

Approches géomorphologiques de la production sédimentaire des torrents

En montagne, la production et le transport de sédiments par les torrents en crue sont générateurs de risques importants, susceptibles de porter atteinte à la sécurité des personnes et des biens. Afin de mieux comprendre les systèmes complexes mis en œuvre lors de ces phénomènes, les auteurs proposent ici différentes approches géomorphologiques de la production sédimentaire des torrents, en présentant quelques cas concrets dans les Alpes françaises.



La prévention, la prévision et la protection contre les crues* torrentielles nécessitent une meilleure connaissance des processus hydrologiques, hydrauliques et géomorphologiques qui contrôlent la production et le transfert des flux liquides et solides. Des avancées scientifiques importantes ont été réalisées ces

dernières années en matière d'hydrologie et d'hydraulique torrentielles. Elles ont permis notamment l'élaboration et l'optimisation d'approches de plus en plus performantes en matière de reproduction des débits en crue (Graff, 2004), de caractérisation du transport solide par charriage à fortes pentes (Recking, 2006) ou encore d'étalement des laves torrentielles* sur les cônes de déjection* (Laigle, 2008). En revanche, peu de travaux se sont intéressés à l'alimentation solide de ces écoulements. Des zones d'ombre importantes existent sur la recharge sédimentaire des lits à forte pente et les outils à disposition ne permettent pas de satisfaire les attentes opérationnelles en matière de prédiction des volumes solides susceptibles de se déposer sur les cônes. Hors, il s'agit d'une information cruciale pour le dimensionnement des ouvrages de protection, pour la modélisation numérique de la propagation et de l'étalement des laves et pour l'établissement de cartes d'aléas*.

La prédiction du transport solide des torrents* est particulièrement complexe, comparativement aux rivières de plaine, du fait de l'influence forte des versants et de la multiplicité des processus qui gouvernent le transfert des sédiments dans les lits (charriage et laves torrentielles). Sa caractérisation implique d'appréhender les zones contributives des versants et d'intégrer la multiplicité des processus qui interviennent dans les transferts sédimentaires internes des systèmes torrentiels. Les approches mécanistes ne parviennent pas à un tel niveau d'intégration, même si quelques tentatives de couplages existent entre les modèles de propagation de laves et de recharge sédimentaire par les glissements de terrain (Bathurst *et al.*, 1997). La géomorphologie* propose une autre façon d'aborder le problème en évaluant les transferts sédimentaires à partir de la caractérisation des phénomènes d'érosion et de dépôt et de la construction de bilans sédi-

1 PRODUCTION, RECHARGE, ÉROSION TORRENTIELLE : PRÉCISIONS TERMINOLOGIQUES

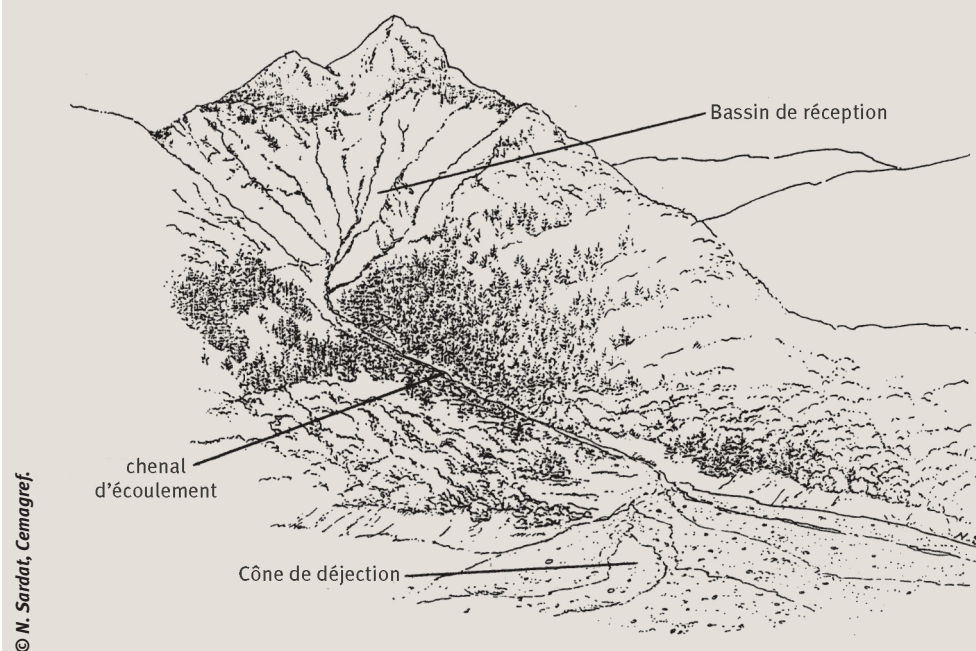
Les notions relatives à l'érosion torrentielle souffrent parfois de confusion faute de consensus dans les définitions que nous utilisons. À titre d'exemple, dans la littérature scientifique, le terme de production sédimentaire peut être employé pour désigner l'érosion des versants, les apports des versants au réseau hydrographique ou l'érosion spécifique mesurée à l'exutoire du bassin versant.

Nous employons ici le terme de production sédimentaire (traduction de *sediment yield*) pour désigner la quantité de matériaux solides qui parvient à l'entrée du cône de déjection et qui est de ce fait susceptible de porter atteinte à la sécurité des personnes et des biens installés sur les cônes de déjection. Cette quantité ramenée à la surface drainée est appelée production sédimentaire spécifique (en m^3/km^2).

Le terme de recharge sédimentaire (traduction de *sediment supply*) est employé ici pour désigner les apports solides au torrent, quelle que soit leur provenance. On peut ainsi distinguer la recharge sédimentaire par les versants de la recharge sédimentaire par érosion du lit ou des berges torrentielles.

Nous désignons enfin par érosion torrentielle l'ensemble des processus d'érosion, de transport et de dépôt des sédiments qui se produisent dans un bassin versant torrentiel.

1 Représentation schématique du bassin versant torrentiel en trois zones fonctionnelles



mentaires. Ces approches dites morphologiques, appliquées avec succès en rivières à lits de graviers, n'ont été utilisées qu'à de rares occasions sur les torrents (Veyrat-Charvillon, 2005).

Cet article a pour objectif de dresser l'état de l'art des approches géomorphologiques utilisées pour résoudre le difficile problème de la production sédimentaire des torrents (encadré 1), en se focalisant à la fois sur les approches qualitatives et quantitatives, et de présenter quelques études de cas récentes. Les méthodes dites globales, fondées sur les relations statistiques entre les caractéristiques physiques des bassins et leur réponse sédimentaire ayant déjà fait l'objet d'une revue synthétique récente (Brochot *et al.*, 1998), elles ne seront pas abordées dans cet article.

Spécificité des recharges et transferts sédimentaires pour les torrents

Il est d'usage courant de sectoriser le bassin versant* torrentiel en trois zones fonctionnelles qui se relaient de l'amont vers l'aval : le bassin d'alimentation, le chenal d'écoulement* et le cône de déjection (figure 1). On ne s'intéresse ici qu'aux zones de production et de transport car en règle générale, le cône contribue peu à la production sédimentaire et ne fait que recevoir les matériaux mobilisés en amont.

Des zones de production au fonctionnement complexe

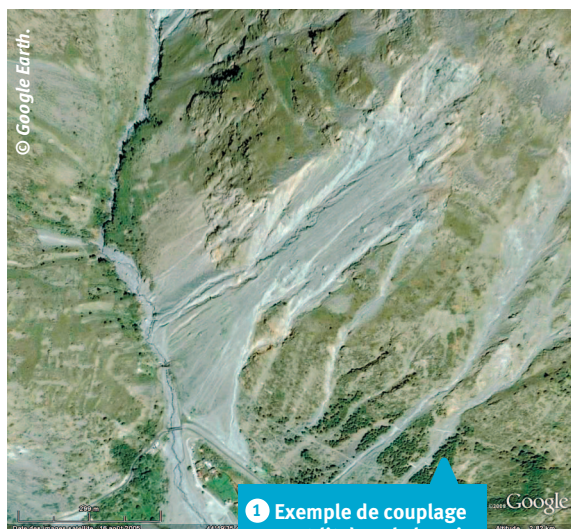
La multiplicité des processus d'érosion

La recharge sédimentaire des torrents par les versants est réalisée par un assemblage complexe de processus

d'érosion qui résulte de la variabilité spatiale des conditions physiques du bassin (géologie, relief, occupation du sol). Reid et Dunne (2007) proposent de distinguer les processus d'érosion chroniques et discrets. Les processus chroniques sont ceux qui induisent une ablation modérée (quelques millimètres ou centimètres par an) et récurrente sur des surfaces reconnaissables et circonscrites (ravinement*, reptation*, solifluxion*, éboulisation*...). Les terrains affectés peuvent être cartographiés et la recharge peut être évaluée en faisant le produit de l'ablation par unité de temps et des surfaces concernées. À l'inverse, les processus discrets se déclenchent brutalement et provoquent des recharges parfois considérables sur des pas de temps courts (glissements de terrain, coulées de débris, éboulements, écroulements...). Contrairement aux processus chroniques, ils peuvent faire l'objet d'un dénombrement et leur densité spatiale peut être mesurée. La recharge est évaluée en faisant le produit de la densité spatiale et d'un volume moyen lorsque les conditions physiques du site sont suffisamment homogènes pour produire des phénomènes de taille équivalente. Les torrents alimentés par des processus chroniques présentent une recharge sédimentaire régulière dans le temps, à l'inverse des torrents alimentés par des processus discrets, caractérisés par des apports de nature catastrophique. La plupart des torrents présentent cependant un mode d'alimentation mixte, qui contribue à générer des réponses sédimentaires complexes dans l'espace et dans le temps.

L'importance des couplages versants-lits

Toutes les surfaces en érosion sur les versants ne contribuent pas à la recharge sédimentaire du torrent. Certaines surfaces sont déconnectées du réseau hydrographi-



1 Exemple de couplage versant-lit dans le bassin du Salso Moreno, Alpes-Maritimes.

► que et les sédiments produits restent stockés sur les pentes ou sur des terrasses éloignées du chenal actif. Il est donc primordial de caractériser l'état de couplage entre les versants et les lits (ou connectivité géomorphologique) afin de délimiter les sources sédimentaires du torrent. Les zones de couplage correspondent aux interfaces versants-lits qui assurent la libre circulation des sédiments (photo 1). L'état de couplage dépend de l'agencement du système de pentes qui détermine la répartition spatiale des discontinuités sédimentaires, mais également de l'intensité des sollicitations climatiques qui contrôle les volumes susceptibles d'être mobilisés et donc les distances de propagation des phénomènes gravitaires alimentés par ces volumes. Des efforts importants restent à faire dans ce domaine, car il n'existe pas aujourd'hui de méthodes rapides et performantes pour caractériser les états de couplage des bassins versants torrentiels.

Un régime sédimentaire spécifique des têtes de bassin

Les têtes de bassins présentent un mode de fonctionnement sédimentaire spécifique, avec des phases d'accumulation de matériaux en provenance des versants et des berges et des phases de vidange brutale qui s'apparentent à des purges sédimentaires. La constitution des réserves sédimentaires amont conditionne ainsi la réponse du torrent aux sollicitations climatiques et donc la fréquence et l'intensité des laves. Certains auteurs (Bovis et Jakob, 1999) proposent de distinguer les torrents à seuil intrinsèque, dont la réponse est fortement conditionnée par l'état des réserves sédimentaires amont, des torrents à seuil extrinsèque, qui disposent toujours d'un stock suffisant pour alimenter les laves.

Dans les torrents à seuil intrinsèque, il n'existe pas de relation simple entre les forçages pluviométriques* et les réponses sédimentaires ; une même pluie peut provoquer

des réponses très différentes en fonction de la quantité de sédiments disponibles dans les têtes de bassin. Il apparaît donc utile de s'intéresser ici au taux unitaire de recharge des chenaux, défini comme le comblement réalisé par unité de temps, qui peut être quantifié à partir du cubage des matériaux accumulés depuis la dernière lave dont la date est connue (Jakob *et al.*, 2005). Ce type d'approche permet de prédire le volume maximal d'un événement extrême susceptible de remobiliser l'intégralité des réserves sédimentaires dans les chenaux. Dans les torrents à seuil extrinsèque, le stock amont n'est pas un facteur limitant et il faut plutôt s'intéresser à la recharge par érosion du lit car c'est elle qui va contrôler le volume maximal prévisible des laves.

Cette typologie fonctionnelle peut se concevoir à différentes échelles spatiales : à l'échelle régionale, il est possible de discriminer les bassins versants torrentiels à seuils intrinsèque et extrinsèque, de même qu'à l'échelle d'un bassin, il est possible de sectoriser les tronçons à seuils intrinsèques et extrinsèques.

Des modes de transport propres aux zones torrentielles

Charriage et laves torrentielles

La prédétermination de la production sédimentaire du bassin torrentiel implique de caractériser le mode de transfert des sédiments dans les lits. On distingue généralement les torrents à laves des torrents à charriage, ces deux modes de transport étant néanmoins souvent associés dans un même bassin. Le caractère monophasique des laves cohésives conduit à un mode de transfert rapide des sédiments, contrairement au charriage où la vitesse des particules est beaucoup plus lente que celle de l'eau. Ces deux modes de transport se distinguent également par le caractère réversible ou non de la mise en mouvement. Une particule prise en charge par une lave a peu de chances de se déposer sur son parcours et on parle d'irréversibilité de l'entraînement. Inversement, le charriage est caractérisé par des discontinuités spatiales plus importantes, qui se traduisent par des phénomènes de tri granulométrique et de régulation amont-aval du flux solide. Lorsque le charriage prédomine, il devient possible d'évaluer le flux solide à partir des lois de transport solide qui permettent de calculer la capacité de transport maximale du lit. Il n'existe pas d'équivalent pour les laves et dans ce cas, on se contente souvent d'estimer le flux à partir d'un taux unitaire de recharge par érosion du lit.

L'importance du profil en long

L'analyse du profil en long constitue une étape incontournable pour appréhender le fonctionnement d'un torrent. Elle consiste à repérer et à expliquer l'origine des différentes ruptures de pentes : passage de gorges rocheuses, impact d'une recharge sédimentaire latérale (glissement de terrain, affluent). La plus ou moins grande raideur du profil longitudinal renseigne également sur la nature probable des phénomènes torrentiels. Dans le cas particulier des laves torrentielles, il est admis que leur déclenchement et leur propagation nécessitent le dépassement de certains seuils de pentes. Par exemple,

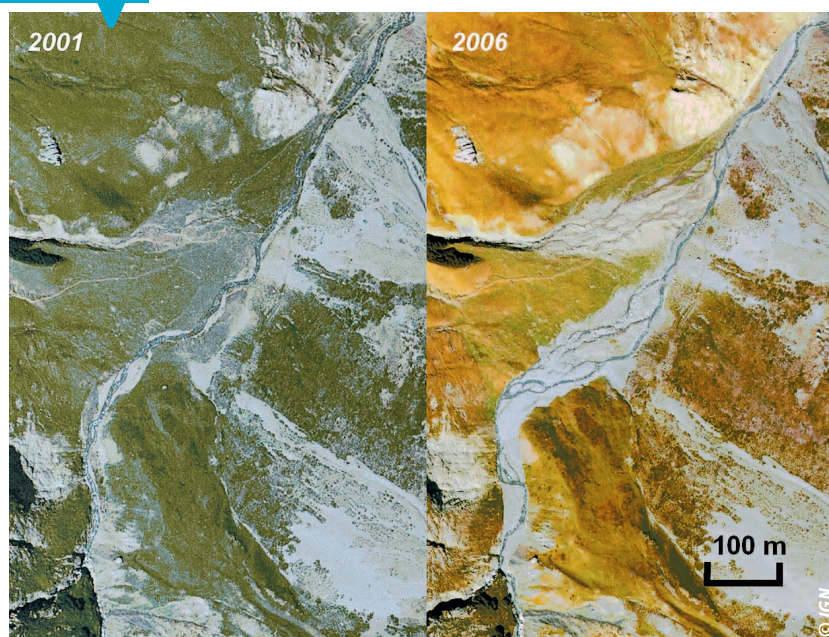
ce risque pourra difficilement être négligé si la pente des versants ou des thalwegs* érodables est d'au moins 25 à 30 % (Rickenmann, 1995).

A *contrario*, une atténuation sensible de la réponse du torrent est prévisible si l'analyse du profil en long et du lit torrentiel révèle l'existence de zones de régulation du transport solide. Généralement, ces entités sont caractérisées par une diminution nette de la pente et par des possibilités de divagations du chenal actif (photo 2). Elles ont un rôle capital sur le plan de la dynamique torrentielle car elles atténuent l'instabilité des lits situés en aval. Les torrents y déposent leurs matériaux lorsque les apports sont extrêmes et ils les reprennent lorsqu'ils sont plus modérés. Dans certains cas de torrents à laves, un arrêt total des coulées peut se produire si la pente reste suffisamment faible sur un tronçon de longueur significative. Ces pentes d'arrêt sont généralement comprises entre 3 et 10 % (Stock et Dietrich, 2006).

La morphologie torrentielle et le régime sédimentaire

Le régime sédimentaire des torrents peut être évalué qualitativement à partir de la morphologie du lit. Montgomery et Buffington (1997) ont proposé une typologie morphologique fonctionnelle des petites rivières de montagne fondée sur des observations réalisées dans les chaînes du Pacifique NW dans des bassins de taille comprise entre 0,01 et 10 km² (Oregon, Washington). Ces auteurs ont identifié et interprété sept grands types morphologi-

2 Sédimentation et divagation latérale du torrent de la Lauzette, Maurienne, à l'origine d'une régulation des apports solides de la crue de juillet 2006 (source : ONF – service RTM de la Savoie ; d'après orthophoto IGN.)



ques qui s'organisent spatialement en fonction du différentiel entre la capacité de transport et la fourniture sédimentaire du lit (figure 2). Cette typologie présente l'intérêt de permettre une sectorisation fonctionnelle du linéaire torrentiel en zone d'érosion, de transport et de dépôt-régulation. Elle offre ainsi la possibilité de construire une trame fonctionnelle qui permet de cibler par la suite l'application de modèles quantitatifs. Sa transposition aux torrents alpins n'a jamais fait l'objet d'une étude approfondie et son application mériterait sans doute quelques adaptations, notamment pour les têtes de bassin qui montrent dans les Alpes des styles morphologiques non répertoriés dans la typologie américaine. Il s'agit notamment des lits à forte pente (> 10 %) caractérisés par la présence de nappes sédimentaires éphémères (photo 3).

Les approches morphologiques de la production sédimentaire

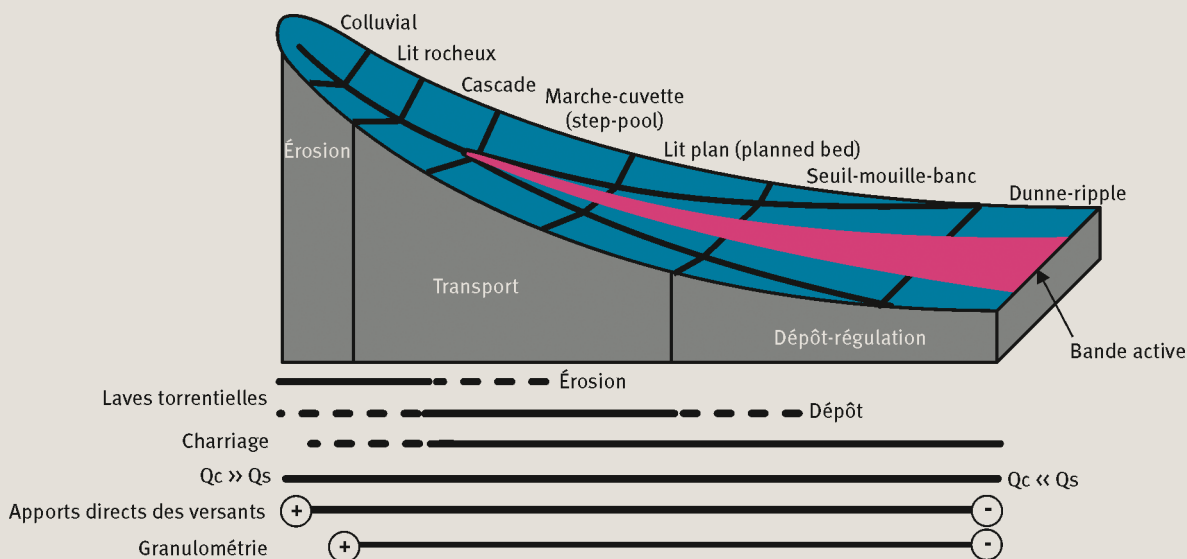
Le concept de « budget sédimentaire »

Dans les lits à fond sédimentaire mobile, il est possible d'estimer indirectement le flux solide grossier à partir de la reconstitution des changements morphologiques survenus pendant un intervalle de temps donné. Ces approches dites morphologiques sont fondées sur l'équation de conservation de la masse du transport sédimentaire, qui donne en différence finie l'équation du budget sédimentaire :

$$V_o = V_i - \Delta_s \quad 1$$

avec V_o le volume solide en sortie, V_i le volume solide en entrée et Δ_s la variation nette de stock. La mesure des changements morphologiques permet d'accéder à la variation de stock, qui nous renseigne sur le différentiel entre les entrées et les sorties solides. Il existe parfois des situations qui permettent de connaître les sorties, et donc

2 Distribution longitudinale théorique des types morphologiques de la classification de Montgomery et Buffington adaptée aux petites rivières de montagne (source : Montgomery et Buffington, 1997, modifié)



On passe progressivement des morphologies limitées en fourniture sédimentaire ($Q_c \gg Q_s$) aux morphologies limitées en capacité de transport ($Q_c \ll Q_s$).
 Q_c : capacité de transport ; Q_s : fourniture sédimentaire ; l'influence des laves torrentielles décroît vers l'aval au profit de celle du transport solide par charriage.

► de calculer les entrées selon une incertitude qui dépend de la précision avec laquelle on mesure les autres composants du bilan. On peut citer le cas des torrents équipés d'une plage de dépôt qui piège l'intégralité de la fraction grossière du flux solide.

Les apports de versant

La recharge sédimentaire par les versants peut être estimée à partir de l'inventaire cartographique et du cubage des cicatrices d'érosion apparues après un événement le long des berges du torrent. Les photographies aériennes peuvent être utilisées pour réaliser cette cartographie, mais elles doivent être associées à une reconnaissance de terrain dans les branches accessibles afin de prendre en compte les cicatrices non visibles sur les photos. L'estimation des volumes mobilisés peut se faire soit directement sur le terrain, soit par photogrammétrie*.

L'utilisation du LiDAR* (télétection par laser aéroporté) pour la quantification de l'érosion torrentielle est encore peu développée, mais il a vocation à devenir l'outil de référence, notamment dans les secteurs dépourvus de végétation où les restitutions topographiques sont peu affectées par les algorithmes de filtrage des échos laser. Le principe de mesure consiste à soustraire des modèles numériques de terrain distincts dans le temps et d'en déduire des volumes d'érosion et de dépôt (Scheidl *et al.*, 2008). Les données LiDAR offrent la possibilité d'obtenir des MNT* haute-résolution de précision décimétrique pour les levés aéroportés et centimétrique pour les levés terrestres. Le coût encore très élevé des données LiDAR explique qu'elles ne soient pas utilisées de manière cou-



3 Reconstitution photographique dans le chenal principal du Manival en Chartreuse, illustrant le caractère éphémère des nappes sédimentaires dans les lits à forte pente.

rante en ingénierie torrentielle, mais on peut facilement imaginer une dissémination forte dans les années à venir. À titre d'exemple, l'ensemble du territoire de la Suisse, à l'exception des zones de haute-montagne, est actuellement couvert par le LiDAR.

La variation du stock de sédiments dans les lits

Prédétermination empirique de la recharge par érosion du lit

L'évaluation du volume de sédiments potentiellement mobilisables peut reposer sur une analyse géomorphologique spatialisée des différentes zones contributives du bassin d'alimentation. Une normalisation de cette approche a été proposée par Hungr *et al.* (1984) pour des torrents où la recharge intervient préférentiellement par incision du lit et par affouillement* des berges. Le domaine d'application spécifié correspond à des bassins versants des massifs côtiers de la Colombie Britannique dont la superficie est comprise entre 1 et 3 km².

La démarche consiste en premier lieu à sectoriser le cours du torrent en fonction du caractère plus ou moins affouillable des différents biefs constituant le réseau hydrographique. La caractérisation morphologique de chaque tronçon homogène s'appuie sur une typologie distinguant cinq classes. Ces dernières sont définies selon des critères relatifs à la nature du substrat alluvial, ainsi qu'à la géométrie et à la stabilité des versants bordant le chenal. Pour chacune, l'apport unitaire en sédiment est alors supposé uniforme. Le cumul des volumes mobilisables est ensuite déterminé en calculant la somme des longueurs respectives dans chaque classe pondérées par le taux unitaire d'érosion.

Bien qu'en apparence assez formaliste, une approche de ce type reste relativement subjective et incertaine, notamment lorsqu'il s'agit d'apprécier, *a priori*, la résistance du pavage apparent d'un lit (photo ④), ou lorsque la contribution des versants est susceptible de prendre des proportions considérables. Elle donne néanmoins un ordre de grandeur qu'il est toujours préférable de comparer avec les résultats obtenus avec d'autres approches.

Monitoring des stocks sédimentaires

La variation nette de stock dans les branches torrentielles peut être évaluée à partir du suivi topographique du lit qui permet de reconstituer les changements morphologiques survenus entre deux levés. La finesse de cette reconstitution est fonction de la densité spatiale du semis de points et de la précision de la mesure. La propagation des erreurs liées à la collecte et au traitement des données permet de calculer un seuil de détection au-delà duquel on considère la variation altitudinale entre deux levés comme significative. Les techniques les plus performantes, comme le levé terrestre par GPS* différentiel ou scan laser offrent des seuils de détection pluricentimétriques.

Les avancées technologiques de la mesure topographique mettent à disposition des outils de plus en plus précis et performants en termes de rapidité et d'emprise d'acquisition. En revanche, ces techniques ne permettent



④ Incision remarquable du lit du Rotenbach dans les Alpes suisses, malgré un pavage de surface initialement constitué de gros blocs.

© E. Gertsch

pas de reconstituer les phases d'érosion et de dépôt qui se succèdent pendant l'événement, car elles ne peuvent être mobilisées qu'après le passage de l'onde de crue. L'utilisation des chaînes d'érosion conserve ainsi tout son intérêt aujourd'hui, car elles permettent de capturer le niveau le plus bas atteint pendant la crue. Leur utilisation peut se concevoir facilement lorsque les respirations altitudinales du lit sont inférieures au mètre.

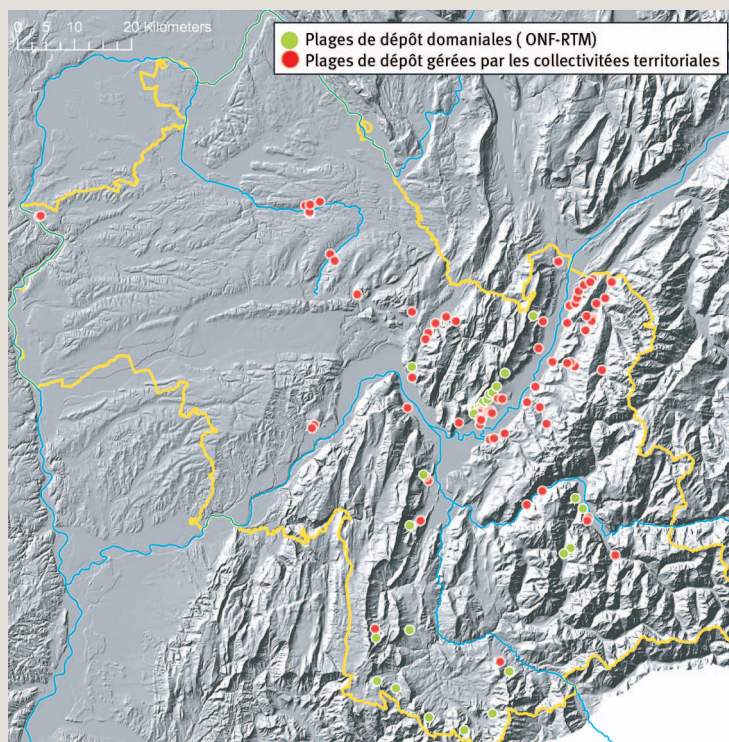
Conclusion

Les approches géomorphologiques de la production sédimentaire des torrents font largement appel à l'étude des formes de surface et à leur évolution au cours du temps. Ces formes nous renseignent sur les processus en jeu et sur les modalités de transfert des sédiments susceptibles de parvenir jusqu'au cône de déjection. Certaines typologies morphologiques ont été proposées à partir d'études réalisées en Amérique du Nord, mais leur transposition au contexte alpin mériterait d'être expertisée de manière approfondie. Des efforts importants doivent également être investis pour la caractérisation des couplages entre les versants et les lits dans la mesure où ces interfaces jouent un rôle fondamental en terme de recharge sédimentaire. Il apparaît également utile de porter les

2 PLAGES DE DÉPÔT ET ÉROSION TORRENTIELLE

Sur le département de l'Isère, près de cent trente plages de dépôt ont été construites depuis le début des années quatre-vingt pour prévenir les risques liés au transport de sédiments dans les torrents. La capacité de rétention de ces ouvrages va généralement de quelques dizaines de m³ à près d'une centaine de milliers de m³. Par ailleurs, les bassins versants qui bénéficient de ces équipements couvrent une gamme de superficies qui s'étend de quelques hectares à plusieurs dizaines de km². Ils présentent également une variété assez représentative du panel des terrains rencontrés dans les Alpes françaises, sur un plan à la fois orographique* et lithologique*. Néanmoins, faute de protocole de suivi clairement défini par les différents gestionnaires, les données de production sédimentaire recueillies au droit de ces ouvrages s'avèrent relativement fragmentaires et d'une qualité très hétérogène. Une étude en cours, bénéficiant d'un financement par le Pôle grenoblois des risques naturels, vise à évaluer la mise en place d'un observatoire de l'érosion torrentielle à partir de la valorisation scientifique de ces ouvrages.

Localisation des plages de dépôt torrentielles recensées en 2009 dans le département de l'Isère



Source : ONF, service RTM de l'Isère.

▶ efforts sur la morphodynamique des lits torrentiels, qui permet à la fois de caractériser de manière indirecte la recharge par les versants et de prédire les apports sédimentaires au cône de déjection. Les études de cas montrent notamment que les réponses sédimentaires observées à l'exutoire sont fortement conditionnées par l'état des réserves sédimentaires dans les lits. Nous sommes enfin convaincus de l'intérêt qu'il y aurait à constituer un observatoire de l'érosion torrentielle dans les territoires de montagne à partir de la valorisation scientifique des plages de dépôt (encadré 2). ■

Remerciements

Les auteurs remercient le PGRN (Pôle grenoblois d'étude et de recherche pour la prévention des risques naturels) pour son soutien financier. Ils remercient également Eva Gertsch (Université de Berne) d'avoir bien voulu mettre à disposition ses photographies.

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- BOVIS, M.J., JAKOB, M., 1999, The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 24, p. 1039-1054.
- BROCHOT, S., KOULINSKI, V., ROVERA, G., 1998, Approches globales pour l'estimation de l'érosion torrentielle (apports des versants et production de sédiments), *Ingénieries-EAT*, n° 15, p. 61-78.
- HUNGR, O., MORGAN, G.C., KELLERHALS, R., 1984, Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 21, p. 663-677.
- MONTGOMERY, D.R., BUFFINGTON, J.M., 1997, Channel-reach morphology in mountain drainage basins, *Geological Society of America Bulletin*, vol. 109, p. 596-611.
- REID, L.M., DUNNE, T., 2003, Sediment budgets as an organizing framework in fluvial geomorphology, in : *Tools in Fluvial Geomorphology*, KONDOLF, G.M., PIEGAY, H., p. 463-500.

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

Les auteurs

Frédéric Liébault

Cemagref, centre de Grenoble,
UR ETNA, Érosion torrentielle,
neige et avalanches,
2 rue de la Papeterie,
BP 76,
38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex
frederic.liebault@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

Alexandre Remaître

Institut de Physique du Globe
de Strasbourg, Centre national
de la recherche scientifique,
UMR 7516,
5 rue René Descartes,
67084 Strasbourg Cedex

Torrent dans les Alpes.