

Abstract

The study of the state of permafrost in high latitude and mountainous locations is very much a relevant news topic that has been related to climate change and increasing air temperatures. The alpine permafrost is thawing (Noetzli & Gruber, 2009; Magnin & al., 2015; Swiss Permafrost Monitoring Network, 2021), which may impacts rock stability (Ravel & al., 2017). The present thesis focuses on increasing knowledge about permafrost dynamics inside mountain massifs.

Recent studies conducted in the Alps by team of researchers (Krautblatter & Hauck, 2007; Keuschnig & al., 2015; Magnin & al., 2015, 2017; Duvillard & al. 2020) used and further developed Electrical Resistivity Tomography (ERT), a known geophysical method, to measure vertical permafrost. The resistivity measured gives information on the water state present in the rocks. Conductivity is the inverse of resistivity, thus low conductivity corresponds to frozen water and high conductivity to liquid water.

This paper presents the distribution of the permafrost inside the Aiguille du Midi (AdM), based on the treatment and analysis of temperature data and resistivity data collected on site during the time period June to September 2020 (Magnin, Alesina & al).

The Aiguille du Midi is located on the edge of the massif du Mont Blanc in the French Alps and culminates at 3843 meters altitude a.s.l. It is formed by porphyritic granite crosscut by major faults, among which the main fault network intersected by a secondary fault network (Leloup & al., 2005).

The Aiguille du Midi is an historical and world famous tourist destination. Some 500'000 visitors converge in Chamonix every year to enjoy the cable car ride and the incredible mountain views from the summit.

Heavy excavation work took place inside the main peak and northern needle to build tunnels and outside infrastructures to accommodate the main cable car station, another smaller cable car station for the telecabin toward Italy, a restaurant, a souvenir shop, a museum, various other facilities and last but not least an elevator shaft for a double lift to the submittal platform that offers a unique monitoring spot. During the various excavation works, water used to cool the drill bits and other drilling elements could have infiltrated the fracture network between the rocks.

Two main research axes are followed for the present master's thesis. A field work campaign was conducted, which aimed at rock temperature and ERT measurement acquisition. Furthermore, an exercise in modelization of the temperature evolution modelling was carried out.

As part of the field work, the North, South and East faces of the Aiguille du Midi summit were equipped and monitored over the past year (Magnin & al., 2015) using 3x160 meters ERT cables. Each cable is equipped with 32 electrodes spread every 5 meters. All three cables are fixed in place and permanently linked to the Terrameter *LS2 d'ABEM* that allows to remotely initiate measurements and collect the data produced. The equipment will be left in place, allowing for data collection in the years to come. Rock temperatures are measured with thermometers installed at regular intervals in borehole of 10 meters depth. Conductivity is calculated using the measurements from the ERT method. The thus obtained conductivity values serve to calibrated temperature. Temperature profiles are created for the AdM, which can be used as an indicator for the presence of permafrost.

For the second research axis, a model calculating the effect of air temperature variations on rock temperature was developed with a 2D-Matlab code. The code uses hydrological and

thermal equations and “Stefan’s problem” (Damlamian and Kenmochi, 1980) to calculate the evolution of permafrost distribution into the AdM. A homogeneous permafrost temperature of -1.5°C and a time lapse of 43 years are used as the model initial conditions (Swiss Permafrost Monitoring Network, 2021).

The code mainly includes the water crystallization’s latent heat, hydro-thermal equations and a temperature anomaly. This anomaly represents the lift inside the Aiguille du Midi and is a good approximation for fracture anomaly.

Future work with additional parameters such as snow cover, precipitations, fracture network and 3D modelling could help to augment and refine the knowledge acquired. For that purpose the field work would have to be expanded to include monitoring during winter conditions. It would also be highly recommendable to develop further laboratory experiments to verify field measurements.

The model could be generalized to other study sites with the same type of environmental settings.

Résumé

L'étude de l'état du permafrost en haute latitude et en montagne est un sujet d'actualité. Des études récentes sont réalisées dans les Alpes par quelques groupes de chercheurs (Krautblatter & Hauck, 2007a; Keuschnig & al., 2015; Magnin & al., 2015, 2017; Duvillard & al. 2020). Dans ces études de permafrost de falaises, la méthode géophysique utilisée est la résistivité électrique par tomographie (ERT). Cette méthode mesure la résistivité de la roche. Celle-ci nous indique sous quel état se trouve l'eau dans les pores des roches. La conductivité est l'inverse de la résistivité, ainsi une faible conductivité indique la présence de permafrost tandis qu'une conductivité élevée indique de l'eau à l'état liquide.

Cette étude présente la distribution du permafrost au sein de l'Aiguille du Midi (AdM), basée sur le traitement et l'analyse des données de température et de résistivité collectées sur le site durant la période estivale, de juin à septembre (by Magnin, Alesina & al.).

L'AdM culminant à 3843 mètres d'altitude a.s.l, est localisée dans le massif du Mont Blanc dans les Alpes françaises. Ce massif est composé de granite porphyrique entrecoupé par des failles majeures, dont la principale faille est intersectée par la seconde (Leloup & al., 2005).

L'AdM est un lieu historique et une destination touristique mondiale. Plus de 500'000 touristes viennent à Chamonix tous les ans pour profiter de la vue panoramique qu'offre le sommet, celui-ci étant facilité par un accès en téléphérique. De lourds travaux de construction ont eu lieu au sein de la montagne pour édifier des tunnels et infrastructures permettant de rejoindre un second téléphérique allant sur l'Italie, ainsi qu'un restaurant, un magasin de souvenir, un musée, et des installations diverses. Un double ascenseur a également été édifié afin de rejoindre la plateforme sommitale ; ce qui offre un lieu de monitoring idéal. Durant

ces travaux, de l'eau et d'autres éléments ont été utilisés afin de refroidir les têtes de forage. Cette eau a pu s'infiltrer dans le système de fracture dans la roche.

Le permafrost alpin fond (Noetzli & Gruber, 2009; Magnin & al., 2015; Swiss Permafrost Monitoring Network, 2021) et les causes sont toujours débattues. Cette thèse de master se concentre sur l'évolution de nos connaissances concernant le permafrost.

Deux directions d'études ont été réalisées, la première consiste à acquérir des données de températures et d'ERT. La seconde repose sur la réalisation d'un modèle simulant l'évolution de température de la roche pour ce site. Les faces Nord, Sud et Est de l'AdM sont équipées et monitorées par 3 câbles de 160 mètres de long. Ces câbles sont composés de 32 électrodes séparées de 5 mètres chacune. Ces câbles sont installés de manière permanente et reliés au TéraMètre LS2 d'ABEM qui permet une acquisition de données à distance et ce pour les années à venir.

Le code MATLAB en 2D conçu pour ce projet modélise les effets de la température de l'air sur la température de la roche. Pour ce faire, il utilise les flux hydrologiques et thermiques ainsi que la chaleur latente afin d'obtenir une modélisation de l'évolution du permafrost à l'AdM. Le modèle utilise une distribution initiale de température homogène à -1.5°C (Swiss Permafrost Monitoring Network, 2021), pendant 43 ans.

Les données géophysiques ont permis d'obtenir une calibration entre le \log_{10} de la conductivité ($\log_{10}C$) et la température, ainsi qu'une évolution annuelle du $\log_{10}C$ sur les 3 profils. Les résultats soulèvent des questions suite à la différence de température obtenue par la calibration et celle mesurée dans le forage. L'effet de surfusion peut être une piste afin d'expliquer ces différences.

Le code Matlab obtenu offre la possibilité d'être utilisé pour d'autres terrains d'études. Il inclut la chaleur latente, les équations hydrothermales et une anomalie. Cette anomalie

représente, pour le cas de l'AdM, l'ascenseur. La modélisation d'anomalies peut également permettre d'incorporer les systèmes de fracture.

Afin de continuer cette étude, des techniques et améliorations de protocoles doivent être apportés pour l'acquisition de données d'ERT afin de poursuivre le monitoring durant la saison hivernale. D'autres études de laboratoire peuvent être mises en place avec un protocole différent de Coperey, 2019.

Le code peut être amélioré par l'addition de nouveaux paramètres tels que les précipitations et la couche de neige isolante en hiver, ainsi que la modélisation du système de fracture. Un code 3D pourrait être mis en place par la suite.

Ce projet me tient à cœur car il me permet de coupler mes connaissances scientifiques ainsi que les compétences acquises lors des formations techniques annexes aux études (formation club alpin et formation cordiste IRATA 2), ce qui ouvre de nouvelles possibilités d'études sur des terrains à accès difficiles. Les perspectives de résultats sont extrêmement intéressantes même si elles peuvent être fortes de conséquences, et anxiogènes. La modélisation a été un grand challenge pour ma part, elle était aussi la seule condition pour que je me joigne à ce sujet pluridisciplinaire complet (géophysique, géomorphologie, physique, modélisation, et connaissance de terrain).