



**HAL**  
open science

# ESTIMATION DE LA TEMPERATURE ET TENEUR EN EAU DU PERMAFROST DE MONTAGNE PAR TOMOGRAPHIE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE ET POLARISATION PROVOQUEE

A. Duvillard, Andre Revil, Florence Magnin, Philippe Schoeneich, Ludovic  
Ravel, Pierre Vaudelet, Johan Berthet

## ► To cite this version:

A. Duvillard, Andre Revil, Florence Magnin, Philippe Schoeneich, Ludovic Ravel, et al.. ESTIMATION DE LA TEMPERATURE ET TENEUR EN EAU DU PERMAFROST DE MONTAGNE PAR TOMOGRAPHIE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE ET POLARISATION PROVOQUEE. Geofcan 2021, Mar 2021, Online, France. <hal-03260728>

**HAL Id: hal-03260728**

**<https://hal.science/hal-03260728v1>**

Submitted on 15 Jun 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.



HAL Authorization

## ESTIMATION DE LA TEMPERATURE ET TENEUR EN EAU DU PERMAFROST DE MONTAGNE PAR TOMOGRAPHIE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE ET POLARISATION PROVOQUEE

DUVILLARD PA.<sup>1,2,3</sup>, REVIL A.<sup>1</sup>, MAGNIN F.<sup>1</sup>, SCHOENEICH P.<sup>4</sup>, CASOTTI C.<sup>1</sup>, RAVANEL L.<sup>1</sup>, VAUDELET P.<sup>3</sup>, BERTHET J.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> EDYTEM, Université Savoie Mont Blanc, CNRS, Le Bourget-du-Lac, France

<sup>2</sup> STYX 4D, Le Bourget-du-Lac, France

<sup>3</sup> NAGA Geophysics, Le Bourget-du-Lac, France

<sup>4</sup> Institut d'Urbanisme et de Géographie Alpine, PACTE, Grenoble, France.

### RESUME

*La prospection géoélectrique est une méthode très utilisée pour détecter et étudier le permafrost. La résistivité électrique qui a largement fait ses preuves est de plus en plus combinée à des mesures en polarisation provoquée sur le terrain et en laboratoire. L'utilisation de modèles pétrophysique récemment développés permet ensuite de convertir les données électriques en informations quantitatives comme la température ou la teneur eau. Cette méthodologie a été testée sur une arête rocheuse et un glacier rocheux où des données thermiques permettent de discuter ces résultats.*

**Mots clés :** Permafrost, conductivité électrique, température, teneur en eau.

### TEMPERATURE AND WATER CONTENT DISTRIBUTION OF MOUNTAIN PERMAFROST FROM CONDUCTIVITY AND INDUCED POLARIZATION TOMOGRAPHY

#### ABSTRACT

*Geoelectric prospecting is a widely used method for detecting and studying permafrost. The electrical resistivity which has largely proven this is increasingly combined with measurements of induced polarization in the field and in the laboratory. The use of recently developed petrophysical models then allows the conversion of electrical data into quantitative information such as temperature or water content. This methodology was tested on a rock ridge and a rock glacier where historical thermal data allow to discuss these results.*

**Key words:** Permafrost, electrical conductivity, temperature, water content.

#### INTRODUCTION

Depuis une trentaine d'années, une augmentation généralisée de la température du permafrost alpin est observée. La dégradation (réchauffement) de ces terrains durablement gelés entraîne une intensification des aléas naturels en haute montagne, avec par exemple un accroissement des dommages et déstabilisation pour les infrastructures. Ainsi, la connaissance de l'état thermique et de la distribution de la glace dans les terrains à permafrost (parois rocheuses, glaciers rocheux) est devenue essentielle pour évaluer la stabilité de ces terrains gelés en mutation. Les mesures directes de températures à la surface de la roche ou dans des forages permettent d'avoir des informations ponctuelles robustes, mais restent coûteuses et peu représentatives spatialement dans des terrains caractérisés par une forte variabilité thermique. À l'inverse, les méthodes de tomographie électrique résistive ou polarisation provoquée (appelé aussi chargeabilité) permettent de caractériser le sous-sol de manière indirecte à bas prix sur de larges espaces avec des tomographies ou images en 2D, 3D ou 4D. La tomographie par résistivité électrique a donc été largement utilisée depuis trente ans pour détecter et surveiller le permafrost de montagne (e.g. Mollaret et al., 2019). Cette méthode est aussi très efficace pour imager les changements de phases (glace/eau) dans les milieux poreux lorsque les températures sont proches de 0°C.

Parallèlement aux mesures de terrain, la caractérisation pétrophysique d'échantillons de roches ou sols en laboratoire a permis de développer des modèles grâce à des observables géophysiques et des paramètres d'intérêt comme la température (e.g. Coperey et al., 2019). L'exploitation quantitative des données géoélectriques pour l'étude du permafrost est relativement récente contrairement à d'autres sciences de l'environnement (e.g. volcanologie, sols pollués...).

Cette étude a pour objectif de tester deux modèles pétrophysique récemment développés pour un diagnostic indirect de la température du permafrost et de la teneur eau dans des terrains supports d'infrastructures en contexte de permafrost.

## SITE D'ÉTUDES



Deux sites aux contextes géomorphologiques différents (paroi rocheuse et formation superficielle) ont été retenus afin d'analyser la distribution actuelle du permafrost : (1) le refuge des Cosmiques (Chamonix) construit sur une arête rocheuse (3613 m d'altitude) et en partie déstabilisée en 1998 par un écoulement (Ravel et al., 2013), et (2) la gare d'arrivée du télésiège de Bellecombes (Deux-Alpes) implantée dans un glacier rocheux (2710 m), qui subit une reprise de ces fondations en 2013 à la suite d'un affaissement. Ce site avait fait l'objet de plusieurs campagnes mesures géophysiques entre 2008 et 2010 (Bodin et al., 2010 ; Cadet et al., 2015). Ces deux sites ont fait l'objet de campagnes de mesures en géoélectrique en septembre 2019 et août 2020 et sont équipés en instrumentation thermique.

**Fig. 1** – Carte de localisation des investigations géophysiques au refuge des Cosmiques (gauche) et télésiège de Bellecombes (droite).

## MÉTHODES

Des campagnes de terrain en résistivité et chargeabilité électrique ont été réalisées avec un résistivimètre ABEM SAS 4000 avec un protocole Wenner trié pour améliorer la qualité des mesures. Le contact entre le sol et les électrodes a été amélioré en utilisant de la bentonite et du sel. La topographie a été extraite d'un nuage de point 3D acquis par drone pour les parois ou mesuré par DGPS pour le glacier rocheux. Les données ont été inversées avec le logiciel RES2DINV et les inversions ont été stoppées à la 3<sup>ème</sup> itération.

La conversion des données de conductivité électrique en température (eq. 1) ou teneur en eau (eq. 2) a été réalisée en utilisant des modèles pétrophysiques développés ultérieurement (voir Duvillard et al., 2018 ; Revil et al., 2020). Pour le site des Cosmiques, des mesures de la conductivité électrique ont été réalisées sur un échantillon de roche afin de tester le modèle pétrophysique. Après avoir saturé l'échantillon avec de l'eau de neige fondue recueillie sur le terrain, des mesures de conductivité électrique ont été effectuées entre -15°C et + 20 °C (Duvillard et al., 2020).

Dans un deuxième temps, les modèles obtenus par la conversion des données géoélectriques sont comparés qualitativement avec des données thermiques mesurées directement sur le terrain en subsurface ou dans des forages instrumentés (Duvillard et al., 2020).

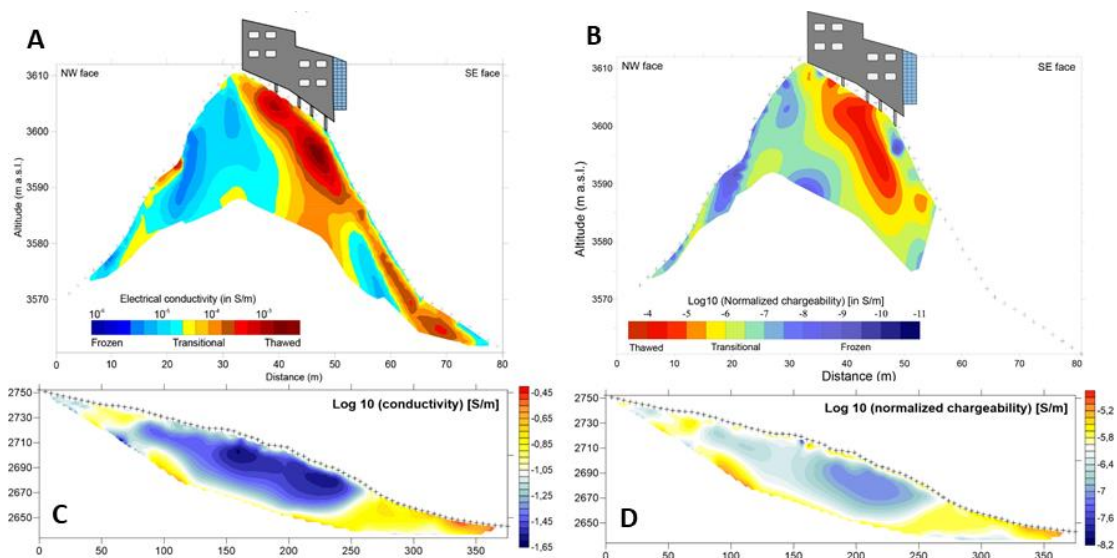
$$\sigma(T) \approx \left[ (\phi - \theta_r) \exp\left(-\frac{T - T_F}{T_C}\right) + \theta_r \right] \frac{\sigma(T_0)}{\phi} [1 + \alpha_T (T - T_0)]. \quad (1)$$

$$\theta = \left[ \frac{1}{\sigma_w} \left( \sigma_\infty - \frac{M_n}{R} \right) \right]^{1/m} \quad (2)$$

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

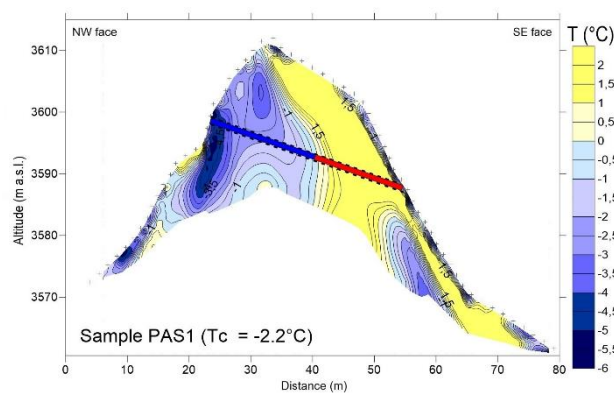
### Tomographie de conductivité électrique et chargeabilité normalisée

Pour l'arête rocheuse des Cosmiques, les tomographies de conductivité électrique et chargeabilité normalisée montrent une distribution similaire avec des valeurs de conductivité plutôt faibles sous la face NO et des valeurs plus élevées sous la face SE (rouge). Cela suggère que la présence du permafrost est limitée à la face NO avec une transition verticale du permafrost sous les le refuge et l'absence de permafrost sous la face SE. Pour le télésiège de Bellecombes, les tomographies sont aussi similaires et suggèrent la présence de sédiments gelés sur plus de 40 m d'épaisseur. L'amplitude faible et le niveau des valeurs suggèrent un permafrost composé d'un mélange de matériaux riches en glace.



**Fig.2** – Tomographie de conductivité électrique et chargeabilité normalisée au refuge des Cosmiques (A-B) et au glacier rocheux de Bellecombes (C-D).

### Distribution de température modélisée

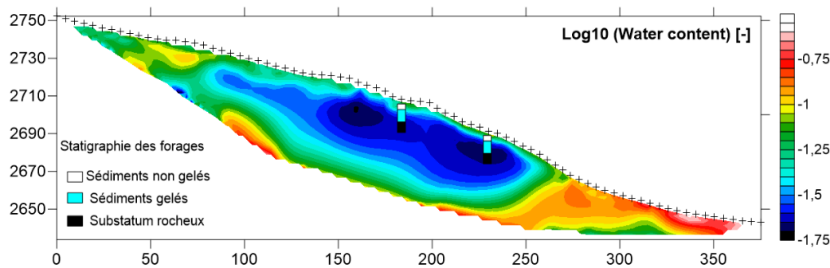


La distribution de température extraite de la conductivité électrique suggère une température d'environ -2°C dans la face NO, ce qui est cohérent avec la température simulée numériquement à partir d'un capteur de température de surface (**Fig. 3**). Ce modèle de température suggère un permafrost proche du point de fusion et donc de possibles instabilités.

**Fig. 3** – Distribution de la température déterminée à partir de la distribution de conductivité électrique.

## Évaluation de la teneur en eau modélisée

Le modèle de teneur en eau générée par l'utilisation combinée de la conductivité électrique et chargeabilité est cohérent avec les observations de terrain. La teneur en eau est deux fois plus élevée au niveau du front du fait des écoulements qu'au niveau de la partie centrale (**Fig. 4**). Cette faible amplitude réduite d'un facteur 2 suggère que les sédiments gelés sont dans une matrice glace/roches riche en eau. Ces observations sont cohérentes avec les mesures de températures du jour de la mesure, comprise entre 0°C et -0,2°C de -2 à -15 m de profondeur. L'évolution de température de deux forages depuis 2009 suggère un réchauffement continu et un permafrost de plus en plus riche en eau.



**Fig. 4** – Distribution de la teneur en eau dans le glacier rocheux et stratigraphie simplifiée des forages en 2009.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ces avancées récentes montrent le grand intérêt de l'utilisation de la polarisation provoquée et de modèle pétrophysique pour la caractérisation du permafrost. À court terme, le suivi et la répétition de profils dans le temps en polarisation provoquée offre de nouvelles perspectives afin de caractériser en détail le changement de phase glace/eau. À plus long terme, des inversions jointes pourront être développées en utilisant des données de température pour guider l'inversion afin d'améliorer la conversion des données géoélectriques en température.

## Remerciements

Les auteurs remercient les 2 Alpes loisirs, les gardiens du refuge des Cosmiques et le bureau d'étude SAGE (Société Alpine de Géotechnique ; JM Krysiecki et O. Brenguier) pour la collaboration mise en place et toutes les informations géotechniques fournies. Nous remercions A. Coperey, M. Marcer, D. Cusicanqui, X. Bodin, L. Ravel pour leur aide sur le terrain et pour le traitement de certaines données. Cette étude s'intègre dans le projet FEDER POIA *PermaRisk*.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BODIN X., DESVARREUX P., FABRE D., KRYSIECKI JM., GAY M., MARIE R., LORIER L., SCHOENEICH P., VALLON M., 2010** – Analyse des risques induits par la dégradation du permafrost alpin. *Fonda. MAIF, Rapport final*, 227p.
- CADET H., BRENGUIER O., 2015** – The Bellecômbes Rock Glacier Case Study, 2 Alpes, France, in: Lollino, G., Manconi, A., Clague, J., Shan, W., Chiarle, M. (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory*, 249–253.
- COPEREY A., REVIL A., ABDULSAMAD F., STUTZ B., DUVILLARD P.A., RAVANEL L., 2019** – Low frequency induced polarization of porous media undergoing freezing: preliminary observations and modelling. *J. Geophys. Res.*, 124.
- DUVILLARD P.A., REVIL A., QI Y., SOUEID AHMED A., COPEREY A., RAVANEL L., 2018** – Three-dimensional electrical conductivity and induced polarization tomography of a rock glacier, *J. Geophys. Res.*, 123.
- DUVILLARD P. A., MAGNIN F., REVIL A., LEGAY A., RAVANEL L., ABDULSAMAD F., & COPEREY A., 2020** – Temperature distribution in a permafrost-affected rock ridge from conductivity and induced polarization tomography. *Geophysical Journal International*.
- MOLLARET C., HILBICH C., PELLET C., FLORES-OROZCO A., DELALOYE R., HAUCK C., 2019** – Mountain permafrost degradation documented through a network of permanent electrical resistivity tomography sites, *The Cryosphere*, 13, 2557–2578.
- REVIL A., SOUEID AHMED A., COPEREY A., RAVANEL L., SHARMA R., PANWAR N., 2020** – Induced polarization as a tool to characterize shallow landslides. *Journal of Hydrology*, 589, 125369.