experte en la matière. L'objectif est d'aboutir à un document stabilisé pouvant être considéré comme l'état de l'art sur ce sujet. Compte tenu du peu de connaissance scientifique disponible sur le sujet, ce document aura essentiellement une visée prospective mais devrait néanmoins fournir un cadre de réflexion accessible aux praticiens de terrain confrontés à cette problématique.

#### **3.3 Perspectives**

Au-delà du travail prospectif développé dans le cadre du projet RISBA, des avancées scientifiques significatives sur le déclenchement des laves torrentielles par un écoulement liquide brutal, susceptibles de produire des retombées opérationnelles directes, ne verront probablement pas le jour avant quelques années. En conséquence, du point de vue des applications au terrain, la stratégie qui semble la plus abordable actuellement consiste à entreprendre une confrontation de la méthode proposée ici à un nombre le plus large possible de cas de terrain répertoriés. Une telle étude pourra être menée à bien si l'on inclut tous les types de phénomènes de débâcles rapides en zone de montagne tels que les ruptures de barrages naturels (résultant de glissements de terrain ou d'éboulements) ou de lacs glaciaires, par exemple, qui constituent également une problématique importante au niveau de tout l'arc alpin.

### Références

BERGER R. C. (1994). Strengths and Weaknesses of Shallow Water Equations in SteepOpen Channel Flow . Proceedings of the 1994 Conference on Hydraulic Engineering, G.V. Cotroneo & R. R. Rumer (Eds.): 1257-1261.

BERTRAND M. (2014). Approches régionales de la susceptibilité torrentielle dans les Alpes du Sud. Thèse de l'Ecole Normale Supérieure de Lyon.

HUNGR O., MORGAN G. & KELLERHALS R. (1984). Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. Canadian Geotechnical Journal 21: 663-677.

LEFORT P. (1991). Transport solide dans le lit des cours d'eau. Dynamique fluviale. SOGREAH – ENSHMG – INPG.

LEVEQUE R. J. (2002). Finite volume methods for hyperbolic problems. Cambridge University Press.

MEUNIER M. (1991). Eléments d'hydraulique torrentielle. Série Etudes du Cemagref, N°1 Montagne.

RECKING A. (2013). Simple method for calculating reach-averaged bed-load transport. Journal of hydraulic engineering, 139(1), 70-75.

Rickenmann D. (1990). Bed load transport capacity of slurry flows at steep slopes. Versuchanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH, Zurich. 249 p.

Rickenmann D., Weber D. and Stepanov B. (2003). Erosion by debris flows in field and laboratory experiments. Proceedings of the third international conference on debris-flow hazards mitigation: Mechanics, prediction and assessment. Davos, Switzerland, September 10-12, 2003. Dieter Rickenmann and Cheng-lung Chend Eds. Millpress 2003. 883-894.

SCHUSTER R. L. (2000). Outburst debris-flows from failure of natural dams. In: G. F. Wieczorek & N. D. Naeser (eds.) Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings of the 2nd International DFHM Conference, Taipei, Taiwan. BALKEMA: 29-42.

TACNET J.-M., NOVEMBER V., RICHARD D. et BATTON-HUBERT M. (2010). Jusqu'où une approche interdisciplinaire est-elle possible dans le cadre de la gestion intégrée des risques naturels en montagne? Colloque OPDE 2010, 25-26 octobre 2010, Montpellier, France, « Aide à la décision et gouvernance ». TAKAHASHI T. (2007). Debris flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures. CRC press. 448 p.