

Planche 3.9 Permafrost – extension et aspects particuliers

Introduction

Le «permafrost», traduit littéralement par sous-sol gelé en permanence, désigne un phénomène thermique connu avant tout en Sibérie et en Alaska. Dans les Alpes, ce même phénomène fait l'objet de recherches intenses depuis les années 1970. La présence du permafrost résulte de la combinaison des processus suivants: si le froid emmagasiné dans le sous-sol durant l'hiver n'est pas complètement compensé en été, la température du sous-sol restera toute l'année inférieure à 0 °C, en-dessous d'une certaine profondeur. Cette profondeur est appelée niveau supérieur du permafrost. Ce n'est qu'à proximité de la surface du sol, dans la couche dite active, que les valeurs de températures s'élèvent en été au-dessus du point de gelée. Sous la couche active, se trouve le permafrost au sens strict. Celui-ci n'est donc pas directement visible. En profondeur, la température se met à monter sous l'effet du flux thermique terrestre et atteint, à la base du permafrost, à nouveau des valeurs positives.

Le permafrost est avant tout défini du point de vue de la température. La glace présente dans le permafrost est formée à partir d'eau à l'état de surfusion et n'est qu'un phénomène accessoire. Il existe en effet des permafrosts dits secs, ne contenant pratiquement pas de glace.

Extension du permafrost dans les Alpes

Généralement, on devrait compter avec le permafrost au-dessus de la limite de la forêt. En plus de la température moyenne annuelle de l'air, c'est le rayonnement reçu qui détermine avant tout la répartition du permafrost. Pour cette raison, il apparaît à des altitudes plus basses sur les pentes exposées au nord que sur celles exposées au sud. La neige, la nature de la surface du sol et la présence d'eau sont d'autres facteurs importants.

Vers le milieu des années 1970, quelques règles empiriques simples ont été établies pour l'estimation de l'extension du permafrost. Vingt ans plus tard, ces règles ont été adaptées par régions et incorporées à des systèmes d'information géographique (SIG). Il existe ainsi divers modèles statistiques [2] qui estiment l'extension du permafrost sur la base d'un modèle numérique d'altitude, avec une résolution spatiale plus ou moins grossière. Chaque maille est ainsi analysée selon son altitude, son exposition et sa position particulière (au pied d'un versant, par exemple). Dans un autre modèle, l'altitude est remplacée par la température moyenne annuelle et l'exposition par le rayonnement direct [4]. Ces modèles ont été appliqués à une même région test et leurs résultats comparés [2]. Sur la carte, la présence probable du permafrost a été calculée à l'aide de trois modèles régionaux différents. Au total, le permafrost concerne environ 4 à 6 % de la surface de la Suisse, soit approximativement le double de la surface occupée par les glaciers.

Glaciers rocheux

Dans les matériaux meubles, la présence du permafrost se remarque souvent aisément. En effet, dans ce type de matériaux, la glace présente dans le volume des pores tend à repousser les fragments de roches les uns par rapports aux autres. Le volume des pores occupés par la glace augmente de ce fait et l'on parle alors de matériel sursaturé en glace. La présence de glace dans les matériaux meubles modifie considérablement les propriétés mécaniques de ces derniers. Si la topographie est favorable, le mélange de glace et de sédiments meubles se déforme progressivement de manière plastique sous l'effet de la gravité. Le permafrost se met alors à ramper et prend des formes caractéristiques rappelant celles des coulées de laves. Cette forme superficielle du relief est appelée glacier rocheux, même si ni leur origine ni leur comportement n'ont un lien commun avec ceux des glaciers.

Les glaciers rocheux typiques ont quelques centaines de mètres de longueur. Leur surface est couverte de fragments de roches plus ou moins grossiers. Ils se déplacent de quelques décimètres par an vers l'aval (v. fig. 1). Comme ces vitesses diminuent généralement vers le bord,

on a des structures de surface en forme de rides et bourrelets. Le front et les bordures latérales sont souvent très raides (jusqu'à 40°). Les grands blocs grossiers, présents sur le bord du front, dégringolent à l'occasion. Ils s'accumulent à son pied pour former une sorte d'auréole. Les matériaux plus fins sur le versant du front permettent à la végétation de s'installer progressivement, si le glacier rocheux n'est plus actif. En effet, sur les glaciers rocheux actifs, les plantes sont dérangées par le mouvement de la masse et les chutes de pierres. Les glaciers rocheux qui ne contiennent plus de glace sont appelés glaciers rocheux fossiles. Ils sont effondrés sur eux-mêmes et, la plupart du temps, couverts de végétation. Le tableau propose un choix de glaciers rocheux des trois catégories (actifs, inactifs et fossiles) facilement identifiables et accessibles.

Processus de fonte de la neige et signification hydrologique du permafrost

Des interactions existent entre le permafrost et la fusion de la couche de neige. C'est ainsi que la fonte du manteau neigeux hivernal se produit avec environ 15 à 20 jours de retard en zone de permafrost [6].

Ces divers aspects ont fait l'objet de recherches dans deux bassins particuliers: dans le bassin de recherche de Furggentälti, l'objet principal est un glacier rocheux de 350 m de long, au pied nord des Plattenhörner (v. photo, [7]). Ce glacier rocheux est actuellement très actif, son front avance en moyenne de 40 cm par année. Entre 1960 et 1992, il a perdu au total 48'000 m³ de sa masse de glace, alors que son taux de fonte annuel entre 1985 et 1992 a quadruplé par rapport à celui des 25 années précédentes. Des recherches sur le terrain ont montré que le permafrost se limite principalement aux zones qui reçoivent relativement peu de radiation directe (fig. 4).

Le processus de fonte de la neige a été suivi dans le domaine du glacier rocheux à l'aide d'une caméra automatique (fig. 6). La fonte de la neige intervient chaque printemps à des dates souvent différentes et s'effectue à des vitesses variables (fig. 7). Cependant les aspects successifs que prennent les restes de couverture neigeuse se ressemblent beaucoup d'une année à l'autre (fig. 5). Les formes de terrain, le transport des neiges par le vent, le rayonnement mais également la température du sol (elle-même influencée par le permafrost) déterminent cette évolution. Inversement, en tenant compte du rayonnement, l'analyse des divers aspects successifs qu'offre le processus de fonte permet de procéder à certaines déductions sur l'extension du permafrost.

Dans le bassin de recherche du vallon de Réchy, le débit est observé dans deux bassins versants partiels depuis 1988 (fig. 8, [1]). Environ 90% des 20.5 ha du bassin 2 sont constitués de permafrost. Ce bassin comprend aussi la partie sud-ouest du glacier rocheux des Becs de Bosson. La plus grande partie de ce glacier rocheux se trouve cependant dans le bassin 1, dont 50% de la surface (76 ha) se situe dans la zone du permafrost. Comme la figure 8 le montre clairement, la proportion de la surface occupée par de la pelouse alpine est nettement plus faible dans le bassin 2 que dans le bassin 1.

Les conditions hydrologiques sont déterminées par les basses températures (moyenne annuelle 1993–1997: -1°C), la maigre végétation et le permafrost. Ainsi l'évaporation annuelle ne dépasse pas 300 mm environ (v. planche 4.1). Les variations hydrologiques saisonnières sont caractéristiques. L'écoulement est marqué par un régime du type nival, avec de petits débits en hiver et de forts débits entre mai et août en raison de la fonte de la couverture de neige hivernale. En comparant les deux hydrogrammes de la figure 9, les différences des bassins correspondants se comprennent facilement. Dominé par le permafrost, le bassin 2 présente des débits spécifiques nettement plus élevés. L'eau de fonte coule dans la couche dégelée au-dessus de la surface du corps de permafrost (v. fig. 10) et alimente les sources situées en bordure du glacier rocheux. Dans le bassin 1, les possibilités de stockage sont nettement meilleures en raison de la plus grande proportion de surface sans permafrost; ceci aboutit à des débits spécifiques nettement plus faibles. Il est d'ailleurs possible qu'une partie des eaux du bassin 1 (particulièrement dans le domaine du glacier rocheux) soit drainée par voie souterraine vers le bassin 2. L'écoulement de base relativement élevé du bassin 2 fait penser à la présence d'un réservoir sous le glacier rocheux.

Le glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch (Engadine)

Dans le cadre d'un projet de recherche, un forage de 60 m a été effectué en 1987 à travers le glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch [3]. Des carottes ont été prélevées, des mesures géophysiques ont été effectuées dans le forage et des instruments y ont été installés en vue d'observations à long terme (fig. 2). Ce forage offre pour la première fois un regard sur la constitution interne d'un permafrost en mouvement [8].

En surface, le glacier rocheux consiste en blocs de différentes tailles (du centimètre à plusieurs mètres). Comme le montre le profil des densités de la figure 2, on rencontre, sous cette couche épaisse d'environ 3 m, de la glace presque pure jusqu'à une profondeur de 30 m. Entre 30 m et 57 m, on rencontre surtout des fragments de roche dont les espaces interstitiels sont remplis de glace. En-dessous, le forage a encore pénétré de quelques mètres dans la roche en place.

A l'emplacement du forage, le déplacement du permafrost en surface est de 6 cm par an vers l'aval. Les mesures des déformations du trou du forage montrent qu'environ les deux tiers de ce déplacement (4 cm/an) proviennent de la couche de cisaillement, entre 28 m et 30 m de profondeur (fig. 2).

L'analyse photogrammétrique à haute résolution de vues aériennes permet de relever les modifications spatiales de la surface du permafrost (fig. 1). Les déplacements observés avec cette méthode concordent très bien avec les mesures effectuées dans le forage. En moyenne, la surface du glacier rocheux s'est abaissée de 4 cm par an, entre 1987 et 1996. La vitesse horizontale maximale de déplacement peut atteindre environ 15 cm par an. Le champ des vitesses de déplacement permet de conclure à un âge de l'ordre de grandeur de 10 000 ans pour ce glacier rocheux [5].

Les températures relevées entre les profondeurs de 3.5 m et 50 m environ se situent toute l'année au-dessous de 0°C. Les fluctuations annuelles peuvent être observées jusqu'à une profondeur de 20 m (fig. 3). Entre 52 m et 56 m de profondeur, de façon surprenante, on retrouve aussi des fluctuations saisonnières, alors qu'en-dessous on enregistre à nouveau des températures négatives stables. Ce phénomène thermique semble indiquer qu'un écoulement d'eau souterraine se produit parfois durant l'été dans cette couche profonde, épaisse de 4 m. Les 30 m supérieurs se sont fortement réchauffés entre 1987 et 1994. En Engadine, les deux hivers 1994/1995 et 1995/1996 ont été pauvres en neige et la mince couche de neige a eu de la peine à fonctionner comme isolant. Dans ces conditions, le froid hivernal a pu facilement pénétrer dans le sous-sol. La température à 11.6 m de profondeur a ainsi atteint en 1996 une valeur proche de celle de 1987 et s'élève à nouveau depuis (fig. 3).

Bibliographie

- [1] **Gardaz, J.-M. (1999):** Permafrost prospecting, periglacial and rockglacier hydrology in mountain areas: Cases studies in the Valais Alps, Switzerland. University of Fribourg, Fribourg.
- [2] **Haeberli, W. et al. (1996):** Simulation der Permafrostverbreitung in den Alpen mit Geographischen Informationssystemen. Arbeitsbericht NFP 31, Zürich.
- [3] **Haeberli, W. et al. (1998):** Ten years after drilling through the permafrost of the active rock glacier Murtèl, Eastern Swiss Alps: answered questions and new perspectives. In: Seventh International Conference on Permafrost, Yellowknife, Canada. Proceedings:403–410, Collection Nordicana, N° 57, Laval.
- [4] **Hölzle, M. (1994):** Permafrost und Gletscher im Oberengadin. Grundlagen und Anwendungsbeispiele für automatisierte Schätzverfahren. Mitteilung der VAW, Nr. 132, Zürich.
- [5] **Kääb, A. (1998):** Oberflächenkinematik ausgewählter Blockgletscher des Oberengadins. In: Beiträge aus der Gebirgs-Geomorphologie. Jahrestagung 1997 der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft. Mitteilung der VAW, Nr. 158:121–140, Zürich.
- [6] **Keller, F. (1994):** Interaktion zwischen Schnee und Permafrost. Eine Grundlagenstudie im Oberengadin. Mitteilung der VAW, Nr. 127, Zürich.

- [7] **Krummenacher, B. et al. (1998):** Periglaziale Prozesse und Formen im Furggentälti, Gemmipass. Mitteilung Nr. 56, Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos.
- [8] **Vonder Mühl, D. (1993):** Geophysikalische Untersuchungen im Permafrost des Oberengadins. Mitteilung der VAW, Nr. 122, Zürich.