



HAL
open science

L'Aiguille du Midi (massif du Mont Blanc) : un site remarquable pour l'étude du permafrost des parois d'altitude

Philip Deline, Velio Coviello, Edoardo Cremonese, Stefan Gruber, Michael Krautblatter, Stéphane Jaillet, Emmanuel Malet, Umberto Morra Di Cella, Jeannette Noetzli, Paolo Pogliotti, et al.

► To cite this version:

Philip Deline, Velio Coviello, Edoardo Cremonese, Stefan Gruber, Michael Krautblatter, et al.. L'Aiguille du Midi (massif du Mont Blanc) : un site remarquable pour l'étude du permafrost des parois d'altitude. Neige et glace de montagne: Reconstitution, dynamique, pratiques, Collection EDYTEM - Cahiers de Géographie, n°8, pp.135-146, 2009. halsde-00399799

HAL Id: halsde-00399799

<https://hal.science/halsde-00399799>

Submitted on 31 Mar 2011

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.

Collection
EDYTEM

Numéro 8 - Année 2009

*Cahiers de
Géographie*

NEIGE et GLACE de MONTAGNE

Reconstitution, dynamique, pratiques



L'AIGUILLE DU MIDI (MASSIF DU MONT BLANC) UN SITE REMARQUABLE POUR L'ÉTUDE DU PERMAFROST DES PAROIS D'ALTITUDE

*THE AIGUILLE DU MIDI (MONT BLANC MASSIF):
A UNIQUE HIGH-ALPINE SITE TO STUDY PERMAFROST IN ROCKWALLS*

PHILIP DELINE ¹, VELIO COVIELLO ¹, EDOARDO CREMONESE ², STEPHAN GRUBER ³,
MICHAEL KRAUTBLATTER ⁴, STÉPHANE JAILLET ¹, EMMANUEL MALET ¹, UMBERTO MORRA DI CELLA ²,
JEANNETTE NOETZLI ³, PAOLO POGLIOTTI ^{2,5}, ANTOINE RABATEL ¹, LUDOVIC RAVANEL ¹,
BENJAMIN SADIÉ ¹, SARAH VERLEYS DONK ⁴

¹ Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie/CNRS, Campus scientifique, F 73376 Le Bourget-du-Lac cedex.

² ARPA, Valle d'Aosta, Italy.

³ Glaciology, Geomorphodynamics & Geochronology Group, University of Zurich, Switzerland.

⁴ Geographisches Institut, Universität Bonn, Germany.

⁵ GEOSITLAB, Università di Torino, Italy.

Contact : philip.deline@univ-savoie.fr

RÉSUMÉ

Le permafrost et ses modifications dans les parois rocheuses de haute montagne restent insuffisamment compris, en particulier du fait de la rareté des sites instrumentés. D'où l'intérêt de développer des recherches à l'Aiguille du Midi (3842 m), aux expositions et pentes variées, et dont les parois et galeries sont accessibles toute l'année. Dans le cadre du projet PermaNET, nous y suivons le régime thermique dans la roche, (i) avec 9 capteurs à un ou trois thermistors implantés jusqu'à 55 cm de profondeur ; (ii) par tomographie électrique résistive, sur la base de la relation température/résistivité du granite local ; (iii) par thermographie infrarouge sur les parois. Ces mesures sont complétées par deux stations météo automatiques mobiles, tandis qu'il est prévu l'installation de chaînes de thermistors d'une dizaine de mètres de profondeur. Ces données seront utilisées pour valider des modèles physiques ou construire des modèles statistiques de la distribution de la température de la roche et sa variabilité. Par ailleurs, un MNT à haute résolution réalisé à l'aide de laserscans terrestres longue et courte portées (pour les parois et dans les galeries respectivement) servira de support à la modélisation numérique (i) de la fracturation de la roche et de la circulation d'eau dans les fractures non saturées ; (ii) de la distribution 3D et de l'évolution des températures de subsurface. Enfin, le suivi de la face SE de l'Arête des Cosmiques et du Pilastre SE à l'aide d'un laserscan terrestre longue portée complète des datations cosmogéniques sur certaines parois pour documenter la morphodynamique passée et actuelle du site.

MOTS-CLÉS : PERMAFROST, RÉGIME THERMIQUE DE LA ROCHE, LASERSCAN TERRESTRE, TOMOGRAPHIE ÉLECTRIQUE RÉSISTIVE, MASSIF DU MONT BLANC.

ABSTRACT

Permafrost and its change in steep high-Alpine rock walls remain insufficiently understood especially because of the scarcity of existing instrumented sites. Thus, it is very interesting to develop investigations at the Aiguille du Midi (3842 m a.s.l), where rockwalls with diverse aspects and slopes, and galleries are accessible year-round. In the framework of the project PermaNET, we monitor the rock thermal regime, (i) with 9 sensors with one or three thermistors installed up to 55 cm deep; (ii) using electrical resistivity tomography (ERT), based on the temperature-resistivity relationship of the local granite; (iii) by infrared thermography on the rockwalls. These measurements are completed by two mobile automatic weather stations, while the installation of thermistor chains up to a depth of 10 m is planned. These data will be used for physically-based model validation or construction of statistical models of rock temperature distribution and variability in the rock walls. A 3D-high-resolution DEM made using long-range and short-range terrestrial laser scanning (for rockwalls and galleries, respectively) will help for numerical modelling of (i) rock fractures and water flow in unsaturated fractures; (ii) the 3D distribution and evolution of temperature fields in the subsurface. Finally, monitoring of the Arête des Cosmiques SE face and SE Pilastre by long-range terrestrial laser scanning, combined with cosmogenic dating of some rockwalls will document the past and present morphological activity of the site.

KEYWORDS: PERMAFROST, ROCK THERMAL REGIME, TERRESTRIAL LASER SCANNING, ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY, MONT BLANC MASSIF.

INTRODUCTION



Au cours de la dernière décennie, de grands écroulements rocheux tels que celui de Kolka-Karmadon dans le Caucase en 2002 (Huggel *et al.*, 2005) ont affecté la plupart des massifs de haute montagne dans le monde. Dans les Alpes, les écroulements de la Brenva (massif du Mont-Blanc en 1997 ; Deline, 2001), de la Punta Thurwieser (massif de l'Ortles-Cevedale en 2004 ; Sosio *et al.*, 2008) ou du Mont Rose (Fischer *et al.*, 2006) sont les exemples les plus marquants de cette période, tandis que d'innombrables éboulements (volume < 100 m³) et petits écroulements ont affecté les parois rocheuses alpines pendant l'été caniculaire 2003, depuis le massif des Ecrins jusqu'aux Hohe Tauern.

Ces parois d'altitude sont caractérisées par la présence de permafrost, défini comme une condition thermique de la roche caractérisée par une température négative pendant au moins deux années consécutives. Certains de ces écroulements sont probablement liés à une dégradation du permafrost contrôlée par le climat (Gruber et Haeberli, 2007), comme le suggèrent la présence de glace ou les écoulements d'eau dans certaines niches d'arrachement, l'augmentation de la température moyenne de l'air et la modélisation. Toutefois, deux problèmes rendent difficile l'étude de cette hypothèse d'une relation entre la dégradation du permafrost de paroi liée au réchauffement climatique et les écroulements rocheux. D'une part, en raison de l'absence d'observations systématiques, la fréquence et le volume des écroulements en haute montagne restent mal connus, y compris pendant les dernières décennies dans un massif aussi anthropisé que les Alpes. D'autre part, le permafrost et ses modifications dans les parois rocheuses

Figure 1 - L'Aiguille du Midi (3842 m).

A : vue depuis l'est ; au centre, Pilier central ; à droite, Pilier nord avec gare d'arrivée du téléphérique ; sur la marge gauche, amorce du Pilastre SE. B : versant ouest de l'Aiguille du Midi (commandement 1000 m) ; au pied, glacier des Bossons et glacier Rond ; à gauche, dans l'ombre, versant nord du groupe de l'Aiguille du Midi, largement englacé. C : sous le pylone TDF, face nord subverticale du Piton central (commandement 100 m). D : versant SE (commandement : 200 m) ; à gauche, amorce de l'Arête des Cosmiques ; à droite, Pilastre SE.

affectées par ces écroulements restent insuffisamment compris : une grande partie des études sont fondées sur la modélisation, avec de rares sites instrumentés du fait des contraintes rencontrées pour réaliser des mesures in situ en haute montagne.

En Suisse, dix forages ont été réalisés ces dernières années dans le substratum en haute montagne, entre 2400 et 3590 m. Profonds de 14 à 100 m, ils sont équipés de thermistors qui relèvent en continu la température dans la roche, depuis 1995 au Junfraujoch, le site le plus ancien et le plus élevé de PERMOS (PERmafrost MONitoring Switzerland ; Vonder Mühll *et al.*, 2007). Ces forages ont été complétés depuis 2005 par un réseau de 36 thermistors qui mesurent la température de surface de parois rocheuses sur une dizaine de sites (Vonder Mühll *et al.*, 2007). En Italie, trois forages profonds de 6 et 66 m (Cimes Blanches, 3100 m) et 100 m (Passo del Stelvio, 3000 m) ont été réalisés dans le substratum depuis 1998 (Harris *et al.*, 2003), mais aucun ne concerne toutefois une paroi rocheuse. En France, aucune paroi de haute altitude n'avait été jusqu'alors instrumentée.

Nous avons retenu l'Aiguille du Midi (figure 1) pour :

- son altitude, puisque ce sommet très emblématique culmine à 3842 m, ce qui en fait le site d'étude du permafrost alpin le plus élevé ;
- sa géométrie, avec toutes les expositions représentées, les pentes à angle variable, et un enneigement d'une durée également variable ;
- l'enjeu économique qu'il constitue, car grâce à la liaison avec Chamonix par téléphérique depuis 1955, l'Aiguille du Midi reçoit un demi-million de visiteurs annuels ;
- son accessibilité toute l'année, y compris les parois du Piton central, accessibles en rappel depuis la terrasse supérieure, et les galeries, qui permettent de pénétrer la masse rocheuse – ce qui est rare en haute montagne, et a permis par exemple d'observer d'importantes arrivées d'eau pendant l'été 2003 (pour la première fois depuis l'ouverture du site).

Cet article s'attache principalement à présenter le cadre dans lequel s'inscrivent des travaux dont la programmation s'étale sur plusieurs années, les méthodes qui sont utilisées et l'instrumentation qu'ils nécessitent. Les premiers résultats acquis depuis 2006 sont ensuite présentés.

I - LE CADRE SCIENTIFIQUE DES ÉTUDES À L'AIGUILLE DU MIDI

Nos travaux à l'Aiguille du Midi ont commencé en novembre 2005, pendant la préparation du projet de recherche franco-italien PERMAdatAROC (Deline *et al.*, 2008 ; http://www.fondazionemontagnasicura.org/multimedia/permadataroc/start_fra.htm). Réalisé de mars 2006 à juin 2008 dans le cadre du programme Interreg III Alcotra, ce projet associait trois partenaires italiens (FMs, ARPA VdA et CNR-IRPI) et le laboratoire EDYTEM. PERMAdatAROC visait à poser les fondements méthodologiques et instrumentaux pour une étude de la relation entre dégradation du permafrost et instabilité des parois rocheuses de haute montagne dans deux secteurs des Alpes nord-occidentales (massif du Mont Blanc et Cervin), en croisant les trois axes de recherche suivants :

- recensement et analyse des éboulements et écroulements actuels dans le massif du Mont Blanc (*CENSI_CRO*) : cet inventaire des événements actuels et de leurs caractéristiques (localisation, exposition, période, conditions météorologiques et d'enneigement, volume, parcours) est réalisé par un réseau d'observateurs (guides, gardiens de refuge, secouristes), en collaboration avec les chercheurs, qui analysent ces données (paramètres topographiques, géologiques et climatiques des parois rocheuses affectées). Cette base de données est complétée par une seconde qui contient les événements passés, compilés à partir de la presse, d'entretiens, d'archives et d'études antérieures ;

- mesure et modélisation du régime thermique dans les parois rocheuses (*PERMA_TEMP*) : cette action combine l'installation de thermistors dans la roche sur huit sites (entre 3300 et 4000 m d'altitude) du massif du Mont Blanc (dont l'Aiguille du Midi) et du Cervin, et la mesure des paramètres topo-climatiques qui caractérisent la surface de ces parois ;
- suivi des éboulements et écroulements actuels sur onze parois types du massif du Mont Blanc (dont l'Aiguille du Midi) et du Cervin (*PERMA_CRO*) : la détermination de leur fréquence et de leur intensité est obtenue par des mesures au minimum annuelles à l'aide d'un laserscan (ou LiDAR, *Light Detection And Ranging*) terrestre (Deline *et al.*, 2008). Un réseau de géophones pour la détection acoustique des éboulements a, par ailleurs, été installé à titre expérimental sur l'un des sites du Cervin.

Nos recherches sur la relation entre dégradation du permafrost et instabilité des parois rocheuses se poursuivent actuellement dans le cadre du projet *PermaNET* (*Permafrost long-term monitoring network*: www.permanet-alpinespace.eu). Il associe, dans le cadre du programme de *Coopération Territoriale Européenne Espace Alpin* (2007-2013) financé par l'Union Européenne, quatorze partenaires, autrichiens (4), allemand (1), suisse (1), italiens (5) et français (3), dont le laboratoire EDYTEM. D'une durée de 3 ans, ce projet doté d'un budget de 3,3 millions d'euros a débuté en

juillet 2008. Ses principaux objectifs sont :

- l'amélioration de la connaissance de la distribution spatiale du permafrost, par la compilation des données existantes et l'établissement d'une carte des Alpes ;
 - la mise en place d'un réseau d'observation et de mesure du permafrost pour le suivi à long terme de son évolution ;
 - la compréhension de la réaction du permafrost au changement climatique à différentes échelles de temps ;
- une meilleure caractérisation des phénomènes géomorphologiques liés à la dégradation du permafrost et susceptibles d'engendrer des aléas, en vue de leur gestion ;
 - l'évaluation de l'impact de l'évolution du permafrost sur la ressource en eau ;
 - la sensibilisation des décideurs, acteurs et usagers de la montagne aux problématiques liées au permafrost.

Dans le cadre de *PermaNET*, l'Aiguille du Midi est devenue un site majeur pour l'étude du permafrost de paroi dans les Alpes.

II - LE SITE D'ÉTUDE

Le massif du Mont Blanc se caractérise par une extraordinaire combinaison d'aiguilles, parois et glaciers. Son énergie de relief est considérable, avec une dizaine de groupes qui dépassent 4000 m d'altitude et le maintien d'une centaine de glaciers, dont la Mer de Glace, le plus étendu des Alpes occidentales. Le massif cristallin externe du Mont Blanc correspond pour l'essentiel à un batholite de granite hercynien, basculé

vers le NW au Tertiaire et découpé en panneaux par de grandes failles subverticales varisques et alpines, les premières ayant rejoué durant la phase alpine. Ces multiples contraintes tectoniques l'ont fracturé selon des plans d'orientation variable qui peuvent se recouper. Du fait de cette structure cassante et de leur raideur, les versants du massif sont généralement propices aux mouvements de masse.

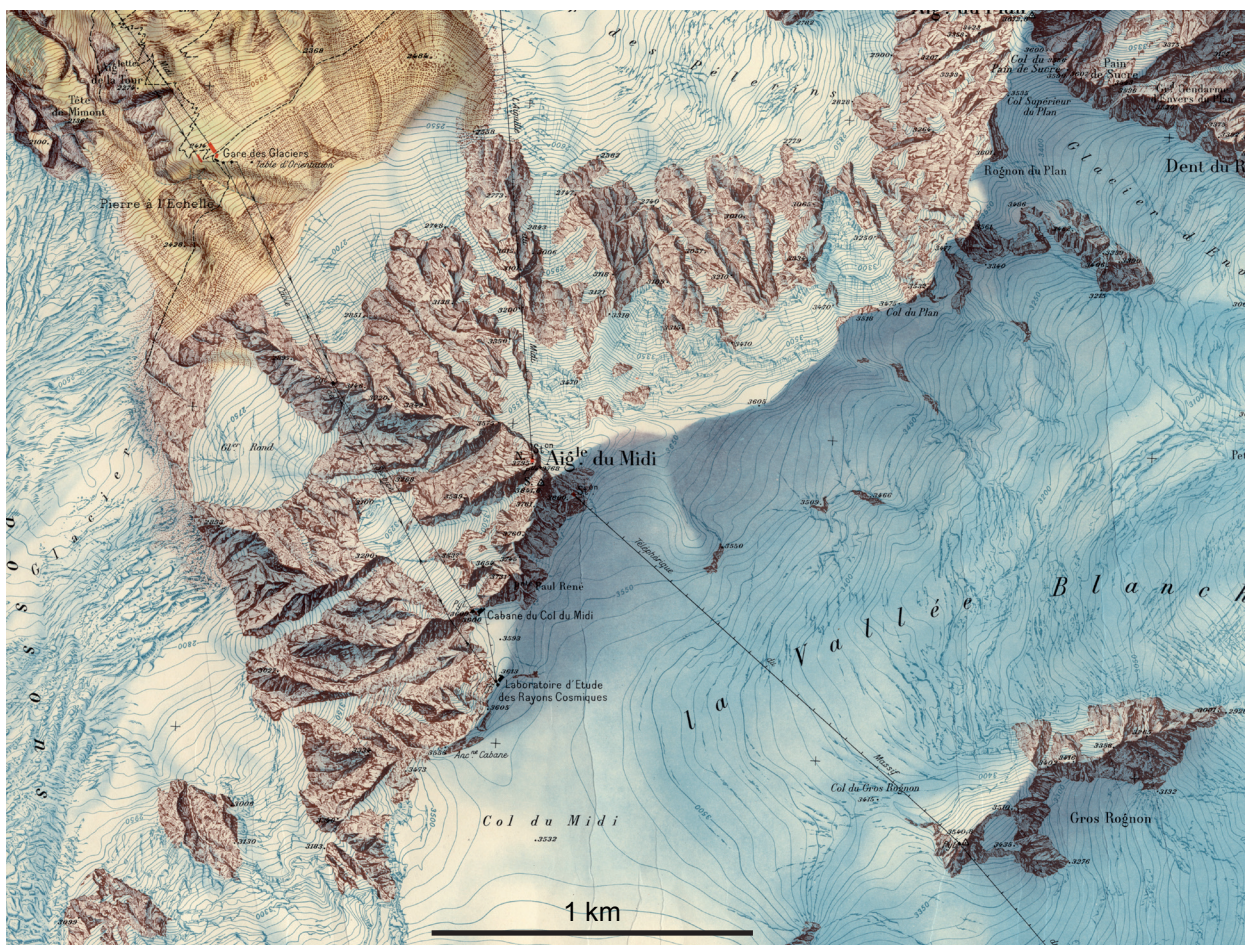


Figure 2 - Groupe de l'Aiguille du Midi. Extrait de la feuille Mont Blanc n°1 Nord - Aiguille du Midi de l'IGN (1952) à 1:10 000 (équidistance : 10 m ; © IGN, Paris 2009 - Autorisation n° 80-9026.). Le Laboratoire d'Etude des Rayons Cosmiques est aujourd'hui remplacé par le refuge des Cosmiques.

III - MÉTHODES ET INSTRUMENTATION

1 - Connaître la géométrie du site : réalisation d'un MNT par laserscanning terrestre

Pour l'ensemble des études envisagées, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à haute résolution du site s'avère indispensable, faute d'une cartographie à très grande échelle que la subverticalité des parois ne favorise pas. Ce MNT est nécessaire pour rendre compte avec précision des volumes rocheux, mais il est également le fondement d'une analyse de la structure géologique, et doit permettre d'affiner la modélisation de la distribution de la température de la roche. Enfin, toute étude de la circulation de l'eau dans la roche devra s'appuyer sur un tel MNT. La possibilité qu'il combine topographie externe (parois) et interne (galeries) constitue un avantage remarquable pour ces différentes études.

Ce MNT est réalisé à partir de données acquises à l'aide de laserscans terrestres. La mesure par laserscan est basée sur l'émission-réception d'un signal lumineux dans l'infrarouge à très faible dispersion spatiale et grande précision temporelle. La mesure du temps de vol (trajet aller-retour du rayon laser) permet celle de la distance jusqu'à plusieurs centaines de mètres avec une précision du centimètre. Cette distance, associée à la connaissance des deux angles d'émission du rayon avec l'horizontal et la verticale permet de déterminer les coordonnées en x, y et z du point balayé. Un laserscan émet et reçoit plusieurs milliers d'impulsions par seconde, ce qui permet de lever rapidement et à haute résolution de grandes surfaces topographiques. Ainsi, le laserscan longue portée Optech ILRIS 3D du laboratoire EDYTEM acquiert 2000 points par seconde avec un angle de mesure de $40^\circ \times 40^\circ$ jusqu'à une distance utile de 800 m (sur rocher) avec une grande précision : la résolution d'acquisition d'un point et l'exactitude du modèle sont de l'ordre de 3 mm à 100 m. Les données numériques obtenues sont transformées pour être traitées dans la suite logicielle InnovMetric PolyWorks, qui intègre un ensemble d'outils de traitement de nuages de plusieurs millions de points. Une fois constitué un nuage de points général, celui-ci est transformé automatiquement en un modèle polygonal 3D à haute résolution de type TIN (*Triangulated Irregular Network*), utilisé pour mesurer des caractères géométriques de la paroi, extraire des entités géométriques et construire le MNT (Ravel et Deline, 2006).

Pour limiter les masques (secteurs non balayés par le laserscan depuis une station, du fait de la topographie de la paroi), plusieurs stations sont généralement retenues, bien que l'isolement de l'Aiguille du Midi réduise le nombre de stations potentielles.

Le ILRIS 3D ayant une portée minimale de 3 m, les relevés laserscan dans les galeries ont été réalisés dans un premier temps avec un Faro CAM2 880 d'une portée minimale de 0,6 m, avec un angle de

mesure de $320^\circ \times 360^\circ$ et une vitesse d'acquisition de 120 000 points par seconde. Le fonctionnement de cet appareil est toutefois contraint par la température de l'air, qui doit être positive ; les galeries du Piton central n'ont ainsi pu être relevées au cours de la première mission laserscan courte portée, bien qu'elle ait eu lieu lors de l'une des journées les plus chaudes de l'été 2008. Il a été remplacé pour la mission de 2009 par un Leica HDS 6000, laserscan courte portée dont le fonctionnement a été garanti par un chauffage d'appoint à soufflerie. Le traitement des données Faro et Leica se fait dans Polyworks.

2 - Mesurer et modéliser la température de l'air et de la roche

a - Mesures directes dans la roche et dans l'air

Pour un suivi en continu du régime thermique des parois rocheuses sur le site de l'Aiguille du Midi, 9 capteurs Geoprecision M-Log6 (résolution : $0,01^\circ\text{C}$; précision : $\pm 0,05^\circ\text{C}$ à 0°C) ont été implantés dans la roche depuis 2005, sur des parois dont l'angle de pente (qui contrôle la présence de la neige) est compris entre 60° et 90° . Deux types de capteurs conçus par l'ARPA VdA dans le cadre de *PERMAdatoROC* sont installés, à thermistor unique, positionné à 10 cm de profondeur, et à 3 thermistors, positionnés dans la roche à 3,30 et 55 cm de profondeur. Trois capteurs Geoprecision M-Log1 mesurant la température et l'humidité de l'air sur les faces nord (1) et sud (2) complètent les capteurs dans la roche. Le datalogger de chaque capteur a une autonomie de trois ans et est déchargé via un port IR. Le pas des mesures retenu pour le site est de 10 minutes.

Deux stations météorologiques automatiques ont également été installées sur les faces nord et sud du Piton central. Elles mesurent la température et l'humidité de l'air à 10 cm de la surface de ces parois, la vitesse et la direction du vent (capteur à ultrasons Vaisala WMT50) et, en face sud, la radiation solaire de courte et de grande (IR) longueur d'onde, incidente et réfléchie (radiomètre Kipp & Zonen CNR1). Ces stations sont vulnérables aux conditions météo de haute altitude (vent, accumulation de neige et de givre sur leurs éléments), et la station en face nord n'a fonctionné que quelques mois en 2008 avant d'être très endommagée par la chute d'un gros glaçon.

b - Tomographie électrique résistive

La tomographie électrique résistive (ERT) permet d'obtenir l'image d'un volume rocheux par une « coupe » de la résistivité en fonction de la profondeur. Elle consiste à injecter un courant électrique

entre deux électrodes et à mesurer la différence de potentiel induite entre une autre paire d'électrodes. Intensité injectée, différence de potentiel et écartement entre les différentes électrodes permettent de déterminer la résistivité électrique de la roche (loi d'Ohm). L'écartement entre électrodes détermine les résolutions horizontale et verticale ainsi que la profondeur d'investigation : variable suivant la résistivité, elle est égale à la moitié du plus grand écartement utilisé entre deux électrodes successives en configuration Wenner. L'établissement d'une relation température/résistivité de la roche permet de déduire la présence éventuelle de permafrost (Krautblatter et Hauck, 2007).

En mettant à profit l'accessibilité des parois et des galeries de l'Aiguille du Midi, il a été décidé l'organisation de plusieurs campagnes d'ERT chaque année, afin de reconnaître la distribution du permafrost dans la masse rocheuse et son évolution saisonnière (Krautblatter *et al.*, soumis). Pour cela, des mesures de la relation température/résistivité du granite du site ont été effectuées au laboratoire de géographie de l'Université de Bonn. La tomographie est réalisée à l'aide d'un Heritage Geophysics SYSCAL Pro qui délivre 800 V, relié à des flûtes de 48 électrodes d'acier placées dans des trous forés. Le protocole retenu prévoit 3000 mesures dipôle-dipôle par flûte, et 200 mesures de type cross-borehole. La polarisation induite est mesurée pour vérifier la capacité de charge des fissures remplies de matériel fin. La méthode d'ERT permettra d'obtenir une carte 3D du permafrost, que les mesures ponctuelles par thermistors (puis forages décamétriques) et les données météo valideront.

c - Thermographie

Une première expérience de thermographie a été faite à l'Aiguille du Midi en 2007. La thermographie mesure la radiation émise dans l'infrarouge par tout corps dont la température est supérieure à 0K (-273,15°C). Cette radiation IR étant dépendante de la température de surface du corps, une caméra thermographique procure à distance une image thermique en fausses couleurs qui représente cette température avec ses variations spatiales. La répétition des mesures autorise alors une analyse diachronique de la température radiative pour l'ensemble de la surface d'une paroi. Toutefois, la radiation enregistrée par la caméra dépend également de l'émissivité de la paroi, de l'angle de mesure, de la température et de l'humidité de l'air qui sépare la paroi de la caméra (distance sur le site : jusqu'à 150 m), et des interférences induites par les objets environnants. Pour vérifier ces perturbations et évaluer l'intérêt de la méthode, nous avons procédé à une expérience préliminaire de comparaison de mesures réalisées avec une caméra thermographique portable Flir ThermaCAM P640 de l'ARPA VdA avec les données fournies localement par les thermistors des parois mesurées.

d - Modélisation du permafrost

La température de surface d'une paroi subverticale est contrôlée par la température annuelle moyenne de l'air (TAMA), fonction de l'altitude, et par la radiation solaire potentielle (RSP) reçue par la paroi, fonction de la topographie (exposition, pente) de celle-ci. Du fait de la subverticalité de la paroi, la couverture nivale peut être négligée. La TAMA peut être déduite des données des stations météorologiques locales ou/et de modèles climatiques régionaux, auxquels on applique le gradient thermique altitudinal moyen ; la RSP (ondes courtes) est calculée par un logiciel. On peut donc, sur la base de ces deux paramètres, construire un modèle de la température annuelle moyenne de la surface des parois (TAMSP) du massif du Mont Blanc, à partir d'un MNT de celui-ci. Les données climatiques à la surface des parois recueillies par les stations météo automatisées de l'Aiguille du Midi et les températures mesurées dans la roche par les différents thermistors du site sont utilisées pour valider ce type de modèle de distribution de la TAMSP.

3 - Analyse structurale du site et circulation de l'eau dans la masse rocheuse

L'un des objectifs des prochaines années est la modélisation numérique de la fracturation de la roche et de la circulation d'eau potentielle dans les fractures non saturées du site, en s'appuyant sur les résultats obtenus. Cette étude devrait être conduite par un ingénieur géologue, utilisant des logiciels de type GoCad pour réaliser le modèle des fractures, et FeFlow pour modéliser en pseudo-3D les transferts de chaleur associés au degré de fracturation et à la présence de glace au sein du massif rocheux ainsi que les écoulements par fusion et leur rôle potentiel dans l'advection de chaleur. L'accessibilité remarquable du site de l'Aiguille du Midi (parois et galeries) et la grande quantité de données qui seront disponibles permettront de contraindre la modélisation dans l'estimation de ses paramètres, de vérifier la pertinence des hypothèses formulées dans le modèle, et d'analyser les incertitudes de modélisation. Des études de sensibilité pourront alors être menées avec cet outil de modélisation pour prédire les incertitudes associées à cette approche quand elle est appliquée à d'autres sites-pilotes du massif du Mont Blanc pour lesquels on dispose de MNT à haute résolution mais avec des données de température dans la roche en nombre réduit.

4 - Mesurer l'instabilité actuelle et passée des parois rocheuses

Contrairement aux autres sites pilotes du massif du Mont Blanc qui sont suivis par laserscan, les parois du

secteur sommital de l'Aiguille du Midi ont bénéficié de travaux de confortement très importants : purges, tirants métalliques parfois plurimétriques, filets... Ces travaux sont décidés chaque année sur la base d'une étude géotechnique conduite par un bureau d'études spécialisé. Par conséquent, le MNT en cours de réalisation ne sert pas de support à une étude diachronique de la stabilité de ces parois. En revanche, le versant SE de l'Aiguille du Midi et de l'Arête des Cosmiques a connu des éboulements/écroulements au cours de ces dernières années (Ravanel, 2007) – dont certains affectent le soubassement du refuge des Cosmiques (figure 2). Il est donc prévu que ce secteur constitue, dans le cadre du projet *PermaNET*, un site-pilote supplémentaire pour le suivi diachronique de la morphodynamique des parois du massif. Un premier relevé par laserscan terrestre longue portée est prévu à l'automne 2009 depuis

le plateau glaciaire, sur lequel les nombreuses stations possibles devraient permettre un faible effet de masque topographique.

Enfin, l'accessibilité de l'Aiguille du Midi et son granite très riche en quartz expliquent le choix de ce site pour la première datation par la méthode cosmogénique de parois supraglaciaires alpines (Böhlert *et al.*, 2008). Cinq échantillons ont été prélevés sur la face sud de l'Aiguille du Midi et sur le premier pilier de l'Arête des Cosmiques (orienté SE), entre 3740 et 3810 m d'altitude, dans des secteurs dont la couleur du rocher de gris clair à orange foncé suggérait un âge croissant. Le temps d'exposition a été déterminé à partir du rapport $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ mesuré par AMS, avec l'hypothèse que le ^{10}Be mesuré a été produit à la surface pendant la dernière période d'exposition et que la paroi n'a pas été érodée (Böhlert *et al.*, 2008).

IV - PREMIERS RESULTATS ET PERSPECTIVES

1 - Le MNT général du site

Le MNT général de l'Aiguille du Midi est actuellement en construction (figure 4). La partie externe (parois) a été réalisée à partir d'une série de relevés topographiques par laserscan longue portée :

- faces nord et NW du Piton central le 19/12/2006, depuis deux stations situées sur les terrasses du Piton nord ;
- faces ouest et sud du Piton central le 25/05/2007, depuis l'Arête des Cosmiques ;
- face sud du Piton nord le 03/05/2008 depuis la terrasse sommitale du Piton central et les fenêtres de la galerie principale ;

- faces sud et est du Piton central le 02/07/2008, depuis la terrasse SE du Piton central et l'arête de neige d'accès à la Vallée Blanche ;

Ces relevés des parois ont été récemment complétés par deux relevés laserscan courte portée dans les galeries :

- galeries du Piton nord le 01/07/2008 ;
- galeries du Piton central le 06/03/2009 ; ces données sont en cours de traitement (figure 5).

Le calage du MNT interne par rapport au MNT externe (des points communs ont été relevés avec une station totale) sera réalisé dans les prochains mois, puis le MNT général (interne-externe) sera géoréférencé à l'aide d'une mission DGPS qui s'appuiera sur le point de référence établi par le LGGE sur l'Arête des Cosmiques.

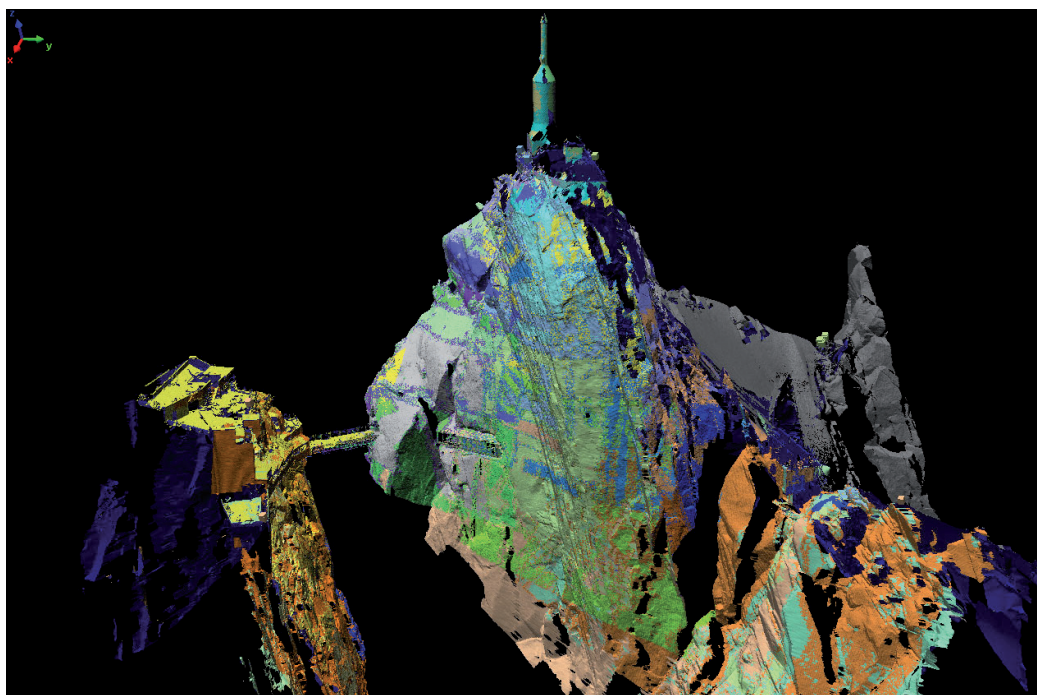


Figure 4 - Modèle polygonal 3D (TIN) des Pitons nord et central, réalisé par laserscanning longue portée. Les couleurs correspondent aux différentes scènes qui ont été assemblées.

2 – Trois années de données de température (mesures, modélisation, ERT, thermographie)

Les quatre premiers capteurs à thermistor unique ont été installés en sub-surface (10 cm de profondeur) le 09/11/2005 au sommet du Piton central, sur les faces sud, ouest, nord et est (en exposition SE sur cette dernière). Puis quatre capteurs à 3 thermistors ont été mis en place le 20/12/2006 sur ces mêmes faces sud, est et nord (en contrebas de ceux de 2005), complétés le 26/01/2007 par un cinquième sur la face ouest.

Pendant la période 21/12/2006 - 21/12/2008, la face sud a été caractérisée par une température moyenne annuelle proche de 0°C, plus de 270 jours (sur un total de 730 jours) avec une température négative, une amplitude thermique maximale très forte et des cycles gel-dégel nombreux (tableau 1). La face nord est plus froide (température moyenne annuelle < -6°C) et connaît une

amplitude thermique moindre, avec des cycles gel-dégel environ 50 % moins nombreux (tableau 1). La température de surface des parois rocheuses est donc principalement contrôlée par la topographie. En effet, du fait de l'exposition, la température sur la face sud dépend de la radiation solaire directe, tandis que celle en face nord est contrôlée par la température de l'air. Par ailleurs, la pente détermine le dépôt de neige ou de débris rocheux, isolants.

La première station météo automatique a également été installée le 20/12/2006 sur la face sud, tandis que la seconde a été posée sur la face nord le 07/02/2008. Leurs données montrent, par exemple, que sur les parois subverticales exposées au sud, le rayonnement net (différence entre rayonnement incident et réfléchi) est plus élevé en hiver qu'en été, en raison de la plus faible élévation du soleil sur l'horizon (figure 6). Le rayonnement direct est ainsi maximal en mars (> 1300 W/m²), d'où des amplitudes thermiques journalières hivernales qui peuvent atteindre 30°C.

Une première campagne de reconnaissance de la distribution du permafrost dans la masse rocheuse de l'Aiguille du Midi par tomographie électrique résistive a été réalisée les 08-09/12/2008. Deux transects horizontaux ont été réalisés dans les galeries principales des Pitons nord et central et le long de la face est de celui-ci (figure 7), complétés par un transect vertical sur les faces nord et sud du Piton central. Les principales fissures ont été relevées pour prendre en compte leur capacité de charge éventuelles, et les mesures de tomographie électrique et de polarisation induite ont été faites en orientation normale et réciproque pour définir la marge d'erreur des mesures. Les données acquises sont en cours de traitement.

Les mesures de thermographie réalisées le 05/04/2007 sur les faces nord et sud du Piton central

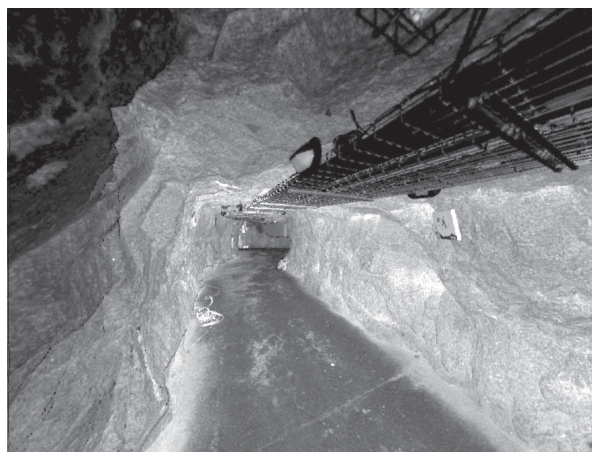


Figure 5 - Nuage de points dans la galerie « Vallée Blanche » du Piton nord de l'Aiguille du Midi, acquis par laserscanning courte portée.

Site:ADMS // Période: 21/12/2006--21/12/2008														
Profondeur (m)	TAMSP (°C)	MAXabs (°C)	MINabs (°C)	DayMAXabs (jj/mm/aa)	DayMINabs (jj/mm/aa)	dTavg (°C)	dTmax (°C)	dTmin (°C)	ZCD (jours)	MAXday (°C)	MINday (°C)	DayMAXday (jj/mm/aa)	DayMINday (jj/mm/aa)	DBZ (jours)
0.03	-0.06	32.74	-21.75	08/10/07	23/11/08	17.81	31.78	1.62	331	14.74	-19.74	06/08/07	22/11/08	275
0.3	0.18	16.4	-15.71	09/10/07	07/12/08	5.51	10.61	0.4	151	12.45	-14.02	12/09/07	06/12/08	271
0.55	-0.16	12.18	-13.48	13/09/07	07/12/08	2.37	6.09	0.32	63	11.02	-12.02	13/09/07	06/12/08	280

Site:ADMN // Période: 21/12/2006--21/12/2008														
Profondeur (m)	TAMSP (°C)	MAXabs (°C)	MINabs (°C)	DayMAXabs (jj/mm/aa)	DayMINabs (jj/mm/aa)	dTavg (°C)	dTmax (°C)	dTmin (°C)	ZCD (jours)	MAXday (°C)	MINday (°C)	DayMAXday (jj/mm/aa)	DayMINday (jj/mm/aa)	DBZ (jours)
0.03	-6.32	13.53	-22.71	25/06/08	24/03/08	5.69	15.24	0.45	232	5.84	-21.07	25/06/08	24/03/08	571
0.3	-6.3	5.36	-19.34	30/06/08	25/03/08	1.71	6.1	0.11	91	3.5	-18.78	25/06/08	25/03/08	591
0.55	-6.16	2.9	-17.36	01/07/08	25/03/08	0.72	3.75	0.04	48	2.5	-17.12	01/07/08	25/03/08	598

Tableau 1 - Données de température sur les parois sud et nord du Piton central de l'Aiguille du Midi pour la période 21/12/2006 – 21/12/2008 (ADMS : face sud ; ADMN : face nord).

TAMSP : T° annuelle moyenne ;
 MAXabs, MINabs : T° absolue maximale, minimale ;
 DayMAXabs, DayMINabs : jour d'occurrence de la T° absolue maximale, minimale ;
 dTavg, dTmin, dTmax : amplitude thermique journalière moyenne, maximale, minimale ;
 ZCD (Zero Crossing Days) : nombre de jours à gel-dégel
 MAXday, MINday : T° moyenne journalière maximale, minimale pour la période ;
 DBZ (Days Below Zero) : nombre de jours avec une T° moyenne < 0 °C

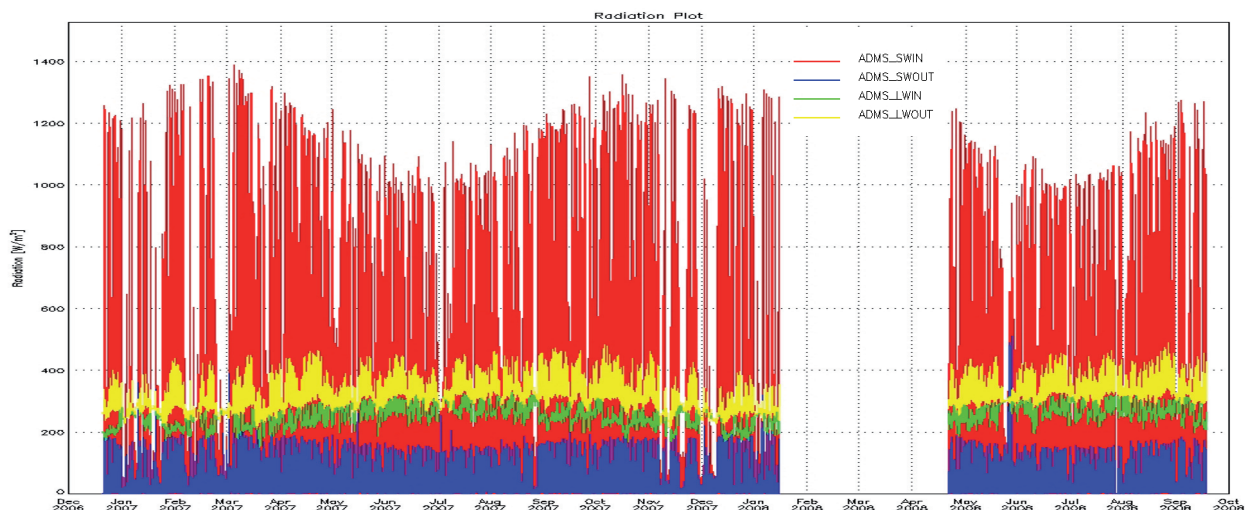


Figure 6 - Données de radiation incidente et réfléchie à courte (SWIN, SWOUT) et grande (LWIN, LWOUT) longueur d'onde (en W/m^2) recueillies par la station météorologique automatique de la face sud du Piton central de l'Aiguille du Midi (période 21/12/2006 – 21/09/2008). Absence de données de mi-janvier à mi-avril 2008.

mettent en évidence à la fois le fort contraste de température de surface entre les deux parois, et la variabilité de celle-ci sur chacune de ces parois : elle est ainsi comprise entre $-2^{\circ}C$ et $-19^{\circ}C$ pour la face nord (figure 8). Pour tester la précision de la thermographie, huit mesures de la face nord ont été réalisées toutes les cinq minutes, dont les valeurs ont été ensuite comparées avec les données enregistrées à -3 cm et aux mêmes moments par un thermistor : l'écart entre les deux jeux de données est inférieure ou égale à $0,4^{\circ}C$. Ces résultats préliminaires sont encourageants et feront l'objet de développements.

Plusieurs modèles statistiques de distribution de la température de surface des parois ont commencé d'être élaborés pour le massif du Mont Blanc (figure 9). Si l'échelle de ces modèles ne permet pas de distinguer très finement la distribution de la température à l'Aiguille du Midi, le modèle représenté ici propose une température comprise grossièrement entre $-7^{\circ}C$ et $-13^{\circ}C$ pour la face nord du Piton central (figure 9), à comparer à la température moyenne de la face nord inférieure à $-6^{\circ}C$ (tableau 1).



Figure 7 - Mesure de tomographie électrique résistive sur la face est du Piton central de l'Aiguille du Midi en décembre 2008.

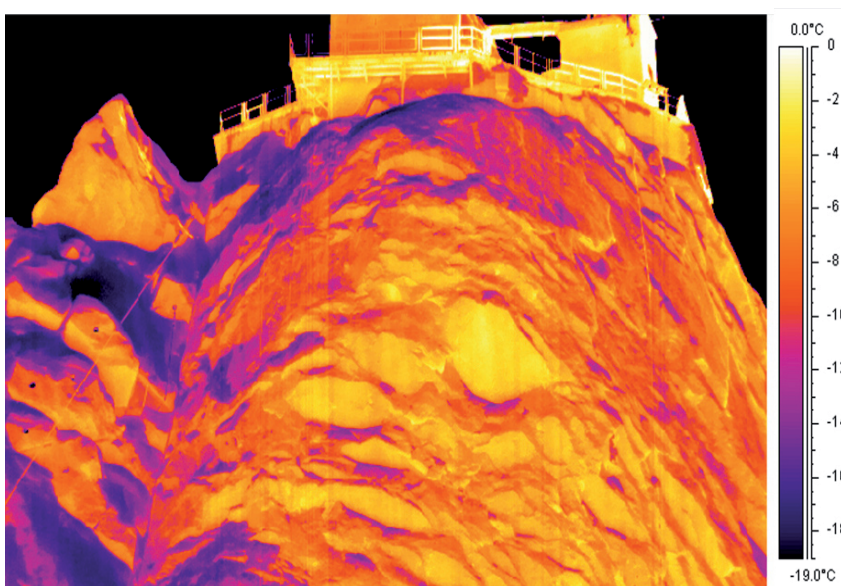


Figure 8 - Image thermographique infrarouge de la face nord du Piton central de l'Aiguille du Midi (05/04/2007) ; température de surface comprise entre $-2^{\circ}C$ et $-19^{\circ}C$.

3 - L'instabilité des parois de l'Aiguille du Midi depuis 40 000 ans

Les dates ^{10}Be montrent une bonne corrélation entre intensité de la couleur orange due à la patine et âge, et une large distribution des âges obtenus : entre 1500 et

6500 ans ^{10}Be pour quatre échantillons, mais atteignant 38 500 ans ^{10}Be pour la paroi la plus âgée (Böhlert et al., 2008). Ainsi, certaines parois de l'Aiguille du Midi semblent si stables qu'elles étaient déjà présentes lorsque le site était un nunatak dominant le grand glacier du Dernier Maximum Glaciaire.

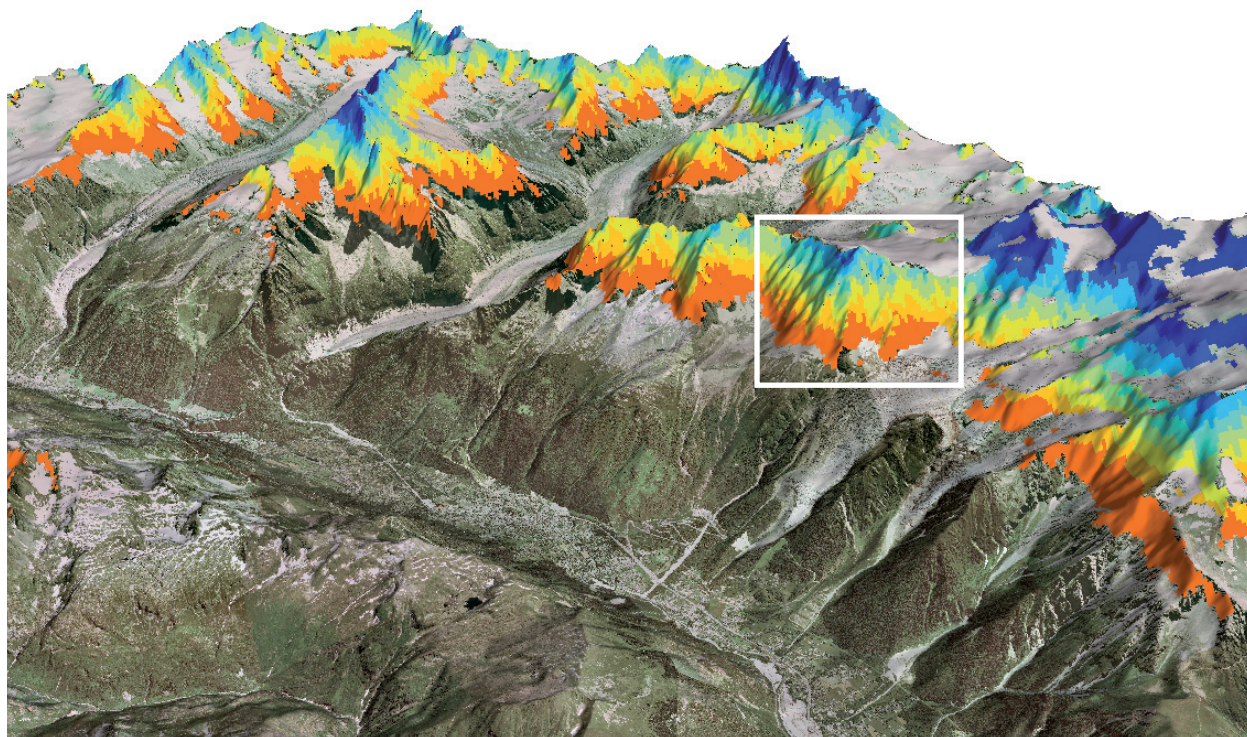


Figure 9 - Distribution modélisée de la température moyenne annuelle de surface des parois rocheuses du massif du Mont Blanc à l'aide du modèle *TEBAL* (vue depuis l'ouest ; drapage : E. Ployon). La température est comprise entre -1°C (orange foncé) et -13°C (bleu foncé) ; encadré : groupe de l'Aiguille du Midi (versants nord et ouest). Orthophoto drapée sur MNT IGN, © IGN, Paris 2009 - Autorisation n° 80-9026.

CONCLUSION

Combiner compréhension des processus, analyses statistiques et modélisation sur un site comme l'Aiguille du Midi permettra de mieux appréhender où, pourquoi et comment la dégradation du permafrost se produit en haute montagne. De plus, la réduction des incertitudes sur les données, les processus et les modèles améliorera notre capacité à prévoir les différents effets induits. Dans les prochains mois, en plus de l'étude de la fracturation du site et de la circulation d'eau induite et le suivi par laserscan des écroulements qui affectent la face SE de l'Aiguille du Midi-Arête des Cosmiques mentionnés *supra*, des recherches et instrumentations complémen-

taires sont prévues à l'Aiguille du Midi dans le cadre du WP4 « Mise en place d'un réseau de suivi du permafrost » de *PermaNET*. Il s'agira : d'installer des chaînes de thermistors dans des forages d'une dizaine de mètres pour mesurer les températures de la roche à plus grande profondeur ; de paramétrer et valider les modèles ; et de réaliser la modélisation numérique de la distribution 3D et de l'évolution des températures de subsurface, basée sur la combinaison de modèles de bilan d'énergie et 3D de conduction de chaleur.

L'Aiguille du Midi est bien en train de devenir un « *hot spot* » pour le permafrost alpin.

Remerciements

Nous remercions la Compagnie du Mont Blanc, et en particulier E. Desvaux, pour la confiance qu'ils nous accordent et les facilités d'accès au site qu'ils nous consentent. Cet article constitue une contribution au projet *PermaNET*, financé par le programme de Coopération Territoriale Européenne Espace Alpin (2007-2013) de l'Union Européenne.

BIBLIOGRAPHIE

- BÖHLERT R., GRUBER S., EGLI M., MAISCH M., BRANDOVÁ D., IVY-OCHS S., KUBIK P.W., DELINE P., HAEBERLI W., 2008. Comparison of exposure ages and spectral properties of rock surfaces in steep, high Alpine rock walls; a field study at Aiguille du Midi (France). In Kane D.L., Hinkel K.M., éd., Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost 2008, Institute of Northern Engineering – University of Alaska Fairbanks, 143-148.
- CORBIN P., OULIANOFF N., 1956. Carte géologique du massif du Mont-Blanc (partie française) à l'échelle du 1/20000 - Feuille Chamonix. Notice explicative suivie d'une planche de coupes géologiques.
- DELINE P., 2001. Recent Brenva rock avalanches (Valley of Aosta): new chapter in an old story? *Supplemento Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 5, 55-63.
- DELINE P., JAILLET S., RABATEL A., RAVANEL L., 2008. Ground-Based LiDAR data on permafrost-related rock fall activity in the Mont-Blanc massif. In Kane D.L., Hinkel K.M., éd. : Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost 2008, Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, 349-354.
- FISCHER L., KÄÄB A., HUGGEL C., NOETZLI J., 2006. Geology, glacier changes, permafrost and related slope instabilities in a high-mountain rock wall: Monte Rosa east face, Italian Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, 761-772.
- GRUBER S., HAEBERLI W., 2007. Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research*, 112, F02S18, doi: 10.1029/2006JF000547.
- HARRIS C., VONDER MÜHLL D., ISAKSEN K., HAEBERLI W., SOLLID J.L., KING L., HOLMLUND P., DRAMIS F., GUGLIELMIN M., PALACIOS D., 2003. Warming permafrost in European mountains. *Global and Planetary Change*, 39, 215-225.
- HUGGEL C., ZGRAGGEN-OSWALD S., HAEBERLI W., KÄÄB A., POLKVOJ A., GALUSHKIN I., EVANS S.G., 2005. The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5 (2), 173-187.
- KRAUTBLATTER M., HAUCK, C., 2007. Electrical resistivity tomography monitoring of permafrost in solid rock walls. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 112, doi:10.1029/2006JF000546.
- KRAUTBLATTER M., VERLEYSDONK S., FLORES-OROZCO A., KEMNA A., soumis. Quantitative temperature-referenced imaging of seasonal changes in permafrost rock walls by high-resolution ERT and implications for rock slope stability (Zugspitze, German/Austrian Alps). *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*.
- RAVANEL L., 2007. Recensement et analyse des écroulements rocheux dans les parois à permafrost de haute montagne. Méthodes et premiers résultats pour le massif du Mont-Blanc. Mémoire de Master 2, Université de Savoie, Chambéry, 84 p.
- RAVANEL L., DELINE P., 2006. Nouvelles méthodes d'étude de l'évolution des parois rocheuses de haute montagne : application au cas des Drus. In Amelot F., éd. : Actes du colloque Géologie et risques naturels - La gestion du risque au Pays du Mont-Blanc. Centre de la Nature Montagnarde, Sallanches, 48-53.
- RAVANEL L., DELINE P., 2008. La face ouest des Drus (massif du Mont-Blanc) : évolution de l'instabilité d'une paroi rocheuse dans la haute montagne alpine depuis la fin du petit âge glaciaire. *Géomorphologie*, 4, 261-272.
- SOSIO R., CROSTA G.B., HUNGR O., 2008. Complete dynamic modeling calibration for the Thurwieser rock avalanche (Italian Central Alps). *Engineering Geology*, 100, 11-26.
- VONDER MÜHLL D., NOETZLI J., ROER I., MAKOWSKI K., DELALOYE R., éd., 2007. Permafrost in Switzerland 2002/2003 and 2003/2004. *Glaciological Report (Permafrost)*, 4-5, 107 p.

NEIGE et GLACE de MONTAGNE

Reconstitution, dynamique, pratiques

Sommaire

Editorial
Introduction

1 - Reconstitution

- Coutterand S. *et al.* - Le lobe glaciaire lyonnais au maximum würmien : glacier du Rhône ou/et glaciers savoyards ?
- Ravel L. *et al.* - Désenglacement du haut bassin versant du Vorz (massif de Belledonne, Isère), au Tardiglaciaire et à l'Holocène.
- Rey P.-J. - Sociétés et fluctuations du climat dans les Alpes nord-occidentales au Néolithique moyen.
- Le Roy *et al.* - Étude des fluctuations glaciaires du Petit Âge de Glace dans le Massif des Écrins : apports de la lichénométrie.
- Kirkbride M.P. - Datation des moraines holocènes d'Islande par tephrochronologie : un état de l'art.
- Le Roy *et al.* - La dendroglaciologie, ou l'apport de l'étude des cernes d'arbres pour la reconstitution des fluctuations glaciaires holocènes.
- Rabatel A. - Évolution glaciaire dans les andes subtropicales chiliennes entre 1955 et 2007 : conséquences pour la ressource en eau.
- Le Roy *et al.* - Un inventaire des aérographies du massif du Mont Blanc.

2 - Dynamique

- Ravel L. - Évolution géomorphologique de la haute montagne alpine dans le contexte actuel de réchauffement climatique.
- Gruber S. - Le permafrost de haute montagne.
- Deline P. *et al.* - L'Aiguille du Midi (massif du Mont Blanc) : un site remarquable pour l'étude du permafrost des parois d'altitude.
- Saulnier G.-M. *et al.* - Un éléphant volant est-il un oiseau ? Perspectives pour l'observation hydrométéorologique des milieux de montagne.
- Jobard S. - L'instrumentation du glacier du Baounet : quels apports pour la traçabilité des mesures environnementales ?
- Moreau L. - L'exploration du cryokarst glaciaire et son intérêt scientifique pour l'étude du drainage des eaux de fonte.
- Mazué R. *et al.* - Suivi de l'évolution de la couverture detritique d'un glacier noir par photo-comparaison : le glacier d'Estelette.

3 - Pratiques

- Paccard P. - Réchauffement climatique et ressource neige en domaines skiables.
- Gauchon C. - Les hivers sans neige et l'économie des sports d'hiver : un phénomène récurrent, une problématique toujours renouvelée.
- Laslaz L. - L'exclusion des glaciers des zones centrales des Parcs nationaux de la Vanoise et des Écrins et leur équipement pour le ski d'été.
- Cayla N. - Les sentiers d'interprétation glaciaire : des outils de valorisation différenciée des glaciers et de leur territoire.
- Lambert R. - Cartozonage : de la carte au zonage du risque avalanche.
- Moulin A. *et al.* - L'incertitude liée aux avalanches dans les Alpes du Nord : identifications et implications pour la gestion.

La «Collection Edytem»
a pour objet de mettre en avant
l'apport de la géographie, de la géologie
et des sciences de l'environnement
dans l'étude des milieux et territoires
de montagne.

Déclinée en «numéros thématiques», elle
met en avant les travaux réalisés au sein
du laboratoire Edytem et les résultats
de ses programmes et actions
de recherche.



Prix - 15 euros

ISBN 978-2-918435-00-6

