

Analyse de l'aléa « lave torrentielle » sur le cône de déjection du torrent du Rioulong (Hautes-Pyrénées) : une approche par scénarios

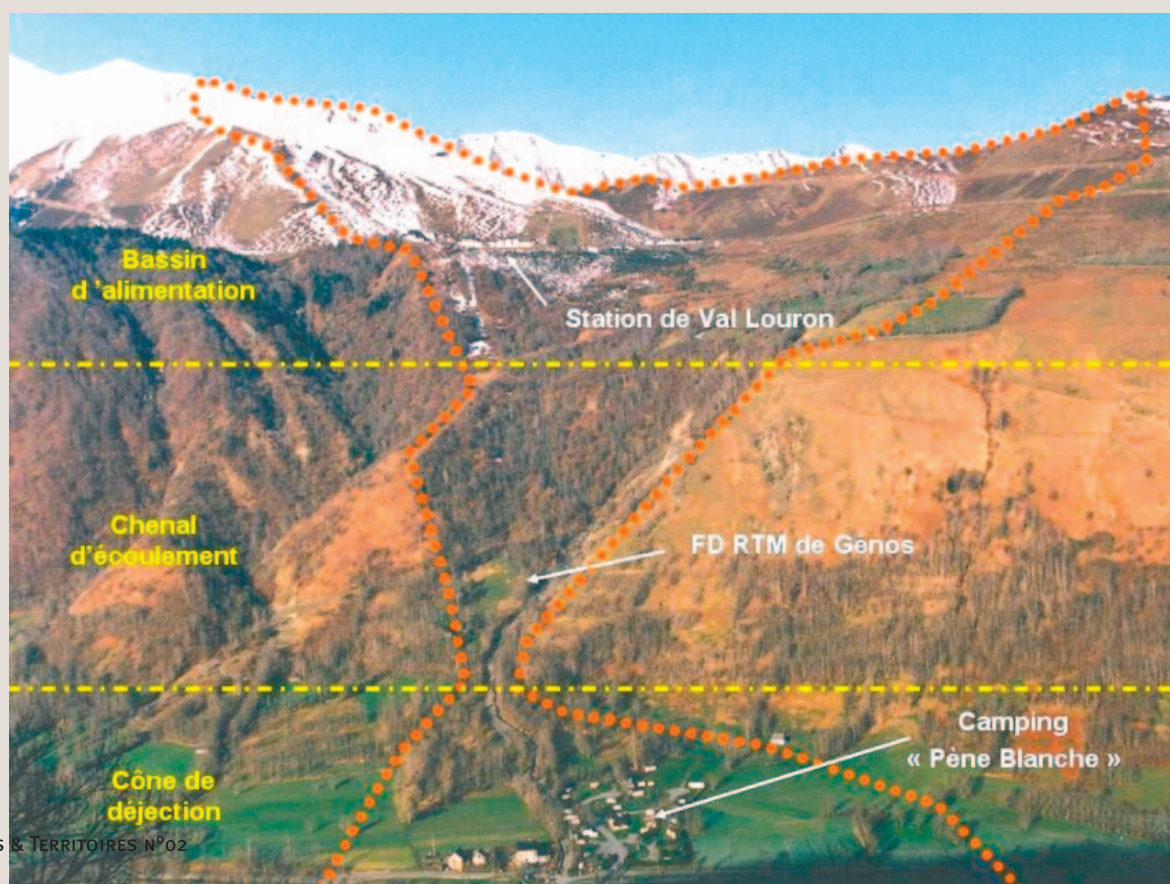
En France, plus de quatre mille communes seraient menacées par les laves torrentielles. Phénomènes difficilement prévisibles, la protection contre les risques qu'elles génèrent repose donc essentiellement sur des mesures de prévention. Il est donc essentiel de connaître l'intensité et la probabilité d'occurrence des écoulements sur un site donné. À partir du diagnostic réalisé sur un torrent des Hautes-Pyrénées, les auteurs nous présentent ici une méthode d'analyse par scénarios, permettant au gestionnaire de caractériser localement les niveaux d'aléa.



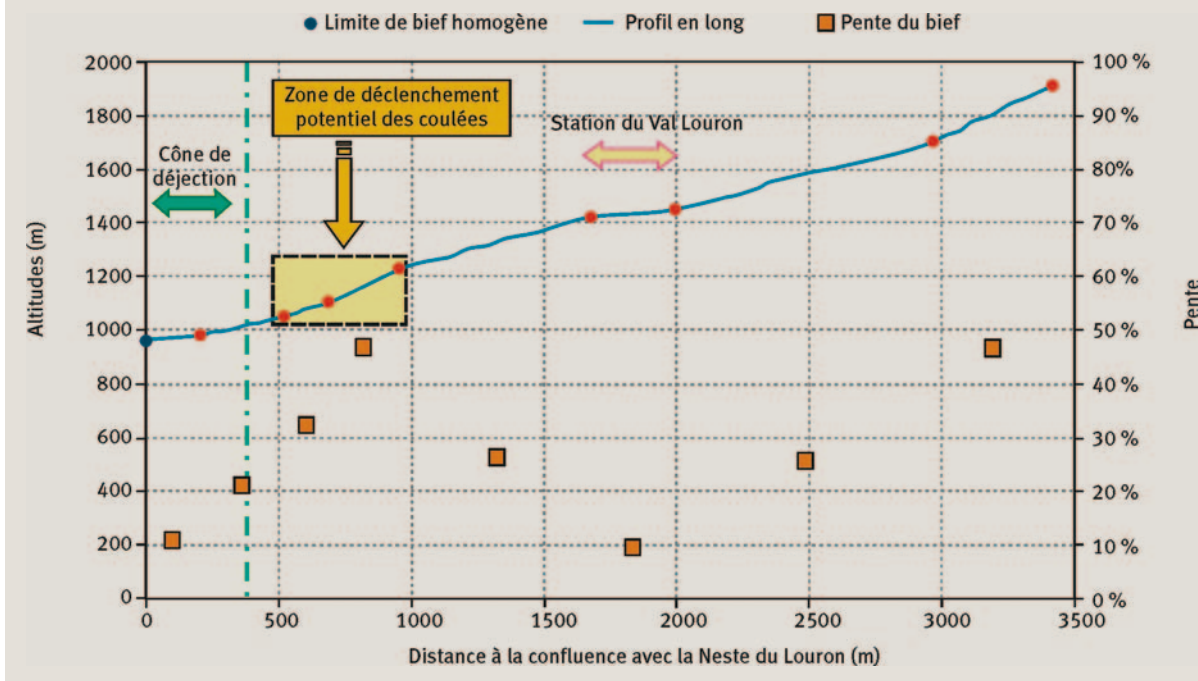
Les laves torrentielles*, comme beaucoup de phénomènes naturels, présentent une grande variabilité de leurs conditions d'occurrence. Cette variabilité résulte bien sûr de l'occurrence des conditions météorologiques déclenchantes, mais également de la nature

et de la disponibilité des matériaux solides présents dans le bassin versant. Ces deux facteurs conjugués vont déterminer le volume, les propriétés mécaniques du matériau et plus généralement l'ensemble des conditions d'écoulement. Or, pour le praticien travaillant à la définition de mesures de prévention, qui voudrait connaître l'inten-

① Vue générale sur le bassin versant du Rioulong (source : ONF - RTM 65-64)



2 Profil en long du torrent du Rioulong



sité (vitesse et hauteur d'écoulement et donc dommages générés) et la probabilité d'occurrence (une fois tous les dix ans, cent ans, mille ans ?) des phénomènes susceptibles d'affecter un point donné de l'espace (une habitation, par exemple), il est crucial d'appréhender cette variabilité. Dans ce contexte, l'analyse par scénarios, qui fait l'objet du présent article, est à considérer comme une méthode pratique, permettant de mener à bien une caractérisation locale des niveaux d'aléa*. Elle est donc avant tout une méthode d'ingénieur qui consiste, sur la base d'un diagnostic fin du bassin versant considéré, à définir une fourchette de valeurs possibles pour chacune des variables d'entrée d'un modèle de propagation des laves torrentielles. À chacune des valeurs de ces variables est affectée une probabilité d'occurrence, le plus souvent qualitative (moyenne, rare, exceptionnelle...). Des simulations d'écoulement peuvent alors être menées en « balayant » ces gammes de variation prédéfinies, chaque résultat étant *a posteriori* associé à une fréquence d'occurrence, elle aussi qualitative.

Une application de cette méthode est ici menée sur le torrent du Rioulong (commune de Loudenvielle, Hautes-Pyrénées) pour lequel, des enjeux sont présents sur le cône de déjection* : des habitations, un terrain de camping et une route. Dans une première partie, un diagnostic est réalisé sur la base d'une analyse du profil en long du torrent, de l'hydrologie et des processus érosifs à l'œuvre dans le bassin versant. Ce diagnostic permet de conclure que la probabilité d'occurrence de laves torrentielles ne peut être négligée. Il précise également l'intensité des phénomènes torrentiels prévisibles au droit du cône de déjection. Dans une deuxième partie, une analyse par scénarios, s'appuyant sur le modèle LAVE2D

de simulation des étalements de laves torrentielles du Cemagref, est mise en œuvre dans le but d'établir une caractérisation de l'aléa lave torrentielle sur le cône de déjection du torrent. Les scénarios sont préalablement construits sur la base du diagnostic du bassin versant. Dans une troisième partie, une analyse d'un dispositif de protection de type digue déviatrice est menée sur la base des scénarios prédéfinis. Elle permet d'apporter des éléments susceptibles d'orienter la conception et le dimensionnement de cet ouvrage. Enfin, les conséquences de l'implantation de cette digue sur les niveaux d'aléa sur le cône de déjection sont analysées.

Un diagnostic préalable du bassin versant du Rioulong

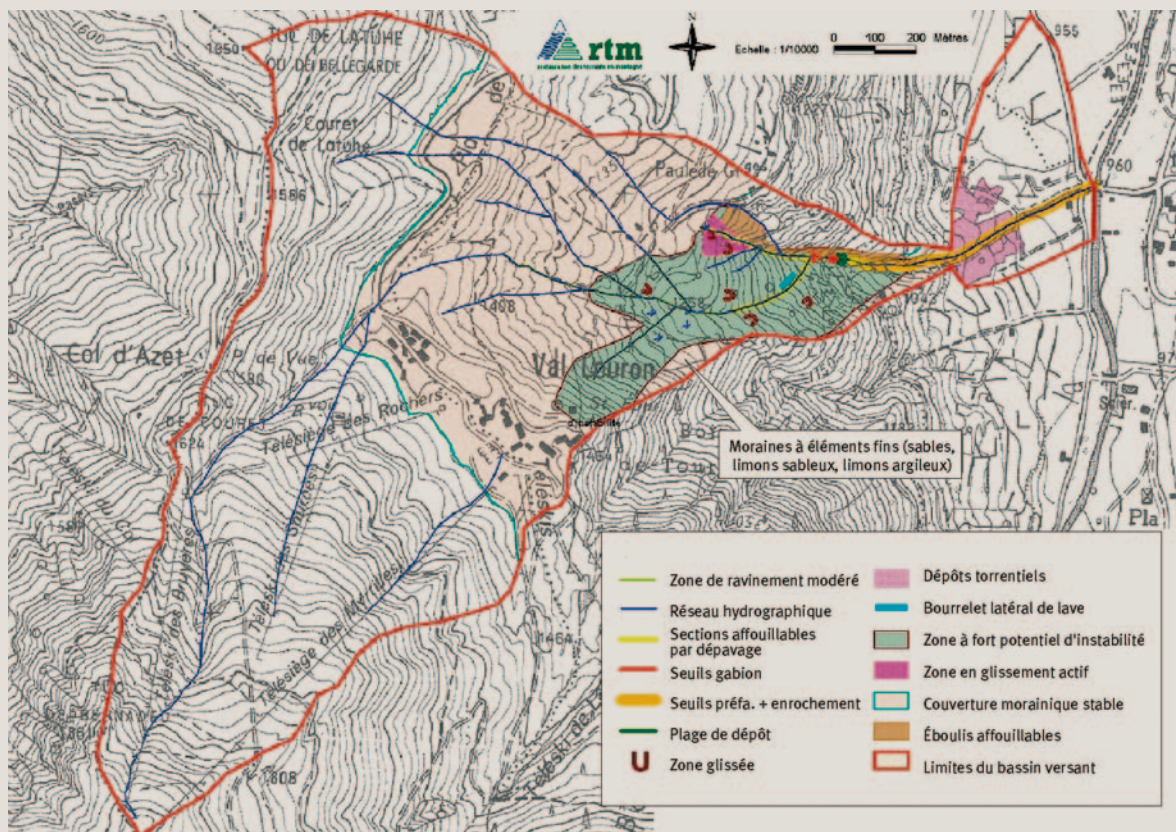
Les caractéristiques géographiques

Le Rioulong est affluent torrentiel situé en rive gauche de la Neste du Louron, dans le département des Hautes-Pyrénées (figure 1). Ce torrent draine un bassin versant* de 1,72 km² de superficie qui s'étage, entre 1 920 m et 960 m d'altitude, sur les communes d'Adervielle-Pouchergue, de Génos et de Loudenvielle.

Globalement peu dégradé et bien recouvert par la végétation, ce bassin versant est imperméabilisé sur environ 6 % de sa superficie totale. Cette situation tient à la présence de la station de ski de Val Louron, qui occupe une ancienne terrasse d'obturation glaciaire située dans le bassin d'alimentation.

Au niveau du chenal d'écoulement* intermédiaire, le torrent s'écoule selon des pentes moyennes comprises entre 30 et 50 % (figure 2). Il entaille des terrains qui

3 Limites topographiques du bassin versant et cartographie des facteurs de production sédimentaire



▶ correspondent à des dépôts morainiques* plaqués sur le versant par l'ancien glacier de la vallée du Luron. Couvrant près d'un quart du bassin versant, ce secteur présente l'allure d'une vaste zone humide suspendue et soumise à des instabilités plus ou moins actives. Il correspond au point de concentration de la majeure partie des branches constituant le réseau hydrographique supérieur (figure 3).

Historiquement, plusieurs crues* provoquées par des averses intenses sont connues sur le Rioulong (1875, 1885, 1891, 1909, 1929, 1936, 1987). Leurs conséquences ont été particulièrement dommageables pour les activités humaines riveraines du cours d'eau. Caractérisés par un transport solide conséquent constitué de graviers, de blocs et de boues glaciaires, ces phénomènes de crues ont très probablement pris la forme de coulées de laves torrentielles, comme en témoignent les dépôts anciens encore visibles sur le cône de déjection.

En 1945, ces événements ont donné à l'État l'opportunité d'acquiescer, cinquante ans après la constitution d'un premier projet de périmètre de restauration, une partie des terrains les plus dégradés de son bassin versant. Ils sont maintenant intégrés à la forêt domaniale RTM* (Restauration des terrains en montagne) de Génos.

Plus récemment, l'implantation d'un camping municipal a conduit à une augmentation significative des enjeux déjà présents sur le cône de déjection (plusieurs habitations et une voie communale). À la suite d'une réflexion

nationale engagée sur les campings « à risques » après la catastrophe du Grand-Bornand en 1987, d'importants travaux de drainage et de correction torrentielle ont été réalisés par le service RTM de l'Office national des forêts dans les années quatre-vingt dix sur les parties domaniales et communales du lit du torrent.

L'hydrologie

Les principaux facteurs susceptibles d'aggraver l'intensité des crues du bassin versant ont été identifiés. En particulier, la faible taille de l'impluvium*, la pente élevée des versants et des thalwegs*, la densité du réseau de drainage ainsi que la présence de nombreuses zones humides et imperméabilisées, conditionnent une réponse plutôt rapide du bassin versant à un événement pluvieux.

Une analyse de la pluviométrie régionale a permis d'évaluer les pluies de projet représentatives du bassin. Une attention particulière a été portée aux événements pluvieux exceptionnels observés sur la chaîne des Pyrénées. Cette réflexion a amené à proposer, pour chacune des parties occidentales, centrales et orientales des Pyrénées, une valeur plausible de la pluie maximale probable à différents pas de temps (figure 4).

Les crues de référence du bassin versant ont été estimées. Une valeur de débit correspondant à la crue maximale probable du bassin versant a également été définie (tableau 1).

L'érosion torrentielle et les transports solides

Les processus érosifs

Dans l'état actuel, l'extension des processus d'érosion est très limitée. Le phénomène le plus actif est un glissement de terrain affectant les terrains morainiques drainés par un tributaire du Rioulong, le ravin de Paulède. Au niveau des lits torrentiels, ce constat se traduit assez logiquement par un transport solide ordinaire particulièrement modeste.

En revanche, en cas de crue intense, des phénomènes de dépavage sont susceptibles de se produire au niveau des chenaux à forte pente raccordant le bassin d'alimentation au cône de déjection. Ces risques de déstabilisation concernent un linéaire d'au moins 700 m, où la granulométrie* des matériaux structurant le lit paraît très faible au regard de la pente d'écoulement du torrent. Un tiers seulement de ce linéaire a fait l'objet de travaux de correction.

Dans cette même zone intermédiaire, une analyse automatique sous système d'information géographique selon des critères d'instabilité définis par Zimmermann *et al.* (1997), complétée par des reconnaissances *in situ* détaillées, montrent que la nature des terrains de couverture et la pente élevée des versants peut conduire au déclenchement de phénomènes de glissements de terrains en cas d'averse continue et durable.

Ces différents constats amènent à proposer une localisation des secteurs les plus sensibles à l'érosion (figure 3),

1 Débits de crue de référence du bassin versant du Rioulong

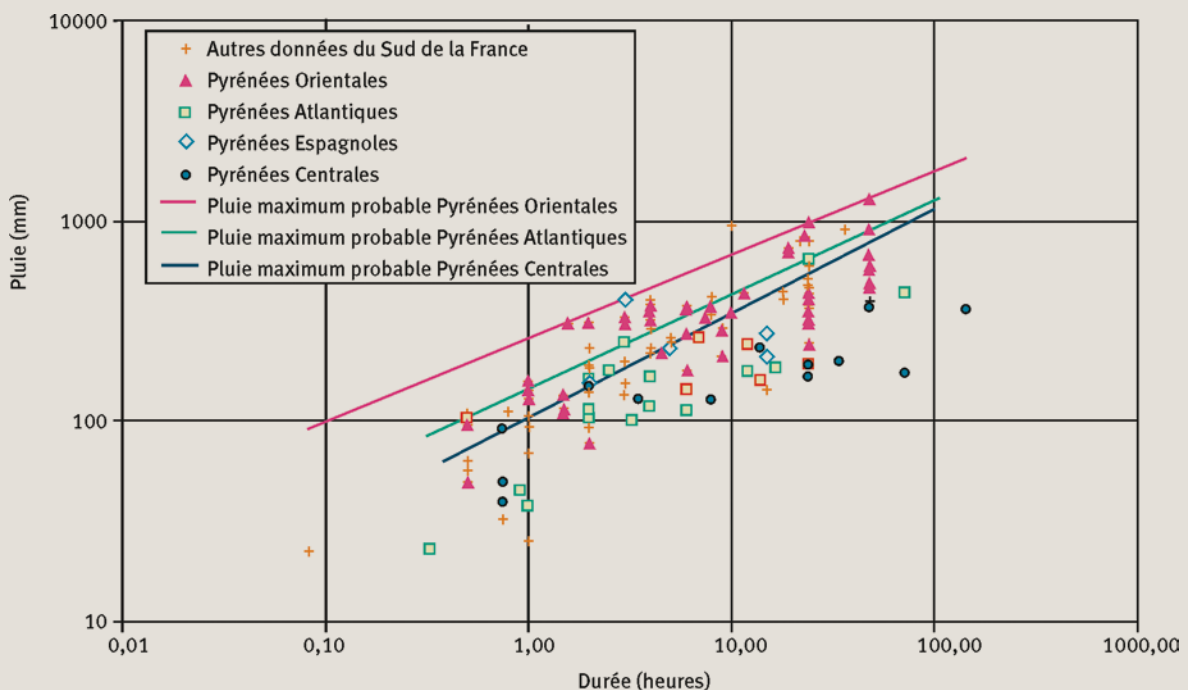
Période de retour de la crue	10 ans	100 ans	Crue maximale probable
Débit de pointe	5 m ³ /s	11 m ³ /s	20 m ³ /s

ainsi qu'une évaluation quantitative du potentiel en matériaux mobilisables (tableau 2). Ces estimations sont soumises à de très fortes incertitudes, mais correspondent à des hypothèses qui paraissent réalistes dans l'état actuel du bassin.

2 Évaluation du potentiel de matériaux mobilisables en fonction du type de processus érosif

Taux de productivité	Processus érosif	
	Érosion linéaire	Glissements de terrain
Faible	4 000 m ³	5 000 m ³
Fort	14 000 m ³	10 000 m ³

4 Cumuls maximaux de pluie observés à différents pas de temps sur diverses parties de la chaîne des Pyrénées françaises



► La capacité maximale de transport par charriage

L'estimation de la capacité de transport du torrent par charriage torrentiel a été évaluée en comparant les résultats issus de l'application de différentes approches hydrauliques (Rickenmann, 1990). Cette analyse montre que les apports solides du torrent à l'apex* de son cône de déjection peuvent potentiellement atteindre un volume de 10 000 m³ environ en cas de crue centennale.

Compte tenu de l'évolution de la pente du torrent, qui passe d'une valeur de plus de 20 % au sommet du cône de déjection à moins de 10 % à la confluence avec la Neste du Louron, d'importants phénomènes d'alluvionnement sont prévisibles au niveau du chenal d'écoulement ordinaire. Dans ces conditions, il faut s'attendre à la divagation du torrent sur son cône de déjection et à la submersion brutale des parcelles exposées par des écoulements à forte charge solide.

L'intensité prévisible des phénomènes de laves torrentielles

Bien que l'activité érosive ordinaire soit limitée, les relevés de terrain réalisés dans le bassin versant et l'analyse du profil en long du torrent montrent que les risques liés au déclenchement d'une lave torrentielle ne peuvent être négligés.

D'importantes quantités de matériaux déstructurés et humides ayant toutes les caractéristiques d'un matériau de lave torrentielle boueuse (proportion importante d'éléments fins de type argile) sont en effet mobilisables à proximité des thalwegs actifs. Par ailleurs, la forte pente longitudinale des chenaux torrentiels dans ces différents secteurs est compatible avec la formation et la propagation de coulées jusqu'au cône de déjection.

En comparant les résultats issus de l'application de diverses méthodes d'estimation des volumes de matériau potentiellement mobilisables, il s'avère plausible de considérer trois scénarios de base correspondant à des laves torrentielles d'occurrence peu fréquente, assez rare, et rare. L'absence d'événement récent entraîne néanmoins de fortes incertitudes sur ces estimations. Cette situation incite à envisager aussi l'occurrence d'un événement exceptionnel. Le tableau 3 précise les valeurs de volume associées à chacun de ces qualificatifs relatifs à l'occurrence des phénomènes et donne à titre indicatif un ordre de grandeur de la probabilité annuelle de dépassement de ces volumes.

Trois hypothèses de débit de pointe qualifiées en probabilité d'occurrence ont également été retenues à partir de

considérations empiriques fondées sur l'hydrologie du bassin versant et sur les volumes des laves torrentielles de référence (Rickenmann, 1999) : 30 m³/s (occurrence peu fréquente), 100 m³/s (occurrence rare) et 180 m³/s (occurrence exceptionnelle). Compte tenu de la faible capacité d'écoulement du chenal ordinaire au droit du cône de déjection, les risques de débordement paraissent très marqués en cas de lave torrentielle, y compris pour les événements les moins intenses en terme de débit. Un étalement des coulées vers les zones occupées par les différentes activités humaines présentes sur le cône paraît très probable.

La construction des scénarios

La topographie du cône de déjection étant connue, grâce à un levé de grande précision (jusqu'à 1 point par m² pour les zones les plus caractéristiques du point de vue hydraulique) effectué spécifiquement, la mise en œuvre du modèle LAVE2D (Laigle *et al.*, 2006) requiert deux types de données d'entrée qui sont d'une part, l'hydrogramme de lave torrentielle à l'apex du cône de déjection et d'autre part, les paramètres rhéologiques* du matériau en écoulement.

L'hydrogramme d'entrée

L'hydrogramme d'entrée fixe le débit de lave torrentielle arrivant sur le cône de déjection en fonction du temps. Ne disposant d'aucune donnée sur la forme de cet hydrogramme, nous avons fait l'hypothèse d'une évolution linéaire du débit qui varie depuis sa valeur en pointe à l'instant $t = 0$ du calcul jusqu'à une valeur nulle au bout d'un certain temps t_f . La donnée du débit de pointe et du volume fixe la durée t_f de la coulée. Les différentes hypothèses étudiées résultent du diagnostic du bassin versant menée précédemment. Cet hydrogramme est « injecté » au niveau du chenal du Rioulong en amont du cône de déjection et en limite du domaine de calcul considéré (figure 5).

Les paramètres rhéologiques

Nous faisons ici l'hypothèse que les laves torrentielles du torrent du Rioulong peuvent être classées dans la catégorie des laves torrentielles à matrice boueuse dont la loi de comportement est du type Herschel-Bulkley (Coussot, 1996), conformément aux observations effectuées sur le terrain. Le comportement mécanique de ce

3 Scénarios de référence considérés : occurrence, volume et probabilité annuelle de dépassement donnée à titre indicatif

Occurrence du phénomène	Peu fréquent	Assez rare	Rare	Exceptionnel
Volume de la lave torrentielle	5 000 m ³	10 000 m ³	15 000 m ³	25 000 m ³
Probabilité indicative	5.10 ⁻² à 2.10 ⁻²	2.10 ⁻² à 1.10 ⁻²	1.10 ⁻² à 3.10 ⁻³	< 3.10 ⁻³

4 Présentation synthétique des scénarios ayant fait l'objet de simulations.
Seule une partie de ces simulations font l'objet d'illustrations dans le présent article.

Volume de la lave (m ³)	Débit de pointe (m ³ /s)	τ_c/ρ	K/τ_c	Objectifs des simulations
10 000	100	0,5	0,3	Test de sensibilité sur la viscosité de la lave torrentielle (figures 5, 6 et 7)
10 000	100	1	0,3	
10 000	100	2	0,3	
10 000	30	1	0,3	Test de sensibilité sur le débit de pointe de la lave
10 000	100	1	0,3	
10 000	180	1	0,3	
5 000	100	1	0,3	Test de sensibilité sur le volume dans une optique de cartographie de l'aléa (figures 6, 8 et 9)
10 000	100	1	0,3	
15 000	100	1	0,3	
25 000	100	1	0,3	
10 000	100	0,5	0,3	Identique au cas précédent mais pour une lave plus fluide (figure 10)
15 000	100	0,5	0,3	
25 000	100	0,5	0,3	
10 000	100	1	0,3	Analyse d'un exemple d'obstacle « naturel », du type embâcle de moins de 9 m de large (figure 11)
25 000	100	1	0,3	
10 000	100	1	0,3	Analyse de l'impact d'une digue de déviation présentant un angle d'incidence de 45 ° (figure 12)
10 000	100	1	0,3	Analyse de l'impact d'une digue de déviation présentant un angle d'incidence de 15 à 20 ° (figure 13)
10 000	180	0,5	0,3	Identique au cas précédent mais en privilégiant une vitesse d'écoulement élevée (figure 14)
10 000	180	2	0,3	Identique au cas précédent mais en privilégiant une hauteur d'écoulement élevée (figure 15)
25 000	180	1	0,3	Impact de l'ouvrage sur les zones habitées situées en rive droite et fonctionnement du dispositif en cas d'événement exceptionnel (figure 16)
25 000	180	0,5	0,3	Identique au cas précédent mais pour une lave plus fluide

type de matériau d'apparence boueuse et répondant à une loi de Herschel-Bulkley est traduit par la donnée de deux paramètres : le rapport seuil de contrainte sur masse volumique τ_c/ρ (m²/s²) et le rapport consistance sur contrainte seuil K/τ_c (s^{1/3}). Ne disposant d'aucun moyen de mesurer les valeurs de ces paramètres pour les laves torrentielles du Rioulong (ceci n'est généralement possible que sur du matériau d'une lave torrentielle très récente), nous avons fait les hypothèses suivantes : la valeur du rapport K/τ_c est fixée à 0,3 s^{1/3} conformément à la valeur moyenne préconisée par Coussot (1996), la valeur du rapport τ_c/ρ est traitée de façon paramétrique. Pour ce dernier paramètre, nous avons retenu trois valeurs pour les simulations :

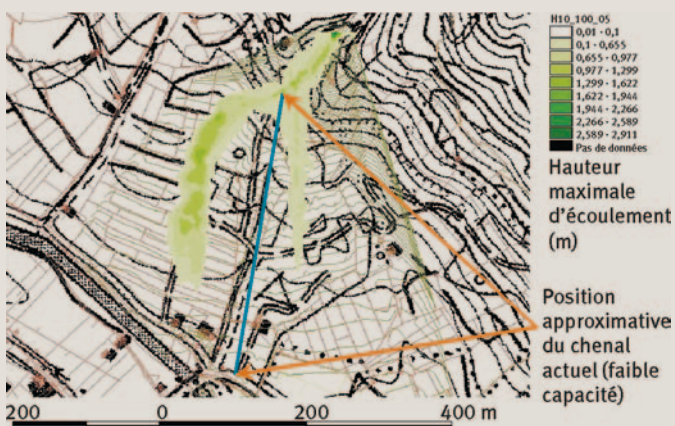
- une valeur moyenne $\tau_c/\rho = 1,0$ m²/s². Considérant, sur la base de notre expérience, qu'une valeur de cet ordre de grandeur est fréquemment rencontrée sur de nombreux torrents, sa probabilité d'occurrence est supposée forte. De plus, l'interprétation de traces de dépôts anciens est venue confirmer cette hypothèse ;

- une valeur forte $\tau_c/\rho = 2,0$ m²/s², dont la probabilité d'occurrence est assez faible, mais qu'il est intéressant d'étudier dans le cadre de la présente approche paramétrique car elle conduit à des hauteurs d'écoulement et de dépôt élevées (considérées ici comme les hauteurs maximales plausibles pour un débit et un volume donnés) ;
- une valeur faible $\tau_c/\rho = 0,5$ m²/s², dont la probabilité d'occurrence est assez faible, mais qu'il est intéressant d'étudier dans le cadre de la présente approche paramétrique car elle conduit à des vitesses et des extensions des coulées élevées (considérées ici comme les vitesses et extensions maximales plausibles pour un débit et un volume donnés).

Une présentation synthétique des scénarios envisagés

Les résultats de simulation présentés ci-après correspondent à des scénarios fondés sur les hypothèses synthétisées dans le tableau 4. En soi, elles ne peuvent rendre compte de tous les cas possibles d'écoulement

5 Hauteurs maximales simulées pour un volume de 10 000 m³, un débit de pointe de 100 m³/s et un rapport $\tau_c/\rho = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$



6 Hauteurs maximales simulées pour un volume de 10 000 m³, un débit de pointe de 100 m³/s et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$



7 Hauteurs maximales simulées pour un volume de 10 000 m³, un débit de pointe de 100 m³/s et un rapport $\tau_c/\rho = 2,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$



qui sont en nombre pratiquement infini. Pour chaque cas traité, des phénomènes perturbateurs sont susceptibles de modifier sensiblement le résultat. À titre d'exemple de ces phénomènes perturbateurs, nous avons traité le cas de la formation d'un embâcle* dans le chenal du torrent. Deux hypothèses d'implantation d'ouvrages de protection de type digue déviatrice sont traitées.

Une caractérisation de l'aléa : l'analyse de l'extension maximale des coulées

Les laves torrentielles pouvant s'avérer destructrices jusqu'aux limites de leur zone d'écoulement, nous avons retenu l'extension maximale des coulées comme critère de caractérisation de l'aléa sur le cône de déjection du Rioulong. Ces extensions sont cartographiées pour chacun des scénarios traités. Toutefois, au-delà des résultats directs d'extension, il est également intéressant d'apprécier leurs variations en fonction des variations des paramètres d'entrée du modèle numérique. C'est pourquoi les résultats sont ici présentés dans une logique d'analyse de sensibilité.

L'influence forte de la valeur du seuil de contrainte

Les simulations suivantes ont pour objectif de mettre en évidence l'influence des caractéristiques rhéologiques du matériau. Elles sont effectuées en considérant un même volume de 10 000 m³ et un même débit de pointe de 100 m³/s. Les trois hypothèses retenues correspondent à une lave torrentielle « fluide » ($\tau_c/\rho = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$) (figure 5), « moyenne » ($\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$) (figure 6) ou « visqueuse » ($\tau_c/\rho = 2,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$) (figure 7).

Ces simulations mettent en évidence une forte influence de la viscosité du matériau sur l'extension de la coulée. Il s'agit là d'un résultat tout à fait cohérent avec des études antérieures menées sur d'autres torrents. On note toutefois l'existence d'une tendance très marquée sur le Rioulong : le débordement latéral en tête de cône de déjection de la totalité du matériau provenant de l'amont, avec répartition entre la rive droite et la rive gauche. Cette tendance est confirmée par les simulations ultérieures.

L'influence modérée du débit de pointe

Les simulations réalisées avaient pour objectif de mettre en évidence l'influence du débit de pointe. Elles ont été effectuées en considérant un même volume de 10 000 m³ et des caractéristiques rhéologiques correspondant à une viscosité moyenne ($\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$). Les trois hypothèses de débit de pointe retenues sont : 30 m³/s, 100 m³/s et 180 m³/s. Les simulations ont montré que la variation du débit de pointe influence de façon très modérée l'extension maximale des coulées. Cette variation se traduit essentiellement par des variations de la vitesse et dans une moindre mesure de la hauteur d'écoulement, principalement dans la zone chenalisée en amont du cône de déjection.

L'influence primordiale du volume

Les simulations suivantes ont pour objectif de mettre en évidence l'influence du volume de la coulée. Elles sont effectuées en considérant un même débit de pointe de 100 m³/s et des caractéristiques rhéologiques correspondant à une viscosité « moyenne » ($\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$). Les hypothèses de volume considérées sont : 5 000 m³ (figure 8), 10 000 m³ (figure 6), 15 000 m³ et 25 000 m³ (figure 9).

Les simulations mettent en évidence une forte influence du volume sur l'extension de la coulée. Il s'agit là d'un résultat tout à fait cohérent avec des études antérieures menées sur d'autres torrents.

L'analyse de l'extension maximale d'une lave torrentielle fluide

Les simulations suivantes ont pour objectif de mettre en évidence l'extension maximale de la coulée dans le cas défavorable d'un matériau fluide ($\tau_c/\rho = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$) qui tend à s'étaler plus facilement mais qui présente des hauteurs d'écoulement et de dépôt plus faibles. Elles sont effectuées en considérant un même débit de pointe de 100 m³/s. Les volumes considérés sont de 10 000 m³ (figure 5), 15 000 m³ (figure 10) et 25 000 m³.

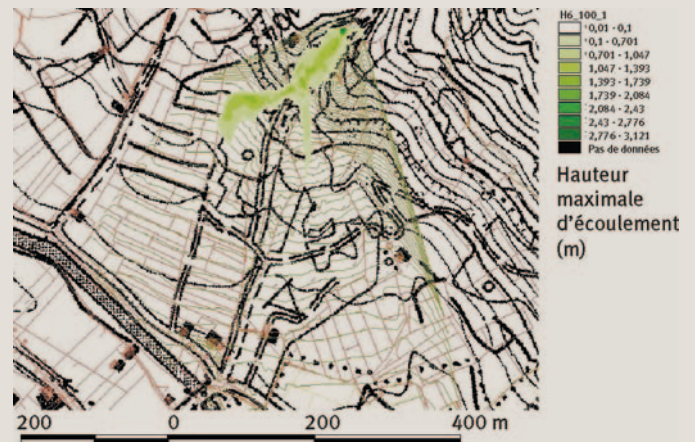
Les simulations mettent en évidence que dans la configuration actuelle, au-delà d'un volume d'environ 15 000 à 20 000 m³ et dans l'hypothèse d'une lave torrentielle fluide, les habitations (représentées par des rectangles noirs sur les figures) situées en rive droite du Rioulong et en aval du cône de déjection sont susceptibles d'être atteintes par des laves torrentielles. Par ailleurs, comme dans tous les cas précédents, le risque en rive gauche est constamment présent.

...et en cas de formation d'un embâcle de 9 m de large obstruant le chenal

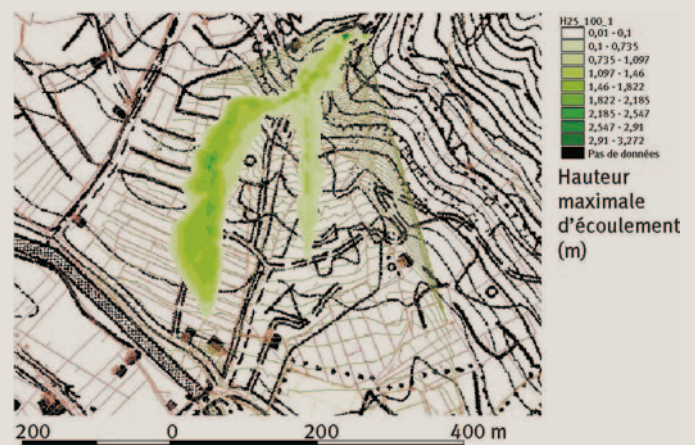
Le bassin versant étant très boisé et le chenal étant de faible capacité, il a paru judicieux d'envisager l'hypothèse d'un blocage du chenal, suite à la formation d'un embâcle. Il est impossible de traiter tous les cas de figures de formation d'un embâcle, une telle éventualité pouvant a priori se produire en n'importe quel point du chenal et avec des niveaux d'importance variables. Le cas traité ici ne doit donc être considéré que comme une illustration d'un tel phénomène. L'hypothèse d'un tel blocage est ici envisagée à l'apex du cône de déjection, au point de divergence des écoulements. Les deux cas traités correspondent à un débit de pointe de 100 m³/s et à un matériau de « viscosité moyenne ». Les deux hypothèses de volume traitées sont : 10 000 m³ (figure 11) et 25 000 m³.

Par rapport aux cas similaires (hypothèses équivalentes) traités en l'absence d'embâcle, on observe une tendance à l'accentuation du débordement en rive gauche du chenal torrentiel, la localisation du point de débordement ne changeant pas fondamentalement. Ce cas de figure, tout à fait plausible, se traduit par une augmentation du volume de matériau dirigé vers la rive gauche du chenal torrentiel et donc une accentuation du risque dans ce secteur. Il pourrait expliquer l'origine des traces d'étalement nombreuses et anciennes clairement visibles sur le terrain dans ce secteur.

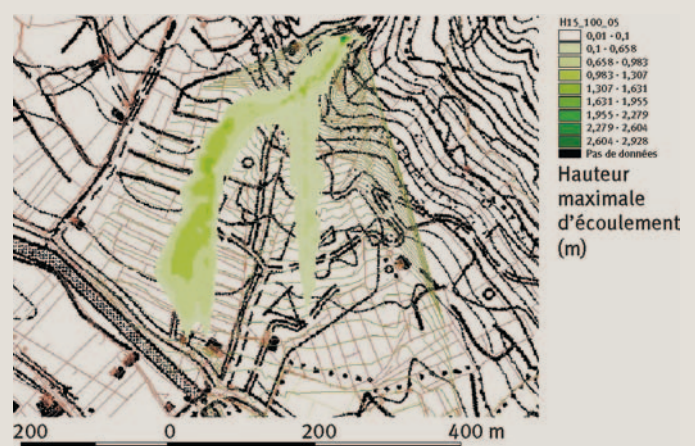
8 Hauteurs maximales simulées pour un volume de 5 000 m³, un débit de pointe de 100 m³/s et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$



9 Hauteurs maximales simulées pour un volume de 25 000 m³, un débit de pointe de 100 m³/s et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$



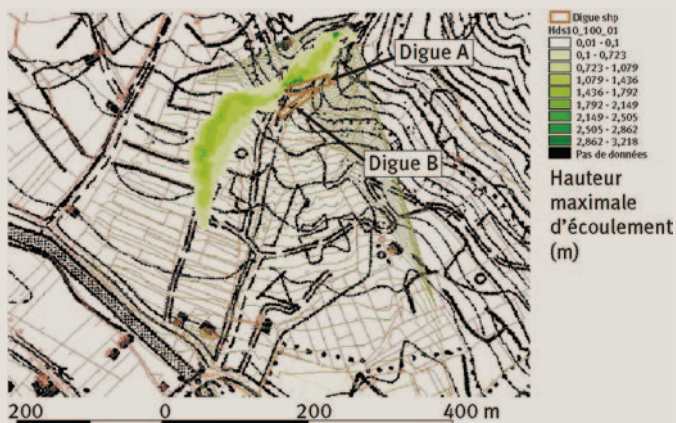
10 Hauteurs maximales simulées pour un volume de 15 000 m³, un débit de pointe de 100 m³/s et un rapport $\tau_c/\rho = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$



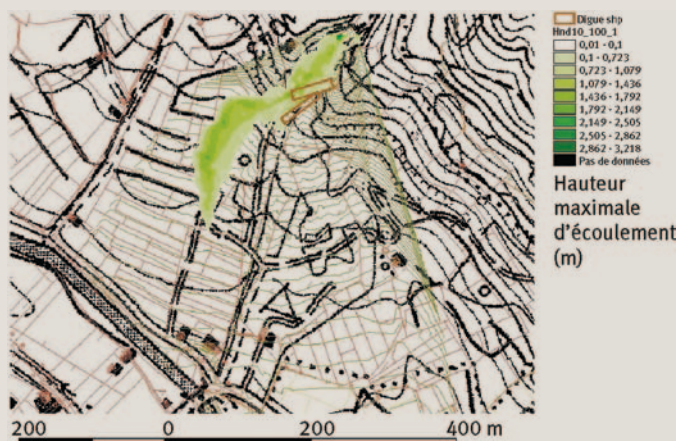
- 11 Hauteurs maximales simulées pour un volume de 10 000 m³, un débit de pointe de 100 m³/s et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ dans l'hypothèse de la formation préalable d'un embâcle à l'apex du cône de déjection



- 12 Hauteurs maximales simulées pour un volume de 10 000 m³, un débit de pointe de 100 m³/s et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ dans l'hypothèse de l'implantation d'une digue présentant un angle d'incidence d'environ 45 ° par rapport au chenal amont du torrent



- 13 Hauteurs maximales simulées pour un volume de 10 000 m³, un débit de pointe de 100 m³/s et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ dans l'hypothèse de l'implantation d'une digue présentant un angle d'incidence d'environ 15 ° par rapport au chenal amont du torrent



L'implantation d'une digue de protection contre les débordements : éléments de conception et de dimensionnement

Un comparatif de deux configurations de la digue

La zone de vulnérabilité* la plus forte (en l'occurrence, un terrain de camping) étant située en rive gauche du cône de déjection, un aménagement de type digue déviatrice a été envisagé par le service RTM dans le cadre d'un schéma d'aménagement plus global du bassin versant. L'objectif de cette digue, implantée au point de divergence des écoulements à l'apex du cône de déjection, est de supprimer le risque de débordement en rive gauche. Nous examinons ici deux cas de figure d'implantation d'une telle digue. Une première configuration (dénommée digue type A [figure 12]) présentant un angle d'incidence d'environ 45 ° par rapport au chenal amont et une seconde (dénommée digue type B [figure 13]) présentant un angle d'incidence d'environ 15 à 20 °, sont testées. Les hypothèses retenues pour cette comparaison sont : lave de viscosité moyenne ($\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$), volume de 10 000 m³ et débit de pointe de 100 m³/s. L'objectif est ici d'établir la quelle de ces deux configurations est la plus favorable en termes d'efficacité et ensuite en termes de dimensionnement de l'ouvrage. Les digues sont ici traitées dans le modèle comme des groupes de cellules imperméables.

Les simulations mettent en évidence un comportement hydraulique de la digue de type B plus favorable que celui de la digue de type A. Les hauteurs et les vitesses d'écoulement atteintes au voisinage de la digue B sont en effet inférieures à celles obtenues pour la digue A (hauteur maximale : 2,8 m et vitesse maximale : 5,6 m/s pour la digue A et hauteur maximale : 1,5 m et vitesse maximale : 1,0 m/s pour la digue B). Ceci présente deux avantages : pour une efficacité *a priori* équivalente, la digue B pourra être de hauteur un peu plus faible et le risque qu'elle soit endommagée par l'impact d'un écoulement est également plus faible. De plus, l'implantation de type A entraîne un « étranglement » des écoulements au niveau du chenal à l'aval immédiat de la digue, conduisant à une accélération locale de l'écoulement (vitesse maximale atteinte ponctuellement : 8,2 m/s dans l'hypothèse considérée). L'implantation de type B ne provoque pas cet effet d'étranglement et donc d'accélération ponctuelle de l'écoulement (vitesse maximale atteinte ponctuellement : 5,3 m/s dans l'hypothèse considérée). Une implantation de type B semble donc préférable.

L'analyse des simulations d'écoulement au voisinage et en aval de la digue

Nous retenons ici uniquement une digue de protection dans sa configuration B évoquée ci-dessus. L'objectif des simulations suivantes est double :

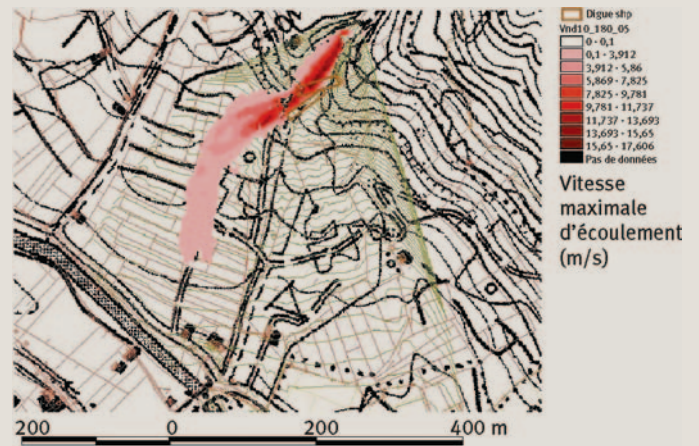
- analyser les écoulements au voisinage de la digue afin de déterminer, pour diverses hypothèses d'événement, les hauteurs et vitesses maximales atteintes à son contact ;

- analyser les conséquences à l'aval, de la présence de cette digue.
- Pour ce faire, on traite :
- un scénario prenant comme hypothèses une lave torrentielle « fluide » et un débit élevé, ce qui nous permet par simulation de tirer des informations sur la vitesse maximale plausible de l'écoulement au contact de la digue ;
 - un scénario prenant comme hypothèses une lave torrentielle « visqueuse » et un débit élevé, ce qui nous permet par simulation de tirer des informations sur la hauteur maximale plausible de l'écoulement au contact de la digue (élément de dimensionnement de la future digue) ;
 - deux scénarios prenant comme hypothèse un volume exceptionnel et un débit élevé, avec pour objectif d'analyser l'extension maximale en présence d'une digue.
- Pour ce qui concerne les caractéristiques des écoulements au voisinage de la digue, le volume de la coulée a une influence très limitée. L'hypothèse envisagée la plus défavorable en termes de vitesse de la coulée (figure 14) fait apparaître ponctuellement des valeurs de l'ordre de 10 m/s et très localement 13 m/s à proximité de l'extrémité aval de la digue (hypothèse d'un débit de pointe de 180 m³/s et lave fluide de $\tau_c/\rho = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$). L'hypothèse envisagée la plus défavorable en terme de hauteur maximale d'écoulement (figure 15) fait apparaître ponctuellement des valeurs de l'ordre de 2,5 m (hypothèse d'un débit de pointe de 180 m³/s et lave visqueuse de $\tau_c/\rho = 2,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$). Même si ces chiffres ne doivent pas être retenus sans discussion complémentaire, ils pourront néanmoins servir à orienter le dimensionnement de la digue. La présence de la digue dirigeant la totalité du volume vers la rive droite du chenal, on assiste à une intensification des écoulements et des extensions sur cette partie du cône (figure 16). Le risque sur la zone du cône de déjection située en rive droite du chenal et notamment pour les deux habitations situées à la partie aval de celle-ci, ainsi que la route, est donc un peu supérieur dans cette configuration, par rapport à l'état existant. Les habitations ne sont toutefois atteintes que pour un seul des scénarios traités correspondant à un volume de 25 000 m³ et un rapport $\tau_c/\rho = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Ce scénario présente donc une probabilité d'occurrence extrêmement faible.

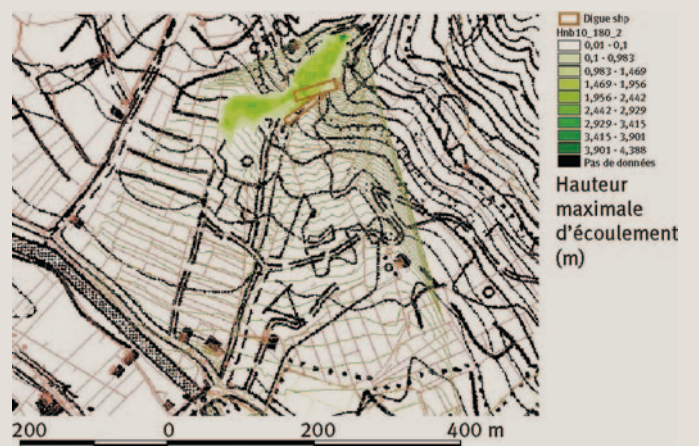
Conclusion

Dans le cadre de la présente étude, portant en particulier sur l'aléa « lave torrentielle » sur le cône de déjection du torrent du Rioulong, un diagnostic fin de la susceptibilité de ce torrent à produire des laves torrentielles a tout d'abord été mené. Un tel diagnostic fin était un préalable indispensable à la mise en œuvre d'un modèle numérique dans le cadre d'une approche par scénarios telle qu'elle a été menée dans un deuxième temps. En effet, ce diagnostic a entre autres permis de définir des scénarios de volume et de débit d'écoulement et de leur affecter une probabilité d'occurrence qualitative. Complété par des hypothèses sur

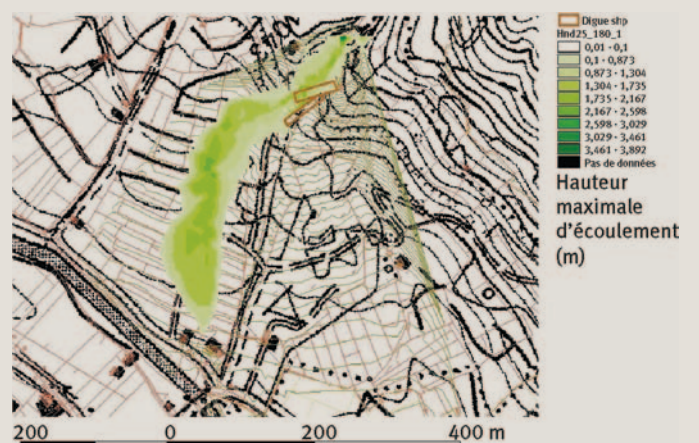
14 Vitesses maximales simulées pour un volume de 10 000 m³, un débit de pointe de 180 m³/s et un rapport $\tau_c/\rho = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ dans l'hypothèse de l'implantation d'une digue présentant un angle d'incidence d'environ 15° par rapport au chenal amont du torrent



15 Hauteurs maximales simulées pour un volume de 10 000 m³, un débit de pointe de 180 m³/s et un rapport $\tau_c/\rho = 2,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ dans l'hypothèse de l'implantation d'une digue présentant un angle d'incidence d'environ 15° par rapport au chenal amont du torrent



16 Hauteurs maximales simulées pour un volume de 25 000 m³, un débit de pointe de 180 m³/s et un rapport $\tau_c/\rho = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ dans l'hypothèse de l'implantation d'une digue présentant un angle d'incidence d'environ 15° par rapport au chenal amont du torrent



- les paramètres rhéologiques des coulées, un jeu complet de scénarios a ainsi pu être établi.

La simulation des écoulements dans le cadre de cette approche par scénarios a montré un intérêt indéniable. Non seulement, elle a permis une évaluation fine des niveaux d'aléa sur le cône de déjection dans son état actuel, mais elle a également fourni des éléments pratiques relatifs à l'implantation d'un ouvrage de protection de type digue déviatrice. Ces éléments concernent la conception de la digue (notamment son orientation), son dimensionnement (évaluation des hauteurs et vitesses susceptibles d'être atteintes au voisinage de la digue) et les conséquences de l'implantation de la digue en termes de modification du niveau d'aléa à l'aval de celle-ci.

Comme il a été mentionné en introduction de cet article, l'approche par scénario, telle qu'elle a été appliquée ici sur le torrent du Rioulong, est une approche relativement simple de la variabilité naturelle des phénomènes. À ce titre, même si elle souffre quelque peu de l'absence d'un support formel plus rigoureux, elle reste néanmoins d'un emploi relativement aisé et bien adapté à une démarche d'ingénieur. ■

Les auteurs

Dominique Laigle

Cemagref, centre de Grenoble,
UR ETGR, Érosion torrentielle,
neige et avalanches,
2 rue de la Papeterie,
BP 76,
38402 Saint Martin d'Hères Cedex
dominique.laigle@cemagref.fr

Christophe Peteuil

Office national des forêts,
Service de restauration des terrains
en montagne de l'Isère,
9 Quai Créqui,
38000 Grenoble
christophe.peteuil@onf.fr

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- 📖 **COUSSOT, P.**, 1996, *Les laves torrentielles. Connaissances à l'usage du praticien*, Cemagref Éditions, Antony, 177 p.
- 📖 **LAIGLE, D., HECTOR A.-F., HUEBL, J., RICKENMANN, D.**, 2006, Confrontation de la simulation numérique de l'étalement de laves torrentielles boueuses à des observations d'événements réels, *La Houille Blanche*, n° 6/2006, p. 105-112.
- 📖 **RICKENMANN, D.**, 1990, *Bed load transport capacity of slurry flows at steep slopes*, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zurich, n° 103, 249 p.
- 📖 **RICKENMANN, D.**, 1999, Empirical relationships for debris flows, *Natural Hazards*, vol. 19, n° 1, p. 47-77.
- 📖 **ZIMMERMANN, M., MANI, P., GAMMA, P., GSTEIGER, P., HEINIGER, O., HUNZIKER, G.**, 1997, Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz, in : *Schlussbericht Nationalen Forschungs Programmes*, NFP 31, Zürich, Vdf Hochschulverlag AG an der ETH, 161 p.





Bourrelet de dépôt d'une lave torrentielle dans le torrent de la Parcigoule (Pyrénées Orientales).