

Suivi temporel [2007-2014] par géoradar et résonance magnétique protonique d'une poche d'eau localisée au sein du glacier polythermique de Tête Rousse (massif du Mont Blanc)

Stéphane Garambois¹, Anatoli Legchenko², Christian Vincent³, Emmanuel Thibert⁴, Jean-François Girard⁵, Jean-Michel Baltassat⁵

¹ ISTerre, Université Grenoble Alpes & CNRS, 38041 Grenoble, France
Stephane.Garambois@ujf-grenoble.fr

² LTHE, Université Grenoble Alpes, CNRS & IRD, 38041 Grenoble, France
anatoly.legtchenko@ujf-grenoble.fr

³ LGGE, Université Grenoble Alpes & CNRS, Grenoble, France
Christian.Vincent@ujf-grenoble.fr

⁴ IRSTEA, UR-ETGR & Université Grenoble Alpes, Grenoble, France
emmanuel.thibert@irstea.fr

⁵ BRGM, 3, av Guillemin - BP 36009 45060 Orleans Cedex - France
jf.girard@brgm.fr; jm.baltassat@brgm.fr

Abstract.

We present Ground Penetrating radar and Surface Nuclear magnetic resonance investigations of an englacial water pocket embedded in the polythermal glacier of Tête Rousse. Besides glacier bed and crevasses characterization, these data allowed the monitoring of the cavity whose geometry changed after artificial water drainages were performed.

Introduction

Le régime thermique des glaciers tempérés dépend de plusieurs facteurs climatiques et locaux, parmi lesquels l'altitude, l'accumulation de neige, l'exposition et la géométrie 3D (Gilbert et al., 2012). Dans ce contexte, la présence de lacs supra-glaciaires, pro-glaciaires ou intra-glaciaires génère un risque important pour les infrastructures et les habitants localisés dans les vallées en aval, notamment en cas de drainage abrupt et soudain de ces lacs. Parmi ceux-ci, les lacs intra-glaciaires posent un problème crucial car ils sont invisibles depuis la surface et donc difficiles à détecter. Un cas emblématique s'est produit en 1892 à Saint-Gervais (Alpes françaises), où une vague composée de plusieurs centaines de milliers de m³ d'un mélange d'eau, de boue et de blocs rocheux a atteint la ville quelques minutes après la rupture d'une cavité remplie d'eau au sein du glacier de Tête Rousse (Vincent et al., 2010), faisant 175 victimes.

Le cas présenté ci-après détaille les investigations géophysiques réalisées au sein du glacier de Tête Rousse à partir de 2007, originellement dédiées à l'évaluation du maintien de la maintenance d'une galerie drainante creusée en 1905. En 2007, les investigations géoradar ont révélé la présence d'une forte réflectivité localisée à 40 mètres de profondeur au sein du glacier, qui potentiellement pouvait être due à une cavité remplie d'eau. Des campagnes additionnelles basées sur les méthodes de Résonance Magnétique Protonique (RMP) et géoradar ont permis entre 2009 et 2010 de valider l'hypothèse d'une cavité remplie d'eau, hypothèse définitivement confirmée par 11 forages de reconnaissance réalisés en juillet 2010 (Vincent et al., 2010). Cette découverte a conduit les autorités en charge de la gestion du risque à décider d'un drainage de la poche, opération réalisée en 2010 et renouvelée en 2011 et 2012, et d'un suivi temporel notamment géophysique (Figure 1). De nombreuses mesures météorologiques, hydrologiques et géophysiques ont été combinées afin de comprendre la formation et l'évolution de la poche suite aux drainages. Ces travaux ont fait l'objet de nombreuses publications portées sur l'étude de la formation de la poche d'eau et de son évolution (Vincent et al., 2012, 2015), sur les données RMP (Legchenko et al., 2011, 2014) et sur les données géoradar (Garambois et al., 2015). Nous proposons ici de revenir sur ces reconnaissances géophysiques et de leurs apports et limites respectives, depuis la découverte de la poche d'eau en 2007 jusqu'aux reconnaissances effectués jusqu'en 2014.

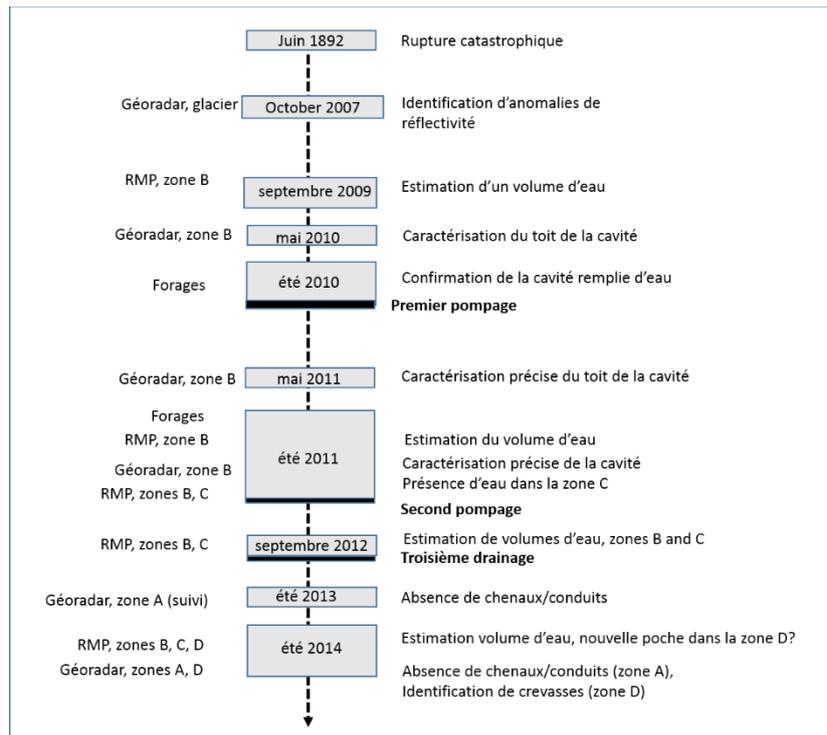


Figure 1. Historique des mesures géophysiques et résultats acquis lors des expériences menées au niveau du glacier.

Anatomie des données géoradar

Le glacier, localisé dans le massif du Mont-Blanc (Alpes françaises) a une extension Est-Ouest de 500 m environ et une largeur de 200 m dans la direction Nord-Sud. Son altitude varie entre 3100 m à 3260 m à l'Est (Figure 2a). Plusieurs campagnes géoradar ont été effectuées au cours du temps (Figure 1), avec des objectifs évoluant depuis i) une investigation grande échelle et faible résolution en 2007 afin d'établir la présence potentielle de la reformation d'une cavité intra-glaciaire ; ii) 2010-2011, 3 campagnes de reconnaissance à plus petite échelle et plus haute résolution dédiées à la caractérisation et au suivi temporel du toit de la cavité après le premier drainage artificiel ; iii) Juin 2014, exploration de la partie supérieure du glacier et iv) 2013-2014, suivi temporel dans la partie aval du glacier, afin de détecter toute apparition de réflectivité géoradar qui pourrait correspondre à la formation d'un conduit intra-glaciaire. Pour les objectifs ii) et iii), des acquisitions denses et anisotropes composées de profils transversaux et longitudinaux ont permis une analyse pseudo-3D des réflexions et d'évaluer les nombreuses réflexions hors-plan.

Les analyses géoradar ont bénéficié de mesures indépendantes réalisées en forage ainsi de mesures répétées RMP. Ces analyses incluent la reconstruction précise de la géométrie du glacier et l'identification de crevasses localisées en amont du glacier jouant un rôle prépondérant pour la circulation d'eau vers la base du glacier.

A l'exception de 2007, toutes les données géoradar ont été acquises à l'aide d'antennes 100 MHz non blindées et leur coordonnées ont été relevées à l'aide d'un système GPS différentiel. L'ensemble des données a été traité à l'aide du logiciel Seismic Unix notamment afin d'améliorer le rapport signal sur bruit par application d'un filtre de Butterworth [50-300 MHz], de relocaliser correctement les réflexions dans le plan 2D à l'aide d'une migration dans l'espace temps-nombre d'onde, d'amplifier les temps d'arrivée tardifs par une fonction temporelle linéaire et de corriger de la topographie. Pour la migration et les corrections statiques, une vitesse constante de 16.8 cm/ns a été utilisée.

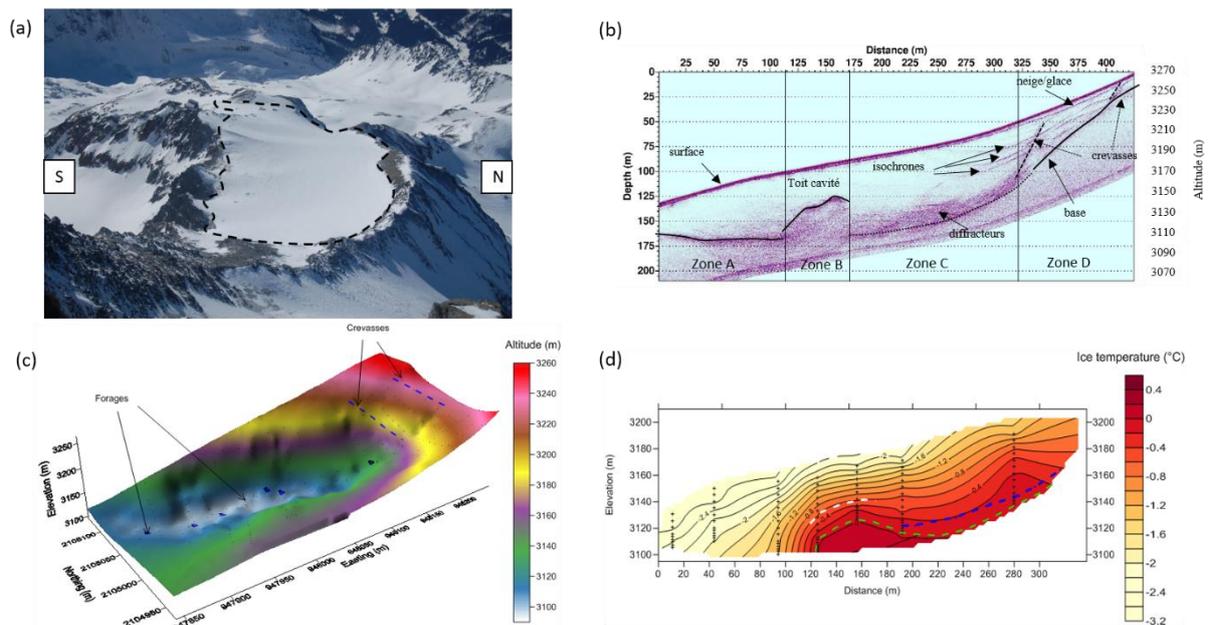


Figure 2. (a) Photographie du glacier (crédit : A. Gilbert) prise depuis l'Est. (b) Image longitudinale géoradar 100 MHz migrée. (c) Topographie de la base du glacier obtenue à partir des données géoradar et des forages de reconnaissance sous la cavité. (d) distribution des températures au sein du glacier le long d'un profil longitudinal.

Un profil longitudinal traversant le glacier d'Ouest en Est est montré sur la figure 1b (acquis en Juin 2014). Il est caractéristique de l'anatomie de la réflectivité radar au sein de ce glacier, qui peut être séparée en 4 zones. La partie avale du glacier (zone A) apparaît très homogène avec une forte réflexion continue apparaissant à la base du glacier. La zone B est dominée par une forte réflexion dont l'apex se trouve à environ 40 m de profondeur et une perte de continuité de la réflexion à la base du glacier. Cette forte réflexion a permis de caractériser le toit de la cavité et une crevasse latérale. La zone C est relativement homogène sur 55 m puis marquée par une réflectivité diffuse sur une couche 10 à 15 m reposant sur la base du glacier. Cette couche a été interprétée comme la partie tempérée (au point de fusion) contenant de l'eau liquide. Enfin, la partie supérieure est marquée par de fortes discontinuités, probablement des crevasses, une forte accumulation de neige, et des réflexions très continues, appelées isochrones, qui peuvent correspondre à des zones d'accumulations de débris ou d'avalanches se produisant lors de périodes climatiques de forte fonte. Ces différentes zones sont très cohérentes avec la distribution des températures relevées dans 7 forages le long du même profil longitudinal (Figure 2d). La zone A est marquée par une température froide inférieure à -2°C , empêchant certainement toute circulation d'eau, alors que des zones de plus fortes températures sont visibles au niveau de la cavité centrale et au niveau de la base du glacier en amont.

Suivi temporel par RMP de la cavité centrale

Le suivi temporel de la cavité par RMP a permis d'estimer les variations du volume d'eau présent au sein de la cavité et sa distribution spatiale (Figure 3, Legchenko et al., 2014). Ces résultats montrent une très bonne adéquation avec les caractérisations géoradar mais fournissent en plus une information cruciale : les volumes d'eau, qui évoluent de $53,500\text{ m}^3$ en 2009 à $18,500\text{ m}^3$ en septembre 2011, soit un an après le second drainage. La distribution des volumes a également fortement évolué, ceux-ci s'éloignant de la base du glacier. Ceci est en accord avec les données géoradar qui montrent une remontée du toit de la cavité de 5 à 10 m vers la surface, suite au drainage. Le volume global a diminué, malgré une remontée du toit vers la surface. Ceci ne peut être expliqué que par le fluage par plasticité de la glace entourant la cavité, la rupture et l'effondrement de pans de glace vers la base du glacier, dont le mélange avec l'eau a pu regeler.

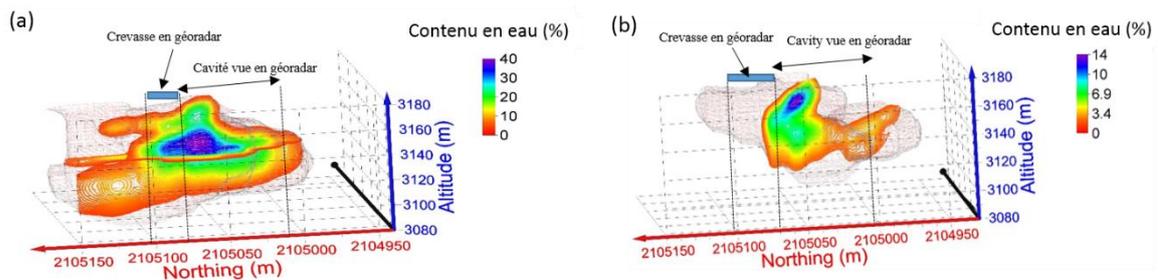


Figure 3. Distributions du contenu en eau selon une coupe longitudinale obtenues après inversion de données RMP. (a) Septembre 2009 ; (b) Septembre 2011, après le premier drainage.

Conclusions

Nous présenterons l'ensemble des résultats obtenus durant ces 8 années de suivi temporel. En particulier, nous montrerons comment une approche pseudo-3D géoradar a permis de caractériser la géométrie 3D du glacier (Figure 2c) et l'évolution temporelle de la cavité centrale, marquée par une réduction de volume et une remontée vers la surface après le premier drainage. Nous montrerons également l'ensemble des résultats RMP, qui ont permis de caractériser de manière quantitative la diminution des volumes d'eau au sein de la cavité centrale après le premier drainage, mais également de faire apparaître une zone réservoir (zone C) et la potentielle détection d'une poche d'eau en amont. L'interprétation combinée des mesures géophysiques a permis d'affiner le rôle de crevasses remplies pouvant expliquer cette poche amont. Nous discuterons ces points en liaison avec les mesures indépendantes utilisables en contrôle. Cette étude montre l'importance de combiner différentes méthodes géophysiques, et notamment dans ce contexte le géoradar et la RMP, dont les sensibilités et résolutions se sont avérées très complémentaires au niveau interprétation

Remerciements

Les auteurs remercient toutes les personnes qui ont pris aux expériences de terrain. Ils remercient également la mairie de Saint-Gervais, la préfecture de Haute-Savoie et l'université Joseph Fourier (Projets Labex OSUG@2020) pour le financement de ces expériences. Les données géoradar ont été acquises à partir de 2013 par la société Hydrophy (Camille Michel et Vincent Cappoen).

Mots clés : Glacier polythermiques, géoradar, RMP, cavité, 3D, suivi temporel

References

- Garambois S., Legchenko A., Vincent C. & E. Thibert, 2015, Ground Penetrating Radar investigations and monitoring of an englacial water pocket in the polythermal glacier of tête rousse, geophysics, submitted.
- Gilbert, A., C. Vincent, P. Wagnon, E. Thibert and A. Rabatel (2012). The influence of snow cover thickness on the thermal regime of Tête Rousse Glacier (Mont Blanc range, 3200 m a.s.l.): Consequences for outburst flood hazards and glacier response to climate change. *J. Geophys. Res.*, **117**, F04018, doi:10.1029/2011JF002258.
- Legchenko A., M. Descloitres, C. Vincent, H. Guyard, S. Garambois, K. Chalikakis and M. Ezersky, (2011), Three-dimensional magnetic resonance imaging for groundwater. *New Journal of Physics*, **13**, 025022, doi: 10.1088/1367-2630/13/2/025022.
- Legchenko A., C. Vincent, J.-M. Baltassat, J.-F. Girard, E. Thibert, O. Gagliardini, M. Descloitres, A. Gilbert, S. Garambois, and H. Guyard, "Monitoring water accumulation in a glacier using magnetic resonance imaging," *Cryosphere*, 2014, vol. 8, pp. 155-166.
- Vincent C., Garambois, S., E. Thibert, E. Lefèbvre, E. Le Meur and D. Six (2010), Origin of the outburst flood from Tete Rousse glacier in 1892 (Mont-Blanc area, France), *Journal of Glaciology*, Vol. 56, No. 198, pp. 688-698.
- Vincent C., M. Descloitres, S. Garambois, A. Legchenko, H. Guyard, E. Lefèbvre, and A. Gilbert, "A potential catastrophic subglacial lake outburst flood avoided in the Mont Blanc area," *Journal of Glaciology*, 2012, vol. 58, pp. 866-878.
- Vincent C., E. Thibert, O. Gagliardini, A. Legchenko, A. Gibert, S. Garambois, T. Condom, J.-M. Baltassat, and J.-F. Girard, "Mechanisms of subglacial cavity filling in Tête Rousse glacier," *Journal of Glaciology*, 61 (228), in press.