

# Torrents et rivières de montagne

## Dynamique et aménagement

A. Recking, D. Richard, G. Degoutte, coordinateurs





# Torrents et rivières de montagne dynamique et aménagement

A. Recking, D. Richard, G. Degoutte, coordinateurs

Éditions Quæ

## Collection *Savoir-faire*

Analyse de sensibilité et exploration de modèles  
Application aux sciences de la nature et de l'environnement  
R. Faivre, B. Looss, S. Mahévas, D. Makowski, H. Monod, éd.  
2013, 352 p.

De la domestication à la transgénèse  
Évolution des outils pour l'amélioration des plantes  
André Gallais  
2013, 176 p.

Mémento de pisciculture d'étang, 5<sup>e</sup> édition  
O. Schlumberger, P. Girard  
2013, 224 p.

Les déversoirs sur digues fluviales  
G. Degoutte, coord.  
2012, 184 p.

Production de canards  
H. Pingel, G. Guy, E. Baéza  
2012, 270 p.

Nutrition et alimentation des chevaux  
William Martin-Rosset, coord.  
2012, 624 p.

Éditions Quæ  
RD 10, 78026 Versailles Cedex, France

# Table des matières

---

<b>Remerciements</b> .....	7
<b>Introduction</b> .....	8
<b>1. Géomorphologie des rivières de montagne</b> .....	15
Introduction.....	15
Le système sédimentaire torrentiel .....	16
La cascade sédimentaire .....	16
Couplages versants-chenaux.....	18
Réponses à l'exutoire.....	20
Les versants .....	22
Les processus de production (météorisation et altération) .....	23
Les processus de transport et de stockage .....	25
Cinématique des processus de versants et couplages versants-chenaux.....	30
Les chenaux.....	39
Morphologie des rivières de montagne.....	39
Réponses morphologiques .....	52
Méthodes et outils .....	59
La production sédimentaire des torrents .....	70
L'information historique .....	71
Méthodes géomorphologiques .....	72
Modèles statistiques multivariés .....	73
Méthode ECSTReM (Alpes françaises).....	76
Conclusion.....	79
Références bibliographiques .....	79
<b>2. Hydrologie</b> .....	90
Introduction.....	90
Les spécificités de l'hydrologie des bassins torrentiels .....	91
Manque de bassins jaugés .....	91
Manque de données pluviométriques en altitude .....	91
Influence de la neige .....	93
Influence du relief sur les précipitations .....	95
Rôle de la géologie et de l'occupation du sol .....	96
Anthropisation des bassins versants.....	96
Instabilité des sections en travers.....	98
Conclusion sur la spécificité de l'hydrologie des bassins torrentiels.....	98

Éléments de base sur l'analyse statistique .....	98
Cadre probabiliste.....	98
Variables d'analyse .....	100
Modes d'échantillonnage .....	102
Ajustement de lois de probabilité.....	104
Sources de données.....	105
Réseaux de mesure et bases de données .....	105
Données synthétiques .....	107
Données historiques .....	108
Estimation des crues rares en sites jaugés .....	109
Méthode du Gradex et variantes .....	110
Méthodes basées sur le couplage d'un simulateur de pluies et d'un modèle hydrologique .....	112
Hydrogrammes de crue de référence .....	113
Estimation en site non jaugé.....	114
Méthodes de régression pour l'estimation des quantiles de crue .....	114
Méthode Shyreg.....	121
Estimation des durées caractéristiques.....	123
Conclusion.....	128
Références bibliographiques .....	129
<b>3. Hydraulique et transport solide.....</b>	<b>133</b>
Introduction.....	133
Généralités .....	134
Les écoulements de surface .....	134
Distinction entre charriage et suspension .....	134
Le transport solide par charriage .....	136
Estimation des grandeurs hydrauliques moyennes .....	143
Définitions .....	143
Contrainte, résistance et loi de frottement .....	146
Spécificité des cours d'eau de montagne.....	148
Transport solide.....	153
Généralités.....	153
Résistance de grain et de forme .....	154
Le début de mouvement .....	157
Les modèles de transport par charriage.....	164
Cas des chenaux proches des têtes de bassin.....	180
Des différences fondamentales avec les rivières à faible pente .....	180
Quelles équations ? .....	184
Conclusion.....	192
Annexe : équations établies pour les rivières de montagne.....	192
Meyer-Peter et Muller (1948) .....	192
Rickenmann (1990).....	192
Lefort-Sogreah (1991) .....	193
Références bibliographiques .....	193

<b>4. Les laves torrentielles</b> .....	200
Introduction.....	200
Principales caractéristiques du phénomène et enjeux opérationnels.....	202
Principales caractéristiques des laves torrentielles.....	202
La prévention des risques générés par les laves torrentielles.....	209
Mécanismes de déclenchement des laves torrentielles.....	213
Mécanismes de formation .....	213
Facteurs favorisant le déclenchement .....	213
Seuils de précipitations .....	214
Évaluation de la magnitude des laves torrentielles .....	216
Évaluation du volume.....	216
Évaluation du débit .....	224
Comportement mécanique des laves torrentielles.....	225
Retour sur la classification des laves torrentielles : aspects rhéologiques .....	227
Évaluation des propriétés rhéologiques.....	230
Modélisation hydraulique des laves torrentielles .....	234
Problématique .....	234
Choix d'une méthode adaptée et limites théoriques .....	236
Approches sommaires .....	236
Approches hydrauliques en régime permanent uniforme.....	239
Modélisation hydraulique en régime transitoire .....	245
Modélisation physique.....	251
Quelques conséquences opérationnelles .....	253
Interactions écoulement-obstacle.....	253
Contexte.....	253
Résultats d'une étude expérimentale .....	254
Généralisation des résultats.....	257
Conséquences opérationnelles.....	257
Méthodes d'estimation post-événement, indices sur le terrain.....	258
Identification des sources et des mécanismes de déclenchement .....	259
Type de lave torrentielle et paramètres rhéologiques.....	259
Épaisseurs et sections d'écoulement .....	259
Vitesse et débit de l'écoulement .....	259
Volume de l'événement.....	259
Levé des principaux dégâts et désordres (si applicable) .....	259
Conclusions et perspectives .....	260
Références bibliographiques .....	261
<b>5. Principes de conception des ouvrages de protection contre les risques torrentiels</b> .....	267
Les ouvrages : acteurs et victimes de l'évolution du transport solide.....	267
Des problématiques de décision variables.....	267
Les ouvrages agissent sur le transport solide ou le subissent .....	268
Structure et objectifs du chapitre .....	269

Typologie fonctionnelle des ouvrages de correction torrentielle.....	272
Objectifs des ouvrages de protection .....	273
Principaux types d'ouvrages .....	273
Effets du transport solide sur les ouvrages .....	277
Analyse comparative des contextes à fort ou faible transport solide .....	278
Dépôt .....	281
Érosion .....	281
Usure.....	282
Impact.....	282
Principes généraux de conception des ouvrages .....	283
De l'analyse fonctionnelle aux cas de charges .....	284
Des cas de charge au dimensionnement structurel .....	288
Critères de choix des structures et définition des cas de charges.....	291
Spécificités du contexte géotechnique .....	295
Agir sur les profils en long et en travers : conception fonctionnelle des barrages de consolidation, seuils et radiers.....	295
L'implantation des ouvrages.....	295
Assurer le transit des écoulements liquides .....	298
Éviter l'affouillement local .....	299
Faire transiter les écoulements : chenaux, digues et protection de berges.....	305
Assurer la résistance des ouvrages : conception structurelle.....	305
Assurer la capacité fonctionnelle des ouvrages.....	308
Stocker, filtrer les matériaux : barrages de sédimentation.....	310
Répartir les écoulements .....	310
Filtrer et/ou stocker .....	312
Dispositions constructives.....	314
Transport solide et infrastructures.....	316
Les étapes clés de la conception des ouvrages .....	317
Spécificités de la méthodologie de conception dans le contexte torrentiel.....	317
Gérer les ouvrages et dispositifs de protection.....	319
Problématiques, méthodes et outils d'aide à la décision pour la gestion du transport sédimentaire .....	319
De nouvelles méthodologies d'aide à la décision appliquées .....	322
Conclusion : de l'analyse des pathologies aux études de dangers .....	328
Références bibliographiques .....	328
Références supplémentaires.....	331
<b>Les auteurs</b> .....	333



# Remerciements

---

## **Comité de pilotage**

Thierry Monier (Artelia Ing)  
Benoit Fourcade (Dynamique Hydro)  
Olivier Bardou (DDT 38)  
Didier Mazel (Stucky Ing)

## **Relecteurs**

Kamal El Kadi Abderrezzak (EDF)  
Damien Kuss (ONF-RTM)  
Yann Queffélec (ONF-RTM)  
Charles Obled (LTHE)  
Christian Deymier (ONF-RTM)  
Vincent Koulinski (ETRM)  
Benjamin Graff (CNR)  
Jean-René Malavoi (EDF)  
Patrice Mériaux (Irstea)  
Éric Bardou (DSM Consulting)

La rédaction de ce guide a été financée par le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. Une partie des résultats qui y sont présentés sont issus d'actions de recherche financées par l'Agence Nationale de la Recherche (Projets ANR Gestrans et Extraflo), la Zone Atelier Bassin du Rhône (site atelier Drôme), les projets Interreg Alcotra Risknat, Espace Alpin Paramount, le projet CPER-Paca Rhythme, le projet rivières en tresses AERMC-ZABR, l'ORE Draix-Bléone, le Pôle Alpin des Risques Naturels, l'INSU-EC2CO, l'Onema, l'ONF-RTM.

# Introduction

---

Didier Richard

Les écoulements dans les cours d'eau de montagne ne sont pas des écoulements comme les autres. Les caractéristiques physiques des régions de montagne sont en effet à l'origine de manifestations naturelles particulières, qui confrontent les acteurs de la gestion des risques naturels à des défis particuliers.

Les zones de montagne sont associées à des reliefs et des pentes marqués. La présence de pentes fortes détermine de façon directe ou indirecte un certain nombre d'autres caractéristiques classiquement associées aux espaces montagnards. Il peut s'agir d'opportunités, avec la capacité par exemple de développer certaines activités comme le ski ou l'alpinisme, ou des activités industrielles exploitant les énergies hydraulique et hydro-électrique (la « houille blanche »). Cela induit également des contraintes, comme la concentration en fonds de vallées d'enjeux socio-économiques potentiellement exposés à des phénomènes gravitaires de diverses natures.

Les forces de gravité résultant des pentes importantes constituent par ailleurs un « moteur » qui prend des proportions bien plus considérables pour la dynamique des phénomènes naturels que dans les zones à moindre relief. Les zones et les communautés de montagne sont ainsi confrontées, exception faite des séismes et de certains aléas climatiques, soit à des phénomènes spécifiques, soit à des manifestations différentes et généralement accentuées de phénomènes qui peuvent également se rencontrer ailleurs.

C'est notamment le cas des crues, qui sont plus violentes, plus brusques, et peuvent même prendre des formes uniques à la montagne. Ces crues soudaines et violentes sont souvent provoquées par des précipitations elles-mêmes violentes et abondantes, entre autres là aussi en raison du relief. Cours d'eau de montagne les plus amont, les torrents drainent les parties sommitales des systèmes hydrographiques. Directement au contact de zones de haute montagne très pentues, aux sols très fragiles, à la végétation rare, exposées à des agressions météorologiques très fortes, les torrents de montagne sont donc facilement alimentés en quantités considérables de sédiments, qu'ils ont ensuite la force de transporter jusque dans les fonds de vallées.

La proximité du torrent avec les diverses sources de sédiments qui l'alimentent oblige très généralement à considérer et analyser le fonctionnement du bassin versant torrentiel dans son ensemble. Schématiquement, on distingue dans

un bassin versant type, en amont le *bassin de réception*, zone de production de l'essentiel du ruissellement et de l'érosion de versants, le *chenal d'écoulement*, partie du réseau hydrographique souvent encaissée où transitent des écoulements déjà formés, et le *cône de déjection* à l'arrivée dans la vallée, où le torrent se déleste d'une part significative de sa charge en sédiments, à la faveur de l'élargissement de son lit et de la réduction de pente, avant de rejoindre la rivière de fond de vallée par exemple (figure 1).

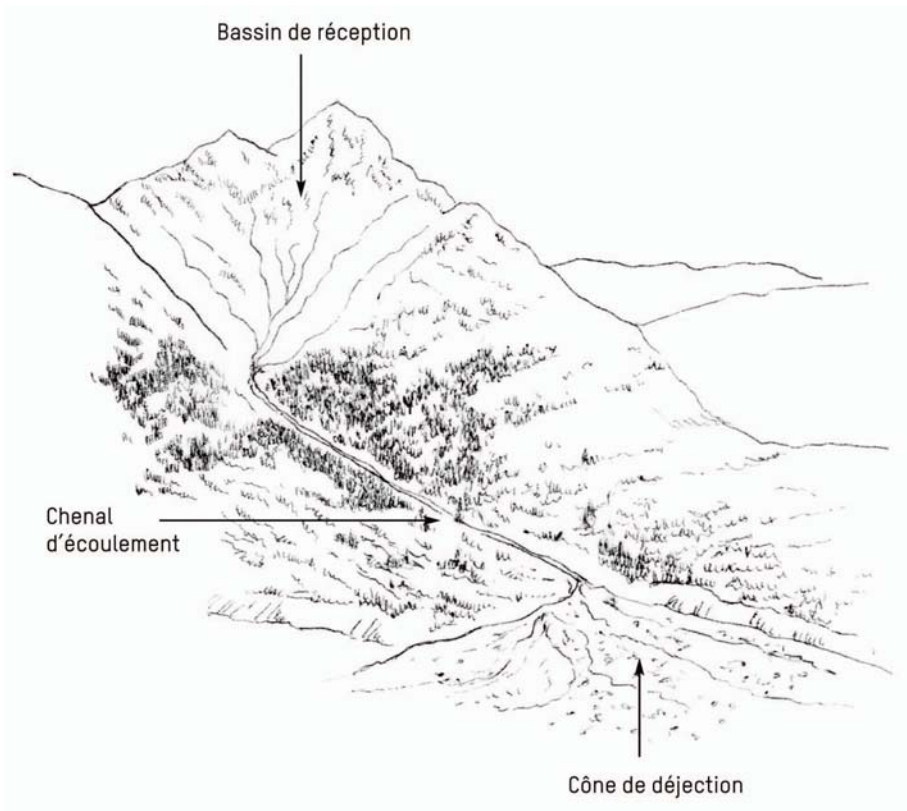


Figure 1. Décomposition schématique d'un bassin versant torrentiel (dessin N. Sardat).

De nombreux processus, d'altération, dégradation, mobilisation des sédiments, sur les versants comme dans les lits des cours d'eau de montagne, sont à l'origine des apports, des stocks et des flux sédimentaires le long des cours d'eau de montagne. Ces processus dépendent de différents facteurs, dont certains sont propres au bassin versant et à son état à un instant donné, d'autres dépendant des caractéristiques de l'événement, en général météorologique, à l'origine de la crue.

Les deux premiers chapitres de cet ouvrage s'intéressent respectivement :

– pour le **chapitre 1**, aux approches et méthodes permettant de comprendre le fonctionnement et la dynamique du bassin versant et de ses diverses composantes.

Il donne de la sorte des « clés de lecture » de ce que nous donne à voir un bassin versant de montagne, siège de crues torrentielles par le passé ;

– pour le **chapitre 2**, aux processus de transformation des précipitations en ruissellement puis en écoulement concentré. Un certain nombre de méthodes hydrologiques sont proposées et commentées en ce qui concerne leur application en contexte de montagne.

La principale particularité des écoulements torrentiels par rapport aux écoulements en rivières à faible pente consiste en un transport de sédiments beaucoup plus important en période de crue. Le rôle de la pente est sensible au niveau des apports de versants, mais également dans les lits des cours d'eau eux-mêmes. Les écoulements accélérés accentuent les forces d'arrachement et d'entraînement des particules sédimentaires composant les lits torrentiels. À ces forces s'ajoute une composante motrice de la force gravitaire également augmentée. Par conséquent, même des particules solides de grandes dimensions, jusqu'à des blocs rocheux de plusieurs tonnes, peuvent être mises en mouvement et transportées par les torrents. L'importance des quantités de sédiments mobilisés peut générer des formes d'écoulement tout à fait spécifiques aux cours d'eau torrentiels.

La première conséquence de l'importance que peut atteindre le transport solide dans les cours d'eau torrentiels concerne la variété des formes d'écoulement qui peuvent y prendre place. Pour les débits liquides les plus faibles, on pourra n'avoir pas de transport solide du tout, ou un transport solide qui ne concernera que les particules les plus fines, comme c'est le cas en rivière. Pour les débits liquides de crue, au contraire, les écoulements mobiliseront des quantités considérables de sédiments, ce qui peut d'ailleurs donner lieu à des formes d'écoulement tout à fait spécifiques des cours d'eau torrentiels.

D'autre part, dès lors qu'il y a transport de sédiments, il existe des interactions entre la phase liquide et la phase solide. Ces interactions sont décrites par la figure 2 :

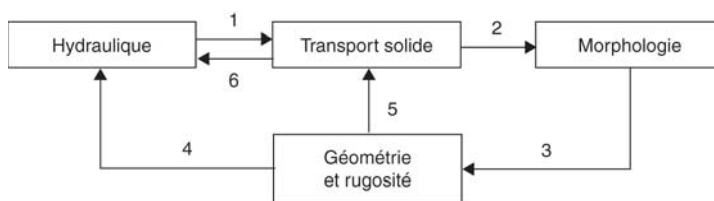


Figure 2. Interactions entre phase liquide et phase solide :

1. Action de l'eau sur le matériau, provoquant un transport de sédiments.
2. Effet du transport de sédiments sur la morphologie par dépôt ou érosion, entraînant enfoncement ou exhaussement, élargissement ou rétrécissement, voire changement radical de lit d'écoulement.
3. Ces modifications morphologiques s'accompagnent de modifications de la rugosité, de la pente, de la géométrie de la section en travers...
4. lesquelles entraînent une modification du régime d'écoulement...
5. et une modification de la quantité de matériaux transportés.
6. Perturbation plus ou moins forte de l'écoulement liquide par la présence de la phase solide en transport.

On comprend bien que, si le transport solide est suffisamment faible, les variations de la morphologie ou leur influence sur l'hydraulique seront elles-mêmes suffisamment faibles pour qu'on puisse d'une part négliger le transport solide dans les calculs hydrauliques, d'autre part assimiler l'écoulement à un écoulement sur fond fixe, à l'échelle de la crue. En revanche, plus le transport solide est intense, ou plus la concentration solide est importante, moins il est admissible de négliger la phase solide, ou même de traiter phase liquide et phase solide de façon indépendante. On conçoit dès lors assez bien qu'il puisse devenir douteux d'utiliser les notions ou les lois établies en hydraulique classique pour ces écoulements très chargés en matériau solide. De fait, un certain nombre de recherches ont été engagées dans les années 1980, ouvrant un champ disciplinaire scientifique spécifique adapté à ces écoulements : l'hydraulique torrentielle.

Compte tenu de l'importance que peut prendre le transport de sédiments dans les écoulements torrentiels, il paraît assez logique de positionner l'hydraulique torrentielle et les phénomènes correspondants sur un axe de concentration solide croissante, entre deux pôles extrêmes (figure 3) : d'un côté l'eau claire et, à l'extrémité opposée, le matériau solide pur. À proximité du pôle « eau », on trouvera donc les phénomènes de transport de sédiments à faible concentration solide se produisant dans les rivières à faible pente, tandis qu'au voisinage du pôle « matériau solide » on situera les mouvements de terrain qui peuvent apparaître lorsque la teneur en eau augmente un peu.

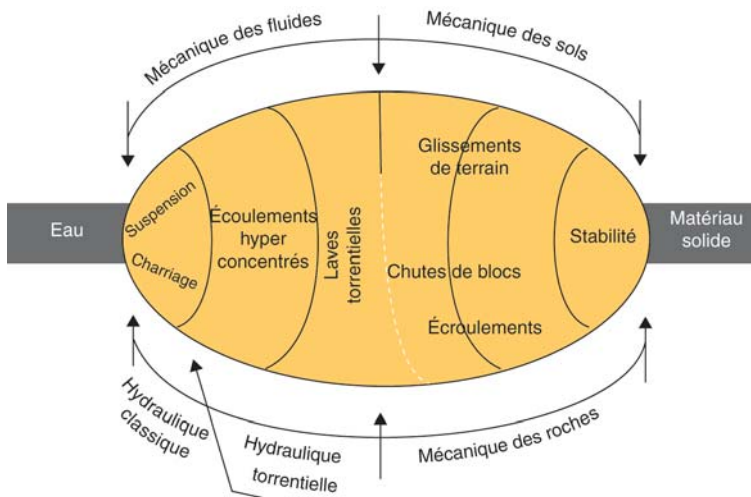


Figure 3. Phénomènes et disciplines en hydraulique et mouvements de terrain. (D'après Meunier, 1991)

On distingue classiquement deux formes principales d'écoulement avec transport solide qui intéressent les torrents :

- le charriage torrentiel qui, du point de vue des mécanismes de transport solide mis en œuvre, s'apparente aux modes de transport observés en rivière ;

– dans certains torrents, les laves torrentielles, qui sont un phénomène tout à fait spécifique.

Le transport solide par charriage tel qu'on l'observe en rivière, pour des pentes inférieures à environ 1 %, présente des concentrations volumiques de l'ordre du dixième de % au maximum. Les grains transportés ont des comportements très individuels, chaque particule se déplaçant totalement indépendamment des autres ou presque. Avec de si faibles transports solides, les changements morphologiques du lit sont tellement faibles que l'on peut considérer le lit comme fixe à l'échelle d'une crue.

Si la concentration en particules solides augmente, en général à cause de la pente, on observe qu'à partir d'une certaine limite, la contribution du sédiment transporté à la hauteur d'écoulement ne peut plus être négligée. On a alors des concentrations solides (en débits) de l'ordre de quelques pour-cent à 25-30 %. Avec de tels transports solides, la morphologie du lit peut être rapidement modifiée, soit en ce qui concerne le profil en long si l'écoulement est canalisé, soit par des changements et déplacements rapides des chenaux d'écoulement si la largeur est suffisante pour permettre des divagations. Enfin, même si le comportement des grains reste essentiellement individuel, on observe par moment et par endroit des amoncellements de mouvement en masse de paquets de particules. Ceci étant, dans tous les cas, l'eau et les particules transportées conservent des mouvements nettement différenciables, le fluide est clairement biphasique.

Le **chapitre 3** est dédié à la caractérisation, la quantification et la modélisation de cette catégorie d'écoulements avec transport solide par charriage.



Figure 4. Dépôt de lave torrentielle du Saint-Antoine, à Modane. (Photo M. Meunier)

Les laves torrentielles sont un phénomène spécifique des torrents. Elles se forment généralement à la faveur des fortes pluies, sur des pentes fortes et lorsque le site permet la formation d'un mélange concentré d'eau et de matériaux solides de granulométrie étendue allant des argiles à des blocs de dimensions métriques.

Contrairement au charriage dont le débit moyen varie de façon graduelle, leur écoulement est très transitoire, constitué de bouffées successives indépendantes, qui se présentent essentiellement sous la forme de vagues de l'ordre de quelques mètres de hauteur se propageant à une vitesse de quelques mètres/seconde. Leur concentration en matériau solide est très élevée. Généralement supérieure à 50 % en volume, elle peut atteindre 80 % et plus, tandis que la concentration solide ne

dépasse pas 20 à 40 % pour les écoulements avec charriage hyperconcentré. Les laves torrentielles présentent un comportement intermédiaire entre fluide et solide qui, sur beaucoup d'aspects, ressemble plus à l'écoulement d'une pâte que d'un liquide à proprement parler. Ceci se traduit, notamment lorsqu'une zone de pente plus faible est atteinte, par un arrêt « en masse » de la coulée, avec une épaisseur de dépôt importante et la présence d'un bourrelet frontal. Cela se traduit également par la formation de bourrelets latéraux de forme linéaire, résultant du dépôt sur les bords du chenal d'une certaine quantité de matériau lors de la propagation des bouffées. Enfin, elles ont la capacité à transporter de gros à très gros blocs (volume de l'ordre du mètre cube). Ces gros blocs ont par ailleurs tendance à se rassembler à l'avant des bouffées de laves torrentielles, constituant ainsi un « front » de lave, nettement différent du « corps » de lave qui le suit.

Le **chapitre 4** est consacré aux écoulements de laves torrentielles et à leurs caractéristiques hydrodynamiques.

Concevoir et dimensionner les mesures et techniques de protection contre les crues d'un torrent ou d'une rivière de montagne requiert cette vision complète des dynamiques de réponse du bassin versant et de ses différentes composantes à des forçages pluvio-météorologiques. Ces études font appel à des disciplines aussi variées que l'hydrologie, pour l'étude de la formation des débits liquides, la géomorphologie pour l'évaluation des productions de sédiments par les versants ou à l'échelle du bassin versant tout entier, l'hydraulique torrentielle pour l'étude de la propagation des écoulements ainsi formés, jusqu'aux techniques de génie civil ou biologique pour la conception des corrections appropriées.

Le **chapitre 5** présente l'éventail des ouvrages de protection et les fonctions qu'ils peuvent assurer vis-à-vis des conséquences de ces crues, ainsi que quelques principes fondamentaux relatifs à leur conception. Ce chapitre n'a toutefois pas la prétention d'épuiser la question du dimensionnement d'ouvrages et encore moins de leur calcul, qui mériterait un plein ouvrage à elle seule.

Une meilleure connaissance des phénomènes de transport solide par les cours d'eau de montagne est de nature à améliorer la prévention contre les risques associés. La caractérisation de ces processus et fonctionnements est cependant confrontée, en zone de montagne, à un déficit général de données de mesure et d'observation des phénomènes naturels. La rigueur des conditions de montagne et la violence des phénomènes extrêmes étudiés mettent les capteurs à rude épreuve, sans compter les variables caractéristiques de ces phénomènes encore inaccessibles à la mesure. La variabilité des contextes naturels due au relief nécessiterait par ailleurs une densité des réseaux d'observation dont on ne dispose pas.

Cet ouvrage aborde, dans les différents chapitres, la problématique de la mesure, de l'observation, et propose un état des lieux des moyens et techniques disponibles. Le recours à l'expérimentation permet de s'affranchir partiellement de ces difficultés, en facilitant d'une part la mesure, d'autre part la maîtrise et la répétabilité des conditions expérimentales. Le transfert d'échelle, pour transposer les résultats expérimentaux à échelle réduite aux phénomènes en vraie grandeur, reste cependant une étape délicate. Grand nombre de ces difficultés sont notamment dues au fait que les fluides impliqués dans les mouvements gravitaires rapides

de montagne sont des fluides complexes, répondant à des lois de comportement spécifiques et souvent encore mal connues. Les lois de l'hydraulique classique de l'eau claire sont par exemple inadaptées aux écoulements à fortes concentrations en transport solide. Pour les laves torrentielles, elles sont même complètement inopérantes en raison du fait que ce sont des fluides à seuil, c'est-à-dire que l'écoulement ne sera possible qu'à partir du moment où une valeur limite de la contrainte de cisaillement sera dépassée.

La compréhension des lois physiques régissant le comportement de ces fluides complexes est un enjeu majeur, dans la mesure où elles déterminent la dynamique de l'écoulement de ces mouvements gravitaires naturels. Elles déterminent également les interactions de ces écoulements avec des structures, et en particulier l'importance des sollicitations qu'ils exercent sur des ouvrages de protection ou des bâtiments. L'intérêt de mieux caractériser ces interactions est évident pour ce qui concerne le dimensionnement des ouvrages ou la réglementation de l'occupation du sol en zones à risques.



# 1

## Géomorphologie des rivières de montagne

---

Frédéric Liébault  
Alexandre Remaître  
Christophe Peteuil

### Introduction

Situées à l'amont du réseau hydrographique, les rivières de montagne assurent une régulation essentielle des apports liquides et solides aux hydrosystèmes de plaine. Leur rôle important en matière de préservation des équilibres morphologiques des rivières de piémont est de plus en plus reconnu (Wohl, 2006 ; Liébault *et al.*, 2008). Les perturbations du transport solide des torrents peuvent être à l'origine d'impacts importants, comme l'incision ou l'exhaussement accélérés de leur émissaire. Les rivières de montagne sont également le support d'écosystèmes remarquables en interactions fortes avec la dynamique géomorphologique de ces milieux (Montgomery et Buffington, 1998). Elles sont aussi le siège de phénomènes extrêmes qui peuvent menacer la sécurité des personnes et des biens établis à proximité du cours d'eau. La gestion intégrée de ces rivières impose une conciliation entre la protection contre les risques naturels et la préservation d'un bon état écologique. Cela passe nécessairement par une bonne compréhension de leur fonctionnement et par la mise en œuvre d'outils adaptés.

La géomorphologie fluviale incorpore un nombre important de travaux dédiés spécifiquement aux rivières de montagne, qui présentent certaines spécificités par rapport aux rivières de plaine. La pente du lit, une propriété physique essentielle qui contrôle l'énergie gravitaire disponible, présente un champ de variabilité très large. Ceci a une influence majeure sur les lois de résistance à l'écoulement, sur la mécanique du transport solide, et donc sur la dynamique des formes fluviales. La proximité des versants amène également un autre élément de complexité. Les versants contrôlent les apports en sédiments aux chenaux et l'irrégularité de leur activité dans l'espace et dans le temps est un forçage essentiel de la dynamique morphologique torrentielle.

La géomorphologie fluviale s'intéresse à l'origine et à la dynamique des formes qui composent les lits fluviaux. Il s'agit d'une discipline scientifique appartenant aux géosciences, dont les principaux acteurs sont des géographes physiciens, des géologues et des hydrauliciens. Elle a connu une véritable révolution quantitative à partir de la seconde moitié du xx<sup>e</sup> siècle, sous l'impulsion d'une série de travaux pionniers dédiés à l'étude des processus à l'origine des formes de surface (Mackin, 1948 ; Leopold et Maddock, 1953 ; Hack, 1957 ; Schumm et Lichty, 1965). Ces contributions majeures ont permis d'ancrer solidement le concept d'équilibre dynamique des formes de surface aux variables de contrôle (flux liquides et solides), dont l'origine trouve racine dans les travaux du géologue Grove Karl Gilbert (Gilbert, 1914). Elles ont aussi produit une nouvelle façon de pratiquer la géomorphologie, fondée sur l'apprentissage d'instruments de mesure dédiés à l'observation de terrain et sur l'utilisation du traitement statistique des données pour l'étude des systèmes complexes (Church, 2010). La place occupée actuellement par la géomorphologie fluviale dans la gestion de l'environnement et des risques naturels doit beaucoup à ces évolutions récentes. Elle constitue aujourd'hui une discipline incontournable des sciences et techniques de l'environnement (Malavoi et Bravard, 2010).

L'objectif de ce chapitre est donc de proposer une revue synthétique des notions, méthodes et outils de la géomorphologie appliquée aux rivières de montagne, dans une optique de gestion du transport solide et du lit. Le champ géographique proposé est étendu et il repose sur une acceptation large du domaine torrentiel ; il couvre le réseau hydrographique depuis les têtes de bassin jusqu'aux rivières de piémont. Cela inclut les torrents et les rivières torrentielles, pour reprendre la terminologie de l'école d'hydraulique torrentielle française qui, depuis Alexandre Surell (Surell, 1841), propose de faire démarrer le domaine torrentiel à une pente de 1 % et de distinguer le torrent de la rivière torrentielle à partir de 6 %. Une première partie est consacrée à la présentation générale du système sédimentaire torrentiel. La deuxième partie traite de la dynamique des versants. La troisième s'intéresse aux chenaux. En dernière partie, nous proposons de traiter le problème de la production sédimentaire des torrents, un domaine particulièrement important dans les expertises de bassins versants torrentiels.

## Le système sédimentaire torrentiel

### La cascade sédimentaire

Il est d'usage de sectoriser le bassin versant torrentiel en trois zones fonctionnelles qui s'organisent de l'amont vers l'aval.

– La **zone de production** (ou bassin de réception) rassemble les principales sources sédimentaires du système. C'est aussi là que se concentre le ruissellement des eaux. Ces sources produisent des débris qui s'accumulent provisoirement dans les têtes de bassin et qui sont évacués brutalement, généralement sous forme de coulées de débris.

– Ces matériaux arrivent ensuite dans la **zone de transport** qui assure un transfert plus ou moins rapide des matériaux vers l'aval. Dans le schéma classique, cette zone intermédiaire est une gorge de raccordement, avec un chenal à forte pente confiné entre des versants raides qui peuvent contribuer localement à la recharge sédimentaire du torrent. Il existe néanmoins une grande diversité de configurations topographiques et ce schéma ne représente qu'un type parmi d'autres. On peut citer à titre d'exemple les larges plaines alluviales intermédiaires, souvent occupées par des tressages ou divagations torrentielles, typiques des Préalpes du Sud.

– En aval de la zone de transport, on trouve la **zone de dépôt**, qui se traduit par la formation d'un cône de déjection lorsque l'espace est disponible dans la vallée principale. L'absence de cône peut s'expliquer par la présence de pièges sédimentaires dans les hauts bassins. Ce cas de figure se rencontre surtout dans les anciennes zones englacées où des lacs de surcreusement glaciaire capturent les débris du bassin de réception et créent une interruption du flux solide vers l'aval. Cette zonation fonctionnelle donne une image simplifiée de l'organisation spatiale des transferts sédimentaires en montagne, qui est souvent bien plus complexe, notamment lorsque le bassin versant dépasse une certaine taille (de l'ordre de 10-15 km<sup>2</sup>).

Une autre façon de conceptualiser la cascade sédimentaire est de concevoir le bassin versant comme un assemblage spatial de deux types d'entités fonctionnelles en interactions : les versants et les chenaux. Chaque entité se caractérise par des stocks sédimentaires qui reçoivent et redistribuent les sédiments selon des modalités propres (figure 1.1). Les stocks de versant sont alimentés par la météorisation de la roche mère (essentiellement sous l'effet du gel-dégel) et la remobilisation des débris par une grande variété de processus de pente (reptation, solifluxion, coulées sèches, ruissellement, glissements de terrain, avalanches). Ces stocks participent ensuite à la recharge sédimentaire des chenaux, soit directement lorsque les processus de pente arrivent à mobiliser les débris jusqu'au réseau hydrographique, soit indirectement par sapement de berges pendant les crues. Une fois parvenus jusqu'aux chenaux, les sédiments sont pris en charge par l'écoulement et participent au transport solide. Celui-ci étant fortement intermittent, des stocks se

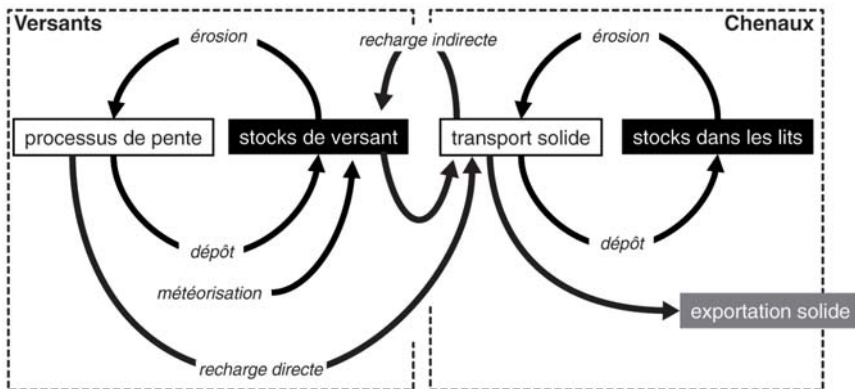


Figure 1.1. Le système sédimentaire torrentiel.

forment au sein du réseau hydrographique et marquent l'interruption temporaire des matériaux dans leur progression vers l'aval. Ce sont les interactions entre ces stocks et le transport solide *via* les processus d'érosion et de dépôt qui contrôlent l'exportation solide du bassin versant. Les stocks exercent ainsi un effet de régulation qui permet d'atténuer les fluctuations du transport solide vers l'aval (Benda et Dunne, 1997a).

### Couplages versants-chenaux

La spécificité des rivières de montagne repose principalement sur l'importance des couplages entre les versants et les chenaux. Les torrents doivent composer avec une recharge sédimentaire très fluctuante, rythmée par les processus de pente. Lorsque les versants sont instables et qu'ils produisent beaucoup de débris, ceci se traduit par une morphodynamique très active dans les chenaux situés en aval. Les pulsations détritiques de versant produisent des vagues sédimentaires qui se propagent dans les chenaux et induisent des cycles de dépôt et reprise remarquables (figure 1.2). Les propriétés morphologiques et sédimentologiques des chenaux sont de ce fait très instables et la notion de régime d'équilibre, couramment utilisée en contexte de plaine, est difficile à transposer en montagne.

Ce type de fonctionnement par bouffées doit cependant être relativisé en fonction de la position au sein du réseau hydrographique. Dans les chenaux d'ordre supérieur (ordre de Strahler > 4-5 ; pour plus d'information sur les méthodes d'ordination du réseau hydrographique, se reporter à Bravard et Petit, 1997), l'influence des versants est atténuée et la fourniture sédimentaire est plus régulière dans le temps. On peut trouver ici des styles morphologiques durables, qui traduisent un équilibre entre la capacité de transport et la fourniture en sédiments (Montgomery et Buffington, 1997).



Figure 1.2. Exemple de cycle dépôt-reprise dans un lit torrentiel sous l'effet d'une crue. Entouré en rouge : bloc visible sur les deux photos. (Photos C. Peteuil)

L'instabilité morphologique des torrents s'explique également par la diversité des écoulements qui se produisent dans les chenaux à forte pente (> 5-6 %). L'association du ruissellement, de l'énergie gravitaire et des apports solides provoque la formation de coulées de débris rapides (pouvant atteindre 10-15 m/s), à forte