

Bilan sédimentaire dans le torrent du Manival

Autor(en): **Theule, Joshua / Liébault, Frédéric / Loye, Alexandre**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Mémoires de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **25 (2013)**

PDF erstellt am: **28.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-389824>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

8. Bilan sédimentaire dans le torrent du Manival (Préalpes françaises)

par

Joshua THEULE¹, Frédéric LIÉBAULT¹, Alexandre LOYE², Dominique LAIGLE¹
& Michel JABOYEDOFF²

Résumé.—THEULE J., LIÉBAULT F., LOYE A., LAIGLE D. & JABOYEDOFF M., 2013. Bilan sédimentaire dans le torrent du Manival (préalpes françaises). *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 109-118.

Le Manival, près de Grenoble (Préalpes Françaises), est un torrent produisant fréquemment des laves torrentielles. Une large plage de déposition de 25'000 m³ protège des laves torrentielles les infrastructures érigées sur son cône de déjection. Le suivi de l'activité sédimentaire, contrôlée dans le bassin versant par la plage de déposition, a débuté au printemps 2009. Des relevés au scanner laser terrestre ont été effectués pour mesurer les changements topographiques dans les petites ravines et le chenal principal, ainsi que dans la plage de déposition. Dans le chenal principal, 39 sections en travers ont été relevées après chaque événement. Les résultats de deux événements torrentiels de 2009 et 2010 ainsi que le transport par charriage consécutif à ces événements sont présentés. Ils révèlent une dépendance envers l'apport sédimentaire issu des zones de production. Durant ces deux années, le stockage sédimentaire qui a pu être identifié montre une tendance à diminuer, malgré une recharge en sédiment saisonnière.

Mots clés: Laves torrentielles, charriage, budget sédimentaire, profils en travers, torrent, Manival.

Abstract.—THEULE J., LIÉBAULT F., LOYE A., LAIGLE D. & JABOYEDOFF M., 2013. Sediment budget monitoring of the Manival Torrent (French-Prealps). *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 109-118.

The Manival near Grenoble (French Prealps) is a very active debris-flow torrent equipped with a large sediment trap (25 000 m³) protecting an urbanized alluvial fan from debris-flows. We began monitoring the sediment budget of the catchment controlled by the trap in Spring 2009. Terrestrial laser scanner is used for monitoring topographic changes in a small gully, the main channel, and the sediment trap. In the main channel, 39 cross-sections are surveyed after every event. Results for two channel debris-flows and bedload transport after the events in 2009 and 2010 are presented revealing the dependency of the sediment supply from the production zone of the torrent catchment. The past two years the torrent storage has been identified as to have a decreasing trend despite seasonal recharge.

Keywords: Debris-flow, bedload transport, sediment budget, cross-sections, torrent, Manival.

¹Unité de Recherche Erosion Torrentielle Neige et Avalanches (ETNA), IRSTEA Grenoble, France; tél.: +33 4 76 76 27 12. E-mail: frederic.liebault@irstea.fr

²Centre de Recherche en Environnement Terrestre (anciennement Institut de Géomatique et d'Analyse du Risque), Faculté des Géosciences et de l'Environnement, Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse.

INTRODUCTION

Les volumes de laves torrentielles sont fortement influencés par l'apport sédimentaire dans le chenal, de sorte que la quantité de sédiment disponible dans le thalweg est un facteur critique dans la prédiction des volumes de matériaux transportés par les laves torrentielles (COE *et al.* 2008, HUNGR *et al.* 2005, HUNGR *et al.* 1984, MARCHI & D'AGOSTINO 2004, REMAITRE *et al.* 2005). C'est pourquoi le taux de recharge, défini comme la vitesse à laquelle les sédiments s'accumulent dans le chenal entre les événements de laves torrentielles, contrôle la fréquence de ces dernières. Il a été utilisé pour distinguer les bassins versants à laves torrentielles limités par les apports sédimentaire de ceux limités par la capacité de transport (BOVIS & JAKOB 1999, JAKOB *et al.* 2005). Bien que les processus d'érosion et de déposition dans les ravines ont été reconnus comme des facteurs clés dans la compréhension de la dynamique des laves torrentielles, peu d'études ont essayé de les mesurer sur le terrain. Un autre problème est la coexistence de plusieurs mécanismes de transport dans les biefs des torrents. Le transport sédimentaire résulte à la fois du charriage et des laves torrentielles. Les travaux essayant de comparer l'influence respective de ces deux mécanismes dans la morphologie du chenal restent cependant insuffisants (MAO *et al.* 2009).

Les budgets sédimentaires à l'échelle du bassin versant peuvent être utilisés pour identifier les principales sources de sédiments, pour évaluer leur contribution respective dans la charge sédimentaire du bassin ainsi que pour avoir une meilleure compréhension des transferts sédimentaires dans ces systèmes géomorphiques complexes (DIETRICH & DUNNE 1978, GOMEZ *et al.* 2003, JOHNSON & WARBURTON 2002, SCHUERCH *et al.* 2006). L'étude de la morphologie du chenal par profils en travers s'est révélée efficace pour estimer le transport par charriage dans les rivières dominées par des bancs de graviers (MARTIN & CHURCH 1995, REID *et al.* 2007). Cette approche morphologique n'a été que rarement appliquée sur des torrents pour caractériser les volumes de laves torrentielles (VEYRAT-CHARVILLON & MEMIER 2006). Suite aux récents développements des scanners laser (LiDAR) aérien et terrestre, il est maintenant possible de mettre en œuvre un relevé topographique de haute résolution, et cela fréquemment. Cette technologie a été de plus en plus utilisée pour capturer les changements morphologiques en terrains accidentés (CONWAY *et al.* 2010, MILAN *et al.* 2007, SCHEIDL *et al.* 2008).

Cet article présente les résultats d'un programme d'observations du bilan sédimentaire d'un bassin torrentiel très actif situé dans la région de Grenoble (Le torrent du Manival). Des sections transversales ainsi que des relevés au scanner laser terrestre (SLT) ont été effectuées. Cet article se concentre principalement sur le suivi par sections en travers dans le torrent principal.

ZONE D'ÉTUDE

Le Manival est un torrent à laves torrentiels très actif situé près de Grenoble, dans les Préalpes françaises du Nord (figure 1). Sa proximité à la ville de Grenoble, son accès facile au torrent principal ainsi que la présence d'une large plage de déposition ($25'000 \text{ m}^3$) en aval permettant de protéger les zones urbanisée du cône contre les laves torrentielles fait du Manival un site d'étude adéquat pour mettre en place un programme d'observations du transport sédimentaire en milieu torrentiel.



Figure 1.–Vue du torrent du Manival ainsi que de sa zone de production en tête de bassin. (photo: Joshua Theule et Alexandre Loye).

En amont de la plage de déposition, la pente moyenne du torrent est de 16% et son aire contributive est de 3.6 km² pour un dénivelé de 1200 m. Approximativement, 180 barrages de retenue ont été construits depuis les années 1890 tout le long du torrent principal et des petites ravines parallèles. Ils sont entretenus par l'Administration des Eaux et Forêts (Service de Restauration des Terrains en Montagne, RTM).

La géologie du bassin versant est typique de la chaîne sédimentaire préalpine. La roche est intensément fracturée et se compose d'une alternance de marnes et de calcaires du Jurassique. La roche en place est couverte par d'épais dépôts de colluvions, lesquels sont mobilisés par des glissements superficiels et des coulées de débris sur les versants ainsi que par des avalanches de neige. Les escarpements de calcaire sont susceptibles de produire des chutes de blocs, lesquels alimentent la couverture de débris sur les versants. Pendant la période de fonte des neiges, les ravines situées sous les falaises peuvent connaître une chute de blocs tous les 5 à 10 minutes (selon les observations de terrain des auteurs).

L'analyse des archives concernant l'historique des débâcles pour les deux derniers siècles montrent que le torrent a produit des laves torrentielles importantes de l'ordre de 10'000 à 60'000 m³ (PETEUIL *et al.* 2008). Depuis 2008, le torrent du Manival a produit une lave torrentielle chaque année.

METHODES

Le suivi du bilan sédimentaire du bassin versant en amont de la plage de dépôt a débuté au printemps 2009 au moyen d'une observation détaillée du chenal torrentiel et de ses versants. Deux techniques différentes ont été utilisées: une étude par sections en travers le long du chenal principal ainsi que des relevés des versants et ravines les plus représentatives au SLT (cette dernière ne fait toutefois pas l'objet de cet article). La plage de dépôt a été utilisée pour définir la charge sédimentaire en sortie du bassin au moyen de mesures des dépôts sédimentaires effectué à partir de relevés au SLT. Les précipitations ont été mesurées depuis octobre 2008 au moyen d'un pluviomètre à bascule installé dans la partie haute du bassin (résolution de 0.14 mm).

Etude par profils en travers

39 stations de relevés par profils en travers ont été réparties le long du chenal principal, entre la plage de déposition et la zone de confluence à l'apex du cône de déjection (figure 2). Les relevés sont effectués avant et après un évènement torrentiel à l'aide d'une station totale (Leica Geosystem TS02, précision de 1.5 mm + 2 ppm). Les volumes de sédiments érodés et déposés dans le torrent sont quantifiés au moyen de la méthode dite morphologique (MARTIN & CHURCH 1995, RAVEN *et al.* 2009, REID *et al.* 2007), permettant ainsi une estimation des volumes de matériaux transportés. Les volumes de déposition V_D et d'érosion V_E entre les sections en travers sont obtenus de la façon suivante:

$$V_E = \frac{A_{E(n)} + A_{E(n+1)}}{2} L_{(n,n+1)} \quad (\text{Equation 1})$$

$$V_D = \frac{A_{D(n)} + A_{D(n+1)}}{2} L_{(n,n+1)} \quad (\text{Equation 2})$$

Les volumes V_D et V_E estimés couvrent la longueur L de deux profils en travers n et $n+1$ avec leur surface transversale moyenne d'érosion A_E et de déposition A_D . La balance de l'activité sédimentaire δV pour le bief considéré est déterminée par la différence entre les deux volumes V_D et V_E . Le principe de conservation de la masse est utilisé pour déterminer le transport des sédiments grossiers pour chaque bief selon l'équation suivant:

$$V_{out} = V_{in} - \delta V \quad (\text{Equation 3})$$

Le volume de sédiments en sortie du bief V_{out} est déterminé par les contributions du bief lui-même δV jusqu'au volume d'entrée du bief amont. A partir des observations de l'apport sédimentaire dans la plage de dépôt ainsi que les volumes charriés tout au long du torrent, l'apport sédimentaire en provenance des zones de production peut être déduit.

L'incertitude des volumes estimés pour chaque bief, c'est-à-dire se situant entre deux profils en travers, $\sigma_{\delta V}$, a été calculé à partir de la loi de Taylor sur la propagation des incertitudes (REID *et al.* 2007):

$$\sigma_{\delta V} = \sqrt{\left(\sigma_L \left[\frac{\delta V}{\delta L} \right]\right)^2 + \left(\sigma_z \left[\frac{\delta V}{\delta z} \right]\right)^2 + \left(\sigma_d \left[\frac{\delta V}{\delta d} \right]\right)^2} \quad (\text{Equation 4})$$

Les termes σ_d et σ_z font références respectivement à l'erreur associée aux distances et élévations des points des profils transversaux. A ces deux termes, une valeur de 5 cm a été attribuée correspondant au D_{84} de la distribution granulométrique de la surface du lit. La distance curviligne entre deux sections successives a été mesurée sur un modèle numérique de terrain (MNT) haute résolution dérivé d'un scan laser aéroporté (ALS). A celle-ci a été attribuée une valeur d'erreur de 1 m (σ_L), correspondant à la maille du MNT.

RÉSULTATS

Durant les deux années d'observations de la topographie du bassin, deux laves torrentielles (DF1 et DF2) se sont produites, chacune ayant une signature différente en terme de charriage (BD1-3 et BD4-6) (figure 3).

Les évènements de 2009

L'orage qui a provoqué la lave torrentielle DF1 est caractérisé par une intensité maximale de pluie de 48,9 mm h⁻¹. Les volumes mesurés par SLT dans la plage de dépôt ont révélé une accumulation de sédiments de 1 873 ± 62 m³ (tableau 1). Les relevés topographiques par profils en travers le long du chenal principal ont montré une perte nette de 2034 ± 559 m³

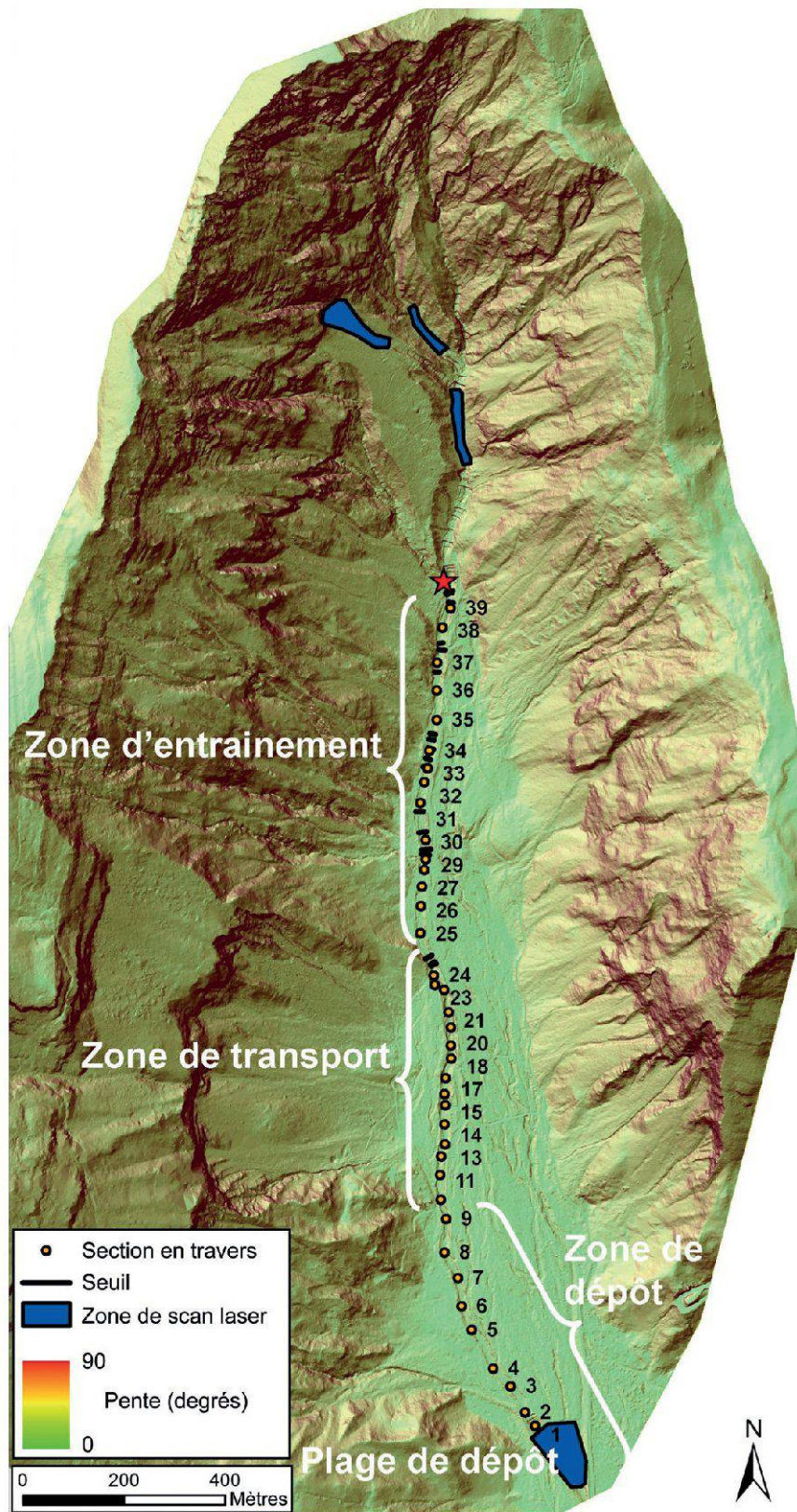


Figure 2.—Carte des pentes et ombrage du MNT du bassin versant du Manival, issue du LiDAR aérien, sur laquelle est reportée l'emplacement des sections étudiées, des barrages et de la zone de déposition.

(déposition: 3 200 m³, érosion: 5 215 m³). L'activité a eu lieu dans la zone de production (rupture de pentes et transport sédimentaire en tête de basins), laquelle était cependant déconnectée du torrent principal (THEULE *et al.* 2012).

La lave torrentielle DF1 s'est chargée en sédiment le long d'un bief sur une distance 600 m, lequel a contribué pour 3 000 m³ (pente moyenne: 18%). Cela correspond à une charge sédimentaire d'environ 5 m³/m. La plupart des sédiments ont été transportés sans interagir avec le chenal sur une distance de 730 m et de pente moyenne de 15%. La déposition a débuté lorsque la pente moyenne atteint 14% et s'est terminée dans la plage de dépôt.

Un mois plus tard, une longue période de pluie d'intensité moyenne (intensité maximum de 16.9 mm h⁻¹) a provoqué le transport de graviers depuis la zone de production dans le chenal principal (BD1) (figure 3). Le budget sédimentaire montre un net gain de 789 ± 392 m³ (déposition: 2 195 m³, érosion: 1 410 m³ (tableau 1). Nous avons pu en outre observer que la déposition a eu lieu de façon préférentielle dans les biais inférieurs qui avaient été purgés durant la lave torrentielle d'août. Nous avons pu calculer que 39% de la perte sédimentaire induite par la lave torrentielle d'août a été compensée par BD1.

BD2 a eu lieu durant de longues périodes de pluie en octobre, atteignant une intensité maximale de 1.6 mm h⁻¹. (figure 3). Le débit d'eau dans le chenal été devenu plus régulier. Le bilan sédimentaire du chenal montre une perte de 89 ± 322 m³ (tableau 1); cependant, un apport d'au moins 233 m³ dans la partie supérieure du chenal révèle un volume de recharge conséquent de la part de la zone de production. La moitié inférieure du torrent en direction de la plage de dépôt a subi une incision d'au moins 321 m³ en raison d'une chenalisation constante du flux d'eau qui emporte les dépôts laissés par les laves torrentielles et phases de charriages précédentes.

Tableau 1.—Budget sédimentaire dans le torrent du Manival pour les événements de 2009 et 2010.

	DF1	BD1	BD2	BD3	DF2	BD4	BD5	BD6
Apport sédimentaire depuis la zone de production	~0 m ³	789 m ³	? m ³	~0	~336 m ³	~210 m ³	~0 m ³	~0 m ³
Changement du stock sédimentaire dans le torrent	-2034 m ³ ±559 m ³	+789 m ³ ±392 m ³	-89 m ³ ±322 m ³	-580 m ³ ±342 m ³	-3052 m ³ ±626 m ³	-608 m ³ ±320 m ³	-267 m ³ ±157 m ³	-306 m ³ ±287 m ³
Volume sédimentaire transporté à l'exutoire (plage de dépôt)	1873 m ³ ±62 m ³	~0 m ³	Perturbé	Perturbé	3388 m ³	819 m ³	200 m ³	440 m ³

Les évènements de 2010

En juin 2010 (au début de la saison des cellules convectives), une lave torrentielle (DF2) a eu lieu lors d'une pluie d'intensité maximale de 25,3 mm h⁻¹. Les mesures effectuées dans la plage de dépôt ont permis d'estimer une accumulation de sédiments de 3388 m³

(tableau 1). Les relevés topographiques par section en travers le long du chenal principal ont montré une perte nette de $3052 \pm 626 \text{ m}^3$ (déposition: 4605 m^3 , érosion: 7658 m^3). La lave torrentielle DF2 a eu un comportement identique à DF1, excepté sa plus grande magnitude. Les caractéristiques de surface de propagation, d'entraînement, de transport et de surface de déposition sont très semblables entre les deux événements torrentiels. Peu d'activité a été observée dans la zone de production.

Le reste de l'été a connu de grandes périodes de pluie de forte intensité, oscillant entre 20 et 40 mm h^{-1} , ne provoquant cependant pas de laves torrentielles ou aucun transport important de sédiments (figure 3). A ce moment, le torrent était pauvre en sédiments et n'était donc pas en mesure de produire une quelconque lave torrentielle malgré la saison. Jusqu'au mois d'octobre 2010, des bancs de gravier se sont développés dans la partie supérieure de la zone de déposition du torrent BD4 (figure 2). La plage de dépôt a accumulé 819 m^3 selon les mesures effectuées à la station totale. Les profils en travers ont permis d'estimer à $608 \pm 320 \text{ m}^3$ la perte en sédiments opérée dans le torrent, ce qui représente un volume de 210 m^3 de matériel rechargeant le chenal depuis la zone de production (tableau 1). Les dépôts post-événements ainsi que les levées de DF2 ont été érodés et accumulés en bancs de graviers dans des biefs préférentiels. Durant la période d'automne 2010, ces bancs de gravier ont été graduellement mobilisés et transportés dans la plage de dépôt en contrebas (BD5 et BD6), sans aucune contribution de la part de la zone de production. Aucune recharge dans le torrent n'a eu lieu durant cette période d'automne.

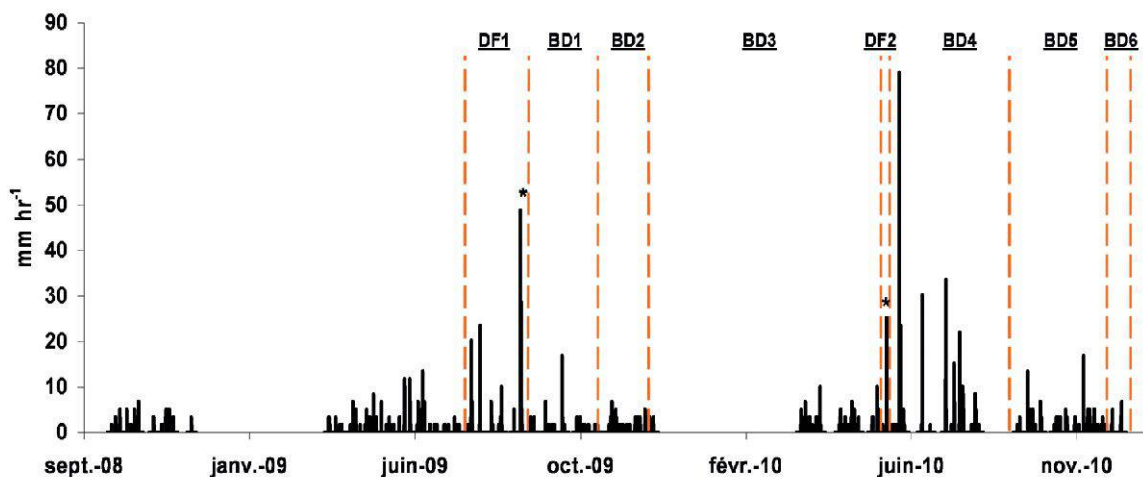


Figure 3.—Campagnes de sections en travers effectuées (line pointillé orange) entre les événements de flux sédimentaire (en gras).

REMARQUES ET CONCLUSIONS

De récentes études ont démontré l'importance de la disponibilité en sédiments, de la capacité de recharge dans le torrent, ainsi que du lien entre le chenal et son bassin versant dans le déclenchement des laves torrentielles (COE *et al.* 2008, SCHLUNEGGER *et al.* 2009). Deux années de suivis topographiques dans le torrent du Manival ont révélé le rôle important

joué par la recharge sédimentaire depuis la zone de production et le transport de sédiment dans le torrent dans le déclenchement régulier de laves torrentielles. Cette recharge sédimentaire qui se dépose dans le chenal principal s'effectue sous forme de bancs de graviers, lesquels ont une faible résistance au cisaillement. La figure 3 montre la tendance décroissante du budget sédimentaire du torrent, malgré la recharge de DF1 (figure 4). A la suite de l'évènement DF2, des pluies de très forte intensité n'ont pas été en mesure de déclencher une lave torrentielle en raison de la disponibilité réduite en matériel peu résistant. L'apport sédimentaire de ces dernières années dans la zone de production semble avoir été limité. Les données historiques du service RTM (PETEUIL 2008) indiquent que la dernière avalanche rocheuse dans la zone de production a eu lieu en 1992, provoquant des laves torrentielles importantes dans un court délai. Des études complémentaires se poursuivent afin de comprendre l'interdépendance entre les évènements rares dans la zone de production responsable de la recharge sédimentaire et les évènements saisonniers de laves torrentielles dans le torrent du Manival.

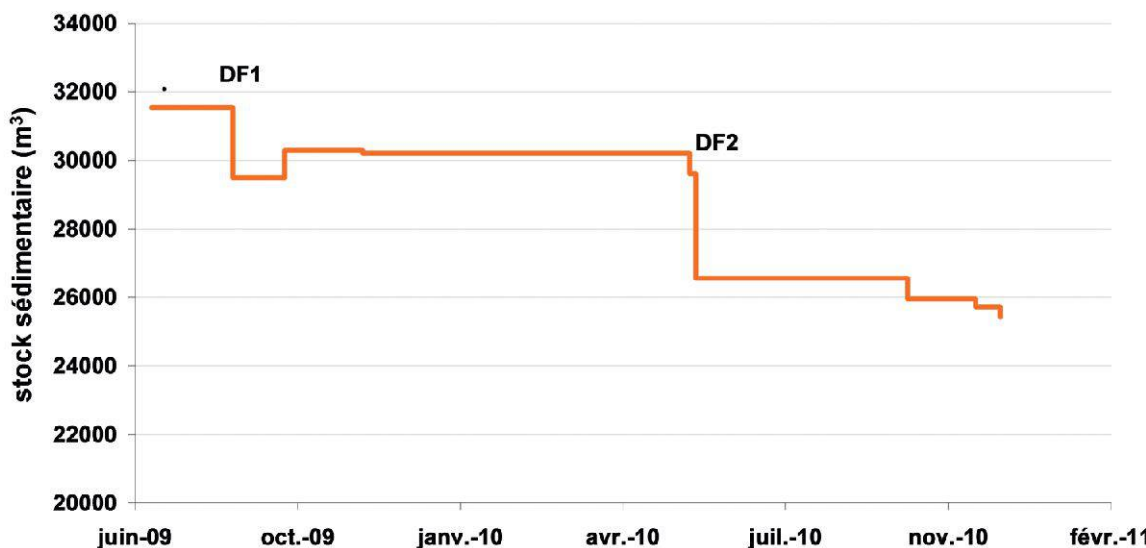


Figure 4.–Variation du stock sédimentaire contenu dans le torrent du Manival estimé à partir des relevés de sections en travers (le stock initial a été déterminé par analyse du niveau de base du lit du torrent).

REMERCIEMENTS

Ces recherches ont été financées par le projet «Interreg Alpine Space Paramount» et par le «Pôle Grenoblois d'étude et de recherche pour la prévention des Risques Naturels» (PGRN). Les auteurs souhaitent remercier Bruno Bacq, Adeline Heymann, Mathieu Labbé, Michael Deschatres, Hugo Jantzi, Mathieu Cassel, Emilien Parisot, and Nicolas Talaska pour leur assistance durant les campagnes de terrains.

REFERENCES

BOVIS M. J. & JAKOB M., 1999. The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. *Earth Surface Processes and Landforms* 24, 1039-1054.

- COE J. A., KINNER D. A. & GODT J. W., 2008. Initiation conditions for debris flows generated by runoff at Chalk Cliffs, central Colorado. *Geomorphology*, 96(3-4), 270-297.
- CONWAY S. J., DECAULNE A., BALME M. R., MURRAY J. B. & TOWNER M. C., 2010. A new approach to estimating hazard posed by debris flows in the Westfjords of Iceland. *Geomorphology*, 114(4), 556-572.
- DIETRICH W. E. & DUNNE T., 1978. Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain. *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. Bd.*, 29, 191-206.
- GOMEZ B., BANBURY K., MARDEN M., TRUSTRUM N. A., PEACOCK D. H. & HOSKIN P. J., 2003. Gully erosion and sediment production: Te Weraroa Stream, New Zealand. *Water Resources Research*, 39(7).
- HUNGR O., MCDUGALL S. & BOVIS M., 2005. Entrainment of material by debris flows. *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*, M. Jakob & O. Hungr, eds., Springer, Berlin Heidelberg, Germany, 135-158.
- HUNGR O., MORGAN G. C. & KELLERHALS R., 1984. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal*, 21, 663-677.
- JAKOB M., BOVIS M. & ODEN M., 2005. The significance of channel recharge rates for estimating debris-flow magnitude and frequency. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(6), 755-766.
- JOHNSON R. M. & WARBURTON J., 2002. Annual sediment budget of a UK mountain torrent. *Geografiska Annaler*, 84A(2), 73-88.
- MAO L., CAVALLI M., COMITI F., MARCHI L., LENZI M. A. & ARATTANO M., 2009. Sediment transfer processes in two Alpine catchments of contrasting morphological settings. *Journal of Hydrology*, 364(1-2), 88-98.
- MARCHI L. & D'AGOSTINO V., 2004. Estimation of debris-flow magnitude in the Eastern Italian Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 207-220.
- MARTIN Y. & CHURCH M., 1995. Bed-material transport estimated from channel surveys: Vedder River, British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 1011-1024.
- MILAN D. J., HERITAGE G. L. & HETHERINGTON D., 2007. Application of a 3D laser scanner in the assessment of erosion and deposition volumes and channel change in a proglacial river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(11), 1657-1674.
- PETEUIL C., MARAVAL C., BERTRAND C. & MONIER G., 2008. Torrent du Manival: Schéma d'aménagement et de gestion du bassin versant contre les crues. Unpublished technical report; Office National des Forêts, Service de Restauration des Terrains en Montagne de l'Isère, Grenoble, Grenoble, France.
- RAVEN E. K., LANE S. N., FERGUSON R. I. & BRACKEN L. J., 2009. The spatial and temporal patterns of aggradation in a temperate, upland, gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(9), 1181-1197.
- REID S. C., LANE S. N., BERNEY J. M. & HOLDEN J., 2007. The timing and magnitude of coarse sediment transport events within an upland, temperate gravel-bed river. *Geomorphology*, 83(1-2), 152-182.
- REMAITRE A., MALET J. P. & MAQUAIRE O., 2005. Morphology and sedimentology of a complex debris flow in a clay-shale basin. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(3), 339-348.
- SCHEIDL C., RICKENMANN D. & CHIARI M., 2008. The use of airborne LiDAR data for the analysis of debris flow events in Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Science*, 8(5), 1113-1127.
- SCHLUNEGGER F., BADOUX A., MCARDELL B. W., GWERDER C., SCHNYDRIG D., RIEKE-ZAPP D. & MOLNAR P., 2009. Limits of sediment transfer in an alpine debris-flow catchment, Illgraben, Switzerland. *Quaternary Science Reviews*, 28(11-12), 1097-1105.
- SCHUERCH P., DENSMORE A. L., MCARDELL B. W. & MOLNAR P., 2006. The influence of landsliding on sediment supply and channel change in a steep mountain catchment. *Geomorphology*, 78(3-4), 222-235.
- THEULE J. I., LIÉBAULT F., LOYE A., LAIGLE D. & JABOYEDOFF M., 2012. Sediment budget monitoring of debris-flow and bedload transport in the Manival Torrent, SE France. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12, 731-749.
- VEYRAT-CHARVILLON S. & MEMIER M., 2006. Stereophotogrammetry of archive data and topographic approaches to debris-flow torrent measurements: Calculation of channel-sediment states and a partial sediment budget for Manival torrent (Isère, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(2), 201-219.