

## Résumé

Dans le contexte d'un climat de plus en plus chaud, la localisation du pergélisol dans les terrains sédimentaires à forte déclivité et l'évaluation des mouvements de terrain qui y ont cours s'avèrent primordiales. S'insérant dans cette problématique, ce travail de thèse s'articule autour de deux axes de recherche différents. D'un point de vue statique, cette recherche propose une étude de la distribution et des caractéristiques du pergélisol dans les éboulis de la zone périglaciaire alpine. D'un point de vue dynamique, une analyse de l'influence des caractéristiques du pergélisol (teneur en glace, température du pergélisol, etc.) et des variations des températures de l'air et du sol sur les vitesses de fluage des corps sédimentaires gelés est effectuée.

Afin de répondre à ce double objectif, l'approche "terrain" a été privilégiée. Pour déterminer la répartition et les caractéristiques du pergélisol, les méthodes traditionnelles de prospection du pergélisol ont été utilisées, à savoir la mesure de la température du sol à la base du manteau neigeux (BTS), la mesure de la température du sol en continu ainsi que la méthode géoélectrique. Les mouvements de terrain ont pour leur part été mesurés à l'aide d'un GPS différentiel.

L'étude de la distribution du pergélisol a été effectuée dans une quinzaine d'éboulis situés dans les régions du Mont Gelé (Verbier-Nendaz) et d'Arolla principalement. Dans la plupart des cas, un pergélisol a pu être mis en évidence dans la partie inférieure des accumulations sédimentaires, alors que la partie médiane des éboulis n'est, le plus souvent, pas gelée. Si cette absence de pergélisol se prolonge parfois dans les portions sommitales des pentes, les mesures réalisées montrent que dans d'autres cas des sédiments gelés y sont à nouveau présents. Les résistivités électriques mesurées dans les portions gelées des éboulis étudiés sont dans la plupart des cas nettement inférieures à celles mesurées sur les glaciers rocheux.

Des études préalables ont montré que des circulations d'air internes sont responsables de l'anomalie thermique négative et, lorsqu'il existe, du pergélisol que l'on trouve dans la partie inférieure d'éboulis situés plus de 1000 m plus bas que la limite inférieure régionale du pergélisol discontinu. L'étude de quatre sites de basse altitude (1400-1900 m), et notamment l'équipement du site de Dreveneuse (Préalpes Valaisannes) avec deux forages, des capteurs de température de surface et un anémomètre a permis de vérifier et de préciser le mécanisme de ventilation actif au sein des éboulis froids de basse altitude. Ce mécanisme fonctionne de la manière suivante: en hiver, l'air contenu dans l'éboulis, plus chaud et plus léger que l'air extérieur, monte à l'intérieur de l'accumulation sédimentaire et est expulsé dans ses parties sommitales. Cet effet de cheminée provoque une aspiration d'air froid à l'intérieur de la partie inférieure de l'éboulis, causant ainsi un sur-refroidissement marqué du terrain. En été, le mécanisme s'inverse, l'éboulis étant plus froid que l'air environnant. De l'air froid est alors expulsé au bas de la pente.

Une ventilation ascendante hivernale a pu être mise en évidence dans certains des éboulis de haute altitude étudiés. Elle est probablement en grande partie responsable de la configuration particulière des zones gelées observées. Même si l'existence d'un effet de cheminée n'a pu être démontrée dans tous les cas, du fait notamment de la glace interstitielle qui entrave le cheminement de l'air, des indices laissant présager son possible fonctionnement existent dans la quasi totalité des éboulis étudiés. L'absence de pergélisol à des altitudes qui lui sont favorables pourrait en tous les cas s'expliquer par un réchauffement du terrain lié à des expulsions d'air relativement chaud.

L'étude des mouvements de terrain a été effectuée sur une dizaine de sites, principalement sur des glaciers rocheux, mais également sur une moraine de poussée et

quelques éboulis. Plusieurs glaciers rocheux présentent des formes de déstabilisation récente (niches d'arrachement, blocs basculés, apparition de la matrice fine à la surface, etc.), ce qui témoigne d'une récente accélération des vitesses de déplacement. Ce phénomène, qui semble général à l'échelle alpine, est probablement à mettre sur le compte du réchauffement du pergélisol depuis une vingtaine d'années. Les vitesses mesurées sur ces formations sont souvent plus élevées que les valeurs habituellement proposées dans la littérature. On note par ailleurs une forte variabilité inter-annuelle des vitesses, qui semblent dépendre de la variation de la température moyenne annuelle de surface.

## **Abstract**

In the context of a warmer climate, the localisation of permafrost in steep sedimentary terrain and the measurement of terrain movements that occur in these areas is of great importance. With respect to these problems, this PhD thesis follows two different research axes. From a static point of view, the research presents a study of the permafrost distribution and characteristics in the talus slopes of the alpine periglacial belt. From a dynamic point of view, an analysis of the influence of the permafrost characteristics (ice content, permafrost temperature, etc.) and air and soil temperature variations on the creep velocities of frozen sedimentary bodies is carried out.

In order to attain this double objective, the "field" approach was favoured. To determine the distribution and the characteristics of permafrost, the traditional methods of permafrost prospecting were used, i.e. ground surface temperature measurements at the base of the snow cover (BTS), year-round ground temperature measurements and DC-resistivity prospecting. The terrain movements were measured using a differential GPS.

The permafrost distribution study was carried out on 15 talus slopes located mainly in the Mont Gelé (Verbier-Nendaz) and Arolla areas (Swiss Alps). In most cases, permafrost was found in the lower part of the talus slope, whereas the medium part was free of ice. In some cases, the upper part of the talus is also free of permafrost, whereas in other cases permafrost is present. Electrical resistivities measured in the frozen parts of the studied talus are in most cases clearly lower than those measured on rock glaciers.

Former studies have shown that internal air circulation is responsible for the negative thermal anomaly and, when it exists, the permafrost present in the lower part of talus slopes located more than 1000 m below the regional lower limit of discontinuous permafrost. The study of four low-altitude talus slopes (1400-1900 m), and notably the equipment of Dreveneuse field site (Valais Prealps) with two boreholes, surface temperature sensors and an anemometer permitted to verify and to detail the ventilation mechanism active in low altitude talus slopes. This mechanism works in the following way: in winter, the air contained in the block accumulation is warmer and lighter than the surrounding air and therefore moves upward in the talus and is expelled in its upper part. This chimney effect induces an aspiration of cold air in the interior of the lower part of talus, that causes a strong overcooling of the ground. In summer, the mechanism is reversed because the talus slope is colder than the surrounding air. Cold air is then expelled in the lower part of the slope.

Evidence of ascending ventilation in wintertime could also be found in some of the studied high-altitude talus slopes. It is probably mainly responsible for the particular configuration of the observed frozen areas. Even if the existence of a chimney effect could not be demonstrated in all cases, notably because of interstitial ice that obstructs

the air circulation, indices of its presence exist in nearly all the studied talus. The absence of permafrost at altitudes favourable to its presence could be explained, for example, by the terrain warming caused by expulsion of relatively warm air.

Terrain movements were measured at about ten sites, mainly on rock glaciers, but also on a push moraine and some talus slopes. Field observations reveal that many rock glaciers display recent destabilization features (landslide scars, tilted blocks, presence of fine grained sediments at the surface, etc.) that indicate a probable recent acceleration of the creep velocities. This phenomenon, which seems to be widespread at the alpine scale, is probably linked to the permafrost warming during the last decades. The measured velocities are often higher than values usually proposed in the literature. In addition, strong inter-annual variations of the velocities were observed, which seems to depend on the mean annual ground temperature variations.