

ESTIMATION DE LA COUVERTURE NEIGEUSE A L'AIDE DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DU SOL DANS LE GLACIER ROCHEUX DU COL D'OLEN (ALPES OCCIDENTALES ITALIENNE) : INSTALLATION EXPERIMENTALE ET PREMIERS RESULTATS.

FRATIANNI S.^{1,2}, GIACCONE E.^{1,3}, COLOMBO N.^{1,4}

¹Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino, via Valperga Caluso 35 - 10125 Torino, Italie, simona.fratianni@unito.it

²Centro di Ricerca sui Rischi Naturali in Ambiente Montano e Collinare (NatRisk), via Leonardo da Vinci 44 - 10095 Grugliasco, Italie

³Institut des Dynamiques de la Surface Terrestre (IDYST), Université de Lausanne, UNIL - Mouline, Géopolis, 1015 Lausanne, Suisse

⁴Department of Geography and Environmental Studies, Carleton University, Ottawa, Canada

Résumé – Dans ce travail les résultats de la première année d'un suivi thermique du sol pour le glacier rocheux du Col d'Olen (Alpes occidentales italiennes) sont présentés. Au total 74 capteurs, qui mesurent la température à la surface du sol (Ground Surface Temperature, GST) chaque trois heures, ont été installés pendant l'été 2014 pour étudier la variabilité spatiale de la température et pour détecter indirectement la durée du manteau neigeux. Téléchargés pendant le mois d'août 2015, les données de température ont été analysées et la durée de la neige a été estimée.

Mots-clés : températures, pergélisol, glaciers rocheux, Alpes.

Abstract – *Inference of snow cover duration from ground surface temperatures at the Col d'Olen rock glacier LTER site (NW Italian Alps). Experimental design and first results.* In this study the first year results of the surface thermal monitoring at the Col d'Olen rock glacier LTER site (NW Italian Alps) are presented. A total of 74 dataloggers, which measure the Ground Surface Temperature (GST) every three hours, were installed during the summer 2014 in order to study the GST spatial variability and indirectly detect the snow cover duration. Downloaded during August 2015, the temperature data were analysed and the snow cover duration was estimated.

Keywords: ground surface temperatures, permafrost, rock glacier, Italian Alps.

Introduction

Les principales formes indicatrices de pergélisol dans les environnements alpins sont les glaciers rocheux (Barsch, 1996), il s'agit d'accumulations de débris avec une forme en lobe ou en langue, caractérisées par la présence de glace interne et par un lent mouvement vers l'aval c'est-à-dire de la reptation (Arenson et al., 2002). Les conditions climatiques sont le principal agent qui modifie leurs vitesses de déplacement, puisqu'elles agissent sur le régime thermique du terrain (Kääb et al., 2007). Des augmentations de température peuvent, en effet, produire une accélération de la reptation suite à la dégradation du pergélisol et à la modification des caractéristiques de déformation (viscosité et plasticité) de la glace interne, là où les conditions morphologiques et topographiques en facilitent la cinématique.

A cause de son fragile équilibre, l'étude des glaciers rocheux est de plus en plus utile pour le monde scientifique. Dans ce but, cette étude vise à identifier les principales caractéristiques thermiques et la variabilité spatiale des températures d'un glacier rocheux situé dans le nord-ouest de l'Italie, dans la zone du Col d'Olen. De plus, nous désirons comprendre les dynamiques d'apparition et de fonte du manteau neigeux, pour évaluer la durée de l'enneigement sans utiliser d'images directes (p.ex. webcam). Ces informations proviennent de l'analyse détaillée des températures à la surface du sol (en anglais *Ground Surface Temperature* ou GST), enregistrées par des capteurs thermiques installés selon une maille régulière de 26 m.

1. Zone d'étude

Le Col d'Olen, situé à 2 881 m d'altitude, est un col alpin qui fait partie du groupe du Mont Rosa qui relie la vallée du Lys (Vallée d'Aoste) et la Valsesia (Piémont) (Fig. 1). Du côté de la Vallée d'Aoste il y a le glacier rocheux étudié (Fig. 2). A ses pieds il y a un talus actif de glacier rocheux qui est composé de matrice interne faite de glace et de débris, il présente des gonflements superficiels. Son front se trouve à 2 760 m d'altitude, ses dimensions sont de 340 m de longueur et 160 m de largeur. Il occupe une surface de près de 37 500 m². Un petit lac (60 x 40 m) est situé à sa base ; il est alimenté par des eaux de fonte de la neige et, très probablement, aussi par les eaux de fusion de la glace interne.

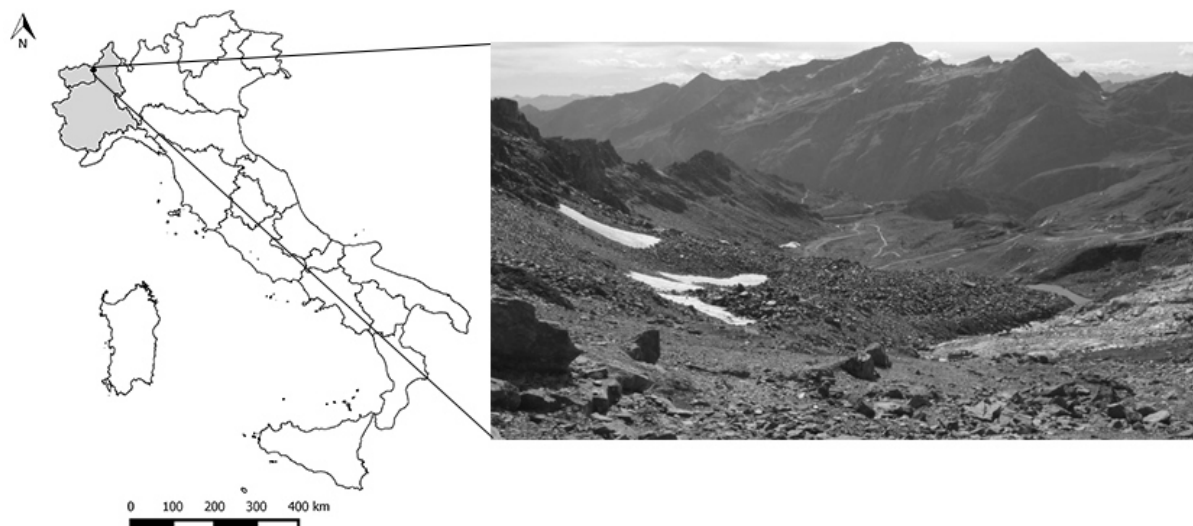


Figure 1. Localisation de la zone d'étude. Vue latérale du glacier rocheux et du lac à sa base.

2. Méthodes

Pour mesurer la température de la surface du sol du glacier rocheux, 74 iButton[®] DS1922L, des capteurs thermiques miniatures, ont été utilisés. Ils ont une résolution de 0,065°C et une précision de $\pm 0,5^\circ\text{C}$, ils ont été programmés pour enregistrer la température à un intervalle de trois heures. Après avoir été placés dans des récipients imperméables et résistants à la radiation solaire, en juillet 2014, ils ont été installés sur le terrain à des profondeurs variables (entre 5 et 10 cm) selon la granulométrie du sol et sous les blocs les plus grands, suivant une grille avec une maille régulière de 26 x 26 m (Fig. 2).

La position de chaque capteur a été enregistrée avec la méthode GNSS (*Global Navigation Satellite System*) en phase différentielle. A la mi-août 2015, la plupart des capteurs ont été récupérés. Les données enregistrées, aux trois heures, ont été combinées sur une base journalière puis le script de Schmid et al. (2012) a été utilisé pour obtenir une estimation de la durée de l'enneigement. Pour ce faire les dates de mûrissement basal (*basal-ripening date* ou RD) et la date de disparition du couvert nival (*melt-out date* ou MD) ont été identifiées pour chaque capteur. RD correspond à l'atteinte d'un stade isothermique et donc au début de la phase initiale de fonte. Ce stade se produit quand la température du sol gelé monte à 0°C soit à cause de la percolation des eaux de fonte de la neige ou suite à de forts épisodes de pluie sur neige (Westermann et al., 2011). MD indique, en revanche, la date à laquelle la neige est complètement fondue et les températures du sol montent alors rapidement. Des cartes de la distribution des températures ont été réalisées par la spatialisation des données ponctuelles avec une méthode de krigeage. Cette méthode a permis de comprendre la distribution spatiale de la WEqT, la *Winter Equilibrium Temperature* : pendant l'hiver, quand le manteau neigeux

atteint une épaisseur suffisante pour isoler le sol des variations atmosphériques (> 60 cm, Hanson et Hoelzle, 2004), la GST se stabilise et atteint progressivement une valeur d'équilibre appelée WEqT. En présence de pergélisol, elle est généralement inférieure à 0°C . Selon la littérature, la période idéale pour mesurer ce paramètre est la fin de l'hiver mais avant que le début de la fonte de la neige commence (Haerberli, 1973). Pour cette raison et en se basant sur les mesures de la hauteur du manteau neigeux qui confirmaient une épaisseur > 100 cm sur tout le glacier rocheux, la date du 1^{er} mars a été choisie.

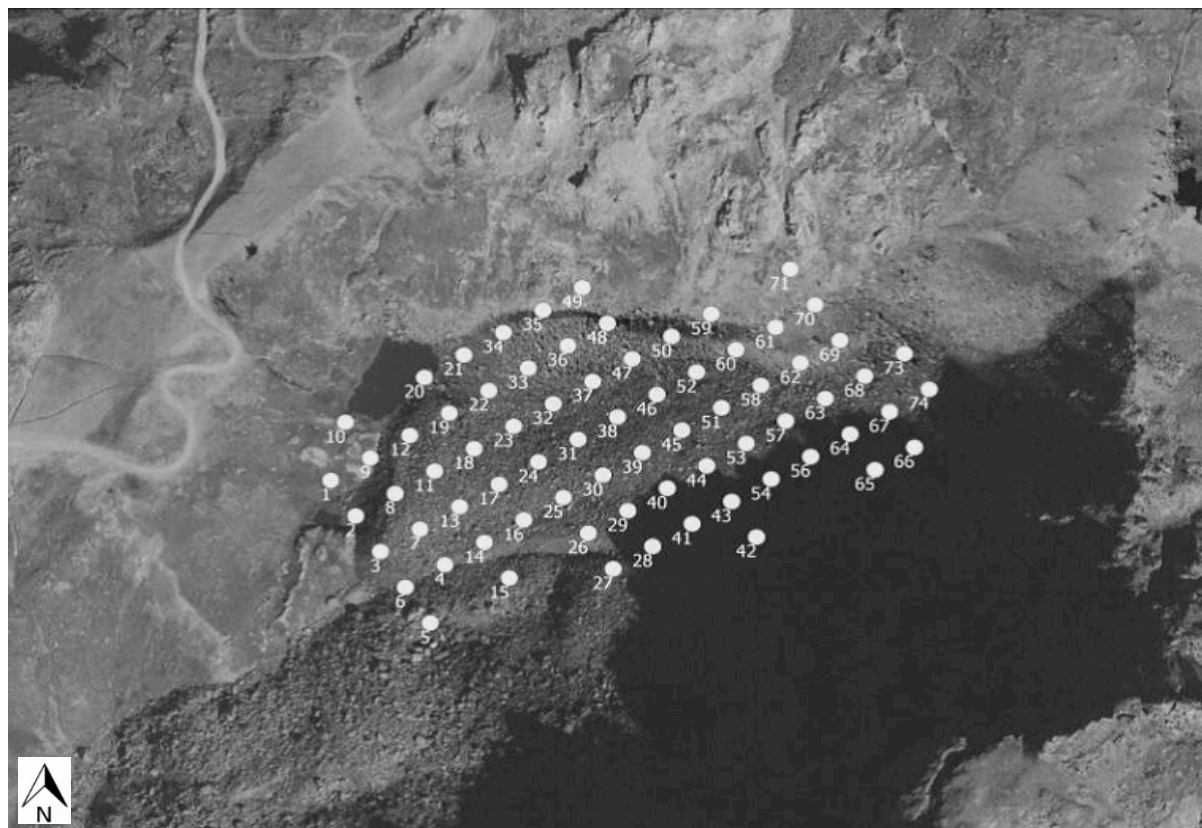


Figure 2. Distribution des capteurs installés sur le glacier rocheux.

3. Résultats

Les données tri-horaires des iButtons, récupérées à la mi-août 2015, ont été vérifiées et regroupées sur base journalière pendant la période entre le 01/08/2014 et le 31/07/2015.

Durant la période libre de la neige, qui influe sur l'état thermique du glacier rocheux, les capteurs enregistrent les valeurs maximales des températures journalières généralement vers 18h. Les températures restent élevées jusqu'à minuit, puis elles commencent à diminuer à cause de la dispersion de la chaleur pendant la nuit. Les températures minimales sont atteintes au matin vers 9h.

Les températures journalières ont une valeur moyenne de $1,6^{\circ}\text{C}$, avec un maximum de $18,6^{\circ}\text{C}$ enregistré par le capteur 71 en date 15/07/2015, et un minimum de $-11,1^{\circ}\text{C}$ enregistré par le capteur 34 le 03/02/2015. Selon les WEqT, il y a une différence thermique à l'intérieur du glacier rocheux (Fig. 3). C'est dans la partie frontale et à côté du lac que les températures les plus basses ont été enregistrées tandis que dans la partie sommitale les températures sont plus élevées.

De la mi-février 2015 à la mi-mai, les capteurs ont enregistré le début de la fonte nivale (RD), puisque les températures ont alors montées jusqu'à 0°C . La disparition de la neige (MD) s'est produite entre la mi-mai et la mi-juillet, elle a été facilitée par la vague de chaleur

du début juillet. Deux typologies d'évolution de la GST ont été observées, représentées par les capteurs 1 et 18. Dans le premier cas, après les oscillations estivales, où il y a des températures positives de l'air, la GST baisse un peu mais elle se maintient légèrement au-dessus de 0°C en novembre 2014, quand la neige est déjà présente, et reste constante pour la période hivernale. Elle remonte ensuite au début de juillet 2015, après la fonte nivale (Fig. 4). La RD n'a pas été calculée. Cette évolution de la GST donne des informations concernant le développement précoce de la neige au début de l'hiver. La neige isole le sol et atténue les oscillations de courte durée de la température de l'air. Dans ces sites le pergélisol n'est pas présent (Ishikawa, 2003). Dans le cas du capteur 18, en revanche, les températures sont positives pendant l'été, elles montrent des fluctuations de courte durée à l'automne, puis elles descendent au-dessous de 0°C à la mi-novembre 2014 et restent négatives jusqu'au début de la période où le couvert atteint son stade isothermique (fin avril 2015). Il s'ensuit une reprise de la hausse des températures après la fonte de la neige en juillet (Fig. 4). Les oscillations des températures pendant l'automne permettent au sol de se refroidir, en favorisant le développement du pergélisol dans le cas où elles sont très négatives. Quand la neige est assez épaisse et isolante (> 60 cm), les températures atteignent un équilibre et restent constantes jusqu'au début de la fonte nivale. Ce type de régime thermique reflète le concept de BTS (*Bottom Temperature Snow*, température mesurée à l'interface neige/sol) et permet l'évaluation indirecte de la présence de pergélisol sur la base de la température d'équilibre à la fin de l'hiver. En fait, selon la théorie des BTS, avec valeurs < -3°C, le pergélisol est probable, entre -3 et -2°C il est possible et avec valeurs > -2°C il est impossible (Hoelzle, 1992).



Figure 3. Distribution de la *Winter Equilibrium Temperature* pour le glacier rocheux (date 01/03/2015).

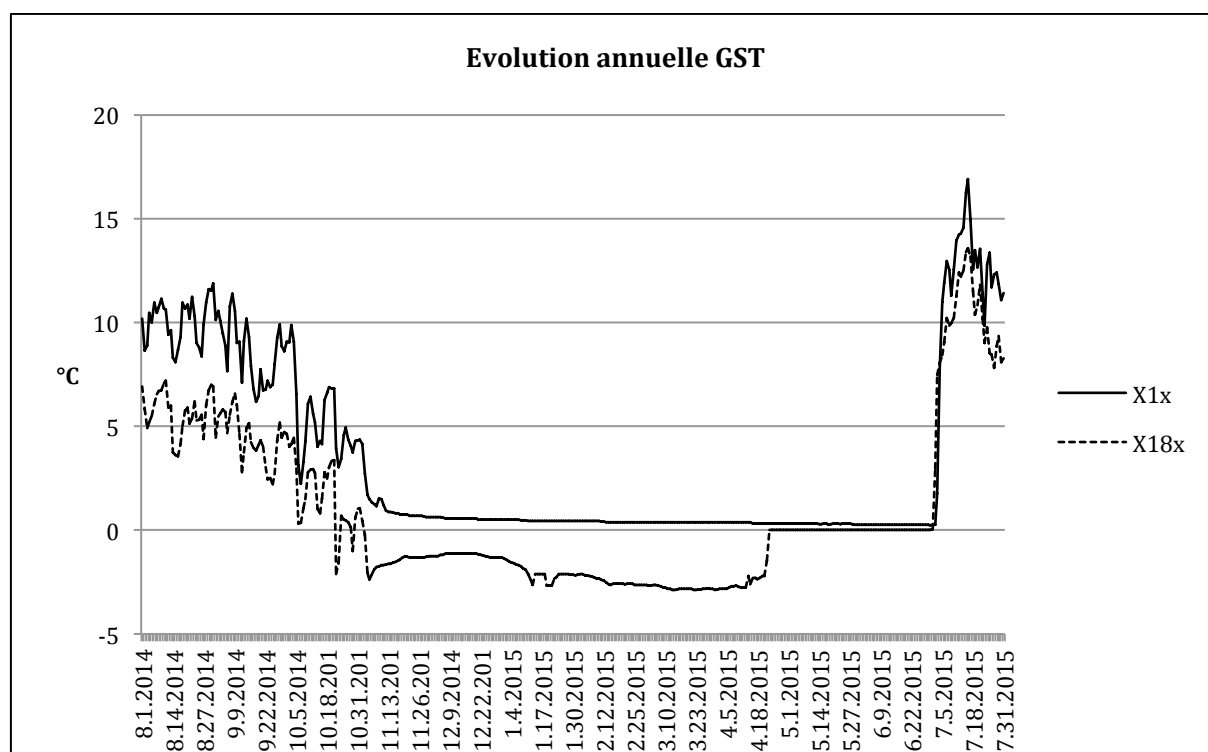


Figure 4. GST des capteurs X1x (ligne continue) et X18x (ligne en pointillé).

Conclusion

A la fin de la première année de suivi, un tableau complet de la variabilité spatiale des températures à la surface du sol a été réalisé. L'utilisation des 74 capteurs de température sur le glacier rocheux a permis d'obtenir une caractérisation thermique détaillée et d'estimer la durée du manteau neigeux. De nombreuses différences thermiques ont été mises en évidence, notamment que la partie frontale est plus froide que la partie sommitale. Dans cette étude nous avons vu que la couverture neigeuse est un facteur prédominant qui conditionne l'équilibre thermique du sol, agissant comme un isolant à cause de sa faible conductivité thermique. Une couverture neigeuse précoce empêche le sol de se refroidir, donc des GST plus chaudes seront enregistrées. En revanche, une fonte tardive retarde le réchauffement du sol, laissant les GST plus froides (Zhang et al., 2001).

Dans la région d'étude la neige persiste au sol pendant environ sept mois soit de novembre à mai. La fonte se produit sur une période de près de trois mois, jusqu'à la mi-juillet. Ces informations nous seront utiles pour la deuxième partie de la recherche qui est actuellement en cours et qui porte sur les températures du lac à la base du glacier rocheux. L'objectif est de vérifier s'il est alimenté seulement par les eaux de fusion nivale (température de l'eau environ 0-2°C) ou s'il est aussi alimenté par les eaux de fusion de la glace interne du glacier rocheux (température proche de 0°C aussi pendant l'été en absence de neige). La poursuite de nos travaux et des mesures thermiques nous aidera à répondre à cette question.

Remerciements

Nous remercions les personnes qui ont coopéré pour la réalisation de cette recherche et pendant les relevés sur le terrain: Danilo Godone, Elena Serra, Diego Guenzi, Cristina Viani, Luigi Perotti, Marco Bacenetti, Gioachino Roberti.

La recherche a été financée aussi avec la bourse de la Fondation Gorla (Asti, IT) liée au projet « Studio degli effetti del cambiamento climatico in ambiente alpino in alta quota », à l'intérieur de l'avis « Bando dei Talenti della Società Civile 2015 ».

Bibliographie

- Arenson L., Hoelzle M., Springman S., 2002. Borehole Deformation Measurements and Internal Structure of Some Rock Glaciers in Switzerland. *Permafrost and Periglacial Processes*, **13**, 117-135.
- Barsch D., 1996. *Rockglaciers: Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments*. Berlin, Springer, 319 p.
- Haeberli W., 1973. Die Basis-Temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **9**, 221-227.
- Hanson S. et Hoelzle M., 2004. The thermal regime of the active layer at the Murtèl Rock Glacier based on data from 2002. *Permafrost and Periglacial Processes*, **15**, 273-282.
- Hoelzle M., 1992. Permafrost occurrence from BTS measurements and climatic parameters in the Eastern Swiss Alps. *Permafrost and Periglac. Process.*, **3**, 143-147.
- Ishikawa M., 2003. Thermal regimes at the snow-ground interface and their implications for permafrost investigation. *Geomorphology*, **52**, 105-120.
- Kääb, A., Frauenfelder, R., Roer, I. 2007. On the response of rock glacier creep to surface temperature increase. *Global and Planetary Change*, **56**, 172-187.
- Schmid M.-O., Gubler S., Fiddes J., Gruber S., 2012. Inferring snowpack ripening and melt-out from distributed measurements of near-surface ground temperatures. *The Cryosphere*, **6**, 1127-1139.
- Westermann S., Boike J., Langer M., Schuler T. V., Eitzelmüller B., 2011. Modeling the impact of wintertime rain events on the thermal regime of permafrost. *The Cryosphere*, **5**, 945-959.
- Zhang T., Barry R. G., Haeberli W., 2001. Numerical simulations of the influence of the seasonal snow cover on the occurrence of permafrost at high latitudes. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, **55**, 261-266.