



HAL
open science

Dynamique géomorphologique des torrents : intérêt de l'emploi des appareils photographiques automatiques

Guillaume Piton, Johan Berthet, Coraline Bel, Firmin Fontaine, Hervé Bellot, Emmanuel Malet, Laurent Astrade, Frédéric Liébault, Alain Recking, Marie Juppet, et al.

► To cite this version:

Guillaume Piton, Johan Berthet, Coraline Bel, Firmin Fontaine, Hervé Bellot, et al.. Dynamique géomorphologique des torrents : intérêt de l'emploi des appareils photographiques automatiques. Collection EDYTEM. Cahiers de géographie, 2017, Monitoring en milieux naturels - Retours d'expériences en terrains difficiles, 19, pp.205-212. 10.3406/edyte.2017.1384 . hal-01635571

HAL Id: hal-01635571

<https://hal.science/hal-01635571v1>

Submitted on 21 Nov 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DYNAMIQUE GÉOMORPHOLOGIQUE DES TORRENTS

INTÉRÊT DE L'EMPLOI DES APPAREILS PHOTOGRAPHIQUES AUTOMATIQUES

TORRENTIAL PROCESSES AND DYNAMICS: INTEREST OF THE USE OF AUTOMATIC CAMERAS

GUILLAUME PITON¹, JOHAN BERTHET², CORALINE BEL¹, FIRMIN FONTAINE¹, HERVÉ BELLOT¹,
EMMANUEL MALET², LAURENT ASTRADE², FRÉDÉRIC LIEBAULT¹, ALAIN RECKING¹,
MARIE JUPPET³, KRISTIAN ROYER³

¹ Univ. Grenoble Alpes, IRSTEA, UR ETNA, 2 rue de la papeterie, 38402 St Martin d'Hères.

² EDYTEM - UMR 5204 CNRS, Université Savoie Mont Blanc, Pôle Montagne, 73370 Le Bourget du Lac cedex.

³ ONF-RTM, Services de l'Isère et des Alpes Maritimes, 9 Quai Créqui, 38026 Grenoble Cedex.

Contact : guillaume.piton@irstea.fr

RÉSUMÉ

La compréhension actuelle de l'occurrence et de la magnitude des crues des torrents de montagne est insuffisante pour une gestion optimale des risques naturels. La prise directe d'images des torrents à intervalle de temps régulier permet d'accroître significativement la compréhension des processus en jeu et de leur dynamique. La rapidité des phénomènes en montagne rend indispensable une automatisation des prises de vues, ceci dans un environnement difficile. Le présent article est un retour d'expérience sur l'équipement de neuf torrents alpins avec différents types d'appareils. Les contraintes spécifiques au milieu torrentiel et les recommandations tirées des tests sont listées, des exemples d'éléments nouveaux de connaissance acquis grâce aux clichés sont finalement retracés. L'utilisation de tels systèmes d'observation est vouée à se développer dans le cadre de recherches scientifiques comme dans ceux de suivis opérationnels.

MOTS-CLÉS : MORPHODYNAMIQUE, LAVES TORRENTIELLES, CHARRIAGE, RESPIRATIONS TORRENTIELLES, TIME-LAPSE.

ABSTRACT

Our knowledge on floods magnitude and frequency in steep slope streams is insufficient for an optimal natural hazards management. Images taken by automatic cameras enhance our knowledge on torrential processes and dynamics. The cameras' automation is required in mountain streams due to the processes' flashiness; this in a hostile environment. This paper reviews our experience of the equipment of nine alpine torrents with various cameras. The adaptations related to the torrential context are described, as well as some recommendations from our tests and trials. Some new elements of knowledge brought from the images are pointed out. In conclusion, such observation systems will, in our opinion, grow in number in the future for operational and scientific purposes.

KEYWORDS: MORPHODYNAMICS, DEBRIS FLOWS, BEDLOAD, BED LEVEL FLUCTUATIONS, TIME-LAPSE.

INTRODUCTION

Le terme torrent désigne les ruisseaux de montagnes qui présentent une forte activité géomorphologique, c'est-à-dire une tendance à éroder et à déposer de larges volumes de sédiments et de flottants lors des crues, relativement à la faible taille de leur bassin versant (Fabre, 1797). Les crues des torrents et leur activité morphogène restent des processus mal connus (Recking et al., 2013). La compréhension de la dynamique des événements extrêmes, en particulier, souffre du faible nombre d'observations directes, lié à leur rareté, à leur imprévisibi-

lité et surtout à leur rapidité. Ils se déroulent sur des échelles de temps de l'ordre de l'heure : trop courtes pour se rendre sur place, déployer des capteurs et enregistrer correctement, et en sécurité, les processus de crues. Chaque épisode de pluie intense ne déclenchant pas systématiquement une lave torrentielle ou une crue morphogène (Bel et al., 2016), anticiper des mesures directes des crues est illusoire. L'acquisition de nouvelles observations doit donc passer par l'automatisation de ces dernières et par une présence permanente sur site.

En raison des enjeux, ces cours d'eau ont souvent été aménagés (recalibrage, endiguement et correction torrentielle), ce qui influence de manière prépondérante leurs dynamiques (Berthet, 2016). Des ouvrages spécifiques aux torrents ont ainsi été développés en complément des techniques issues du génie fluvial : barrages de correction torrentielle et plages de dépôts (Piton et Recking, 2016a, 2016b ; Piton et al., 2016). Si la physique du processus en contexte naturel est mal connue, on peut imaginer que les interactions processus – ouvrages sont aussi assez obscures. Les modèles numériques et les analyses expertes manquant de validations de terrain pour les raisons évoquées plus haut, cartographier l'aléa torrentiel et concevoir des ouvrages adaptés reste un exercice subtil et fondamentalement incertain.

Développer des outils permettant de réaliser des observations de ces phénomènes de crues a donc un intérêt double : (i) à court terme pour renforcer la connaissance empirique des phénomènes et de l'effet des ouvrages, par la multiplication des observations directes (photos, vidéos, hydrogrammes) et indirectes (écoute sismique, analyse diachronique de la géomorphologie) ; (ii) à plus long terme pour améliorer la compréhension de la physique des processus et

renforcer la pertinence des approches croisant travail de terrain et modélisations physique et numérique.

Depuis 2010, l'unité de recherche ETNA du centre IRSTEA de Grenoble et le laboratoire EDYTEM de Chambéry développent et mettent en place des appareils photographiques automatiques dans des torrents de montagnes. Ces dispositifs visent à compléter les mesures des capteurs (géophones, pluviomètres, voir Fontaine et al., 2017) et les analyses géomorphologiques (Berthet, 2016), dans l'amélioration de la compréhension de la morphodynamique des torrents. Au-delà des objectifs scientifiques, la mise en œuvre de prise automatique d'images de processus de crues rapides et rares en site de montagne comporte des contraintes fortes que nous rapportons dans cet article. Il présente synthétiquement les sites équipés dans le cadre de nos travaux, le matériel utilisé et les contraintes rencontrées. Il apporte dans un second temps des exemples des nouveaux éléments scientifiques et techniques tirés de ces observations. Il se termine par quelques perspectives d'utilisation. Au global, nous pensons que l'utilisation de tels systèmes d'observation est vouée à se développer dans des cadres de recherche scientifiques comme de suivis opérationnels.

PRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE DES SITES

Plusieurs sites ont été équipés d'appareils photos, parfois renforcés de capteurs complémentaires et avec des fréquences de prises de vues et des conditions de déclenchement variées (Tableau 1). On remarque que les dispositifs de suivi concernent des torrents alimentés par des sources sédimentaires diverses, à l'activité morphogène élevée (sensiblement annuelle) à très élevée (plusieurs laves torrentielles par année).

Les bassins versants au droit des stations de monitoring sont de taille variable, avec parfois plusieurs stations dans un bassin versant afin de permettre l'observation du transfert de la crue et de ses éventuels changements de dynamique. Les observations sont souvent assez récentes mais nous bénéficions de plus de cinq ans de retour d'expérience sur deux sites (Navratil et al., 2011).

Nom du torrent (Département)	S _{BV} Bassin versant aux stations [km ²]	Géologie des sources sédimentaires	Fréquence annuelle de laves torrentielles (crues avec charriage)	Type de suivi*	Période de suivi
Arveyron de la mer de Glace (74)	76,4	Moraines (gneiss et granite)	0 (~1)	TL	2014-2016
Arveyron d'Argentière (74)	32,4	Moraines (gneiss et granite)	0 (~1)	TL	2014-2016
Creusaz (74)	13,1	Moraines (gneiss et granite)	~0,3 (~1)	TL	2014-2016
Griaz (74)	3,8	Gneiss/Calcaires marneux (permafrost)	~1 (~5)	TL	2014-2016
Manival (38)	1,0-3,6	Dérochoir marno-calcaire	~0.25 (~1-3)	TL+Cr.+M.	2011-2016
Roize (38)	12,2	Dérochoir marno-calcaire	0 (~1)	TL + Cr.	2015-2016
Rif Cros (05)	2,99	Calcaires, Dolomie, moraines	~0,5(?)	TL+Cr.+M.	2015-2016
Roubion (05)	1,06	Gypse, Dolomie, moraines	~0,3(?)	TL+Cr.+M.	2015-2016
Réal (06)	1,3-1,7-2,0	Dépôt d'obstruction glaciaire	~3 (~3)	TL+Cr.+M.	2011-2016

Tableau 1 - Caractéristiques des torrents équipés de caméras automatiques par EDYTEM et IRSTEA. Type de suivi : TL : time-lapse journalier ; Cr : photos pendant les crues à 0,1-1 Hz ; M. : monitoring (* cf. Fontaine et al., 2017).

MATÉRIELS : CAPACITÉS ET CONTRAINTES

De nombreux types d'appareils photos ont été testés sur l'ensemble des sites : caméras renforcées à basse résolution (*e.g.*, CC640 de Campbell®), appareils photos destinés à la surveillance de la faune (*e.g.*, PC900 de Reconyx®), reflex numérique dans des coffrets étanches (*e.g.*, EOS1200D de Canon®) et caméras intégrant un ordinateur embarqué (*e.g.*, BeeCam d'Advantsee®). La qualité des images varie grandement entre les modèles : de 0,3 Mpx pour notre Campbell CC640, à 4,5 Mpx sur nos reflex numériques (Figure 1).

Les prises de vues time-lapse, de une à plusieurs fois par jour, peuvent être programmées simplement sur la caméra elle-même, ou via une centrale d'acquisition (*e.g.*, CR10X de Campbell®). Les déclenchements pendant les crues font appel à des capteurs externes (*e.g.*, géophones, voir Fontaine *et al.*, 2017) dont le signal doit être traité par une centrale environnementale. Afin d'obtenir des prises de vue à la fois lors des événements extrêmes et lors des petites crues, tout en évitant la saturation rapide de la mémoire de l'appareil, il est nécessaire de trouver un compromis sur la sensibilité des seuils de déclenchement relatifs aux capteurs externes.

Dans le cas particulier de la prise de vues pendant les crues des torrents à laves torrentielles, le temps d'éveil de la caméra doit être court. Par exemple, les fronts des laves torrentielles, partie clé du processus que l'on désire filmer, arrivent potentiellement en quelques secondes dans le champ de l'appareil. Positionner les capteurs externes une centaine de mètres en amont de la caméra apparait suffisant au vu des vitesses d'écoulement (des linéaires plus longs posent des problèmes de fiabilité du dispositif – dégâts liés aux animaux ou promeneurs, instabilités des berges et une augmentation du coût).

La gestion de l'alimentation électrique est un des principaux enjeux des systèmes d'acquisition. Lorsque le réseau public est proche, les stations y sont directement branchées. Les stations autonomes peuvent parfois fonctionner avec des jeux de piles ou des batteries pour des simples prises de vue journalières. Dans les cas où les batteries ne sont pas suffisantes, notamment pour les systèmes requérant un déclenchement externe, elles peuvent être couplées à une alimentation photovoltaïque. Celle-ci n'est toutefois pas suffisante pour alimenter un éclairage permettant de filmer les crues

nocturnes, comme celles provoquées par les gros orages estivaux. Des caméras à double capteur (couleur de jour et monochrome en condition de faible luminosité) ont été testées. Elles permettent d'élargir la plage de fonctionnement aux conditions de faible éclairage (aube, crépuscule), mais sont insuffisantes pour capter des objets distants de plus de quelques mètres en pleine nuit.

L'environnement souvent très humide imposerait d'utiliser des systèmes tropicalisés qui sont en général trop coûteux. Pour des recherches scientifiques par exemple, notre expérience laisse penser que, pour l'heure, des boîtiers reflex d'entrée de gamme positionnés dans des boîtiers étanches sont une bonne solution (Figure 1b). Chaque type d'appareil a toutefois ses avantages et ses inconvénients en termes de robustesse, flexibilité, autonomie, coût et qualité d'images. Il faut définir, sur chaque site, le cahier des charges à respecter pour choisir la configuration optimale. Malgré cela, il arrive que les contraintes réelles dépassent celles planifiées. Ainsi, des boîtiers étanches ne le sont pas totalement, ou des équipements installés sous un pont routier peuvent être gravement attaqués par la rouille (effet du sel de déverglaçage). Les progrès techniques, à des coûts toujours plus faibles, interdisent de définir un produit type idéal, et laissent penser que ces appareils sont voués à être de plus en plus implémentés. La capacité de recevoir à distance les clichés ouvre des perspectives opérationnelles importantes. Par exemple, la télétransmission peut faciliter le suivi et le contrôle des infrastructures et sites à forts enjeux, tels que les ouvrages de protection en amont de réseaux de communications clés et de zones urbaines peuplées. Elle permet alors d'intéresser, au-delà des chercheurs, les gestionnaires qui peuvent en conséquence aider en mutualisant les moyens.

D'après notre expérience, selon la fréquence des crues, la facilité d'accès au site et la complexité du système (time-lapse, déclenchement pendant les crues ou station de monitoring), entre 2 et 10 visites de contrôle par an sont nécessaires à une maintenance correcte de l'installation. L'émergence d'interface web, permettant le contrôle à distance du bon état de fonctionnement des stations de monitoring, tend à optimiser la fréquence de ces visites (voir Fontaine *et al.*, 2017).

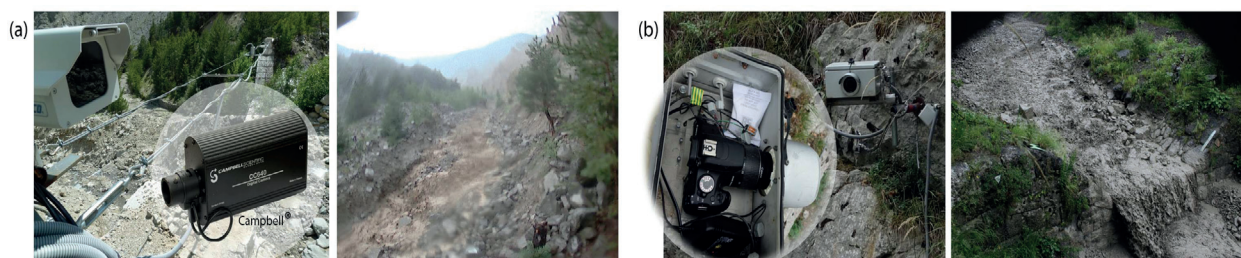


Figure 1 - Exemples de dispositif de prise de vues et d'images (d'après Bel, 2017). A) Caméra CC640 Campbell® installée sur le torrent du Réal. B) Réflex EOS550D Canon® installé sur le torrent du Manival.

NOUVEAUX ÉLÉMENTS TIRÉS DES OBSERVATIONS AUTOMATIQUES

Les trois sections suivantes illustrent et explicitent quelques éléments marquants tirés des observations

par caméras ; plus de détails sont disponibles dans Piton (2016), Berthet (2016) et Bel (2017).

Activité morphogène des torrents Chamoniards

Les dynamiques morphologiques des torrents proglaciaires préoccupent scientifiques et gestionnaires dans la mesure où d'importants volumes sédimentaires sont libérés des glaces dans les têtes de bassin. Les enjeux sont particulièrement importants dans la vallée de Chamonix, fortement urbanisée. Tout en étudiant les changements dans les marges proglaciaires, il a été nécessaire de comprendre les implications à l'aval. Cinq systèmes de prise de vue time-lapse ont donc été installés sur quatre torrents, avec une fréquence d'acquisition de 3 images par jour. Ils sont situés à proximité des zones de confluence avec l'Arve, en visant les bassins de plages de dépôt, destinés à limiter les apports des affluents glaciaires au cours d'eau principal de la vallée. Les changements observés sur les photographies reflètent donc l'état de la production sédimentaire de ces torrents proglaciaires. Bien que le traitement des images n'ait été que qualitatif, il a permis d'étayer les arguments qui s'appuyaient sur d'autres méthodes.

Les torrents proglaciaires connaissent des changements réguliers, imputables aux crues quotidiennes

durant la période de fonte estivale (Maizels, 1993). L'apport des caméras a permis de mettre en évidence l'absence de ce type de fonctionnement pour les torrents suivis. Les petites crues ont également eu des activités morphogènes négligeables. Sur l'Arveyron d'Argentière, même la part granulométrique la plus fine (sable et gravier) n'a pas été remobilisée (Figure 2a-b). En revanche, deux événements d'occurrence décennale ont été captés : la rupture d'une poche d'eau sur le glacier des Bossons qui alimente le torrent de la Creusaz le 07 août 2014 et un fort épisode pluvieux, le 26 août 2014, qui a principalement touché les Arveyrons de la Mer de Glace et d'Argentière. Ces crues ont été très morphogènes (Figure 2b-c). Ces observations tendent à souligner le déficit sédimentaire marqué de ces cours d'eau. La faiblesse des apports étant la conséquence conjuguée des aménagements humains (correction torrentielle, aménagement routiers, hydroélectricité) et d'un découplage des marges proglaciaires, où sont situés les stocks sédimentaires, avec les systèmes torrentiels à l'aval.

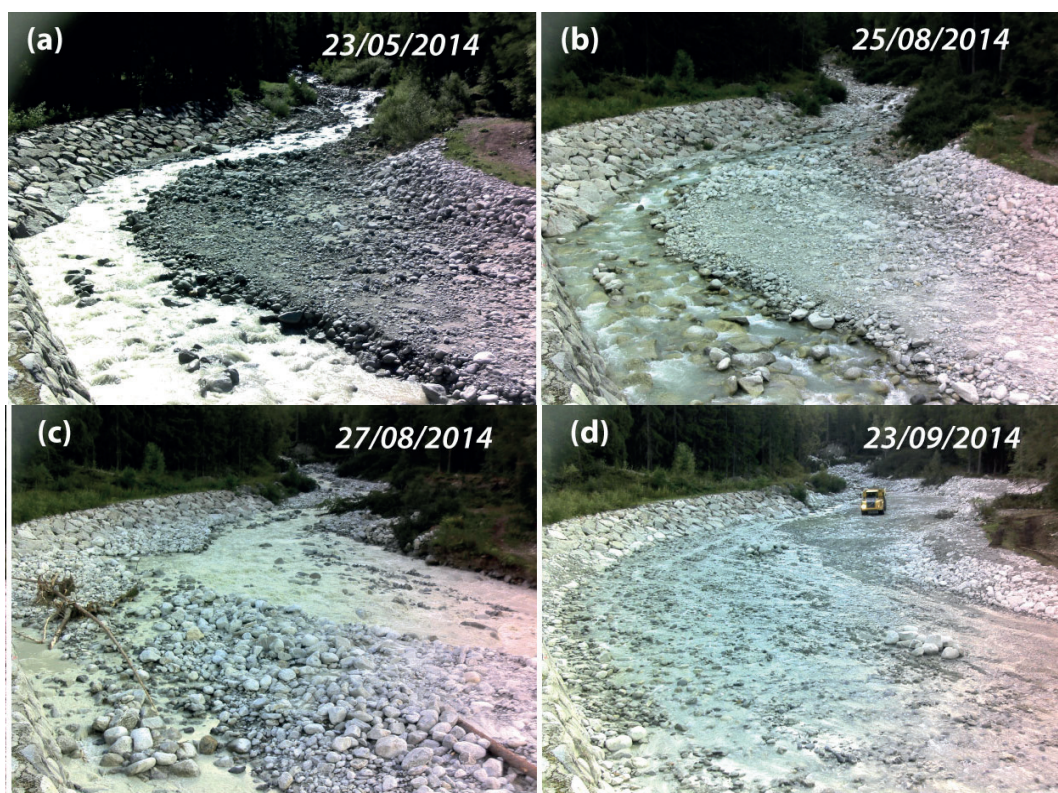


Figure 2 - Arveyron d'Argentière à l'amont immédiat de sa confluence avec l'Arve en 2014 : aucun changement n'est décelable entre (a) mai et (b) fin août. Après la crue du 26 août, le lit a totalement changé (c), avant d'être une nouvelle fois profondément remanié par les curages (d).

Caractérisation de la typologie des crues du Réal et du Manival

Les torrents peuvent subir à la fois des laves torrentielles et du charriage. La nature de ces écoulements gravitaires complexes va dépendre de multiples facteurs : fraction granulaire, argileuse et aqueuse du mélange, source et historique de propagation (Meunier, 1994 ; Bardou, 2002). Cette nature peut varier à la fois dans le temps et dans l'espace, et ce au cours d'un même événement. La caractérisation du type de crue est un élément clé lors de l'évaluation de l'aléa torrentiel et des potentiels dégâts occasionnés. Afin de discriminer phénoménologiquement les différents types d'écoulement et d'interpréter les signaux de monitoring, les prises de vues au cours des crues sont des informations essentielles (Figure 3).

Lors des crues à charriage (Figure 3a), l'écoulement fait usuellement quelques dizaines de centimètre d'épaisseur et apparaît clairement biphasique. Les images montrent également des changements morphologiques progressifs. Après la crue, les dépôts présentent une granulométrie de surface plutôt triée.

Les phénomènes de « laves immatures » (Figure 3 b-c), aussi dénommés « debris floods » (Hung, 2005), correspondent aux crues plus fortement chargées en matériaux solides. Les hauteurs d'écoulement sont plus importantes, de même que l'étendue granulométrique des matériaux transportés (on peut rencontrer des blocs). Les dépôts peuvent être localement triés. Le transport solide semble apparaître sous forme de bouffées, mais ne développe pas de front granulaire et reste biphasique. Les changements morphologiques peuvent être conséquents : jusqu'à plusieurs mètres de dépôt en quelques minutes ; e.g., Figure 3b avec le comblement du barrage en amont.

Enfin, lors des laves torrentielles (Figure 3d), des fronts, parfois haut de plusieurs mètres, apparaissent très clairement. L'écoulement monophasique intègre l'ensemble de la gamme granulométrique : de l'argile aux blocs pluri-métriques. Après la crue, les dépôts sont non triés et peuvent être matricés. Les changements morphologiques peuvent être là aussi conséquents, souvent de l'ordre de plusieurs mètres d'érosion ou de dépôt.

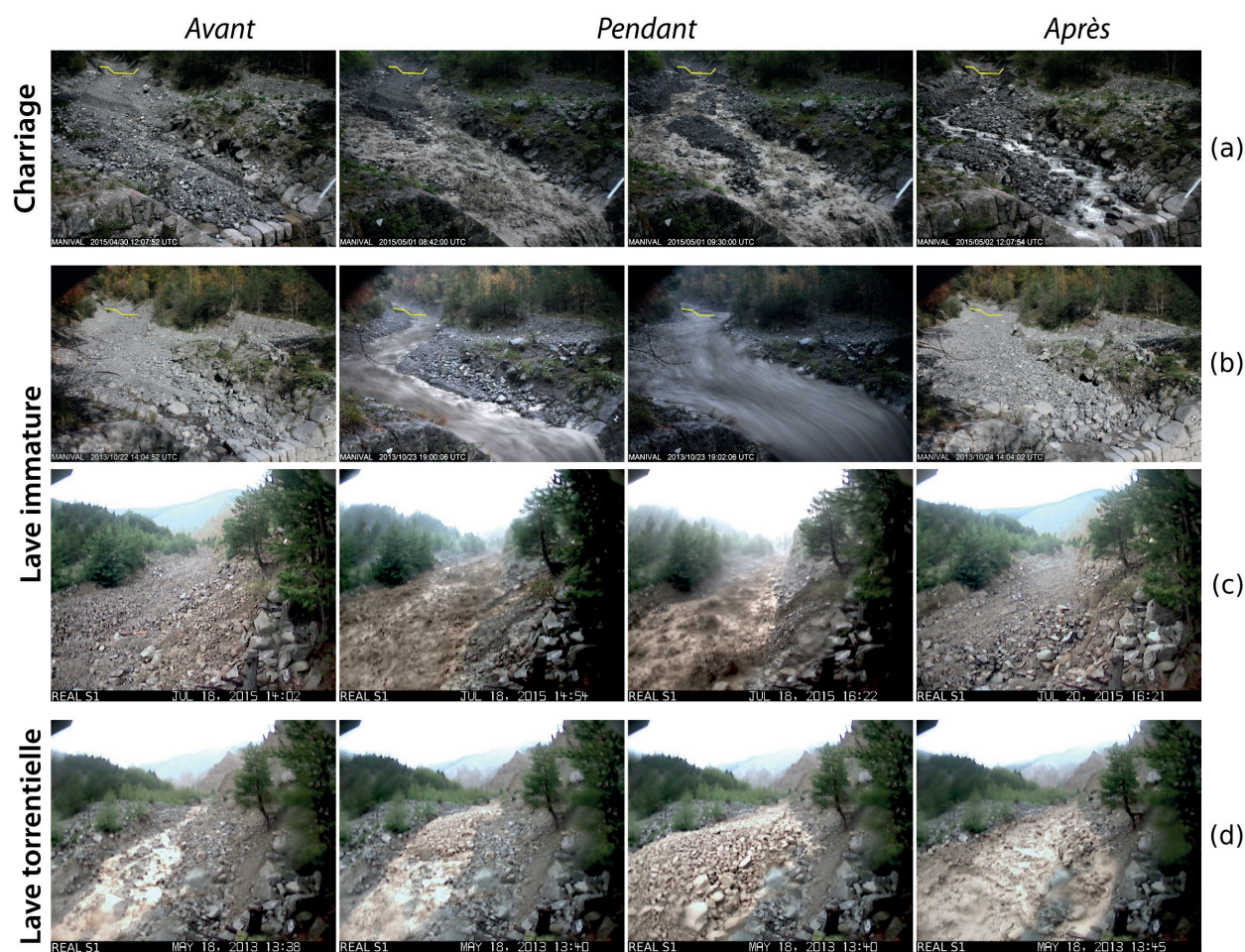


Figure 3 - Illustration du continuum phénoménologique de processus sédimentaire. Torrent du Manival : a) crue ordinaire avec du charriage ; b) crue fortement chargée, interprétée comme une lave immature (cf. Takahashi 2014). Torrent du Réal : c) lave immature ; d) lave torrentielle.

Morpho-dynamique dans les plages de dépôt de Chartreuse

Les bassins des plages de dépôt ont un rôle clé dans la réduction du risque torrentiel. Ils piègent la charge solide résultant des crues extrêmes, mais aussi des crues ordinaires, ce qui augmente les coûts de curages et perturbe les équilibres morphologiques et biologiques aval (Malavoi et al., 2011). Pour mieux dimensionner ces ouvrages et optimiser le transfert des crues ordinaires ne menaçant pas les enjeux, il est nécessaire

d'améliorer la compréhension actuelle de la dynamique de sédimentation de ces bassins de rétention. L'observation du remplissage de ces ouvrages lors des crues torrentielles constitue une première étape en apportant une description géomorphologique correcte des processus en jeux lors du piégeage de la charge solide.

Les premières observations corroborent des résultats issus de modèle physique (e.g., Piton 2016) en mettant en avant des cycles morphologiques alternant tressage et écoulement à chenal unique (Figure 4). Comme attendu, on observe par ailleurs que les crues ordinaires jouent un rôle clé sur le remplissage des plages de dépôt. Le piégeage est total dans les bassins régulièrement curés où l'absence de chenaux préexistants génère un étalement de la lame d'eau (Figure 4a-c). Dans le cas des bassins moins entretenus, où des chenaux apparaissent (Figure 4d-i), des phénomènes d'auto-curage partiels ont été observés à travers l'incision d'anciens dépôts.

Le suivi continu des sites au niveau de plusieurs stations démontre que ces torrents montrent régulièrement des crues d'eau claire, i.e., sans export de sédiment vers la plage de dépôt. Une activité morphogène peut tout de même avoir lieu plus haut : la crue du 23 juillet 2016 sur le Manival a, par exemple, fortement remanié le chenal au droit de la station supérieure (SBV=1,0 km²), alors que les écoulements atteignant la plage de dépôt (SBV=3,6 km²) n'ont déposé qu'une charge négligeable (images non fournies). Des stockages-déstockages (*respirations torrentielles*) ont donc clairement lieu au niveau du chenal d'écoulement.

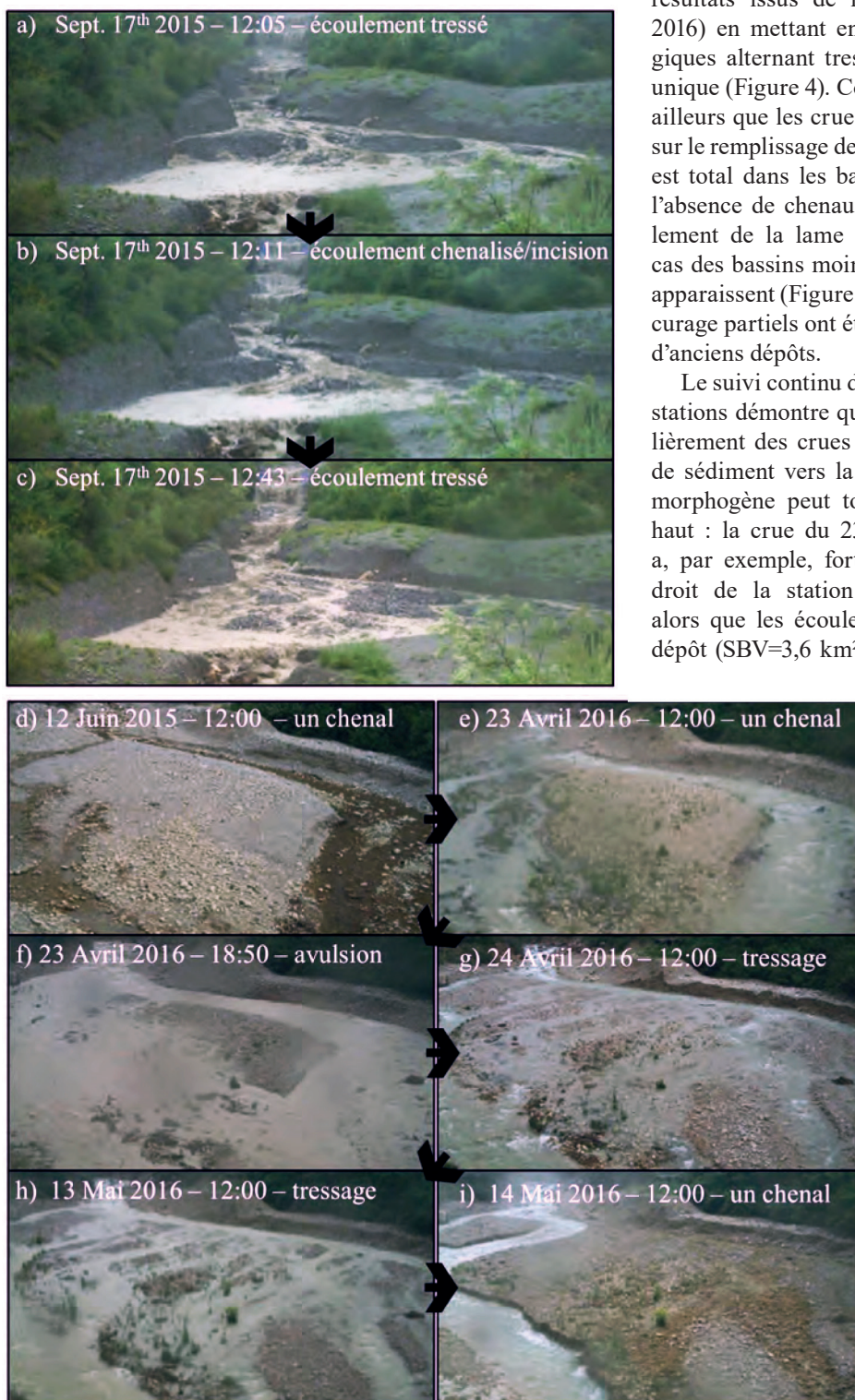


Figure 4 - Images prises depuis les barrages de fermeture des plages de dépôt du Manival (a-c) et de la Roize (d-g). Illustration des changements morphologiques et des cycles naturels d'écoulements mono- et multi-chenalisés dans les deux cas, à l'échelle d'une crue dans le Manival et d'une année dans la Roize, à la fourniture sédimentaire plus faible.

Systèmes de prises de vue installés sur les plages de dépôt du Manival (ci-dessous) et de la Roize (deux photos de droite) : Caméras Rexonyx dans coffrets de protection installés sur des mats de 3 m, spités dans les barrages en béton armé. Le mat supporte aussi le panneau solaire, un coffret étanche, installé au sol contre le barrage protège la batterie et la centrale environnementale des intempéries.



Systèmes de prise de vue installés sur : l'Arveyron d'Argentière (à gauche), l'Arveyron de la Mer de Glace (au-dessus) et le torrent de la Griez (à droite).



CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les progrès techniques dans le développement d'appareils photographiques numériques (robustesse, qualité des images) et de leur automatisation, à des coûts toujours plus réduits, permet désormais de mettre en place des dispositifs d'observation automatique des torrents. Les contraintes liées à l'environnement hostile des fonds de vallées de montagne peuvent être contournées par l'utilisation de dispositifs adaptés (alimentation solaire, coffrets étanches, boîtiers durcis) et par une maintenance raisonnable au regard de la qualité des informations acquises. Le développement parallèle de capteurs d'activité du torrent (voir Fontaine et *al.*, 2017) permet par ailleurs un déclenchement de prises de vues pendant les épisodes de crues, les observations à haute fréquence sont ainsi multipliées tout

en optimisant le stockage de données et la sollicitation des appareils. Ces prises de vues permettent de mesurer la fréquence d'activité des torrents et de qualifier les processus en jeux (laves/charriage) et les impacts morphologiques résultants. D'un point de vue opérationnel, c'est dans le suivi des ouvrages clés (ponts, ponts-canaux et plages de dépôt) que ces dispositifs de monitoring ont probablement le plus grand avenir, en particulier quand ils seront capables d'envoyer à distance, et en temps réel, les clichés des crues et des ouvrages, sujet sur lequel nous travaillons activement. D'autres perspectives d'application s'ouvrent également, comme la mesure des vitesses d'écoulement directement depuis les images. Ces techniques, plus pointues, existent néanmoins pour l'heure seulement au stade expérimental.

Remerciements

Un remerciement particulier est adressé aux financeurs de ces recherches : IRSTEA, les projets européens Alpine Space SedAlp et Alcotra RISBA et RISKMAT, la structure fédérative de recherche VOR (Vulnérabilité des Ouvrages aux Risques), le Conseil Départemental des Hautes-Alpes et le Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Abords (SM3A). Par ailleurs, nous tenons à remercier les services RTM des Hautes-Alpes, de l'Isère et des Alpes-Maritimes, ainsi que le SM3A, maîtres d'ouvrages des sites d'implantation des stations, ainsi que Frédéric OUSSET, Xavier RAVANNAT et Christian EYMOND-GRIS pour leur aide à la conception et à l'installation des dispositifs

BIBLIOGRAPHIE

- BARDOU E., 2002. Méthodologie de diagnostic des laves torrentielles sur un bassin versant alpin. Thèse de Doctorat, Ecole Polytech. Féd. de Lausanne, 382p.
- BEL C., 2017. Analysis of debris-flow occurrence in active catchments (French Alps) from field monitoring data. Thèse de Doctorat, Univ. Grenoble Alpes, 142 p.
- BEL C., LIÉBAULT F., NAVRATIL O., ECKERT N., BELLOT H., FONTAINE F., LAIGLE D., 2016. Rainfall control of debris-flow triggering in the Réal Torrent, Southern French Prealps. *Geomorphology*, 291, 17-32. DOI : 10.1016/j.geomorph.2016.04.004.
- BERTHET J., 2016. L'évolution géomorphologique des systèmes torrentiels proglaciaires dans la vallée de Chamonix-Mont Blanc : une approche du couplage sédimentaire de la fin du Petit Age Glaciaire au désenglacement récent. Thèse de Doctorat, Univ. Grenoble Alpes, 302 p.
- FABRE J.A., 1797. Essai sur la théorie des torrents et des rivières. Bidault Libraire, Paris. 342 p.
- FONTAINE F., BEL C., BELLOT H., PITON G., LIEBAULT F., JUPPET M., ROYER K., 2017. Suivi automatisé des crues à fort transport solide dans les torrents : stratégie de mesure et potentiel des données collectées. In Malet E., Astrade L., Monitoring en milieux naturels - Retours d'expériences en terrains difficiles, *Collection Edytem*, n°19, 211-218.
- HUNGR O., 2005. Chap. 2: Classification and terminology. In Debris-flow hazards and related phenomena, Springer. 9-23.
- MAIZELS J., 1993. Lithofacies variations within sandur deposits: the role of runoff regime, flow dynamics and sediment supply characteristics. *Sedimentary Geology*, 85, 299-325.
- MALAVOI J.R., GARNIER C.C., LANDON N., RECKING A., BARAN P., 2011. Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière. Ed. Onema. 216 p.
- MEUNIER M., 1994. Les progrès de la connaissance et les méthodes d'étude des phénomènes torrentiels. *La Houille Blanche*, 25-31.
- NAVRATIL O., LIÉBAULT F., BELLOT H., THEULE J., RAVANAT X., OUSSET F., LAIGLE D., SEGEL V., FIQUET M., 2011. Installation d'un suivi en continu des crues et laves torrentielles dans les Alpes françaises. In Journée de Rencontre sur les Dangers Naturels, Institut de Géomatique et d'Analyse du Risque, Lausanne (Suisse), 8 p.
- PITON G., 2016. Sediment transport control by check dams and open check dams in Alpine torrents. Thèse de Doctorat Univ. Grenoble Alpes, 222 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01420209v2>
- PITON G., CARLADOUS S., RECKING A., LIEBAULT F., TACNET J., KUSS D., QUEFFÉLÉAN Y., MARCO O., 2016. Why do we build check dams in Alpine streams? An historical perspective from the French experience. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(1), 91-108.
- PITON G., RECKING A., 2016a. Design of sediment traps with open check dams. I: hydraulic and deposition processes. *J. Hydraul. Eng.*, 142(2), 1-23.
- PITON G., RECKING A., 2016b. Design of sediment traps with open check dams. II: woody debris. *J. Hydraul. Eng.*, 142(2), 1-17.
- RECKING A., RICHARD D., DEGOUTTE G., 2013. Torrents et rivières de montagne: Dynamique et aménagement. Ed. Quae, Antony., 331 p.
- TAKAHASHI T., 2014. Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures. CRC Press, London, 551 p.