PLATE 32. PERMAFROST

Introduction

Permafrost is a term used to describe the thermal condition of earth materials, such as soil and rock, when their temperature remains below 0°C continuously for more than 1 year. The negative annual heat imbalance at the ground surface due to the cold climate in polar and alpine regions has been responsible for the formation and maintenance of permafrost conditions in the ground. Ice may be present in the form of particle coatings, layers, wedges, crack fillings, or irregularly shaped masses. Above the permafrost is a surface layer of soil or rock, called the active layer, which thaws in summer and freezes in winter.

Hydrologic methodology developed for more southern latitudes has often been utilized for permafrost regions, simply because intensive studies have not been carried out in these northern regions to determine whether hydrologic processes are greatly affected by the presence of permafrost. The effects of permafrost on the various components of the hydrologic cycle have been studied in Canada only to a limited extent. Current Canadian knowledge of permafrost hydrology is documented in the proceedings of recent workshops [1,2]. For this reason, the present text and accompanying map deal only with the occurrence and distribution of permafrost, taken from references 3-7, which contain extensive bibliographies.

Zonation of Permafrost

One-half of Canada's land surface is underlain by permafrost. The permafrost region is divided into two zones: continuous in the north and discontinuous in the south. In the continuous zone, permafrost exists everywhere beneath the land surface and varies in thickness from about 100 metres at the southern limit to 1000 metres in the Far North. The active layer usually extends down to the permafrost. In the discontinuous zone, some areas have permafrost beneath the land surface and other areas are free of permafrost. The distribution ranges from widespread in the north, where permafrost areas predominate, to scattered, where permafrost occurs in islands in generally unfrozen terrain. It varies in thickness from a few metres or less at the southern limit to about 100 metres at the boundary with the continuous zone. The active layer does not extend down to the permafrost in all places. South of the discontinuous zone, a few patches of permafrost exist in peatlands owing to unusual microclimatic and terrain conditions.

Permafrost in the Cordillera comprises a continuous zone at higher elevations, and below that, a discontinuous zone extending down to the lower altitudinal limit of permafrost. At the northern limit of the Cordilleran alpine permafrost, as shown on the map, permafrost occurs in valley bottoms. Southward to about latitude 54°30′N, the lowest probable elevation of permafrost is about 1200 metres above sea level, with only scattered occurrences in peatlands at lower elevations. South of latitude 54°30′N, the lowest probable elevation has been estimated to rise steadily to about 2000 metres at the 49th parallel.

Thickness of Permafrost

The thickness of permafrost is influenced by such factors as soil and rock type, snow cover, and proximity to bodies of water. The values shown on the map were obtained by different methods such as direct observation in boreholes, mine shafts, and wells; ground-temperature measurements using thermocouple and thermistor cables; and geophysical methods, including seismic and resistivity.

Temperature of Permafrost

The temperature of the permafrost in the continuous zone at the depth where annual variations are only a few tenths of a degree—termed the depth of zero annual amplitude—ranges from about −15°C in the Far North to about −5°C at the southern boundary of the zone. In the discontinuous zone, the temperature of the permafrost at the depth of zero annual amplitude generally ranges from about −5°C in the north to just below 0°C at the southern limit of the zone. The six ground-temperature envelopes (Figure 1 on the map) are typical for stations in the continuous and discontinuous zones. The annual temperature fluctuations decrease with depth. The depth of zero annual amplitude in the permafrost region generally varies from about 10 to 20 metres depending on the same conditions affecting the thickness of permafrost. Temperature data are obtained by several methods. Multipoint thermocouple and thermistor cables installed permanently in boreholes are read regularly at weekly or monthly intervals to construct envelopes like those in Figure 1. Another method is to observe the temperature at regular depth intervals by lowering a single thermistor on a cable in abandoned petroleum exploration boreholes, which are cased and oil filled.

Climate Relationships of Permafrost

The mean annual air temperature isotherms on the map are derived from a 30-year average for the period 1941-1970 inclusive. A broad relationship appears to exist between air temperature and permafrost temperature based on presently available permafrost thickness and temperature observations obtained at specific locations. In general, the temperature of the permafrost is from one to 5.5 Celsius degrees (average, about 3.3 degrees) warmer than the average annual air temperature at a given locality. It is apparent that the distribution of permafrost is related to air temperature. The boundary between the continuous and discontinuous permafrost zones corresponds roughly to a mean annual air temperature of about −8.3°C, and the southern limit of permafrost to about −1°C. The lower altitudinal limit of Cordilleran permafrost, shown on the map, coincides approximately with the −1°C average annual air isotherm.

Other Factors Affecting Permafrost

Other factors that affect permafrost conditions include relief, vegetation, hydrology, snow cover, fire, glacier ice, and soil and rock type.

Relief influences the amount of solar radiation received by the ground surface and the accumulation of snow. The influence of orientation and degree of slope is particularly evident in mountainous regions. In the discontinuous zone, this may result in permafrost occurring on north-facing slopes but not on adjacent slopes facing south. In the continuous zone, permafrost is thicker and the active layer thinner on north-facing slopes.

Vegetation affects permafrost in various ways and is one of the more obvious indicators of subsurface conditions. The greatest influence of vegetation is its role of shielding the permafrost from atmospheric heat and in impeding heat transfer. This protection is provided mainly by the insulating properties of the widespread moss and peat cover. Removal or even disturbance of this surface cover causes degradation of the underlying permafrost.

Water greatly influences the distribution and thermal regime of permafrost. In the discontinuous zone, the existence of permafrost is inhibited in poorly drained areas. Under water bodies, there is almost always an unfrozen layer of ground that never completely freezes. The extent of this thawed zone varies with a large number of factors—area and depth of the water body, water temperature, thickness of winter ice and snow cover, general hydrology, and composition and history of accumulation of bottom sediments.

Snow cover influences the heat transfer between the air and the ground and hence affects the distribution of permafrost. The snowfall regime and the length of time that snow lies on the ground are critical factors. A heavy fall of snow in the autumn and early winter inhibits winter frost penetration. On the other hand, a thick snow cover that persists on the ground in the spring delays thawing of the ground underneath. The heavier snowfall east of Hudson Bay appears to be an important factor in the northward displacement of the permafrost zones in Quebec.

Fire is a transient factor which is not normally recognized as affecting the permafrost. Although the time of actual burning at any given point is usually of short duration, a forest or tundra fire can change the underlying permafrost conditions. Charring of the ground surface will change the heat absorption capabilities of the ground. The removal of the vegetative cover by burning can cause thawing of the permafrost, and unstable soil conditions result.

The growth and regime of glaciers and ice caps has had a marked effect on the permafrost through geological time. The temperature at the bottom of the ice determined the temperature of the underlying permafrost. The variety of postglacial conditions produced fluctuations in the extent of permafrost.

The types of soil and rock, as well as their water content, have considerable influence on the permafrost because of variations in their thermal properties such as conductivity, diffusivity, and specific heat. They affect the rate of permafrost accumulation and the thickness of the active layer.

Acknowledgments

The text and map material were prepared and assembled by R.J.E. Brown, National Research Council of Canada.

Selected References

[1] Permafrost Hydrology. 1974. Proceedings of a Workshop Seminar, CNC/IHD Secretariat, c/o Inland Waters Directorate, Department of the Environment, Ottawa.
[2] Williams, J.R. and van Everdingen, R.O. 1973. Groundwater investigations in permafrost regions of North America: a review. North American Contribution to Second International Conference on Permafrost, Yakutsk, U.S.S.R. National Academy of Sciences, Washington, D.C., pp. 435-446.
[3] Brown, R.J.E. 1967. Permafrost in Canada, map published by Division of Building Research, National Research Council (NRC 9769) and Geological Survey of Canada (Map 1246A), August.
[4] Brown, R.J.E. 1970. Permafrost in Canada — Its Influence on Northern Development. University of Toronto Press, 234 pp.
[5] Brown, R.J.E. and Péwé, T.L. 1973. Distribution of permafrost in North America and its relationship to the environment: a review, 1963-1973. Proc. North American Contribution to Second International Conference on Permafrost, National Research Council of Canada, Ottawa, National Academy of Sciences/National Research Council, Washington, pp. 71-100.
[6] Ives, J.D. 1974. Permafrost. *In* Arctic and Alpine Environments, Chapter 4A, pp. 159-194. Edited by J.D. Ives and R.G. Barry, Methuen and Co. Ltd., London, 999 pp.
[7] Taylor, A.E. and Judge, A.S. 1974. Canadian Geothermal Data Collection—Northern Wells, 1955 to February 1974. Geothermal Series No. 1, Geothermal Services of Canada, Earth Physics Branch, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, 171 pp.

PLANCHE 32. PERGÉLISOL

Introduction

Le terme pergélisol décrit le régime thermique des matériaux de la lithosphère tels que le sol et le roc, si leur température reste constamment inférieure à 0 °C pendant plus d'une année. Le déficit annuel de l'échange de chaleur entre l'atmosphère et la surface de la terre, dû au climat froid qui prévaut dans les régions polaires et alpines, est responsable de la formation et du maintien de la couche de pergélisol dans le sol. La glace peut se former en pellicules, en couches et en coins, remplir des fissures ou prendre d'autres formes irrégulières. Le pergélisol est recouvert d'une couche de sol ou de roc, appelée zone active ou mollisol, qui gèle en hiver et dégèle en été.

Les méthodes utilisées en hydrologie et développées surtout dans les régions situées sous des latitudes plus méridionales, sont souvent appliquées telles quelles dans les régions de pergélisol. La raison principale est l'absence d'études importantes portant sur l'influence du pergélisol sur les phénomènes hydrologiques. Bien qu'on connaisse peu des effets du pergélisol sur les différentes parties du cycle hydrologique au Canada, il existe néanmoins une bonne documentation tirée à partir des comptes rendus de colloques récents [1 et 2]. C'est pour cette raison que le texte et la carte qui l'accompagne, s'inspirant des ouvrages de référence nos 3 à 7, ne traitent que de la présence et de la répartition du pergélisol.

Répartition du pergélisol

La moitié du territoire canadien repose sur une couche de pergélisol, comprenant une zone continue dans le nord et une zone discontinue dans le sud. Dans la première, le pergélisol se trouve partout sous la surface du sol et atteint une épaisseur variant entre quelque 100 mètres dans la partie méridionale et 1000 mètres dans le Grand-Nord. La zone active descend habituellement jusqu'à la couche du pergélisol. Dans la zone discontinue, le sous-sol de certaines régions contient du pergélisol alors que celui-ci est absent ailleurs. Le pergélisol est étendu et dense dans le nord, alors que vers le sud il est confiné dans des îles où le terrain n'est généralement pas gelé. Son épaisseur passe de quelques mètres ou moins, dans la partie méridionale de la zone discontinue, à environ 100 mètres dans la partie voisine de la zone continue. La zone active n'est pas partout en contact direct avec le pergélisol. Au sud de la zone discontinue, le pergélisol apparaît par endroits dans les terrains tourbeux en raison des conditions de microclimat et de topographie peu communes qui y prévalent.

Le pergélisol occupe une zone continue dans les parties supérieures de la Cordillère, au-dessous desquelles s'étend la zone discontinue jusqu'à la limite inférieure du pergélisol. La carte indique que le pergélisol occupe le fond des vallées, à la limite septentrionale de la Cordillère alpine du pergélisol. Au sud jusqu'à environ 54°30′ N., la côte 1200 mètres au-dessus de la mer marque la limite inférieure du pergélisol; au-dessous de cette élévation, on trouve le pergélisol parsemé dans les tourbières. Au sud du 54°30′ N., on estime que la plus basse altitude probable s'élève graduellement pour atteindre les 2000 mètres près du 49e parallèle.

Épaisseur du pergélisol

L'épaisseur du pergélisol dépend de la nature du sol et du roc, de la couverture nivale et de la proximité des nappes d'eau. Les valeurs portées sur la carte proviennent de diverses méthodes telles: les mesures directes effectuées dans les trous de sonde, les puits de mine et les puits, les mesures de températures du sol à l'aide de câbles munis de thermocouples et de thermistors et les mesures géophysiques incluant les levés sismiques et de résistivité.

Température du pergélisol

Dans la zone continue, à la profondeur à amplitude annuelle nulle où les variations annuelles de température ne sont que de quelques dixièmes de degré, la température du pergélisol varie entre environ —15 °C dans le Grand-Nord, et environ —5 °C, dans la partie méridionale de la zone. Dans la zone discontinue, à la profondeur à amplitude annuelle nulle, elle se situe de façon générale à —5 °C dans le nord de la zone, à juste au-dessous de 0 °C, dans la partie méridionale. Les six enveloppes de températures du sol sont caractéristiques des stations des zones continues et discontinues (figure 1). Les variations annuelles de température diminuent en fonction de la profondeur. La profondeur à amplitude annuelle nulle, dépendant des mêmes facteurs qui sont responsables de l'épaisseur du pergélisol, varie généralement entre environ 10 mètres et 20 mètres. Les données de température sont obtenues à l'aide de câbles à thermocouples et à thermistors, installés en permanence dans les trous de sonde. Les lectures hebdomadaires ou mensuelles sont mises en graphique comme sur la figure 1. Une autre méthode consiste à mesurer la température à des intervalles de profondeur réguliers en descendant un câble à thermistor unique dans un forage d'exploration de pétrole abandonné, tubé et rempli de pétrole.

Relations climat-pergélisol

Les isothermes des températures moyennes annuelles de l'air, qui figurent sur la carte, sont tirées des moyennes annuelles obtenues au cours de la période de trente ans allant de 1941 à 1970 inclusivement. Il semble, compte tenu des données actuellement disponibles sur les mesures de température et d'épaisseur du pergélisol qui ont été effectuées en des endroits spécifiques, qu'il existe une relation simple entre la température de l'air et celle du pergélisol. De façon générale, cette dernière est supérieure de 1 à 5.5 degrés Celsius (moyenne de 3.3 degrés) à la température moyenne annuelle de l'air mesurée en un endroit donné. Il semble donc que la répartition du pergélisol est fonction de la température de l'air. La limite entre la zone continue et discontinue correspond approximativement à la température moyenne annuelle de l'air de —8.3 °C et à quelque —1 °C à la limite sud du pergélisol. L'altitude limite minimale du pergélisol de la Cordillère coïncide approximativement avec l'isotherme de —1 °C, tel qu'on le voit sur la carte.

Autres facteurs pouvant influer sur le pergélisol

Le relief, la végétation, l'hydrologie, la couverture nivale, le feu, les glaciers et la nature de la roche et du sol sont tous des facteurs qui influent sur le pergélisol.

Le relief exerce une influence sur la quantité d'ensoleillement reçue par le sol et sur la quantité de neige qui s'y accumule. L'effet de l'orientation et de la déclivité des versants se fait sentir surtout dans les régions montagneuses. Dans la zone discontinue, ces facteurs peuvent donner naissance à la formation de pergélisol sur les versants nord mais non sur les versants sud avoisinants. Dans la zone continue, le pergélisol est plus épais sur les versants nord et la zone active plus mince.

La végétation agit de diverses façons sur le pergélisol; elle est considérée comme l'indicateur le plus évident de l'état du sous-sol. Son rôle le plus connu, c'est celui de mettre le pergélisol à l'abri de la chaleur atmosphérique et d'empêcher l'échange de chaleur. Cette protection est assurée principalement par les propriétés isolantes du vaste tapis de mousse et de tourbe. Le fait d'enlever ou même de perturber cette couverture protectrice provoque la dégradation du pergélisol sous-jacent.

L'eau influe considérablement sur la répartition et le régime thermique du pergélisol. Dans la zone discontinue, les régions mal drainées empêchent la formation de pergélisol. Il existe presque toujours, sous les nappes d'eau, une couche de terre non gelée qui ne réussit jamais à geler complètement. L'étendue de cette partie non gelée dépend d'un grand nombre de facteurs tels: la superficie et la profondeur de la nappe d'eau, la température de l'eau, l'épaisseur de la couche de glace et de neige pendant l'hiver, les caractéristiques hydrologiques générales, la composition des dépôts de sédiments ainsi que la manière dont ils se sont accumulés.

La couverture nivale crée un effet sur l'échange de chaleur entre l'air et le sol et affecte en conséquence la répartition du pergélisol. Le régime des chutes de neige et la durée de l'enneigement sur le sol sont des facteurs extrêmement importants. Ainsi, une chute de neige abondante en automne ou au début de l'hiver empêche la pénétration de la gelée d'hiver. D'autre part, une couverture nivale épaisse qui demeure sur le sol au printemps en retarde le dégel. Les chutes de neige abondantes à l'est de la baie d'Hudson apparaissent comme un facteur important dans le déplacement, en direction du nord, des zones de pergélisol au Québec.

Le feu constitue un facteur passager que l'on ne considère pas normalement comme pouvant influer sur le pergélisol. Bien qu'un incendie en un endroit donné soit habituellement de courte durée, il n'en demeure pas moins qu'un incendie de forêt ou de toundra peut altérer l'état du pergélisol qui se trouve dans le sous-sol. La carbonisation de la surface du sol changera ses capacités d'absorption de la chaleur. La disparition de la couche végétale, suite à un incendie, peut entrainer le dégel du pergélisol et rendre le sol moins stable.

Au cours des temps géologiques, la formation et le régime des glaciers et des calottes glaciaires ont profondément influencé le pergélisol. La température de la partie inférieure de la glace a déterminé celle du pergélisol sous-jacent. Les conditions post-glaciaires variées ont amené des fluctuations dans l'étendue du pergélisol.

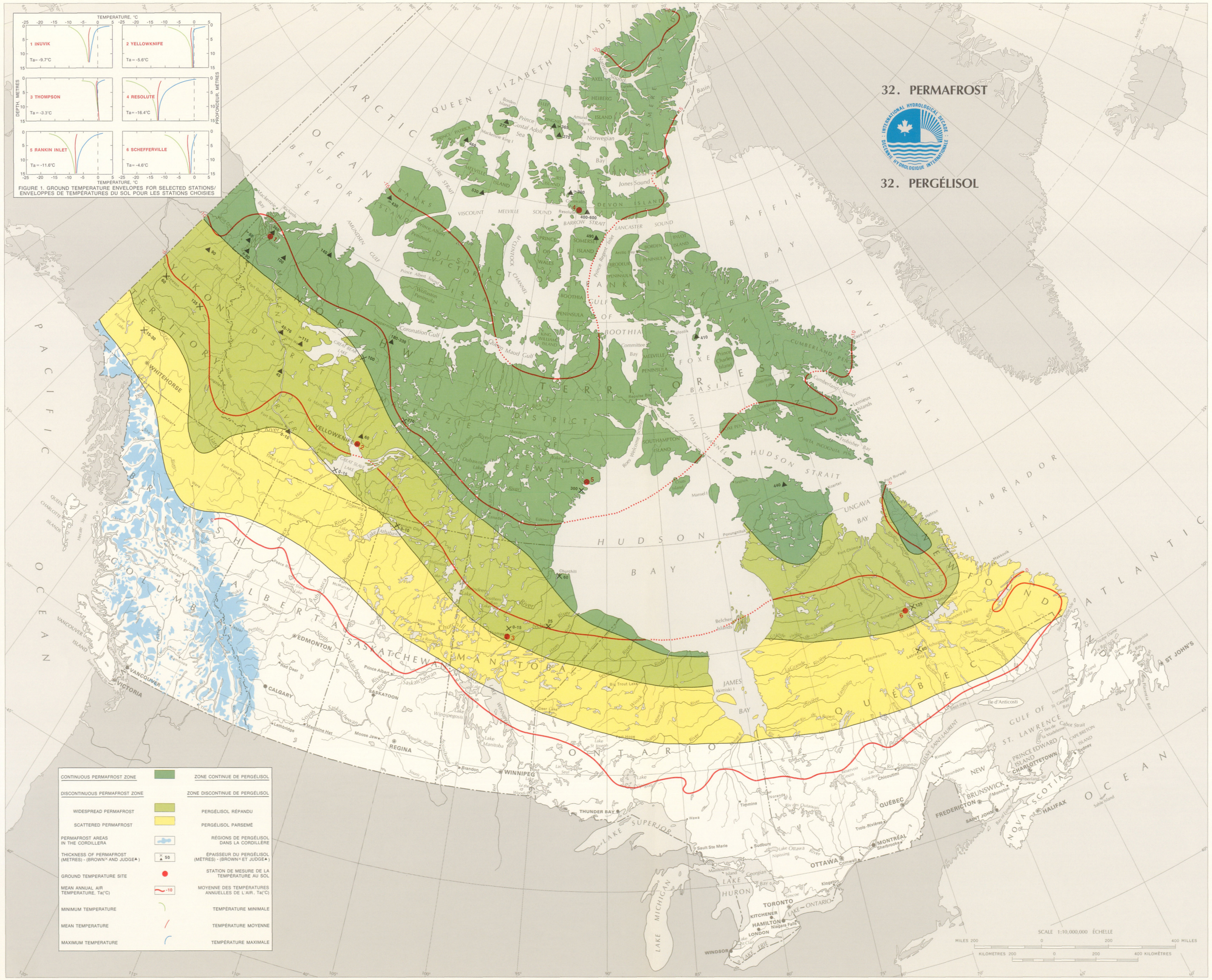
La nature et la teneur en eau du sol et du roc exercent, en raison des variations de leurs propriétés thermiques telles que la conductivité, la diffusivité et la chaleur spécifique, une influence considérable sur le pergélisol. Elles modifient le taux d'accumulation du pergélisol ainsi que l'épaisseur de la zone active.

Remerciements

Monsieur R.J.E. Brown du Conseil national de recherches du Canada, a rédigé le texte et fait la mise en carte.

Références

[1] *Permafrost Hydrology*. 1974. Comptes rendus d'un atelier de travail. Secrétariat de la CNC/DHI aux soins de la Direction générale des eaux intérieures, ministère de l'Environnement, Ottawa.
[2] Williams, J.R. et van Everdingen, R.O. 1973. *Groundwater investigations in permafrost regions of North America: a review*. North America Contribution to Second International Conference on Permafrost, Yakutsk, U.R.S.S. National Academy of Sciences, Washington, D.C. p. 435 à 446.
[3] Brown, R.J.E. Août 1967. *Permafrost in Canada*. Carte publiée par la Division des recherches sur le bâtiment, Conseil national de recherches (CNR 9769) et la Commission géologique du Canada (Carte 1246 A).
[4] Brown, R.J.E. 1970. *Permafrost in Canada—Its Influence on Northern Development*. Presses de l'Université de Toronto, 234 pages.
[5] Brown, R.J.E. et Péwé, T.L. 1973. *Distribution of permafrost in North America and its relationship to the environment: a review, 1963-1973*. Proc. North American Contribution to Second International Conference on Permafrost, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, National Academy of Sciences/National Research Council, Washington, p. 71 à 100.
[6] Ives, J.D. 1974. *Permafrost. Arctic and Alpine Environments*, chapitre 4A, p. 159 à 194. J.D. Ives et R.G. Barry (éd.), Methuen, Londres, 999 pages.
[7] Taylor, A.E. et Judge, A.S. 1974. *Canadian Geothermal Data Collection —Northern Wells, 1955 to February 1974. Geothermal Series No. 1*. Services géothermiques du Canada, Direction de la physique du globe, ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, Ottawa, 171 pages.



PROJECTION CONIQUE CONFORME DE LAMBERT, PARALLÈLES STANDARD 49°N ET 77°N.
SOURCE DE DONNÉES: CANADA, MINISTÈRE DES PÊCHES ET DE L'ENVIRONNEMENT, SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT ATMOSPHÉRIQUE, 1975.

LAMBERT CONFORMAL CONICAL PROJECTION, STANDARD PARALLELS 49°N AND 77°N.
DATA SOURCE: CANADA, DEPARTMENT OF FISHERIES AND THE ENVIRONMENT, ATMOSPHERIC ENVIRONMENT SERVICE, 1975.