

Diagnostic du fonctionnement d'un bassin versant générateur de laves torrentielles et estimation de l'aléa : le cas du Réal (Alpes-Maritimes, France)

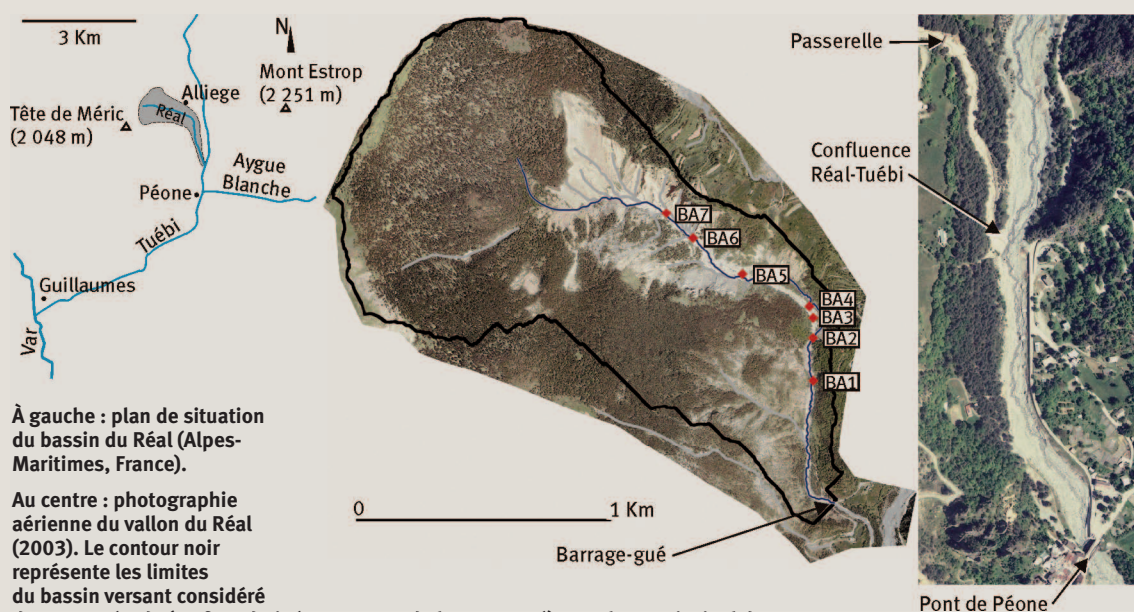
En montagne, les fortes précipitations sont à l'origine de phénomènes naturels souvent très violents. Les laves torrentielles, coulées de boues particulièrement destructrices lorsqu'elles atteignent les vallées, en sont une des manifestations les plus impressionnantes. Afin de mettre en place efficacement des mesures de prévention et de protection, les gestionnaires ont besoin d'une meilleure connaissance de ces phénomènes. Cet article synthétise les résultats d'une étude détaillée du fonctionnement et de la dynamique sédimentaire d'un bassin versant alpin générateur de laves torrentielles, et propose des recommandations en matière d'aménagement complémentaire de protection.



Les bassins versants* du Réal et du Tuébi constituent l'un des systèmes torrentiels les plus actifs du département des Alpes-Maritimes (Julian et Anthony, 1997). Ces deux torrents* sont connus comme de gros producteurs de laves torrentielles*, lesquelles occasionnent fréquemment des dégâts et désagréments

jusqu'au village de Péone situé juste à l'aval de leur confluence (terrains engravés, routes coupées...). C'est pourquoi le service de restauration des terrains en montagne (RTM*) a entrepris, dès le début du vingtième siècle, un important programme de correction torrentielle visant à traiter à la fois la branche principale du Tuébi et son affluent le Réal. Cependant, dans le cas du Réal, la

1 Le bassin versant du Réal (Alpes-Maritimes, France)



À gauche : plan de situation du bassin du Réal (Alpes-Maritimes, France).

Au centre : photographie aérienne du vallon du Réal (2003). Le contour noir représente les limites du bassin versant considéré dans cette étude (surface drainée en amont du barrage-gué). Le talweg principal du torrent est figuré en bleu. Les emplacements des 7 barrages de correction torrentielle construits à ce jour, ainsi que du barrage-gué, sont également indiqués.

À droite : photographie aérienne de la confluence Réal-Tuébi. La confluence est située 500 m en amont du pont de Péone, bien visible en bas de la photo.

1 Caractéristiques morphométriques du bassin versant du Réal (surface drainée en amont du barrage-gué) calculées à partir du MNT de 2003

Superficie S (km ²)	2	Altitude maximale du talweg $h_{max,t}$ (m)	1 697
Altitude maximale h_{max} (m)	2 048	Pente moyenne du talweg l_m (%)	18
Altitude minimale h_{min} (m)	1 254	Dénivelée spécifique l_{bv} (%)	56
Longueur du talweg principal L (m)	2 400	Superficie non végétalisée (%)	18

Définitions de la pente moyenne l_m et de la dénivelée spécifique l_{bv} : $l_m = (h_{max,t} - h_{min})/L$; $l_{bv} = (h_{max} - h_{min})/\sqrt{S}$.

faible pérennité des ouvrages construits dans le bassin versant, ainsi que la dynamique sédimentaire très active du torrent, ont conduit le service RTM à s'interroger sur le bien-fondé de la poursuite de ce programme de correction. Par ailleurs, l'accroissement récent des enjeux* potentiellement menacés par les crues* à Péone plaide également en faveur d'une réflexion approfondie sur l'adéquation des moyens de protection mis en place.

Le Cemagref a ainsi été saisi en 2004 pour réaliser une étude du bassin versant du Réal. Cette étude s'est déroulée en deux phases :

- diagnostic du fonctionnement torrentiel du bassin (2004),
- formulation de propositions pour un programme d'aménagements complémentaires (2007).

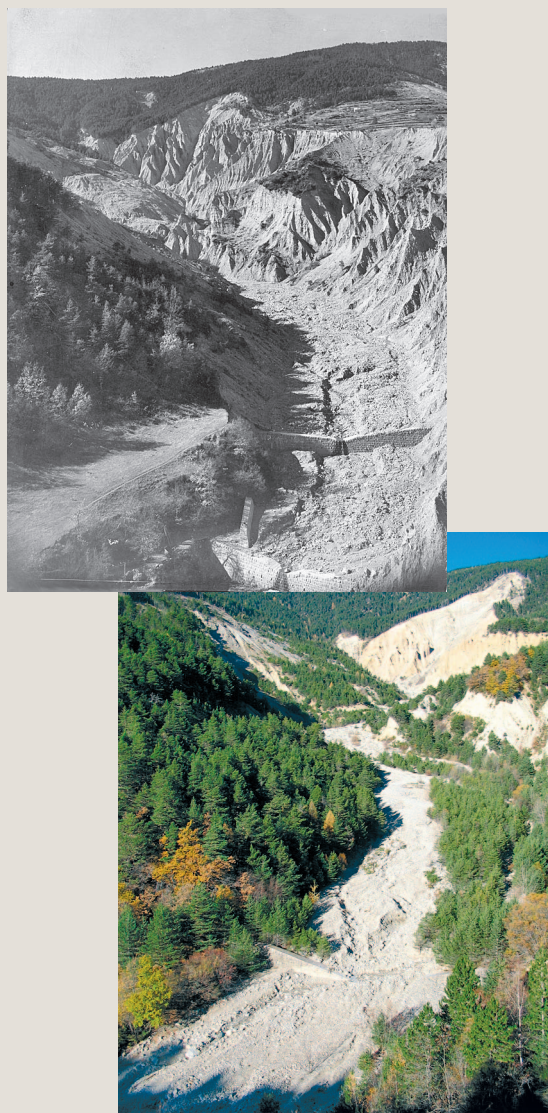
Ces deux phases ont fait l'objet de rapports détaillés. L'objet du présent article est d'en synthétiser les principales observations et conclusions. Dans une première partie, les caractéristiques du bassin versant sont résumées. La seconde partie décrit la démarche suivie pour caractériser les crues extrêmes susceptibles de se produire, en insistant plus particulièrement sur le cas des laves torrentielles. Nous nous attachons ensuite à décrire la dynamique globale du torrent, avant de proposer une évaluation qualitative de l'aléa* torrentiel et de son évolution à long terme. Enfin, en conclusion, des recommandations en matière d'aménagements complémentaires sont formulées.

Description générale du bassin versant

Les caractéristiques géomorphologiques* du bassin

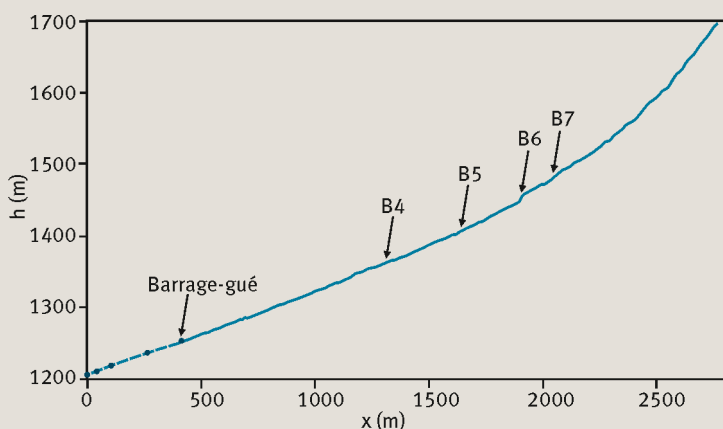
Notre étude s'est basée sur un modèle numérique de terrain (MNT*) du vallon du Réal établi en 2003 par photogrammétrie* aérienne (équidistance des courbes iso-altitude : 2 m). Les principales caractéristiques morphométriques* du bassin versant sont indiquées dans le tableau 1. Globalement, celui-ci présente une forme relativement allongée avec un réseau de drainage assez peu développé, en particulier en rive gauche (figure 1). La courbe hypsométrique* montre une forte proportion relative des altitudes élevées (Staub, 1998), ce qui est

2 Vues du bassin du Réal en amont du barrage BA3, en 1938 (en haut, source : RTM 06) et en 2004 (en bas)



L'évolution du lit entre ces deux dates est clairement visible. Les deux barrages que l'on observe sur la photo de 1938 sont BA3 et BA4. En 2004, seules les ailes de BA4 sont encore visibles. On distingue aussi l'érosion régressive de la grande griffe d'érosion en arrière-plan.

3 Profil en long du Réal suivant le talweg principal du torrent (figure 1)



La courbe en trait plein a été extraite du MNT (2003). Nous l'avons prolongée, pour le tronçon situé entre la confluence et le barrage-gué, par des mesures de terrain (trait pointillé).

▶ typique d'un bassin relativement jeune et encore en ouverture. Enfin, le vallon est bien végétalisé, recouvert en grande partie par une forêt de résineux. Les zones dénudées correspondent pour l'essentiel à une grande griffe d'érosion située dans le bassin de réception en rive gauche du chenal* principal (figure 1).

Des études géologiques détaillées du bassin versant du Réal ont été conduites par Quélenec et Rouire (1981) et Staub (1998). Ces auteurs montrent que le bassin est caractérisé par des processus d'érosion très actifs. De manière notable, plus de 70 % de sa superficie sont occupés par des couvertures quaternaires tendres : alluvions*, éboulis ou moraines*. La formation la plus caractéristique, située dans la partie haute (bassin de réception) en rive gauche de la ravine* principale, est un éboulis lité composé de nombreux blocs généralement gréseux englobés dans une matrice argilo-sableuse. L'épaisseur de cette formation, d'origine vraisemblablement glaciaire (moraine ou alluvions d'obturation fluvioglaciales – *ndlr : pour simplifier, cette formation sera qualifiée de « morainique » dans la suite*), pourrait dépasser par endroit la centaine de mètres. Elle est affectée de processus de ravinement* très spectaculaires : canyons* et ravines aux parois sub-verticales, cheminées de fées*, traces d'éboulements fréquents (figure 2). Le canyon le plus marqué correspond à la grande griffe d'érosion bien visible sur la photo aérienne (figure 1). L'observation de documents anciens (figure 2) montre que cette grande griffe est le siège d'une érosion régressive intense (volumes érodés estimés à 45 000 m³/an).

En rive droite, le paysage porte, au niveau du barrage BA6 (figure 1), les stigmates d'un grand glissement datant des années 1920-1930 qui s'est développé dans des formations marneuses* d'âge callovo-oxfordien. Des photographies datant des années 1900 montrent que ces marnes* étaient à l'origine recouvertes d'une puissante

couverture quaternaire qui a été déblayée à la suite du glissement. Ce glissement semble aujourd'hui stabilisé et les marnes, bien végétalisées, sont affectées par des processus de ravinements relativement peu intenses.

Le chenal principal

Le chenal du Réal est caractérisé par une tendance très nette à l'exhaussement*. Sur le terrain, deux zones de dépôt préférentielles peuvent être identifiées : entre les barrages BA6 et BA4 (figure 2, largeur du chenal dans cette zone : 40-50 m), et entre le barrage BA1 et le barrage-gué (largeur du chenal dans cette zone: 20-25 m). Ces deux zones présentent un bombement central très marqué qui tend à forcer les écoulements liquides sur les bords du chenal. En aval du barrage BA5 ainsi qu'en amont du barrage-gué, les écoulements ainsi repoussés ont ouvert de véritables chenaux secondaires dans les arbres, en rive gauche. Les dépôts observés dans le lit ont en général un aspect chaotique et granulaire (absence de matrice fine visible). Même si des traces de charriage* sont localement reconnaissables (dépôts bien classés), la plupart de ces dépôts correspondent vraisemblablement à des laisses plus ou moins lessivées et remaniées de laves torrentielles. Certains d'entre eux ont d'ailleurs conservé l'aspect en lobe allongé très caractéristique des débordements de laves.

En aval du barrage-gué, le Réal s'écoule dans un chenal régulièrement curé par la municipalité de Péone afin de prévenir les débordements lors des crues. Le lit est relativement étroit dans tout ce tronçon (10-15 m) et présente, immédiatement à l'aval d'une passerelle métallique, un coude très marqué vers la droite (figure 1). À cet endroit, le Réal contourne en fait ce qui peut être considéré comme son cône de déjection*, même si celui-ci est très peu développé (le faible développement du cône de déjection du Réal est vraisemblablement imputable à la forte capacité de transport du Tuébi qui permet d'évacuer une grande partie des matériaux apportés à la confluence). Au niveau de la confluence, nous avons noté lors de nos visites en 2004 et 2007, que le lit du Réal était perché de 2 à 3 m par rapport à celui du Tuébi. La zone de confluence elle-même présente un aspect très chahuté, avec présence de nombreux dépôts provenant des crues des deux torrents. Signalons enfin que le tronçon du Tuébi entre la confluence et le village de Péone est endigué (figure 1).

Le profil en long du Réal présente une très longue portion linéaire de pente 11-12 %, s'étendant depuis la confluence jusqu'au barrage BA5 (figure 3). Entre les barrages BA5 et BA6, la pente se raidit quelque peu, devenant voisine de 15 %. Ensuite, au-delà du barrage BA6, le profil montre un raidissement régulier en allant vers l'amont du bassin de réception.

Une correction torrentielle efficace mais peu pérenne

Entre 1933 et 1983, une série de sept grands barrages de correction a été implantée dans le vallon du Réal (figure 1). En complément, des travaux visant à limiter la

production sédimentaire des ravines du bassin de réception (gabions*, seuils, plantations) ainsi que des versants du chenal (banquettes préfabriquées) ont également été conduits. Globalement, ce programme de correction active paraît avoir fait preuve d'efficacité. Ainsi, la comparaison entre la situation actuelle et celle en 1938 montre que les berges du tronçon BA3-BA6 se sont considérablement revégétalisées et stabilisées durant la période (figure 2). On note aussi que de nombreuses ravines dans le bassin de réception sont aujourd'hui partiellement végétalisées, et ne contribuent donc plus ou très peu à l'approvisionnement sédimentaire du chenal principal. Seule la grande griffe d'érosion située en rive gauche semble avoir été rétive aux tentatives de correction. Cependant, et malgré ces succès, la correction active du Réal est confrontée à un grave problème d'absence de pérennité des ouvrages mis en place. En particulier, un enfouissement systématique des barrages est à déplorer, et ce en dépit de rehausses successives sur plusieurs d'entre eux. Trois barrages sont aujourd'hui complètement enfouis (BA1, BA2, BA3), et trois n'émergent plus qu'au niveau des ailes (BA4, BA5, BA7). En outre, beaucoup des petits ouvrages qui avaient été mis en place dans le bassin de réception ont aujourd'hui disparu.

Les caractéristiques des crues torrentielles du Réal

Le Réal présente les caractéristiques d'un torrent à dynamique très active. D'après la fréquence des interventions de la municipalité de Péone pour dégager le barrage-gué situé sur une route communale, il semble que l'occurrence de crues significatives soit quasiment annuelle. En outre, et même s'il ne faut pas exclure *a priori* la possibilité d'observer également des crues liquides en charriage, de nombreux indices désignent le Réal comme un gros producteur de laves torrentielles : chenaux en U dans le bassin de réception et les zones de transit des écoulements, dépôts et laisses de crues caractéristiques, traces sur la végétation, témoignages de riverains... Malheureusement, les archives historiques concernant les crues passées sont très parcellaires et imprécises. Seuls les événements majeurs ayant occasionné des dégâts dans les zones habitées ou sur les ouvrages de correction ont été consignés. En outre, la nature exacte du phénomène (charriage ou lave torrentielle) n'a en général pas été reportée, et aucune estimation chiffrée des volumes de matériaux mis en jeu n'est disponible. La caractérisation des crues extrêmes susceptibles de se produire dans le Réal a donc dû se fonder principalement sur des méthodes prédictives.

Le cas des crues en charriage

Aucune mesure directe de débit n'est effectuée à proximité du torrent du Réal. L'estimation des débits liquides de crue a donc été réalisée par application de méthodes empiriques sommaires à partir des caractéristiques des pluies (cf. Deymier *et al.*, 1995 ; Galea et Ramez, 1995, pour une synthèse des différentes méthodes existantes). Les pluies centennales de différentes durées

peuvent être quantifiées relativement précisément grâce à plusieurs analyses statistiques des précipitations dans les Alpes-Maritimes disponibles dans la littérature (projet Interreg II France-Italie ; Djerboua, 2001 ; Berolo et Laborde, 2003). Nous avons ainsi retenu les valeurs de $P_{100/24h} = 170$ mm pour la pluie centennale journalière, et de $P_{100/1h} = 50$ mm pour la pluie centennale de durée 1 h, durée correspondant au temps de concentration du bassin (estimé grossièrement). Le recoupement des différentes méthodes sommaires appliquées aboutit alors à considérer un débit liquide centennal de pointe compris dans la fourchette 14-22 m³/s. Nous avons retenu la valeur $Q_l = 20$ m³/s.

Le débit solide en charriage Q_s associé à un débit liquide Q_l peut être estimé à partir de la formule simplifiée de Meunier (1991) : $Q_s / Q_l = 8,2I^2$, où I est la pente du tronçon considéré. En faisant en outre une hypothèse sur la forme de l'hydrogramme* de crue (nous avons ici considéré un hydrogramme triangulaire, de temps de montée égal au temps de concentration, et de temps de décrue égal à deux fois le temps de concentration), on peut ensuite en déduire le volume solide transporté par charriage. Avec une pente de 12 % correspondant au tronçon final du Réal à l'amont immédiat de sa confluence avec le Tuébi, on obtient ainsi, pour le débit liquide centennal de 20 m³/s, un volume solide transporté en charriage de l'ordre de 13 000 m³. Etant données les fortes incertitudes associées aux méthodes simplifiées employées, il est clair que cette valeur de transport solide par charriage ne doit être considérée que comme indicative.

Il faut noter en outre que ce ne sont pas nécessairement les débits liquides extrêmes qui produisent, en volume, les transports solides les plus importants. Des pluies plus longues, même si elles engendrent un débit liquide plus faible, peuvent conduire à des volumes solides transportés supérieurs. Afin d'évaluer cet effet, on peut estimer le transport solide que produirait une pluie centennale journalière, en supposant que le rapport entre les transports solides produits par des pluies de durées différentes est égal au rapport des lames d'eau correspondantes. On aboutit dans ce cas à un volume solide transporté en charriage à l'exutoire du Réal de l'ordre de 40 000 m³.

Le cas des laves torrentielles

Les volumes prévisibles

Les mécanismes de déclenchement des laves torrentielles dans le Réal ne sont pas connus avec précision. Néanmoins, au vu des matériaux retrouvés dans les dépôts, il semble clair que les laves prennent généralement naissance dans les raides formations morainiques du bassin de réception, et sans doute essentiellement dans la grande griffe d'érosion. Deux mécanismes de génération différents sont alors envisageables : soit des glissements/déstabilisations localisés se transformant ensuite en coulées, soit une érosion plus diffuse dans les différentes ravines avec des écoulements se concentrant progressivement jusqu'à dégénérer en laves. Dans le cas de laves torrentielles résultant d'un mécanisme de type glissement-coulée, une étude géotech-

2 Résultats des différentes méthodes globales sommaires utilisées pour l'estimation du volume des laves du Réal

Méthode sommaire	Volume (m ³)
Takei (1984)	21 000
Kronfellner-Kraus (1985)	40 000 – 60 000
D'Agostino (1996)	46 000
D'Agostino <i>et al.</i> (1996)	27 000

Méthode sommaire	Volume (m ³)
Bianco <i>et al.</i> (2001)	11 000
Brochot <i>et al.</i> (2003)	36 000
Rickenmann (1995)	31 000 – 50 000

Cf. Brochot *et al.* (2002) pour une synthèse des différentes méthodes.

► nique conduite par Jomard (2003) a montré que seules des déstabilisations impliquant des volumes inférieurs à 65 000 m³ étaient possibles dans les formations morainiques. Ce mécanisme de déclenchement est donc susceptible de donner lieu à des laves torrentielles apportant des volumes de l'ordre de 60 000 m³ à la confluence (en supposant une certaine quantité de dépôt dans le chenal).

Dans le cas de laves résultant plutôt d'une érosion diffuse dans le bassin de réception, les volumes attendus peuvent être estimés par application de méthodes globales sommaires fondées sur des ajustements statistiques à partir de catalogues d'événements bien documentés (tableau 2 ; cf. Brochot *et al.* [2002] pour une synthèse des différentes méthodes disponibles). Aucune de ces méthodes sommaires n'a été validée spécifiquement dans la région du Réal. Néanmoins, le fait que les résultats fournis par la plupart des méthodes que nous avons employées convergent dans la fourchette de volume 40 000-60 000 m³, semble accorder quelque crédit à ce résultat. En complément, l'application de la méthode géomorphologique de Hungr *et al.* (1984) fournit également, dans le cas du Réal, un volume de lave de l'ordre de 50 000 m³.

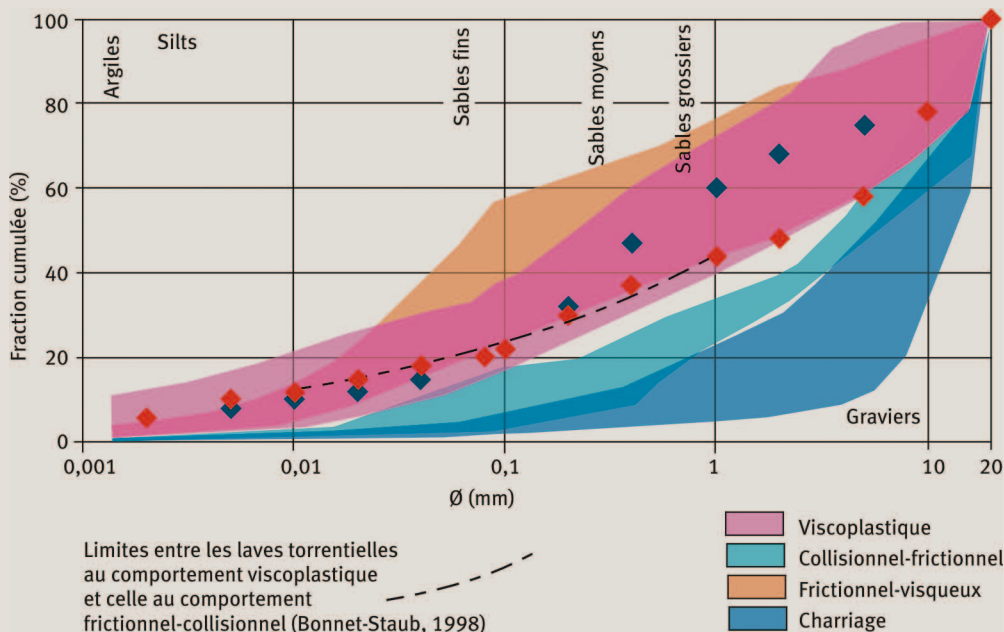
Au final, nous proposons de retenir, pour les laves torrentielles, un événement de référence ayant un volume de 60 000 m³. Ceci correspond typiquement à la mobilisation d'un seul des mécanismes de déclenchement évoqués ci-dessus. Par ailleurs, et même si cela semble peu probable, on ne peut exclure complètement une conjonction des deux mécanismes. Un tel événement, qui impliquerait un volume de lave de l'ordre de 120 000 m³, pourrait être considéré comme un événement maximal prévisible. Afin de caractériser complètement ces événements (événement de référence et événement maximal prévisible), il faudrait en principe fournir également une estimation de leur fréquence* d'occurrence. Malheureusement, les méthodes sommaires mises en œuvre ne renseignent pas sur ce point, et nous ne disposons pas de données historiques suffisantes pour aller plus loin.

Le type probable des laves et leur rhéologie

Le type de comportement mécanique des laves torrentielles – boueux (viscoplastique*) ou granulaire – est une caractéristique cruciale à déterminer pour pouvoir procéder ensuite à des calculs hydrauliques (Cousot, 1996). Dans le cas du Réal, la texture de surface des dépôts observés sur le terrain, qui présentent une carapace macroporeuse d'apparence peu cohésive, pourrait faire penser à des laves granulaires. Toutefois, cette observation doit être interprétée avec précaution du fait du lessivage des fines par les écoulements post-crue. Au contraire, la présence dans le chenal de nombreux lobes bien formés, avec des fronts raides et très nets, est plutôt caractéristique de laves boueuses.

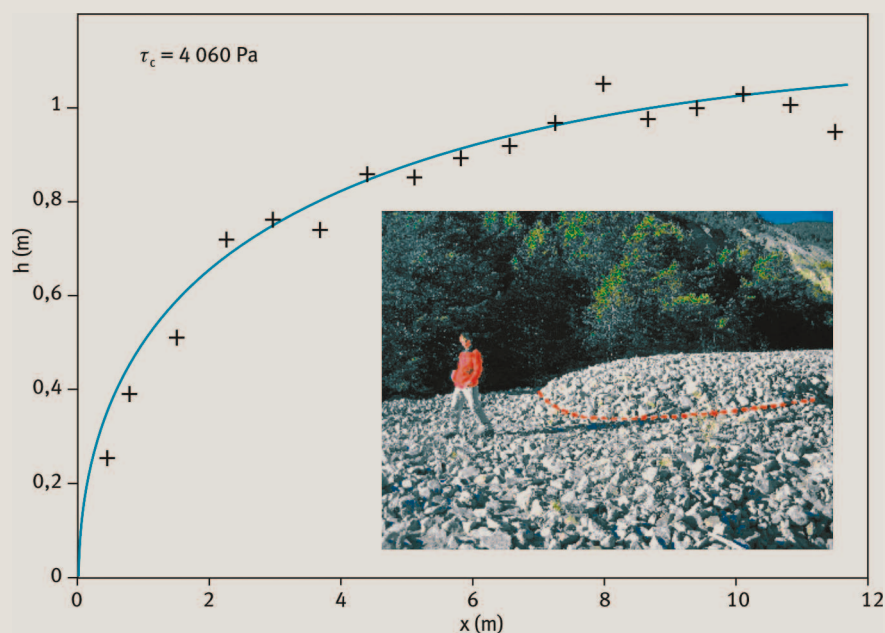
Pour être fiable, la détermination du type de lave doit être fondée sur une analyse granulométrique* et/ou rhéologique* des matériaux déposés, en essayant de collecter des échantillons les moins lessivés possibles. Staub (1988) a ainsi procédé à une analyse granulométrique (fraction < 20 mm) d'échantillons prélevés dans des dépôts récents de laves torrentielles du Réal (l'un d'eux provenant même d'un dépôt « frais », c'est-à-dire de moins de 12 h). Nous avons repris ces données et les avons superposées sur les fuseaux granulométriques de Bardou (2002), qui mettent en correspondance la distribution granulométrique de la fraction inférieure à 20 mm et le comportement rhéologique du matériau (figure 4). Les deux échantillons analysés figurent clairement dans le fuseau des laves boueuses (viscoplastiques). Nous retenons donc que les laves torrentielles du Réal présentent probablement un comportement mécanique de type boueux.

La valeur de la contrainte-seuil* τ_c , qui constitue le paramètre rhéologique principal des laves boueuses, peut être estimée à partir de la forme des lobes de dépôt retrouvés sur le terrain (Cousot, 1996). Cette méthode d'estimation présente l'avantage d'être relativement peu sensible au lessivage des argiles, et peut donc être conduite sur des dépôts anciens. Nous avons ainsi levé les profils en long de quatre lobes situés dans la zone de dépôt entre les barrages BA4 et BA5. Dans tous les cas,



4 En haut : courbes granulométriques de deux échantillons de matériaux de laves torrentielles du Réal (losanges bleus et rouges : données de Staub, 1998) superposées sur les fuseaux granulométriques établis par Bardou (2002). Le fuseau correspondant aux laves boueuses est celui figuré en couleur rose.

Ci-contre : profil en long d'un des lobes de dépôt levés (croix) et ajustement optimal par la prédiction théorique. L'insert présente une photo du lobe considéré.

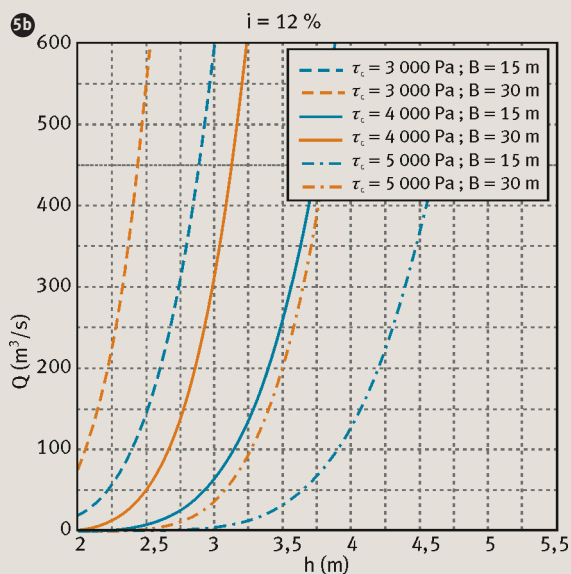
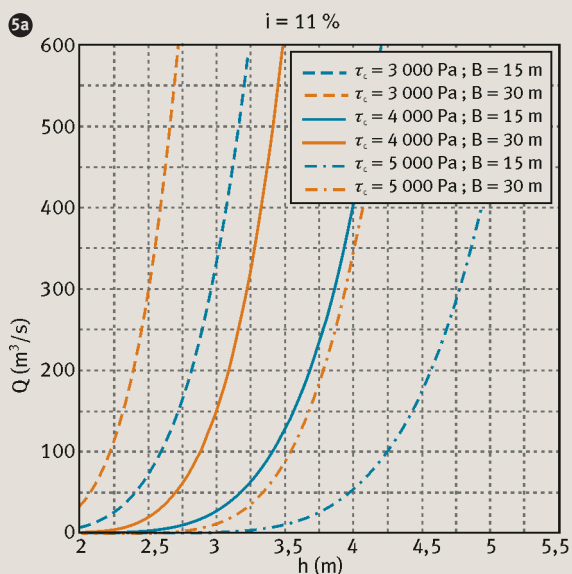


l'ajustement de la prédiction théorique sur les données s'est révélé satisfaisant (figure 4), et fournit une valeur de contrainte-seuil τ_c dans la gamme 3 000-5 000 Pa (en supposant une densité $\rho = 2\,300\text{ kg/m}^3$). Cette gamme est tout à fait cohérente avec les contraintes-seuils typiques des laves torrentielles boueuses citées dans la littérature (Cousot, 1996).

Les hauteurs d'écoulement

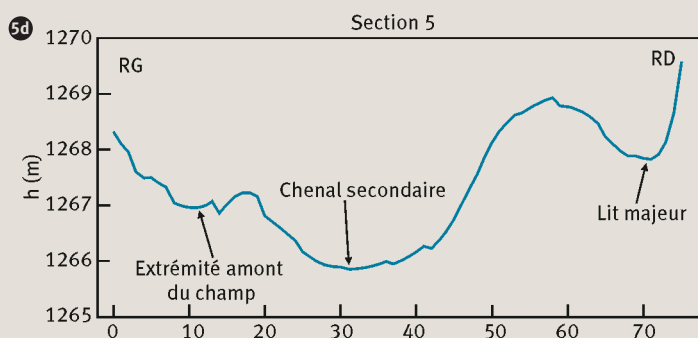
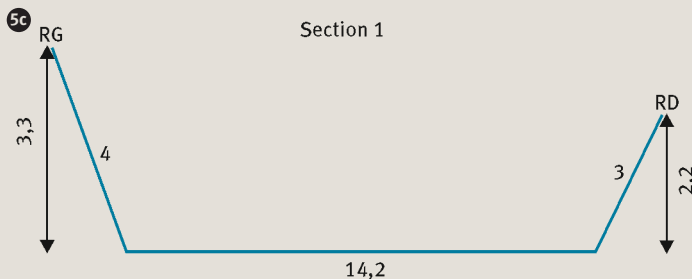
Lorsqu'il s'agit de laves torrentielles boueuses, les hauteurs d'écoulement maximales dans des sections données peuvent être estimées assez simplement à partir des relations débit-hauteur en régime permanent uniforme établies par Cousot (1996) (figure 5). Pour le Réal, nous

ne disposons d'aucune estimation directe du débit de pointe des laves. De manière heuristique, et en nous basant sur les relations empiriques proposées par Rickenmann (1999) (encadré 1, p. 147), nous avons choisi de retenir une valeur de débit de pointe $Q_p = 400\text{ m}^3/\text{s}$ aussi bien pour l'événement de référence que pour l'événement maximal prévisible. Par « chance », comme le montrent les abaques de la figure 5, la hauteur d'écoulement est en fait relativement peu sensible au débit. Ainsi, la grande incertitude associée à notre estimation du débit n'aura finalement que peu d'incidence sur les hauteurs d'écoulement calculées, et ce d'autant que les autres sources d'incertitude affectant le calcul des hauteurs sont nombreuses. Citons en particulier la non-prise



5a : relations débit-hauteur dans un canal de section trapézoïdale pour une pente de 11 % et différentes valeurs de contrainte seuil τ_c et de largeur de base B et 5b : pour une pente de 12 %.

5c : profils en travers du chenal du Réal au niveau du coude vers la droite à l'aval du barrage-gué (section 1, pente locale 11 %) et 5d : au niveau du sommet du champ à l'amont du barrage-gué (section 5, pente locale 12 %).



► en compte du front granulaire (hypothèse de régime permanent uniforme), qui conduit vraisemblablement à sous-estimer les hauteurs réelles.

Nos visites de terrain, ainsi que l'examen des photographies aériennes, nous ont permis d'identifier plusieurs sections du Réal comme potentiellement critiques. Le calcul des hauteurs d'écoulement maximales prévisibles h_m dans ces sections montre que deux d'entre elles sont plus particulièrement susceptibles de connaître des débordements. La première est située au niveau du coude vers la droite en aval du barrage-gué (figure 1, figure 5). À cet

endroit, un débordement en rive gauche est probable en cas de lave torrentielle correspondant au scénario de référence (h_m dans la gamme 3-5 m : figure 5). Cependant, les matériaux qui déborderaient resteraient vraisemblablement bien canalisés par un chenal fossile du Réal (situé dans la zone boisée en rive gauche du chenal actuel) avant de rejoindre rapidement le lit du Tuébi. La seconde section critique, *a priori* plus problématique, est localisée juste à l'amont du barrage-gué, au niveau du sommet d'un champ situé en rive gauche (figure 5). Un débordement du champ à partir du chenal secondaire dans la forêt qu'empruntent à l'heure actuelle les

1 RELATIONS EMPIRIQUES DE RICKENMANN (1999)

Ces relations empiriques très simples relient le débit de pointe Q_p d'une lave torrentielle à son volume V , en distinguant le cas des laves boueuses et granulaires. Notons cependant que la distinction boueuse/granulaire considérée par l'auteur de cette méthode ne recouvre pas tout à fait la classification rhéologique adoptée dans notre étude. En outre, la dispersion des données ayant servi à établir ces relations est extrêmement forte. Dans notre cas, l'application de la formule correspondant à l'hypothèse boueuse fournit des valeurs de débit de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ environ pour l'événement de référence ($V = 60\,000 \text{ m}^3$), et de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ pour l'événement maximal prévisible ($V = 120\,000 \text{ m}^3$). Dans l'hypothèse granulaire, les valeurs correspondantes sont respectivement de $700 \text{ m}^3/\text{s}$ et de $1\,200 \text{ m}^3/\text{s}$. L'estimation que nous avons finalement retenue ($Q_p = 400 \text{ m}^3/\text{s}$) est intermédiaire entre les résultats fournis par les deux hypothèses, en excluant la valeur de $1\,200 \text{ m}^3/\text{s}$ qui paraît déraisonnable.

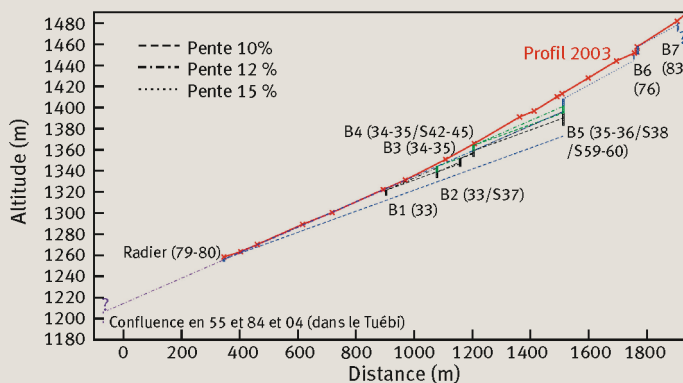
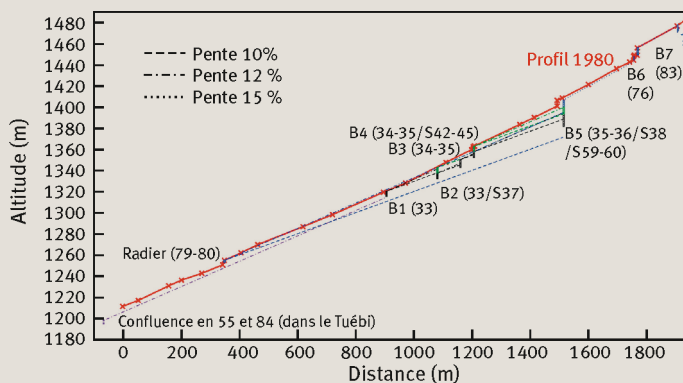
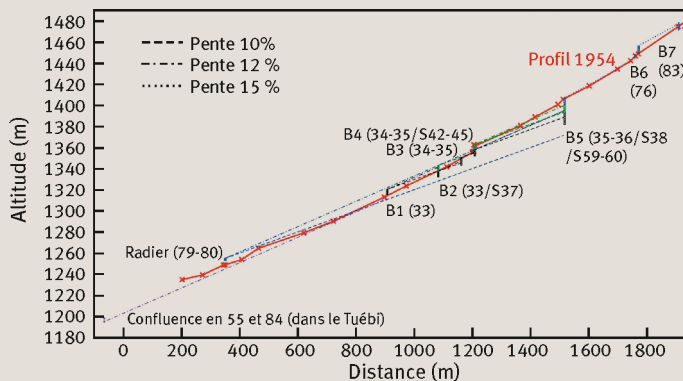
écoulements est très probable, et ce même en cas de lave torrentielle d'intensité inférieure au scénario de référence (h_m dans la gamme 2,5-3,5 m). Une fois ce débordement opéré, les écoulements pourraient alors envahir une zone relativement grande, correspondant typiquement au cône de déjection du torrent.

En aval de la confluence, le calcul montre que la surface sous le pont de Péone est suffisante pour permettre le transit d'une lave torrentielle du Réal correspondant à l'événement de référence, mais que la marge de sécurité est faible. De manière générale, le chenal du Tuébi à la traversée de Péone semble être correctement dimensionné pour laisser transiter les crues provenant du Réal.

Cependant, dès la confluence, il y a multiplication des scénarios possibles selon l'état du Tuébi au moment de la crue du Réal. En nous limitant aux situations où seul le Réal est en crue, il devient en particulier de considérer la possibilité que des dépôts importants se forment au niveau de la confluence Réal-Tuébi, et qu'une crue ultérieure se produise. De tels dépôts pourraient résulter d'une lave torrentielle, mais aussi d'une crue longue en charriage. Dans le cas d'une lave, la connaissance de la contrainte-seuil permet d'obtenir directement une estimation de l'épaisseur de dépôt maximale envisageable (Coussot, 1996) : $h_d = \tau_c / [\rho g \sin(\arctan I)] \approx 3 \text{ m}$ (avec $I = 8 \%$ la pente du Tuébi au niveau de la confluence).

En présence d'un tel dépôt, le débordement d'une lave torrentielle du Réal correspondant à l'événement de référence deviendrait alors très probable, que ce soit à l'amont du pont en rive gauche (revanche* de la digue insuffisante) ou au niveau du pont. En outre, l'occurrence de débordements liquides en cas de crue ultérieure en charriage deviendrait également très probable du fait de la présence d'une ouverture dans la digue en rive gauche, juste en face de la confluence.

6 Profils en long du Réal à différentes époques. Les profils anciens (1954, 1980) ont été retrouvés dans les archives du service RTM 06



Tous les profils ont été rééchantillonnés aux mêmes points et recalés au mieux en se fondant sur la crête des barrages encore visibles (entre parenthèses : dates de construction des ouvrages et de leurs rehausses éventuelles). Pour simplifier les comparaisons, des pentes de référence à 10, 12 et 15 % ont été tracées à partir de la crête des différents ouvrages. Les altitudes de la confluence en 1955 et 1984, ainsi qu'une estimation de l'altitude en 2004 (mesure sommaire sur le terrain) sont également figurées.

3 Récapitulatif des aléas engendrés par les crues du Réal à Péone, et enjeux concernés

Dysfonctionnement	Aléa (probabilité d'occurrence)	Enjeux concernés
Débordement d'une lave en amont du barrage-gué	Très fort	Faibles à moyens (route d'Aliège, champs, grange)
Débordement d'une lave au niveau de la passerelle	Fort	Quasi nuls
Débordements liquides par l'ouverture dans la digue en aval du tunnel	Faible à moyen (uniquement en cas de dépôt préexistant dans le chenal ou de crue longue en charriage sans intervention)	Très importants (quartier d'habitation en rive gauche du Tuébi)
Débordement d'une lave au-dessus de la digue en rive gauche du Tuébi.	Faible (uniquement en cas de dépôt préexistant dans le chenal)	
Blocage d'une lave sous le pont de Péone et débordements		

► Éléments sur la dynamique globale du bassin

Dans une logique de gestion du risque* et des apports sédimentaires, il est important de pouvoir prédire si la situation actuelle du bassin Réal est stable. L'exhaussement du lit, dont les signes sur le terrain sont clairs, tend à indiquer que ce n'est pas le cas. Afin d'étudier l'origine de cet exhaussement et son évolution probable, nous avons comparé les profils en long du Réal à différentes époques, depuis 1935 jusqu'à 2003 (figure 6). Globalement, on observe que le lit du Réal subit un exhaussement régulier depuis le profil de 1954. Le volume déposé dans le lit est de l'ordre de 160 000 m³ entre 1954 et 1980, et de 140 000 m³ entre 1980 et 2003 : ceci correspond en moyenne à un dépôt de l'ordre de 6 000 m³/an. Dans le détail, on constate également que le dépôt ne s'effectue pas de façon homogène : durant la période 1954-1980, l'exhaussement s'est surtout produit dans la zone située à l'aval du barrage BA4, alors que c'est le tronçon situé entre les barrages BA4 et BA6 qui a connu l'essentiel des dépôts durant la période 1980-2003 (figure 6).

Afin d'analyser cette évolution depuis 1954, il est commode de s'appuyer sur une notion de pente d'équilibre du lit dont la valeur semble être ici voisine de 12 % du moins dans la partie aval du torrent. En effet, comme on l'a déjà noté, le profil en long actuel du Réal présente une longue portion de pente quasi-constante autour de 12 %, depuis la confluence jusqu'au barrage BA5 (figure 3). Cette même pente de 12 % se retrouve également dans de nombreux tronçons des profils plus anciens (figure 6). Notons toutefois que, dans le cas du Réal, l'origine d'une telle pente d'équilibre n'est pas très claire dans la mesure où la dynamique du torrent est essentiellement dominée par les laves torrentielles (même si le rôle du charriage n'est pas complètement négligeable). Il faut admettre qu'il existe également, pour les laves torrentiel-

les, une pente particulière (ou du moins une gamme de pentes) correspondant à un équilibre entre érosion et dépôt, et donc pour laquelle le lit est globalement stable.

En admettant cette valeur de pente d'équilibre de 12 %, il apparaît alors immédiatement que la nécessité de rehausses de la plupart des barrages s'explique principalement par une sous-estimation de la pente d'équilibre lors de leur construction (mauvaise coordination des ouvrages entre eux : figure 6). On note également que le profil en long de 1954 semble avoir été relativement proche de l'équilibre (figure 6), avec un premier point de calage à la confluence et d'autres sur les crêtes de chaque barrage émergé à l'époque (BA1, BA2 et BA4). Ceci indique que la cause majeure de l'exhaussement du profil de 1980 par rapport à celui de 1954 pourrait avoir été la construction du barrage-gué en 1979-1980, lui aussi mal coordonné (altitude en crête située environ 6 m à l'aplomb du point correspondant sur le profil de 1954 : figure 6), et qui aurait rompu l'équilibre du lit. Dans un premier temps après la construction de cet ouvrage, le barrage BA4 a continué à jouer son rôle de point de calage et l'exhaussement induit est donc resté limité au tronçon situé à l'aval (situation observée en 1980). Dans un deuxième temps, le barrage BA4 a fini par être quasiment enfoui lui aussi, et l'exhaussement s'est alors propagé vers l'amont (situation actuelle). En outre, l'exhaussement est sans doute encore amplifié par l'élargissement progressif du lit dans le tronçon BA4-BA6, qui favorise le dépôt des laves. On constate également, depuis 1955, une augmentation régulière de l'altitude du Tuébi à la confluence (plus de 3 m entre 1955 et 1984 : figure 6). Ceci pourrait aussi avoir contribué à l'exhaussement du Réal. Toutefois, le caractère perché du Réal observé à l'heure actuelle, sans doute imputable aux interventions anthropiques en aval du barrage-gué, semble indiquer que la confluence ne joue plus véritablement un rôle de point de calage depuis la construction de cet ouvrage.

En termes de prospective, l'évolution du lit enregistrée depuis 1980 laisse à penser que l'exhaussement va se poursuivre, voire s'amplifier dans le futur, en particulier dans le tronçon BA4–BA6 qui présente à l'heure actuelle des caractéristiques très favorables au dépôt des laves. Le chenal à l'aval de BA4 semble aujourd'hui relativement proche de l'équilibre (figure 6), mais il est probable que si elle s'amplifie entre BA4 et BA6, la tendance au dépôt finisse également par se propager vers l'aval (ce qui semble d'ailleurs déjà être le cas à l'amont du barrage-gué). À terme, on peut aussi craindre qu'un élargissement et un exhaussement généralisés du chenal ne viennent à provoquer une déstabilisation des berges par érosion latérale et sapement de pied dus aux écoulements qui sont progressivement repoussés sur les bords du bombement central. L'événement le plus défavorable serait sans doute une réactivation du grand glissement en rive droite dans les terrains marneux. Cependant, du fait de la raideur des berges, des glissements d'ampleur plus modeste sont également susceptibles de se développer en de nombreux endroits du bassin versant.

L'aléa torrentiel à Péone

Les résultats présentés dans les parties précédentes permettent d'obtenir une qualification du niveau de l'aléa torrentiel induit par les crues du Réal à Péone (tableau 3), ainsi que de l'évolution probable de cet aléa dans le futur. À ce stade, et en l'absence de données concernant les fréquences des événements considérés, cette analyse reste essentiellement qualitative. Parmi les différents dysfonctionnements récapitulés dans le tableau 3, c'est l'occurrence de débordements en rive gauche du Tuébi, à l'amont du pont, qui serait la plus dommageable. En effet, ces débordements affecteraient directement tout un quartier d'habitation (figure 1). Rappelons toutefois qu'un tel scénario ne serait possible qu'en cas de préexistence d'un dépôt important dans le chenal du Tuébi, et impliquerait donc la survenue rapprochée de deux crues de forte intensité entre lesquelles une intervention de curage du chenal n'aurait pas été possible. Sa probabilité* reste donc faible. Au final, le risque – résultant du croisement entre le niveau d'aléa et la vulnérabilité des enjeux concernés – induit par les crues du Réal à Péone peut donc être considéré actuellement comme relativement faible. Rappelons que nous ne nous intéressons, dans cette étude, qu'aux crues du Réal. Toutefois, la présence d'un dépôt important à la confluence serait évidemment tout aussi problématique – et de nature à augmenter l'aléa de débordement à Péone – en cas de crue ultérieure du Tuébi.

Concernant l'évolution future de l'aléa, les conséquences envisageables d'une éventuelle poursuite, voire intensification, de l'exhaussement du lit du Réal sont doubles. D'une part, le stock de matériaux disponibles dans le chenal va augmenter, et une reprise en masse de ces sédiments lors d'un épisode de crue exceptionnelle pourrait être à craindre. D'autre part, comme nous l'avons déjà évoqué, la poursuite de l'exhaussement est

susceptible, à terme, d'entraîner une déstabilisation des berges du torrent. Au final, on pourrait donc être amené à devoir reconsidérer à la hausse le volume des laves torrentielles extrêmes dans le futur. Pour autant, une telle augmentation du volume prévisible des laves n'aurait pas, directement, de conséquence majeure sur la qualification des aléas présentée dans le tableau 3. En effet, la valeur de débit de pointe de référence considérée dans cette étude (400 m³/s) paraît déjà relativement sécuritaire et, de plus, la hauteur d'écoulement des laves dans une section donnée ne dépend que faiblement du débit (figure 5). Cette conclusion rassurante ne doit toutefois pas occulter le fait qu'un accroissement du volume des laves torrentielles ne serait pas sans incidence sur la gestion des dépôts et des apports sédimentaires après les crues. En particulier, la probabilité qu'un dépôt important se forme à la confluence, avec les conséquences potentiellement néfastes que l'on a déjà évoquées, augmenterait certainement.

Synthèse et recommandations

Notre étude s'est attachée à établir un diagnostic complet du fonctionnement torrentiel du Réal en utilisant les données existantes. Nous avons analysé les aspects hydrologiques, sédimentaires et hydrauliques afin d'aboutir à une qualification de l'aléa torrentiel ainsi que de son évolution probable dans le futur. Globalement, il apparaît que les risques induits par les crues du Réal à Péone sont relativement faibles. Néanmoins, il nous semble que deux mesures simples seraient de nature à minimiser encore les risques à peu de frais, et sont donc recommandables :

- la fermeture de la brèche dans la digue en rive gauche en face de la confluence, ce qui permettrait d'éviter les éventuels débordements liquides ;
- et la mise en place d'une cote d'alerte dans le lit du Tuébi à Péone. Typiquement, on peut considérer que le niveau maximum acceptable du lit est le niveau actuel, particulièrement sous le pont (distance lit-tablier de 6 m en 2003). Au-delà, il conviendrait de procéder sans délai à un curage des matériaux excédentaires pour éviter tout risque de débordement lors d'une crue ultérieure.

Dans le futur, on peut s'attendre à ce que l'exhaussement du lit observé à l'heure actuelle (et vraisemblablement depuis la construction du barrage-gué) se poursuive, voire s'amplifie. La principale crainte est que cet exhaussement ne vienne progressivement ruiner les résultats que la correction active mise en place depuis les années 1930 avait permis d'obtenir, en matière notamment de stabilisation des versants. Il pourrait donc être utile d'envisager, à moyenne échéance, une reprise du programme de correction afin de prévenir une telle évolution. En particulier, la mise en place de dispositifs visant à renforcer les pieds de versant (murets en gabions, fermeture des chenaux secondaires, revégétalisations ponctuelles...) serait certainement utile pour contrer l'effet de sape induit par les divagations du chenal. À plus longue échéance, la réhabilitation des six barrages actuellement

► enfouis, voire la construction d'un nouvel ouvrage au pied de la grande griffe d'érosion, pourrait également être bénéfique.

Néanmoins, les conséquences de l'exhaussement du lit sur le niveau de risque à Péone ne devraient pas être sensibles à court terme. C'est pourquoi nous recommandons de n'envisager une reprise effective de la correction active dans le vallon du Réal qu'après avoir procédé, durant quelques années, à un suivi régulier de l'activité torrentielle. La dynamique de ce bassin semble suffisamment rapide pour qu'un tel suivi puisse combler rapidement le manque actuel de données quantitatives, et lever un certain nombre des incertitudes pesant sur la connaissance du fonctionnement du torrent et de son évolution. Un tel dispositif de suivi, qui pourrait évoluer à terme vers un véritable laboratoire de terrain, présenterait en outre un intérêt scientifique certain.

D'un point de vue plus général, les bassins versants torrentiels sont des systèmes complexes dont le fonctionnement global résulte de nombreux processus en interactions mutuelles : formation des écoulements, recharge sédimentaire, stabilité des versants, équilibre dynamique du lit en fonction des différents types de crues, influences anthropiques... L'étude que nous avons conduite illustre l'importance de procéder systématiquement à un diagnostic exhaustif, permettant d'acquérir une vision d'ensemble du fonctionnement du système, avant de se lancer dans toute procédure de zonage* ou tout programme d'aménagement. Même en l'absence d'archives historiques complètes, un tel diagnostic peut être réalisé par le biais de méthodes géomorphologiques et mécaniques relativement simples. Évidemment, ces méthodes simples sont entachées d'incertitudes importantes qu'il est impératif de prendre en compte dans l'analyse des résultats. À chaque étape du diagnostic, des outils plus sophistiqués auraient pu être mis en œuvre (analyse géomorphologique complète du bassin versant, modèles hydrauliques 2D ou 3D...). Néanmoins, le bénéfice qui en aurait été retiré en termes de réduction des incertitudes, dans le cadre d'une telle étude intégrée, reste difficile à apprécier. ■

Les auteurs

Guillaume Chambon

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

Didier Richard

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

Vincent Segel

Service départemental RTM
des Alpes-Maritimes,
62 route de Grenoble,
BP 3260,
06205 Nice Cedex 3

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- **BARDOU, E.**, 2002, *Méthodologie de diagnostic des laves torrentielles sur un bassin versant alpin*, thèse de Doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- **BEROLO, W., LABORDE, J.-P.**, 2003, *Statistiques des précipitations journalières extrêmes sur les Alpes-Maritimes*, CNRS.
- **BROCHOT, S., MARCHI, L., LANG, M.**, 2002, L'estimation des volumes des laves torrentielles : méthodes disponibles et application au torrent du Poucet (Savoie), *Bull. Eng. Geol. Env.*, vol. 61, p. 389-402.
- **COUSSOT, P.**, 1996, *Les laves torrentielles, connaissances à l'usage du praticien*, Études – Équipements pour l'eau et l'environnement, Éditions Cemagref, 177 p.
- **DJERBOUA, A.**, 2001, *Prédétermination des pluies et crues extrêmes dans les Alpes franco-italiennes. Préviation quantitative des pluies journalières par la méthode des analogues*, thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

► Consulter l'ensemble des références sur le site de la revue www.set-revue.fr



Morphologie d'un lit torrentiel (Vénézuéla).