



Le permafrost de montagne et les processus géomorphologiques associés : évolutions récentes dans les Alpes françaises

Xavier Bodin, Philippe Schoeneich, Philip Deline, Ludovic Ravel, Florence Magnin, Jean-Michel Krysiecki et Thomas Echelard



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/rga/2806>

DOI : [10.4000/rga.2806](https://doi.org/10.4000/rga.2806)

ISSN : 1760-7426

Traduction(s) :

Mountain permafrost and associated geomorphological processes: recent changes in the French Alps

- URL : <https://journals.openedition.org/rga/2885> [en]

Éditeur :

Association pour la diffusion de la recherche alpine, UGA Éditions/Université Grenoble Alpes

Référence électronique

Xavier Bodin, Philippe Schoeneich, Philip Deline, Ludovic Ravel, Florence Magnin, Jean-Michel Krysiecki et Thomas Echelard, « Le permafrost de montagne et les processus géomorphologiques associés : évolutions récentes dans les Alpes françaises », *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* [En ligne], 103-2 | 2015, mis en ligne le 02 septembre 2015, consulté le 08 décembre 2022. URL : <http://journals.openedition.org/rga/2806> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/rga.2806>

Ce document a été généré automatiquement le 8 décembre 2022.



Creative Commons - Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International
- CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Le permafrost de montagne et les processus géomorphologiques associés : évolutions récentes dans les Alpes françaises

Xavier Bodin, Philippe Schoeneich, Philip Deline, Ludovic Ravel, Florence Magnin, Jean-Michel Krysiecki et Thomas Echelard

NOTE DE L'AUTEUR

Remerciements

Cet article constitue une synthèse de plus de 10 années de recherches menées dans les Alpes françaises sur la question du permafrost de montagne. Ces travaux ont été permis grâce au soutien de plusieurs fonds pour la recherche (MAIF, INTERREG, Alpine Space, LabEx OSUG@2020, ZA Alpes, Région Rhône Alpes) qui sont ici remerciés. La majorité des données présentées ici proviennent du réseau PermaFRANCE, dont une partie des activités de suivi du permafrost de montagne est soutenue par l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble. Merci par ailleurs à Emmanuel Thibert (IRSTEA Grenoble) et Martial Bouvier (Parc National des Ecrins) pour la collecte et la mise à disposition des données de déplacement du glacier rocheux de Laurichard, ainsi qu'au réseau d'observateurs bénévoles (guides, gardiens de refuge...) pour les données sur l'activité gravitaire des parois du massif du Mont Blanc. Enfin, les commentaires et conseils de l'éditeur de ce numéro de la RGA, Monique Fort, ainsi que les retours des deux relecteurs ont été grandement appréciés.

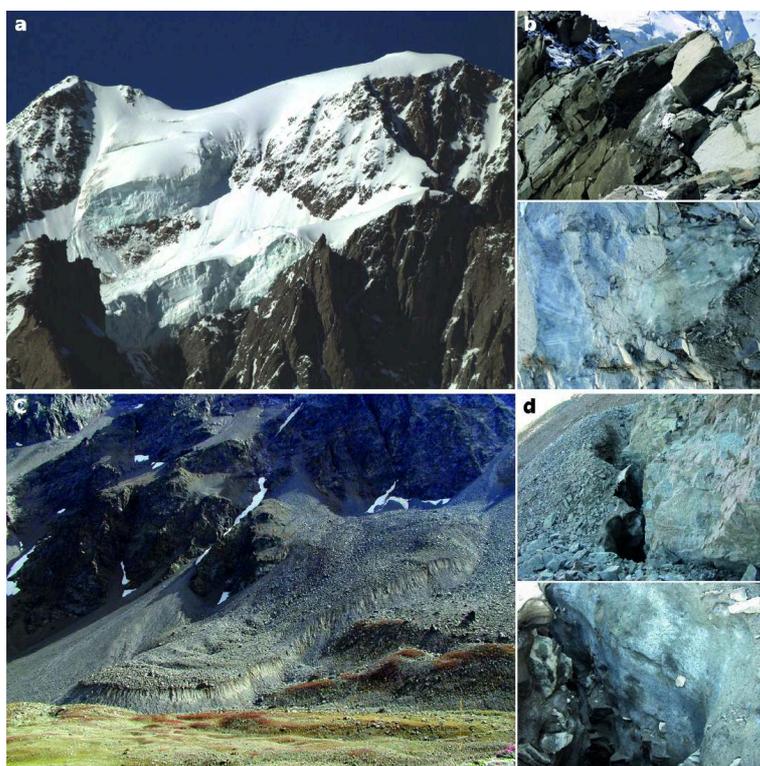
Introduction

- 1 Le permafrost est un élément majeur de la cryosphère de montagne (Gruber et Haeberli, 2009) : connaître et comprendre ses réponses au réchauffement climatique

constituent un enjeu scientifique et sociétal fort. La dégradation du permafrost présent sur les versants est susceptible d'avoir des conséquences dommageables pour les territoires alpins, en particulier en matière de risques. En effet, la déstabilisation des versants rocheux ou à formations superficielles liée à l'élévation de température de la glace du sol, à la modification de sa teneur en glace, voire à la disparition de cette glace peut enclencher des processus hydro-géomorphologiques brutaux et complexes (chaînes de processus), du fait notamment de la vigueur du relief.

- 2 Deux types d'environnement sont plus particulièrement scrutés : les parois rocheuses supra-glaciaires, qu'un contact direct avec l'atmosphère et une teneur en glace limitée rendent très sensibles au climat à court terme, et les formations superficielles, où le signal climatique est régulé par la présence saisonnière d'un manteau neigeux « tampon » et une teneur en glace élevée. Les marqueurs visibles de ces deux types de permafrost sont, respectivement, les glaciers suspendus sur les parois car leur base froide est « collée » au substratum rocheux du fait du gel permanent qui le caractérise (Gruber et Haeberli, 2007 ; Fig. 1a), et les glaciers rocheux, mélange de glace et de débris rocheux affecté d'un fluage lent et constant (Haeberli *et al.*, 2006 ; Fig. 1c). La glace du permafrost peut s'observer, en de rares occasions, dans les fractures de parois rocheuses ou les niches d'arrachement (Fig. 1b) et à la faveur de fractures dans un glacier rocheux (Fig. 1d).

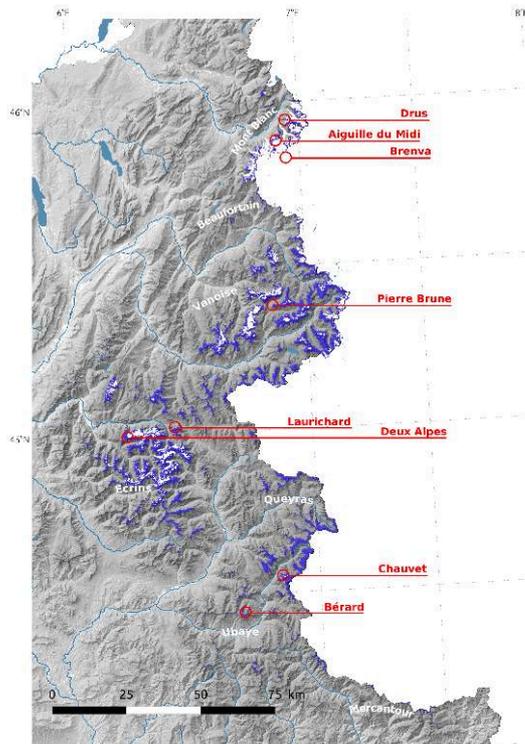
Figure 1 : Principaux marqueurs de la présence du permafrost en montagne



a) Glacier suspendu sur le sommet sud des Grandes Jorasses, dont le front se situe à 3980 m d'alt., massif du Mont Blanc (photo P. Deline) ; b) glace dans des niches d'arrachement à l'Arête des Cosmiques à 3605 m d'alt. en 2006 (haut : au centre) et dans la face ouest du Petit Dru à 3530 m d'alt. en 2011 (bas ; largeur photo : ~ 50 cm), dans le massif du Mont Blanc (photos L. Ravanel) ; c) glacier rocheux de Laurichard, dont le front atteint 2420 m d'alt., massif du Combeynot (photo : E. Thibert, 2004) ; d) structure interne du glacier rocheux de Laurichard dans le secteur de la rimaye (photo du bas : zoom dans la photo du haut ; largeur photo du bas : ~ 1 m) (photos X. Bodin).

- 3 En France, les premières études reconnaissant la présence de permafrost et son rôle sur les environnements alpins remontent au début des années 1980 (Francou, 1981 ; Evin, 1983). Un regain d'intérêt pour ce sujet a eu lieu à partir de 2003 (thèses de Monnier en 2006, de Bodin en 2007, de Ravanel en 2010, d'Echelard et Perrier en 2014 ou encore Magnin en 2015). L'étendue potentielle du permafrost dans les Alpes françaises est estimée selon les auteurs entre 700 et 1500 km² (Fig. 2), soit 10 à 20 % des terrains situés au-dessus de 2000 m d'altitude (Boeckli *et al.*, 2012 ; Bodin *et al.*, 2008 ; Magnin *et al.*, 2015a). Depuis 2005, des efforts importants ont été réalisés pour étudier à la fois l'état thermique du permafrost, reflet du climat actuel et passé de la haute montagne, et les dynamiques géomorphologiques associées. Que ce soit dans les parois rocheuses (Magnin *et al.*, 2015b) ou dans les formations superficielles (Bodin *et al.*, 2009 ; Schoeneich *et al.*, 2014), des forages instrumentés, des mesures thermiques en subsurface et le suivi de la morphodynamique permettent d'approcher l'état du permafrost dans les Alpes françaises et ses réponses au changement climatique en cours. La majorité de ces travaux sont intégrés dans le réseau français d'observation et de suivi du permafrost PermaFRANCE (Schoeneich *et al.*, 2010), dans des sites répartis entre 44 et 46°N et 2400 m et 4500 m d'altitude (Fig. 2).

Figure 2 : Distribution potentielle du permafrost dans les Alpes françaises (d'après Bodin *et al.*, 2008) et localisation des principaux sites mentionnés dans ce travail



- 4 Le propos de cet article est de fournir une vision synthétique des principales connaissances sur le permafrost des Alpes françaises, en présentant d'une part les mesures thermiques disponibles, que ce soit en profondeur, c'est-à-dire dans le permafrost *stricto sensu*, ou à proximité de la surface, et, d'autre part, les principaux résultats des études portant sur les dynamiques géomorphologiques associées à la présence du permafrost en montagne. L'évolution conjointe de l'état thermique du permafrost et du climat est mise en regard de celle de phénomènes tels que les

écroulements dans le massif du Mont Blanc ou la vitesse d'écoulement du glacier rocheux de Laurichard dans le massif des Ecrins. Enfin, les perspectives futures en termes d'aléas et de possibles risques émergents sont discutées.

Températures actuelles du permafrost alpin et tendances

Mesures en forages

- 5 Mesurer le régime thermique du sol sous la couche active, qui, elle, gèle et dégèle saisonnièrement, est l'unique moyen de connaître l'état du permafrost. Pour cela, des forages, équipés de chaînes de capteurs de température mesurant en continu, fonctionnent depuis 2009 dans trois contextes géologiques et géomorphologiques différents.

Le forage vertical profond 2Alpes-3065

- 6 Un forage profond de 100 m a été réalisé en 2010 à 3065 m d'altitude en marge du domaine skiable des Deux-Alpes (Fig. 2). Le forage a été implanté sur un large dôme rocheux de gneiss homogène, dans le but de caractériser l'évolution à long terme du profil thermique du substratum. Le forage est équipé à la fois d'une chaîne de capteurs (30 sondes PT100 échelonnées de 0 à 98 m) et d'une fibre optique pour la mesure de température distribuée (Schoeneich *et al.*, 2012). Les quatre années de mesures disponibles (décembre 2010-juillet 2014) montrent une profondeur de couche active de 4,5 à 5,5 m, une pénétration des variations saisonnières jusqu'à 25-30 m, une température stable de -1,3 °C à 30 m de profondeur, et une température à la base du forage de -0,7 °C. Le permafrost a donc ici une profondeur supérieure à 100 m ; l'extrapolation du gradient géothermique suggère que la base du permafrost est à environ 180 m de profondeur.

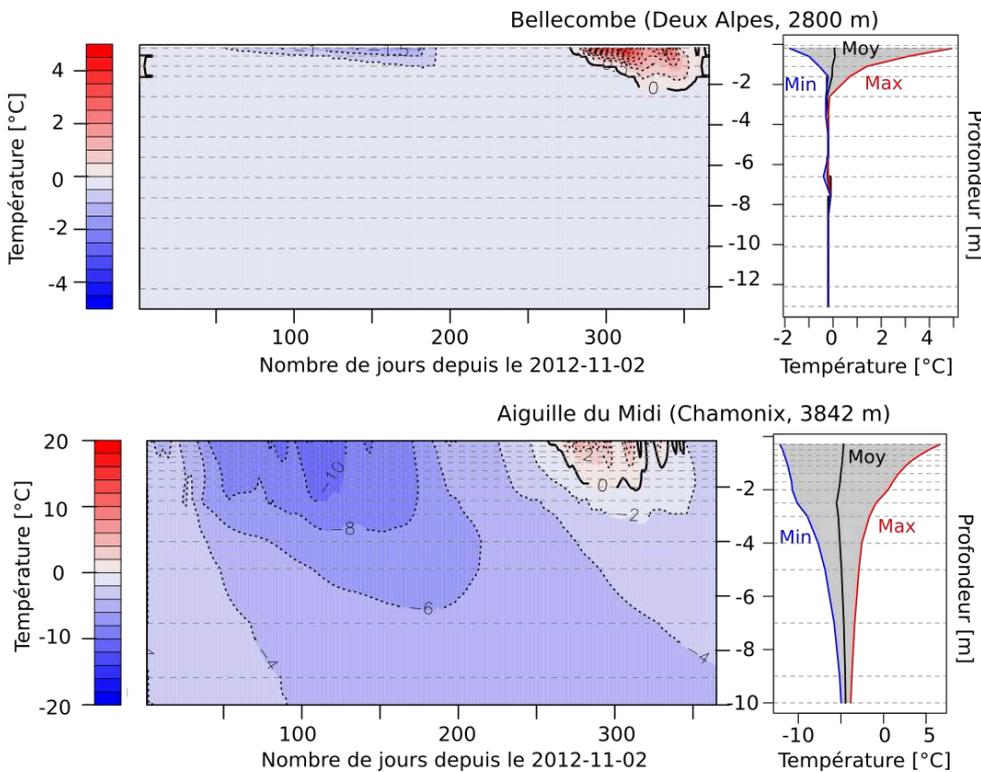
Les forages dans les parois de l'Aiguille du Midi

- 7 Accessible depuis Chamonix par un téléphérique, le sommet de l'Aiguille du Midi est un ensemble de trois pitons granitiques culminant à 3842 m d'altitude (Fig. 2). En septembre 2009, trois forages d'une profondeur de 11 m ont été réalisés dans les parois sud (3753 m), nord-ouest (3738 m) et nord-est (3745 m) du Piton Central puis équipés de chaînes de 15 thermistors chacun (précision $\pm 0,1^\circ\text{C}$) relevant la température entre 30 cm et 10 m de profondeur toutes les 3 heures (Magnin *et al.*, 2015b). Les moyennes annuelles de température à 10 m de profondeur indiquent un permafrost tempéré dans la face sud (-1,5°C) et de type froid en face nord-ouest (-4,5°C, Fig. 3) et nord-est (-3,6°C). Le gradient thermique est positif dans le forage NO et négatif dans le forage sud, certainement en raison des flux de chaleur latéraux depuis la face ensoleillée vers les faces à l'ombre. L'épaisseur des couches actives est comprise en moyenne entre 2,2 m (nord-ouest) et 5,7 m (sud), avec des variations d'épaisseur interannuelles différentes d'un forage à l'autre.

Les forages du glacier rocheux de Bellecombe

- 8 Deux forages de 15 m de profondeur ont été réalisés en 2009 dans le glacier rocheux de Bellecombe (altitudes : 2700-2750 m), sur le domaine skiable des Deux-Alpes (Fig. 2). Ils ont traversé une couche active à débris grossiers d'environ 2,5 m, puis une couche riche en glace, voire de la glace massive jusqu'à 9,5 m de profondeur, avant de rencontrer le substratum rocheux. Ils sont équipés chacun de 15 capteurs (PT100) échelonnés entre 0 et 13,5 m de profondeur.
- 9 Les cinq années de mesures disponibles (octobre 2009 à octobre 2014) montrent, sous une couche active d'environ 2,5 m d'épaisseur, un permafrost isothermal "tempéré", avec une température de $-0,1$ à $-0,2$ °C sur tout le profil et tout au long de l'année (Fig. 3). Les variations saisonnières sont limitées à la couche active et bloquées au toit du permafrost par la présence de glace. Le permafrost est donc ici à une température très proche du point de fusion.

Figure 3 : Régime thermique pendant une année de deux types de permafrost, mesuré dans le glacier rocheux de Bellecombe (forage aval) et dans la paroi de l'Aiguille du Midi (forage NO)



A gauche, températures journalières en fonction de la profondeur (les lignes horizontales grises représentent la profondeur des capteurs) ; à droite, profils thermiques correspondant aux valeurs minimales, moyennes et maximales pour l'année 2013.

- 10 La comparaison des régimes thermiques mesurés dans les forages de Bellecombe et de l'Aiguille du Midi met en évidence l'effet de la présence d'une teneur en glace élevée dans le glacier rocheux : la fusion de cette glace absorbe la chaleur atmosphérique ce qui limite sa propagation en profondeur. Les variations de température du permafrost sont donc plus fortes dans une paroi rocheuse, où la profondeur de la couche active peut par exemple s'épaissir de plusieurs mètres à la faveur d'un été chaud. A l'inverse, le refroidissement d'un permafrost au point de fusion est lent, du fait de la chaleur

latente nécessaire pour cela. Ces particularités propres à chaque environnement, qui régulent pour une grande part les réponses géomorphologiques des versants alpins, peuvent par ailleurs se combiner.

Mesures de la température de surface

- 11 Les forages sont des installations coûteuses, d'où leur nombre limité. Le suivi du permafrost en montagne est donc complété par des mesures de température réalisées en continu par des enregistreurs placés en subsurface (1-5 cm) dans le rocher ou les formations superficielles (10-50 cm). En regard du permafrost, la température de surface peut être interprétée comme le "signal d'entrée" thermique et, en hiver, lorsque le manteau neigeux isole suffisamment la surface de l'atmosphère, comme un indicateur des conditions thermiques régnant plus en profondeur.

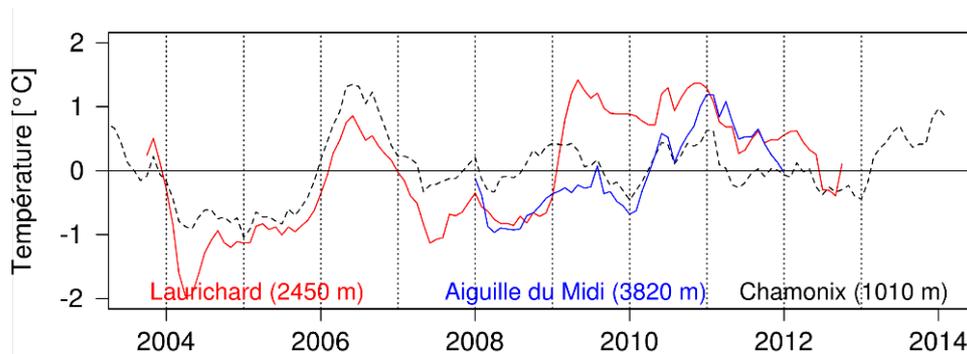
Parois rocheuses

- 12 Depuis 2005, neuf capteurs enregistrant la température entre 3 et 55 cm de profondeur ont été installés dans les faces nord, est, sud et ouest du Piton Central de l'Aiguille du Midi. En considérant également les capteurs à 30 cm de profondeur dans les forages (voir ci-dessus), douze capteurs de surface sont donc disponibles pour caractériser la distribution de la température. Une différence de 8°C est observée entre les faces nord et sud. L'offset de surface, c'est à dire la différence de température entre la surface des parois et l'air (de valeur positive) qui résulte principalement du bilan radiatif, est de 1 à 2°C en face nord et de 9 à 10°C en face sud. Quatre des capteurs sont affectés par la présence de neige, dont l'épaisseur dépasse fréquemment 60 cm pour trois d'entre eux. Deux de ces derniers situés en face sud enregistrent une moyenne annuelle de température plus basse que celle des capteurs sans neige dans la même exposition ; au contraire, l'autre capteur très enneigé, situé en face nord, est plus chaud que les capteurs sans neige dans la même exposition. Enfin, le capteur à faible épaisseur de neige enregistre des conditions plus froides que d'autres capteurs pourtant plus à l'ombre, ce qui témoigne de l'effet refroidissant d'une fine couche de neige.

Glaciers rocheux

- 13 En octobre 2003, sept enregistreurs autonomes de température ont été placés à quelques dizaines de centimètres sous la surface du glacier rocheux de Laurichard, abrités du rayonnement solaire direct (cf. Fig. 1, Fig. 2). Les enregistrements font clairement ressortir le rôle majeur de l'enneigement sur le régime thermique de surface, et la variabilité du régime thermique hivernal. Ainsi, des hivers à enneigement abondant et précoce (comme en 2003-2004 ou 2006-2007) se traduisent par un découplage net entre le sol et l'atmosphère qui minimise le refroidissement hivernal. A l'inverse, des hivers peu neigeux comme celui de 2004-2005 favorisent la perte de chaleur du sol et donc le refroidissement en profondeur.

Figure 4 : Evolution, depuis 2003, des écarts à la moyenne (période 2003-2012) filtrée par une fenêtre glissante sur les 12 mois précédents à partir des mesures de température de subsurface réalisées au glacier rocheux de Laurichard (capteur LA1) et en paroi rocheuse à l'Aiguille du Midi (exposition est). L'écart à la moyenne (période 2003-2012) pour la température de l'air à la station météo de Chamonix (données Météo France) est également présentée

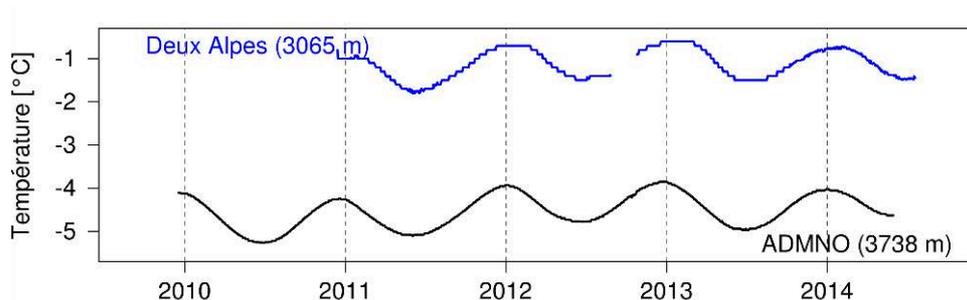


- 14 Afin de filtrer les fluctuations saisonnières, les analyses de la température de surface sont réalisées à l'aide de moyennes glissantes (sur les 12 mois précédents) qui font ressortir les tendances marquantes (Fig. 4). Au glacier rocheux de Laurichard, deux évolutions conjointes se superposent : une variabilité interannuelle liée essentiellement à l'enneigement (mais les vagues de chaleur se marquent également, comme celle de l'automne 2006) et une élévation relativement continue de la température sur la période observée. Les mesures à l'Aiguille du Midi montrent un couplage plus étroit avec la température de l'air, du fait de la faiblesse (l'absence, selon les sites de mesures) d'enneigement.

Evolution des températures du permafrost et contrôles climatiques

- 15 L'évolution à moyen et long terme mesurée dans le permafrost peut être décrite à partir des enregistrements de température à plusieurs mètres de profondeur, où l'influence saisonnière se réduit (elle s'annule généralement vers 15-25 m). Sur les 4, respectivement 5, années de mesure disponibles aux forages 2Alpes-3065 et ADMNO, la tendance observable à l'augmentation atteint 0,04°C par décennie pour le premier et 0,08°C par décennie pour le second. Cette croissance des températures est similaire à celle observée ces dernières années dans le forage de Murtelet (plus longue série disponible dans les Alpes), en Suisse, et concorde avec les mesures récentes dans les autres forages alpins, où elle semble démarrer dès 2007 (PERMOS, 2013). Par ailleurs, le faible gradient thermique observé dans le profil témoigne vraisemblablement de la tendance au réchauffement des couches proches de la surface, en réponse à l'augmentation des températures des 30 dernières années (Harris *et al.*, 2001).

Figure 5 : évolution de la température du permafrost en profondeur (capteur à 10 m au forage Aiguille du Midi nord-ouest, ADMNO, et à 11 m au forage 2Alpes-3065) dans le substratum rocheux (Deux Alpes) et en paroi (face NO du Piton Central de l'Aiguille du Midi)



Réponses géomorphologiques à l'évolution du permafrost

Fonctionnement typiquement observé

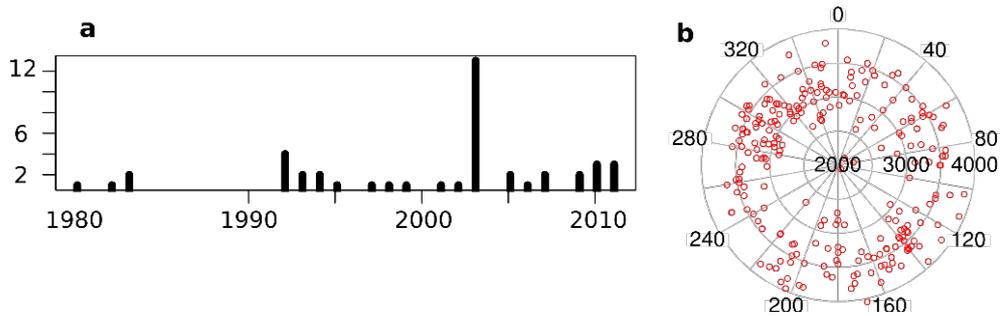
- 16 L'évolution du permafrost de montagne influence le fonctionnement géomorphologique des versants, qui inclut typiquement les chutes de blocs, éboulements et écroulements dans les parois rocheuses, et les mouvements des glaciers rocheux dans les formations superficielles. Pour déceler les changements éventuels dans les processus, il convient d'en connaître les composantes saisonnière et interannuelle en réponse à la variabilité du climat. Seul un suivi à long terme et la reconstitution historique lorsqu'elle est possible, permettent de caractériser cette activité « normale ».

Activité gravitaire dans les parois du massif du Mont Blanc

- 17 A l'inverse des glaciers rocheux dont le fluage correspond à une dynamique intrinsèque, la « normalité » pour une paroi rocheuse est une relative stabilité à l'échelle pluri-séculaire (cf. Böhlert *et al.*, 2008), favorisée dans le massif du Mont Blanc par une roche compétente (granite). Ainsi, sur le versant nord des Aiguilles de Chamonix et dans la face ouest des Drus, aucun écroulement n'a été relevé entre la fin du Petit Âge Glaciaire (c. 1855) et 1936 (Ravel et Deline, 2008 ; Ravel et Deline, 2011) hormis un petit écroulement aux Drus lors du séisme de 1905. La température encore basse maintenait vraisemblablement dans les parois un permafrost stabilisateur tandis que les couvertures glacio-nivales largement développées sur de nombreuses faces (Delaloye, 2008) les stabilisaient malgré leur dense fracturation. Toutefois, la stabilité des parois rocheuses de haute montagne se dégrade fortement depuis deux décennies, comme le montrent les inventaires d'écroulements aux Aiguilles de Chamonix (Fig. 6a). La fréquence des écroulements a connu un pic lors de l'été caniculaire 2003, avec 182 dépôts d'écroulement relevés sur les glaciers du massif du Mont Blanc (Ravel *et al.*, 2011). Depuis 2007, les écroulements y sont documentés de manière quasi systématique dans 60 % du massif (Ravel *et al.*, 2010 ; Ravel et Deline, 2013). Les 350 écroulements relevés de 2007 à 2014 se sont produits très majoritairement à des altitudes caractérisées par un permafrost tempéré (température comprise entre -2 et 0°C ; Fig. 6b), et pendant des périodes chaudes. Le rôle du permafrost dans le

déclenchement des écroulements est suggéré par plusieurs autres observations : glace ou écoulement d'eau observés dans des cicatrices ; écroulements qui se produisent plus haut en altitude pendant les étés à canicule ; très fort contraste de l'altitude d'origine des écroulements entre faces nord et sud, piliers ; enfin, piliers, éperons et arêtes, à dégradation accrue du permafrost, particulièrement affectés par les écroulements (Ravanel et Deline, 2015).

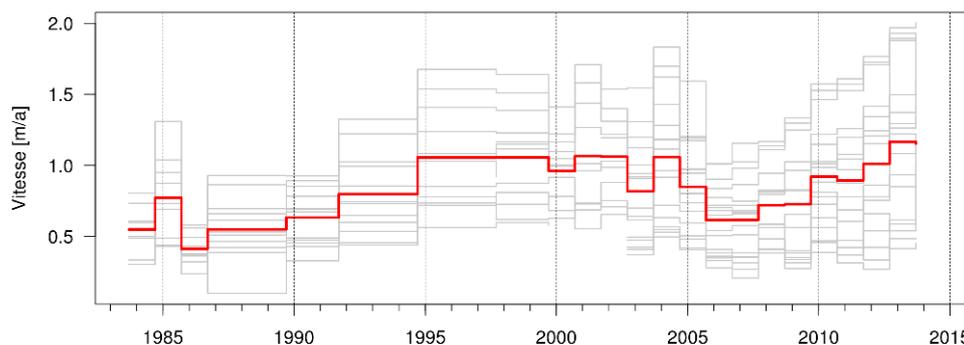
Figure 6 : a) nombre annuel d'écroulements dans les Aiguilles de Chamonix depuis 1980, établi par photocomparaison ; b) altitude (en m) et orientation (en °) de l'ensemble des écroulements recensés entre 2007 et 2011 dans le massif du Mont Blanc



Dynamique des glaciers rocheux

- 18 La plupart des glaciers rocheux alpins flue à des vitesses qui vont de quelques dm à 1-2 m/an, avec des variations de vitesse interannuelle et saisonnière (Haerberli *et al.*, 2006). Le déplacement du glacier rocheux de Laurichard est ainsi suivi annuellement depuis une trentaine d'années (Francou et Reynaud, 1992) grâce à des mesures de la position de blocs à sa surface, réalisées depuis 2000 par le Parc national des Ecrins.

Figure 7 : Vitesse moyenne annuelle (courbe rouge) du glacier rocheux de Laurichard entre 1985 et 2012 (les courbes grises représentent les blocs individuels)



- 19 Cette série de données (Fig. 7) montre une évolution de la vitesse très proche, dans ses variations interannuelles, de celle enregistrée sur d'autres glaciers rocheux alpins (Kääb *et al.*, 2007 ; Delaloye *et al.*, 2008). Les années 1990 ont été marquées par une accélération progressive (Kellerer-Pirklbauer *et al.*, 2012), avec, dans le cas de Laurichard, deux pics de vitesse en 2001 et en 2004. Puis une baisse des vitesses a été observée jusqu'en 2008, suivie d'une nouvelle accélération toujours en cours (Schoeneich *et al.*, 2014), de façon similaire à ce qui s'est produit ailleurs en Suisse (PERMOS, 2013) et en Autriche (Kellerer-Pirklbauer *et al.*, 2012).

- 20 Cette similarité de comportement à travers l'arc alpin suggère un contrôle climatique commun. Bien que les conditions thermiques du glacier rocheux de Laurichard ne sont connues que de façon indirecte par la mesure de la température de surface depuis 2003, plusieurs facteurs peuvent expliquer sa réponse au signal climatique (Bodin *et al.* 2009). D'une part, l'augmentation de la température de l'air aurait conduit à celle du glacier rocheux, engendrant des déformations plus grandes du mélange glace/débris telles qu'observées depuis les années 1990. Au contraire, les hivers peu neigeux à effet refroidissant entraîneraient une diminution de la vitesse. Enfin, vue la très faible conduction thermique du permafrost, l'impact de l'eau liquide (notamment due à la fonte printanière) sur le corps du glacier rocheux pourrait expliquer ces variations de vitesse, comme celles saisonnières mesurées sur certains sites en Suisse (Perruchoud et Delaloye, 2007).

Dynamiques extrêmes

- 21 En marge du fonctionnement « normal » de la haute montagne, on observe depuis plusieurs années dans les Alpes des phénomènes dont l'intensité ou la nature est inhabituelle : écroulements rocheux de grande ampleur, fréquence accrue d'écroulements de volumes petit et moyen, accélération, déstabilisation voire rupture de glaciers rocheux. Si le manque d'observations anciennes ne permet pas d'affirmer avec certitude qu'il s'agit bien de phénomènes nouveaux, des études de cas détaillées les relient sans équivoque au réchauffement climatique et en particulier à ses épisodes chauds. La plupart de ces phénomènes peuvent constituer un aléa pour les populations, leurs habitations, les infrastructures et les pratiques sportives sur les versants de la haute montagne.

Les écroulements rocheux de grande ampleur

- 22 Trois écroulements de grande ampleur (volume > 0,1 Mm³) se sont produits dans la région du massif du Mont Blanc au cours des deux dernières décennies, pour lesquels la dégradation du permafrost a été évoquée comme facteur probable de déclenchement. La niche d'arrachement de l'écroulement de la Brenva en janvier 1997 (2 Mm³ ; Deline, 2009 ; Fig. 8b), située entre 3400 et 3700 m d'altitude en exposition SE, est probablement caractérisée par un permafrost tempéré (Deline *et al.*, soumis) ; une possible advection de chaleur par circulation d'eau en profondeur le long des fractures a pu y permettre la dégradation localisée du permafrost. Il en est vraisemblablement de même pour l'écroulement du Crammont (0,5 Mm³) en décembre 2008, qui s'est détaché d'une paroi exposée nord entre 2400 et 2650 m d'altitude également en contexte de permafrost tempéré (Deline *et al.*, 2011), et pour celui du Pilier Bonatti en juin 2005 (0,26 Mm³ ; Fig. 8a), qui culminait à 3660 m d'altitude dans la face ouest des Drus (Ravel et Deline, 2008).

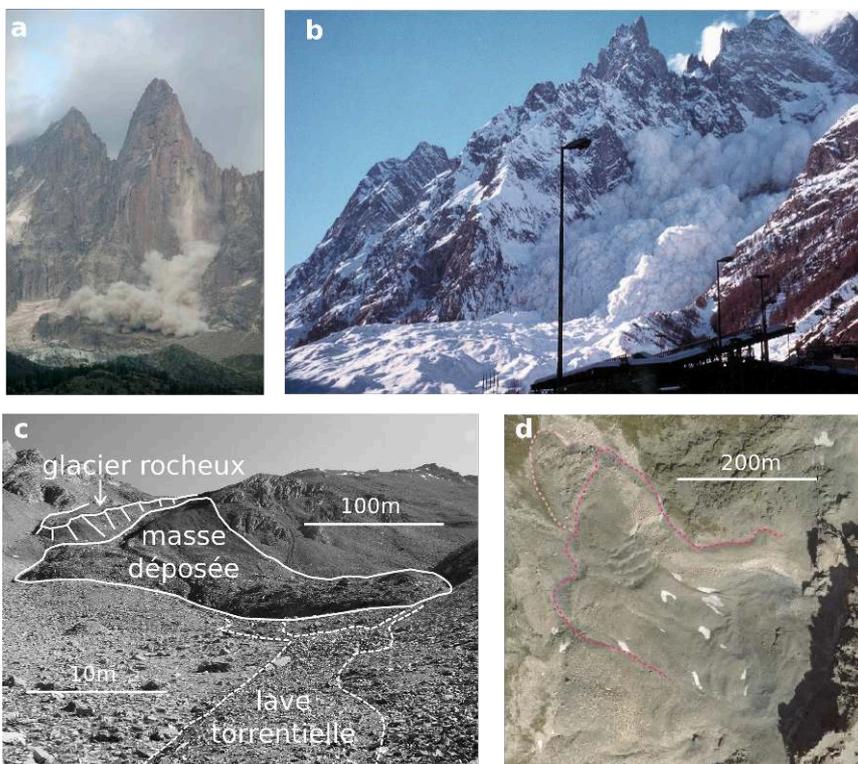
La déstabilisation des glaciers rocheux

- 23 De nombreux glaciers rocheux alpins ont récemment commencé à présenter des modalités de déplacement inhabituelles, liées à une accélération de tout ou partie de ces formes (Roer *et al.*, 2008 ; Delaloye *et al.*, 2012 ; Schoeneich *et al.* 2014). Le détachement du glacier rocheux du Bérard (Fig. 8c), dans les Alpes françaises, reste à ce

jour un des deux seuls cas connu au monde (Bodin *et al.*, 2012 ; Bodin *et al.*, accepté). Les premiers signes de cette déstabilisation remontent au moins à 2004, suivis par deux phases majeures au cours de l'été 2006 ayant mobilisé plus de 0,25 Mm³ de glace et débris. Outre le rôle de la topographie, les causes évoquées pour ce phénomène sont l'augmentation de la température de l'air des années 1990, les vagues de chaleur des étés 2003 et 2006, et les conditions hydro-nivo-météorologiques des semaines qui ont précédé le détachement.

- 24 En Vanoise, des données satellitaires ont récemment permis de détecter le glacier rocheux déstabilisé de Pierre Brune (Fig. 8d), dont la morphologie présente des signes manifestes de fortes déformations. Une reconstitution partielle du phénomène indique que les premières fractures sont apparues entre 1952 et 1970, suivies par une accélération de la déstabilisation entre 1990 et 2001. Des mesures GPS révèlent des mouvements de plusieurs m.a⁻¹ actuellement (Echelard, 2014).

Figure 8 : a) écoulement dans la face ouest des Drus (massif du Mont Blanc) le 29 juin 2005 vers 11 h (photo : J.-C. Bèche) ; b) avalanche de neige déclenchée par l'écroulement de la Brenva (versant italien du massif du Mont Blanc) en janvier 1997 (photo : M. Pennard) ; c) le glacier rocheux du Bérard après son détachement partiel en 2006 (tiré de Bodin *et al.*, accepté) ; d) fractures et topographie chaotique sur la langue du glacier rocheux de Pierre Brune, en Vanoise (tiré de Echelard, 2014)



Phénomènes cryokarstiques

- 25 L'un des principaux effets de la perte de glace due à la dégradation du permafrost est le développement de phénomènes « cryokarstiques », c'est à dire des affaissements superficiels par perte de volumes en profondeur. De nombreuses formes cryokarstiques sont ainsi observées sur les pistes de ski ; elles résultent dans la plupart des cas de

perturbations anthropiques (terrassements) qui affectent la couche active, et sont donc sans lien direct avec le changement climatique.

- 26 Toutefois, plusieurs thermokarsts naturels ont été observés en France ces dernières années. Le cas le plus spectaculaire est le Lac du Plan de Chauvet, en Haute Ubaye, qui se forme puis se vide à travers la glace en provoquant des crues torrentielles (Fig. 9). Six vidanges ont eu lieu depuis 1930, les plus récentes en 1997 et 2008. Tous les cas de thermokarst identifiés à ce jour se développent dans des secteurs avec une présence probable du permafrost, dont plusieurs sont des marges proglaciaires contenant de la glace morte héritée du PAG. Il s'agirait donc à proprement parler de formes de dégradation glaciaires, mais qui affectent des corps de glace qui n'ont pu se maintenir que grâce à des conditions de permafrost.

Figure 9 : Vidange du lac du Plan de Chauvet (Alpes de Haute Provence) en juillet 2008 (photos : M. Peyron, RTM 04). a) Vue d'ensemble du site : lac thermokarstique dans une marge proglaciaire contenant localement des glaces mortes préservées en conditions de permafrost ; b) orifice de vidange au travers d'un bouchon de glace (moulin) ; c) crue quelques centaines de mètres à l'aval du lac de Chauvet, à la confluence avec l'Ubaye



Discussion : l'émergence de nouveaux risques liés à la dégradation du permafrost de montagne ?

- 27 Les aléas naturels ont de tout temps été présents en haute montagne, du fait du caractère très dynamique de ce milieu. Des observations récentes montrent toutefois une augmentation significative de la fréquence ou de l'intensité de certains phénomènes, comme les écroulements rocheux (Ravanel et Deline, 2011). On enregistre également des phénomènes « nouveaux », tels que la déstabilisation de glaciers rocheux (Delaloye *et al.*, 2012) ou l'apparition de lacs cryokarstiques.

- 28 Si la prévision des grands écroulements reste presque impossible, l'identification de sites potentiellement dangereux du fait d'autres phénomènes est possible. A la demande des services RTM (ONF) qui ont en charge la gestion des risques naturels en montagne, un inventaire exhaustif des glaciers rocheux a ainsi été entrepris dans les départements alpins français (Bornet *et al.*, en préparation) à partir de l'interprétation de photographies aériennes, d'orthophotographies et d'observations de terrain. L'objectif de cet inventaire est de repérer tous les glaciers rocheux susceptibles de présenter un danger et tous les lacs en contact avec des glaciers rocheux. Une évaluation de l'aléa conduit ensuite à l'établissement d'une liste de sites à surveiller.
- 29 Par ailleurs, un travail de recensement de près de 1800 infrastructures (refuges, remontées mécaniques, dispositifs paravalanches, axes de transport de fluides, etc.) présentes en contexte de permafrost et/ou de retrait glaciaire dans les Alpes françaises vient d'être réalisé, dont 55 % présenteraient un risque de déstabilisation (Duvillard *et al.*, 2015). Des dommages ont d'ores et déjà été observés sur nombre d'entre elles, avec des conséquences socio-économiques parfois lourdes (fermeture et chômage techniques, baisse du chiffre d'affaire, travaux indispensables, etc.).

Conclusion

- 30 Présent à la fois dans les parois rocheuses de haute altitude et dans les formations superficielles, le permafrost en France affecte de nombreux versants, et sa dégradation est susceptible de provoquer des situations à risque. Les mesures disponibles depuis 2009 montrent une augmentation des températures du permafrost, à la fois liée à un réchauffement atmosphérique et à un enneigement conséquent ces derniers hivers. D'après les suivis en cours et les reconstitutions réalisées, les dynamiques géomorphologiques associées à la présence de permafrost semblent globalement affectées par ce réchauffement du permafrost, comme en témoigne, par exemple, l'accélération des glaciers rocheux au cours des années 1990. Par ailleurs, des événements météorologiques extrêmes, comme des étés caniculaires, se traduisent vraisemblablement par des pics d'activité géomorphologique : la hausse de la fréquence des écroulements constatée dans le massif du Mont Blanc au cours de l'été 2003 ou la déstabilisation du glaciers rocheux du Bérard en 2006 en sont probablement des exemples. Il est évident que le réchauffement du permafrost, et la modification des teneurs respectives en glace et en eau dans le sol qui en découlent, modifient les conditions de stabilité des versants alpins. Toutefois, la compréhension, et la prévision, des conséquences en termes d'aléas devront prendre en compte la très forte variabilité des contextes locaux afin de répondre aux attentes sociétales, et plus spécifiquement celles des gestionnaires des risques naturels.

BIBLIOGRAPHIE

- BODIN X. 2007. – « Géodynamique du pergélisol de montagne : fonctionnement, distribution et évolution récente. L'exemple du massif du Combeynot (Hautes Alpes) ». Université Paris-Diderot, thèse de doctorat, 274 p.
- BODIN X., SCHOENEICH P., LHOTELLIER R., GRUBER S., DELINE P., RAVANEL L. & MONNIER S. 2008. – « Towards a first assessment of the permafrost distribution in the French Alps. » In : *Proceedings of the 6th Swiss Geoscience Meeting 2008*, Lugano, 175–176.
- BODIN X., KRYSIECKI J.-M., SCHOENEICH P., Le ROUX O., LORIER L., ECHELARD T. & WALPERSDORF A. (accepté). –« The collapse of the Bérard rock glacier (Southern French Alps) in 2006 ». *Permafrost and Periglacial Processes*.
- BODIN X., THIBERT E., FABRE D., RIBOLINI A., SCHOENEICH P., FRANCOU B. & FORT M. 2009 – « Two decades of responses (1986–2006) to climate by the Laurichard rock glacier, French Alps. » *Permafrost and Periglacial Processes*, 20(4), 331–344. doi :10.1002/ppp.665
- BODIN X., KRYSIECKI J.-M. & IRIBARREN ANACONA P. 2012. – « Recent collapse of rock glaciers : two study cases in the Alps and in the Andes. » In *Proceedings of the 12th Congress INTERPRAEVENT*. Grenoble.
- BOECKLI L., BRENNING A., GRUBER S. & NOETZLI J. 2012. – « Permafrost distribution in the European Alps : calculation and evaluation of an index map and summary statistics. » *The Cryosphere*, 6, 807–820.
- BÖHLERT R., GRUBER S., EGLI M., MAISCH M., BRANDOVÁ D., HAEBERLI W., IVY-OCHS S., CHRISTL M., KUBIK P.W. & DELINE P. 2008. – « Comparison of exposure ages and spectral properties of rock surfaces in steep, high alpine rock walls of Aiguille du Midi (France). » In Kane D.L., Hinkel K.M. (Eds.), *Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost 2008*, Institute of Northern Engineering – University of Alaska Fairbanks, 143-148.
- DELALOYE R. 2008. – « Parois glaciaires... parois rocheuses : l'évolution séculaire des grandes faces alpines. » *Klimaveränderungen auf der Spur. Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft SGMG, Samedan, 2007*, pp. 93-104
- DELALOYE R., MORARD S., BARBOUX C., ABBET D., GRUBER V., RIEDO M. & GACHET S. 2012. –« Rapidly moving rock glaciers in Mattertal. » In *Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft* (pp. 21–31).
- DELINE P. 2009. – « Interactions between rock avalanches and glaciers in the Mont Blanc massif during the late Holocene. » *Quaternary Science Reviews*, 28 (11-12) : 1070-1083, doi : 10.1016/j.quascirev.2008.09.025.
- DELINE P., AKÇAR N. & IVY-OCHS S. (soumis). – « Repeated rock avalanches onto the Brenva Glacier (Mont Blanc massif, Italy) : a chronology. » *Quaternary Science Reviews*
- DELINE P., ALBERTO W., BROCCOLATO M., HUNGR O., NOETZLI J., RAVANEL L. & TAMBURINI A. 2011. – « The December 2008 Crammont rock avalanche, Mont Blanc massif area, Italy. » *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11 : 3307–3318, doi :10.5194/nhess-11-3307-2011
- DUVILLARD P.-A., RAVANEL L. & DELINE P. 2015. – « Risk assessment of infrastructure destabilization in context of permafrost in the French Alps. » In : G. Lollino *et al.* (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 1*, 297-300.

- ECHELARD, T. 2014. – « Contribution à l'étude de la dynamique des glaciers rocheux dans les Alpes françaises par interférométrie radar différentielle (D-InSAR). » Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, 183p.
- EVIN M. 1983. – « Structure et mouvement des glaciers rocheux des Alpes du Sud. » Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier.
- FRANCOU B. 1981. – « Géodynamique des éboulis et formes associées de la Combe de Laurichard. » Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier.
- FRANCOU B. & REYNAUD, L. 1992. – « 10 years of surficial velocities on a rock glacier (Laurichard, French Alps). » *Permafrost and Periglacial Processes*, 3(1), 209–213
- GRUBER S. & HAEBERLI W. 2007. – Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research*, 112, F02S18.
- GRUBER S. & HAEBERLI W. 2009. – « Mountain Permafrost. » In *Permafrost soils* (pp. 33–44). doi : 10.1007/978-3-540-69371-0
- HAEBERLI W., HALLET B., ARENSON L., ELCONIN R., HUMLUM O., KÄÄB A. & VONDER MÜHLL D. 2006. – « Permafrost Creep and Rock Glacier Dynamics. » *Permafrost and Periglacial Processes*, 17, 189–214.
- HARRIS C., HAEBERLI W., & M, D. V. 2001. – « Permafrost Monitoring in the High Mountains of Europe : the PACE Project in its Global Context. » *Permafrost and Periglacial Processes*, 11, 3–11.
- KELLERER-PIRKLBAUER A., & KAUFMANN V. 2012. – « About the relationship between rock glacier velocity and climate parameters in Central Austria. » *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105/2, 94–112.
- MAGNIN F. 2015. – « Distribution et caractérisation du permafrost des parois du massif du Mont Blanc. Une approche combinant monitoring, modélisation et géophysique. » Université de Savoie, thèse de doctorat, 298 p.
- MAGNIN F., BRENNING A., BODIN X., DELINE P. & RAVANEL L. 2015a. – « Modélisation statistique de la distribution du permafrost de paroi : application au massif du Mont Blanc. » *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement* : 21, n°2, pp. 145-162.
- MAGNIN F., DELINE P., RAVANEL L., NOETZLI J. & POGLIOTTI P. 2015b. – « Thermal characteristics of permafrost in the steep alpine rock walls of the Aiguille du Midi (Mont Blanc Massif, 3842 m a.s.l.). » *The Cryosphere*, 8(3), 109–121. doi :10.5194/tc-9-109-2015
- MONNIER, S. 2006. – « Les glaciers-rocheux, objets géographiques. Analyse spatiale multiscalaire et investigations environnementales. Application aux Alpes de Vanoise. » Université Paris XII-Val de Marne, Thèse de doctorat, 342 p.
- PERMOS. 2013. – « Permafrost in Switzerland 2008/2009 and 2009/2010. » (J. Noetzli, Ed.). Glaciological Report Permafrost No. 10/11 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences.
- PERRIER R. 2014. – « Suivi local et régional du pergélisol dans le cadre du changement climatique contemporain : application aux vallées de la Clarée et de l'Ubaye (Alpes du sud, France). » Université Paris Diderot, Thèse de doctorat, 385p.
- PERRUCHOUD E. & DELALOYE R. 2007. – « Short-Term Changes in Surface Velocities on the Becs-de-Bosson Rock Glacier (Western Swiss Alps). » In *Proceedings of the 9th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography* (Vol. 43, pp. 131–136). Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung.

- RAVANEL, L. 2010. – « Caractérisation, facteurs et dynamiques des écroulements rocheux dans les parois à permafrost du massif du Mont Blanc. » Université de Savoie, thèse de doctorat, 326 p.
- RAVANEL L., ALLIGNOL F., DELINE P., GRUBER S. & RAVELLO M. 2010. – « Rock falls in the Mont Blanc Massif in 2007 and 2008. » *Landslides*, 7 : 493-501.
- RAVANEL, L., ALLIGNOL, F., DELINE, P. & BRUNO G. 2011. – « Les écroulements rocheux dans le massif du Mont-Blanc pendant l'été caniculaire de 2003. » *Géovisions*, 36 : 245-261.
- 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 : relief, processus, environnement* 4, 261-272. doi : 10.4000/geomorphologie.7444.
- RAVANEL L., & DELINE P. 2011. – « Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls : the North side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the Little Ice Age. » *The Holocene*, 21 : 357-365.
- RAVANEL L., & DELINE P. 2013. – « A network of observers in the Mont Blanc massif to study rockfalls from high alpine rockwalls. » *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 36(1), 151-158.
- RAVANEL L., & DELINE P. 2015. – « Rockfall hazard in the Mont Blanc massif increased by the current atmospheric warming. » In : G. Lollino et al. (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory*, vol. 1, 435-428
- ROER I., HAEBERLI W., LAMBIEL C., & KÄÄB A. 2008. – « Observations and Considerations on Destabilizing Active Rock Glaciers in the European Alps. » In 9th International Conference on Permafrost (pp. 1505-1510).
- SCHOENEICH P., BODIN X., KRYSIECKI J., DELINE P., & RAVANEL L. 2010. – *Permafrost in France. Report n° 1*. Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, 72 p.
- SCHOENEICH P., ECHELARD T., KRYSIECKI J.-M., KERGOMARD F., LORIER L., MINGRAT L., DARRICAU C., JUGNET P., COTONI T., MELLAN L., HUWALD H., BERTON F. 2012. – « The borehole 2Alpes-3065 – a pilot installation for fiber optic DTS measurements in permafrost. » *Tenth International Conference on Permafrost, 20-27 juin 2012, Salekhard*. vol. 4/2, p. 507-508.
- SCHOENEICH P., BODIN, X., ECHELARD, T., KAUFMANN, V. & LIEB, G. K. 2014. – « Velocity changes of rock glaciers and induced hazards. » In Lollino G., Manconi A., Clague J., Shan W., Chiarle M. (eds) : *Engineering geology for society and territory - Volume 1 : Climate Change and engineering geology* (IAEG XII Congress, 15-19 septembre 2014, Torino). Springer, pp. 223-227.
- SPRINGMAN S. M., ARENSON L. U., YAMAMOTO Y., MAURER H., KOS A., BUCHLI T. & DERUNGS G. 2012. – « Multidisciplinary Investigations on Three Rock Glaciers in the Swiss Alps : Legacies and Future Perspectives. » *Geografiska Annaler : Series A, Physical Geography*, 94(2), 215-243. doi : 10.1111/j.1468-0459.2012.00464.x

RÉSUMÉS

La montagne alpine est affectée par des processus géomorphologiques dont l'évolution est en partie conditionnée par la dégradation du permafrost : écroulements d'ampleur variable, déstabilisation de glaciers rocheux ou apparition de dépressions cryokarstiques. Ces phénomènes, par leur intensité, sont susceptibles d'engendrer des risques pour les territoires. Nous proposons une synthèse des connaissances sur l'état actuel du permafrost de montagne

dans les Alpes françaises et sur son évolution récente. Cet état de l'art se base sur des travaux de recherche menés depuis une dizaine d'années et les mesures recueillies dans le cadre de PermaFRANCE, le réseau français d'observation à long terme du permafrost de montagne. L'analyse des données à disposition montre ainsi qu'en paroi rocheuse, à 3800 m d'altitude, la température à 10 m de profondeur est comprise entre -4,5 et -1,5°C selon l'orientation, alors que dans les formations superficielles, à 2800 m d'altitude en orientation nord, elle est proche du point de fusion. Depuis le début de ces mesures en profondeur en 2010, une tendance à l'augmentation de la température est observable, corroborée par d'autres forages alpins. Le régime est influencé par l'enneigement, de façon très nette en formations superficielles et beaucoup plus discrète en paroi, ce que les mesures en surface réalisées depuis 2003 montrent nettement. Cette variabilité interannuelle se combine aux tendances de plus long terme qui sont probablement à l'origine de l'évolution constatée des dynamiques géomorphologiques associées au permafrost alpin : augmentation de la fréquence des processus gravitaires du type chute de bloc et fluctuation des vitesses des glaciers rocheux. La recrudescence probable de phénomènes extrêmes comme les écroulements majeurs ou la déstabilisation de glaciers rocheux dans les prochaines décennies pourrait engendrer des risques nouveaux ou accrus auxquels les territoires devront s'adapter.

Alpine mountains are affected by significant geomorphological processes whose evolution is partly conditioned by permafrost warming: rockfalls of various volumes, destabilisation of rock glaciers, and cryokarst. These phenomena, because of their intensity, may generate risks for territories. This paper provides a synthesis of the knowledge about the current status of the mountain permafrost in the French Alps and its recent evolution. This state-of-the-art overview is based on research conducted over the past 10 years and the measurements collected within PermaFRANCE, the French network for long-term observation of the mountain permafrost. The analysis of the available data shows that for a rock wall located at 3800 m asl., the temperature is between -4.5 and -1.5°C at a depth of 10 m, according to the aspect, whereas it is close to the melting point in surficial deposits at 2800 m asl. on a northern slope. Since the beginning of these measurements at depth in 2010, a trend of increasing temperature has been discernible, as found in other alpine boreholes. As clearly shown by the surface measurements conducted since 2003, the thermal regime is influenced by snow, particularly in surficial deposits and to a much lesser extent in rock walls. This inter-annual variability is combined with longer-term trends, which probably induce the observed changes in geomorphological dynamics associated with alpine permafrost: an increased frequency of gravitational processes such as rockfalls and fluctuation in rock glacier velocities. The possible increase in extreme events, such as rock avalanches or the destabilisation of rock glaciers, in the coming decades could create new or increased risks, to which territories must thus adapt.

INDEX

Keywords : permafrost, French Alps, geomorphological dynamics, climate change

Mots-clés : permafrost, Alpes françaises, dynamiques géomorphologiques, changement climatique

AUTEURS

XAVIER BODIN

Laboratoire EDYTEM, UMR 5204 CNRS / Université Savoie Mont-Blanc, Le Bourget-du-Lac

PHILIPPE SCHOENEICH

Laboratoire PACTE, UMR 5194 CNRS / Université Joseph Fourier, Grenoble

PHILIP DELINE

Laboratoire EDYTEM, UMR 5204 CNRS / Université Savoie Mont-Blanc, Le Bourget-du-Lac

LUDOVIC RAVANEL

Laboratoire EDYTEM, UMR 5204 CNRS / Université Savoie Mont-Blanc, Le Bourget-du-Lac

FLORENCE MAGNIN

Laboratoire EDYTEM, UMR 5204 CNRS / Université Savoie Mont-Blanc, Le Bourget-du-Lac

JEAN-MICHEL KRYSIECKI

Bureau d'études SAGE ingénierie, Gières

THOMAS ECHELARD

Laboratoire PACTE, UMR 5194 CNRS / Université Joseph Fourier, Grenoble