

**La géophysique appliquée au pergélisol, Québec nordique :
historique et développements récents**
**Permafrost Geophysics in Northern Québec: Review and Recent
Developments**
**Verwendung der Geophysik beim Studium des
Dauerfrostbodens im nordischen Québec: Geschichte und
neuere Entwicklungen**

Maurice K.-Seguin et Michel Allard

Volume 41, numéro 1, 1987

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/032670ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/032670ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (imprimé)

1492-143X (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

K.-Seguin, M. & Allard, M. (1987). La géophysique appliquée au pergélisol, Québec nordique : historique et développements récents. *Géographie physique et Quaternaire*, 41(1), 127–140. <https://doi.org/10.7202/032670ar>

Résumé de l'article

Au Québec nordique, les relevés géophysiques pour l'étude du pergélisol ont débuté en 1953, lors de la construction du chemin de fer reliant Schefferville à Sept-Îles. Une entente entre le Conseil national de la recherche du Canada et la Compagnie Iron Ore du Canada a ensuite favorisé l'emploi de mesures géothermiques. Dès 1962, les sondages de résistivité électrique ont servi à déterminer la répartition et l'épaisseur du pergélisol. La Compagnie Iron Ore et les chercheurs de l'université McGill ont ensuite employé d'autres méthodes: polarisation spontanée et provoquée, électromagnétisme, infrarouge thermique et diagraphies. D'autres groupes, actifs ailleurs au Québec au cours des années 70, ont mis à profit différentes méthodes: mesures et modèles thermiques, géoradar, géocaméra. La géophysique au Centre d'études nordiques a débuté en 1973, en Hudsonie, et s'est poursuivie dans une dizaine d'autres sites. On a surtout employé la résistivité électrique accompagnée de contrôles thermiques dans le mollisol et de forages superficiels. Les développements techniques les plus importants réalisés au Centre d'études nordiques, liés aux composantes microélectroniques et aux systèmes d'acquisition de données, ont eu lieu au site expérimental de Kangiqsualujuaq où les résultats de plusieurs méthodes sont comparés et où de nouvelles approches sont évaluées.

Essais

LA GÉOPHYSIQUE APPLIQUÉE AU PERGÉLISOL, QUÉBEC NORDIQUE: HISTORIQUE ET DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS

Maurice K.-SEGUIN et Michel ALLARD, respectivement Département de géologie et Centre d'études nordiques, et Département de géographie et Centre d'études nordiques, Université Laval, Sainte-Foy, Québec G1K 7P4.

RÉSUMÉ Au Québec nordique, les relevés géophysiques pour l'étude du pergélisol ont débuté en 1953, lors de la construction du chemin de fer reliant Schefferville à Sept-Îles. Une entente entre le Conseil national de la recherche du Canada et la Compagnie Iron Ore du Canada a ensuite favorisé l'emploi de mesures géothermiques. Dès 1962, les sondages de résistivité électrique ont servi à déterminer la répartition et l'épaisseur du pergélisol. La Compagnie Iron Ore et les chercheurs de l'université McGill ont ensuite employé d'autres méthodes: polarisation spontanée et provoquée, électromagnétisme, infrarouge thermique et diagraphies. D'autres groupes, actifs ailleurs au Québec au cours des années 70, ont mis à profit différentes méthodes: mesures et modèles thermiques, géoradar, géocaméra. La géophysique au Centre d'études nordiques a débuté en 1973, en Hudsonie, et s'est poursuivie dans une dizaine d'autres sites. On a surtout employé la résistivité électrique accompagnée de contrôles thermiques dans le mollisol et de forages superficiels. Les développements techniques les plus importants réalisés au Centre d'études nordiques, liés aux composantes microélectroniques et aux systèmes d'acquisition de données, ont eu lieu au site expérimental de Kangisualujuaq où les résultats de plusieurs méthodes sont comparés et où de nouvelles approches sont évaluées.

ABSTRACT *Permafrost geophysics in northern Québec: review and recent developments.* In northern Québec geophysical investigations for the study of permafrost started in 1953 during the construction of the railway linking Schefferville to Sept-Îles. A little later, a joint venture by the National Research Council of Canada and the Iron Ore Company of Canada initiated the first geothermal measurements. In 1962, electrical resistivity soundings were used to determine the spatial distribution and thickness of permafrost. The Iron Ore Company of Canada and researchers of McGill University used other geophysical methods, including self and induced polarization, electromagnetism, thermal infrared and geophysical logs. During the 70's, other groups active elsewhere in Québec started using different geophysical methods such as geothermal measurements and models, ground probing radar and geocamera. At the Centre d'études nordiques, permafrost geophysics was first used in 1973 in the Hudson Bay region and later extended to some ten other localities. Electrical resistivity complemented with thermal controls in the active layer and shallow drillings were mainly used. The most important technical developments at the Centre d'études nordiques are related to microelectronic components and automated data acquisition systems; the experiments are being carried out at Kangisualujuaq where the results of different methods are compared and new approaches evaluated.

ZUSAMMENFASSUNG *Verwendung der Geophysik beim Studium des Dauerfrostbodens im nördischen Québec: Geschichte und neuere Entwicklungen.* Im nördischen Québec haben die geophysikalischen Erhebungen zum Studium des Dauerfrostbodens 1953 begonnen, während des Baus der Eisenbahnlinie zwischen Schefferville und Sept-Îles. Ein Abkommen zwischen dem Conseil National de la Recherche du Canada und der Firma Iron Ore du Canada hat anschließend die Verwendung geothermischer Messungen begünstigt. Seit 1962 haben Untersuchungen des elektrischen Leitungswiderstands dazu gedient, die Verteilung und die Dicke des Dauerfrostbodens zu bestimmen. Die Firma Iron Ore du Canada und Forscher der McGill-Universität haben danach andere Methoden verwendet: spontane und induzierte Polarisierung, Elektromagnetismus, thermisches Infrarot und geophysikalische Berichte. Andere Gruppen, die in einem anderen Teil Québecs im Laufe der siebziger Jahre tätig waren, haben verschiedene Methoden genutzt: thermische Messungen und Modelle, Georadar, Geokamera. Am Centre d'études nordiques wurde 1973 zum ersten Mal die Geophysik eingesetzt im Gebiet der Hudson Bay und später in zehn anderen Gebieten. Man hat vor allem den elektrischen Leitungswiderstand verwendet zusammen mit thermischen Kontrollen im Auftauboden und mit Oberflächen-Bohrungen. Die wichtigsten technischen Entwicklungen, die im Centre d'études nordiques realisiert wurden, sind verbunden mit mikroelektronischen Komponenten und den Datenverarbeitungssystemen; die Experimente sind bei Kangisualujuaq durchgeführt worden, wo die Ergebnisse von mehreren Methoden verglichen und neue Methoden beurteilt werden.

INTRODUCTION

Les méthodes géophysiques pour l'étude du pergélisol ont été appliquées au Canada, surtout le long de corridors réservés au passage de pipelines (Yukon, Territoires du Nord-Ouest) et dans les régions d'exploration pétrolière (archipel arctique, Territoires du Nord-Ouest) et minière (e.g. Québec nordique). Les méthodes géophysiques utilisées dans les toutes premières applications sur le pergélisol furent la géothermie, la résistivité électrique et la réfraction sismique. On estimait alors que ces méthodes offraient les meilleures perspectives (AKIMOV *et al.*, 1978). Les contrastes importants des propriétés physiques, notamment la résistivité électrique et les vitesses sismiques (V_P et V_S) entre les matériaux dégelés et pergélisolés étaient alors relativement bien connus (MÜLLER, 1961). Les méthodes géophysiques permettaient déjà d'obtenir des renseignements utiles relatifs à la distribution latérale, l'épaisseur et certaines propriétés physiques du pergélisol: lithologies, porosités et intensités de gel interstitiel variables (BARNES, 1963; ROETHLISBERGER, 1961).

Le but de cet essai consiste à faire un tour d'horizon des méthodes géophysiques utilisées au Québec nordique permettant: 1) de déterminer les extensions latérale et verticale du pergélisol, 2) de donner des renseignements relatifs aux propriétés physiques *in situ* du pergélisol, 3) d'évaluer la pertinence de l'emploi de méthodes géophysiques intégrées pour la prévision de l'évolution temporelle du pergélisol.

HISTORIQUE

Au Québec nordique, les premières études géophysiques appliquées au pergélisol ont probablement été réalisées vers 1952-53 par les ingénieurs de la Quebec North Shore and Labrador Railway (WOODS *et al.*, 1959; PRYER, 1959, 1963) lors de la construction de la voie ferrée de quelque 580 km reliant Sept-Îles à Schefferville. Les méthodes géophysiques utilisées dans des aires pergélisolées incluaient la résistivité électrique, la réfraction sismique et les mesures géothermiques de faible profondeur (0,5-2 m).

Les premières études géothermiques (principalement des câbles à thermocouples et à thermistances dans des trous de forage) dans des régions de pergélisol discontinu ont été rendues nécessaires en raison des difficultés rencontrées dans l'exploitation des mines de fer autour de la région de Schefferville. Un premier protocole de recherche scientifique sur le pergélisol de cette région a été établi entre le Conseil national de recherche du Canada et la Compagnie Iron Ore du Canada (IOCC), en 1955 (BONNLANDER et MAJOR-MAROTHY, 1957). Plus tard, l'inclusion du McGill Sub-Arctic Research Station dans le consortium (BONNLANDER, 1958; BONNLANDER et MAJOR-MAROTHY, 1964) a permis d'établir une base de recherche pour les nombreuses études géophysiques (SEGUIN, 1974a). ANNERSTEN (1962) a été le premier à employer les sondages de résistivité électrique pour déterminer avec succès la répartition et l'épaisseur du pergélisol. Entre 1965 et 1980, et plus particulièrement entre 1967 et 1973, les conseillers et les ingénieurs de la firme IOCC et occasionnellement les chercheurs de l'université McGill ont employé d'autres méthodes géophysiques que la

résistivité et la réfraction sismique, par exemple: la polarisation provoquée, la polarisation spontanée, les méthodes électromagnétiques standard, les méthodes électromagnétiques de très basses fréquences dans la bande radio, la méthode infrarouge thermique, les diagraphies dans les trous de forage (WYDER, 1972; SEGUIN et GARG, 1972; SEGUIN, 1974a) et la méthode sismique dans les trous de forage (HUNTER, 1974). D'autres groupes de recherche (e.g. Hydro-Québec, ministère de la Défense nationale, Commission géologique du Canada, Direction de la physique du globe, Université de Montréal) ont eu recours à diverses méthodes géophysiques pour l'étude du pergélisol ailleurs au Québec nordique, soit en Jamésie, à la baie aux Feuilles, à Akulivik et dans les environs de Kangiqsujuaq.

Au Centre d'études nordiques, les premiers travaux de géophysique appliquée au pergélisol ont été effectués en 1973, en Hudsonie, plus exactement dans un champ de paises près de la rivière Ouiatchouane (LAGAREC, 1980). D'autres travaux géophysiques ont ensuite été entrepris au lac Minto, au lac de la Hutte Sauvage, à la rivière aux Feuilles, à Purtuniqu, à Kuujuarapik (Poste-de-la-Baleine), aux îles Manitounuk, à la rivière Nastapoca, au lac à l'Eau Claire, à la rivière Sheldrake, au lac Guillaume-Delisle, à Kangiqsualujuaq, à la rivière Koroc et à proximité du fjord Weymouth. Toutes ces études ont été réalisées de 1975 à 1985. La figure 1 montre les sites où des recherches géophysiques relatives au pergélisol ont été effectuées au Québec nordique.

Par contre, l'étude comparative des photographies aériennes de quelques champs de paises aux environs de Schefferville (e.g. régions du lac Annabel sud, de Goodream, de Fleming 4, etc.) de 1949 à nos jours indiquent que les paises ont subi une régression d'environ 15 % de leur superficie et leur remplacement par des mares de thermokarst (Hardy Granberg, communication personnelle, 1986). Des observations similaires ailleurs au Québec nordique ont été faites par SAMSON (1975), PAYETTE *et al.* (1976) et LAGAREC (1980).

Originellement dans la région de Schefferville, la plus basse valeur de température ($-7,7^{\circ}\text{C}$) enregistrée à une profondeur de 3 m sous le mollisol a été observée le long d'une colline linéaire, à une altitude de 790 m au-dessus du niveau moyen de la mer (THOM, 1969, 1970a, b). Des compilations plus récentes de données géothermiques à Schefferville provenant de plus de 200 thermocâbles, ainsi que des rapports non publiés relatifs au pergélisol, indiquent la présence de plusieurs sites dont les températures sont légèrement plus basses que -8°C (e.g. $-9,4^{\circ}\text{C}$ à 1,8 m de profondeur le 19 février 1974 dans le dépôt Ferriman; GRANBERG *et al.* 1983, 1984). Les données géothermiques démontrent l'existence prépondérante d'isothermes quasi verticaux (fig. 2) et l'absence presque totale de gradients thermiques verticaux. La présence du pergélisol discontinu dépend donc d'abord de la topographie locale qui influence l'épaisseur de la couverture nivale, puis des propriétés thermiques des matériaux géologiques, la distribution et le type de végétation. Les travaux de NICHOLSON (1979) ont démontré l'influence dominante de la couverture de neige sur la distribution spatiale du pergélisol. Des sources de chaleur (énergie calorimétrique), tels les lacs, les marécages, les

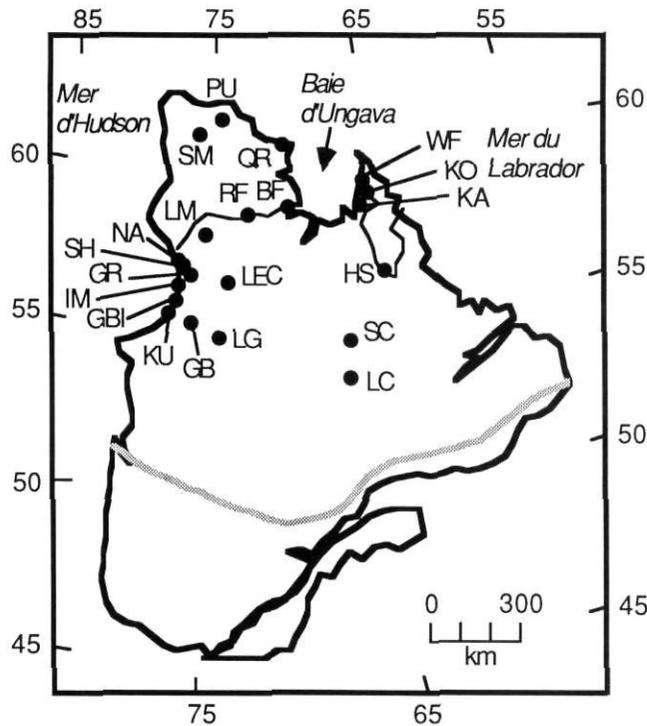


FIGURE 1. Localisation des sites du Québec nordique où des levés géophysiques relatifs au pergélisol ont été effectués: LC, Labrador City; SC, Schefferville; HS, lac de la Hutte Sauvage; KA, Kangiqsualujuaq; KO, rivière Koroc; WF, fjord Weymouth; BF, Tasiujaq; QR, Quaqtaq; PU, Purtunig; SM, Akulivik-Kangiqsujuaq; LM, lac Minto; LEC, lac à l'Eau Claire; NA, rivière Nastapoca; SH, rivière Sheldrake; GR, lac Guillaume-Delisle; IM, îles Manitounuk; GB1, Grande Baleine 1; KU, Kuujuarapik; GB, grande rivière de la Baleine; LG, la Grande Rivière. Trait continu: contact pergélisol continu-discontinu; trait pointillé: limite sud du pergélisol discontinu (ALLARD et SEGUIN, 1987a).

Location of the sites where geophysical surveys related to permafrost were carried out in northern Québec. Solid line: boundary of continuous-discontinuous permafrost; dashed line: boundary of discontinuous permafrost-unfrozen area (ALLARD and SEGUIN, 1987a).

cours d'eau ou l'écoulement d'eau souterraine, favorisent la formation de taliks dans le pergélisol. Les levés effectués par ANNERSTEN (1962) avaient justement pour but de déterminer la répartition bidimensionnelle des aires pergélisolées et non gelées.

LES DÉCENNIES 50 ET 60

Au cours de ces deux décennies, les recherches géophysiques ont été concentrées dans les environs de Schefferville. L'expérience a montré qu'il était nécessaire de délimiter et de classer les aires pergélisolées en cours d'exploitation minière à ciel ouvert et de faire des corrélations entre les différents types (ou classes) de pergélisol quant aux données géophysiques et aux paramètres physiques des roches et des sols pergélisolés de manière à optimiser le rendement des exploitations minières. D'autres activités telles l'exploration géologique (principalement le forage) et la construction de voies ferrées et de routes, de voies d'accès

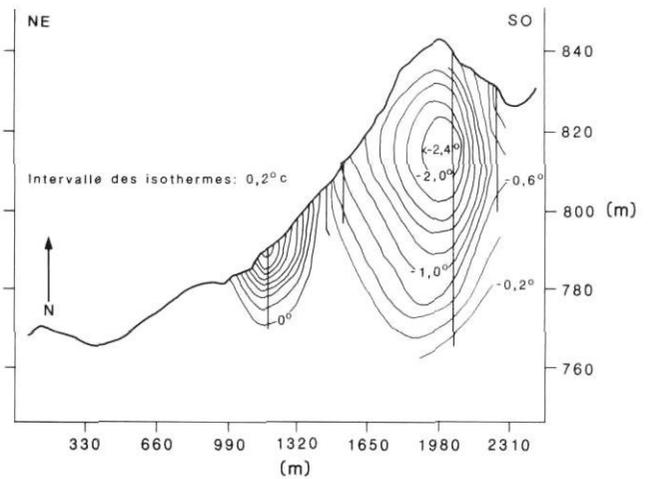


FIGURE 2. Courbes isothermes indiquant la position du pergélisol dans la colline Ferriman, région de Schefferville (modifié d'après ANNERSTEN, 1966).

Isotherms across Ferriman Ridge, Schefferville district (modified after ANNERSTEN, 1966).

aux mines, d'aéroports, de tunnels, de dykes, de galeries d'accès, de barrages hydroélectriques, d'excavations spécifiques, de fondations des grandes structures, d'installations de services municipaux, requièrent toutes une connaissance adéquate de la nature, de l'étendue et du comportement du pergélisol.

La formation de pergélisol saisonnier est possible lorsque l'amplitude des changements de température de l'air (température moyenne de -5°C à Schefferville) est appréciable et que le régime thermique des matériaux superficiels terrestres est favorable (SEGUIN, 1974a). À Schefferville, la température de surface du pergélisol n'est que très légèrement inférieure à 0°C . Sur la colline Ferriman, ANNERSTEN (1964) a observé que les variations de la température moyenne annuelle selon la profondeur étaient dues aux variations de température en surface et aux propriétés thermiques du sol ou du roc (diffusion et conductivité thermique). Ayant observé une forte tendance vers des températures décroissantes à de plus grandes profondeurs de la surface vers le cœur du pergélisol, ANNERSTEN (1964) conclut à un pergélisol en état de dégradation (fig. 2). Toutefois, les observations continues au cours des 15 dernières années n'ont pu confirmer ou infirmer ce présumé état de dégradation. Ceci est vraisemblablement dû à la présence de gradients de température latéraux plus prononcés que le gradient thermique vertical. NICHOLSON et THOM (1972) ont conclu qu'il n'y avait pas de preuves d'aggradation du pergélisol à Schefferville. Ces auteurs optent donc pour un état d'équilibre du pergélisol avec le climat. Ainsi donc, si le pergélisol se dégrade, le climat se réchauffe peut-être.

Bref, l'utilisation des méthodes géophysiques a été très limitée au cours de cette période, si l'on fait exception de la géothermie. Les premiers essais de détermination relatifs à l'extension latérale du pergélisol, à l'aide des méthodes de résistivité électrique et de réfraction sismique, ont donné des résultats préliminaires concluants et utiles à la solution de

certains problèmes d'ingénierie, du transport et d'activités minières.

LES ANNÉES 70

Des recherches géophysiques relatives au pergélisol ont débuté vers 1967 et se sont poursuivies tout au long des années 1970 dans le district minier de Schefferville (SEGUIN 1967a, 1967b, 1968). En plus des mesures géothermiques (NICHOLSON, 1976, 1978, 1979), les premières techniques

géophysiques employées ont été les sondages de résistivité électrique de surface (fig. 3) et la réfraction sismique. Se sont ensuite ajoutés les levés électromagnétiques terrestres (fig. 4) et aéroportés dans le domaine fréquentiel (électromagnétisme standard et de très basses fréquences) et les levés de polarisation provoquée (SEGUIN, 1974a). Les diagraphies géophysiques (fig. 5) employées pour délimiter les aires pergélisolées sont les suivantes: caliper, neutron, gamma-gamma (densité), résistivité électrique (configurations normales à un seul point avec boues et à sec), polarisation spontanée

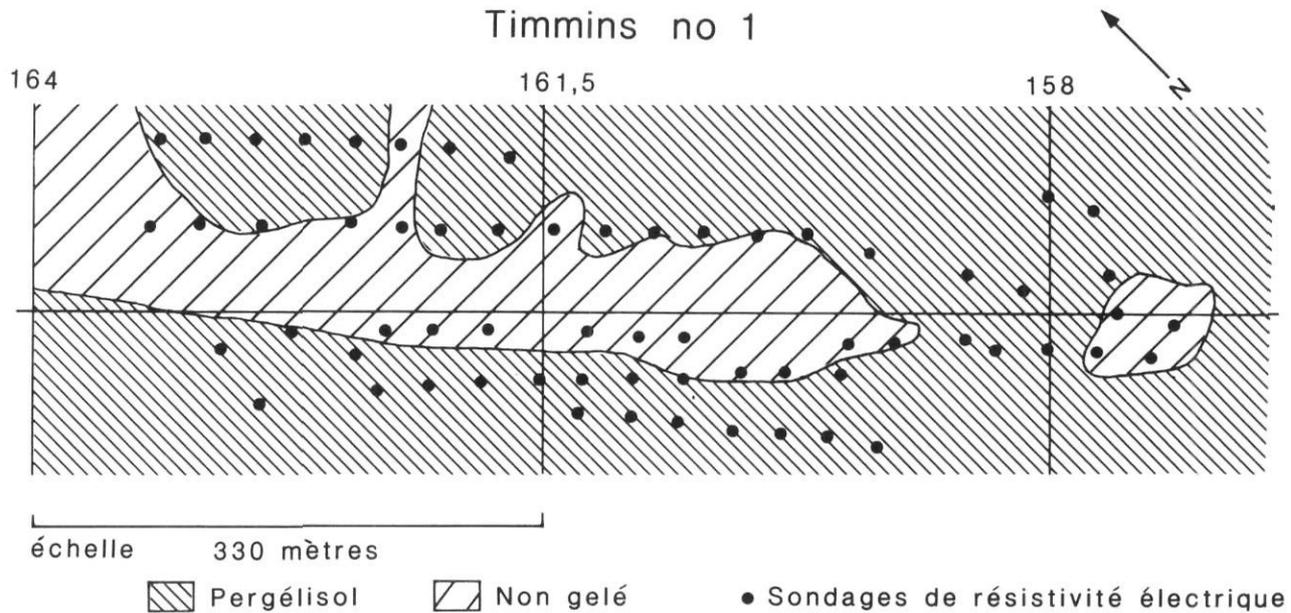


FIGURE 3. Détermination de l'extension latérale du pergélisol discontinu à l'aide de sondages de résistivité électrique (configuration de Schlumberger) dans le dépôt minier de Timmins n° 1, région de Schefferville. Chaque point représente un sondage. L'extension verticale minimale du pergélisol est de 20 m à partir de la surface. Le mollisol est considéré comme transparent sur ce plan (d'après Seguin, 1972 dans GRANBERG *et al.*, 1983).

*Delineation of the spatial distribution of discontinuous permafrost using electrical resistivity soundings (Schlumberger array) on the Timmins #1, Schefferville district. Each dot represents one sounding. The minimum vertical extent of permafrost is 20 m below the surface. The active layer is transparent on this plan view (after Seguin 1972, in GRANBERG *et al.*, 1983).*

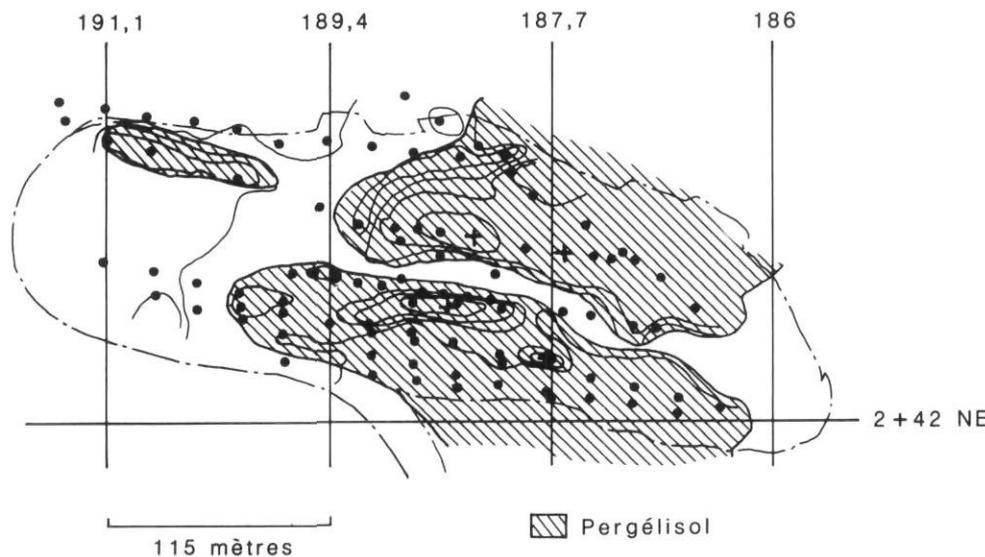


FIGURE 4. Délimitation latérale du pergélisol discontinu à partir des variations d'impédance électrique (ρ_a) obtenue par un levé électromagnétique de très basse fréquence (ondes radio). Dépôt minier n° 6, région de Schefferville, 21 juillet 1979. La base du pergélisol est à 60 m de profondeur (d'après Seguin, 1979 dans GRANBERG *et al.*, 1983).

*Lateral distribution of discontinuous permafrost according to variations of electrical impedance (ρ_a) obtained with a very low frequency ground electromagnetic survey on the Timmins #6 deposit, Schefferville district (July, 21, 1979). The base of permafrost is approximately 60 m-deep (after Seguin, 1979, in GRANBERG *et al.*, 1983).*

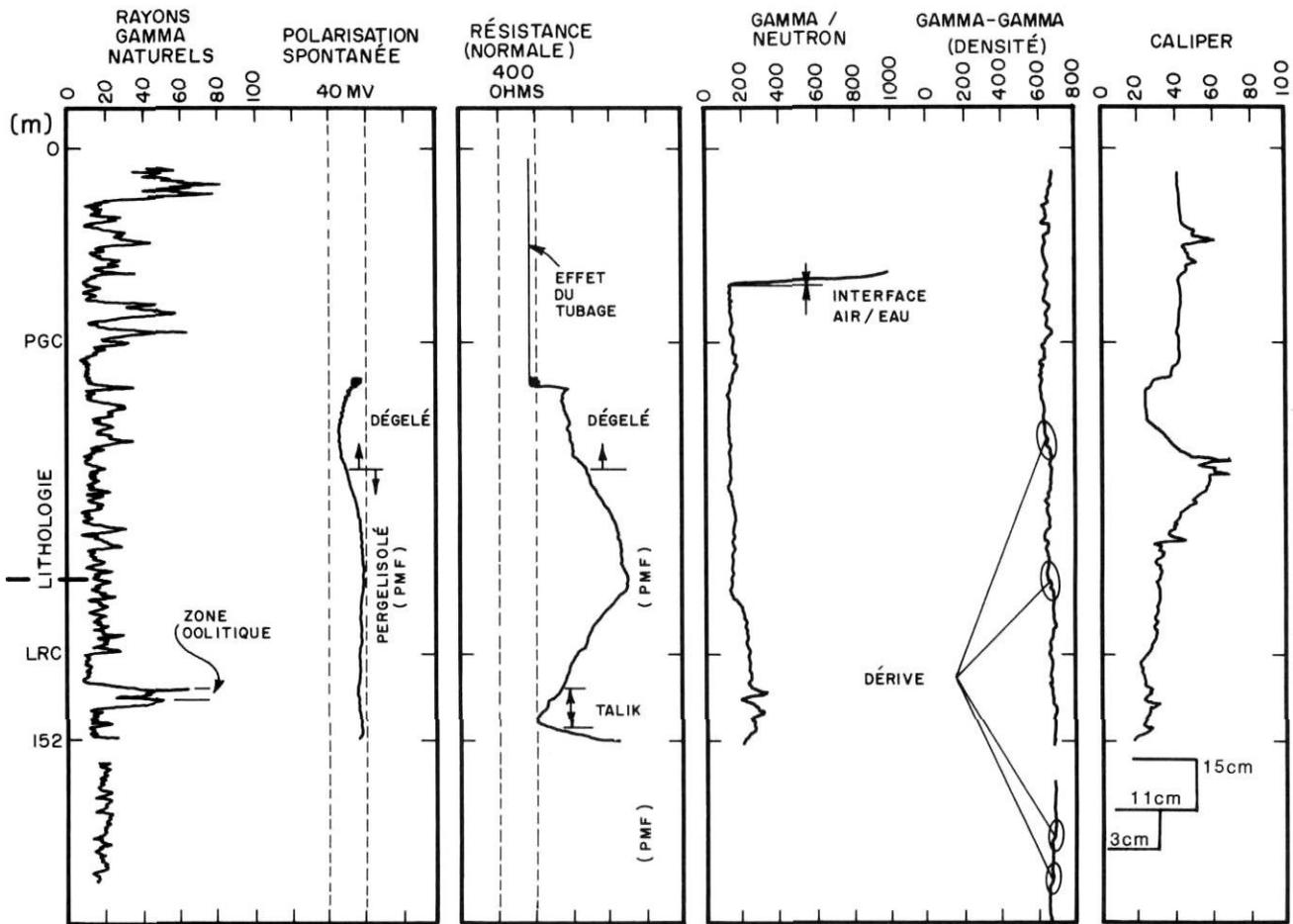


FIGURE 5. Diagraphies géophysiques [rayons gamma naturels, polarisation spontanée (PS), résistance électrique (RE), gamma-neutron, gamma-gamma et caliper (C)] dans un trou de forage du dépôt de Timmins n° 4, région de Schefferville. Pour la lithologie, PGC et LRC représentent des membres géologiques de la formation de Sokoman, Les variations de PS, RE et C sont utiles pour la délimitation du pergélisol (d'après WYDER, 1972).

Geophysical logs (natural gamma rays, self potential electrical resistance, gamma-neutron, and caliper) in a drill hole on the Timmins #4 deposit, Schefferville district. For the lithology, PGC and LRC units represent geological members of the Sokoman iron formation. Self potential, electrical resistivity and caliper variations are most useful to delineate the permafrost (after WYDER, 1972).

(SEGUIN, 1971b, 1974a, WYDER, 1972) et polarisation provoquée (SEGUIN et GARG, 1972, SEGUIN, 1974c et 1977). En ce qui a trait aux techniques diagraphiques, la résistivité électrique et la polarisation spontanée dans des trous secs sont les plus efficaces pour déterminer la distribution verticale du pergélisol. Le log neutronique permet de déterminer le degré d'humidité ou le contenu en glace, le log gamma-gamma et, à un degré moindre, le log caliper, la porosité (quantité de glace dans les pores). La méthode de sautage et d'enregistrement des ondes sismiques dans les trous de forage (*uphole shooting*) ont aussi été employées avec un succès mitigé (HUNGER, 1974). Dans la région de Schefferville, les domaines d'application de la géophysique au pergélisol peuvent être subdivisés en quatre grands groupes (SEGUIN, 1973; SEGUIN et GRANBERG, 1986): 1) études régionales et étape de l'exploration minière, 2) étape du développement minier, 3) étape de l'exploitation minière et 4) études géotechniques associées aux activités minières, municipales et de transport (surtout ferroviaire). En résumé, la réfraction sismique définit

précisément l'interface supérieure du pergélisol et les sondages de résistivité électrique, l'interface inférieure avec une précision relative de $\pm 10\%$.

Ailleurs au Québec, l'observation de couches de glace profonde a été effectuée dans le bassin de la grande rivière de la Baleine (BOTTERON *et al.*, 1979) à l'aide d'une géocaméra. Des mesures géothermiques ont été réalisées dans la région des collines de Povungnituk entre le cap Smith et la baie de Maricourt (JUDGE, 1973, TAYLOR et JUDGE, 1979), au sud de la baie aux Feuilles (GRAY et PILON, 1976; GRAY *et al.*, 1979). L'emploi du radar à impulsion de très haute fréquence combiné aux sondages faits avec une sonde thermique manuelle a permis à PILON *et al.* (1979) de démontrer la capacité de ce genre d'instrument à mesurer l'épaisseur du mollisol. Des mesures géothermiques et des SRE ont été effectués dans les régions de Labrador City-Wabush (SEGUIN, 1974b), de Purtuniqu (SAMSON et Tordon, 1969; SEGUIN 1978; SEGUIN et ROBITAILLE, 1984) et de Kuujuarapik (SEGUIN et CRÉPAULT, 1979). La présence

et la distribution du pergélisol à la rivière aux Feuilles ont été déterminées à l'aide de sondages de résistivité de surface (PAYETTE et SEGUIN, 1979), de même qu'au lac de la Hutte Sauvage (SEGUIN et SAMSON, 1980) et à la rivière Ouatichouane (LAGAREC, 1980). Des mesures géothermiques, des sondages de résistivité électrique, ainsi que des levés de polarisation spontanée et de polarisation provoquée de surface, ont permis de déterminer l'épaisseur du pergélisol dans les environs du lac Minto avec une précision relative de $\pm 15\%$ (SEGUIN, 1976; SEGUIN et LAMBERT, 1975).

En résumé, au cours de cette décennie, on assiste à l'utilisation maximale des techniques géophysiques appliquées au pergélisol dans la région de Schefferville et de Labrador City. Notons les développements les plus importants, à savoir les sondages de résistivité électrique pour la détermination précise de l'extension latérale et verticale, ainsi que la distribution locale du pergélisol dans les mines de fer, la délimitation précise de l'épaisseur du mollisol par la réfraction sismique, l'application des diagraphies géophysiques (principalement la résistivité électrique, la polarisation spontanée et neutronique), les innombrables mesures géothermiques et, enfin, la détermination *in situ* des propriétés électriques, élastiques dynamiques et thermiques du pergélisol dans divers types de roches et de sols à partir des relevés géophysiques en surface et en profondeur. Des études géophysiques similaires ont été effectuées à une échelle plus réduite dans quelques autres sites du Québec. L'emploi du géoradar à la fin des années 70, permettant de détecter la limite supérieure du pergélisol, est digne de mention.

LES ANNÉES 80

La diminution des fonds de recherche relatifs à l'étude du pergélisol, la disparition de certains centres de recherche nordique au Québec, l'arrêt des travaux d'ingénierie et des études environnementales reliées à la construction des barrages hydroélectriques de la baie de James et, finalement, l'arrêt des recherches sur le pergélisol en raison de la fermeture des mines de Schefferville, sont les facteurs les plus importants responsables du déclin récent des études sur le pergélisol au Québec.

L'application des techniques géophysiques au pergélisol est devenu le fait de recherches universitaires la plupart du temps isolés. Les travaux géophysiques portant sur la distribution spatiale et l'évolution temporelle du pergélisol (principalement levés de résistivité électrique et mesures géothermiques) ont été effectués à la grande rivière de la Baleine (POITEVIN et GRAY, 1982) pour le compte d'Hydro-Québec, à la rivière Nastapoca (SEGUIN et ALLARD, 1984b), à la rivière Sheldrake, au lac à l'Eau Claire et à la rivière Ouatichouane (ALLARD et SEGUIN, 1985) et à Kangiqsualujuaq (GAHÉ et SEGUIN, 1985, 1986; GAHÉ *et al.*, 1987), dans des matériaux meubles, ainsi que dans les régions du détroit de Manitounuk (SEGUIN et ALLARD, 1984a) et du lac Guillaume-Delisle (golfe de Richmond) (MICHAUD, 1985) dans le roc. Au Québec nordique, des essais de détection de l'épaisseur du pergélisol en fonction de la latitude et de l'altitude pour divers matériaux non consolidés ont été effectués

en se basant sur l'interprétation des données géophysiques (DESBIENS *et al.*, 1985).

En résumé, au début des années 1980, les recherches géophysiques ont été concentrées dans des études régionales de la distribution latérale et verticale du pergélisol discontinu au Québec nordique. Au cours de ces recherches, on a surtout eu recours aux méthodes électriques et géothermiques.

LES DÉVELOPPEMENTS

Au Centre d'études nordiques, deux approches relatives à l'étude du pergélisol sont actuellement utilisées dans deux régions différentes: 1) des rivières Nastapoca et Sheldrake (LÉVESQUE *et al.*, 1986) et 2) de Kangiqsualujuaq — rivière Koroc (GAHÉ et SEGUIN, 1985). Dans la première région, les données géophysiques (résistivité électrique et géothermie) ont servi à la confection d'une carte de prévision de l'épaisseur du pergélisol dans différentes catégories de matériaux meubles. Dans la seconde région, on a effectué une cartographie combinée des dépôts quaternaires, des formes cryogènes et du pergélisol tout en évaluant et en comparant diverses méthodes électriques et électromagnétiques. Diverses méthodes géophysiques (sondages de résistivité électrique, polarisation provoquée, polarisation spontanée, température, électromagnétisme terrestre dans le domaine fréquentiel, sonde neutron, capacitancemètre dans le domaine fréquentiel, calorimétrie adiabatique *in situ*) souvent encore au stade expérimental y sont utilisées tant en surface (figs. 6, 7 et 8) que dans des trous de forage (figs. 9, 10 et 11) pour délimiter l'extension du pergélisol discontinu dans les milieux littoral et terrestre. Grâce à l'instrumentation géophysique dans des trous de forage du site expérimental de Kangiqsualujuaq et à un suivi prévu pour une période de cinq ans, une étude détaillée de l'évolution du pergélisol est actuellement en cours dans cette région.

Jusqu'à maintenant, les méthodes biophysiques et paléogéographiques (ALLARD et SEGUIN, 1987a) ont permis de prévoir l'état d'aggradation, de détérioration ou d'équilibre thermique du pergélisol en divers endroits du site. Une autre approche possible, et qui peut être conduite en parallèle avec la précédente, consiste à dresser un bilan thermique à l'aide des données obtenues grâce à des stations météorologiques et à des instruments géophysiques installés dans le sol. Les données géophysiques fournissent des connaissances sur la répartition du pergélisol et les propriétés physiques *in situ* et les données météorologiques, les indices de gel et de dégel, les précipitations et l'épaisseur de la couverture nivale. À partir des conditions du régime thermique (conditions aux limites), un modèle physicomathématique peut être construit et l'évolution du pergélisol prévue pour les décennies futures. Cette approche déjà proposée de façon un peu moins élaborée par ANNERSTEN (1966) n'a pas connu de suite immédiate. Récemment, PILON (1982) a poursuivi cette approche et abordé l'étude de l'évolution du dégel dans un sol du point de vue physicomathématique. Dans son analyse, l'auteur distingue les paramètres internes impliqués dans les transports de chaleur dans un sol et, en particulier, les propriétés physiques de ce sol et les paramètres externes impliquant des

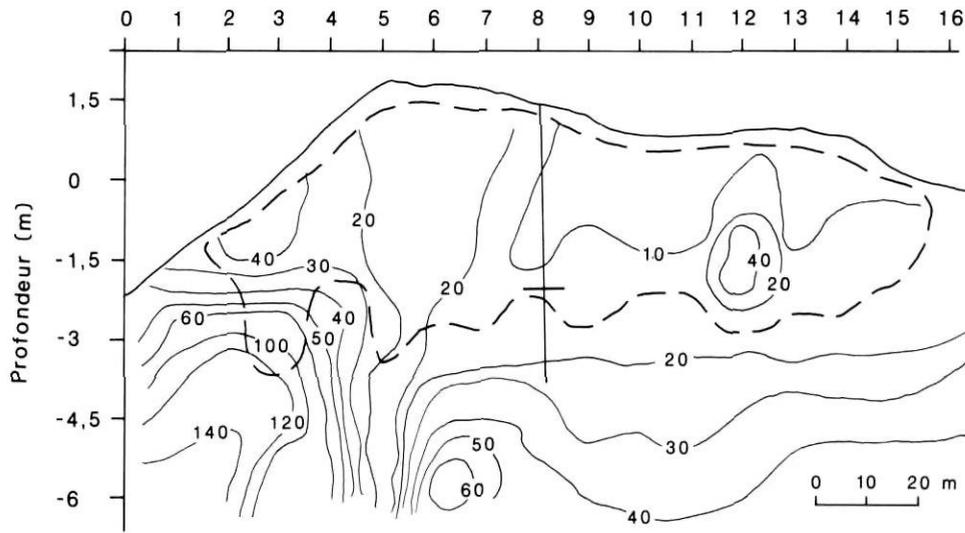


FIGURE 6. Pseudo-section de résistivité apparente (ρ_a) en $K\Omega$ -m sur une terrasse marine (Kangiqsualujjuaq). Les lignes de contour sont exprimés en $K\Omega$ -m et la ligne verticale représente l'emplacement d'un sondage de résistivité électrique. La configuration dipôle-dipôle est utilisé pour ce levé géophysique. La limite de la section pergélisolée est indiquée en tireté.

Pseudo-section of apparent resistivity (ρ_a) in $K\Omega$ -m on a sandy marine terrace (Kangiqsualujjuaq). Isoresistivity values are in $K\Omega$ -m and the vertical line shows the location of an electrical resistivity sounding. A dipole-dipole array is used in this geophysical survey. The top and the base of permafrost are shown as a dashed line.

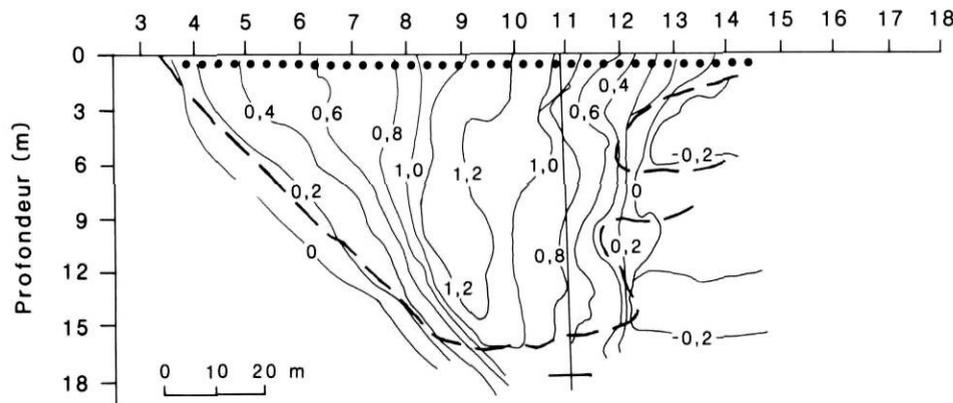


FIGURE 7. Pseudo-section de chargeabilité apparente (ma) en millisecondes sur une terrasse marine (Kangiqsualujjuaq). La configuration dipôle-dipôle est employée. La ligne verticale indique l'emplacement d'un sondage de résistivité électrique et la limite de la section pergélisolée est soulignée.

Pseudo-section of apparent chargeability in milliseconds on the same marine terrace (Fig. 6). A dipole-dipole array is used. The vertical line indicates the site of an electrical resistivity sounding. The top of permafrost is outlined with shallow drillings and the interpreted base of permafrost is shown in dashed lines.

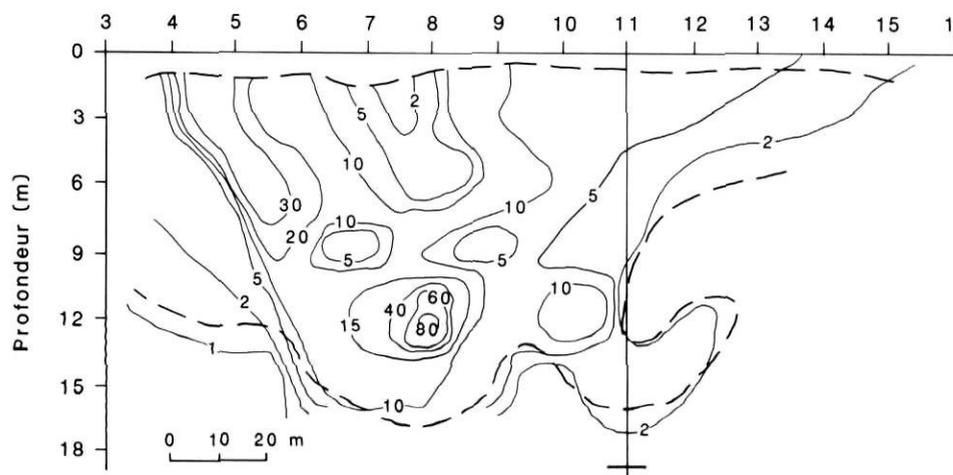


FIGURE 8. Pseudo-section de la résistivité apparente (ρ_a en Ω -m) obtenue par sondage électromagnétique multifréquentiel et multi-séparation (petite butte pergélisolée sur schorre dans un limon argileux). La limite de la section pergélisolée apparaît en tireté.

Pseudo-section of apparent resistivity (ρ_a en Ω -m) obtained with multifrequency-multiseparation electromagnetic soundings (small permafrost mound on the tidal flats). The boundary of the permafrost body is shown in dashed lines.

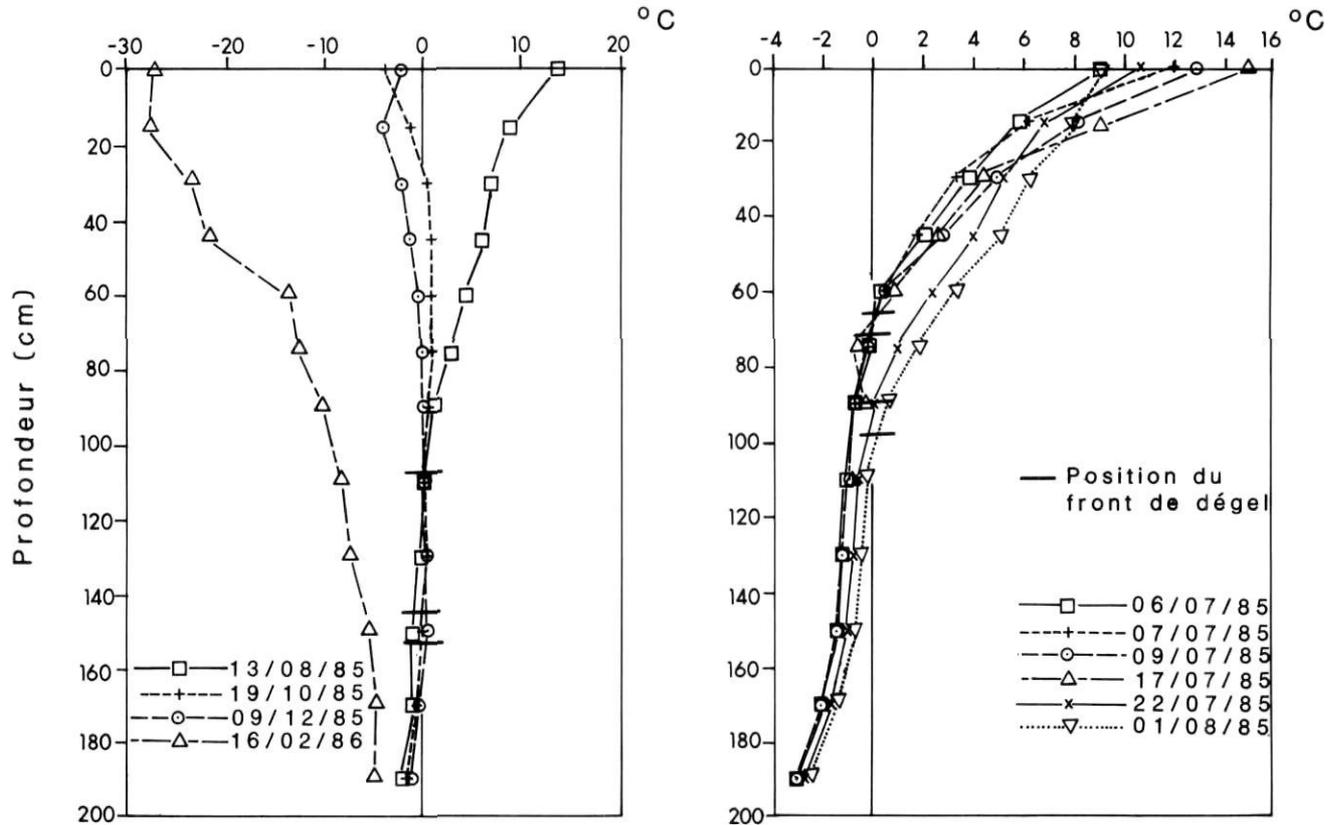


FIGURE 9. Températures du sol sur une butte argileuse de pergélisol à Kangiqsualujuaq, du 6 juillet 1985 au 16 février 1986. L'interface du front de dégel apparaît sur la figure.

Soil temperatures in permafrost on clayey silt mound in Kangiqsualujuaq from July 6, 1985 to February 16, 1986. The successive positions of the thawing front are shown.

transports de chaleur au-dessus de l'interface atmosphère-sol, principalement de nature climatique. PILON (1982) et GRAY *et al.* (1981) ont appliqué cette méthodologie dans le but d'élaborer un modèle permettant de prévoir l'évolution temporelle du mollisol dans la région de la baie aux Feuilles. TAYLOR et JUDGE (1979) et PILON (1982) ont appliqué un modèle semblable pour prévoir l'évolution et l'épaisseur du pergélisol continu de la partie la plus septentrionale du Québec et déterminer l'état du pergélisol sous les conditions climatiques actuelles.

Plusieurs méthodes géophysiques permettant de préciser la distribution spatiale et en profondeur du pergélisol (fig. 8, 9 et 13), et utiles pour déterminer l'origine ou prévoir l'évolution du pergélisol, n'ont pas encore été réalisées au Québec nordique (e.g. réflexion sismique, gravimétrie, méthodes électromagnétiques dans le domaine temporel, magnétotellurie dans la bande audio) ou bien, très rarement (géoradar à très haute fréquence, infrarouge thermique, etc.). L'emploi approprié de diagraphies variées (e.g. thermique, neutronique, de résistivité électrique, de polarisation spontanée, de polarisation provoquée, électromagnétique et acoustique) dans divers matériaux pergélisolés est susceptible de donner des renseignements importants; on devrait y apporter une attention particulière.

Les études en cours et les recherches futures indiquent d'ores et déjà une réorientation des études géophysiques

appliquées au pergélisol, à savoir une diminution des recherches axées sur la distribution du pergélisol à l'échelle régionale et une concentration accrue sur des travaux thématiques plus locaux selon une problématique et des objectifs très précis, e.g. détection et évolution future du pergélisol en milieu littoral ou terrestre par l'analyse des données géothermiques, grâce à la méthode de diffusion de Fourier, suivi temporel et spatial de la limite inférieure du pergélisol par l'entremise de diverses méthodes géophysiques, étude de l'influence des conditions hydrogéologiques sur le régime thermique.

Bref, on met progressivement l'accent sur les processus à l'œuvre qui touchent les phénomènes reliés au pergélisol de préférence à la cartographie de sa distribution.

L'apport de la géophysique à la connaissance de la distribution spatiale du pergélisol et de ses propriétés physiques peut être résumé comme suit. Les sondages de résistivité électrique de surface permettent dans au moins 80 % des cas de déterminer l'épaisseur du mollisol et la profondeur de la limite inférieure du pergélisol dans les sols et, souvent, dans le roc. Les mesures thermiques (essentiellement des réseaux de thermistors dans des trous de forage) permettent de déterminer avec précision la base du pergélisol. La réfraction sismique donne une plus grande précision que les sondages de résistivité électrique pour mesurer l'épaisseur du mollisol, mais ne permet pas de déterminer la limite inférieure du

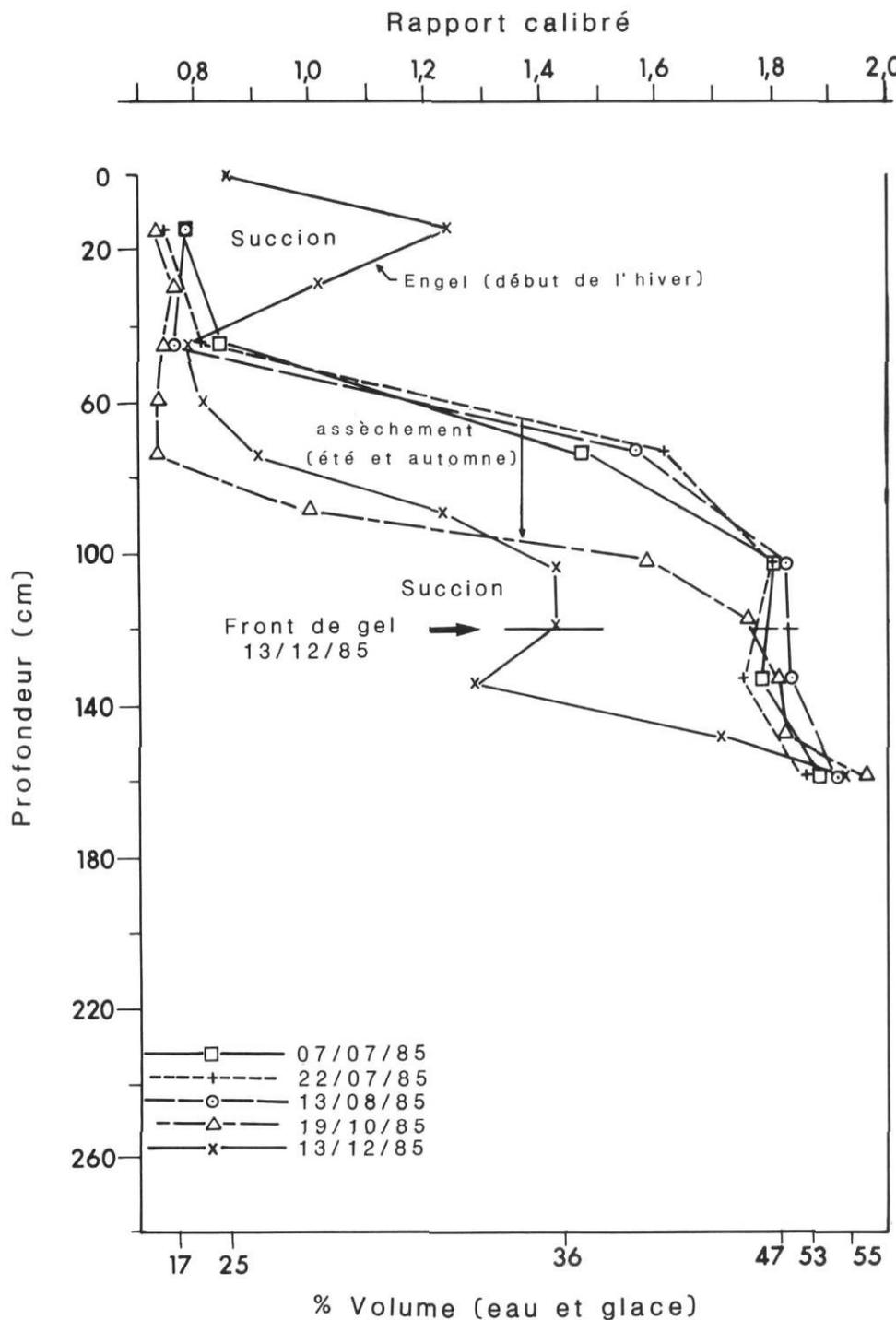


FIGURE 10. Détermination de la teneur relative en eau et en glace à l'aide d'une sonde neutronique (terrasse marine sableuse à Kangiqsualujuaq) et calibration de ce pourcentage volumétrique à l'aide de la méthode calorimétrique adiabatique *in situ*. Au début de l'hiver, l'onde de froid en provenance de la surface favorise la formation de glace et pompe l'eau en dessous. Ceci a pour effet d'augmenter la teneur en eau dans la partie supérieure du mollisol et de la diminuer dans la partie supérieure. L'augmentation relative de la teneur en eau à 120 cm est causée par le gradient thermique très prononcé entre le sommet du pergélisol à 155 cm et le front de dégel saisonnier à environ 115 cm.

Estimate of the relative water and ice content using a neutron probe (marine terrace at Kangiqsualujuaq) and calibration of this volume in percentage with the in situ adiabatic calorimetric method. At the beginning of the winter season, the cold front originating from the surface favours the formation of ice and pumping of water from down below. This process increases the water content in the upper part of the active layer at the expense of the lower part. The relative increase in water content at 120 cm is due to the larger thermal gradient caused by the occurrence of the upper surface of permafrost at 155 cm and the freezing front at about 115 cm.

pergélisol. La méthode électromagnétique (très basse fréquence) permet de détecter la présence du pergélisol. La polarisation provoquée a permis dans certains cas de mesurer l'épaisseur du mollisol et du pergélisol, mais cette technique n'est pas toujours aussi fiable que les sondages de résistivité électrique. Les méthodes électromagnétiques standard et la méthode infrarouge thermique n'ont pas encore donné de résultats satisfaisants en ce qui a trait à la délimitation du pergélisol. Dans les trous de forage, parmi les diagraphies utilisées, seules celles de la résistivité électrique, de la po-

larisation spontanée et peut-être caliper ont donné des renseignements pertinents relatifs à la distribution spatiale du pergélisol.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES MILIEUX PERGÉLISOLÉS

Les observations précédentes nous amènent directement à considérer les propriétés physiques du pergélisol au Québec nordique. Peu d'études à l'échelle mondiale (e.g. KERSTEN,

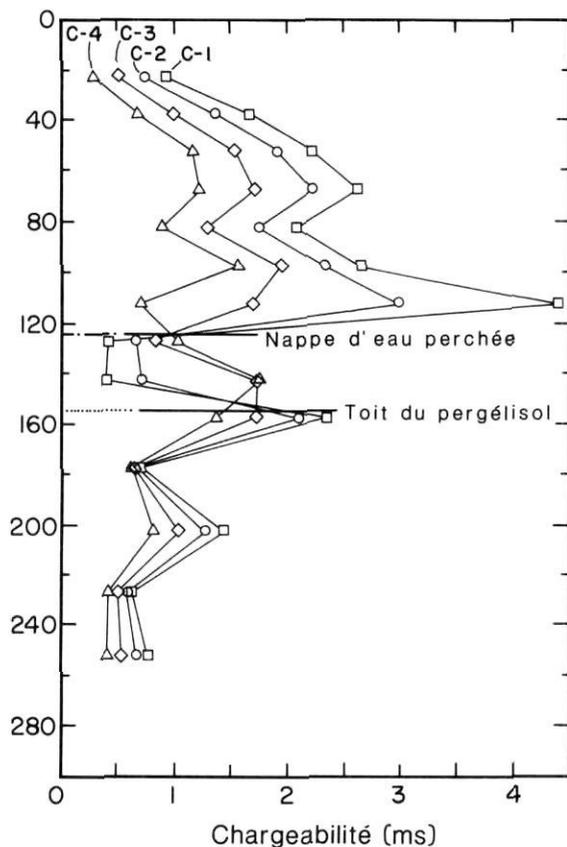


FIGURE 11. Détermination de l'interface gel-dégel à partir de mesures suivies de la polarisation provoquée dans un trou de forage (terrasse marine sableuse à Kangiqsualujuaq). C_1 , C_2 , C_3 et C_4 représentent les temps de mesure de la décroissance de la chargeabilité. Cette expérience a été réalisée le 2 août 1985.

Determination of the thaw depth and active layer water table using measurements of induced polarization in a drill hole (marine terrace in Kangiqsualujuaq). C_1 , C_2 , C_3 and C_4 represent the times on the chargeability decay curve. This experiment was carried out on August 2, 1985.

1963; TSYTOVICH, 1963) et encore moins au Québec nordique sont disponibles sur ce sujet. Dans la région de Schefferville, BACON (1957, 1958), SEGUIN (1971a, 1974a), SEGUIN et CAUCHON (1972), YAP (1972), GARG (1973, 1979), GARG et STACEY (1972), KING et GARG (1982) ont déterminé les propriétés électriques (résistivité électrique) et élastiques (statiques et dynamiques) de divers matériaux rocheux pergélisolés. Des données de diffusion thermique (ANNERSTEN, 1966) et de conductivité thermique (SEGUIN et CAUCHON, 1972; YAP, 1972; SEGUIN, 1974a, 1977) sont aussi disponibles pour les mêmes matériaux rocheux.

Ailleurs au Québec nordique, des données de résistivité électrique en relation avec la granulométrie des matériaux meubles pergélisolés et non gelés sont disponibles dans la région de la rivière Nastapoca (SEGUIN et ALLARD, 1984b), tandis que des mesures de résistivité électrique en fonction de la température ont été publiées au sujet de divers matériaux rocheux dans le pergélisol continu à Portuniqu (SEGUIN, 1978). Des mesures de conductivité thermique, de densité et de porosité dans de nombreuses unités rocheuses des régions

de Portuniqu (SEGUIN, 1978) et du détroit de Maniyouk (SEGUIN et ALLARD, 1984a) sont aussi disponibles. La connaissance approfondie des propriétés physiques du pergélisol telles la résistivité électrique, les constantes élastiques (statiques et dynamiques), les vitesses sismiques longitudinales et transverses, la diffusion et la conductivité thermique, la densité, la porosité, la chaleur spécifique et la chaleur latente sont essentielles pour une interprétation plus précise des données géophysiques en termes de distribution spatiale et d'évolution temporelle (aggradation, dégradation, équilibre thermique, âge de formation ou de fonte) du pergélisol dans divers milieux et matériaux géologiques.

DISCUSSION

Depuis près de 25 ans, les méthodes géophysiques et les expériences physiques se sont avérées utiles principalement pour l'étude de deux aspects du pergélisol au Québec nordique: 1) sa distribution spatiale et 2) son régime thermique et son évolution. La qualité de la cartographie relative à la répartition du pergélisol s'est améliorée grâce à l'apport des géomorphologues et des écologistes qui ont permis de régionaliser les résultats des sondages de résistivité électrique et de cartographier le pergélisol de manière plus détaillée (e.g. LÉVESQUE *et al.*, 1986).

De nombreuses vérifications de l'interprétation des données géophysiques recueillies ont été faites grâce à des forages, et la précision de l'interprétation s'est améliorée petit à petit. Divers facteurs peuvent concourir à l'obtention d'une plus grande précision. Lorsque plusieurs méthodes géophysiques sont utilisées concurremment, la concordance relative aux déterminations des extensions latérales ou verticales obtenues permet une bonne précision ou une meilleure fiabilité (e.g. SEGUIN, 1974a, 1976, GAHÉ et SEGUIN, 1985; GAHÉ *et al.*, 1987). Lorsqu'une seule méthode géophysique est employée, plusieurs facteurs doivent être pris en considération: 1) le choix judicieux de l'emplacement du sondage géophysique en fonction des critères géomorphologiques, 2) la minimisation de l'influence des hétérogénéités latérales du sous-sol indépendantes du pergélisol, i.e. une connaissance relativement complète de la stratigraphie du Quaternaire, et 3) la sélection du bon dispositif et la prise de mesure dans des directions orthogonales. Ces facteurs permettent une plus grande précision de la détermination de l'épaisseur du pergélisol.

Le second aspect ne s'est pas développé au même rythme que le premier durant la même période. Des modèles physicomathématiques suffisamment élaborés pour permettre de décrire fidèlement l'équilibre du bilan thermique en milieu pergélisolé existent déjà (SMITH 1977, PILON 1982, SMITH et RISEBOROUGH, 1983, GRAY *et al.*, 1987), mais leur utilisation est très restreinte; les limites d'application de tels modèles dépendent plus de la quantité et de la qualité des paramètres internes et externes employés que de la précision du modèle lui-même. L'accent a donc été presque exclusivement mis sur l'approche biogéographique au cours des 15 dernières années en ce qui concerne la détection et l'évolution du pergélisol, e.g. aggradation, stagnation, dégradation ou combinaisons cycliques de ces divers processus. On doit se rendre compte que la biogéographie et la stratigraphie per-

mettent une reconstitution paléocologique du pergélisol en fonction du temps qui tient compte des paramètres tels que les changements de milieux physiques, l'inclinaison des arbres, les affaissements ou les bombements du terrain, etc. (ALLARD et SEGUIN, 1987b), alors que la géophysique fait appel à des paramètres de mesures plus directes tels les variations de température, la résistivité électrique, la polarisation provoquée, la polarisation spontanée, l'activité neutronique, les déplacements relatifs verticaux, etc. À ce stade, il importe d'établir des installations permanentes et d'adopter une approche plus analytique et expérimentale à l'aide de méthodes géophysiques. L'approche physique relative à la prévision de l'évolution du pergélisol continu ou discontinu est certainement valable dans une perspective d'avenir. Cependant, lorsqu'on se réfère à l'évolution passée et à des reconstitutions paléoclimatiques, il importe de distinguer entre les milieux de pergélisol continu et discontinu. Dans le cas du pergélisol continu (et donc d'une grande épaisseur), TAYLOR et JUDGE (1979) ont démontré qu'il était possible de distinguer les événements thermiques récents de ceux du passé et en conséquence de cerner l'évolution temporelle du pergélisol dans le passé à condition de connaître avec précision la distribution de la température à grande profondeur. Une analyse géothermique de cette nature n'est pas possible dans un milieu de pergélisol discontinu de faible épaisseur. La phase d'exploration selon une approche superficielle géomorphologique et écologique, accompagnée de sondages de résistivité électrique épars prend moins d'importance. Le développement des connaissances sur le pergélisol dépend d'une nouvelle approche qui est simultanément favorisée par l'apparition d'instruments automatisés et plus efficaces et l'élaboration de modèles thermiques plus précis fondée sur les mesures des propriétés physiques du pergélisol. L'utilisation simultanée de modèles hydriques et thermiques raffinés, des mesures précises des variations de hauteur et de volume de masses pergélisolées avec des instruments très précis (réflectométrie laser, extensomètres ultra sensibles, amplificateurs différentiels à réluctance variable, etc.), le suivi temporel des mesures géophysiques (e.g. polarisation spontanée, polarisation provoquée dans des trous de forage) à la base du pergélisol et l'établissement de stations micrométéorologiques permettant de suivre les fluctuations climatiques locales (e.g. température de l'air, humidité relative, radiation solaire, précipitations, vitesse et orientation des vents, épaisseur nivale, degré d'enneigement, etc.) s'imposent. Il y aurait aussi lieu d'utiliser à l'avenir la télédétection comme outil de délimitation du pergélisol. Des études fondées sur les données de Radarsat, infrarouge thermique ou une approche par l'étude de la végétation et du couvert nival peuvent éventuellement donner des renseignements utiles sur le pergélisol. Il s'agit ici d'étapes importantes à franchir, nécessaires quoique insuffisantes, pour prévoir l'évolution du pergélisol, et principalement le pergélisol discontinu qui présente davantage de difficultés de ce point de vue.

CONCLUSION

Si l'on fait exception de la côte septentrionale du Québec nordique, le pergélisol au large des côtes est absent. Par

contre, le pergélisol discontinu et continu en milieux terrestre et littoral est fréquent (ALLARD et SEGUIN, 1987a). Dans les régions de pergélisol discontinu en milieu terrestre, les sondages de résistivité électrique, de polarisation provoquée, et électromagnétique à multi-séparations et à multi-fréquences semblent représenter les techniques géophysiques les plus efficaces pour déterminer la répartition bi- et tridimensionnelle du pergélisol et obtenir des renseignements utiles pour l'étude de son évolution temporelle et spatiale. En milieu littoral, les méthodes électromagnétiques et les sondages de polarisation provoquée sont généralement peu fiables de sorte que les sondages de résistivité électrique accompagnés de forages demeurent le seul outil relativement sûr. Le géoradar à très hautes fréquences (ANNAN et DAVIS, 1976, 1978, ANNAN *et al.*, 1975) devrait être communément utilisé dans les régions de pergélisol discontinu, étant donné le haut degré de résolution que comporte cette méthode géophysique.

Dans les régions de pergélisol continu du Québec nordique où très peu d'études géophysiques ont été effectuées, les sondages électromagnétiques profonds dans le domaine des temps (SINHA et STEPHENS, 1983), la réflexion sismique (HUNTER *et al.*, 1982) et la magnétotellurie dans la bande audio (KOZIAR et STRANGWAY, 1978) semblent être les techniques géophysiques les plus adéquates pour la détermination de l'épaisseur et de l'évolution du pergélisol si l'on se fonde sur les résultats obtenus dans le delta du MacKenzie et dans l'Archipel arctique canadien.

Dans tous les milieux caractérisés par la présence du pergélisol discontinu ou continu, l'emploi de diagraphies dans les trous de forage et plus particulièrement celles de la résistivité électrique, de la polarisation spontanée, de la polarisation provoquée et thermique est très avantageux pour préciser la distribution du pergélisol et pour prévoir l'évolution du pergélisol à court et moyen termes. Dans ce cas, l'exploitation du potentiel électrique durant le gel et la fonte (*freezing potential*) (BOROVITSKII, 1976, PARAMESWARAN et MACKAY, 1983; MACKAY, 1983) par diagraphies de polarisation spontanée et polarisation provoquée semble déboucher sur des développements géoscientifiques importants permettant d'effectuer un suivi à moyen terme du déplacement de la limite inférieure du pergélisol. L'utilisation d'appareils de mesure de soulèvement du sol par le pergélisol, soit par déplacement différentiel (MackAY, 1983), soit par rapport à une station à hauteur fixe bien établie sera fondamental pour prévoir l'évolution du pergélisol.

RÉFÉRENCES

- AKIMOV, A. T., DOSTOVALOV, B. N. et YAKUPOV, V. S. (1978): Geophysical Methods of Studying Permafrost, *Third International Conference on Permafrost*, Edmonton, Canada, p. 767-777.
- ALLARD, M. et SEGUIN, M.K. (1985): La déglaciation d'une partie du versant hudsonien québécois: bassins des rivières Nastapoca, Sheldrake et à l'Eau Claire, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 39, p. 13-24.
- (1987a): Le pergélisol au Québec nordique: bilan et perspectives, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. XLI, n° 1.

- (1987b): The Holocene evolution of permafrost near the tree line on the eastern coast of Hudson Bay (Northern Quebec), *Canadian Journal of Earth Sciences*, sous presse.
- ANNAN, A. P. et DAVIS, J. L. (1976): Impulse radar sounding in permafrost, *Radio Science*, 11, p. 383-394.
- (1978): High frequency electrical methods for the detection of freeze-thaw interfaces, *Proceedings of the third International Conference on Permafrost*, Edmonton, Canada, p. 498-500.
- ANNAN, A. P., DAVIS, J. L. et SCOTT, W. J. (1975): Impulse radar profiling in permafrost, *Geological Survey of Canada, Paper*, 75-1C, p. 343-351.
- ANNESTEN, L. (1962): *Earth resistivity measurements using the resistivity meter belonging to Q.N.S.L. and thermocouple readings in the Ferriman area*, Report to Iron Ore Company of Canada, Schefferville, 51 p.
- (1964): Investigation of permafrost in the vicinity of Knob Lake, 1961-62, in *Permafrost Studies in Central Labrador — Ungava*, J. B. Bird, édit., McGill Subarctic Research Papers, 16, p. 51-137.
- BACON, L. D. (1957): *Permafrost on resistivity of iron ore samples as related to permafrost conditions*, Permafrost Report No. 1, submitted to I.O.C.C., 16 p.
- (1958): *Permafrost study variation of resistivity with temperature*, Permafrost Report No. 2, submitted to Hollinger-Hanna Ltd. and I.O.C.C., 13 p.
- BARNES, D. F. (1963): Geophysical methods for delineating permafrost, in *Proceedings of the 1st Permafrost International Conference*, 1963, National Academy of Sciences and National Research Council Publication No. 1287, Washington, D.C. p. 349-355.
- BONNLANDER, B. (1958): Permafrost research, *McGill Subarctic Research Paper*, 4, p. 56-58.
- BONNLANDER, B. et MAJOR-MAROTHY, G. M. (1957): *Report on permafrost investigations, 1956-57*, Internal Report to the Iron Ore Company of Canada, Schefferville, 14 p.
- (1964): Permafrost and ground temperature observations, 1957, *McGill Subarctic Research Paper*, 16, p. 33-50.
- BOROVITSKII, V. P. (1976): The development of inherent electrical fields during the freezing of rocks in the active layer and their role in the migration of trace elements, *Journal of Geochemical Exploration*, 5, p. 65-70.
- BOTTERON, G., GILBERT, C., LOCAT, C. et GRAY, J. T. (1979): Observations préliminaires sur la répartition du pergélisol dans le bassin de la grande rivière de la Baleine, Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 33, p. 291-298.
- DESBIENS, J., SEGUIN, M. K.- et ALLARD, M. (1985): Statistiques descriptives sur les épaisseurs du pergélisol discontinu au Québec nordique, *Annales de l'ACFAS*, vol. 52-53, p. 177.
- GAHÉ, E. et SEGUIN, M. K.- (1985): Géophysique du pergélisol à Kangiqsuallujuaq, Québec nordique, *Annales de l'ACFAS*, vol. 52-53, p. 341.
- (1986): Géophysique du pergélisol à Kangiqsuallujuaq, Québec nordique, soumis pour publication aux Comptes Rendus de l'ACFAS, 3^e Colloque de Géophysique, Chicoutimi, 13 p. 11 fig.
- GAHÉ, E., ALLARD, M. et SEGUIN, M. K.- (1987): Géophysique et dynamique holocène des plateaux palsiques à Kangiqsuallujuaq, Québec nordique, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. XLI, n° 1, p. 33-46.
- GARG, O. P. (1973): *In-situ* physicomécanical properties of permafrost, using geophysical techniques, *Permafrost, North American Contribution to the 2nd International Conference*, Washington, D.C. p. 508-517.
- (1979): Mining of frozen iron ore in northern Québec and Labrador, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 33, p. 369-376.
- GARG, O. P. et STACEY, P. F. (1972): Techniques used in the delineation of permafrost in the Schefferville, P.Q. area, *Proceedings of a Seminar on the Thermal Regime and Measurements in Permafrost*, National Research Council, Technical Memorandum 108, 10 p.
- GRANBERG, H. B., LEWIS, J. E., MOORE, T. R., STEER, P. et WRIGHT, R. K. (1983): *Schefferville Permafrost Research*, final report DSS Contract No. 20SU 23235-2-1030, 26 volumes.
- GRANBERG, H. B., DESROCHERS, D. T., LEWIS, J. E., WRIGHT, R. K. et HOUSTON, L. (1984): Annotation, error analysis and addenda to the Schefferville Permafrost Data File, final report DSS Contract No. OST83 — 00302, 16 volumes.
- GRAY, J. T. et PILON, J. A. (1976): Permafrost distribution at Tasiujaq (Leaf Basin) on the South West Coast of Ungava Bay, New Québec, *Revue de Géographie de Montréal*, vol. 30, p. 367-373.
- GRAY, J. T., PILON, J. A. et POITEVIN, J. (1979): Le pergélisol et la couche active dans la toundra forestière au sud de la baie aux Feuilles, Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 33, p. 253-264.
- (1987): Active layer studies in Northern Quebec: towards a predictive model, soumis au *Journal canadien de Géotechnique*.
- HUNTER, J. A. (1974): Seismic up-hole wavefront experiments in permafrost, Québec, *Geological Survey of Canada Paper*, 74-1, Part B, p. 83-86.
- HUNTER, J. A., BURNS, R. A., GOOD, R. L., MacAULAY, H. A. et GAGNÉ, R. M. (1982): Optimum field techniques for bedrock reflection mapping with the multichannel engineering seismograph, *Geological Survey of Canada, Current Research*, Part B, p. 125-129.
- JUDGE, A. S. (1973): The prediction of permafrost thickness, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 10, p. 1-11.
- KERSTEN, M. S. (1963): Thermal Properties of Frozen Ground, *First International Conference on Permafrost*, Lafayette, Indiana, National Academy of Science and National Research Council, Washington, D.C., p. 301-305.
- KING, M. S. et GARG, O. P. (1982): Compressive strengths and dynamic elastic properties of frozen and unfrozen iron ore from Northern Quebec, *Proceedings of the Fourth Canadian Permafrost Conference*, Calgary, March 1981, National Research Council, Ottawa, p. 374-381.
- KOZIAR, A. et STRANGWAY, D. W. (1978): Permafrost Mapping by Audio Frequency Magnetotelluric, *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 15, p. 1535-1546.
- LAGAREC, D. (1980): *Étude géomorphologique de pases et autres buttes cryogènes en Hudsonie, Nouveau-Québec, Québec*, Université Laval, thèse de doctorat, 290 p.
- LÉVESQUE, R., ALLARD, M. et SEGUIN, M. K.- (1986): Cartographie assistée par ordinateur du pergélisol aux rivières Nastapoca et Sheldrake, Hudsonie, 54^e Congrès de l'ACFAS, vol. 54, p. 486.
- MACKAY, J. R. (1983): Downward water movement into frozen ground, western arctic coast, Canada, *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 20, p. 120-134.

- MICHAUD, Y. (1985): *Évolution de versants rocheux au golfe de Guillaume-Delisle, Hudsonie*, Thèse de maîtrise non publiée, Université Laval, Québec, 102 p.
- MÜLLER, G. (1961): Geschwindigkeitsbestimmungen elastischer Wellen in geofeorenen Gesteinen und die Anwendung akustischer Messungen auf Untersuchungen des Frostmantels an Gefrier-schöften, *Geophysical Prospecting*, vol. 9, p. 276-295.
- NICHOLSON, F. H. (1976): Permafrost thermal amelioration tests near Schefferville, Quebec, *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 13, p. 1694-1705.
- (1978): Permafrost spatial and temporal variations near Schefferville, Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 35, p. 265-277.
- (1979): Permafrost distribution and characteristics near Schefferville, Quebec: recent studies, *Proceedings of the 3rd International Conference on Permafrost*, NRC Canada, Ottawa, vol. 1, p. 428-433.
- PARAMESWARAN, V. R. et MACKAY, J. R. (1983): Field measurements of electrical freezing potentials in permafrost areas, *Proceedings of the Fourth International Conference on Permafrost*, Fairbanks, Alaska, p. 962-967.
- PAYETTE, S., SAMSON, H. et LARAREC, D. (1976): The evolution of permafrost in the taiga and in the forest-tundra, western Quebec-Labrador Peninsula, *Canadian Journal of Forest Research*, p. 203-220.
- PAYETTE, S. et SEGUIN, M. K. (1979): Les buttes minérales cryogènes dans les basses terres de la rivière aux Feuilles, Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 33, p. 339-358.
- PILON, J. A. (1982): *Étude de la couche active et du pergélisol dans la région de Baie aux Feuilles, Ungava*, Thèse de doctorat, Université de Montréal, p. 43-270.
- PILON, J. A., ANNAN, A. P., DAVIS, L. et GRAY, J. T. (1979): Comparison of thermal and radar active layer measurement techniques in the Leaf Bay area, Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 33, p. 317-326.
- POITEVIN, J. et GRAY, J. T. (1982): Distribution du pergélisol dans le bassin de la Grande Rivière de la Baleine, Québec, *Naturaliste canadien*, vol. 109, p. 445-455.
- PRYER, R. W. (1959): Frost Action and Railroad Maintenance in the Labrador Peninsula, *Highway Research Board, Bulletin*, 210, p. 34-48.
- (1963): Mine railroads in Labrador-Ungava, in *Proceedings of the 1st Permafrost International Conference*, 1963, National Academy of Sciences and National Research Council Publication, n° 1287, Washington, D.C., p. 503-508.
- ROETHLISHERGER, H. (1961): Seismic Refraction Soundings in Permafrost Near Thulé, Greenland, in G. O. Raasch, éd., *Geology of the Arctic*, Vol. 2, International Symposium on Arctic Geology, 1st, Calgary, Alberta, Proceedings, 1960, p. 970-981.
- SAMSON, H. (1975): *Évolution du pergélisol en milieu tourbeux en relation avec le dynamisme de la végétation, golfe de Richmond, Nouveau-Québec*, Québec, Univ. Laval, thèse de M.Sc.
- SAMSON, L. et TORDON, F. (1969): Experience with engineering site investigation in northern Quebec and northern Baffin Island, in R. J. E. Brown, éd., *Proceedings of the Third Canadian Conference on Permafrost*, NRC Canada, Technical Memorandum 96, p. 21-38.
- SEGUIN, M. K. (1967a): *A new method for the interpretation of resistivity data applied to horizontal layers for the determination of overburden and water table depth*, official report, The Royal Institute of Technology, Division Geodesy, Stockholm 70, Sweden, 73 p.
- (1967b): *A generalized automatic interpretation of data obtained by refraction seismic method*, The Royal Institute of Technology, Stockholm 70, Sweden, 63 p.
- (1968): *Calculation and interpretation of the depths of overburden and of seismic velocities in permafrost on the Elross #1 (Timmins No. 4) deposit*, private report to I.O.C.C., 21 p.
- (1971a): Applications des méthodes électriques aux problèmes de génie, *L'Ingénieur*, 262, janvier, p. 12-21.
- (1971b): *Semi-quantitative interpretation of the in-hole geophysical data (bore-hole geophysics information section) in regions of permafrost*, open file report to Iron Ore Company of Canada, August 15th, 1971, 14 p.
- (1973): *Étude du pergélisol discontinu dans la région de Schefferville*, rapport technique remis au Conseil national de recherches pour la défense (octroi 9511-130-73), 27 p.
- (1974a): The use of geophysical methods in permafrost investigation: iron ore deposits of the central part of the Labrador Trough, northeastern Canada, *Geoforum*, vol. 18, p. 56-58.
- (1974b): État des recherches sur le pergélisol dans la partie centrale de la fosse du Labrador, Québec subarctique, *Revue de Géographie de Montréal*, vol. 28, p. 343-357.
- (1974c): *Conception et construction des sondes électriques et thermiques pour l'étude du pergélisol continu ou discontinu; vérification de leur fonctionnement dans les trous de forage effectués à Schefferville et en Abitibi*, rapport technique rédigé pour le Conseil national de recherche pour la défense (octroi n° 9511-130-74), 35 p.
- (1976): Observations géophysiques sur le pergélisol des environs du lac Minto, Nouveau-Québec, *Cahiers de Géographie de Québec*, vol. 20, p. 327-346.
- (1977): Détermination de la géométrie et des propriétés physiques du pergélisol discontinu de la région de Schefferville, *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 14, p. 431-443.
- (1978): Temperature — Electrical Resistivity Relationship in Continuous Permafrost at Purtunig, Ungava Peninsula, in *Proceedings of the Third International Conference on Permafrost*, NRC Canada, Ottawa, p. 137-144.
- SEGUIN, M. K. et ALLARD, M. (1984a): La répartition du pergélisol dans la région du détroit de Manicouagan, côté est de la mer d'Hudson, Canada, *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 21, p. 354-364.
- (1984b): Le pergélisol et les processus thermokarstiques de la région de la rivière Nastapoca, Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 38, p. 11-25.
- SEGUIN, M. K. et CAUCHON, A. (1972): Étude expérimentale des propriétés mécaniques (statiques et dynamiques) des matériaux rocheux, *L'Ingénieur*, 280, p. 54-63.
- SEGUIN, M. K. et CRÉPAULT, J. (1979): Étude géophysique d'un champ de palse à Poste-de-la-Baleine, Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 33, p. 327-357.
- SEGUIN, M. K. et GARG, O. P. (1972): Delineation of frozen rocks from Labrador-Ungava Peninsula using bore-hole geophysical logging, in *9th Canadian Symposium on Rock Mechanics*, Montréal, Dec. 13-15, p. 53-75.

- SEGUIN, M. K.- et GRANBERG, H. (1986): Use of permafrost geophysics in the Schefferville District, soumis pour publication.
- SEGUIN, M. K.- et LAMBERT, G. (1975): *Études bibliographiques de l'application de la géophysique au pergélisol*, mémoire, Centre d'ingénierie nordique et Centre d'études nordiques, janvier, 8 p.
- SEGUIN, M. K.- et ROBITAILLE, B. (1984): Cartographie géomorphologique, délimitation tridimensionnelle des matériaux meubles pergélisolés et mouvements de masse dans la région de Purtuniqu, Nouveau-Québec, *Annales de l'ACFAS*, vol. 51, p. 313 (résumé).
- SEGUIN, M. K.- et SAMSON, G. (1980): Application archéologique des techniques de résistivité électrique à des sites amérindiens, lac de la Hutte Sauvage (Nouveau-Québec), *Geoexploration*, vol. 18, p. 15-32.
- SINHA, A. K. et STEPHENS, L. E. (1983): Deep electromagnetic sounding over the permafrost terrain in the MacKenzie Delta, N.W.T., Canada, *4th International Conference on Permafrost*, Fairbanks, Alaska, National Academy of Science, Washington, D.C., p. 1166-1171.
- SMITH, M. W. (1977): *Computer simulation of microclimatic and ground thermal regimes: test results and program description*, Ministry of Indian and Northern Affairs, Ottawa, Canada, 74 p.
- SMITH, M. W. et RISEBOROUGH, D. W. (1983): Permafrost Sensitivity to Climatic Change, *Proceedings of the Permafrost Fourth International Conference*, p. 1178-1183.
- TAYLOR, A. et JUDGE, A. (1979): Permafrost Studies in Northern Quebec, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 33, p. 245-251.
- THOM, B. (1969): New permafrost investigations near Schefferville, P.Q., *Revue de Géographie de Montréal*, vol. 23, p. 317-327.
- (1970a): *Amelioration of permafrost*, Iron Ore Company of Canada, Geotechnical Engineering Report, n° TS 6907-3, 16 p.
- (1970b): *Comprehensive report on Timmins #4 permafrost experimental site*, International Report to the Iron Ore Company of Canada, Technical Report, n° 6907-4, 12 p.
- TSYTOVICH, N. A. (1963): Instability of Mechanical Properties of Frozen and Thawing Soils, *First International Conference on Permafrost*, Lafayette, Indiana, National Academy of Science and National Research Council, Washington, D.C., p. 325-331.
- WOODS, K. B., PRYER, R. W. J. et EDEN, W. J. (1959): Soil Engineering Problems on the Quebec North Shore and Labrador Railway, *Bulletin of American Railway Engineering Association*, vol. 10, p. 669-688.
- WYDER, J. E. (1972): *Report of bore-hole geophysical logging at Iron Ore Company of Canada, Schefferville, P.Q., August 1971*, Part of the Geological Survey of Canada, Project 680035, 4 p.
- YAP, S. M. (1972): *Engineering properties of frozen ores from Labrador*, Unpublished M. Eng. Thesis, McGill University, Montreal, P.Q., Canada.