

Collection EDYTEM

Numéro 19 - Année 2017

Coordination :
Emmanuel Malet
Laurent Astrade

MONITORING EN MILIEUX NATURELS

RETOURS D'EXPÉRIENCES EN TERRAINS DIFFICILES

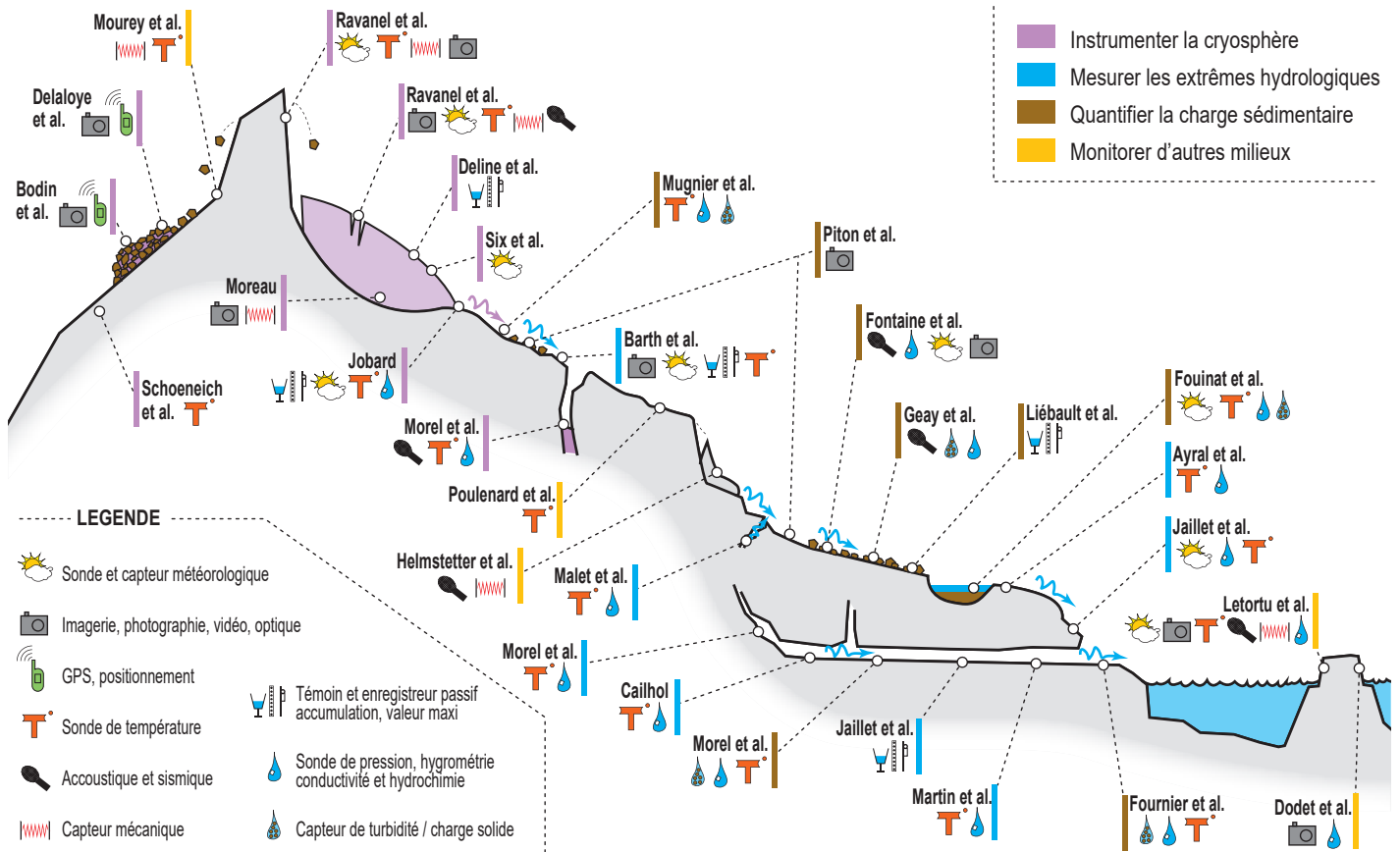


Sommaire

Éditorial, par FABIEN ARNAUD	3
Avant-propos, par EMMANUEL MALET, LAURENT ASTRADE	4
Introduction - Monitorer les milieux naturels, entre ambitions et contraintes, une affaire de compromis. Par EMMANUEL MALET, LAURENT ASTRADE, CHRISTOPHE GAUCHON, STÉPHANE JAILLET	9
Le monitoring énergétique pour les systèmes d'acquisition en milieu naturel difficile. Par LIONEL DARRAS, ARMAND MARISCAL	19
Instrumenter la cryosphère	25
Instrumentation thermique et cinématique des parois à permafrost du massif du Mont Blanc. Par LUDOVIC RAVANEL, EMMANUEL MALET, PIERRE-ALLAIN DUVILLARD, FLORENCE MAGNIN, PHILIP DELINE, GRÉGOIRE GUILLET, FABRIZIO TROILO, PAOLO POGLIOTTI, UMBERTO MORRA DI CELLA, JAN BEUTEL, STEPHAN GRUBER	27
Suivis par GPS et webcam de glaciers rocheux à mouvement rapide. Par REYNALD DELALOYE, CHRISTOPHE LAMBIEL	39
L'apport d'appareils photo reflex autonomes pour le suivi quasi-continu de la dynamique des glaciers rocheux. Exemples dans les Alpes et dans les Andes Par XAVIER BODIN, EMMANUEL MALET, FLAVIEN VERNIER, GUILHEM MARSY, HÉLA HADRI, DARIO TROMBOTTO	47
Les contraintes et difficultés des observations sur les glaciers de montagne. Par DELPHINE SIX, CHRISTIAN VINCENT	55
Dix ans de balises d'ablation sur le glacier d'Estelette (massif du Mont Blanc) pour étudier la dynamique de sa couverture détritique. Par PHILIP DELINE, MARTIN P. KIRKBRIDE	61
Du blanc au-dessus du vide. Monitoring multi-paramètres de la formation et de l'évolution d'un pont de neige au-dessus d'une crevasse sur un glacier alpin. Par LUDOVIC RAVANEL, EMMANUEL MALET, PHILIPPE BATOUX	68
Instrumentation hydrologique et météorologique en milieu glaciaire alpin. Application au glacier du Baunet (Savoie). Par SYLVAIN JOBARD	77
Time lapse, rendre visible l'invisible. Premiers développements et applications au suivi des glaciers. Par LUC MOREAU	87
2Alpes-3065, les tribulations d'un forage d'altitude. Par PHILIPPE SCHOENEICH, JEAN-MICHEL KRYSIECKI	95
Fonte du glacier souterrain de Scarasson (Marguareis, Italie). Suivi instrumenté de la température, de l'humidité et du recul. Par LAURENT MOREL, RICHARD MAIRE, FRANÇOIS VALLA, JOAN DECKER, MICHEL SIFFRE, JOFFREY BOSCAR, SERGE CAILLAULT, CATHY LAMBOGLIA, Jo LAMBOGLIA, JEAN-ROBERT PETIT, MICHEL OGAND	101

Mesurer les extrêmes hydrologiques	109
Instrumentation hydrométéorologique spatialisée sur le bassin versant du Vorz (massif de Belledonne). Par THIERRY BARTH, EMMANUEL MALET, GEORGES-MARIE SAULNIER	111
Stratégie de suivi hydrologique spatialement distribué. Application à la compréhension des crues éclair sur les bassins versants cévenols. Par PIERRE-ALAIN AYRAL, ISABELLE BRAUD, GUILLAUME NORD, ENRIQUE GONZALEZ-SOSA, ROSARIO SPINELLI	121
Suivi en continu des températures et conductivités des eaux thermales en contexte hyper minéralisé. Salins-Les-Thermes, Savoie. Par EMMANUEL MALET, MARC DZIKOWSKI, Bernard FANGET, CAMILLE DOUBLET, DOMINIQUE GASQUET	129
Ruissellement et dissolution d'un bassin versant lapiazé des karsts de Patagonie, île Tarlton, archipel de Madre de Dios (Chili). Par STÉPHANE JAILLET, LAURENT MOREL, RICHARD MAIRE, EMMANUEL MALET, GEORGES MARBACH, DENIS MORALES, FLORIAN CHENU, FABIEN HOBLÉA, BERNARD TOURTE, tous les membres des EXPÉDITIONS ULTIMA PATAGONIA	137
La mesure autonome des hauteurs et des températures de l'eau dans les drains des systèmes karstiques. Outils de suivi et approches méthodologiques simples adaptés au milieu souterrain. Par DIDIER CAILHOL	147
Le Lurographe, développement d'un enregistreur autonome motivé par les mises en charge de la grotte de la Luire (Vercors, France). Par LAURENT MOREL, GROUPE SPÉLÉOLOGIQUE VALENTINOIS	161
Suivi à hautes résolutions spatiale et temporelle du système karstique des Fonts (Gard, France). Par PHILIPPE MARTIN, PIERRE-ALAIN AYRAL, JEAN-FRANÇOIS DIDON-LESCOT, JEAN-MARC DOMERGUE, NADINE GRARD.....	169
Instrumentation et analyse de l'érosion régressive en rivière souterraine. Le projet participatif Bilbrupt et la zone des cascades du Rupt du Puits, Lorraine, France. Par STÉPHANE JAILLET, CLAUDE HERBILLON	177
Quantifier la charge sédimentaire	189
Monitoring d'un lac de haute altitude. Le cas du lac de la Muzelle (massif des Écrins). Par LAURENT FOUINAT, EMMANUEL MALET, PIERRE SABATIER, JÉRÔME POULENARD, RICHARD BONET, CLOTILDE SAGOT, FABIEN ARNAUD	191
Mesure de la charge en suspension de torrents proglaciaires. L'exemple des torrents issus du glacier des Bossons. Par JEAN-LOUIS MUGNIER, HERVÉ GUILLON, JEAN-FRANÇOIS BUONCRISTIANI, OLIVIER ROMEYER, PASCALE BASCOU	199
Dynamique géomorphologique des torrents. Intérêt de l'emploi des appareils photographiques automatiques. Par GUILLAUME PITON, JOHAN BERTHET, CORALINE BEL, FIRMIN FONTAINE, HERVÉ BELLOT, EMMANUEL MALET, LAURENT ASTRADE, FRÉDÉRIC LIEBAULT, ALAIN RECKING, MARIE JUPPET, KRISTIAN ROYER	205
Suivi automatisé des crues à fort transport solide dans les torrents. Stratégie de mesure et potentiel des données collectées. Par FIRMIN FONTAINE, CORALINE BEL, HERVÉ BELLOT, GUILLAUME PITON, FRÉDÉRIC LIEBAULT, MARIE JUPPET, KRISTIAN ROYER	213

Monitoring du charriage avec une trappe à fente, observatoire de Draix. Par FRÉDÉRIC LIEBAULT, SÉBASTIEN KLOTZ, HUGO JANTZI, XAVIER RAVANAT	221
La mesure du charriage par acoustique passive en rivière. Par THOMAS GEAY, PIERRE OUSTRIÈRE, SÉBASTIEN ZANKER	227
Suivi du transport particulaire en contexte karstique. Méthode et application. Par MATTHIEU FOURNIER, DAVID VIENNET, NICOLAS MASSEI, JEAN-PAUL DUPONT	235
Instrumentation et caractérisation pour l'étude des dépôts sédimentaires dans les grottes. Par LAURENT MOREL, STÉPHANE JAILLET, VINCENT LIGNIER, RICHARD MAIRE	243
Monitorer d'autres milieux	249
Impacts des vagues et de la circulation d'eau sur la microfracturation des falaises rocheuses. Mise en place d'un suivi multiparamètre en Bretagne. Par PAULINE LETORTU, KATJA LAUTE, NICOLAS LE DANTEC, EMMANUEL AUGEREAU, JÉRÔME AMMANN, CHRISTOPHE PRUNIER, ALAIN HÉNAFF, LAURENCE DAVID, ADELIN MAULPOIX, VÉRONIQUE CUQ, MARION JAUD, BERNARD LE GALL, CHRISTOPHE DELACOURT	251
Mesures de vagues extrêmes le long de falaises rocheuses escarpées, île de Banneg, archipel de Molène, Bretagne. Par GUILLAUME DODET, FABIEN LECKLER, MICHEL OUTRÉ, RONAN AUTRET, FRANCE FLOC'H, NICOLAS LE DANTEC, SERGE SUANEZ	257
Mesure de la fréquentation d'itinéraires d'accès à la haute montagne dans le massif du Mont Blanc à l'aide de capteurs pyroélectriques. Par JACQUES MOUREY, LUDOVIC RAVANEL	263
Écoute sismique et acoustique du mouvement de terrain de Séchilienne (massif de Belledonne). Par AGNÈS HELMSTETTER, GAËL JANEX	271
Monitoring des régimes thermiques des sols en montagne. Expériences alpines actuelles. Par JÉRÔME POULENARD, PHILIPPE CHOLER, EMMANUEL MALET	279



Sommaire du Collection EDYTEM n°19

« Monitoring en milieux naturels - Retours d'expériences en terrains difficiles »

SUIVIS PAR GPS ET WEBCAM DE GLACIERS ROCHEUX À MOUVEMENT RAPIDE

SURVEYING RAPIDLY MOVING ROCK GLACIERS BY GPS AND WEBCAMS

REYNALD DELALOYE¹, CHRISTOPHE LAMBIEL²

¹Département de Géosciences, Géographie, Université de Fribourg, Ch. du Musée 4, CH-1700 Fribourg Suisse.

²Institut des dynamiques de la surface terrestre, Université de Lausanne, Mouline – Géopolis, CH-1015 Lausanne, Suisse.

Contact : reynald.delaloye@unifr.ch

RÉSUMÉ

Une observation se basant sur des relevés GPS et une visualisation par webcam, pouvant être complétée par d'autres approches, a été mise en œuvre depuis plusieurs années pour le suivi de glaciers rocheux à mouvement rapide pouvant présenter des risques de rupture partielle ou rechargeant rapidement en sédiments un chenal torrentiel sous-jacent. L'article décrit des aspects techniques et pratiques, mais surtout les contraintes environnementales, auxquels il y a lieu de faire face.

MOTS-CLÉS : GPS, WEBCAM, GLACIERS ROCHEUX, VALAIS.

ABSTRACT

An observation based on GPS survey and visualization by webcam, possibly completed by other approaches, has been implemented for several years for the monitoring of rapidly moving rock glaciers presenting a potential of partial collapse or quickly refilling in sediments an underlying torrential channel. The article describes technical and practical aspects, but in particular the environmental constraints which have to be faced.

KEYWORDS: GPS, WEBCAM, ROCK GLACIERS, WALLIS.

INTRODUCTION

Le rythme de déplacement des glaciers rocheux peut varier fortement d'une saison à l'autre ou rester relativement constant. Dans les cas dits de déstabilisation, des cassures apparaissent suite à la forte augmentation des vitesses. La rupture d'un volume conséquent peut être envisagée comme scénario le plus défavorable. Que ce soit pour un suivi à long terme ou dans une optique de prévention des risques, une observation récurrente, voire permanente, des mouvements de glaciers rocheux est requise. Dans les situations où les matériaux transportés par le glacier rocheux alimentent un chenal torrentiel, il est également nécessaire de pouvoir rendre compte de l'état de recharge sédimentaire de ce dernier et d'appréhender les mécanismes et modalités de remobilisation des matériaux dans le

chenal (ruissellement, déclenchement de laves torrentielles). Pour répondre à ces objectifs multiples, nous avons mis en œuvre un type d'observation qui se base sur l'utilisation unique ou combinée de relevés GPS (ou GNSS), d'un suivi continu par GPS et d'une visualisation par webcam. Le présent document relate quelques retours d'expérience dans l'utilisation de ces approches ou technologies sur différents glaciers du Valais. Il va de soi que, selon les cas et les objectifs que l'on cherche à atteindre et selon les développements technologiques du moment, d'autres types d'outils peuvent être utilisés de manière alternative ou en complément (analyses photogrammétriques sur la base d'images terrestres ou aériennes, relevés par station totale, lidar, SAR terrestre ou satellitaire, etc.).

LE RELEVÉ GPS

La mesure répétée de points marqués au sol par GPS (GNSS) différentiel permet de déterminer le champ des vecteurs de vitesse de déplacement de la surface du terrain. Les mesures sont effectuées régulièrement, en général une à plusieurs fois par année, sur un réseau pouvant comporter jusqu'à plus d'une centaine de points par glacier rocheux. Nos plus longues

séries d'observation continue ont débuté au cours de la période 2000-2001 sur les glaciers rocheux suisses des Yettes Condjà, des Becs-de-Bosson et d'Aget (Lambiel et Delaloye, 2004). La répétition des mesures année après année constitue une méthode efficace pour suivre l'évolution des vitesses des glaciers rocheux sur le long terme (PERMOS 2016).

Nos relevés s'effectuent systématiquement à l'aide de « récepteur géodésique » bi-fréquence (on disait simplement autrefois – et aujourd'hui encore – un GPS) fonctionnant en mode différentiel et en temps réel (mode RTK). Deux options principales existent. La première s'appuie sur une station de référence locale (base locale) installée pour la durée du relevé (Figure 1). La communication entre celle-ci et le ou les appareils mobiles s'effectue par radio. La seconde utilise un réseau GNSS permanent (AGNES en Suisse) et demande que le site surveillé soit intégralement couvert par le réseau de téléphonie (GSM), ce qui est très loin d'être le cas en région de montagne. La précision est meilleure en planimétrie qu'en altimétrie. Elle est en général de l'ordre du centimètre lorsque l'on utilise une base locale. Elle peut être moins bonne, allant jusqu'à plusieurs centimètres, avec l'utilisation du réseau permanent.

Si, dans les faits, l'emplacement d'une station de base n'est pas important en soi (il peut être modifié d'une campagne à l'autre), il est cependant plus aisé de l'implanter dans un endroit stable, dont on ne s'attend pas à ce que sa position absolue se modifie à long terme. L'emplacement de cette station doit être accessible, mais surtout, permettre une liaison radio avec l'intégralité du site de relevé. Afin d'éviter le transport d'un lourd trépied, on aura aussi tout avantage à installer la station de base sur un ancrage permanent (Figure 2).

Sur le terrain surveillé, les points sont marqués discrètement au burin et au spray (Figure 3). Il est indispensable de disposer de plusieurs points stables aux alentours (appelés points de calage, points de contrôle ou points fixes). On les utilisera pour ajuster entre eux si nécessaire, par translation dans les trois dimensions, les jeux de données de plusieurs campagnes de mesure. Sur le glacier rocheux ou sur la masse en mouvement, la distribution des points ne doit pas nécessairement



Figure 1 - Dans certains secteurs, trouver un emplacement stable et aisément accessible pour l'implantation d'une base locale n'est pas toujours aisé (ici, station de référence du col du Louché, glacier rocheux des Becs-de-Bosson, 46°10'20"N, 07°30'50"E).



Figure 2 - Aujourd'hui, un ancrage permanent remplace l'utilisation du trépied au col du Louché : du poids économisé, du temps gagné et de la précision grignotée.



Figure 3 - Sur le glacier rocheux des Becs-de-Bosson, un réseau de points a été défini spécifiquement pour permettre un suivi par relevé GPS été comme hiver.

Les points de mesure sont marqués au sommet de blocs dont on espère qu'ils émergent du manteau neigeux en hiver (ou ne sont pas enfouis trop profondément, le GPS nous renseignant à ce sujet), ce qui peut toutefois rendre leur accès estival quelque peu acrobatique.

répondre à des règles précises, mis à part celles de la sécurité et de l'efficacité. On évitera les parcours louvoyants, les changements d'altitude inutiles ainsi que les zones trop instables ou soumises à des chutes de pierres.

Au final, un relevé GPS permet de connaître rapidement le déplacement d'un grand nombre de points (Figure 4). Sa résolution temporelle étant faible, le recours à un suivi permanent peut être requis.

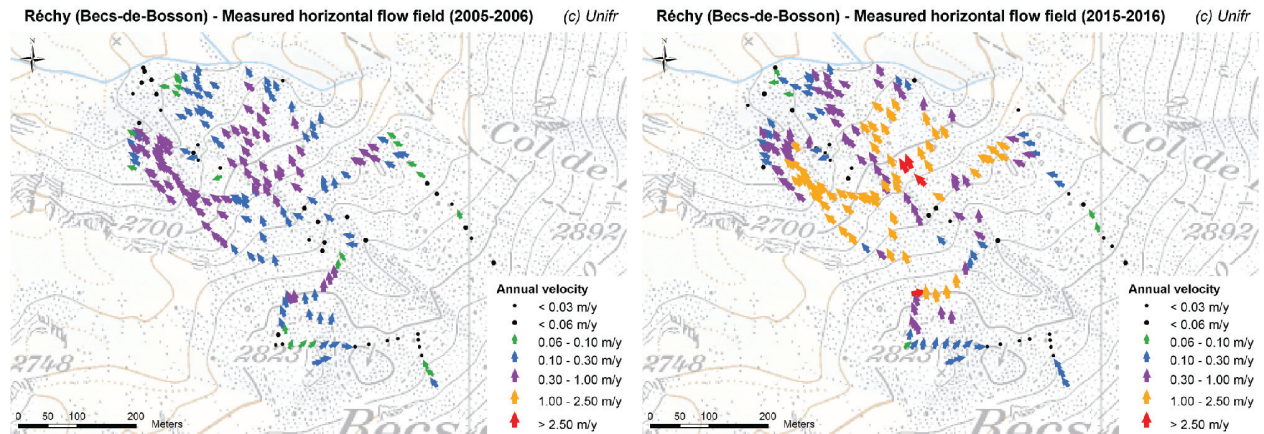


Figure 4 - Réchy/Becs-de-Bosson. Sur ce glacier rocheux, un réseau d'environ 220 points est mesuré annuellement. À deux personnes et deux GPS mobiles, le relevé complet est effectué en 5 heures, auxquelles s'ajoutent environ 2 heures de marche pour accéder au site. Le traitement des données, leur archivage et leur exploitation basique, telle qu'illustrée ici, prend environ une heure. Les deux cartes de flux superficiel présentées rendent compte de l'accélération notoire du glacier rocheux en 10 ans.

LE SUIVI PERMANENT PAR GPS

L'installation d'un « GPS permanent » (ou GPS fixe) permet un suivi continu d'un bloc. Comme pour le relevé GPS décrit plus haut, le positionnement d'un récepteur géodésique permanent s'effectue en mode différentiel et s'appuie sur le réseau permanent (base virtuelle) ou sur une base locale permanente. Les données GNSS brutes sont transmises par GPRS à un serveur. Le calcul différentiel s'effectue en post-traitement automatisé. Des filtres sont appliqués afin d'exclure les résultats à l'évidence erronés et les calculs de position sont moyennés sur une heure. Dans notre cas, la conception hardware (le GPS) et la partie software (post-traitement, filtrage, mise à disposition des données, interface web) sont assurées par Geosat SA (plateforme *glaciorisk.ch*).

Jusqu'à ce jour, nous n'avons utilisé que des récepteurs monofréquence (moins chers). En mode différentiel virtuel, la précision s'avère être de l'ordre de 1-2 cm en planimétrie, allant jusqu'à 3-5 cm en altimétrie. En mode différentiel local, la précision est infracentimétrique en planimétrie et de l'ordre du centimètre en altimétrie. Moyennant les positions calculées sur 24 heures, on obtient des valeurs dont la précision (écart-type) est de quelques millimètres tout au plus.

Le GPS fixe sera installé stratégiquement en fonction du secteur d'intérêt. Il faut garder à l'esprit que l'objectif est la mesure des mouvements du glacier rocheux et non pas de ceux du bloc se déplaçant sur le glacier rocheux. Il faudra donc veiller à trouver un bloc suffisamment grand, afin de minimiser les risques de mouvement individuel du bloc (Figure 5).

Les autres contraintes sont classiques : être hors d'atteinte des avalanches et d'éventuelles chutes de pierres (y compris en provenance des parties supérieures du glacier rocheux). Les abords d'une piste de ski sont à éviter et la communication GPRS doit pouvoir s'opérer (sinon il faudra passer par l'installation d'un relais).

Ce que l'on représente en général sont les vitesses, une grandeur dérivée des mesures de positions (Figure 6). La principale difficulté est d'estimer tout d'abord à partir de quel intervalle de temps les variations de vitesses observées sont significatives (voir par exemple Wirz et al., 2015) et ensuite ce qu'elles représentent (comment par exemple distinguer le mouvement du glacier rocheux de celui de la couche active et de celui du bloc sur lequel est installé le GPS). La tendance est grande à sur-interpréter les (petites) variations de vitesses.

LA VISUALISATION PAR WEBCAM

L'utilisation d'une webcam permet un suivi visuel et continu d'une zone entière, certes non quantitatif. Elle permet notamment d'appréhender les mécanismes d'érosion tels que chutes de pierres et déclenchement de laves torrentielles (Kummert et al., 2017) (Figure 7).

Dans le cas des glaciers rocheux à mouvement rapide, la visualisation au front de l'horizon de cisaillement a été un résultat inattendu (Figure 8).

Nos sites sont équipés d'une ou deux webcams Mobotix (M12, M15 ou M24), fournies par la firme

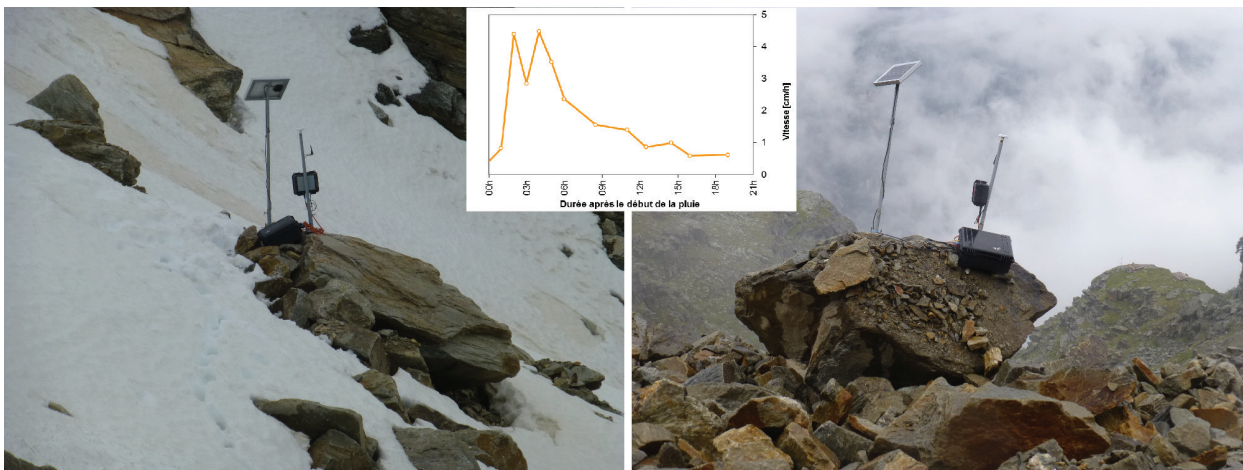


Figure 5 - À gauche : En mai 2014, le GPS est réinstallé une cinquantaine de mètres à l'amont sur un des seuls blocs apparents. À droite : Ce ne fut manifestement pas le meilleur choix pour suivre le mouvement du glacier rocheux (mais y en avait-il d'autre ?). Par contre, il a été possible de mesurer le déplacement de ce bloc lors d'un évènement de précipitation d'environ 20 mm en 3-4 heures : le bloc s'est déplacé de près de 30 cm en une nuit. Cette accélération n'a rien à voir avec le mouvement du glacier rocheux, mais sur la base des images webcam disponibles, on constate qu'il s'agit d'une combinaison entre le mouvement isolé du bloc lui-même et, dans ce secteur raide, de celui d'une partie de la couche active du glacier rocheux, à savoir les quelques mètres de débris non gelés qui reposent sur le permafrost.



Figure 6 - Réchy/Beccs-de-Bosson. Trois GPS sont installés sur ce glacier rocheux dans un axe amont-aval (GPS 1-4-3), la distance GPS 1-4 étant de 23 m et GPS 4-3 de 43 m. Ce secteur a été identifié sur le réseau de points GPS comme ayant un comportement particulièrement hétérogène. L'utilisation conjointe de ces trois GPS rapprochés a pour but de mettre en évidence les similitudes et différences du comportement intra-annuel de cette partie du glacier rocheux afin d'en comprendre sa dynamique. Une base locale est utilisée depuis novembre 2016. En haut : Le GPS n°3 fraîchement installé. En bas : au milieu du glacier rocheux, les 23 m séparant encore le GPS n°1 à gauche du GPS n°4 à droite. Le GPS n°1 se déplace approximativement deux fois plus vite que le n°4.

ID electronic SA. Chaque webcam fonctionne de manière autonome sur une batterie alimentée par un panneau solaire. Si les webcams installées jusqu'ici ont une résolution de 3 Mega pixels (2048 x 1536), les nouveaux modèles de Mobotix offrent désormais une résolution de 6 Mega Pixels (3072 x 2048). Certaines de nos webcams ont deux objectifs simultanés, qui permettent la prise de vue d'un plan large et d'un plan rapproché. L'intervalle de prises de vues peut être programmé à distance. Pour les glaciers rocheux rapides, il est généralement d'une heure, et est occasionnellement ramené à 15 minutes durant les périodes de forte activité (par exemple en période de fonte de neige). Les images sont envoyées via une connexion GPRS à un

serveur, où les données sont stockées. À noter que ces webcams ne peuvent pas enregistrer de films.

Les challenges sont nombreux. Ils sont tout d'abord d'ordre technique. Le panneau solaire doit être de grande taille (1230 x 595 x 28 mm, poids 10 kg), ce qui implique une batterie lourde (22 kg), afin de permettre un fonctionnement de la caméra durant toute une journée et durant les périodes sans soleil. À noter que plus le panneau solaire est grand, plus la prise au vent augmente, ce qui peut mettre en danger l'installation par situation météorologique défavorable.

Dans les environnements raides, trouver la meilleure position pour l'installation de la caméra peut être difficile. L'emplacement doit avoir une connexion GPRS



Figure 7 - Gugla-Bielzug – 13-17.06.2013. Cette webcam a été installée le 13 juin 2013. Le glacier rocheux a fortement accéléré depuis quelques années et le stock de sédiment disponible dans le chenal torrentiel est important. La fonte des neiges est tardive cette année-là, et elle s'annonce intense. Des laves torrentielles sont attendues. La première image est enregistrée le 13 juin à 18h (gauche). Le premier déclenchement d'une petite lave torrentielle a lieu à peine 2h plus tard (centre). D'autres vont suivre tous les soirs durant une semaine. La plus grosse activité a lieu le 17 juin (droite). Au moment de la prise d'image (21h), deux laves torrentielles ont déjà atteint le fond de la vallée, nécessitant l'évacuation partielle d'un village et la fermeture des voies d'accès à la haute vallée de Zermatt. Deux autres laves vont encore suivre en première partie de nuit.

Figure 8 - Tsarmine (Val d'Arolla, 46°02'47"N, 07°30'20"E). En haut : Photo prise le 06.01.2017 après une longue période sans nouvelle chute de neige. À une vingtaine de mètres sous la ligne de front en rive gauche du glacier rocheux (à droite sur l'image) apparaît l'horizon de cisaillement (base mouvante). Le glacier rocheux avance d'environ 2,5 cm/jour. Il n'y a pas de chutes de pierre en hiver. En bas : Photo prise le 29.06.2016. Il s'agit de la période la plus active de l'année en termes d'érosion du front. Le matériel qui s'est avancé en porte-à-faux durant l'hiver dégèle et s'effondre progressivement. Beaucoup d'eau de fonte de neige circule soit au-dessus du niveau gelé (couche active), soit en profondeur au contact avec la roche en place, ou parfois à l'intérieur même du glacier rocheux. L'horizon de cisaillement que l'on décelait en hiver, n'est désormais plus visible.



suffisamment bonne pour que les images puissent être envoyées au serveur régulièrement et avec succès et le panneau solaire doit recevoir assez de soleil pour que la batterie soit bien chargée. L'emplacement doit évidemment être à l'abri des chutes de pierres et des avalanches. Au vu de la résolution relativement basse de ce type d'appareil, la caméra ne doit pas être située trop loin du front du glacier rocheux, afin de permettre la détection de phénomènes d'érosion. Du fait de la difficulté de trouver des positions à partir desquelles tant le front du glacier rocheux que la pente de débris à l'aval puissent être observés de manière satisfaisante, deux webcams doivent parfois être installées.

Des problèmes liés à l'électricité statique lors d'un orage ou même lors du simple passage d'un front froid peuvent survenir. Pour limiter ces problèmes il faut

éviter les installations sur les crêtes de systèmes à composantes électriques disposés sur plusieurs appareils (p. ex, caméra sur le côté d'un bloc et panneau solaire de l'autre côté) et rassembler impérativement le tout sur un seul mât, même si cela peut paraître surprenant si l'on cherche à éviter d'attirer la foudre. Une bonne mise à terre complètera idéalement l'installation. Lorsque les éléments de l'installation sont dispersés, les tensions électriques générées par l'atmosphère sont telles que les court-circuits sont inévitables. Pour exemple, au moins 5 interventions ont dû être effectuées en une année au Grabengufér en 2011 ! Plus aucune – pour raison électrique – depuis que tout est installé sur un mât.

L'utilisation de l'image s'est, par ailleurs, révélée un formidable outil de communication.

CONCLUSION

Les différents retours d'expérience présentés ici montrent les avantages de combiner différentes méthodes ou techniques de mesure pour le suivi des glaciers rocheux à mouvement rapide (Figure 9). En particulier, l'installation de GPS fixes et de webcams permet un suivi temporel à haute résolution des mécanismes de transfert sédimentaire. Pour cela il est toutefois indispensable de disposer de matériel

robuste adapté aux conditions de la haute montagne. Le choix des emplacements et l'installation en elle-même s'avèrent également très importants. Malgré cela, des défaillances techniques ou des perturbations de l'installation par des agents extérieurs surviennent inévitablement tôt ou tard, ce qui peut impliquer occasionnellement une intervention de maintenance ou de réparation.

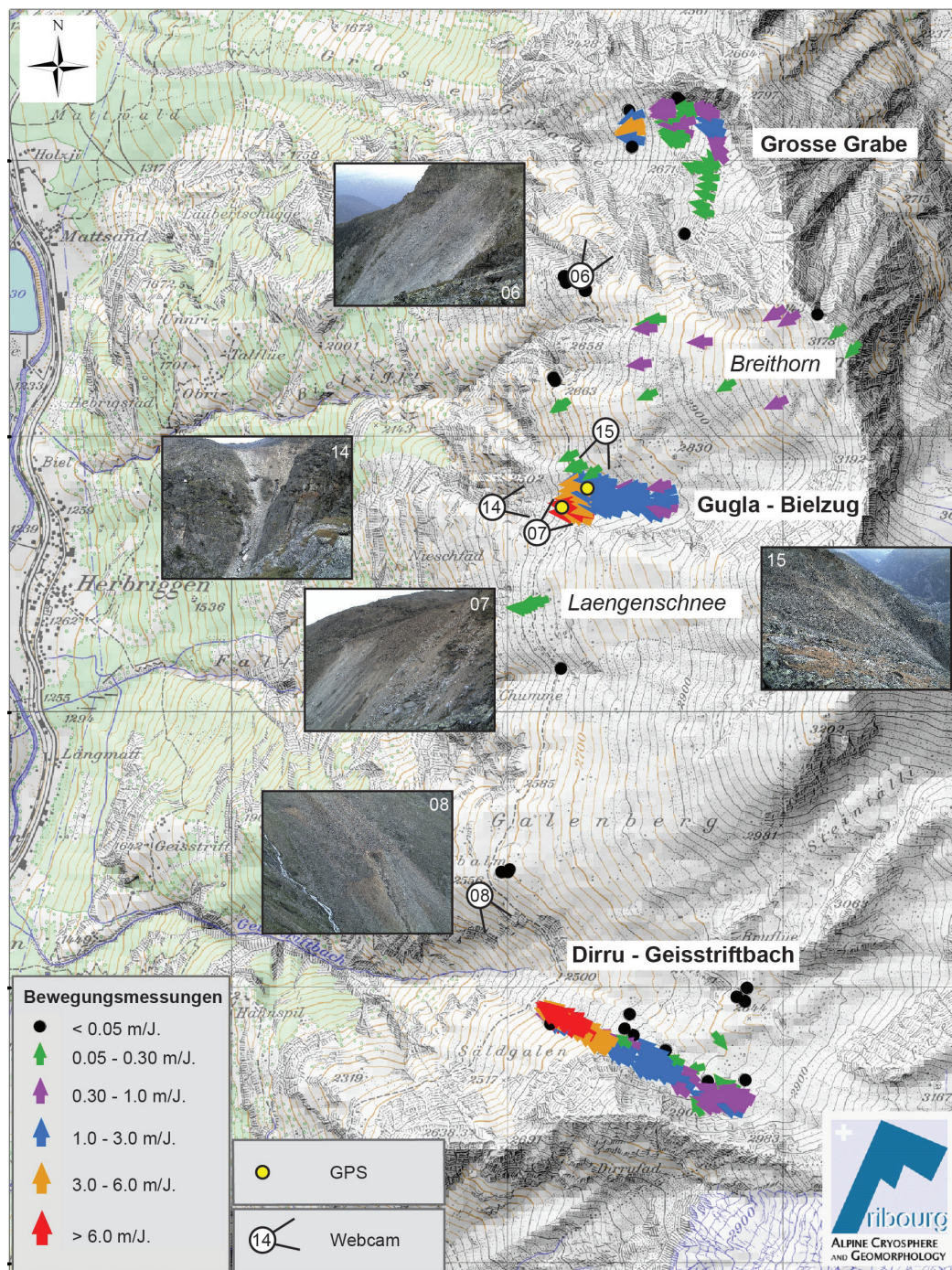


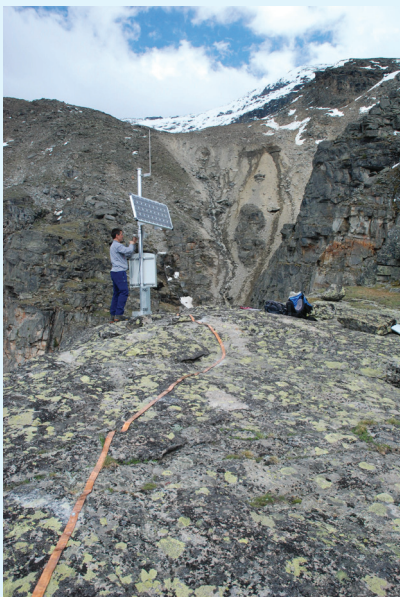
Figure 9 - Vue d'ensemble des suivis effectués en 2013 sur le territoire de la commune de St-Niklaus (vallée de Zermatt) : relevés GPS annuels ou bi-annuels avec indication des vitesses en m/an (m/a), emplacements des GPS permanents et webcams.



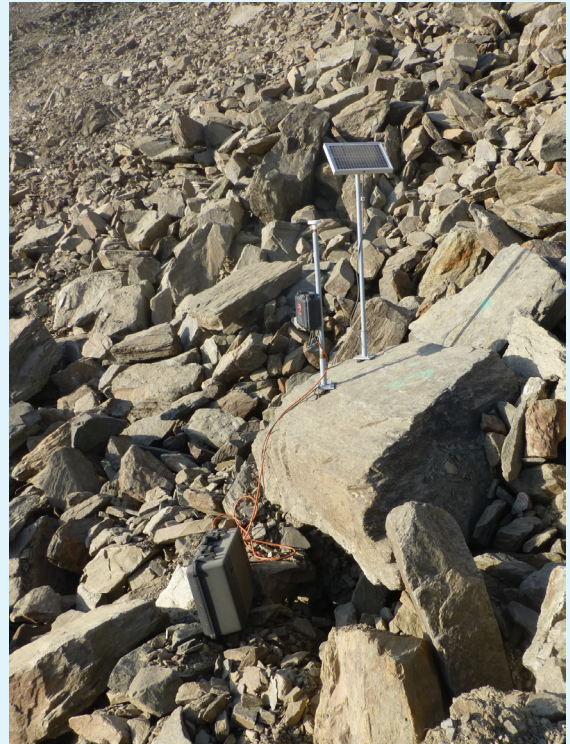
Glacier rocheux de Jegi (vallée de Saas) : un GPS fixe se compose, sur la partie supérieure du mât, des deux antennes GNSS (monofréquence) et GPRS, de panneaux solaires suffisamment grands afin de permettre un fonctionnement continu 24/24h du système, d'un coffre contenant batterie, régulateur de charge, modem, système GNSS. Le déplacement est ici de 1 à 2 cm par jour selon la période de l'année.



Une webcam installée sur mât : paratonnerre, panneau solaire, caméra, antenne GPRS, armoire comprenant batterie, régulateur de charge, processeur, routeur et modem,...



... sans oublier une bonne mise à la terre.



Le challenge sur un glacier rocheux peut être de trouver un bloc sur lequel installer un GPS fixe. Dans le cas de l'installation illustrée (Gugla-Bielzug, vallée de Zermatt), le choix s'est avéré judicieux. Le GPS (et le bloc) ont parcouru une distance de 32,5 m entre son installation en novembre 2011 et son retrait en mai 2014, sans perturbation notable.



Un autre orage, une autre caméra (Grabengufser, vallée de Zermatt, 2800 m) : un vol plané de 10 m, un atterrissage dans les blocs, aucun dégât ! Par contre une fois l'installation remontée, brouillard ! Le réglage de la caméra est impossible. Il faudra revenir deux jours plus tard, et l'on profitera de la ballade (1500 m de dénivellation) pour haubaner solidement le mât. Depuis lors, ça tient !



Remerciements

Nos remerciements s'adressent en particulier au Service des Forêts du Canton du Valais, section dangers naturels, ainsi qu'aux communes d'Evolène, Randa et St. Niklaus pour leur soutien au cours des années, aux entreprises Geosat SA à Sion et ID electronic SA à Massongex pour la gestion de toutes les questions techniques liées aux installations permanentes, à Air-Glacières et Air-Zermatt pour les fréquents héliportages, sans oublier à tous les étudiants/-es et collaborateurs/-trices des Universités de Fribourg et Lausanne qui ont occasionnellement ou régulièrement contribué à la réussite de ce projet.

BIBLIOGRAPHIE

- KUMMERT M., DELALOYE R., BRAILLARD L., 2017. Erosion and sediment transfer processes at the front of rapidly moving rock glaciers: systematic observations with automatic cameras in the western Swiss Alps. *Permafrost and periglacial processes* (in press).
- LAMBIEL C., DELALOYE R., 2004. Contribution of RTK GPS in the study of creeping mountain permafrost : Examples from the Western Swiss Alps. *Permafrost and periglacial processes*, 15, 229-241.
- PERMOS 2016. Permafrost in Switzerland 2010/2011 to 2013/2014. In Noetzli J., Luethi R., Staub B. eds, Glaciological Report (Permafrost), N° 12-15 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences, 85 pp.
- WIRZ V., MARTEN GEERTSEMA M., GRUBER S., PURVES R., 2016. Temporal variability of diverse mountain permafrost slope movements derived from multi-year daily GPS data, Mattertal, Switzerland. *Landslides*, 13: 67-83.