Géomorphologie : relief, processus, environnement

vol. 24 - n° 1 | 2018
Actes des 18ème journées des Jeunes Géomorphologues

Traçage sédimentaire d'une lave torrentielle dans le bassin de la Peyronnelle (Queyras, Alpes françaises du Sud)

Tracing sedimentary mobilization from debris flows in the Peyronnelle watershed (Queyras, Southern French Alps)

Kevin Graff, Vincent Viel, Benoît Carlier, Candide Lissak, Malika Madelin, Gilles Arnaud-Fassetta et Monique Fort

Édition électronique
URL : http://journals.openedition.org/geomorphologie/11967
DOI : 10.4000/geomorphologie.11967
ISSN : 1957-777X

Éditeur
Groupe français de géomorphologie

Édition imprimée
Date de publication : 21 avril 2018
Pagination : 43-57
ISBN : 978-2-913282-79-7
ISSN : 1266-5304

Ce document vous est offert par Université Paris Diderot Paris 7

Référence électronique
Kevin Graff, Vincent Viel, Benoît Carlier, Candide Lissak, Malika Madelin, Gilles Arnaud-Fassetta et Monique Fort, « Traçage sédimentaire d'une lave torrentielle dans le bassin de la Peyronnelle (Queyras, Alpes françaises du Sud) », *Géomorphologie : relief, processus, environnement* [En ligne], vol. 24 - n° 1 | 2018, mis en ligne le 20 mars 2018, consulté le 02 mai 2018. URL : http://journals.openedition.org/geomorphologie/11967 ; DOI : 10.4000/geomorphologie.11967

© Groupe français de géomorphologie

revue en ligne : https://journals.openedition.org/geomorphologie/

GÉOMORPHOLOGIE : RELIEF, PROCESSUS, ENVIRONNEMENT

vol. 24, n° 1 (2018), p. 43-57
Mise en ligne le 20 mars 2018 sur journals.openedition.org
https://journals.openedition.org/geomorphologie/11967
DOI:10.4000/geomorphologie.11967

© 2018 GFG Editions - Tous droits réservés

http://edytem.univ-savoie.fr/gfg/

Traçage sédimentaire d'une lave torrentielle dans le bassin de la Peyronnelle (Queyras, Alpes françaises du Sud)

Tracing sedimentary mobilization from debris flows in the Peyronnelle watershed (Queyras, Southern French Alps)

Kévin Graff [*a], Vincent Viel [b], Benoît Carlier [b], Candide Lissak [a], Malika Madelin [b], Gilles Arnaud-Fassetta [b], Monique Fort [b]

[a] Université Caen-Normandie, UMR 6554 CNRS-LETG – Esplanade de la Paix, 14000 Caen, France.
[b] Université Paris 7-Diderot, Sorbonne Paris Cité, UMR 8586 CNRS-PRODIG – 5 rue Thomas Mann, 75013 Paris, France.

RÉSUMÉ

Du fait d'un certain nombre de facteurs prédisposants (lithologie schisteuse, forte connectivité versant–chenal), le bassin versant du Haut-Guil (317 km²) est particulièrement sensible au risque de crues torrentielles. Liées à des épisodes météorologiques de haute magnitude/basse fréquence, ces crues entraînent d'importants remaniements de stocks sédimentaires dans les drains élémentaires. Au cours de la crue trentennale de juin 2000, l'un des principaux affluents du Guil, le Peynin (15 km²), a fourni jusqu'à 22 500 m³ de matériaux déplacés par les laves torrentielles. Afin d'améliorer les connaissances sur la dynamique de ces stocks sédimentaires, 320 transpondeurs passifs RFID (PIT tags) ont été implantés dans les galets et blocs du lit du torrent de la Peyronnelle. Depuis deux ans, ces galets et blocs équipés ont fait l'objet d'une surveillance régulière. Le 9 août 2015, un orage estival (14 mm en 3 h) a déclenché des laves torrentielles dans deux sous-bassins du Peynin (Ravin de la Peyronnelle ; Ravin des Trois arbres), mettant en mouvement plus de 90 % des galets et blocs équipés. Les distances maximales parcourues ont dépassé 700 m. Pour cet épisode, un volume total de 9 000 m³ de sédiments a été mobilisé le long du bassin de la Peyronnelle et plus d'un tiers des galets et blocs équipés a rejoint le Peynin. Le taux de retour (~30 %) des galets et blocs équipés ainsi que les distances parcourues mettent en avant la rapide recharge sédimentaire des drains de premier ordre dans les bassins élémentaires.

Mots clés : lave torrentielle, transpondeur passif RFID, transfert sédimentaire, cône de déjection, Alpes françaises.

ABSTRACT

The upper Guil watershed (317 km²) in the Queyras is characterized by a lithology composed of 90-95% of schists, supplying a high, fine and coarse sediment load to the active channel. The Guil River is subject to high magnitude/low frequency, flash-flood events. Most of the sediment load in the main channel of the Guil River comes from small torrential tributaries, such as the Peynin watershed. Transported by debris flows, the sediment volumes deposited during June 2000 have been estimated up to 12,000 m³ aggraded on the Peyronnelle fan. We intend to highlight the sediment dynamics on small torrential channels and its connection with gravel-bed streams. Thus, we set up 320 PIT tags equipped pebbles and boulders on the Peyronnelle watershed; distances and trajectories of tracers have been monitored since 2013 during summer periods. On August 9, 2015, a thunderstorm occurred in the Peynin watershed and triggered debris flows in the most active sub-watersheds. This event has mobilized 90% of the PIT tags equipped pebbles and boulders installed in the Peyronnelle watershed. On the basis of a 32% return rate, our results indicate a > 700 m maximum distance transfer and the mobilization of 36% of PIT tags equipped pebbles and boulders out of the watershed. Deposited volumes on the torrential fans have been estimated up to 9,000 m³ in the Peynin watershed. These results highlight the pulsating character of sediment fluxes associated with moderate magnitude and frequency events and indicate the strongest functionality of debris-flow dominated channels in the Peynin watershed..

Keywords: *debris flow, PIT tag, sedimentary transfer, alluvial fan, French Alps.*

INFORMATION SUR L'ARTICLE
Article soumis le 12 octobre 2017.
Reçu sous sa forme révisée le 05 février 2018.
Définitivement accepté le 12 mars 2018.

*Auteur correspondant. Tél : 33 (0)2 31 56 61 46
Courriels :
kevin.graff@unicaen.fr (K. Graff)
vincent.viel@univ-paris-diderot.fr (V. Viel)
carlierbenoit@hotmail.fr (B. Carlier)
candide.lissak@unicaen.fr (C. Lissak)
malika.madelin@univ-paris-diderot.fr (M. Madelin)
gilles.arnaud-fassetta@univ-paris-diderot.fr (G. Arnaud-Fassetta)
fort@univ-paris-diderot.fr (M. Fort)

1. Introduction

Dans les bassins versants montagnards, les flux sédimentaires issus de l'érosion des versants sont particulièrement élevés. La charge alluviale de fond est régulièrement mobilisée lors de crues durant lesquelles des blocs de plusieurs tonnes peuvent être transportés. Si aujourd'hui les infrastructures permettent une régulation efficace des débits liquides dans les rivières de montagne (Hughes et Rood, 2003), une meilleure gestion des transferts solides doit être menée pour limiter les dégâts liés aux crues (Rollet, 2008). Pour gérer efficacement l'impact de cet aléa et du risque qu'il engendre, il convient de comprendre la dynamique sédimentaire à la fois temporellement et spatialement, depuis les

lieux de production jusqu'à l'exutoire du bassin versant (Cossart, 2016). Les transferts sédimentaires, qu'ils soient longitudinaux et/ou latéraux, ne sont pas linéaires dans le bassin versant. Le transit sédimentaire se fait *via* une succession de processus efficients à des échelles spatiales et temporelles variables, qui assurent le relais entre les différentes zones de stockage sédimentaire intermédiaires. Cette complexité des flux sédimentaires est formalisée à travers le concept de cascade sédimentaire (Caine, 1974 ; Beylich et Warburton, 2007). Pour analyser les flux au sein de la cascade sédimentaire, il est souvent approprié de réaliser un budget sédimentaire, qui permet de quantifier les entrées, le transport et les stocks sédimentaires intermédiaires ainsi que les sorties au sein d'un bassin versant (Walling, 1983 ; Reid et Dunne, 2003). Cependant, la réalisation d'un budget sédimentaire nécessite d'appréhender quantitativement les facteurs de déclenchement de chacun des processus intervenant dans la cascade sédimentaire, tels que les seuils de formation ou les fréquences d'observation, ainsi que les flux sédimentaires qui y sont associés (Summerfield, 1991 ; Schrott et Adams, 2002 ; Beylich et Warburton, 2007). Dans le but de caractériser et quantifier à terme le budget sédimentaire dans le bassin versant montagnard du Peynin (Queyras, France), la recherche présentée ici se focalise sur un phénomène particulier, celui des laves torrentielles. À l'origine de flux sédimentaires importants, ces laves assurent un rôle de transition au sein du système torrentiel entre les processus de versant (glissements de terrain, éboulements, etc.) et le transport solide par charriage. Elles jouent généralement un rôle important dans la recharge de la cascade sédimentaire (Remaître et al., 2005 ; Garitte et al., 2007 ; Bel et al., 2015). Comprendre leur fonctionnement est donc essentiel si l'on souhaite mieux appréhender les dynamiques spatiales et temporelles des flux sédimentaires qui animent les extrémités amont des bassins versants montagnards, zones de production préférentielle des débits solides responsables des dommages en aval.

L'objectif est ici d'analyser la mobilisation puis la redistribution des sédiments dans le bassin versant durant un événement de lave torrentielle observée lors d'un épisode hydro-climatique de basse fréquence (10-15 ans) et de relativement haute magnitude. Cette étude a été menée sur le Peynin, l'un des affluents du Guil. Situé dans le Parc Naturel Régional du Queyras, dans les Alpes du Sud françaises (fig. 1), le bassin versant du Guil est sporadiquement soumis à des épisodes de pluies intenses dont les effets sont très morphogènes dans les bassins versants torrentiels affluents (Koulinski, 2000 ; Brousse et al., 2011 ; Fort et al., 2002 ; Koulinski, 2002 ; Arnaud-Fassetta et Fort, 2004 ; Arnaud-Fassetta et al., 2005 ; Fort et al., 2015). Notre choix s'est porté sur le bassin torrentiel le plus actif en matière de transfert de la charge solide, celui du Peynin (Koulinski, 2000 ; Fort et al., 2002) et plus particulièrement sur l'un de ses sous-bassins, la Peyronnelle d'une superficie de 1 km² (Einhorn, 2003). Afin de quantifier les transferts sédimentaires induits par les laves torrentielles, nous avons expérimenté une méthode de traçage de la charge grossière basée sur l'utilisation de transpondeurs passifs RFID (*Radio Frequency IDentification*) appelés *PIT tags* (Nichols, 2004 ; Lamarre et al., 2005 ; Rollet et al., 2008 ; McCoy et al., 2011 ; Liébault et al., 2012 ; Bel, 2017). Bien que cette méthode soit utilisée depuis plusieurs années sur des écoulements permanents de faible à moyenne énergie (Lamarre et al., 2005 ; Phillips et Jerolmack, 2014 ; Michler et al., 2016), son application à des bassins élémentaires sujets à des laves torrentielles est encore peu répandue et constitue l'originalité de ce travail (Graff et al., 2016). Après avoir présenté brièvement le secteur d'étude, nous comparerons les deux derniers événements (2000 et 2015) de laves torrentielles enregistrés sur le bassin de la Peyronnelle avant de détailler les méthodes utilisées et d'expliciter, discuter et mettre en perspective les résultats obtenus.

2. Secteur d'étude

Le Queyras bénéficie d'un climat méditerranéen à influence montagnarde. Située dans la zone interne des Alpes, cette région est protégée des perturbations venues de l'Atlantique avec les courants d'ouest et profite d'un régime sous le vent la majeure partie de l'année. Parfois, principalement en fin de printemps et en automne, des masses d'air humides venant du sud-est, les « *coups de Lombarde* », peuvent engendrer d'intenses précipitations sur des intervalles de temps très courts (Fort et al., 2015). Les débits extrêmes des cours d'eau du bassin sont atteints lorsque se cumulent les apports de la fusion nivale avec ceux des épisodes de Lombarde. Une telle configuration météorologique explique au cours des siècles l'occurrence de crues catastrophiques : les plus importantes du dernier siècle ont été les crues des 12-15 mai 1948, 13-15 juin 1957 (Tricart, 1961) et 10-14 juin 2000 (Arnaud-Fassetta et al., 2005). Les volumes de matériaux transportés durant la crue centennale de juin 1957 ont été estimés à 270 000 m³ pour le Guil et 100 000 m³ pour le Peynin (Tricart, 1960, 1961). La crue de juin 2000 a été considérée comme trentennale (Fort et al., 2002 ; Arnaud-Fassetta et al., 2005 ; Koulinski, 2014 ; Fort et al., 2015). Durant cet événement, les volumes transportés par le Guil, estimés à environ 150 000 m³, ont été principalement fournis par ses affluents de rive gauche.

Durant la crue de juin 2000, l'affluent ayant transporté le plus de sédiments a été le Peynin (Koulinski, 2000, 2002 ; Einhorn, 2003). Ce bassin torrentiel est un affluent de rive gauche du Guil, d'une superficie de 15 km² (fig. 1). Situé dans la partie amont du Guil, il s'inscrit dans les schistes lustrés alpins (unité piémontaise) présentant un pendage (rétro-charriage de la nappe pennine) qui se traduit par une forte dissymétrie des versants. Le versant de rive droite est parallèle au pendage tandis que le versant de rive gauche est à contre-pendage. Les chutes de blocs, les écoulements torrentiels et les avalanches sont les processus dominants sur la rive gauche du Peynin et expliquent l'efficacité des transferts sédimentaires dans les sous-bassins. Parmi les sous-bassins tributaires de rive gauche, celui de la Peyronnelle, d'une superficie de 1 km² et d'une pente longitudinale moyenne de 23,5 %, apparaît comme le plus efficace en matière de transfert sédimentaire. En juin 2000, les volumes de débris déposés sur le cône déjection de la Peyronnelle par ce torrent ont été estimés à 12 000 m³ tandis que le bassin adjacent (le ravin des Trois Arbres) a fourni 4 000 m³ lors du même événement (Fort et al., 2002 ; Einhorn, 2003). Les cônes de déjection de ces deux affluents du Peynin sont coalescents et représentent une surface totale de 0,35 km². Si, dans le bassin de la Peyronnelle, les avalanches sont récurrentes d'une année sur l'autre, ce sont les écoulements hyper-concentrés et les laves torrentielles, de moindre fréquence, qui constituent le principal mode de transport sédimentaire vers le chenal du Peynin. Le dernier événement de lave torrentielle enregistré dans le bassin de la Peyronnelle s'est produit en août 2015 (fig. 2). Du fait de ses caractéristiques (versant à contre pendage, forte activité torrentielle, abondante fourniture en débris), le bassin de la Peyronnelle est donc apparu comme le plus adapté pour suivre les transferts sédimentaires à partir de traceurs et analyser le comportement ainsi que les volumes transportés par les laves torrentielles.

3. Outils et méthodes

3.1. Méthode de traçage sédimentaire

Deux principales méthodes permettent de déterminer la mobilité des sédiments grossiers (> 2 mm) d'un cours d'eau : *(i)* les méthodes de mesure indirectes, basées sur la déduction d'une

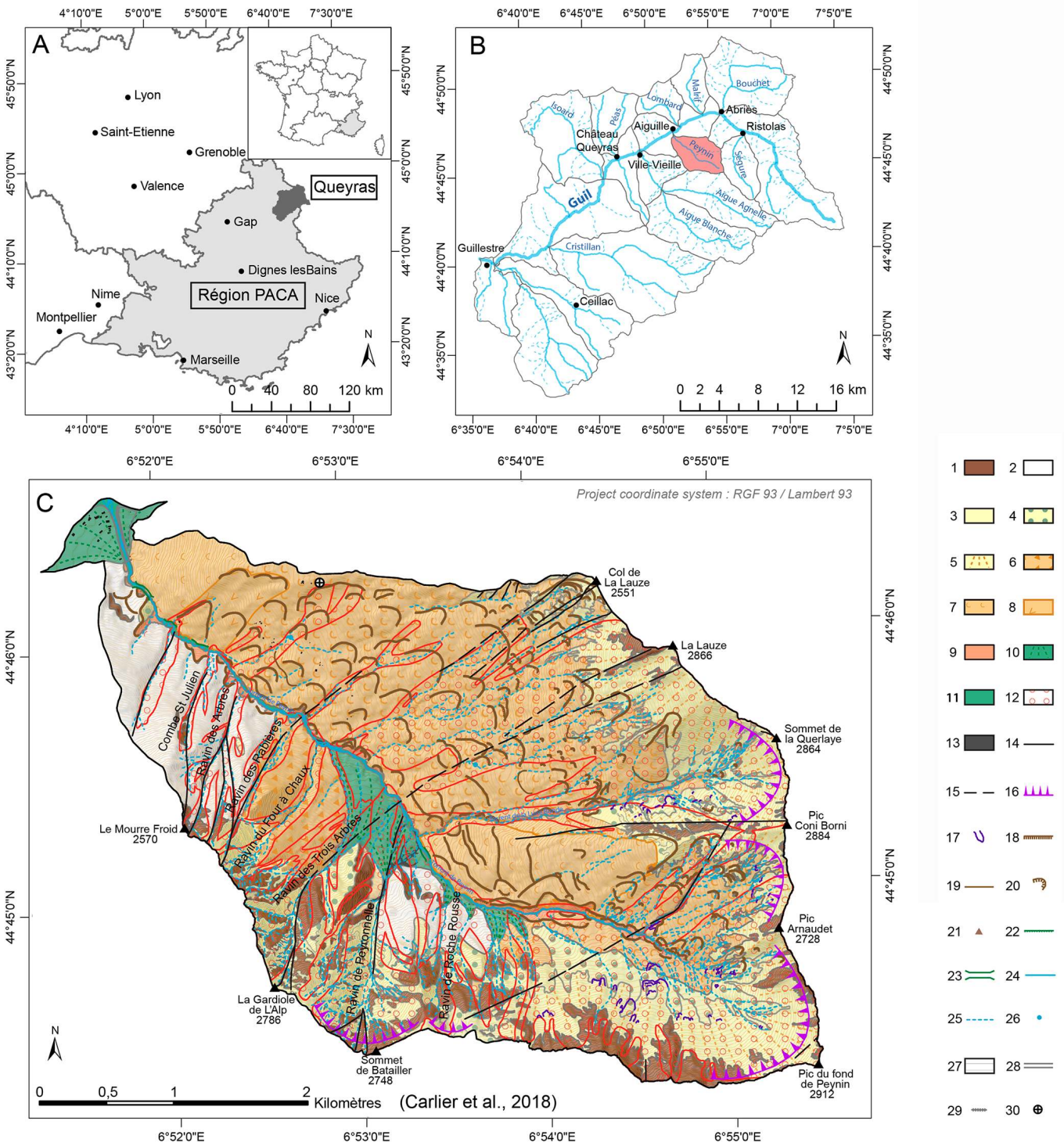


Fig. 1 – Localisation du bassin versant du Guil.

A : Localisation du bassin du Peynin parmi les sous-bassins du Guil. B : Carte géomorphologique du Peynin (Carlier et al., 2018). C : 1. Affleurement rocheux ; 2. Substrat ; 3. Éboulis ; 4. Éboulis végétalisé ; 5. Tablier d'éboulis actif ; 6. Dépôt d'éboulement ; 7. Terrain glissé ; 8. Tassement rocheux ; 9. Glissement-arrachement de bas de versant ; 10. Cône torrentiel ; 11. Surface d'accumulation torrentielle ; 12. Emprise des avalanches ; 13. Dépôt de lave torrentielle de 2000 et 2015 ; 14. Faille observée ; 15. Faille supposée ; 16. Cirque glaciaire ; 17. Loupe de solifluxion ; 18. Niche d'arrachement ; 19. Front de glissement ; 20. Glissement rotationnel superficiel ; 21. Bloc éboulé ; 22. Rebord de terrasse torrentielle (crue de juin 1957) ; 23. Gorge ; 24. Cours d'eau pérenne ; 25. Cours d'eau temporaire ; 26. Source ; 27. Espace ludique d'Aiguilles (piste de luge, terrain de snowboard et VTT, remontée mécanique, etc.) ; 28. Digue non maçonnée ; 29. Seuil temporaire ; 30. Station météorologique.

Fig. 1 – Location of the Guil Watershed.

A: Location of the Peynin watershed among the Guil sub-watershed. B: Geomorphological mapping of Peynin (Carlier et al., 2018). C: 1. Rocky outcrop; 2. Absence of superficial deposit; 3. Scree; 4. Vegetalised scree; 5. Active talus deposit; 6. Rockslide; 7. Landslide; 8. Rocky collapse; 9. Downslope pullout; 10. Torrential fan; 11. Torrential accumulation surface; 12. Avalanche stranglehold; 13. Debris flow deposit (2000 and 2015); 14. Fault; 15. Supposed fault; 16. Glacial cirque; 17. Solifluction lobe; 18. Landslide scare; 19. Front of landslide; 20. Rotational landslide; 21. Collapsed block; 22. Torrential terrace ledge – flood of 1957; 23. Gorge; 24. Watercourse; 25. Temporary watercourse; 26. Source; 27. Recreation area of Aiguilles; 28. Levee – not built; 29. Threshold – temporary; 30. Weather station.

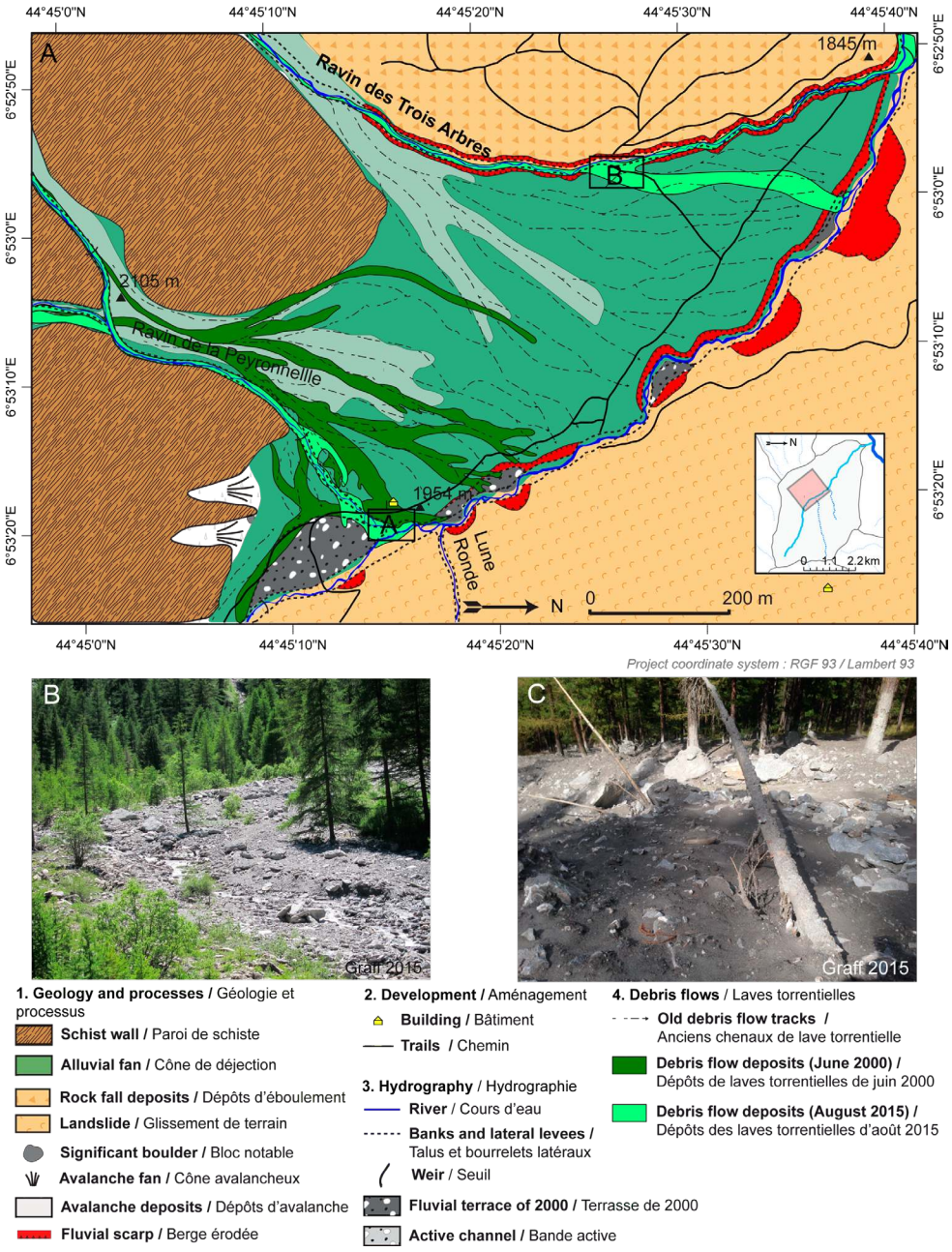


Fig. 2 – Carte géomorphologique du cône de la Peyronnelle et des Trois Arbres. Aval du cône de déjection de la Peyronnelle après le passage de la lave torrentielle d'août 2015.

Aval du cône de déjection de la Peyronnelle (A). Débordement de la lave torrentielle d'août 2015 sur le cône de déjection du ravin des Trois Arbres (B).

Fig. 2 – Geomorphological mapping of the Peyronnelle and Trois Arbres fan.

Peyronnelle downstream after debris flow of August 2015. Downstream of the Peyronnelle fan (A). The debris flow of August 2015 overflowed on Trois Arbres fan (B).

relation de mouvement, depuis la zone d'érosion jusqu'à la zone de dépôt la plus proche, et d'un seuil de mise en mouvement des particules (Rollet, 2008) et, *(ii)* les méthodes de mesure directes qui permettent d'évaluer les distances réellement parcourues, les seuils de mise en mouvement de la charge solide et les flux charriés (Wilcock et al., 1996 ; Haschenburger et Church, 1998 ; Petit et al., 2005 ; Wong et al., 2007). Les méthodes de traçage n'ont pas cessé d'évoluer depuis les années 1960 grâce à une sophistication toujours plus avancée des outils et des types de traceur. Les taux de retour associés à ces méthodes vont être fortement variables. Ils diffèrent selon de nombreux éléments tels que la technique de traçage, la portée des *PIT tags*, les systèmes de détection, la résistance des traceurs à l'abrasion ou la rapidité avec laquelle les traceurs vont être diffusés dans le milieu (Cassel, 2017). Hassan et Roy (2016) mettent en avant plusieurs avantages de la technologie RFID (*PIT tags*). Facile d'utilisation, elle permet un suivi individuel et à long terme du transport grossier, avec une durée de vie des traceurs supérieure à 50 ans pour des traceurs exposés en surface ou enfouis. L'implantation des traceurs dans des particules demande en revanche un travail important et peut parfois perturber l'imbrication des particules dans le lit. L'utilisation de radio-transmetteurs, donnant une information en continu sur la position des particules en surface et en profondeur durant une crue, n'a pas été envisagée en raison du coût important de cet outil et de sa durée de vie d'environ un an. Le traçage radioactif présente les mêmes caractéristiques qu'une technologie RFID mais le prix élevé, la toxicité engendrée et l'octroi nécessaire d'un permis représentaient trop de contraintes pour leur utilisation. L'utilisation de traceurs magnétiques a également été rejetée en raison de l'impossibilité de retrouver à distance l'identifiant des traceurs.

Dans le cas d'étude, le suivi des mouvements des galets et blocs transportés sous forme de laves torrentielles se fait par des traceurs qui doivent présenter des caractéristiques spécifiques pour qu'ils puissent se révéler efficaces. En effet, contrairement à un écoulement fluviatile « classique », aucun tri granulométrique

n'est observé lors du transport et du dépôt sédimentaire, et les débris les plus grossiers (entre 1 et 2 m) sont transportés au même titre que les plus fins (Johnson et Rodine, 1984 ; Remaître, 2006). Les écoulements de lave torrentielle tendent à transporter les débris les plus grossiers en front de lave et sur les marges, également appelés front et bourrelet de lave torrentielle (Berti et al., 1999). Les traceurs doivent donc être capables de résister à un remaniement conséquent au sein même des écoulements torrentiels et doivent être détectables sous la surface des dépôts de lave. Avec ce type d'écoulement, il n'est pas envisageable de marquer les blocs avec de la peinture, d'insérer des matériaux exogènes ou des revêtements d'oxyde de fer car ces marqueurs ne sont pas détectables sous la surface (Rollet, 2008). Par ailleurs, les contraintes du site d'étude ne permettent pas de transporter des équipements trop contraignants. Enfin, nous savons qu'il existe une forte probabilité de perte des traceurs en raison de la puissance hydraulique de ce type d'écoulement. Au vu des coûts nécessaires à leur mise en place, l'insertion d'aimants, de noyaux de fer, d'anneaux de métal, de particules radioactives et de radio transmetteurs a ainsi été exclue des marqueurs envisagés. Nous avons donc fait appel à une méthode de traçage RFID à travers l'utilisation de *PIT tags* pour analyser et quantifier le transport sédimentaire dans un petit bassin torrentiel montagnard.

Un *PIT tag* (RFID passif) est un transpondeur passif composé d'un noyau en ferrite, d'un circuit intégré, d'un condensateur de charge et de résonance hermétiquement fermé dans une enveloppe en verre (Rollet, 2008). Les *PIT tags* sont dits passifs car ils réagissent à un signal électromagnétique émis par une antenne RFID et sont identifiables par un coffret autonome de lecture des transpondeurs passifs. La portée maximale du signal émis par l'antenne au *PIT tag* est de 40 cm et elle est variable selon la porosité et le type de sol. Les *PIT tags* sont principalement utilisés pour le suivi du transport des sédiments grossiers, c'est-à-dire les graviers, galets et les blocs selon la nomenclature de Wentworth, dans les grandes rivières (Lamarre et al., 2005 ; Rollet, 2008, Piégay et al., 2016) et les rivières de montagne (Liébault et al., 2012 ; Brousse et al., 2017).

3.2. Stratégie d'échantillonnage des particules

Dans un petit bassin torrentiel tel que celui de la Peyronnelle, l'analyse granulométrique est particulièrement complexe en raison de l'hétérométrie des particules, allant des sables, inférieurs à 2 mm, aux très gros blocs, supérieurs à 2 m (Bunt et Abt, 2001). Des stratégies telles que l'échantillonnage par quadrillage (Cailleux et Tricart, 1959), consistant à mettre en place une grille à la surface du sol et à enregistrer l'ensemble des particules présentes sous chaque nœud, ne convenaient pas en raison de la taille parfois plurimétrique des galets ou des blocs présents dans le torrent et d'un risque de sur- ou sous-représentativité de la taille des particules présentes sur les berges. Nous avons procédé à une analyse fine de la granularité de la charge grossière de la Peyronnelle à travers une stratégie de comptage surfacique des blocs et galets. En suivant la méthode d'échantillonnage de Wolman (1954), nous avons comparé la représentativité de la taille des galets et blocs équipés (GBE) de *PIT tags*. Cette stratégie consiste à mesurer selon un pas régulier, dans notre cas 50 cm, les caractéristiques des particules présentes le long d'un profil en travers. Pour chacune des particules retenues, nous avons déterminé sa taille, sa position dans le chenal et sa pétrographie. Ainsi, 14 profils en travers ont été réalisés d'amont en aval du torrent de la Peyronnelle à l'aide d'un DGPS, et 433 particules ont été échantillonnées (fig. 3). Les sédiments ainsi collectés sont considérés comme la gamme granulométrique de référence des éléments grossiers transportés par la Peyronnelle.

3.3. Application de la méthode des PIT tags à la Peyronnelle

Les capacités de transport et les puissances spécifiques sont à leur paroxysme en contexte de lave torrentielle, ce qui engendre une forte mobilité horizontale et verticale des sédiments. Cette absence de tri granulométrique (Remaître, 2006) constitue la principale faiblesse de cet outil car les GBE sont aléatoirement déposés en surface et enfouis sous la surface. Il y a donc un risque qu'une partie des particules équipées soit indétectable en raison de l'enfouissement par les laves torrentielles. De plus, la récurrence des laves torrentielles peut se faire sur des pas de temps décennaux à pluri-décennaux. Par conséquent, les GBE peuvent rester en place pendant plusieurs années sans pouvoir être remobilisés.

Dans le bassin de la Peyronnelle, la question de la position, de la taille et du type de blocs dans lequel un *PIT tag* devait être injecté a été au cœur de l'élaboration du protocole méthodologique. En effet, le substrat géologique de la Peyronnelle est à dominante métamorphique, constitué de « schistes lustrés ». Or, les débris en « plaquettes » résultant de l'altération des schistes résistent moins que d'autres au transport sédimentaire dans les torrents. Nous avons donc sélectionné des blocs de schistes quartzeux ou de schistes carbonatés, mieux adaptés à l'injection des *PIT tags*. De la même façon, nous avons éliminé les débris inférieurs à 9 cm de largeur car ils se dilataient sous la contrainte de l'injection.

Suite à l'ensemble des contraintes, nous avons implanté 320 tags TIRIS 134 KHz Basses fréquences (réf : T09P025 4002) de 2,3 cm de long dans des galets et blocs selon la nomenclature de Wentworth (échelle logarithmique de base 2). Nous avons choisi une dizaine de sites d'implantation homogènes afin de couvrir l'ensemble du linéaire de la Peyronnelle (fig. 3). L'intérêt était de pouvoir décrire précisément les distances parcourues par la charge solide dans les différents tronçons torrentiels. Nous avons volontairement augmenté la taille et le nombre des GBE sur les sites n° 3 et n° 10 en raison de leur positionnement stratégique (fig. 4). Le site d'implantation n° 3, situé à la confluence de la Peyronnelle et de son affluent de rive gauche, représente un secteur préférentiel de passage des laves torrentielles ; le site n° 10, situé à l'exutoire, permet de rendre compte de la charge exportée depuis l'aval de la Peyronnelle vers le Peynin. Chaque GBE a été repositionné dans son imbrication naturelle afin de ne pas fausser leur résistance à l'entraînement par les laves torrentielles.

Sur les 320 GBE, 10 % ont été positionnés sur les sommets de berge, 20 % sur les flancs internes de berge et 70 % dans le fond du lit. Depuis leur mise en place en juillet 2014, les GBE ont fait l'objet d'une prospection annuelle en période estivale ou après un événement spécifique comme celui d'août 2015. La taille des blocs retenus pour l'injection de *PIT tags* est comprise entre 4,2 cm et 160 cm (axe B) et est ensuite repéré avec un DGPS (Rollet, 2008 ; Liébault et al., 2012). En dessous de 4,2 cm, la taille de la particule ne permettait pas la mise en place de *PIT tags*. Au-delà de 160 cm, la probabilité de mise en mouvement des blocs par les laves torrentielles a été considérée comme étant trop faible. Ces deux éléments expliquent le décalage observé entre la courbe granulométrique des galets et blocs de la Peyronnelle (GB) et celle des GBE (fig. 5).

4. Résultats

4.1. Les laves torrentielles du 9 août 2015

Les laves torrentielles du 9 août 2015 sont les premières à se produire dans le bassin versant de la Peyronnelle depuis celles

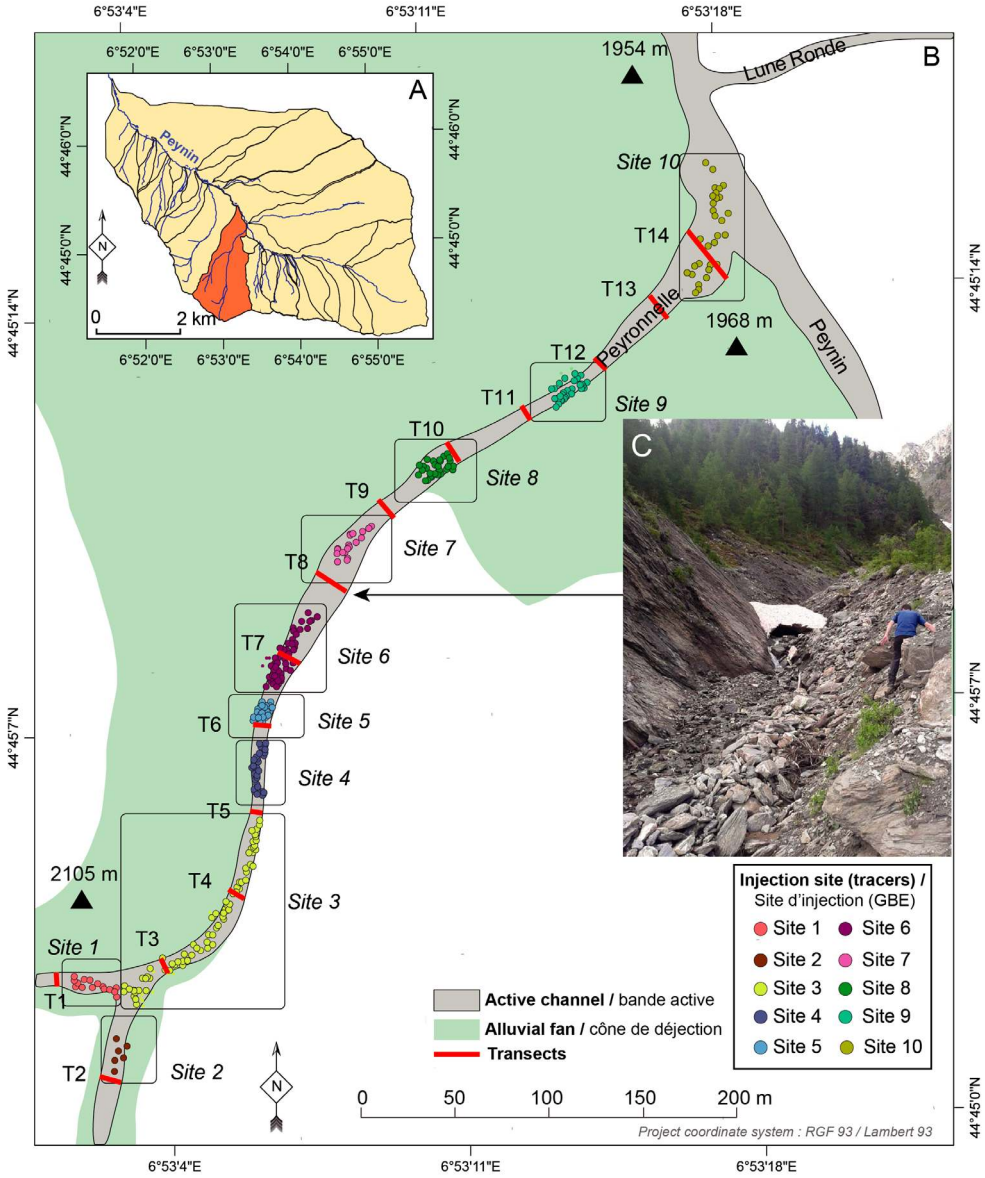


Fig. 3 – Localisation de la Peyronnelle.

Localisation des 14 transects réalisés d'amont en aval de la Peyronnelle à l'aide d'un DGPS (A) et des 10 sites de marquage des GBE (B). La photo illustre la morphologie du talweg au niveau du transect n° 8 (C).

Fig. 3 – Location of the Peyronnelle.

Location of the 14 transects selected along the Peyronnelle torrent with a DGPS (A) and location of the 10 PIT tags injection sites (B). The photo illustrates the morphology of the talweg in the transect #8 (C).

de juin 2000 (Fort et al., 2002 ; Einhorn 2003 ; Fort et al., 2015). Une station météorologique installée à 2 000 m sur le versant de rive droite du Peynin et mesurant les précipitations à haute fréquence (pas de temps de 6 minutes) a permis d'estimer à 38,2 mm en 41 h (dont 14 mm en 3 h) le volume de pluie, d'une intensité moyenne, ayant déclenché cet épisode de lave torrentielle.

La superficie (S) des dépôts de lave torrentielle du 9 août 2015 est retranscrite sur la carte géomorphologique (fig. 2). Les épaisseurs ont été déterminées en faisant la moyenne entre une estimation haute (H_h) et basse (H_b) des dépôts. L'estimation haute correspond aux traces laissées sur les arbres par le passage des laves torrentielles et l'estimation basse correspond aux hauteurs des bourrelets et fronts de lave retrouvés sur le cône de déjection de la Peyronnelle. La formule suivante a été retenue pour le calcul du volume des laves torrentielles V_{LT} :

$$V_{LT} = S\,((H_h\ H_b)/2) \qquad [1]$$

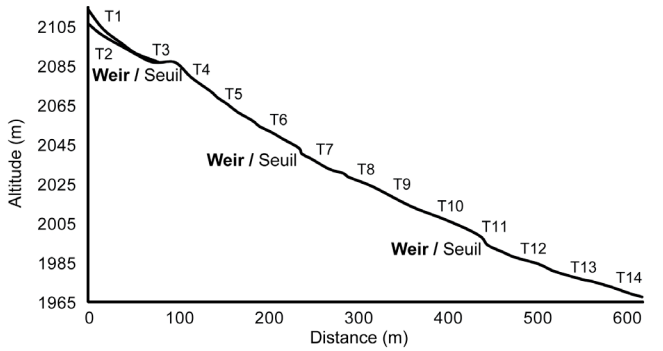
Dans le bassin versant de la Peyronnelle, les premiers dépôts de lave torrentielle ont été observés dès l'apex du cône jusqu'à la confluence avec le Peynin (fig. 3). La superficie des dépôts de lave torrentielle a été estimée à environ 12 800 m² pour une hauteur moyenne de 0,7 m, soit un volume s'élevant à environ 9 000 m³.

4.2. Taux de retour et trajectoires des GBE

Sur les 320 GBE du bassin de la Peyronnelle, 101 ont été retrouvés (GBE-r) suite à l'épisode de laves torrentielles d'août 2015, soit un taux de retour de 31 %. Les 219 GBE « non retrouvés » constituent la fraction granulométrique la plus fine des GBE (fig. 6). Du fait de leur plus petite taille, donc de leur plus grande mobilité, il est possible que les GBE non retrouvés soient sortis de la zone de prospection qui s'arrête à environ 300 m en aval de la confluence entre la Peyronnelle et le Peynin. Par conséquent, les 101 GBE-r ne donnent qu'une estimation basse des flux sédimentaires exportés de la Peyronnelle vers le Peynin. De plus, les *PIT tags* implantés dans des schistes se désagrégeant facilement sous l'effet d'une contrainte mécanique, il est fortement probable qu'une partie des *PIT tags* a été broyée du fait des remaniements importants entraînés par les laves torrentielles. Sur les 101 GBE-r, 95 ont été mis en mouvement et 6 n'ont pas bougé en raison de leur position très en retrait par rapport à la trajectoire des laves torrentielles. Parmi les GBE-r mis en mouvement, 37 ont quitté le bassin de la Peyronnelle pour rejoindre le Peynin, 52 ont été redéposés dans le chenal principal de la Peyronnelle et 12 ont été déposés sur le cône de déjection de la Peyronnelle. Les distances ainsi parcourues vont

de 8 m à 717 m, pour une moyenne de 226 m et un écart type de 206 m (fig. 7).

Ces résultats soulignent tout d'abord que la majorité des GBE-r ont été mobilisés puis déposés au sein même du chenal de la Peyronnelle. Ils démontrent également qu'il existe une redistribution importante des GBE-r au sein même du bassin versant. Durant l'événement du 9 août 2015, la majorité des sites ont été actifs et les distances parcourues par les GBE-r décroissent progressivement d'amont (moyenne : 541 m) en aval (moyenne : 69 m). La forte disparité de mobilité entre l'amont de la Peyronnelle, *i.e.* site n° 2 (fig. 7) et son affluent de rive gauche, *i.e.* site n° 1 (fig. 7) peut s'expliquer par le fait que le profil en long de la Peyronnelle est moins pentu avec des hauteurs de berge plus faibles que celui de son affluent situé en rive gauche. Cette différence a entraîné un débordement de la lave torrentielle en rive droite de la Peyronnelle (fig. 8), débordement qui a grandement diminué la puissance, donc les distances parcourues par les *PIT tags*. À l'inverse, les GBE-r du site d'injection n° 7 (fig. 7) ont subi de très faibles déplacements (11 m en moyenne), bien qu'ils aient été affectés, comme sur les autres sites, par les laves torrentielles. Cela peut s'expliquer par le fait que la moitié des GBE-r du site n° 7 a été initialement implantée sur les berges et les sommets de berge tandis que l'autre moitié a été implantée en rive droite du chenal dont la convexité a pu entraîner la perte de puissance des laves torrentielles et réduire *de facto* les distances parcourues.



Transect	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
Particles / particules	17	58	64	27	14	21	18	18	14	24	18	40	45	55

Fig. 4 – Profil en long de la Peyronnelle (DGPS) avec la localisation des 14 transects réalisés ainsi que le nombre de particules échantillonnées.

Fig. 4 – Longitudinal profile of the Peyronnelle torrent with the location of each transect and the amount of particles in each transect.

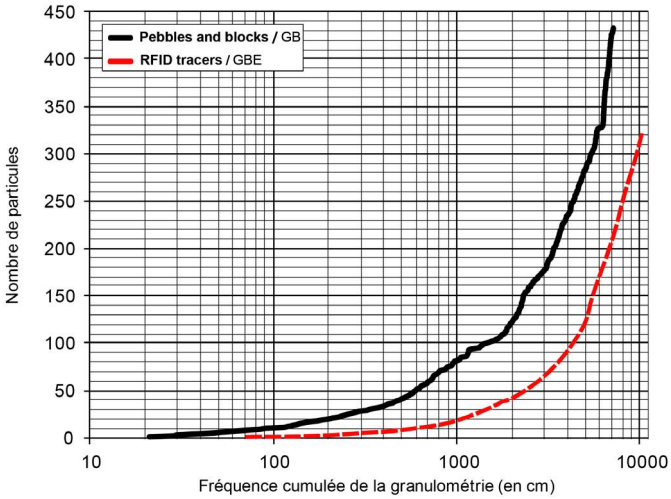


Fig. 5 – Représentativité de la gamme granulométrique des GBE par rapport à la granularité de référence (14 transects) des débris dans le torrent de la Peyronnelle.

Fig. 5 – Representativeness of the grain-size distribution of RFID tracers relative to the reference grain-size distribution (14 transects) in the Peyronnelle torrent.

Les GBE-r ont été remobilisés majoritairement dans le fond du lit (67/200 GBE soit un taux de retour de 34 %), les flancs internes et les sommets des berges quant à eux n'ayant fourni respectivement que 19/85 (taux de retour de 22 %) et 15/35 (taux de retour de 43 %) des GBE-r. Les blocs provenant du fond du chenal sont prédominants et les distances parcourues plus importantes (en moyenne 270 m), compte tenu de leur position plus favorable à leur mobilisation par la lave torrentielle. Les GBE-r situés sur les flancs internes et les sommets de berge ont parcouru en moyenne 185 m et 78 m, respectivement. Les distances parcourues par les GBE-r sont donc largement influencées par leur position initiale dans le chenal. Les GBE-r qui ont été transportés hors du bassin de la Peyronnelle permettent de le vérifier puisqu'ils ont été injectés à 86 % dans le fond du lit (31/36 GBE-r). La provenance des GBE retrouvés sur le cône de déjection de la Peyronnelle est plus diversifiée. En effet, 6 provenaient du fond du lit, 3 étaient positionnés sur les flancs internes des berges et 3 sur les sommets de berge, *i.e.* les sites d'injection n° 3, n° 6 et n° 8 (fig. 7). Le nombre de GBE-r mobilisés depuis le haut des berges est plus réduit. Cela témoigne du débordement des laves torrentielles en plusieurs points du chenal, contribuant au stock sédimentaire déposé dans le fond du lit et sur le cône de la Peyronnelle.

En parallèle, 37 GBE ont été retrouvés hors du bassin de la Peyronnelle, la majorité provenant des sites n° 1 à n° 6. La représentation majoritaire des GBE-r provenant de l'amont de la Peyronnelle est à associer au phénomène même de lave torrentielle qui a favorisé un prélèvement de débris en amont du bassin. Une fois mobilisés, les débris sont alors plus facilement transportés jusqu'à l'exutoire du bassin versant. On observe donc une dichotomie entre les GBE-r mobilisés et exportés en dehors du bassin versant de la Peyronnelle par la lave torrentielle, d'une part, et les blocs déplacés sur de courtes distances lors du passage de la lave torrentielle et qui demeurent encore dans le chenal à l'issue de l'événement, d'autre part. En considérant la redistribution sédimentaire enregistrée par les GBE-r au sein du bassin versant comme représentative de la redistribution des sédiments observée lors de la lave torrentielle du 9 août 2015, il est possible de proposer une estimation de la contribution du torrent de la Peyronnelle au chenal du Peynin. Sur les 101 GBE-r implantés, 64 % sont restés dans le bassin de la Peyronnelle (cône de déjection et lit torrentiel) et 34 % ont été expédiés dans le Peynin. Suite à l'événement du 9 août 2015, alors que 9 000 m³ de matériaux ont été mesurés dans le bassin de la Peyronnelle les volumes de matériaux sortis du bassin n'ont pu être mesurés. Néanmoins, si l'on considère que les volumes mesurés sont équivalents au pourcentage de GBE retrouvés dans le bassin, nous pouvons penser que 36 % des matériaux ont été expédiés hors du bassin de la Peyronnelle, ce qui correspondrait à 3 240 m³. Ainsi, le volume total de matériaux mobilisés dans le bassin de la Peyronnelle et dans le Peynin s'élèverait donc à 12 240 m³.

4.3. Relations entre la taille des débris, leur origine et les distances parcourues dans le lit torrentiel

Une analyse des relations entre distances parcourues et origine puis granularité des GBE-r a pu être menée sur la base des quatre secteurs préférentiels de dépôt de ces derniers (listés d'amont en aval) :

- Secteur A : secteur où les GBE-r ont été mobilisés d'amont en

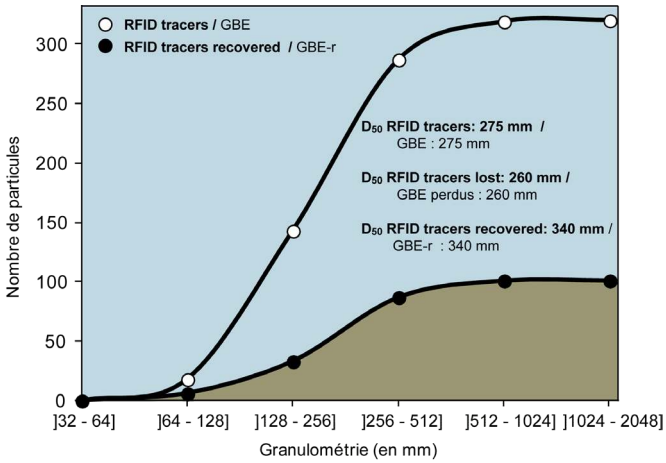


Fig. 6 – Comparaison de la distribution granulométrique entre les GBE-r mis en mouvement et les GBE non retrouvés.

Fig. 6 – Comparison of the grain-size distribution between RFID tracers mobilized and RFID tracers lost.

aval de la Peyronnelle avant d'être déposés dans les parties convexes du chenal principal ;

- Secteur B : secteur où les GBE-r ont été mobilisés avant d'être déposés dans la partie concave du torrent de la Peyronnelle (*i.e.* zone préférentielle d'accumulation des débris) ;
- Secteur C : secteur où les GBE-r ont été déposés sur le cône de déjection de la Peyronnelle lors du débordement des laves torrentielles ;
- Secteur D : secteur où les GBE-r sont sortis du bassin de la Peyronnelle (fig. 9).

L'analyse de l'origine des GBE-r dans les secteurs A, B et C (fig. 9) montre une contribution majoritaire des berges et du fond du chenal. En revanche, le débordement du chenal n'a pas entraîné sa mobilité latérale pour ce type d'événement. Bien que présents, les débordements sont restés ponctuels et n'ont pas été morphogènes. Il faut atteindre des épisodes plus conséquents pour que de nouveaux chenaux apparaissent. À l'opposé, les GBE-r exportés du bassin, *i.e.* secteur D (fig. 9) ont été injectés presque intégralement (environ 90 %) dans le fond du chenal, là où la puissance des laves torrentielles est la plus importante.

La mise en relation de la taille de l'axe B des GBE-r avec les distances parcourues par ces derniers (fig. 10) montre une absence de relation significative entre les deux variables (r = 0,077). Prise dans son ensemble, la distance parcourue par les galets et les blocs lors d'une lave torrentielle est donc indépendante de la taille des galets et des blocs transportés dans le bassin versant de la Peyronnelle. Des observations de terrain mettent en avant une relation entre les distances parcourues, la géométrie du chenal d'écoulement (convexité/concavité), les hauteurs de berge et la pente du lit. Nous avons aussi regardé si un tri granulométrique s'opérait au sein même des principaux sites de dépôts des GBE-r. Les résultats obtenus (fig. 11) mettent en avant une absence ou une faible corrélation entre les distances parcourues et la granularité de la charge sédimentaire. Les GBE-r déposés dans la concavité du chenal de la Peyronnelle ainsi que ceux exportés lors du bassin, *i.e.* secteurs B et D (fig. 11) montrent une corrélation non significative entre la granularité et la distance parcourue par les débris. Pour les GBE-r restés dans le chenal de la Peyronnelle ainsi que ceux déposés sur le cône, *i.e.* secteurs A et C (fig. 11), la faible (ou l'absence de) corrélation entre taille des blocs et des galets et distance parcourue dans le bassin s'explique par la nature même des laves torrentielles. Fonctionnant par bouffées et possédant des capacités de transport importantes, entre 30 et 160 cm (axe B) pour les valeurs moyennes et maximales, les laves torrentielles n'exercent pas de tri granulométrique des sédiments déposés. Ainsi, les blocs les plus grossiers sont transportés au même titre que les petits blocs, les galets et les graviers. Une analyse plus poussée de la granularité des dépôts de lave torrentielle pourrait être effectuée au niveau des particules fines (< 2 mm) afin d'établir une corrélation entre la densité des eaux chargées en fines et les distances parcourues par les débris.

5. Discussion

5.1. Mise en œuvre des traceurs RFID dans un bassin versant torrentiel

Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser une méthode de traçage RFID afin de caractériser et quantifier la dynamique sédimentaire associée à des laves torrentielles dans un petit bassin versant montagnard. Cette méthode reste aujourd'hui peu utilisée pour comprendre la dynamique sédimentaire des torrents, même si quelques études appliquent cette méthode pour appréhender ce type de phénomène (McCoy et al., 2011 ; Bel et al., 2015).

L'utilisation des traceurs RFID apporte d'abord des informations relativement précises sur les distances parcourues par des écoulements d'intensité et de fréquence variables. Elle permet ensuite de caractériser la redistribution longitudinale et latérale des alluvions dans le bassin versant. Elle permet enfin de localiser dans le bassin versant les zones préférentielles d'une possible recharge sédimentaire par les laves torrentielles. Un autre atout est le coût (financier, matériel et humain) raisonnable de mise en place de cette méthode. La facilité d'implantation des *PIT tags* est particulièrement intéressante pour des environnements torrentiels généralement difficiles d'accès. En revanche, l'utilisation de traceurs RFID nécessite un suivi régulier et une réimplantation régulière de GBE. Par exemple, sur les 451 GBE installés dans le torrent du Bouinenc dans lequel prédominent les crues torrentielles (Liébault et al., 2012), 88 % ont été retrouvés la première année (2008), 65 % la deuxième (2009) et seulement 45 % la troisième année (2010). Pour des bassins affectés plusieurs fois par an par des laves torrentielles, cela nécessite un important travail de terrain.

Les taux de retour d'une méthode RFID sont particulièrement élevés (> 90 %) dans le cas d'un lit « fluvial » (Lamarre et al., 2005 ; Rollet, 2008). Dans un lit « torrentiel », les principales contraintes sont liées à l'enfouissement des GBE sous des épaisseurs parfois conséquentes de particules fines, à la taille et à la friabilité de certains blocs ainsi qu'à la distance parcourue par les GBE une fois que ces derniers sont sortis du bassin. Par conséquent, les taux de retour des GBE peuvent chuter très rapidement à 30-40 % dès le premier événement morphogène (Bel et al., 2015 ; Graff et al., 2016). À ce jour, des travaux similaires ont été réalisés en France par l'IRSTEA de Grenoble sur les torrents du Réal et du Manival (Bel et al., 2015). Sur les 164 GBE installés dans le bassin du Réal (2,3 km²) dans les Alpes-Maritimes, 71 ont été retrouvés (taux de retour d'environ 43 %) et 58 ont été mobilisés sur des distances allant jusqu'à 1 200 m. Le torrent du Manival (3,6 km²) dans l'Isère a été équipé de 102 GBE et 41 ont été retrouvés (taux de retour de 40 %) pour des distances parcourues allant jusqu'à 1 500 m. Les taux de retour cités dans la littérature sont donc équivalents à ceux observés (~30 %) dans le bassin de la Peyronnelle. Notons cependant que l'implantation des traceurs RFID a été faite plus en amont dans les bassins du Réal et de Manival, comparée à l'implantation réalisée dans le bassin de la Peyronnelle. Ainsi, moins de GBE ont pu être exportés en dehors du champ de prospection, ce qui expliquerait que les taux de retour soient légèrement supérieurs (+10 %). De plus, ces trois bassins

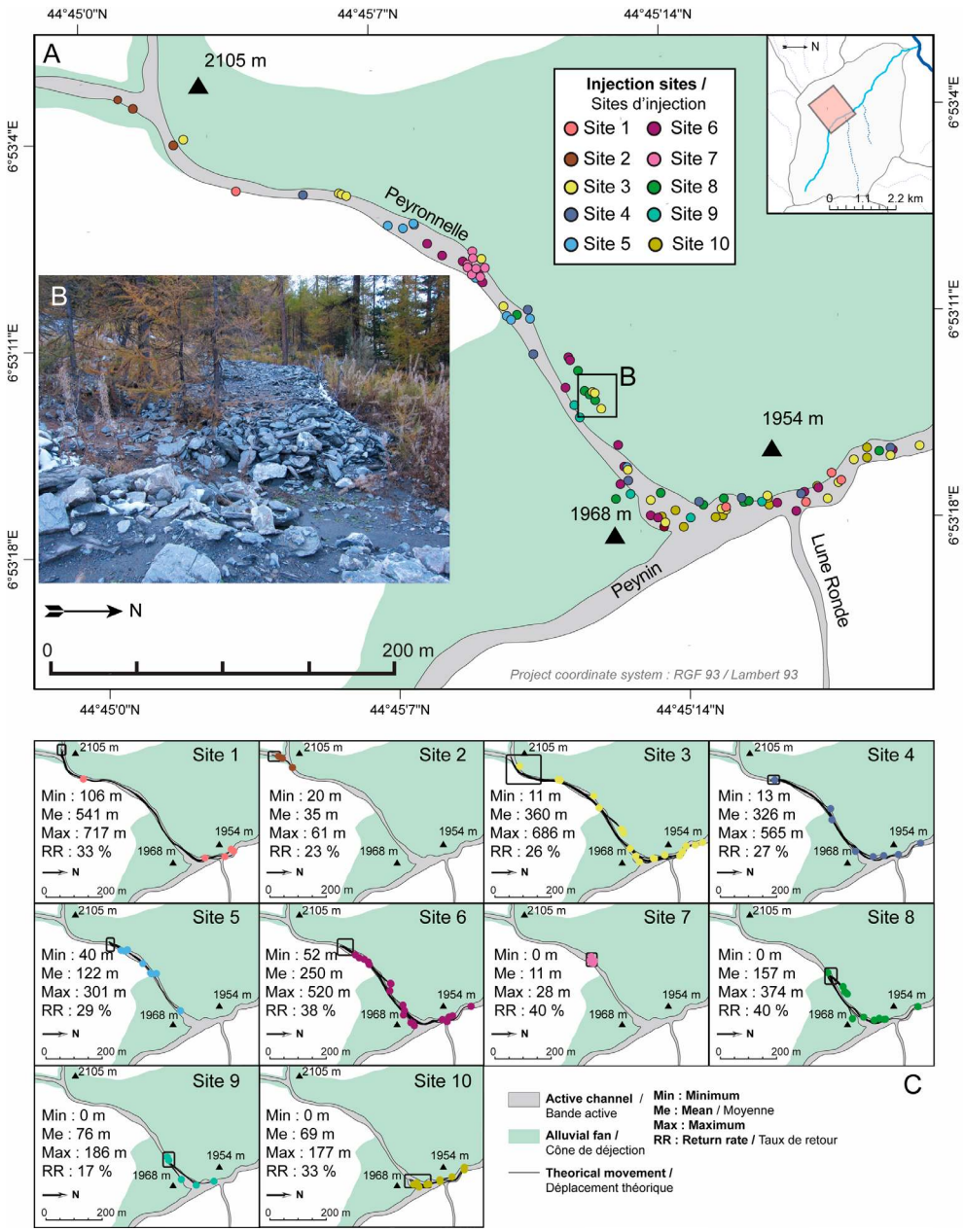


Fig. 7 – Transport des traceurs RFID.

A : Mise en mouvement et transport des GBE-r le 10 août 2015 depuis les 10 sites d'injection. B : Déplacements théoriques des GBE-r.

Fig. 7 – RFID tracers mobilization.

A: RFID tracers mobilization and transport during August 10th, 2015 from 10 injection sites. B: Theoretical displacements of recovered tracers.

produisent des laves torrentielles à matrice boueuse, *i.e.* proches d'un écoulement hyper-concentré, et engendrent un enfouissement accru des GBE sous des épaisseurs parfois pluri-métriques de débris lors du déclenchement des laves torrentielles, aboutissant à de faibles taux de retour. En revanche, ces taux de retour sont très inférieurs à ceux obtenus par Nichols (2004) à Walnut Gulch, où 96 % des GBE ont été retrouvés, et par Lamarre et al. (2005) à Moras, qui ont retrouvé 87 à 96 % des GBE.

Afin d'obtenir des résultats significatifs, il convient d'équiper un très grand nombre de blocs et de galets et de les répartir très largement dans le bassin torrentiel. À l'avenir, les problèmes de détection des GBE liés à l'enfouissement sédimentaire devraient sensiblement s'améliorer grâce à l'évolution des techniques de conception des antennes RFID. Dans cette étude, la fréquence du lecteur RFID était de 134 KHz, permettant d'identifier la présence de GBE au mieux à moins de 40 cm de profondeur ou de distance. L'évolution récente des émetteurs de radiofréquences a permis de passer de 134 KHz (RFID NFC) à 5,4 GHz (RFID UHF), autorisant dès lors une détection jusqu'à 1 m en profondeur et 10 m en surface dans un milieu sec. L'utilisation de *PIT tags* RFID actifs (Brousse et al., 2017 ; Cassel, 2017) permettrait de s'affranchir du problème de l'eau et d'améliorer très nettement les taux de retour. Le coût de ces *PIT tags* actifs est cependant bien plus onéreux (actuellement ~40 € l'unité).

5.2. Intérêt des traceurs RFID dans le cadre du suivi des laves torrentielles

Les GBE mis en place dans le bassin de la Peyronnelle ont permis une analyse fine des conditions d'érosion, de transport et de sédimentation impulsées par les laves torrentielles. Jusqu'à présent, l'analyse des laves torrentielles se faisait empiriquement à partir des observations réalisées en laboratoire ou à partir d'observations de terrain sans instrumentation (Remaître, 2006). Récemment, le développement de certains outils tels que le TLS (*Terrestrial Laser Scanning*) a permis de quantifier les volumes d'érosion et de dépôt des laves torrentielles, comme ce fut le cas sur le torrent de Manival (Theule et al., 2012). Cette méthode permet de quantifier précisément les volumes sédimentaires déplacés mais ne permet

pas de rendre compte de la physique des fluides. L'utilisation d'un TLS couplée à celle de traceurs RFID permettrait de quantifier la mobilité et les volumes transitant au cours des événements de laves torrentielles dans le bassin de la Peyronnelle. Des géophones sont également couramment utilisés pour détecter le passage d'un front de lave torrentielle et reconstituer la vitesse de propagation du front entre deux géophones placés en série le long d'un chenal (Hürlimann et al., 2003 ; Navratil et al., 2013). Cette méthode permet d'obtenir, par l'intermédiaire d'un signal, des données en temps réel sur les laves torrentielles mais ne rend pas compte de la variabilité de la dynamique sédimentaire au sein même des écoulements, ce qu'a permis l'utilisation des *PIT tags*. Notre approche apparaît ainsi originale, dans la mesure où nous avons pu rendre compte de la variabilité de la dynamique sédimentaire au sein du fluide de lave torrentielle et ce, à l'échelle d'un tronçon de plusieurs centaines de mètres. L'utilisation couplée de *PIT tags* et de géophones permettrait de se rendre compte à la fois des vitesses de propagation des laves et des trajectoires parcourues.

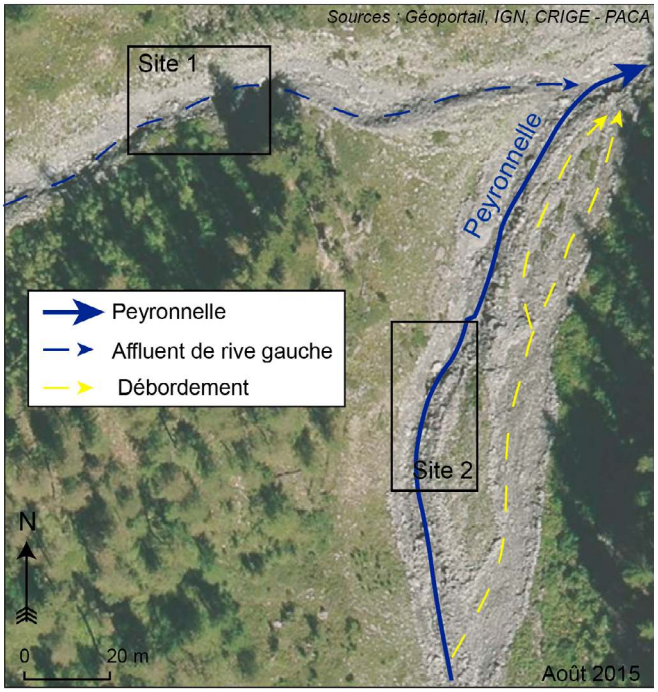


Fig. 8 – Photographie aérienne des laves torrentielles d'août 2015 à la confluence de la Peyronnelle et de son affluent de rive droite.

Fig. 8 – Aerial photography of debris flows (August 2015) near the confluence of the Peyronnelle torrent and his right-bank tributary.

Dans le bassin de la Peyronnelle, les distances parcourues par les GBE-r, supérieures à 700 m, sont conséquentes au regard de la superficie du bassin (1 km²) et de l'intensité moyenne de l'événement (38,2 mm en 41 h dont 14 mm en 3 h). Ces distances correspondent à la distance entre le lieu de mobilisation des galets et des blocs et la confluence avec le torrent du Peynin. Sur l'ensemble des GBE-r, une part importante (30 %) a pu être transportée hors du bassin pour alimenter directement le torrent du Peynin en débris fins et grossiers. Il y a eu remobilisation dès l'amont du bassin versant, soit à plus de 2 100 m d'altitude, *i.e.* site d'injection n° 1 (fig. 7), grâce à un important stock sédimentaire disponible et à la forte pente en amont du bassin de la Peyronnelle. Les distances parcourues par les GBE-r sur le drain principal, *i.e.* site d'injection n° 2 (fig. 7) sont faibles au regard des distances parcourues par les GBE sur l'affluent de rive gauche (20-60 m). Sur le drain principal, les laves torrentielles ont donc remobilisé des débris dans le fond du chenal, d'anciens dépôts non seulement de lave torrentielle mais aussi d'avalanche et d'éboulis (fig. 9) et ont alimenté le torrent de la Peyronnelle. Un tel rechargement par les laves torrentielles a déjà été observé dans les bassins du Manival et du Réal (Theule, 2012 ; Bel, 2017). Une partie des débris remobilisés ne viendrait donc pas directement des zones de production mais serait issue du déstockage des sédiments accumulés au fil des ans. Une campagne d'acquisition d'images TLS permettrait de quantifier le déstockage des sédiments s'opérant dans le bassin de la Peyronnelle.

L'étude a pu préciser la dynamique sédimentaire au sein même du bassin torrentiel de la Peyronnelle. Si environ un tiers des GBE-r sont sortis du bassin, une douzaine d'entre eux sont venus se déposer dans le secteur distal du cône de déjection, *i.e.* secteur C (fig. 9), là où les débordements de chenal sont restés ponctuels et très peu morphogènes. Cet événement d'une fréquence quinquennale et

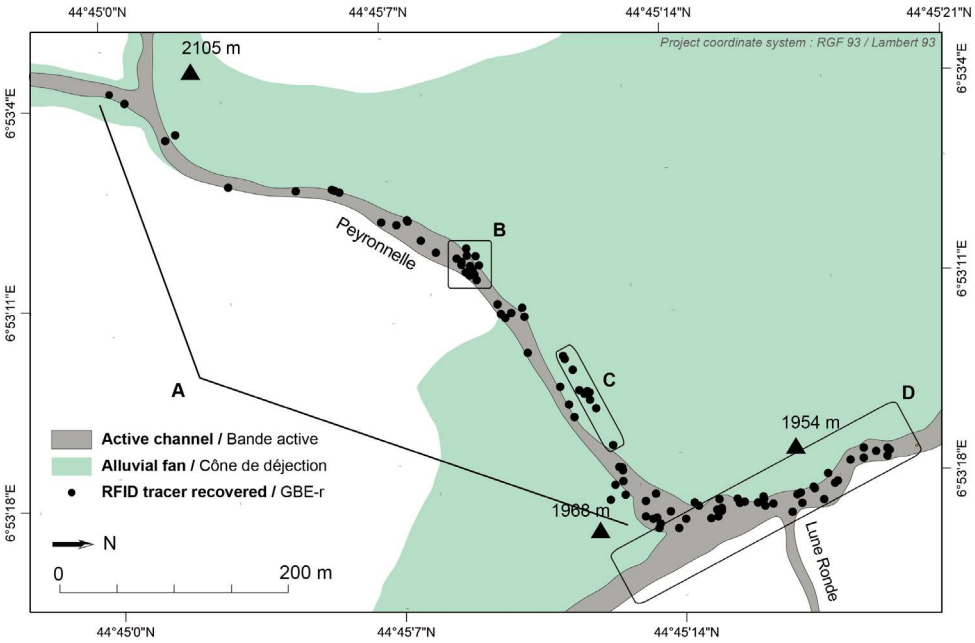


Fig. 9 – Illustration des quatre principaux sites de dépôt suite à la mobilisation et au transport des GBE.

Fig. 9 – Illustration of the four main deposition sites due to debris flows event.

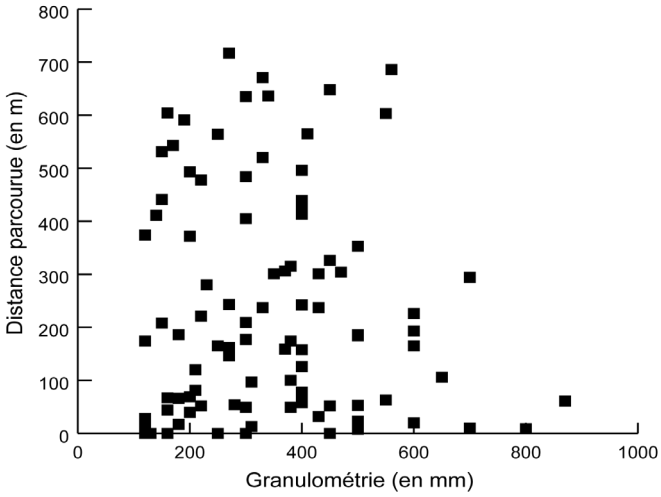


Fig. 10 – Distances parcourues par les GBE selon la mesure de l'axe B.

Fig. 10 – Transfer distances of the PIT tags equipped pebbles and boulders vs. B-axis measurement.

d'une magnitude moyenne n'a donc pas entraîné une mobilité du chenal d'écoulement torrentiel. Il faut atteindre des événements plus conséquents (190 mm de précipitations sur 2 jours à Château-Queyras lors de la crue de juin 1957 ; 140 mm de précipitations sur 4 jours à Château-Queyras lors de la crue de juin 2000) pour que de nouveaux chenaux liés au passage des laves torrentielles soient ouverts sur le cône de la Peyronnelle, comme en témoignent les nombreux chenaux aujourd'hui végétalisés ou en cours de végétalisation sur ce cône, où il serait intéressant de périodiser la mobilité du torrent au fil du temps.

5.3. Impact des apports latéraux (laves torrentielles) sur le flux sédimentaire du drain principal (le Peynin)

Les résultats montrent une contribution significative des laves torrentielles dans la recharge sédimentaire du chenal du Peynin. Cette contribution, qui a déjà pu être observée lors d'événements de haute magnitude – basse fréquence (*e.g.* crue centennale de juin 1957 et crue trentennale de juin 2000), est ici démontrée pour des événements d'intensité plus réduite. Ainsi, en dehors des événements tels ceux de juin 1957 ou juin 2000, les sédiments exportés par charriage hors du bassin versant du Peynin sont relativement peu abondants. Les événements de laves torrentielles d'une intensité comparable à celle du 9 août 2015 permettent la (re)constitution des différents stocks sédimentaires à l'intérieur du bassin versant. Ces éléments sont essentiels pour que la cascade sédimentaire devienne efficiente dans son intégralité lors d'événements de plus forte intensité.

Les laves torrentielles qui se forment dans les sous-bassins situés en rive gauche du torrent du Peynin (versant à contre-pendage) jouent donc un rôle essentiel dans le fonctionnement de la cascade sédimentaire du bassin versant du Peynin. Ce sont les phénomènes les plus fréquents et les plus efficaces en matière de transfert sédimentaire. Les laves torrentielles affectent principalement les petits bassins en aval du Peynin en raison de la forte connectivité versant - chenal. La météorisation rapide qui affecte les affleurements de schistes lustrés, en particulier la gélifraction, permet la production d'une quantité importante de débris fins qui vont directement être déposés dans le chenal torrentiel par les avalanches et qui constituent, en plus des éboulis, un stock sédimentaire mobilisable par les laves torrentielles. La contribution des versants, couplée à des transferts sédimentaires particulièrement efficaces, engendre une très bonne connectivité versant – chenal du Peynin. Ce n'est en revanche pas le cas des bassins versants situés en rive droite du Peynin. Ces bassins, orientés dans le sens du pendage, se caractérisent par des mouvements de masse lents qui favorisent les sapements de pied de versant par le Peynin : la connectivité sédimentaire versant–chenal y est beaucoup moins efficiente (Carlier et al., 2018).

6. Conclusions

En 2013, l'ANR SAMCO a proposé une action de recherche visant à augmenter la résilience des sociétés face aux aléas torrentiels et gravitaires dans un contexte de changements globaux. Ce programme prévoyait de reconstituer un budget sédimentaire à l'échelle du bassin versant du Guil. Dans ce cadre, notre recherche s'est focalisée sur une partie de ce budget sédimentaire en vue de quantifier spatialement l'apport des laves torrentielles au sein des sous-bassins torrentiels.

Au regard d'autres méthodes utilisées pour caractériser les phénomènes de lave torrentielle, telles que l'utilisation de géophones ou d'un TLS (Theule et al., 2012 ; Navratil et al., 2013), le recours aux *PIT tags* passifs pour l'analyse du fonctionnement des laves torrentielles à matrice boueuse constitue une originalité de ce travail. Si les taux de retour des GBE que nous avons obtenus sont satisfaisants pour étudier la dynamique spatiale des laves torrentielles, l'utilisation de *PIT tags* actifs (Brousse et al., 2017 ; Cassel et al., 2017) permettrait sans doute une nette amélioration des taux de retour en raison de l'augmentation des distances de détection.

Néanmoins, nos résultats obtenus grâce à l'utilisation de transpondeurs RFID passifs ont mis en avant le rôle essentiel des laves torrentielles dans l'efficience de la cascade sédimentaire du torrent du Peynin. Malgré un événement de moyenne intensité, les volumes transportés au sein des sous-bassins du Peynin ont été conséquents et la part de ce volume issue du déstockage d'anciens dépôts dans le chenal d'écoulement permet une alimentation progressive des stocks sédimentaires dans le chenal principal du Peynin. Lorsque ces derniers parviennent dans la zone à enjeux (*i.e.* cône de déjection), ils peuvent provoquer des dommages importants aux structures et aux habitations, comme en juin 2000. Aujourd'hui, les gestionnaires du bassin sont confrontés au dilemme découlant de deux actions antithétiques : curer les bassins torrentiels afin de réduire les dégâts lors des crues, ce qui engendre à long terme une érosion régressive plus importante, ou contrôler l'équilibre sédimentaire dans les lits torrentiels, ce qui contribue à la stabilité du profil en long et conduit au ralentissement de l'érosion régressive, qu'elle agisse longitudinalement dans le chenal principal ou latéralement sur les affluents et les versants.

Remerciements

Cette recherche s'inscrit le cadre du programme ANR 12 — SENV-0004, SAMCO (Adaptation de la société aux risques en montagne dans un contexte de changement global) et il convient de remercier l'ANR, les chercheurs travaillant dans ce programme ainsi que l'ensemble des collaborateurs (BRGM, IPGS, IRSTEA, LIVE-UMR7362, PRODIG-UMR8586, GEODE-UMR5602 et GEO-HYD) pour leur aide tant matérielle et financière qu'intellectuelle et humaine. Ce travail a également été réalisé grâce aux étudiants du master DYNARISK qui ont bien voulu apporter leur aide sur le terrain. Nous souhaitons enfin remercier le Parc Naturel Régional du Queyras pour son soutien, en particulier Bérangère Charnay (Chargée de mission Eau et Risques Naturels).

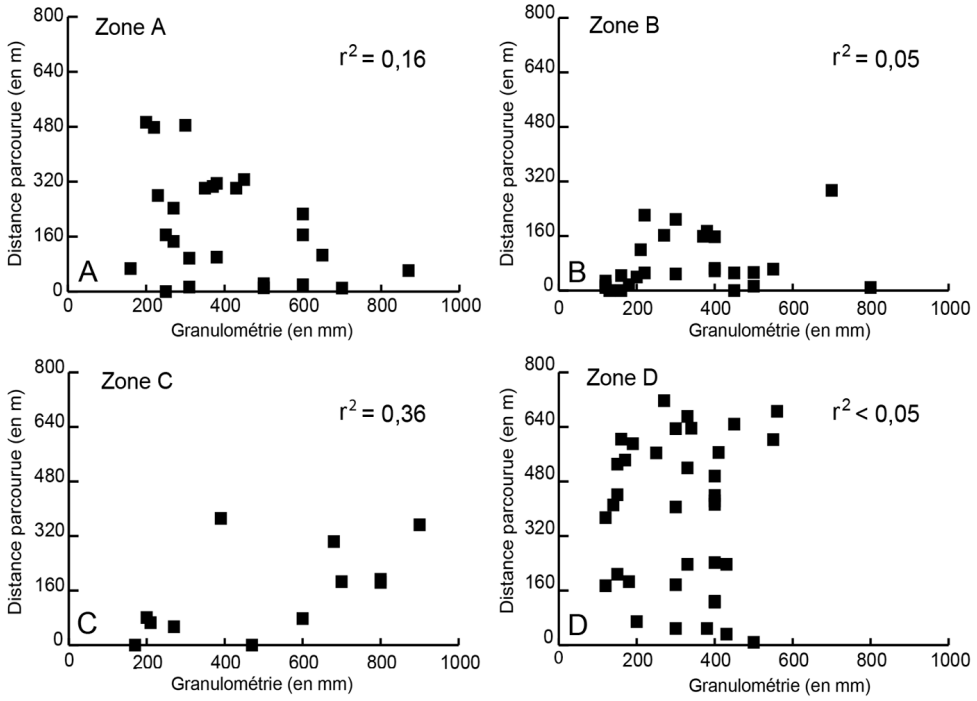


Fig. 11 – Distances parcourues par les GBE-r selon la taille des particules pour chaque zone de dépôt.

A : Zone A ; B : Zone B ; C : Zone C ; D : Zone D.

Fig. 11 – Transfer distance of RFID tracers recovered vs. grain size for each depositional zone.

A: Zone A; B: Zone B; C: Zone C; D: Zone D.

Références

Arnaud-Fassetta G., Fort M. (2004) – La part respective des facteurs hydroclimatiques et anthropiques dans l'évolution récente (1956-2000) de la bande active du Haut Guil, Queyras, Alpes françaises du Sud. Méditerranée, 102 (1), 143-156. DOI : 10.3406/medit.2004.3350

Arnaud-Fassetta G., Cossart E., Fort M. (2005) – Hydro-geomorphic hazards and impact of man-made structures during the catastrophic flood of June 2000 in the Upper Guil catchment (Queyras, Southern French Alps). Geomorphology, 66 (14), 41-67. DOI : 10.1016/j.geomorph.2004.03.014

Bel C. (2017) – Analysis of debris-flow occurrence in active catchments of the French Alps using monitoring stations. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 187 p.

Bel C., Liébault F., Spitoni M., Navratil O., Fontaine F., Bellot H., Laigle D. (2015) – Dynamique sédimentaire des torrents sujets au charriage extrême et aux laves torrentielles : monitoring, suivi photogrammétrique et traçage RFID. 15ème congrès français de sédimentologie ASF2015, Chambéry.

Berti M., Genevois R., Simoni A., Tecca P.R. (1999) – Field observations of a debris flow event in the Dolomites. Geomorphology, 29 (34), 265-274. DOI : 10.1016/S0169-555X(99)00018-5

Beylich A.A., Warburton J. (2007) – Analysis of Source-to-Sink-Fluxes and Sediment Budgets in Changing High-Latitude and High-Altitude Cold Environments. In Lantuit H., Beylich A.A., Lamoureux S. (Eds.): Integration and synthesis of cold environment sediment flux data SEDIFLUX Manual. NGU Report 2007.053, 158 p.

Bunt K., Abt S.R. (2001) – Sampling Surface and Subsurface Particle-Size Distributions in Wadable Gravel- and Cobble-Bed Streams for Analyses in Sediment Transport, Hydraulics, and Streambed Monitoring. USDA, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-74, 450 p.

Brousse G., Arnaud-Fassetta G., Cordier S. (2011) – Evolution hydromorphologique de la bande active de l'Ubaye (Alpes françaises du Sud) de 1956 à 2004 : contribution à la gestion des crues. Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement, 17 (3), 307-318. DOI : 10.4000/geomorphologie.9510

Brousse G., Liébault F., Arnaud-Fassetta G., Laval F. (2017) – Combined contribution of active RFID technology, time lapse camera and DTM for monitoring of the Haut-Drac river restoration (Southern Alps, France). 9th International conference on geomorphology (9th ICG), 6th - 11th november 2017, Vigyan Bhawan, New Delhi.

Cailleux A., Tricart J. (1959) – Initiation à l'étude des sables et des galets. CDU, Paris, 1, 369 p.

Cassel M. (2017) – Caractérisation des particules dans les lits à galets : expérimentation, développements, méthodologiques et applications in situ. Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Lyon, 248 p.

Cassel M., Dépret T., Piégay H. (2017) – Assessment of a new solution for tracking pebbles in rivers based on active RFID: a new solution for tracking pebbles in rivers based on active RFID. Earth Surface Processes and Landforms, 42 (13), 1938-1951. DOI : 10.1002/esp.4152

Caine N. (1974) – The geomorphic processes of the alpine environment. In Ives J.D., Barry R.G. (Eds.): Arctic and Alpine Environments, London: Methuen, 721-748.

Carlier B., Carlier G., Gance J., Provost F., Lissak C., Graff K., Viel V., Arnaud-Fassetta G., Fort M., Bétard F., Madelin M., Malet J.-P., Cossart E. (2018) – Distribution spatiale et estimation des volumes sédimentaires dans un bassin versant de schistes lustrés : l'exemple du Peynin (Queyras, Alpes du Sud). Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement, 24 (1). DOI : 10.4000/geomorphologie.11994

Cossart E. (2016) – L'(in)efficacité géomorphologique des cascades sédimentaires en question : les apports d'une analyse réseau. Cybergeo: European Journal of Geography, 778 (22). DOI : 10.4000/cybergeo.27625, 2016

Einhorn B. (2003) – Budget sédimentaire d'un bassin-versant torrentiel des Alpes du Sud : le haut Guil (Queyras, Hautes Alpes).

Mémoire de DEA, Université Paris 7, Diderot, 150 p.

Fort M., Arnaud-Fassetta G., Cossart E., Beaudouin B., Bourbon C., Debail B., Einhorn B. (2002) – Impacts et signification hydromorphologique de la crue du Guil de juin 2000 (Haut Queyras). In Delahaye D., Levoy F., Maquaire O. (Eds.): Geomorphology: from Expert Opinion to Modelling. A tribute to Professor Jean-Claude Flageollet. Proceedings of the Symposium held in Strasbourg, France, CERG Editions, 159-166.

Fort M., Arnaud-Fassetta G., Bétard F., Cossart E., Madelin M., Lissak C., Viel V., Bouccara F., Carlier B., Sourdot G., Tassel A., Geai M.-L., Bletterie X., Charnay B. (2015) – Sediment Dynamics and Channel Adjustments Following Torrential Floods in an Upper Alpine Valley (Guil River, Southern French Alps). In Lollino G., Arattano M., Giustolisi O., Marechal J.-C., Grant G.E. (Eds.): Engineering Geology for Society and Territory Volume 3. Springer, Cham, 313-317. ISBN : 978-3-319-09053-5 978-3-319-09054-2

Garitte G., Lahousse P., Thénard L., Salvador P.-G. (2007) – Evolution contemporaine de l'activité torrentielle sur les cônes de déjection de la basse vallée de la Clarée (Briançonnais, Alpes françaises du Sud). Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement, 13 (4), 293-308.
DOI : 10.4000/geomorphologie.4252

Graff K., Viel V., Carlier B., Lissak C., Arnaud-Fassetta G., Fort M., Madelin M. (2016) – Sediment tracing from small torrential channels to gravel-bed rivers using pit tags method. A case study from the upper Guil catchment. Geophysical Research Abstracts, 18, EGU2016-8100-1.

Haschenburger J.K., Church M. (1998) – Bed material transport estimated from the virtual velocity of sediment. Earth Surface Processes and Landforms, 23 (9), 791-808.
DOI : 10.1002/(SICI)1096-9837(199809)23:9<791::AID-ESP888>3.0.CO;2-X

Hassan M.A., Roy A.G. (2016) – Coarse particle tracing in fluvial geomorphology. In Kondolf G.M., Piégay H. (Eds.): Tools in Fluvial Geomorphology. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 306-323. ISBN : 978-1-118-64855-1 978-0-470-68405-4

Hürlimann M., Rickenmann D., Graf C. (2003) – Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alpes. Canadian Geotechnical Journal, 40 (1), 161-175.
DOI : 10.1139/t02-087

Hughes F.M.R., Rood S.B. (2003) – Allocation of River Flows for Restoration of Floodplain Forest Ecosystems: A Review of Approaches and Their Applicability in Europe. Environmental Management, 32 (1), 12-33.
DOI : 10.1007/s00267-003-2834-8

Johnson A.M., Rodine J.R. (1984) – Debris flow. In Brundsen D., Prior D.B. (Eds.): Slope Instability. Wiley, Chichester, 257-361.

Koulinski V. (2000) – Étude hydraulique du torrent du Peynin sur son cône de déjection. Rapport SARL E.T.R.M., Aiguilles (France), 58 p.

Koulinski V. (2002) – Étude hydraulique de la dérivation du torrent de Peynin sur son cône de déjection. Rapport SARL E.T.R.M., Saint Pancrasse, 43 p.

Koulinski V. (2014) – Plan de gestion du transport solide dans le bassin versant du Guil (n° 4). Rapport SARL E.T.R.M., Les Chapelles, 52 p.

Lamarre H., MacVicar B., Roy A.G. (2005) – Using Passive Integrated Transponder (PIT) Tags to Investigate Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers. Journal of Sedimentary Research, 75 (4), 736-741.
DOI : 10.2110/jsr.2005.059

Liébault F., Bellot H., Chapuis M., Klotz S., Deschâtres M. (2012) – Bedload tracing in a high-sediment-load mountain stream: bedload tracing in a high-sediment-load mountain stream. Earth Surface Processes and Landforms, 37 (4), 385-399.
DOI : 10.1002/esp.2245

McCoy S.W., Coe J.A., Kean J.W., Tucker G.E., Staley D.M., Wasklewicz T.A. (2011) – Observations of debris flows at chalk cliffs, Colorado, USA: Part 1, in situ measurements of flow dynamics, tracer particle movement and video imagery from the summer of 2009. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, Casa Editrice Università La Sapienza, 715-726.
DOI : 10.4408/IJEGE.2011-03.B-078

Michler L., Brousse G., Arnaud-Fassetta G., Carozza J.-M. (2016) – Dynamique de la charge de fond de l'Argent Double (Affluent de rive gauche de l'Aude, France du Sud) : Approche croisée « technologie RFID / modélisation numérique du transport solide ». Bulletin de la Société Géographique de Liège, 67, 59-75.
https://popups.uliege.be:443/0770-7576/index.php?id=4330

Navratil O., Liébault F., Bellot H., Travaglini E., Theule J., Chambon G., Laigle D. (2013) – High-frequency monitoring of debris-flow propagation along the Réal Torrent, Southern French Prealps. Geomorphology, 201, 157-171.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2013.06.017

Nichols M.H. (2004) – A radio frequency identification system for monitoring coarse sediment particle displacement. Applied Engineering in Agriculture, 20 (6), 783-787.
DOI : 10.13031/2013.17727

Petit F., Gob F., Houbrechts G., Assani A.A. (2005) – Critical specific stream power in gravel-bed rivers. Geomorphology, 69 (14), 92-101.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2004.12.004

Phillips C.B., Jerolmack D.J. (2014) – Dynamics and mechanics of bed-load tracer particles. Earth Surface Dynamics, 2 (2), 513-530.
DOI : 10.5194/esurf-2-513-2014

Piégay H., Arnaud F., Cassel M., Depret T., Alber A., Michel K., Rollet A.-J., Vaudor L. (2016) – Suivi par RFID de la mobilité des galets : retour sur 10 ans d'expérience en grandes rivières. Bulletin de la Société Géographique de Liège, 67, 77-91.
https://popups.uliege.be:443/0770-7576/index.php?id=4476

Remaître A., Malet J.-P., Maquaire O., Ancey C., Locat J. (2005) – Flow behaviour and runout modelling of a complex debris flow in a clay-shale basin. Earth Surface Processes and Landforms, 30 (4), 479-488.
DOI : 10.1002/esp.1162

Remaître A. (2006) – Morphologie et dynamique des laves torrentielles : Applications aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud). Thèse de doctorat, Université de Caen, 487 p.

Reid L.M., Dunne T. (2003) - Sediment budgets as an organizing framework in fluvial geomorphology. In Kondolf, G.M. and Piégay, H. (Eds.), Tools in Fluvial Geomorphology. Wiley, New York. 463-500.

Rollet A.-J. (2008) – Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain. Thèse de doctorat, Université de Lyon 3, 305 p.

Rollet A. J., Macvicar B., Piegay H., Roy A. (2008) – L'utilisation de transpondeurs passifs pour l'estimation du transport sédimentaire : premiers retours d'expérience. La Houille Blanche, 4, 110-116.
DOI : 10.1051/lhb:2008047

Schrott L., Adams T. (2002) – Quantifying sediment storage and Holocene denudation in an Alpin Basin, Dolomites, Italy. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband, 128, 129-145

Summerfield M.A. (1991) – Global Geomorphology. An

introduction to the study of landforms. Longman Scientific and Technological, Harlow, 537 p.

Theule J., Liébault F., Loye A., Laigle D., Jaboyedoff M. (2012) – Sediment budget monitoring of debris-flow and bedload transport in the Manival Torrent, SE France. Nat. Hazards Earth System Sciences, 12, 731-749.
DOI : 10.5194/nhess-12-731-2012

Theule J. (2012) – Geomorphic study of sediment dynamics in active debris-flow catchments (French Alps). Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 152 p.

Tricart J. (1960) – Mécanismes normaux et phénomènes catastrophiques dans l'évolution des versants du bassin du Guil (Hautes-Alpes, France). Zeitschrift fur Geomorphologie, 5 (4), 227-301.

Tricart J. (1961) – Evolution du lit du Guil au cours de la crue de juin 1957, en aval de Ristolas. Extrait du bulletin de la section de géographie, Comité des travaux historiques et scientifiques, ministère de l'éducation nationale, Paris, LXXII, 169-403.

Walling D.E. (1983) – The sediment delivery problem. Journal of Hydrology, 65 (1-3), 209-237.
DOI : 10.1016/0022-1694(83)90217-2

Wilcock P.R., Barta A.F., Shea C.C., Kondolf G.M., Matthews W.V.G., Pitlick J.C. (1996) – Observations of flow and sediment entrainment on a large gravel-bed river. Water Resources Research, 32 (9), 2897-2909.
DOI : 10.1029/96WR01628

Wolman M.G. (1954) – A method of sampling coarse river bed material. Transaction of the American Geophysical Union, 35 (6), 951-956.
DOI : 10.1029/TR035i006p00951

Wong M., Parker G., DeVries P., Brown T.M., Burges S.J. (2007) – Experiments on dispersion of tracer stones under lower-regime plane-bed equilibrium bed load transport: flume experiments on dispersion of tracer stones. Water Resources Research, 43 (3), W03440.
DOI : 10.1029/2006WR005 172

Abridged version

In mountainous areas, especially in large watersheds with torrential tributaries, the production and transport of sediment significantly increase flood impacts in the valley bottoms. The quantification and characterization of sedimentary transfers are therefore major challenges to provide better flood risk management. As a part of SAMCO (ANR 12 SENV-0004 SAMCO) research project on mountain hazard assessment in a context of global changes, we tried to improve the knowledge of these hydromorphological systems at both spatial and temporal scales, by identifying sediment supply and sediment dynamics from torrential tributaries to the trunk channel. A sediment budget was used as a tool for quantifying erosion, transport and deposition processes. This research is focused on a part of the sedimentary budget to understand the torrential processes and to define debris-flow's contribution.

This research is focused on the upper Guil watershed (317 km²) in the Queyras (Southern French Inner Alps), entrenched in the "schistes lustrés" and ophiolitic bedrock (fig. 1). This watershed is prone to catastrophic summer floods, e.g. June 1957 with > 100-yr return period or June 2000 with 30-yr return period, characterized by huge sediment transport from tributaries to down valley, very much facilitated by strong hillslope-channel connectivity. The Peynin is the most active torrent among the left-bank tributaries of the upper Guil River. The reasons for this high torrential activity during catastrophic summer flood are linked to dissymmetrical, steep mountain slopes, and high production of debris due to tectonic joints and efficient frost-shattering. During the June 2000 30-yr return period flood event a volume of 12,000 m³ of sediment has been aggraded in the Peyronnelle fan. This study especially focuses on the Peyronnelle watershed (1 km²), the most active, left-bank tributary of the Peynin (fig. 2).

The purpose of this paper is to assess and quantify the sediment dynamics during a debris flow event along a high torrential tributary. Due to these susceptibility factors, 320 particles of the Peyronnelle watershed have been equipped with Passive Integrated Transponders (PIT tags) installed in 10 injection sites along the talweg (fig. 3). Each monitored particle was measured along the three long-intermediate-short-axis (fig.4). Pit-tags tracers have been distributed in the talweg (30%), and along the left and right-banks (70%). Five injection forms were determined and recorded to trace the source of receivers' displacement. A Differential Global Positioning System (DGPS) has been used to locate and map each monitored particle. Precision is estimated from 0.5 m for horizontal dimension to 1.5 m for vertical dimension. A meteorological station (2,000 m) was implemented in 2014 on the right flank of the Peynin watershed. Rainfall is recorded hourly for every day. Overnight on August 8 and 9, 2015, an important rainfall event (23 mm in 3 h; intense storm cells) has been recorded at the Peynin weather station. Debris flows have developed in the sub-watershed, located on the left-bank of the Peynin torrent (Four à Chaux, Trois Arbres, Peyronnelle, Roche Rousse). This rainfall event was spatially limited so that the flash-flood regime did not extend to other Guil tributaries. A few days later, we could directly map in the field the debris flow surfaces that occurred in the Peynin watershed. We estimated the average height by measuring the difference between tracks left on upstream and downstream banks. Total volumes mobilized during the debris flow event were estimated at 9,000 m³.

Out of 320 pebbles and boulders equipped with PIT tags in the Peyronnelle watershed, 101 have been found (i.e. 31%) after the debris flow event (fig. 7). We classified them in 4 different groups: PIT tags equipped pebbles and boulders mobilized and redeposited downstream in the same Peyronnelle channel, i.e. 27 pebbles and boulders in Group A (fig. 9); PIT tags equipped pebbles and boulders mobilized in preferential deposition sites such as the concave bends of the Peyronnelle, i.e. 26 pebbles and boulders in Group B (fig. 9); PIT tags equipped pebbles and boulders distributed outside the main channel zone but stored in the watershed on the Peyronnelle fan, i.e. 12 pebbles and boulders in Group C (fig. 9); PIT tags equipped pebbles and boulders displaced outside the main channel and outside the watershed, i.e. 36 pebbles and boulders in Group D (fig. 9). Collectively, 90% out of the 101 found PIT tags equipped pebbles and boulders were displaced. The longest recorded travel distance exceeds 700 m and more than a third of the PIT tags equipped pebbles and boulders were displaced over distances longer than 300 m. The left-bank of the Peyronnelle torrent has a greater activity, i.e. 100 pebbles and boulders over 730 m, than the right-bank, i.e. 20 pebbles and boulders over 60 m. Controlling factors are directly related to the steepness of the slope, allowing the displacement of the particles by gravity flow. Heights of the banks together with channel width regulate the acceleration of debris flow. These results highlight the pulsating character of sediment fluxes associated with high magnitude and low-frequency events and indicate the strongest functionality of debris-flow dominated channels in the Peynin watershed.

Compared to other methods used to characterize debris flows processes, such as geophone or Terrestrial Laser Scanning, the use of PIT tags for the study of debris flows with muddy matrix is one of the originality of this work. Research carried out in parallel by the IRSTEA of Grenoble (Bel, 2017) showed higher return rates of PIT tags equipped pebbles and boulders for debris flows produced in crystalline massifs or limestone, generating debris flows with granular matrix. Our results highlight the major role played by the torrential flows in the efficiency of the sediment cascade of Peynin torrent. Though the rainfall event was of moderate intensity, the volumes transported by the Peynin torrent are significant. These volumes, corresponding to the remobilization of former channel deposits, allow a sporadic, yet systematic supply to the sedimentary fluxes to the Peynin channel. During generalized events (e.g. floods of 1957 and 2000) these sediment storages will be directly mobilized by the Peynin torrent down to the Guil River. These debris influxes to the Guil River are those going to generate damages to infrastructure and population during abundant, intense rainfall events.