

Insatallation d'un suivi en contenu des crues et laves torrentielles dans les Alpes françaises

Autor(en): **Navratil, Oldrich / Liébault, Frédéric / Bellot, Hervé**

Objekttyp: **Article**

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

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

PDF erstellt am: **24.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-389823>

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.

7. Installation d'un suivi en continu des crues et laves torrentielles dans les Alpes françaises

par

Oldrich NAVRATIL¹, Frédéric LIÉBAULT¹, Hervé BELLOT¹, Joshua THEULE¹,
Xavier RAVANAT¹, Frédéric OUSSET¹, Dominique LAIGLE¹,
Vincent SEGEL² & Marc FIQUET³

Résumé.—NAVRATIL O., LIÉBAULT F., BELLOT H., THEULE J., RAVANAT X., OUSSET F., LAIGLE D., SEGEL V. & FIQUET M., 2013. Installation d'un suivi en continu des crues et laves torrentielles dans les Alpes françaises. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 93-107.

Ce papier présente les enjeux scientifiques, opérationnels et techniques d'un observatoire de mesure des crues et laves torrentielles installé en 2010 sur cinq torrents des Alpes françaises (Isère et Alpes-Maritimes). Couplée à des relevés topographiques à haute-résolution et des données pluviométriques spatialisées, ce type d'installation, encore inédite en France, permettra d'observer, mesurer et analyser plus précisément les mécanismes de déclenchement et de transfert des écoulements torrentiels en milieu montagneux.

Mots clés: géophones, imagerie vidéo, morphodynamique, recharge sédimentaire, torrents.

Abstract.—NAVRATIL O., LIÉBAULT F., BELLOT H., THEULE J., RAVANAT X., OUSSET F., LAIGLE D., SEGEL V. & FIQUET M., 2013. Presentation of high-frequency flash floods and debris-flows monitoring in the French Alps. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 93-107.

This contribution presents the research aims and the main characteristics of five flash flood and debris-flow torrents monitored since the late 2010 in the French Alps. High-frequency monitoring stations associated with a high-resolution topographical dataset and rainfall radar imagery will provide an original contribution to improve our understanding of the trigger mechanisms and the transfer of flash floods/debris-flow in mountainous areas.

Keywords: geophones, imagery analysis, torrent morphology, sediment yield.

¹Unité de Recherche «Erosion Torrentielle Neige et Avalanches», Irstea Grenoble (ex. Cemagref);
tél.: +33 (0)4 76 76 28 40.

E-mail: Oldrich.Navratil@univ-lyon2.fr

²Service de Restauration des Terrains de Montagne des Alpes-Maritimes, Office Nationale des Forêts.

E-mail: vincent.segel@onf.fr

³Conseil Général des Alpes-Maritimes.

E-mail: mfiquet@cg06.fr

INTRODUCTION

Les torrents de montagne sont caractérisés par des écoulements à fortes pentes, souvent dans des zones sensibles à l'activité érosive du milieu. Les bassins versants torrentiels constituent ainsi des systèmes géomorphologiques particulièrement actifs de par leur capacité à produire, mobiliser et exporter des quantités très importantes de matériaux. Les crues torrentielles assurent ainsi la continuité indispensable des transferts sédimentaires en mobilisant les stocks apportés par les versants. Ces événements peuvent présenter des caractéristiques et des intensités différentes, allant jusqu'à la formation de laves torrentielles capables de charrier des blocs de plusieurs mètres cubes et des vitesses de front pouvant atteindre 15 m s^{-1} .

La prévision des crues et laves torrentielles représente en France un enjeu majeur en termes de sécurité civile en montagne. En effet, près de 4500 communes sont concernées par le risque torrentiel en France (BOURRELIER 1997). Les crues des torrents constituent des éléments essentiels vis-à-vis de l'aménagement et de la gestion des territoires de montagne, de par leur potentiel dommageable au niveau économique et humain. Ainsi l'urbanisation actuelle des cônes de déjection accroît considérablement la vulnérabilité des zones concernées et la pression anthropique a pu également favoriser l'activité érosive de ces milieux.

De nombreuses questions se posent cependant encore en ce qui concerne les facteurs de déclenchement d'une lave torrentielle, les facteurs contrôlant la production et les transferts sédimentaires, les volumes de matériaux susceptibles d'être mobilisés par un événement. Cette méconnaissance est en partie due à la complexité même de ces écoulements très particuliers et des processus mis en jeu (BARDOU 2002). Elle peut aussi s'expliquer par les difficultés liées à l'observation *in situ*, en raison du caractère peu prévisible et dévastateur de ces phénomènes naturels (ITAKURA *et al.* 2005). Ainsi, ces 20 dernières années, de nombreuses initiatives de suivi en continu et d'installation de stations d'alerte ont vu le jour en Europe, aux Etats-Unis et en Asie (e.g., MARCHI *et al.* 2002, HÜRLIMANN *et al.* 2003, MCCOY *et al.* 2010, TAKAHASHI 2009). En France, de tels exemples demeurent encore rares, voir inexistantes en ce qui concerne les laves torrentielles.

L'objet de ce papier est de présenter 5 sites de mesure des crues et laves torrentielles déployés au cours de l'année 2010 dans les Alpes française par Irstea Grenoble (ex. Cemagref; figures 1 et 2, tableau 1). Ce travail est mené en collaboration avec le service RTM (Restauration des Terrains de Montagne) de l'ONF (Office National des Forêts) et le Conseil Général des Alpes-Maritimes dans le cadre de projets européens (Interreg-Alcotra-Risknat and Interreg-Alpine Space-Paramount). Les enjeux socio-économiques liés au transport sédimentaire dans ces zones sont essentiellement liés à la protection des infrastructures (voies de communication) et à la sécurité de village localisés à proximité de leur exutoire.

Nous présenterons dans ce papier notre démarche de recherche, les sites retenus, ainsi que l'instrumentation déployée sur le terrain. Un des sites localisé sur le torrent du Réal à Péone (figure 1a) sera décrit avec plus d'attention en raison de sa très forte activité torrentielle (2-3 laves torrentielles par an) et des caractéristiques de l'instrumentation déployée *in situ*, couplant les mesures de trois stations de mesure le long du torrent, des

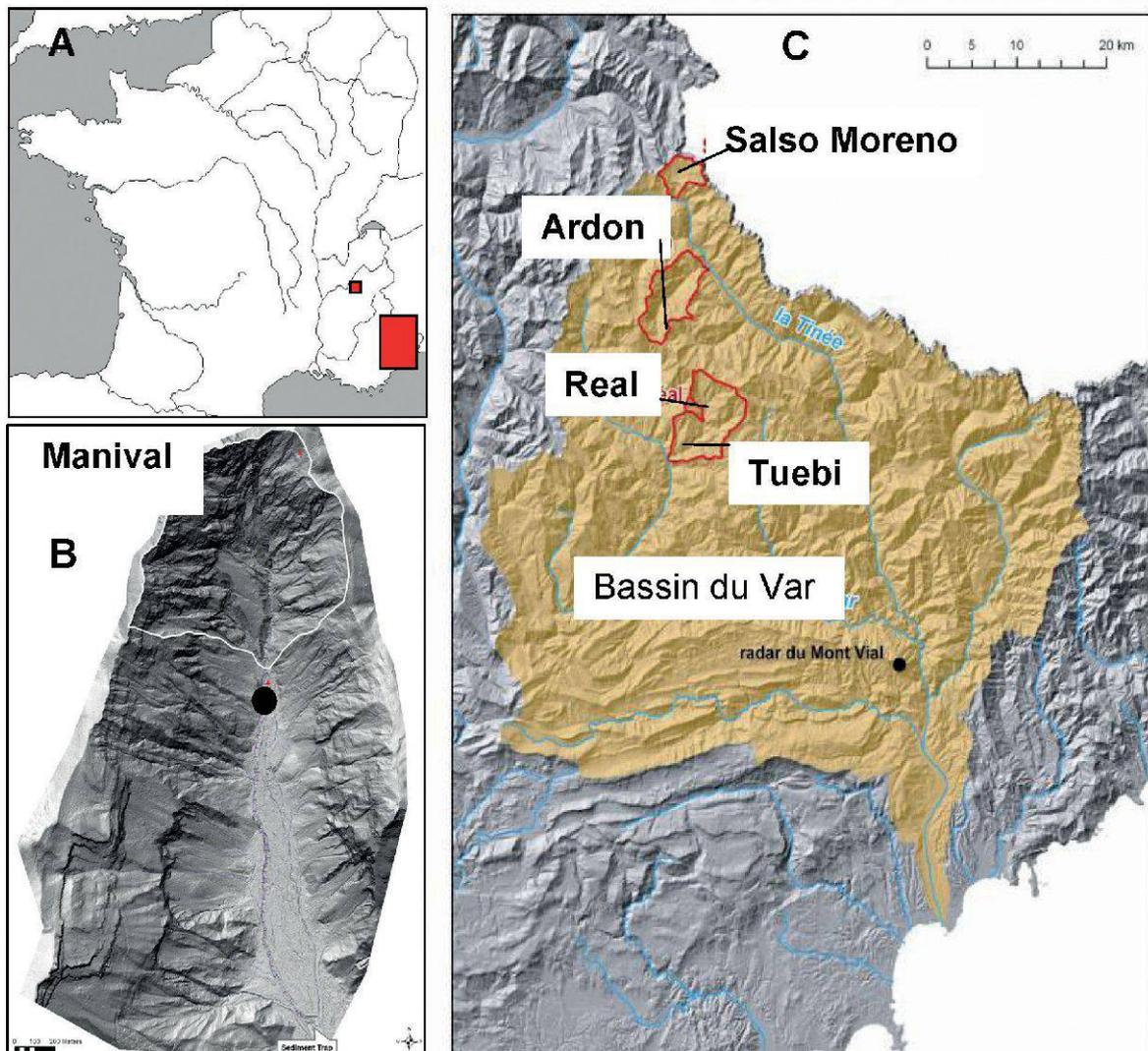


Figure 1.–Localisation des bassins versants d'étude en France (A). Le bassin du Manival dans les Alpes du Nord (B). Les bassins du Réal, Tuébi, Ardon et Salso Moreno dans les Alpes du Sud (C).

données topographiques haute-résolution (temporelles et spatiales) et des données issues de radars météorologiques (MERIAUX *et al.* 2011). Ce suivi en continu est fondé entre autre sur l'utilisation de géophones, permettant d'enregistrer les vibrations du sol au passage des laves pour en déduire la vitesse moyenne du front de l'écoulement. L'utilisation de géophones avec des stations énergétiquement autonomes s'est révélée complexe; le développement instrumental et les tests préliminaires de ce matériel seront présentés dans une dernière partie.

NOTRE DÉMARCHE ET LES SITES D'ÉTUDES

Dans le cadre de ce programme de recherche, nous avons opté pour une approche d'observation *in situ* à l'aide de stations hydrométriques autonomes avec transmission de données au laboratoire.

Tableau 1.–Caractéristiques des sites étudiés.

Torrent	Aire Drainée (km ²)	Altitude ASL (m)	Transport sédimentaire		Enjeux socio-économiques	Matériel installé			
			Charriage	Lave torrentielle		Niveaux	Géophones	Camera	Pluviomètres
Ardon	35.7	1139-2829	X	O	Saint-Etienne-de-Tinée village	Sonde pression	0	0	1
Réal (3 sites)	2.3	1218-2069	X	X	Péone village	Radar and ultrason	9	1	4
Réal Tuébi	48.7	779-2582	X	O	Péone, Guillaumes villages	Sonde pression	0	0	1
Salso Moreno	12.6	1639-2868	X	X	Le Pra village, road RD64	Echelle à maximum	0	0	1
Manival	3.6	570-1738	X	X	St Nazaire les Eymes, N90	Ultrason	3	2	2

Cinq bassins d'étude ont été instrumentés dans les Alpes du Nord et les Alpes du Sud (figure 1, tableau 1). Sur chacun de ces sites, des crues torrentielles sont observées chaque année par les services du RTM. Ces événements engendrent généralement un transport sédimentaire par charriage et chaque année, au moins une lave torrentielle est observée au niveau des petits bassins aux versants très dégradés: les torrents du Manival et du Réal (figure 1, tableau 1). Ces laves engendrent alors des dépôts de matériaux souvent conséquents à l'aval de ces zones et alimentent en sédiment fins et grossiers les torrents d'ordre supérieur (figure 3). Ces laves sont généralement déclenchées par des événements de pluie ou de grêle très intenses au printemps et/ou en été, et sont associées à des fronts d'orage ou des orages convectifs localisés et violents.

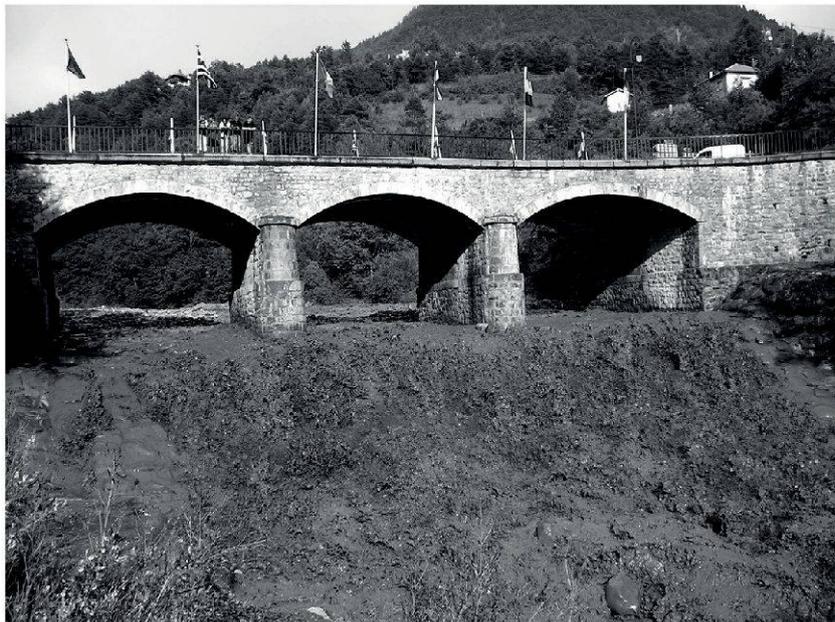


Figure 2.—Passage d'une crue torrentielle sur le Tuébi à Guillaumes le 26 juillet 2006 (source: RTM 06).

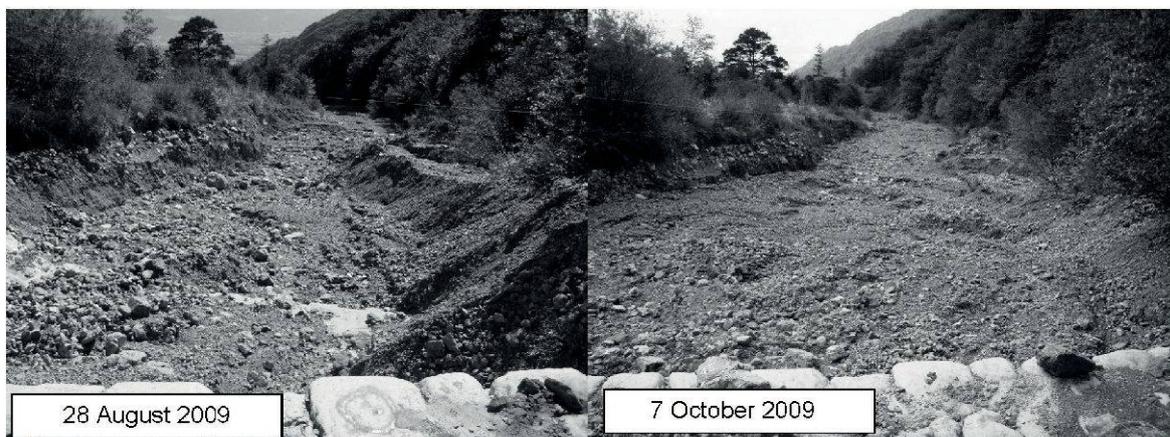


Figure 3.—Séquence photographique illustrant la recharge sédimentaire du lit du torrent du Manival (clichés: J. Theule).

En ce qui concerne le suivi des crues torrentielles, les stations sont classiques (mesure de hauteur d'eau, vitesses de surface en crue, suivi topographique de la section de mesure, jaugeages en basse eaux). En effet, ces événements sont généralement caractérisés par des écoulements très chargés en sédiment fins (plusieurs centaines de g L^{-1} dans certains cas) et la présence de charriage des sédiments plus grossiers au fond du lit (figure 2).

Les laves torrentielles, de par leur particularité rhéologique (phases solide et liquide indissociables) demandent une attention plus particulière en termes d'instrumentation (voir les détails d'une installation à la section 3). L'instrumentation est basée sur l'utilisation de géophones (vibration du sol au passage de la lave), de capteurs radar et ultrason et d'imagerie (vidéo infrarouge et photographie haute résolution).

A ces données, s'ajoute un suivi topographique haute-résolution de tous les sites d'étude, à l'exception du torrent du Tuébi (chenal principal et des zones de dépôts). Ces relevés sont réalisés après chaque crue par des levés LIDAR ou théodolite (THEULE 2009). Ces données permettent actuellement de calculer la production sédimentaire des torrents du Manival et du Réal ainsi que leur dynamique longitudinale de stockage et de déstockage des sédiments dans le chenal principal, en lien avec la saisonnalité des pluies.

L'OBSERVATOIRE DU TORRENT DU RÉAL (ALPES-MARITIMES)

Trois stations de suivi des écoulements torrentiels ont été installées sur le torrent du Réal (tableau 1, figure 1 et 4a). La distance entre ces stations (notées R1, R2, R3) est d'environ 800 m. Les processus d'érosion des sédiments des zones sources et l'initiation des laves de la partie amont sont enregistrés à la station R1 (figure 4b). La station R2 (figure 4c) fournit une estimation des transferts de sédiments mais aussi des processus d'initiation des laves dans le lit du torrent, i.e. attribuée à la remobilisation de dépôts apportés par les crues précédentes (généralement de charriage, THEULE 2009). La station R3 (figure 4d) fournit un suivi juste à l'amont de la zone de confluence, dans une partie de dépôt de laves. Il sera ainsi possible de reconstituer l'évolution du volume des laves au cours de la propagation et d'étudier les phénomènes de recharge par incision du lit.

Une des contraintes majeure liée à ce type d'instrumentation est l'alimentation en énergie des stations. L'alimentation en courant ne pouvant être assurée sur secteur, compte tenu de l'environnement étudié, elle est donc assurée pour chaque station par une batterie de 12 V (100 Ah) couplée à un panneau solaire (55 Wcc), rendant alors ces installations autonomes.

Des capteurs à ultrason et radar (Paratronic®) fournissent le niveau de l'écoulement au niveau des sections de mesure (figure 4b, c, d). Le passage d'une lave génère du bruit et des vibrations du sol très importantes pouvant se faire ressentir à plusieurs centaines de mètres de l'écoulement. Ainsi, sur chaque site, nous avons installé sur les berges trois géophones verticaux (GS20-DX, Geospace®, fréquence naturelle de 8Hz) distants d'environ 100 m le long du chenal principal.

La contrainte d'alimentation des stations ne nous permet pas d'utiliser un ordinateur pour l'acquisition du signal à très haute fréquence (jusqu'à 1000 Hz pour le signal des géophones). Les géophones ont donc été couplés à un conditionneur de signal électronique permettant d'enregistrer l'enveloppe du signal des vibrations du sol au cours de la lave (voir la partie 5 pour plus de détail). L'enregistrement des hauteurs d'écoulement et du signal

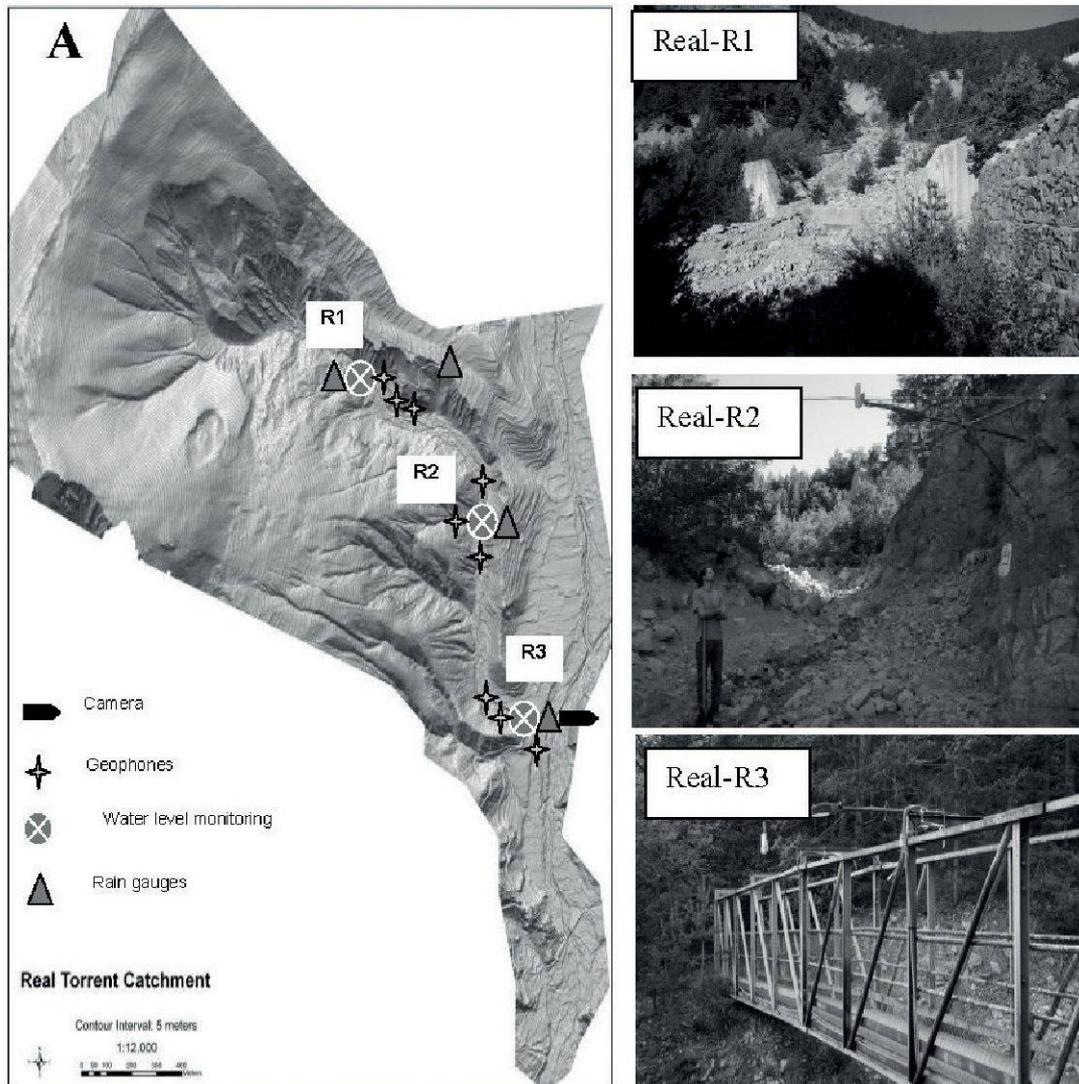


Figure 4.—Instrumentation en place sur l'observatoire du Réal (Alpes Maritimes, commune de Péone). (A) Localisation et photos des différentes stations du torrent du Réal; (B) Matériel de mesure à la station amont; (C) à la station du milieu; (D) à la station aval. Notations: Cam: camera, RG: pluviomètre; US: ultrason, Rd: radar, Geo: géophone. Les axes 'x' et 'y' sont en mètre (NAVRATIL *et al.* in press).

des géophones se fait à 5Hz, en continu, à l'aide d'une Campbell® CR1000 et d'une carte mémoire de 2Go (module CFM100; autonomie de 80 jours). Ces données nous permettront alors d'estimer la vitesse moyenne du front de lave, qui sera ensuite utilisée pour calculer le débit et le volume de chaque lave.

Les pluies sont enregistrées sur chaque site à un pas de temps de 5 minutes. Un appareil photo (Campbell® CC640, résolution, 680x540 pixels) a été placé sur le site R1; il est asservi aux géophones, au pluviomètre et aux limnimètres pour prendre des images pendant les crues.

Les stations sont visitées toutes les 3 semaines par les services du RTM. Un contrôle quotidien au laboratoire du bon fonctionnement des sites est assuré à l'aide d'une connexion téléphonique (*via* le réseau GSM).

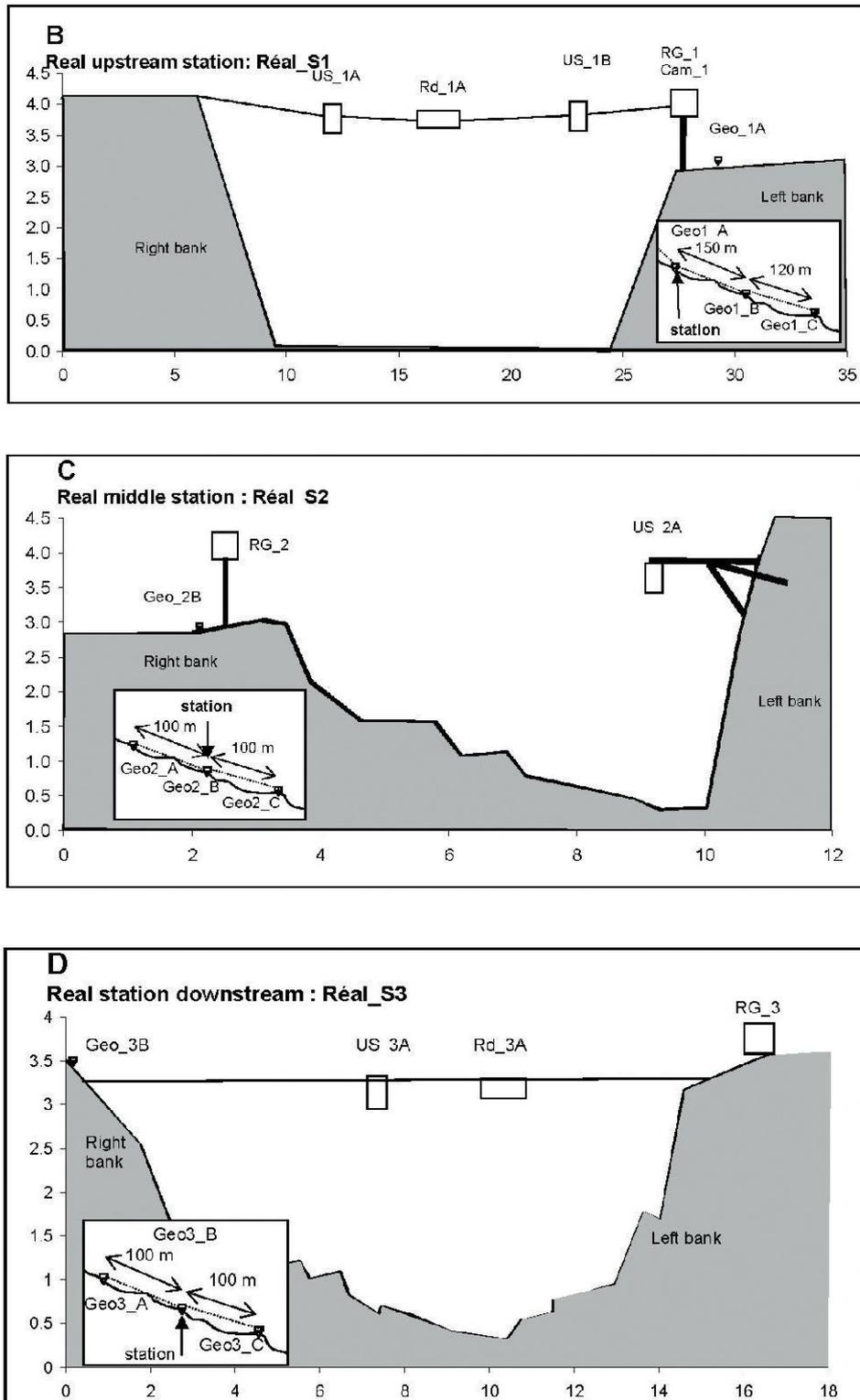


Figure 4.—Suite. Instrumentation en place sur l'observatoire du Réal (Alpes Maritimes, commune de Péone). (A) Localisation et photos des différentes stations du torrent du Réal; (B) Matériel de mesure à la station amont; (C) à la station du milieu; (D) à la station aval. Notations: Cam: camera, RG: pluviomètre; US: ultrason, Rd: radar, Geo: géophone. Les axes 'x' et 'y' sont en mètre (NAVRATIL *et al.* in press).

UTILISATION DES GÉOPHONES POUR LE SUIVI DES LAVES TORRENTIELLES:
CONDITIONNEMENT DU SIGNAL ET TESTS

Présentation des géophones

Les géophones sont couramment utilisés pour le suivi des laves torrentielles (e.g. MARCHI *et al.* 2002, HÜRLIMANN *et al.* 2003, ITAKURA 2005). Ces capteurs sont composés d'un aimant pouvant vibrer dans une bobine, soit verticalement (notre cas), soit horizontalement. En vibrant, ce capteur génère alors un courant très faible, proportionnel à l'amplitude de vibration du sol au passage de la lave. Leur fréquence naturelle de résonance se situe généralement autour de 5-10 Hz (10 Hz pour le cas de la figure 5); la réponse du capteur est donc linéaire au-delà de cette fréquence.

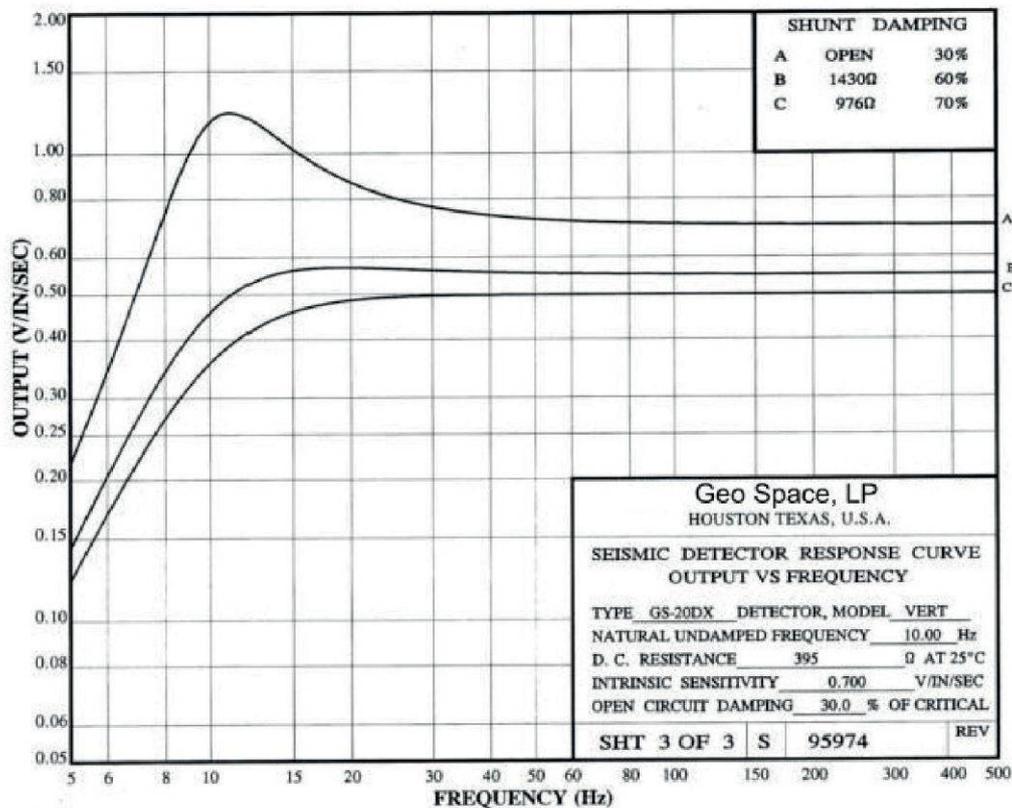


Figure 5.–Réponse du géophone (en volt par inch par seconde) en fonction de la fréquence de vibration (notice technique Géospace®, GSDX20).

Les méthodes d'acquisition du signal et la méthode adoptée

Les vibrations générées par les laves torrentielles ont des fréquences variant entre 50 et 300 Hz (FUANG *et al.* 2007, HUANG *et al.* 2007). Différentes méthodes peuvent être utilisées pour enregistrer ces vibrations: (1) une acquisition haute fréquence du signal à 500 Hz (FUANG *et al.* 2007) ou 1000 Hz (HUANG *et al.* 2007) permettant de prendre en compte toute la richesse du signal, mais toutefois incompatible avec une utilisation de station autonome de

type environnementale, fonctionnant sur panneau solaire; (2) une moyenne des amplitudes du signal (100 mesures/s, TECCA *et al.* 2003) présentant l'avantage d'un échantillonnage du signal à une fréquence plus importante (100Hz) mais qui risque d'être trop faible par rapport aux fréquences générées par les laves (non respect du critère de Shanon); (3) une transformation du signal en comptage d'impulsions (en nombre et durée) au dessus d'un seuil fixé (HURLIMANN *et al.* 2003, BADOUX *et al.* 2008); cette méthode présente l'avantage d'être simple, mais pose le problème du choix du seuil et du sens physique attribué au signal ainsi enregistré.

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi de conditionner électroniquement le signal analogique en sortie des géophones (figure 6; signal noir) en le redressant *via* un montage redresseur sans seuil avec des ampliopes (signal gris), puis en le filtrant (signal gris épais). La fréquence de coupure F_c de conditionnement des signaux respecte le critère de Shanon, soit $F_c = 2.5$ Hz pour une fréquence d'acquisition à 5 Hz (fréquence critique d'acquisition admissible pour les CR1000 avec 6 capteurs). Ce signal est ensuite amplifié et conditionné dans une boucle de courant pour que le signal puisse être transporté sans perte sur une grande distance. Il est ensuite enregistré à 5 Hz sur la centrale d'acquisition à travers une résistance de haute précision de 100 Ohms (dérive en température $< 0.01\%^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Cette méthode de traitement du signal présente l'avantage d'enregistrer sur une centrale environnementale un signal discrétisé à 5 Hz qui peut être relié linéairement à l'intégrale du signal analogique du géophone et donc à l'énergie de vibration (composante verticale) générée au passage d'une lave.

D'autre part, l'offset et le gain du signal peuvent être réglés sur le terrain individuellement pour chaque géophone, permettant de prendre en compte les caractéristiques de sol et d'implantation des capteurs (e.g. distance au chenal, lithologie).

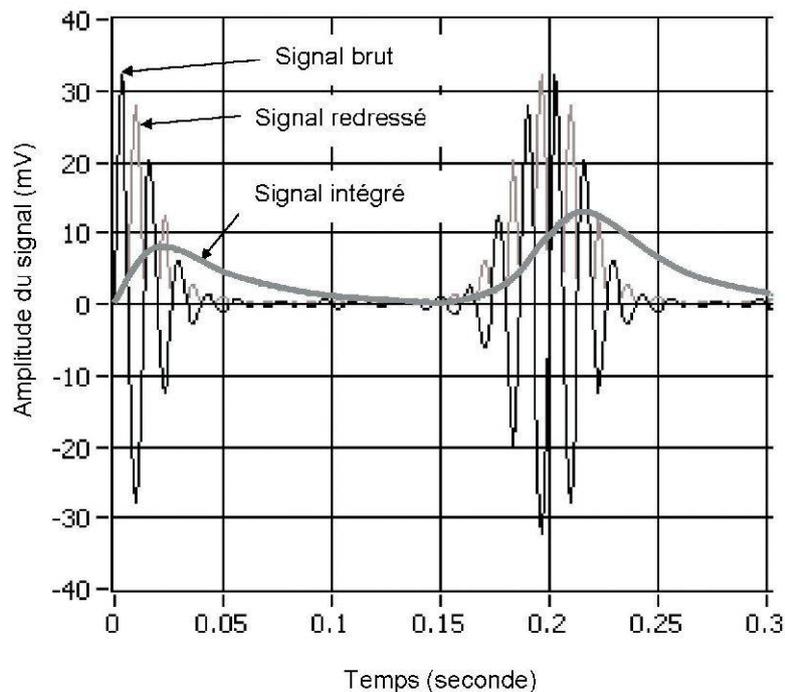


Figure 6.—Exemple théorique de conditionnement du signal proposé dans le cadre de ce projet: signal brut, redressé puis intégré.

Premiers tests in situ

Nous avons réalisé plusieurs tests préliminaires pour contrôler le signal en sortie du conditionneur des géophones:

Test 1: le géophone est placé sur un terrain meuble, un poids de 10 kg est lâché d'une hauteur de 2 m à différentes distances du géophone;

Test 2: le même test en plaçant le géophone sur un bloc posé sur ce même terrain meuble;

Test 3: le géophone est posé sur un bloc de la berge du Manival et des blocs (env. 10 kg) sont lâchés de 2 m de haut à différentes distances;

Test 4: identique au test 3, mais le géophone est placé sur un barrage RTM;

Test 5: un effondrement de berge est déclenché à quelques mètres d'un géophone situé sur un bloc coincé dans la berge composée de matériaux meubles;

Test 6: comme pour le test 3, mais cette fois-ci en lâchant de gros blocs ($\gg 10$ kg) de 4-5 m de haut dans le lit du cours d'eau ou en créant des effondrements de berge (distance d'environ 5 m du géophone).

Ces tests montrent d'une part que notre installation permet de mesurer des signaux lors de la chute de bloc individuel ou d'effondrement de berges (figures 7, 8). Ces résultats sont rassurants et nous permettent de penser que ce système sera adapté au suivi des laves qui génèrent des vibrations plus soutenues.

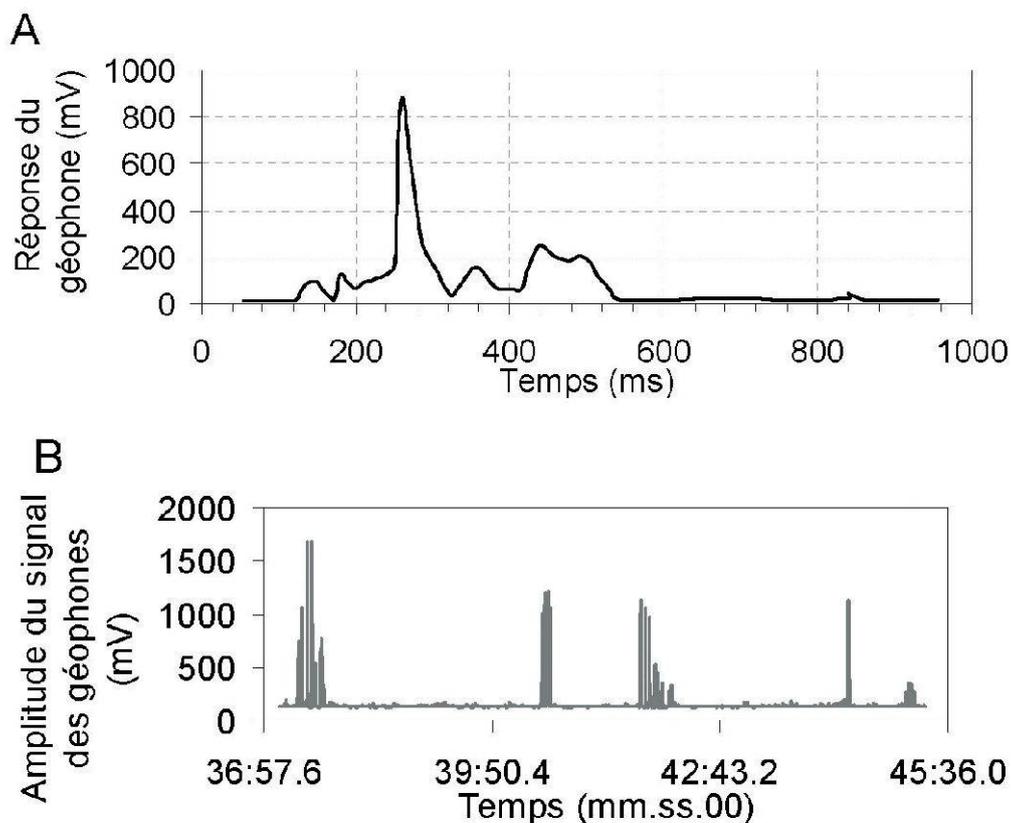


Figure 7.–Signal d'un géophone sur le Manival. (A) Signal en sortie du conditionneur des géophones pour le test 5; (B) Signal enregistré au niveau de la Campbell pour les tests 6.

D'autre part, ce signal est cohérent avec les différentes sollicitations (figure 8): par exemple, le pic d'intensité décroît rapidement avec l'éloignement de la sollicitation. L'amplitude du pic de vibration et cette décroissance dépendent fortement de la nature du matériau se trouvant entre la sollicitation et le géophone (berge ou barrage). Il semblerait que la meilleure installation du géophone soit dans un matériau meuble; nous avons donc choisi de placer nos géophones sur des blocs ancrés dans les berges le long du torrent. Cette première conclusion est-elle pertinente pour des géophones verticaux; elle serait probablement à revoir pour des géophones horizontaux.

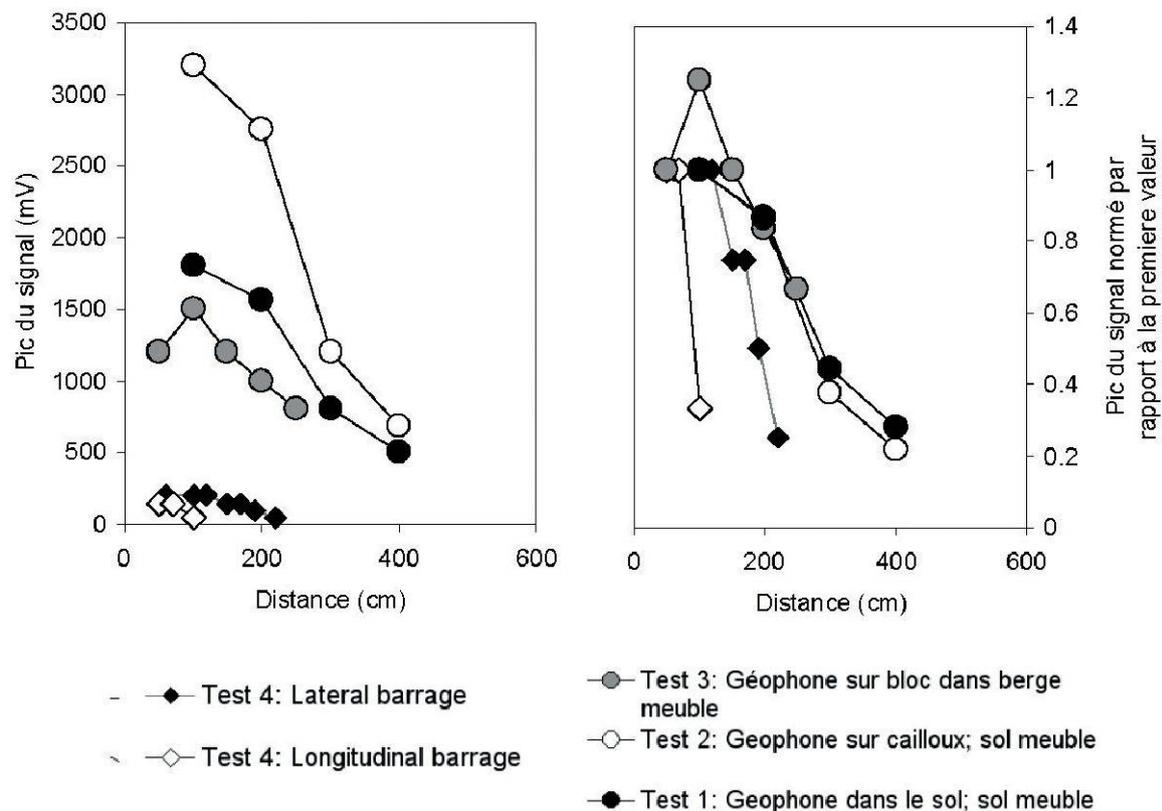


Figure 8.—Résultats des tests des géophones de 1 à 4.

Calculs d'incertitudes et positionnement des géophones sur le terrain

Les principales incertitudes liées à l'estimation du volume de la lave sont les suivantes:

- (1) l'erreur sur la mesure de la hauteur d'écoulement mesurée par le radar ou l'ultra-son; de l'ordre de la taille des sédiments;
- (2) l'erreur sur la mesure de la section initiale et de sa variation avec le temps; il sera nécessaire de vérifier sa stabilité après le lave. Privilégier une section stable permettra de réduire fortement cette incertitude;
- (3) l'erreur sur la mesure du tirant d'eau moyen, liée à la non-représentativité des points de mesures; un réseau dense de mesure par section permet de diminuer cette incertitude;

(4) l'erreur sur la mesure de la vitesse, essentiellement liée à sa résolution.

Cette dernière incertitude peut être estimée à partir du calcul d'erreur suivant:

$$R = \frac{V^2}{F \cdot d} \quad (\text{Equation 1})$$

avec R la résolution de la mesure de la vitesse, V la vitesse de l'écoulement (de 1 à 15 ms^{-1} pour les laves) et d la distance entre les géophones.

Ainsi, une acquisition à 5 Hz et une distance minimum entre les géophones de 100 m permettraient d'obtenir une résolution variant de 0.002 à 0.5 ms^{-1} (figure 9), soit une incertitude inférieure à 4% sur toute la gamme des vitesses (1-15 ms^{-1}). La distance de 100 m entre les géophones a donc été retenue lors de leur installation sur le terrain.

D'autre part, compte tenu des tests précédents sur le signal (figures 7 et 8), nous avons choisi de placer les géophones sur les berges meubles à environ 5-10 m du chenal principal (comme lors des tests préliminaires 3 et 6). Nous avons disposé les géophones sur une équerre en aluminium fixée sur des blocs insérés dans les berges, dans la mesure du possible, à l'aval de seuils ou de barrages RTM. Les géophones sont conditionnés sous une plaque en aluminium indépendante, limitant ainsi les impacts directs de la pluie ou de la grêle; le câble du géophone est fixé au niveau de la plaque afin de prévenir d'éventuels frottements liés au vent. Dans la mesure du possible, nous avons installé les géophones sur des parties de berges horizontales, permettant ainsi de limiter le bruit généré par le ruissellement de surface lors des fortes pluies.

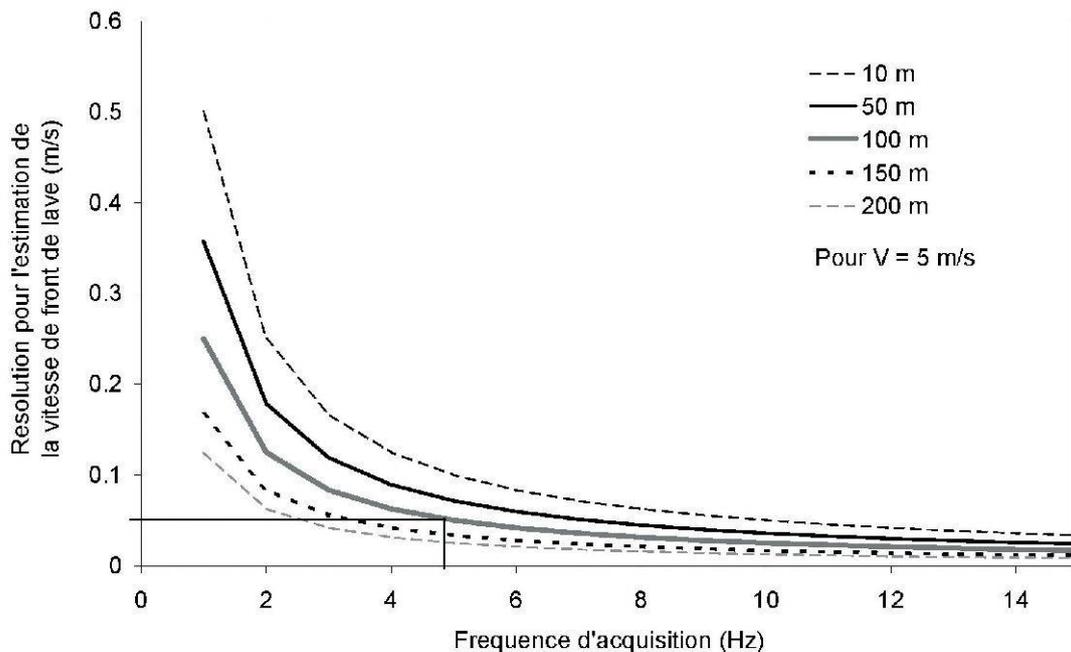


Figure 9.—Abaques pour l'estimation de la résolution de la vitesse de propagation de la lave en fonction de la fréquence d'échantillonnage au niveau de la Campbell (pour un front de lave se déplaçant à environ 5m/s).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La combinaison entre des suivis haute-fréquence des flux de sédiments à différents points dans le réseau, des suivis topographiques avant et après chaque crue fourniront des informations nécessaires pour une meilleure compréhension des processus mis en jeu lors des crues et des laves torrentielles: de leur zone d'initiation, en passant par leur transfert (érosion/dépôt) dans le chenal jusqu'aux zones de dépôts dans les trappes à sédiments, le chenal ou leur transit vers l'aval (NAVRATIL *et al.* 2012).

Deux stations d'étude (la station du Manival et du Real amont) ont été équipés d'appareil photo et de camera (pour le Manival, une camera infrarouge pour suivre les événements de jour comme de nuit). Ces images permettront de valider les résultats obtenus et de fournir des informations quantitatives (vitesses de surface, granulométrie) et qualitatives (nature de l'écoulement: écoulement de boue, visqueux, granulaire) indispensables pour une bonne interprétation des mesures.

D'autre part, pour la région des Alpes-Maritimes, nous disposons de données radar précises (radar bande X; projet Irstea-Météo France CRISTAL; MERIAUX *et al.* 2011) permettant de fournir une spatialisation des laves d'eau et du type d'hydrométéores observés (au km² tous les ¼ d'heure). Il est attendu prochainement d'utiliser ces données pour les coupler à des informations spatialisées (MNT, zones érodées, géologie), pour une étude de la susceptibilité torrentielle à l'échelle régionale (BERTRAND 2010). Elles fourniront des informations très précieuses pour nos sites d'étude.

Ainsi, le couplage entre ces données de forçage hydrométéorologique, le contexte physiographique, les relevés topographiques haute résolution et le suivi en continu du transfert des crues et laves torrentielles fourniront un jeu de données complet et original, qui nous l'espérons, nous permettra d'apporter des éléments de compréhension pertinents pour une meilleure prévision des crues et laves en montagne.

REMERCIEMENTS

Ces recherches sont financées par les projets européens Interreg-Alcofra-Risknat et Interreg-Alpine Space-Paramount et le Ministère Français de l'Environnement (MEDDE-DGPR). Nous remercions tout particulièrement Jean-Luc Demirdjian, Thierry Eme, Thierry Lièvre, Philippe Chavignon, Mathieu Schmitt et Nathalie Andreis, Eric Travaglini pour leur aide lors de l'installation des stations, le suivi de terrain et les mesures topographiques, ainsi que Luc Pouyadou pour son assistance lors de la confection des conditionneurs des géophones; Christian Eymond-Gris, Sébastien Klotz, Bruno Bacq et Aurélien Chartier pour leur aide lors de la conception et l'installation des stations sur le terrain.

RÉFÉRENCES

- ARATTANO M. & MARCHI L., 2008. Systems and Sensors for Debris-flow Monitoring and Warning. *Sensor*, 8: 2436-2452.
- BACQ B., 2010. Caractérisation des états de surface en lit torrentiel à partir du LiDAR terrestre et liens avec la morpho-dynamique Application au torrent du Manival (Isère); *Mémoire de fin d'étude, Cemagref de Grenoble; Université de Provence*, 52p.
- BADOUX A., GRAF C., RHYNER J., KUNTNER R., MCARDELL B. W., 2008. A debris-flow alarm system for the Alpine Illgraben catchment: design and performance *Nat Hazards*. 49: 517-539. DOI 10.1007/s11069-008-9303-x.

- BARDOU E., 2002. Méthodologie de diagnostic des laves torrentielles sur un bassin versant alpin. *Thèse de l'École Polytechnique de Lausanne*. 382pp.
- BERTRAND M., 2010. Approches régionales de la susceptibilité torrentielle (Alpes du sud). *Thèse en cours au Cemagref, années 2010-2013*.
- BOURRELIER P.H., 1997. Evaluation de la Politique Publique dans le Domaine des Risques Naturels, Rapport Interministériel. Conseil National de l'Évaluation, Commissariat Général au Plan, *La Documentation Française*, Paris, 138p.
- 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: 270-297. doi:10.1016/j.geomorph.2007.03.017.
- FANG Y.M., LEE B.J., CHOU T.Y., LIEN H.P., CHANG Y.H., HSIAO T.C., LIN Y.L., LIEN Y.C. & YIN H.Y., 2007. Analysis and Maintenance of Debris Flow Monitoring System - A Case Study of Events in Aiyuzih River. *2nd International Conference on Urban Disaster Reduction* November 27~29, 2007.
- GENEVOIS A., CALGARO R. & TECAC P.R., 2001. Image Analysis for Debris Flow Properties Estimation. *Phys. Chem. Earth (C)*, 26 (9): 623-631.
- HUANG C.J., YIN H.Y., CHEN C.Y., YEH C.H. & WANG C.L., 2007. Ground vibrations produced by rock motions and debris flows. *Journal of Geophysical Research*, 112, F02014, doi:10.1029/2005JF000437.
- HÜRLIMANN M., RICKENMANN D. & GRAF C., 2003. Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps. *Can. Geotech. J.* 40: 161-175.
- ITAKURA Y., INABA H. & SAWADA T., 2005. A debris-flow monitoring devices and methods bibliography. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5: 971-977.
- MARCHI L., ARATTANO M. & DEGANUTTI A.M., 2002. Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps). *Geomorphology* 46: 1-17.
- MCCOY S.W., KEAN J.W., COE J.A., STALEY D.M., WASKLEWICZ T.A. & TUCKER G.E., 2010. Evolution of a natural debris flow: In situ measurements of flow dynamics, video imagery, and terrestrial laser scanning. *Geology*, 38 (8): 735-738.
- MERIAUX P., WESTRELIN S., CHEZE J.L., TABARY P., JAVELLE P. & DEFRANCE D., 2011. RHYTMME Project: a Radar Network dedicated to Hydrometeorological Risk Management in Mediterranean Mountains. *Colloque SHF "Eaux en montagne"*.
- NAVRATIL O., LIEBAULT F., THEULE J., BELLOT H., TRAVAGLINI E., CHAMBON G. & LAIGLE D., (in press). High-frequency monitoring of debris-flows propagation in the Réal Torrent, Southern French Alps. *Geomorphology*.
- TAKAHASHI T., 2009. A Review of Japanese Debris Flow Research. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 2 (1): 1- 14.
- TECCA P.R., GALGARO A., GENEVOIS R. & DEGANUTTI A.M., 2003. Development of a remotely controlled debris flow monitoring system in the Dolomites (Acquabona, Italy). *Hydrol. Process.* 17: 1771-1784.
- THEULE J., 2009. The coarse sediment yield of torrent catchments during flow events. *Thèse en cours au Cemagref: 2008-2011*. Rapport technique, 11p.

