



L'apport d'appareils photo reflex autonomes pour le suivi quasi-continu de la dynamique des glaciers rocheux. Exemple dans les Alpes et dans les Andes.

Xavier Bodin, Emmanuel Malet, Flavien Vernier, Guilhem Marsy, H  la Hadhri, Dario Trombotto

► To cite this version:

Xavier Bodin, Emmanuel Malet, Flavien Vernier, Guilhem Marsy, H  la Hadhri, et al.. L'apport d'appareils photo reflex autonomes pour le suivi quasi-continu de la dynamique des glaciers rocheux. Exemple dans les Alpes et dans les Andes.. Emmanuel Malet; Laurent Astrade. Monitoring en milieu naturel : retours d'expériences en terrains difficiles., 19, Collection EDYTEM, pp. 47-54, 2017, 978-2-918435-11-2. hal-02071517

HAL Id: hal-02071517

<https://sde.hal.science/hal-02071517>

Submitted on 8 Jan 2021

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

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

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

THE CONTRIBUTION OF AUTONOMOUS CAMERAS FOR MONITORING ROCK GLACIERS DYNAMICS CASE STUDIES IN THE ALPS AND THE ANDES

XAVIER BODIN¹, EMANNUEL MALET¹, FLAVIEN VERNIER², GUILHEM MARSY²,
HÉLA HADHRI², DARIO TROMBOTTO³

¹EDYTEM, Université Savoie Mont-Blanc, UMR 5204 CNRS, Pôle Montagne, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex.

²LISTIC, Université Savoie Mont-Blanc, Polytech Annecy-Chambéry, 5 chemin de Bellevue, 74944 Annecy.

³IANIGLA, CCT CONICET, Av. Ruiz Leal s/n Parque General San Martín, Mendoza, Argentine.

Contact : Xavier.bodin@univ-smb.fr

RÉSUMÉ

Enchassés au creux de nombreux hauts vallons de montagne, les glaciers rocheux sont des formes indicatrices de la présence d'un permafrost riche en glace se déformant de façon lente et continue le long des versants. Les déplacements de surface sont en général mesurés par la répétition de levés de blocs marqués par GPS différentiel, avec une précision élevée (de l'ordre du cm) sur une sélection de quelques dizaines de point, et à un pas de temps annuel ou de quelques mois, ou par photogrammétrie aérienne, permettant alors une couverture spatiale complète de la forme selon une discrétisation (taille de pixel) dépendante du système optique utilisé, mais avec une répétition qui n'est souvent au mieux que de plusieurs années. Les vitesses d'écoulement des glaciers rocheux sont typiquement de l'ordre du mètre par an, mais de fortes fluctuations sont observées, à la fois dans le temps et dans l'espace. Afin d'apporter des éléments de compréhension nouveaux sur la variabilité spatiale et temporelle de la cinématique de surface des glaciers rocheux, nous avons développé un système de suivi (dimension temporelle) optique à haute résolution (dimension spatiale) par photogrammétrie time-lapse. Le dispositif a été installé sur deux sites, l'un dans les Andes d'Argentine (suivi par système monoscopique : avec un seul appareil photo), et l'autre dans les Alpes françaises (suivi stéréoscopique : avec deux appareils photo). Nous présentons ici une synthèse descriptive des installations ainsi qu'une analyse préliminaire de l'apport de ce système pour l'étude de mouvements lents.

MOTS-CLÉS : GLACIER ROCHEUX, PERMAFROST, SUIVI DES DÉPLACEMENTS DE SURFACE, PHOTOGRAMMÉTRIE TIME-LAPSE.

ABSTRACT

Embedded in high altitude mountain valleys, rock glaciers are indicative of ice-rich permafrost that slowly but rather constantly deforms along slopes. Surface displacements are generally measured every year, or every few months, by repeated GPS surveys of marked blocks, with a centimetric precision, or by aerial photogrammetry, allowing a complete spatial coverage but with a coarser precision and a wider temporal window. In order to bring new insights into the spatial and temporal variability of rock glaciers surface kinematics, we developed a monitoring system using time-lapse high resolution optical cameras. The device was installed on two sites, one in the Argentinian Andes (monoscopic system) and one in the French Alps (stereoscopic system). We present here a description of the installations and a preliminary analysis of the contribution of such system for studying slow slope movements.

KEYWORDS: ROCK GLACIER KINEMATICS, PERMAFROST, SURFACE DISPLACEMENT MONITORING, TIME-LAPSE PHOTOGRAMMETRY.

LES SITES

Le glacier rocheux de Laurichard (Alpes françaises)

Situé à une heure de marche du col du Lautaret (Hautes Alpes, 45°N - 6,4°E), accessible toute l'année, le glacier rocheux de Laurichard (Figure 1.2) fait l'objet d'une attention constante de la part des géomorphologues depuis plusieurs décennies. B. Francou avait ainsi initié à la fin des années 1970 un programme de suivi géodésique de plusieurs lignes de blocs marqués sur le glacier rocheux. Ces mesures annuelles se poursuivent toujours aujourd'hui (effectuées par le Parc national des Écrins), et ont révélé une évolution des déformations probablement fortement contrôlées par le climat, et notamment les températures de l'air en début d'hiver (Bodin *et al.*, 2009).

La morphologie du glacier rocheux est relativement simple et classique, avec des rides de compres-

sion ainsi que des talus latéro-frontaux bien marqués. D'une longueur de 600 m pour une largeur moyenne de 100 m, la totalité de la forme est observable dès lors que l'on s'élève un peu sur le versant adret qui lui fait face. Le glacier rocheux est composé en surface de blocs grossiers, pluri-décimétriques, sans ou avec très peu de matrice fine.

Les vitesses moyennes de déplacement varient entre 25 cm/an aux racines et au front et plus d'un mètre par an dans la partie médiane, plus raide. Une particularité, révélée par le suivi LiDAR (Bodin *et al.*, 2008), est le fait que la morphologie du glacier rocheux ne rend pas complètement compte des mouvements qui l'affectent : en effet, la langue terminale connaît de forts mouvements la déviant sur sa droite.

Le glacier rocheux de Quebrada del Medio (Andes d'Argentine)

Également localisé à une distance raisonnable d'une voie d'accès (2h de route de Mendoza, puis 2h de marche), le glacier rocheux de Quebrada del Medio (Figure 1.1) est un complexe de formes glaciaires et périglaciaires, typique des Andes centrales semi-arides. Long de plus de 4 km, le complexe prend racine vers 4 500 m d'altitude, où se mélangent glacier

et glacier couvert, puis évolue à partir de 4 000 m en un véritable glacier rocheux. Les 700 derniers mètres du glacier rocheux forment une langue de 200 mètres de large, présentant des bourrelets et des sillons arqués caractéristiques du fluage du permafrost riche en glace. Un talus latéral et frontal relativement haut enserrme la langue, avec des signes d'activité forte prin-

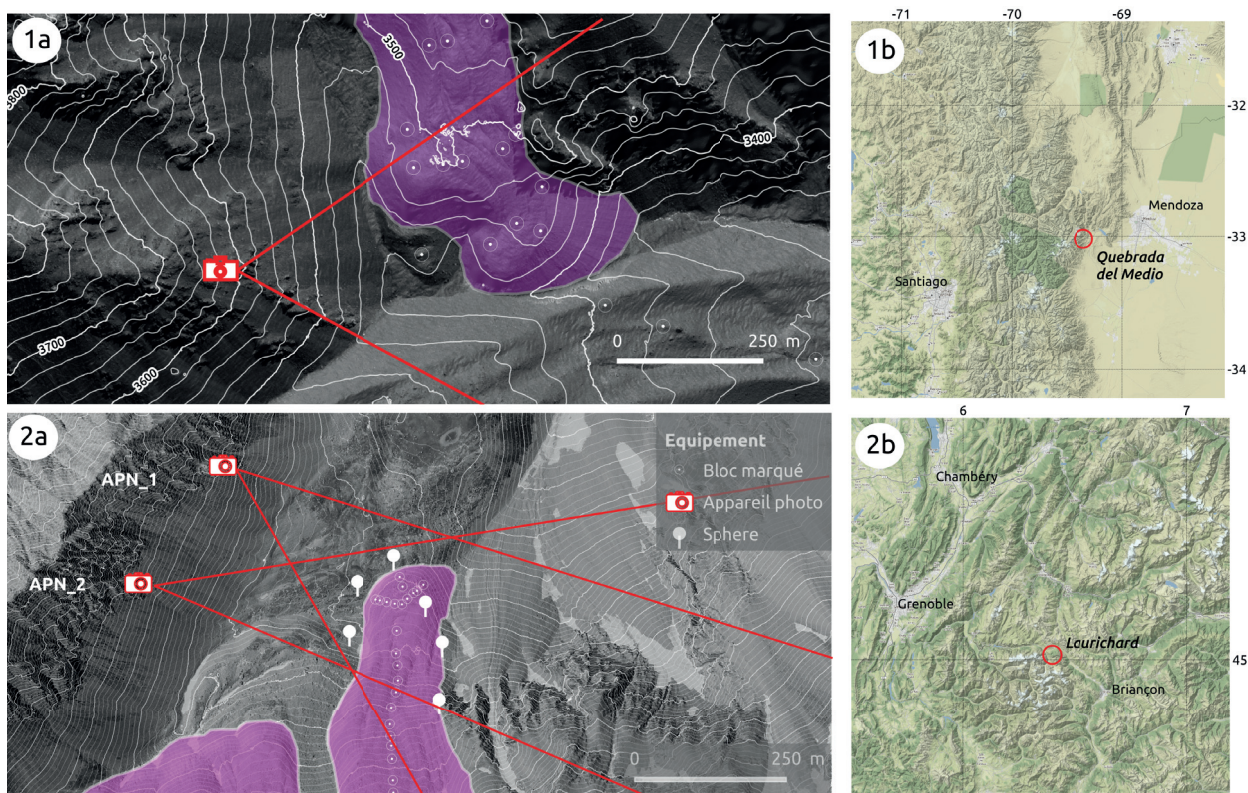


Figure 1 - Implantation des dispositifs de suivi photogrammétrique dans les deux sites d'étude. 1) Glacier rocheux de Quebrada del Medio, en Argentine. 2) Glacier rocheux de Laurichard, dans les Hautes Alpes. Les inserts 1b et 2b fournissent la localisation des sites.

cipalement localisés sur le front terminal, vers 3 400 m d'altitude. La granulométrie de la forme combine des matériaux grossiers et une matrice plus fine, avec des variations spatiales assez importantes.

Outre son inclusion dans l'inventaire national des glaciers et des milieux périglaciaires d'Argen-

tine (IANIGLA-ING, 2015), le glacier rocheux de Quebrada del Medio fait l'objet d'études depuis 2013, notamment pour la détermination de sa dynamique de surface (Bodin *et al.*, 2015) et pour la compréhension de son fonctionnement hydrogéologique (Sileo *et al.*, non publié).

LE DÉFI INSTRUMENTAL

Adéquation du dispositif aux objectifs scientifiques et aux contraintes

Pour les deux sites d'étude, l'objectif scientifique est similaire : déterminer les champs de déplacement à la surface du glacier rocheux, sur un pas de temps court, idéalement quelques jours. Il s'agit de dépasser les contraintes des données de mouvement généralement acquises sur les glaciers rocheux, réduites à quelques points (GPS) sur la forme et/ou à des fréquences de répétition de plusieurs mois (photographies aériennes).

Étant donnée l'ampleur relativement faible des mouvements (de l'ordre du m/a), la taille des objets étudiés (quelques ha) et la variabilité spatiale (quelques mètres) et temporelle (probablement quelques jours, voire moins) des phénomènes, un système d'acquisition terrestre (depuis un versant) d'images optiques s'avère le plus adapté.

Les principaux défis techniques résident dans : (i) l'autonomisation du dispositif, afin de le rendre opérationnel sur des périodes longues (typiquement plusieurs mois entre deux visites), (ii) l'automatisation d'appareils photo reflex commerciaux, conditionnés ici pour pouvoir résister aux conditions environnementales difficiles (froid, humidité, neige, vent, rayonnement...) et (iii) l'adaptation de la sensibilité (au sens métrologique du terme) du capteur aux caractéristiques des variables que l'on souhaite mesurer (déplacement de surface, vitesses, déformation...).

Concernant les conditions environnementales, les deux sites équipés connaissent un climat et des dynamiques environnementales similaires, bien que très éloignés géographiquement. De fait, ils se situent tous deux dans un milieu favorable à la présence d'un permafrost riche en glace, avec des températures moyennes annuelles de l'air aux alentours de 0°C. L'enneigement est plus faible au glacier rocheux Quebrada del Medio, avec un cumul de précipitations annuelles inférieur à 400 mm, alors qu'il atteint plus du double à Laurichard. L'altitude est également plus élevée sur le site argentin, de 1 000 m environ, la latitude est aussi différente (10° plus proche de l'équateur), ce qui se traduit par une insolation plus forte sur l'année.

La conception des deux dispositifs s'est faite en tenant compte de ces caractéristiques environnementales, mais également de certaines contraintes logistiques. L'éloignement du site argentin impliquait un envoi par avion du matériel et, par conséquent, un poids général réduit : pour cela un boîtier en résine, étanche et de taille plus réduite (env. 25 x 25 x 25 cm) que celui de Laurichard a été employé, entraînant une batterie (7 Ah contre 12 Ah) et un système électronique (carte Heelsee contre station Campbell) également moins volumineux. Des panneaux solaires de 5 W ont été utilisés.

Description des dispositifs et de leur implantation

Avec des vitesses similaires pour les deux glaciers rocheux, le choix des appareils photo s'est fait en fonction de la distance moyenne entre le terrain et le lieu d'implantation du dispositif. La configuration topographique des sites et l'agencement en leur sein des glaciers rocheux, évalués au travers d'outils SIG, ont permis d'identifier plusieurs lieux d'implantation adéquats (Figure 2, pour Laurichard). Une visite préliminaire sur le terrain (11 juin 2013 pour Laurichard, 29 avril 2014 pour Quebrada del Medio) a ensuite été nécessaire pour sélectionner le lieu final, notamment en fonction de la solidité, de la massivité et de l'orientation (pour le champs de vision de l'appareil photo mais également pour l'efficacité des panneaux solaires) des éperons rocheux sur lesquels les dispositifs ont été implantés (Figure 1).

Une fois le site déterminé, le choix de l'appareil photo s'est ensuite fait de façon à ce que le système optique

(capteur CCD + objectif) offre la sensibilité la plus fine possible. La taille du pixel au sol est ici l'élément déterminant : les appareils photo reflex disponibles sur le marché (en 2013) permettent, pour une distance appareil-terrain de 500 m, d'obtenir un pixel sol de 8 à 12 cm pour une focale de 24 mm, de 4 à 7 cm pour une focale de 50 mm, et de 2 à 4 cm pour une focale de 85 mm. La qualité (distorsion, précision, qualité du pixel) de la restitution numérique – c'est-à-dire de la photo – des détails imagés par les pixels, déterminée à la fois par la qualité du capteur CCD et de l'objectif, est également un critère important, qui a été vérifié par des tests préliminaires. Au final, deux Nikon D800 équipés d'objectifs à focal fixe de 85 mm (f/1,8) pour Laurichard, et un Nikon D7100 équipé d'un objectif de 24 mm (en équivalent 35 mm, ouverture f/2,8) pour Quebrada ont été utilisés, produisant des images respectivement de 7 360 x 4 912 pixels et 6 000 x 4 000 pixels.

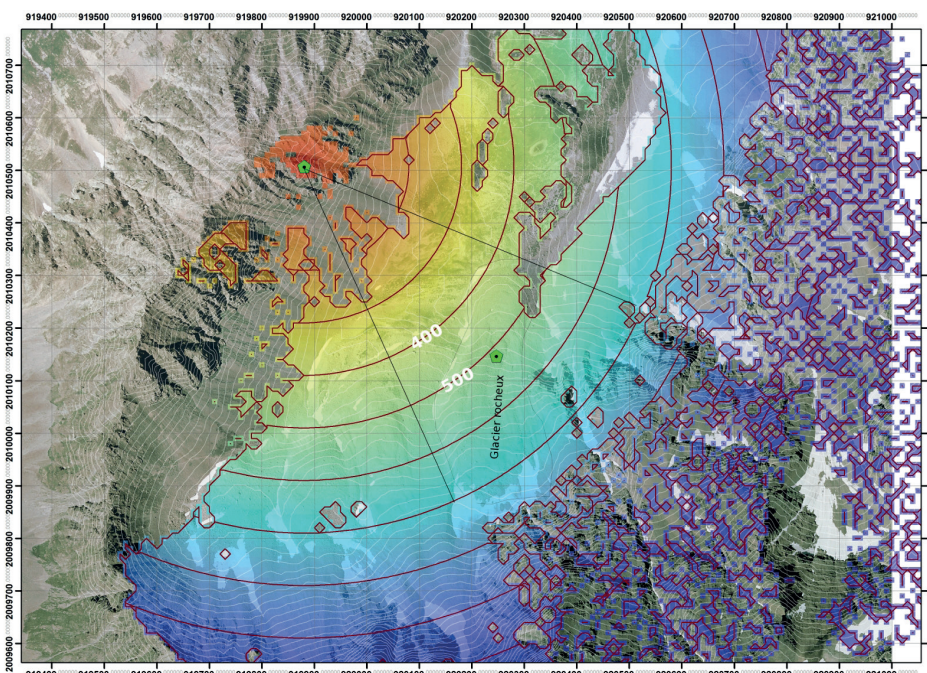


Figure 2 - Cartographie de la distance entre le site potentiel d'implantation du premier appareil photo à Laurichard et le terrain (module Terrain visibility, SAGA GIS) ayant permis de choisir le site d'implantation.

Installation et maintenance

Le premier dispositif installé est celui visant le glacier rocheux de Laurichard depuis le versant est de la Pyramide de Laurichard (Figure 3a). Deux missions ont été nécessaires pour mettre en place les deux appareils photo, l'ensemble du système étant opérationnel depuis juillet 2016. Les boîtiers ont été scellés sur deux éperons rocheux, dont l'accès exige d'employer des cordes. Une attention particulière a été apportée

à rendre le dispositif le plus discret dans le paysage. L'installation a par ailleurs nécessité d'obtenir une autorisation préfectorale, car se situant dans l'emprise d'une réserve naturelle gérée par le Parc national des Écrins.

L'installation de l'appareil photo sur le site de Quebrada del Medio (Figure 3b) s'est faite au cours d'une mission de deux jours (décembre 2014), selon une procédure similaire. Désinstallé en mars 2016, le dispositif n'a malheureusement fonctionné que quelques jours pour des raisons qui n'ont, pour l'heure, pu être précisément déterminées. L'installation pourrait être assez facilement reconduite, les supports du boîtier (spits) ainsi que le panneau solaire étant toujours en place, mais les conditions n'ont pour le moment pas été réunies pour cela.

Les images sont acquises toutes les 1 à 2 h en présence de lumière solaire (première prise de vue à 6h), toute l'année (certaines images de début et fin de journée en hiver sont donc faites de nuit). La récupération des données nécessite de se rendre sur le site pour décharger la carte mémoire SD, tous les 3 à 6 mois selon les configurations d'acquisition.

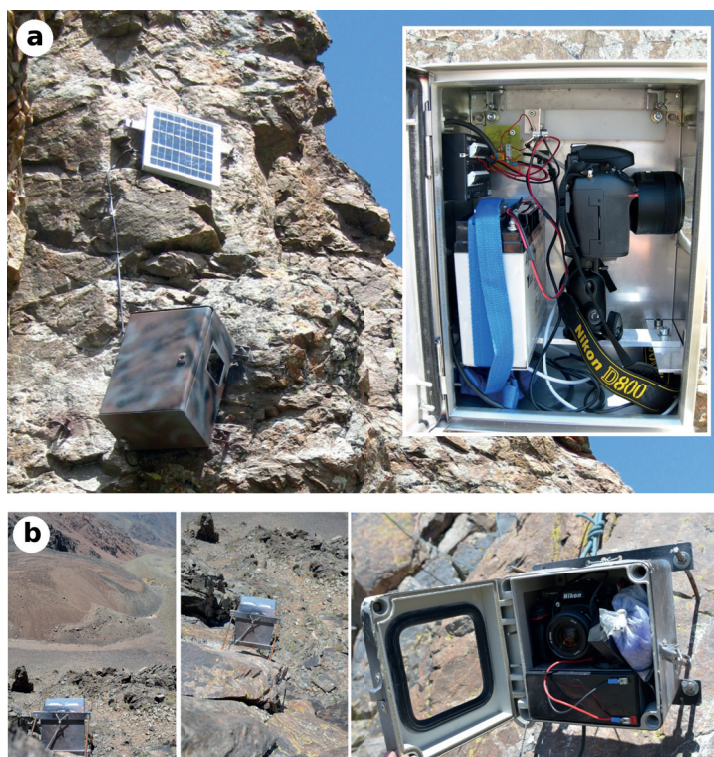


Figure 3 - Aperçu de l'implantation des dispositifs, a) sur le site de Laurichard, versant est de la Pyramide de Laurichard, b) sur le site de Quebrada del Medio.

Premiers résultats et retour d'expérience

Étant donné la panne du dispositif à Quebrada, nous nous basons ici uniquement sur l'expérience menée à Laurichard. Tout d'abord, un travail de recalage entre les images d'un même appareil (Figure 4b) a révélé que des erreurs non-linéaires, dépassant parfois plusieurs pixels, étaient présentes, causées principalement par la dilatation/contraction des différents éléments du dispositif (Marsy, 2016). Une fois le recalage effectué et l'erreur résiduelle évaluée, il est alors possible de calculer les champs de déplacement (Figure 5) et, grâce aux points de contrôle présents au sol (sphères fixées sur des blocs, référencées par GPS centimétrique), de passer des déplacements en pixels aux déplacements métriques, tout en géoréférençant les données (Figure 4b) en utilisant un modèle numérique d'altitude fait par LiDAR aérien, d'une résolution de 50 cm.

Des développements informatiques sont en cours pour automatiser les procédures de tri des images, de

recalage, de corrélation et de calcul de modèles 3D à partir des couples de photos recalées.

Au final, les expériences menées sur les deux sites d'étude ont permis de révéler plusieurs aspects importants pour l'implémentation de notre méthode de suivi automatique par photogrammétrie des vitesses d'un glacier rocheux :

- la configuration topographique du site est fondamentale dans le choix de l'équipement, et sur le volet optique notamment ;

- la difficulté à mesurer les vitesses relativement faibles de l'objet d'étude est techniquement compensée par l'apparence de sa surface sur les photos (sa texture, en l'occurrence des blocs grossiers), qui facilite la corrélation d'images, à l'échelle sub-pixelique ;

- les mouvements liés à la dilatation/rétraction des différentes parties du dispositif (boîtier, objectif...), en fonction de la température et de l'ensoleillement notam-

ment, induisent un bruit difficile à caractériser et qui peut parfois gêner les calculs de déplacement ;

- le rajout au dispositif d'une fonction de transfert (par radio, GPRS, téléphonie mobile...) de données sur le fonctionnement de l'équipement permettrait de suivre l'état du dispositif et d'éviter des ruptures de fonctionnement trop longues, liées en particulier aux complications d'accès, en hiver notamment.

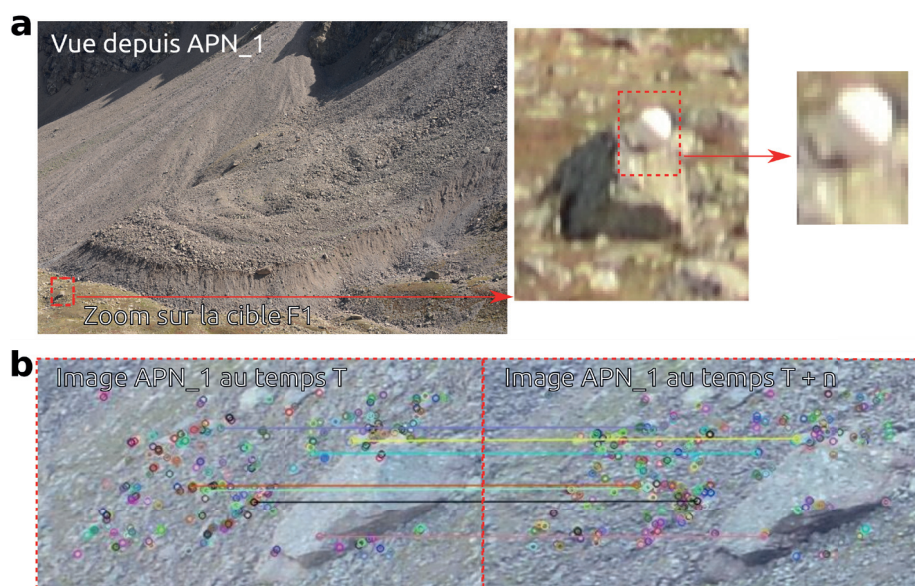
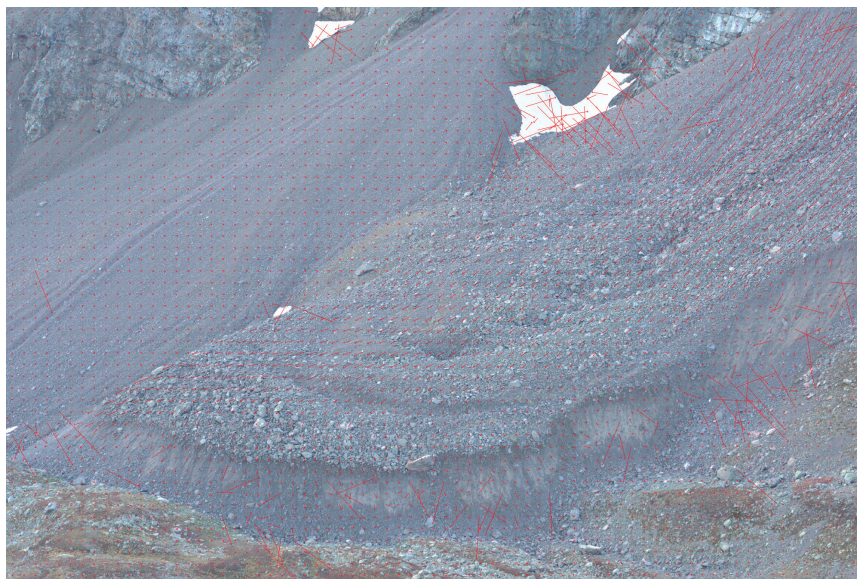


Figure 4 (en haut) - a) Visibilité des sphères (35 cm de diamètre) servant au géoréférencement à différents niveaux de zoom dans l'image initiale (à droite). b) Illustration de l'algorithme de détection de points homologues entre deux images successives afin de déterminer le recalage limitant le bougé lié à la dilatation/rétraction thermique des pièces du dispositif.

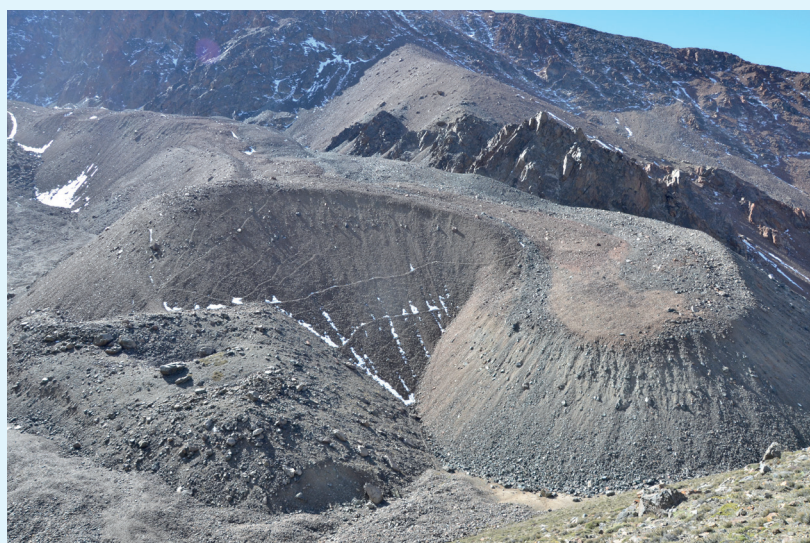
Figure 5 - Vecteurs déplacements (en pixel) obtenus à partir de la corrélation de deux images séparées de 10 jours, prises l'appareil APN_1 du glacier rocheux de Laurichard.





Vue automnale du glacier rocheux de Laurichard. L'enneigement donne une idée à la fois des contrastes entre ubac et adret et de la variabilité micro-climatique.

Vue de face du glacier rocheux de Quebrada del Medio. Le talus frontal du glacier rocheux, haut (environ 30 m), raide et très raviné, contraste avec les rebords latéraux, indiquant des niveaux d'activité (mouvement) variable selon les différentes parties du glacier rocheux.



Installation des appareils photo sur le site de Quebrada del Medio (en haut), et sur celui de Laurichard (en bas).

Aperçu de l'accès hivernal aux appareils photo, sur la Pyramide de Laurichard, 600 m de dénivellée depuis le col du Lautaret.



Mesure par GPS de la position d'une sphère servant au recalage des modèles 3D sur le glacier rocheux de Laurichard (le panneau solaire provient d'une installation précédente).

Remerciements

L'instrumentation des deux sites a été financée par l'Université Savoie Mont Blanc, la Fédération de recherche VOR et la Région Auvergne-Rhône-Alpes. L'installation des dispositifs a bénéficié du soutien, administratif et logistique, du Parc national des Ecrins pour le site de Laurichard, et du CCT-CONICET et de l'Universidad nacional de Cuyo pour le site de Quebrada del Medio. Les contributions, en général joyeuses et sportives, de tous les participants des multiples sorties de terrain ayant permis de faire fonctionner les équipements sont vivement remerciées, notamment Cyril Coursier et Nils Paulet dans les Alpes, Carla Tapia Baldis, Damien Bornet et Daniel Falaschi dans les Andes, ainsi que de nombreuses autres personnes qui, plus ou moins directement, ont fourni un appui appréciable. Suite à sa chute malencontreuse le jour de l'installation initiale, le dispositif de mesure de Quebrada del Medio a été réanimé par Esteban Lannuti, dont les compétences hors pair en électronique autant que la modestie ont été décisives.

BIBLIOGRAPHIE

- BODIN X., SCHOENEICH P., JAILLET S., 2008. High-Resolution DEM Extraction from Terrestrial LIDAR Topometry and Surface Kinematics of the Creeping Alpine Permafrost : The Laurichard Rock Glacier Case Study (Southern French Alps). In Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, Fairbanks, 137-142.
- BODIN X., THIBERT E., FABRE D., RIBOLINI A., SCHOENEICH P., FRANCOU B., REYNAUD L., FORT M., 2009. Two decades of responses (1986–2006) to climate by the Laurichard rock glacier, French Alps. *Permafrost Periglac. Process.*, 20, 331-344. doi:10.1002/ppp.665
- BODIN X., TROMBOTTO D., 2015. Evaluation of a terrestrial photogrammetry method rock glacier dynamics. A study case in the Argentinean Andes of Mendoza. In Proceedings of the Geomorphometry 2015 Conference, Poznan.
- DALL'ASTA E., FORLANI G., RONCELLA R., SANTISE M., DIOTRI F., MORRA DI CELLA U., 2016. Unmanned Aerial Systems and DSM matching for rock glacier monitoring. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.10.003
- IANIGLA-INVENTARIO NACIONAL DE GLACIARES 2015. Subcuencas de los ríos Blancos y sector del Cordón del Plata , cuenca del río Mendoza, Provincia de Mendoza. IANIGLA-CONICET, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 60 p.
- MARSY G. 2016. Traitements de séries temporelles de photos pour quantifier les champs de déplacements de glaciers rocheux. Rapport de PFE, Polytech Annecy-Chambéry, Univ Savoie Mont Blanc, 25 p.

