

Article

« Le pergélisol au Québec nordique : bilan et perspectives »

Michel Allard et Maurice K.-Seguin

Géographie physique et Quaternaire, vol. 41, n° 1, 1987, p. 141-152.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/032671ar>

DOI: 10.7202/032671ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

LE PERGÉLISOL AU QUÉBEC NORDIQUE : BILAN ET PERSPECTIVES

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

RÉSUMÉ La compilation de travaux publiés et d'études inédites permet de proposer un bilan des connaissances sur le pergélisol du Québec. Au Québec arctique, quelques études, fondées sur des mesures thermiques dans des trous de forage, ont révélé des épaisseurs de plusieurs centaines de mètres de pergélisol et permis d'en reconstituer l'évolution climatique. Cependant, la morphologie cryogène n'a presque pas été étudiée. Au Québec subarctique, les nombreuses mesures thermiques dans la région de Schefferville et les relevés régionaux, principalement en Hudsonie, mettent en évidence l'étroite relation entre la présence, l'épaisseur et le régime thermique du pergélisol et les facteurs climatiques locaux, en particulier l'enneigement. Ce dernier facteur étant lié de près à la structure du couvert végétal, une nouvelle carte du pergélisol, fondée sur les données les plus récentes de la végétation et des observations personnelles, est proposée. Trois approches ont servi à déterminer l'âge et l'évolution passée du pergélisol : 1) un modèle physico-mathématique développé à partir de mesures thermiques en milieu arctique ; 2) l'analyse stratigraphique de tourbières à palses ; 3) l'analyse du contexte géologique quaternaire. La dynamique récente du pergélisol a été étudiée par le biais des changements écologiques survenus dans les tourbières. Le pergélisol au Québec subarctique peut dater d'aussi loin que la déglaciation dans les régions jamais boisées ; ailleurs, il apparaît être d'âge néoglaciale. Les feux de forêts ont peut-être eu une influence sur sa dynamique. Les formes cryogènes et les gélisols les plus répandus au Québec subarctique sont brièvement mis en relation avec les différents types de formations superficielles pergélisolées. Les mesures *in situ* des propriétés physiques et du régime thermique du pergélisol discontinu seront nécessaires pour prévoir l'effet des changements climatiques.

ABSTRACT *Permafrost in northern Québec: state of knowledge and research needs.* The state of knowledge on permafrost is discussed from a compilation of previous studies and unpublished work. A few studies in Arctic Québec, based on temperature measurements in deep-drill holes, have revealed permafrost many hundreds of metres thick and have recorded its climatic history. Periglacial morphology remains to be studied. In Subarctic Québec, numerous temperature measurements, mostly in the Schefferville area, and regional surveys, particularly in the Hudson Bay area, have evidenced the close relationship between occurrence, thickness and thermal regime of permafrost and local climatic factors, principally snow cover. As the latter is closely linked to vegetation structure, a new permafrost map, based on most recent vegetation mapping and personal observations, is suggested. Age and past evolution of permafrost have been estimated using these approaches: a physico-mathematical model from thermal data in the Arctic, stratigraphic analysis of peat bogs and site evaluation of Quaternary geological context. Recent permafrost dynamics have been studied via ecological changes in fens and bogs with the help of old aerial photographs and dendrochronology. Permafrost in the Subarctic may be as old as deglaciation in regions that were never forest-covered; elsewhere, however, it is probably of Neoglacial age. Forest fires probably had an important role on its spreading. The most widespread cryogenic landforms and patterned ground features in the Subarctic are broadly related to the various surficial formations affected by permafrost. *In situ* measurements of permafrost and active layer processes and thermal regime are suggested in order to evaluate the effects of future climatic changes.

ZUSAMMENFASSUNG *Dauerfrostboden im nördlichen Québec. Bilanz und Perspektive.* Die Zusammenstellung der veröffentlichten und unveröffentlichten Arbeiten führt zu einer Bilanz der Kenntnisse über den Dauerfrostboden Québecs. Im arktischen Québec haben einige auf thermische Messungen in Bohrlöchern gestützte Untersuchungen für den Dauerfrostboden Tiefen von mehreren hundert Metern ergeben, und sie erlaubten, dessen klimatische Entwicklung zu rekonstruieren. Jedoch ist die Kryogene Morphologie fast nicht untersucht worden. Im subarktischen Québec machen die zahlreichen thermischen Messungen im Gebiet von Schefferville und die regionalen Erhebungen vor allem im Gebiet der Hudson Bay die enge Beziehung, die zwischen dem Vorkommen, der Dicke und dem thermischen System des Dauerfrostbodens und den lokalen klimatischen Faktoren, insbesondere dem Schneefall, besteht, deutlich. Da dieser letzte Faktor eng mit der Vegetationsstruktur verknüpft ist, wird eine neue Karte des Dauerfrostbodens vorgeschlagen, die auf die neuesten Vegetationsdaten und persönliche Beobachtungen gestützt ist. Drei Methoden haben geholfen, das Alter des Dauerfrostbodens und seine Entwicklung in der Vergangenheit zu bestimmen: 1) ein physikalisch-chemisches Modell, welches aufgrund thermischer Messungen im arktischen Milieu entwickelt wurde; 2) die stratigraphische Analyse der Palsen-Torfmoore; 3) die Analyse des geologischen Kontextes im Quaternär. Die jüngere Dynamik des Dauerfrostbodens wurde mittels der in den Torfmooren aufgetretenen ökologischen Veränderungen studiert. Der Dauerfrostboden im subarktischen Québec kann so alt sein wie die Enteisung in den nie bewaldeten Gebieten; anderswo scheint er aus neoglazialer Zeit zu stammen. Die Waldbrände haben vielleicht einen Einfluß auf seine Dynamik gehabt. Die im subarktischen Québec am weitesten verbreiteten kryogenen Formen und Frostböden werden kurz in Beziehung gesetzt zu den verschiedenen, vom Dauerfrost beeinflussten Oberflächenbildungen. Messungen *in situ* der physikalischen Eigenschaften und des thermischen Systems des unterbrochenen Dauerfrostbodens werden notwendig sein, um den Einfluß klimatischer Veränderungen vorauszusehen.

INTRODUCTION

Le pergélisol est présent dans environ un tiers du territoire de la péninsule du Québec-Labrador. C'est depuis la fin des années 1950 surtout qu'on l'étudie; les recherches ont d'abord été rendues nécessaires en raison des besoins de l'exploitation minière dans la région de Schefferville. Un accroissement des activités de recherche sur le sujet dans plusieurs autres régions du Québec nordique s'est fait sentir durant les années 1970. Un numéro spécial de *Géographie physique et Quaternaire* (1979, vol. 33, n^{os} 3-4) a permis de faire état des travaux menés à Purtuniqu, en Ungava (TAYLOR et JUDGE, 1979), le long de la rivière aux Feuilles (PAYETTE et SEGUIN, 1979) et près de son embouchure (GRAY et PILON, 1976; GRAY *et al.*, 1979; PILON *et al.*, 1979), en Hudsonie (SEGUIN et CRÉPAULT, 1979) et même en Gaspésie (GRAY et BROWN, 1979). Depuis ce temps, le nombre de chercheurs sur le pergélisol a diminué, ce qui n'empêche pas de noter certains progrès.

Le présent essai a pour but principal de dresser le bilan des connaissances acquises sur la répartition, l'âge, les propriétés et la dynamique du pergélisol, tout en discutant des faits saillants relatifs aux méthodes utilisées jusqu'à maintenant. Les problèmes en voie d'étude seront ensuite abordés et des orientations seront proposées pour des travaux futurs. L'accent sera mis sur le pergélisol des zones subarctiques du Québec, c'est-à-dire comprises entre la limite des forêts continues et la toundra arctique (PAYETTE, 1983), ce qui inclut la zone hémis-arctique de ROUSSEAU (1968).

RÉSUMÉ DES CONNAISSANCES SUR LE PERGÉLISOL

LA RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE

Puisqu'il s'agit d'un phénomène climatique — il faut une température annuelle moyenne inférieure à 0°C à la surface du sol — les cartes du pergélisol au Canada et au Québec ont d'abord été établies à partir d'indices thermiques (BROWN, 1967, 1978). À l'échelle locale, de nombreuses mesures, surtout prises dans les environs de Schefferville, ont permis de démontrer les relations quantitatives qui existent entre, d'une part, la présence et le régime thermique du pergélisol et, d'autre part, l'épaisseur du tapis nival (ANNERSTEN, 1966; THOM, 1969; NICHOLSON et GRANBERG, 1973; NICHOLSON, 1976). Ainsi, une épaisseur de neige de 75-80 cm est suffisante dans les sites étudiés à Schefferville pour empêcher la formation du pergélisol (NICHOLSON, 1979, p. 236). Comme la couche de neige au Québec subarctique est très mince sur les crêtes, sur les buttes exposées à la déflation et dans la toundra et qu'elle est généralement supérieure à 80 cm contre les versants sous le vent, dans le fond des vallées à couvert arbustif et dans les forêts (FILION et PAYETTE, 1978; PAYETTE *et al.*, 1975; PAYETTE et LAGAREC, 1972), BROWN (1979) a amélioré la carte en incluant les aires exposées et les étendues de toundra au sein de la toundra forestière et de la taïga comme îlots probables de pergélisol. La carte des formations végétales de HARE (1959) lui a servi de référence (IVES, 1979).

Dans différentes régions du Québec, deux approches ont été utilisées jusqu'à présent pour préciser la répartition du pergélisol, son épaisseur et l'épaisseur du mollisol: 1) des études détaillées où ces paramètres ont été mesurés à l'aide de méthodes géophysiques de surface et dans des trous de forage et, fait important, où de nombreuses mesures thermiques ont été prises; 2) des travaux régionaux de nature géomorphologique ou écologique, souvent accompagnés de relevés géophysiques de surface, principalement de sondages de résistivité électrique.

C'est autour de Schefferville que les études de climatologie de surface ont été conduites de pair avec des mesures thermiques en profondeur. Les dépôts meubles autour des gîtes miniers consistent en des couvertures de till et de dépôts fluvioglaciaires d'épaisseur variable sur un relief de crêtes et de sillons rocheux. Ces matériaux, relativement conducteurs, sont propices à un dégel estival profond, de sorte que le mollisol dépasse régulièrement 1,8 m et atteint 2,3 m en moyenne; lorsque le couvert végétal est absent ou détruit artificiellement, le dégel estival atteint 3,6 m (NICHOLSON, 1979). Le pergélisol peut atteindre 120 m d'épaisseur sous les crêtes dénudées; son régime thermique fluctue d'année en année, principalement à cause des variations interannuelles que subit l'épaisseur du couvert nival. Les dépressions humides et les écoulements d'eau dans le mollisol localisent des «points chauds» (zones à température négative plus élevée) et, souvent, des taliks dans le pergélisol sous-jacent (NICHOLSON, 1979; WRIGHT, 1979). La situation est différente au-delà de la limite des arbres dans la zone de pergélisol continu. En effet, GRAY et PILON (1976), de même que GRAY *et al.* (1979) ont démontré, grâce à des mesures thermiques, que le pergélisol dépasse 200 m d'épaisseur à la baie aux Feuilles, alors qu'il peut atteindre 600 m à Purtuniqu (SEGUIN, 1978).

Des relevés régionaux ont été faits dans différents secteurs de l'Hudsonie et au sud de la baie d'Ungava (HAMELIN et CAILLEUX, 1969; SEGUIN et CRÉPAULT, 1979; SEGUIN, 1976; SEGUIN et ALLARD, 1984 a et b; LAGAREC 1980, 1976, 1973; PAYETTE et SEGUIN, 1979; BOTTERON *et al.*, 1979; GANGLOFF et PISSART, 1983; DIONNE, 1978). Plusieurs d'entre eux portent sur les paises. La compilation de ces travaux ainsi que ceux qui sont en cours en Hudsonie (ALLARD et SEGUIN, sous presse; LÉVESQUE, 1986) confirment, dans les régions subarctiques, la présence locale du pergélisol dans les sites à couvert végétal très ouvert, en raison du rôle qu'exerce la densité des arbustes et des arbres sur la répartition et l'épaisseur du tapis nival. Les paises, qui occupent le fond tourbeux des vallées, constituent en toundra forestière les îlots de pergélisol les plus évidents. La limite nordique de l'aire des tourbières profondes (de l'ordre de 1 m) correspondant à peu de choses près à la limite des arbres (ALLARD *et al.*, sous presse), les paises font place dans la toundra arbustive aux buttes minérales de pergélisol (SEGUIN et ALLARD, 1984a). Les relevés géophysiques et les mesures morphométriques (longueur, largeur et hauteur) des paises et des buttes minérales de pergélisol ont permis d'établir une corrélation curviligne et asymptotique entre les dimensions des buttes et l'épaisseur du pergélisol sous-jacent (BLAIS, 1984; ALLARD *et al.*, sous presse). Ainsi l'épaisseur

du pergélisol croît avec les dimensions des buttes, soit d'un minimum de 3-4 m jusqu'à ce qu'un maximum d'environ 30 m soit atteint. Ce maximum représente l'épaisseur la plus susceptible d'être en équilibre avec la température moyenne de l'air de la région avoisinante du site sondé, puisque les grandes surfaces peu enneigées présentent les conditions les plus favorables à la formation du pergélisol.

Des relevés régionaux ont aussi été réalisés dans d'autres matériaux de surface, comme les tills, les dépôts fluvioglaciers, les sables et graviers marins et les argiles. Afin de vérifier la possibilité d'influences climatiques régionales sur l'épaisseur du pergélisol discontinu, une analyse statistique de toutes les mesures de résistivité électrique faites par les auteurs depuis 1973 a été menée. Pour chacune des régions mentionnées ci-dessus (voir aussi la légende de la fig. 1), nous avons compilé toutes les mesures sur l'épaisseur du pergélisol en classant les résultats selon les types de dépôts meubles; puis, des tests statistiques (Kolmogorov-Smirnov) ont été réalisés entre les groupes de mesures au sein de chaque région, de même que d'une région à l'autre (DESBIENS *et al.*, 1985). Comme pour les paises, des variations importantes sont évidentes pour chaque région. Cependant, en retenant la valeur du quartile supérieur dans chaque groupe de mesures, un accroissement de l'épaisseur du pergélisol selon la latitude apparaît nettement. En effet, le pergélisol dans les sédiments minéraux commence à apparaître de façon notable vers 56° N; son épaisseur augmente rapidement jusqu'au 57° N et est de l'ordre de 25 m au 59° N. On constate là l'influence du gradient climatique latitudinal (fig. 1). Toutefois, sous les paises le pergélisol suit un gradient particulier d'épaisseur croissante; l'aire de répartition des paises commence nettement plus au sud. Ceci peut s'expliquer par le rôle isolant de la tourbe et, peut-être aussi, parce que nombre d'entre elles sont des formes héritées de périodes climatiques plus froides que maintenant (DIONNE, 1984).

Des compilations morpho-climatiques récentes (DEWEZ *et al.*, 1984; ALLARD *et al.*, sous presse) et des synthèses plus anciennes en Hudsonie (PAYETTE *et al.*, 1976; LAGAREC, 1982), il ressort aussi que le pergélisol présent dans les sédiments minéraux sous forme de buttes minérales de pergélisol (aussi appelées buttes minérales cryogènes ou paises minérales) se retrouve dans des régions au climat nettement plus froid que celui des régions de tourbières à paises. Lorsque l'on trouve les deux types de buttes dans une même tourbière ou dans une même région (DIONNE, 1978; PISSART et GANGLOFF, 1984; DEWEZ *et al.*, 1984), cela peut être dû à une des deux raisons suivantes; 1) les buttes minérales se sont formées dans un site au micro-climat plus rigoureux, comme un rebord de terrasse balayé par le vent en hiver ou sur le littoral marin, ou 2) il s'agit de paises en voie de dégradation dont le couvert de tourbe a été érodé (ALLARD *et al.*, sous presse). LÉVESQUE (1986) a cartographié à l'échelle de 1/50 000 la distribution et l'épaisseur du pergélisol dans une région de 3700 km² entre le lac Guillaume-Delisle et le 57° N; les cartes illustrent clairement que la superficie relative de terrain pergélisolé (en moyenne 76 %) et l'épaisseur (en moyenne 20 m) sont plus importants dans les plaines d'argiles tyrelliennes le long de la côte et au-delà

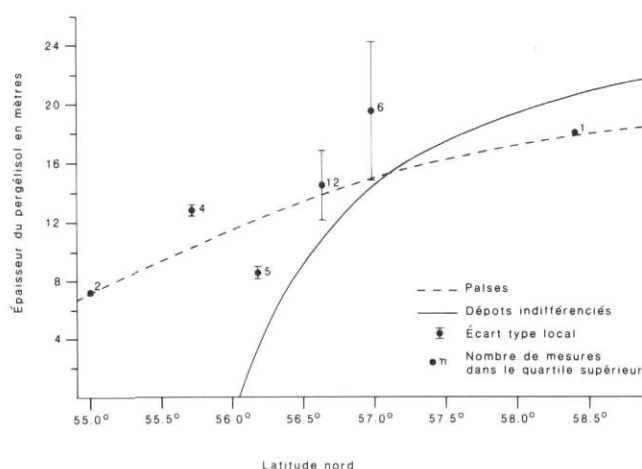


FIGURE 1. Relations entre l'épaisseur du pergélisol et la latitude dans les dépôts meubles. Les courbes représentent cette relation pour le quartile supérieur des groupes de mesures d'épaisseur pour chaque région représentée par un point. Le pergélisol dans les tourbières a une distribution nettement plus méridionale que dans les autres matériaux. Du sud au nord, les stations représentées sont: Kuujuarapik, Manitounuk, Ouiatchouane, Nastapoca, lac Minto et Kangihsualujuaq.

Relationship between permafrost thickness and latitude in unconsolidated deposits. The curves show this relationship for the value of the upper quartile of measurement distributions for each region shown by a point. Permafrost in bogs has a more clearly southern distribution than in other materials. From south to north, points represent: Kuujuarapik, Manitounuk, Ouiatchouane, Nastapoca, Lake Minto and Kangihsualujuaq.

de la limite des arbres qu'à l'intérieur des terres, en deçà de la limite des arbres (respectivement 20 % et 10 m), à cause de l'effet refroidissant de la baie d'Hudson; cependant, le pergélisol redevient plus abondant et plus épais (20-30 m) au-delà de la limite marine dans les immenses champs de drumlins, parce que les sommets de ces formes glaciaires sont dépourvus d'arbres et privés de couverture nivale en raison de l'effet chasse-neige des vents.

Dans le roc, les travaux de BOTTERON *et al.* (1979), puis de POITEVIN et GRAY (1982), ont montré l'existence du pergélisol jusqu'à des profondeurs de 180 m dans les collines dénudées qui bordent le littoral, près de Kuujuarapik. Les relevés de résistivité électrique dans les cuestas des Manitounuk (SEGUIN et ALLARD, 1984b) et du lac Guillaume-Delisle (MICHAUD, 1986) révèlent aussi la présence du pergélisol en milieu rocheux littoral au-dessus du niveau de la mer. Sa présence s'explique par l'importante déflation du couvert nivale qui garde à nu les crêtes rocheuses sur la côte de la mer gelée. Les buttes rocheuses périglaciaires, décrites par BOURNÉRIAS (1972), PAYETTE (1978), DIONNE (1983), LeBRUN (1985), et MICHAUD (1985) et dont on peut évaluer sommairement la mobilité par les faces neuves sans lichens, peuvent à juste titre être considérées comme indicatrices de la présence du pergélisol dans le roc sous-jacent. En effet, leur soulèvement implique des pressions hydrauliques dans le mollissil rocheux disposé sur un substrat rendu imperméable par le gel permanent de l'eau dans la structure (DYKE, 1984).

Compte tenu des observations accumulées sur les formes liées au pergélisol et les facteurs écologiques de l'enneigement (FILION et PAYETTE, 1976) depuis dix ans en Hudsonie et ailleurs, il y a lieu de proposer une nouvelle carte de la distribution du pergélisol au Québec nordique. Cette carte (fig. 2) est fondée en grande partie sur la zonation des formations végétales la plus récente (PAYETTE, 1983). Les changements par rapport aux cartes précédentes (BROWN, 1979; IVES 1979; NICHOLSON, 1979) sont importants, en particulier dans la région du lac à l'Eau-Claire-lac Minto et le long du littoral hudsonien. Les régions à pergélisol discontinu connaissent des températures moyennes annuelles de l'air comprises entre -1°C et -7°C . L'isotherme de 10°C pour le mois le plus chaud, correspondant de près à la limite des arbres, se situe au seuil entre le pergélisol dispersé et le pergélisol répandu (fig. 1). Pour les besoins d'une meilleure compréhension, nous avons retenu le seuil de 50 % d'occupation du territoire par le pergélisol pour définir la limite entre la zone de pergélisol discontinu, mais répandu et la zone de pergélisol sporadique. En réalité, les pourcentages de superficie pergélisolée sont généralement bien supérieurs à 50 % au-delà de cette limite et beaucoup moindres en deçà. Au nord de la limite des arbres, les taillis d'arbustes sur sols humides et les emplacements des profondes combes à neige constituent en grande partie des terrains sans pergélisol, ou taliks. Quant à la zone de pergélisol continu, elle correspond essentiellement à la toundra arctique.

L'ÂGE DU PERGÉLISOL ET SA DYNAMIQUE RÉCENTE

L'âge et les étapes de développement du pergélisol peuvent être estimés selon trois approches nécessairement complémentaires: 1) par des modèles physico-mathématiques à partir de lectures thermiques dans des trous de forage profonds; 2) par le contexte géologique quaternaire; 3) par l'analyse stratigraphique de coupes et la datation au radiocarbone.

Les modèles physico-mathématiques

Les seuls modèles du genre au Québec ont été appliqués en milieu arctique près de Purtunig, où le pergélisol atteint des profondeurs d'environ 500 m (TAYLOR et JUDGE, 1979, fig. 4) et dans la région de Tasiujaq (PILON, 1982). Le modèle de Taylor et Judge montre que la température de surface a été de 2°C inférieure à la température actuelle de 3000 à 1700 BP et d'environ 1°C inférieure à la température actuelle de 800 à 100 BP. La température moyenne annuelle de surface est présentement de $-6,6^{\circ}\text{C}$, alors que celle de l'air peut être estimée entre -8°C et -9°C (GAGNON et FERLAND, 1967). Il est possible que le pergélisol date d'il y a fort longtemps et ait commencé à se développer sous la base d'un glacier froid.

Ce genre de modèle, qui a aussi donné des résultats paléo-climatiques intéressants ailleurs en région de pergélisol continu (ex. en Alaska; LACHENBRUCH et MARSHALL, 1986), convient là où l'influence du gradient géothermique est mesurable. Il risque d'être inapplicable pour dater le pergélisol et estimer les changements thermiques qu'il a subis dans les îlots de pergélisol du Subarctique où toute la couche gelée est susceptible de voir son profil thermique modifié en quelques

années à peine, en raison des changements de la température moyenne de surface et où des apports latéraux de chaleur sont présents. D'autres genres de modèles, qui tiennent compte de la variabilité des conditions micro-climatiques de surface, devront être utilisés pour simuler les effets complexes des changements climatiques sur le régime thermique du pergélisol discontinu.

Le contexte géologique quaternaire

La déglaciation et l'émersion des terres en périphérie de la péninsule imposent des jalons chronologiques indiscutables, même s'ils ne sont pas toujours définis avec toute la précision souhaitable. Alors qu'on peut entretenir des doutes sur l'épaisseur de la glace et la température à la base du glacier wisconsinien dans les zones arctiques, il est raisonnablement sûr que la base de l'inlandsis au-dessus du Québec subarctique était à peu près à la température de fusion parce que c'est là qu'étaient localisées les plus grandes épaisseurs de glace. Il ne pouvait donc y avoir de pergélisol sous-glaciaire, ce qui fixe l'âge maximal du pergélisol en Hudsonie entre 7900 BP (début de la déglaciation des côtes et âge de la Moraine de Sakami) et 6000 BP, date probable de la fonte des derniers vestiges d'inlandsis (LAURIOL et GRAY, 1983; RICHARD *et al.*, 1982). Compte tenu de l'influence indirecte exercée par les formations végétales et le relief sur la distribution du pergélisol, tout site d'assez grande superficie demeuré sans couvert arbustif ou forestier depuis la déglaciation est donc probablement pergélisolé depuis ce temps.

L'émersion postglaciaire des secteurs côtiers impose une contrainte temporelle évidente pour l'aggradation du pergélisol. Ainsi, on retrouve le pergélisol côtier à partir de Kuujuarapik le long de la baie d'Hudson, soit dans les formations rocheuses, soit en îlots dispersés dans les argiles tyrrelliennes de la basse terrasse, tout au plus à 5 m d'altitude (DIONNE, 1978; ALLARD *et al.*, sous presse). Les 20 m de pergélisol à glace de ségrégation forés par Hydro-Québec (SEGUIN et ALLARD, 1984b) à cet endroit datent d'au plus 200-300 ans, compte tenu de l'émersion récente à un taux d'environ 1 m/siècle (HILLAIRE-MARCEL, 1976; ALLARD et TREMBLAY, 1983). Il a fallu aussi une longue période d'émersion suivie de l'élaboration d'une plaine alluviale avant que les paises de la rivière Avenau ne se forment (PISSART et GANGLOFF, 1984). À plus haute altitude, certaines buttes de pergélisol réparties entre 120 m et 180 m près de la rivière Nastapoca pourraient être aussi vieilles que 5500-6000 BP, date minimale de l'émersion des plaines d'argiles marines (ALLARD et SEGUIN, sous presse). Sur le rivage de la baie d'Ungava, où les taux d'émersion actuels avoisinent 0,6 m/siècle (LAURIOL, 1982), le pergélisol s'étend par endroits jusque sous les marais maritimes et les crêtes de débris glaciels sub-actuelles (FOURNIER *et al.*, 1987); il y est donc récent, voire syngénétique puisqu'il se forme dans des sédiments littoraux encore en voie d'accumulation.

Les reconstitutions stratigraphiques et les datations ^{14}C

Comme on n'a pas encore démontré la présence de couches de glace fossile dans le pergélisol, ni de taliks stratigraphiques ou de vestiges de paises fossilisés sous des

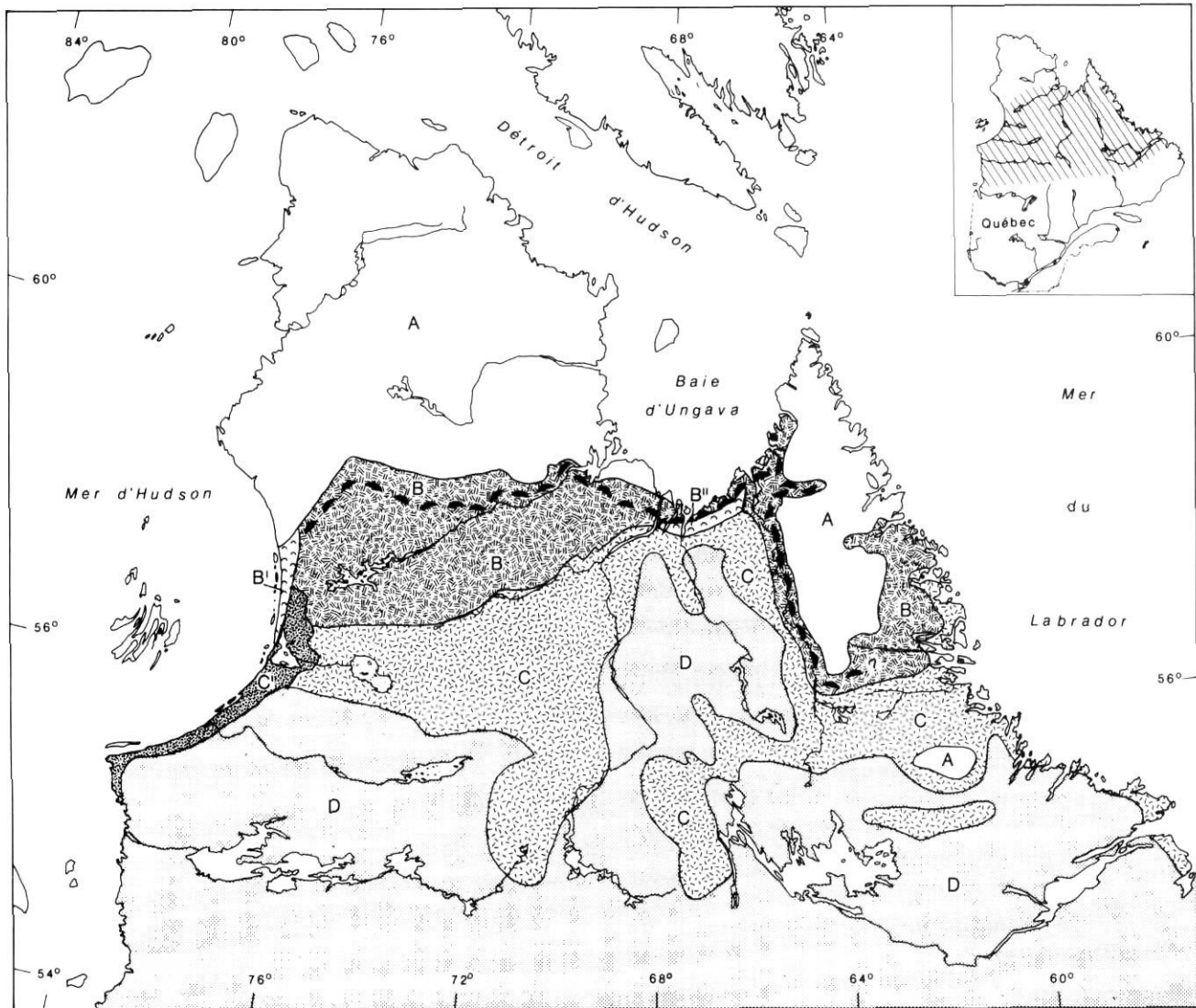


FIGURE 2. Distribution du pergélisol au Québec nordique. Zone A: Pergélisol continu, sauf probablement sous les grands lacs et les rivières. Épaisseurs dépassant 150 m en général. Les couches supérieures sont en équilibre avec le climat actuel. Zone B: Pergélisol discontinu et répandu (> 50 % de la surface du terrain), présent dans tous les types de matériaux géologiques de surface; absent sous les terrains humides avec peuplements arbustifs et sous les peuplements forestiers denses. Polygones de toundra abondants et consistant de façon dominante en *soil wedges*; ostioles dans les dépôts riches en limons. Buttes minérales de pergélisol dans les tills et les sables de terrasses. Tourbières à palses en-deçà de la ligne en tireté. Présence possible de pergélisol relict. Sous zone B': Aire de concentration majeure des plateaux et buttes de pergélisol dans les limons argileux de la mer de Tyrrell. Sous zone B'': Aire de concentration de palses dans les sédiments de la mer D'Iberville recouverts de tourbe. Zone C: Pergélisol discontinu et dispersé (< 50 % de la surface des terres), présent sous les collines dénudées et pouvant dépasser 100 m d'épaisseur. Tourbières à palses dispersées. Possibilité d'îlots de pergélisol relict. Sous zone C': Aire de concentration des champs de palses dans les tourbières sur limons argileux de la mer de Tyrrell et noyaux de pergélisol dans les collines rocheuses de la côte (buttes rocheuses périglaciaires abondantes). Zone D: Pergélisol sporadique (< 2 % du territoire) rencontré surtout dans les tourbières et sous les sommets suffisamment hauts pour constituer des îlots de toundra forestière.

Permafrost distribution in northern Québec. Zone A: Continuous permafrost, except probably under large lakes and rivers. Thickness generally greater than 150 m with the upper layers in equilibrium with present climate. Zone B: Discontinuous but widespread permafrost (> 50 % of land surface), present under all types of surficial deposits; absent under wet and shrubby ground and under densely forested terrain. Numerous tundra polygons with soil wedges; mud-boils on silty deposits. Mineral permafrost mounds in tills and terrace sands. Palsa bogs below the broken line. Possible occurrence of relict permafrost. Sub-zone B': Major concentration area of permafrost plateaus and mounds in clayey silts of Tyrrell Sea. Sub-zone B'': Concentration area of palsas in D'Iberville Sea sediments overlaid by peat. Zone C: Discontinuous and scattered permafrost (< 50 % of land surface), present under exposed hills; thickness may be greater than 100 m. Scattered palsa bogs. Patches of relict permafrost possibly present. Sub-zone C': Major concentration area of palsa bogs overlying clayey silts of Tyrrell Sea and abundant permafrost in rock outcrops along the coast (numerous heaved bedrock mounds). Zone D: Sporadic permafrost (< 2 % of territory) located mostly in wetlands and under summits high enough to be islands of forest tundra.

dépôts plus récents, les analyses stratigraphiques n'ont eu qu'une portée limitée; il n'y a pas encore de site étudié où il est possible de démontrer de manière irréfutable une cyclicité de type présence-absence-présence du pergélisol. Des fentes de gel fossiles dans les sables éoliens (FILION, 1983) et des cryoturbations anciennes dans des buttes de pergélisol (PAYETTE et SEGUIN, 1979) ont cependant été rapportées.

La tourbe des paises est un matériau propice aux reconstitutions stratigraphiques faisant appel à l'analyse pollinique, aux macro-restes végétaux et à la datation ^{14}C (PISSART et GANGLOFF, 1984; RICHARD, 1981; HEIM, 1976; MATHIEU, 1983; SAVOIE et GANGLOFF, 1980; ALLARD et SEGUIN, sous presse; GAHÉ *et al.*, 1987). Ces études ont été réalisées à partir de l'échantillonnage de la couverture de tourbe sur des paises, non perturbée par des mouvements de versant. Toutes, peu importe les particularités stratigraphiques locales (variations de composition de la tourbe, phases lacustres ou alluviales préalables, etc.), répondent à un même concept général, à l'instar des travaux menés hors-Québec (SEPPÄLÄ, 1986; KERSHAW et GILL, 1979; ZOLTAI, 1972; ZOLTAI et TARNOCAI, 1975; RAILTON et SPARLING, 1973), à savoir que la tourbe s'est accumulée pendant quelques milliers d'années en milieu gorgé d'eau, minérotrophe surtout, et non pergélisolé avant le soulèvement géival qui a asséché le sommet de la séquence et causé un changement important dans l'environnement local. Dans de nombreux cas, la tourbe cesse simplement de s'accumuler lors du soulèvement géival et sa surface est colonisée par des mousses et des lichens. L'âge de la surface de la tourbe est donc une approximation de l'âge de l'apparition de la forme associée au pergélisol. Notons qu'on n'a pas encore trouvé dans la tourbe, de façon certaine, de pergélisol qui n'ait d'expression topographique.

Les âges de quatre plateaux palsiques et de trois buttes de pergélisol avec coiffe de tourbe résiduelle sont ainsi connus dans la région de la rivière Sheldrake et de la rivière Nastapoca et sont répartis entre 2300 BP et 1200 BP (ALLARD et SEGUIN, sous presse). Une compilation préliminaire de 21 datations laisse croire que les périodes de 1650-1050 BP et 650-200 BP ont été particulièrement favorables à l'aggradation du pergélisol dans les tourbières. Un nombre important de dates modernes démontre aussi que des paises se forment encore occasionnellement à la faveur de changements des conditions locales, en particulier en raison de l'enneigement (ALLARD *et al.*, sous presse). La validité générale de ces estimations se vérifie au niveau d'une tourbière isolée près de la rivière aux Feuilles où COUILLARD et PAYETTE (1985) ont retracé par l'analyse des macro-restes les phases d'expansion et de dégradation du pergélisol. Ils y montrent que le premier îlot de pergélisol s'est formé dans la tourbière il y a 2700 BP et que la période la plus importante d'aggradation se situe entre 1400 et 700 BP.

Ces résultats concordent avec les interprétations des analyses polliniques qui montrent un refroidissement climatique généralisé depuis 3200-2700 BP (RICHARD, 1981, 1979; RICHARD *et al.*, 1982; SHORT et NICHOLS, 1977; McANDREWS et SAMSON, 1977; HEIM, 1976). Ils concordent aussi relativement bien avec les interprétations paléo-

climatiques plus précises de FILION (1984, 1983; activité dunaire), GAGNON (1982; fluctuations de la limite des arbres), MORIN (1985; chronologie des coulées de gélifluxion), PAYETTE (1984; formation des tourbières), et de PAYETTE et GAGNON (1985; dynamique du couvert forestier arbustif et forestier).

La mise en commun des trois modes de datation permet de proposer les principes suivants pour dater la formation du pergélisol selon les environnements où on le décèle :

- dans le Québec arctique et dans les sites du subarctique n'ayant jamais été couverts par une végétation dense, le pergélisol est probablement établi depuis la déglaciation ou l'émersion.
- dans les secteurs où les restes ligneux, les charbons de bois enfouis et l'évolution avancée des profils pédologiques indiquent qu'un couvert forestier a déjà existé, le pergélisol s'est probablement établi après la déforestation, qui elle peut être datée. Il risque fort d'être plus jeune que 3000 BP et contemporain d'une des périodes froides de l'Holocène inférieur (PAYETTE et GAGNON, 1985). L'étude conjointe des charbons de bois fossiles et des cryosols permettra de préciser la dynamique feux-successions végétales-pergélisol.
- Dans les plus anciennes tourbières, l'accumulation de matière organique a débuté entre 5500 et 6000 ans BP (PAYETTE, 1984). Les paises et les plateaux palsiques n'ont commencé à y abonder qu'au Néoglaciare.
- le long des côtes : l'âge du pergélisol présent dans les buttes argileuses le long du détroit de Manitounuk et le long de l'estuaire du fleuve George correspond obligatoirement au Petit Âge glaciaire, puisque l'émersion récente a coïncidé avec cette période froide. Dans le roc, le pergélisol date aussi de l'émersion et s'épaissit actuellement au rythme du relèvement isostatique.

Le pergélisol intertidal, sous les marais (fig. 3) et les flèches glacielles de la baie d'Ungava, apparaît comme un phénomène actuel lié aux estrans très larges et en général déneigés par la déflation. À court terme, c'est le faible gradient-inondation marégraphique sur le haut des marais littoraux qui favorise l'exposition du sol aux basses températures de l'air.

ÉVOLUTION RÉCENTE DU PERGÉLISOL

Récemment, le pergélisol a probablement connu une période de dégradation, si on en croit ce qui s'est passé dans les tourbières à paises. PAYETTE *et al.* (1976), SAMSON (1975) et LAPRISE (1986) ont montré, grâce à la cartographie détaillée des paises de la rivière Ouiatchouane, que celles-ci n'ont cessé de régresser entre 1959, année de la photo aérienne, et 1983. Une paise, en particulier, est disparue depuis le relevé cartographique de Samson. Par ailleurs, quelques analyses dendrochronologiques laissent croire que la colonisation des paises par les arbres a connu un essor depuis les années 1870 et que de nombreux affaissements liés au recul de leurs versants se produisent depuis ce temps (ALLARD *et al.*, sous presse). La dégradation a été particulièrement rapide durant les années 1930 et au début des années 1960. La densification récente des espèces ligneuses



FIGURE 3. Fissure de tension dans le tapis végétal provoquée par la croissance d'une petite butte de pergélisol sur le marais maritime à Kangiqsualujuaq.

Tension crack due to the growth of a small permafrost mound on the tidal marsh near Kangiqsualujuaq.

sur les paises est associée au réchauffement climatique survenu depuis la fin du Petit Âge glaciaire, soit depuis environ 1870 AD, lequel est nettement visible dans les courbes dendrochronologiques régionales (PARKER *et al.*, 1981; JACOBY 1983; PAYETTE *et al.*, 1985), de même que dans les données climatiques de l'hémisphère nord (KELLY *et al.*, 1982).

GÉOMORPHOLOGIE

Les types de gélisol et les formes du relief varient selon la nature des formations superficielles pergélisolées. Ces manifestations de surface en terrain gelé n'ont fait l'objet que de très peu de descriptions, si l'on exclut les travaux sur les paises, les buttes minérales de pergélisol (fig. 4) et les buttes rocheuses périglaciaires. DIONNE (1978) a décrit de nombreux faciès de gélisol en Jamésie et au sud de l'Hudsonie; cependant, il est évident que la plupart d'entre eux ne sont pas reliés au pergélisol mais plutôt à des contextes géomorphologiques particuliers, comme les bords de lacs et les dépôts minces sur le roc. Par contre, certaines formes et certains gélisols couvrent d'immenses superficies sur les terrains pergélisolés du Québec subarctique au point de devenir des indices de surface importants pour la cartographie du pergélisol discontinu. Les formes cryogènes et les gélisols observés récemment en Hudsonie et en Ungava sont classés selon les dépôts quaternaires correspondants et présentés au tableau I. Trois types de gélisols, en particulier, méritent l'attention à cause de leur importance spatiale.

Les gélisols les plus fréquemment rencontrés en milieu subarctique sont les ostioles dans les sédiments limoneux, les polygones avec fentes à remplissage organique et minéral et les thufurs ou *turf hummocks*. Les ostioles, qui forment des « médailles » de 30 cm à 3 m de diamètre, ont un centre généralement nu et sont le plus souvent entourées d'un sillon occupé par des mousses et des plantes basses. L'éjection en surface de limons liquéfiés du mollisol et un mouvement convectif dû aux pressions gélistatiques dans des cellules à l'intérieur du mollisol sont les deux mécanismes le plus souvent



FIGURE 4. Buttes de pergélisol parsemées d'ostioles dans les limons argileux marins, sous zone B¹; le pergélisol est absent sous les arbustives mal drainées et sous la plupart des mares de thermokarst.

Permafrost mounds pitted with mudboils in clayey marine silts, sub-zone B¹; there is no permafrost under the wet and shrubby areas and underneath most of the thermokarst ponds.

responsables de leur formation. SEGUIN et ALLARD (1984b) ont démontré qu'elles jouent un rôle important dans les processus de dénudation périglaciaire dans les argiles marines de la mer de Tyrrell.

Les polygones, de 4 à 18 m de diamètre, se manifestent surtout dans les tills et les sédiments hétérométriques contenant une fraction limoneuse importante et, parfois, dans les sables et graviers marins et fluvioglaciers (fig. 5 et 6). Ils n'ont fait l'objet que d'observations éparées (DIONNE, 1978; SEGUIN et ALLARD, 1984b). Les fentes le long des sillons sont remplies de sable et de matière organique dont les horizons podzoliques s'incurvent en forme de V. Observées en hiver dans des excavations, de minces (1 à 5 mm) fissures de contraction thermique s'ouvrent dans ces fentes (fig. 7) qui, cependant, ne se prolongent pas dans le pergélisol sous-jacent par des coins de glace (dans plusieurs dizaines de sites étudiés à la rivière Nastapoca, au lac Minto et sur la côte sud de la baie d'Ungava, les auteurs n'ont encore trouvé aucun coin de glace sous les sillons de ces polygones.) En U.R.S.S., ces *primordial soil wedges* se répartissent dans les régions où, comme au Québec subarctique, les températures annuelles moyennes de surface sont comprises entre 0°C et -5°C (ROMANOVSKIJ, 1985). Ostioles et polygones se côtoient fréquemment, les unes étant souvent réparties à l'intérieur des autres. Ils changent de forme sur les versants où ils évoluent en gradins de gélifluxion et en sols striés.

Les thufurs sont des monticules de 25 cm à 1 m de hauteur faisant en moyenne 1,5 m de diamètre et répartis en vastes champs sur les terrains plats et mal drainés (fig. 8). Ils abondent en particulier sur les tills et sur les dépôts glaciels des estrans à blocs soulevés de l'Ungava; la coiffe de tourbe et de mousse du dessus camoufle un noyau minéral (HAMELIN et COOK, 1967). Le sol entre les monticules est sans couvert muscinal ou ne supporte que quelques cypéracées. En été (fin juillet), le front de dégel est très inégal dans ces champs de buttes; il atteint environ 1,2 m entre les *hummocks* et 30 cm à l'intérieur de ceux-ci à cause de l'effet isolant de la coiffe de mousses et de tourbe qui, elle-même, fait 15-25 cm d'épaisseur.

TABLEAU I

Correspondances générales entre les formations superficielles, les formes cryogènes (métriques et décamétriques) et les gélisols au Québec subarctique

Dépôts quaternaires	Formes cryogènes	Gélisols
Tourbe	paises et plateaux palsiques; mares de thermokarst	fissures de tension polygonales; coins de glace occasionnels
Sables fluviatiles de terrasses	buttes de pergélisol basses et de configurations variées	(observations insuffisantes)
Crêtes et flèches glacielles à granulométrie hétérométrique	—	polygones occasionnels et fentes à remplissage mixte
Plages de blocs et galets, champs de blocailles	—	cercles de pierres occasionnels
Sables et graviers littoraux	buttes de pergélisol basses et plates	polygones occasionnels et fentes à remplissage mixte
Vasières à blocs soulevées (Ungava)	champs de thufurs	buttes gazonnées, ostioles
Sables d'exondation infra-littoraux (granulométrie moyenne et uniforme)	buttes de pergélisol	polygones occasionnels avec fentes à remplissage mixte
Limons, argiles et sables fins marins	plateaux et buttes de pergélisol; mares de thermokarst	ostioles, coulées boueuses superficielles; lobes de gélifluxion, terrassettes
Sables et graviers fluvioglaciaires (deltas, sandurs, eskers)	—	polygones à remplissage de sable (rares)
Tills (drumlins, moraines côtelées, formes de décrépitude)	buttes de pergélisol occasionnelles en bombements topographiques bas, assimilables parfois à des polygones à centres bombés	polygones avec fentes à remplissage minéral et organique; ostioles évoluant en terrassettes sur les pentes; lobes de gélifluxion
Tills en terrain plat	Champs de thufurs sur fens	buttes gazonnées et ostioles
Roc	buttes rocheuses périglaciaires (lorsque la structure est favorable). Généralement aucun indice de surface	—



FIGURE 5. Réseau polygonal de fentes à remplissage mixte sur une crête d'accumulation glacielle de la mer D'Iberville. Le polygone au premier plan fait 10 m de diamètre.

Polygonal network of soil wedges on a raised ridge of ice drifted deposits of D'Iberville Sea. The polygon in foreground is 10 m across.



FIGURE 6. Réseau de polygones de toundra sur une colline de till dans les environs de la rivière Nastapoca. Les épaisseurs de pergélisol sous ces réseaux de fentes à remplissage mixte (*soil wedges*) sont de l'ordre de 20 m. Par contre, le pergélisol est habituellement absent sous les terrains bas, arbusifs et boisés entourant ces collines.

Tundra polygons on a hilltop in till, near Rivière Nastapoca. Permafrost thickness underneath these soil wedge networks is about 20 m. Permafrost is absent underneath low shrubby and forest terrain that surrounds the hills.

GÉOCRYOLOGIE

La quantité et le type de glace contenue dans le pergélisol (cf. MACKAY, 1972), son épaisseur, l'épaisseur du mollisol, ses caractéristiques géotechniques et ses propriétés géophysiques (sismiques et électriques) varient en fonction des formations superficielles. Sauf pour quelques descriptions peu étoffées de glace de ségrégation dans les sédiments fins de la mer de Tyrrell, on ne sait presque rien des propriétés géologiques, chimiques et mécaniques des sols gelés du Québec. L'étude de DEVER *et al.* (1984) sur la géochimie isotopique de la glace des paises entre Radisson et Kuujua-rapik est celle qui contient le plus de données sur la composition chimique de la glace lenticulaire. Elle démontre, par suite de déterminations de la teneur en ^3H , que le pergélisol peut être

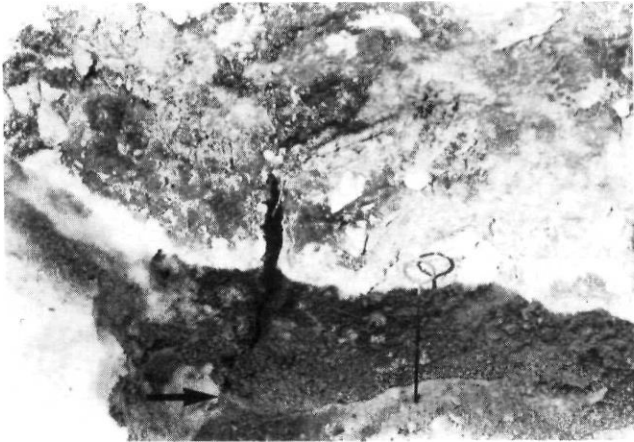


FIGURE 7. Fissure de contraction thermique dans un sillon de polygone près du lac Minto, début avril 1986; la fissure était ouverte de 1-2 mm jusqu'à une profondeur de 70 cm (niveau de la flèche).

Thermal contraction crack in a polygonal trough near Lac Minto, beginning of April 1986; the crack was 1-2 mm wide down to a depth of 70 cm, at arrow level.

sujet à des migrations d'eau. Il en découle que la glace du sol se renouvelle actuellement et modifie sa disposition lenticulaire, même dans un pergélisol âgé de plusieurs siècles.

LES RECHERCHES FUTURES

Les besoins en données nouvelles ont trait au régime thermique du pergélisol, à la compréhension des processus affectant le mollisol et responsables des gélisols, à la connaissance des éléments du régime thermique du pergélisol littoral et au développement de connaissances en géocryologie.

Dans les régions de pergélisol discontinu, des stations de mesure incluant des câbles à thermistances à travers le pergélisol et des instruments météorologiques au-dessus de la surface sont nécessaires pour suivre les variations de température dans une multitude de contextes géomorphologiques et écologiques: dépôts grossiers et fins, couverts végétaux variés, diverses épaisseurs d'enneigement. La mesure de tous ces paramètres permettra de les inclure dans certains modèles d'évolution du pergélisol (SMITH, 1977; SMITH et RISEBOROUGH, 1983). Comme la température au-delà de quelques mètres de profondeur varie de façon globale et relativement rapide en réponse à l'ensemble des facteurs qui influencent la température annuelle moyenne en surface, on peut ainsi envisager l'utilisation de câbles à thermistance permanents comme outils de mesure intégrée pour suivre les changements climatiques au fil des années. Il devrait aussi être possible de prévoir les effets des changements climatiques à venir.

On n'a pas encore au Québec fait d'études géocryologiques. Sans ces dernières on ne peut décrire convenablement les propriétés des sols gelés et, en particulier, la mobilité des gélisols (pressions gélistatiques et hydrostatiques, reptation, gélifluxion). En plus des observations et des descriptions de profils de sols et de fentes de gel, la mise en place d'instruments aux sites-échantillons est primordiale pour mesurer les déformations du terrain, de même que les variations de la teneur



FIGURE 8. Champ de thufurs sur un estran à blocs soulevé (40 m) près de Kangiqsuallujuaq.

Turf hummocks on a raised boulder flat (40 a.s.l.) near Kangiqsuallujuaq.

en eau et en glace du mollisol (cf. MACKAY, 1984, 1983; MACKAY et MACKAY, 1976; MICHEL et FRITZ, 1978; SMITH, 1985).

CONCLUSION

Les besoins de l'exploitation minière ont lancé les recherches sur le pergélisol au Québec, et la période de 1950 à 1975 a été particulièrement fertile, notamment au chapitre des mesures thermiques et géophysiques grâce aux nombreux forages. Il reste de nombreuses données de l'époque à analyser (H. Granberg, comm. pers.). Au cours des années 1970 et au début des années 1980, des études ponctuelles ont été menées dans diverses régions à un rythme très sporadique. Malheureusement, aucune continuité dans les mesures thermiques n'a été assurée dans des trous de forage en milieu arctique comme ceux de la baie aux Feuilles (GRAY *et al.*, 1979) et de Purtuniqu (TAYLOR et JUDGE, 1979) et en milieu subarctique au site de Grande Baleine 1 (POITEVIN et GRAY, 1982). Pendant ce déclin, des campagnes de mesures thermiques en profondeur, des études écologiques et géomorphologiques, faites surtout dans les tourbières à palses et les buttes minérales de pergélisol, ont pris le relais et ont rapporté des connaissances fondamentales débouchant sur une meilleure compréhension géographique du pergélisol et sur une chronologie paléo-climatique holocène maintenant bien établie. Il n'en reste pas moins une grande variété de volets à couvrir; les propriétés physiques et le régime climatique du pergélisol restent à étudier avec plus d'intensité.

Au Québec, on n'a pas récemment sollicité de recherches reliées à de grands projets comparables au développement des ressources pétrolières du Mackenzie. Le développement hydro-électrique à la baie de James s'est fait en milieu boréal où le pergélisol est un facteur négligeable. Toutefois, au Québec, c'est maintenant qu'il faut développer les recherches sur le pergélisol par des méthodes analytiques en prévision d'un besoin futur de méthodes éprouvées et de connaissances applicables à des projets de développement. Le pergélisol est aussi une composante physique importante des écosystèmes nordiques qui sont appelés à subir des modifications

naturelles, par exemple à la suite du réchauffement climatique prévu dans les prochaines années.

REMERCIEMENTS

L'accumulation d'observations par les auteurs au cours des six dernières années a été rendue possible grâce à des subventions du fonds F.C.A.R. du gouvernement du Québec, du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du gouvernement du Canada et du budget spécial de recherches de l'Université Laval. L'encouragement et l'organisation matérielle des travaux sont venus du Centre d'études nordiques de l'Université Laval. Les auteurs ont profité de nombreuses discussions avec plusieurs collègues, principalement les docteurs Louise Filion, Serge Payette, Réjean Gagnon et Hubert Morin. Plusieurs étudiants, trop nombreux pour les nommer, ont collaboré sur le terrain; parmi ceux-ci, Alain Fournier et Richard Lévesque ont fait d'utiles suggestions lors de la rédaction du manuscrit. Les commentaires de MM. J. T. Gray et P. Gangloff, lecteurs pour la revue, et de M. S. Payette, rédacteur de ce numéro, ont encouragé des mises au point importantes lors de revision finale du texte.

RÉFÉRENCES

- ALLARD, M. et SEGUIN, M. K. (sous presse): The Holocene evolution of permafrost near the tree line on the eastern coast of Hudson Bay (northern Québec), *Journal canadien des Sciences de la Terre*.
- ALLARD, M., SEGUIN, M. K. et LÉVESQUE, R. (sous presse): Palsas and mineral permafrost mounds in northern Québec, *Proceedings, First International Symposium on Geomorphology*, Manchester, U.K., 15-21 Sept. 1985.
- ALLARD, M. et TREMBLAY, G. (1983): La dynamique littorale des îles Manitounuk durant l'Holocène, *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supp. Bd. 47: 61-95.
- ANNERSTEN, L. D. (1966): Interaction between cover and permafrost, *Biuletyn periglacialny*, 15: 27-33.
- BLAIS, R. (1984): *Modèles mathématiques pour l'évaluation de l'épaisseur du pergélisol des palses de la rivière Sheldrake*, Université Laval, Département de géographie, mémoire de baccalauréat, 69 p.
- 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*, 33: 291-298.
- BOURNÉRIAS, M. (1972): Pyramides rocheuses d'éjection en milieu périglaciaire, Puvurnituq, Nouveau-Québec, *Revue de Géographie de Montréal*, 26: 214-219.
- BROWN, R. J. E. (1967): *Permafrost map of Canada*, Division of building research, National Research Council (NRC 9769) and Geological Survey of Canada (map 1246A).
- (1978): Permafrost map of Canada, in *Hydrological atlas of Canada*, Dept. of Fisheries and Environment (map n° 32).
- (1979): Permafrost distribution in the southern part of the discontinuous zone in Québec and Labrador, *Géographie physique et Quaternaire*, 33: 279-290.
- COUILLARD, L. et PAYETTE, S. (1985): Évolution holocène d'une tourbière à pergélisol (Québec nordique), *Journal canadien de Botanique*, 63: 1104-1121.
- DESBIENS, J., SEGUIN, M. K. et ALLARD, M. (1985): Statistiques descriptives sur les épaisseurs du pergélisol discontinu au Québec nordique, 53^e congrès de l'A.C.F.A.S., Chicoutimi, *Résumé des communications*, p. 177.
- DEVER, L., HILLAIRE-MARCEL, C. et FONTES, J.Ch. (1984): Composition isotopique, géochimie et genèse de la glace en lentille (palsen) dans les tourbières du Nouveau-Québec (Canada), *Journal of Hydrology*, 71: 107-130.
- DEWEZ, V., LAGAREC, D. et PHIPPS, M. (1984): *The distribution of some periglacial landforms in northern Québec (Canada) as related to climate: An information system approach*, Département de géographie, Université d'Ottawa, Notes de recherches, n° 47, 35 p.
- DIONNE, J.-C. (1978): Formes et phénomènes périglaciaires en Jamésie, *Géographie physique et Quaternaire*, 32: 187-247.
- (1983): Frost-heaved bedrock features: a valuable permafrost indicator, *Géographie physique et Quaternaire*, 37: 241-252.
- (1984): Palses et limites méridionales du pergélisol dans l'hémisphère nord: le cas de Blanc-Sablon, Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, 38: 165-184.
- DYKE, L. D. (1984): Frost heaving of bedrock in permafrost regions, *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 21: 389-405.
- FILION, L. (1983): *Dynamique holocène des systèmes éoliens et signification paléoclimatique (Québec nordique)*, Université Laval, Département de biologie, thèse de Ph. D., 123 p.
- (1984): A relationship between dunes, fire and climate recorded in the Holocene deposits of Québec, *Nature*, 309: 543-546.
- FILION, L. et PAYETTE, S. (1976): La dynamique de l'enneigement en région hémis-arctique, Poste-de-la-Baleine, Nouveau-Québec, *Cahiers de Géographie de Québec*, 20: 275-302.
- (1978): Observations sur les caractéristiques physiques du couvert de neige et sur le régime thermique du sol à Poste-de-la-Baleine, Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, 32: 71-79.
- FOURNIER, A., ALLARD, M. et SEGUIN, M. K. (1987): Typologie morphogénétique des marelles du marais littoral de la baie de Kangisualujuaq, estuaire moyen du George, Québec nordique, *Géographie physique et Quaternaire*, 41: 47-64.
- GAGNON, R. (1982): *Fluctuations holocènes de la limite des forêts, Rivière-aux-Feuilles, Québec nordique: une analyse macro-fossile*, Université Laval, département de phytologie, thèse de Ph. D., 108 p.
- GAGNON, R. M. et FERLAND, M. (1967): *Climat du Québec septentrional*, Québec, Ministère des Richesses naturelles, M.P. 10, 107 p.
- GAHÉ, É., ALLARD, M. et SEGUIN, M. K. (1987): Géophysique et dynamique holocène de plateaux palsiques à Kangisualujuaq, Québec nordique, *Géographie physique et Quaternaire*, 41: 33-46.
- GANGLOFF, P. et PISSART, A. (1983): Évolution géomorphologique et palses minérales près de Kuujuaq (Fort-Chimo, Québec), *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 19: 119-132.
- GRAY, J. T. et PILON, J. A. (1976): Permafrost distribution at Tasiujaq (Leaf Basin) on the southwest coast of Ungava Bay, New Québec, *Revue de Géographie de Montréal*, 30: 367-373.
- GRAY, J. T. et BROWN, R. J. E. (1979): Permafrost presence and distribution in the Chic-Chocs Mountains, Gaspésie, Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, 33: 299-316.

- GRAY, J. T., PILON, J. A. et POITEVIN, J. (1979): Le pergélisol et la couche active dans la tundra forestière au sud de la baie aux Feuilles, Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, 33: 253-264.
- HAMELIN, L. E. et CAILLEUX, A. (1969): Les palses dans le bassin de la Grande Rivière de la Baleine, *Revue de Géographie de Montréal*, 23: 329-337.
- HAMELIN, L. E. et COOK, F. A. (1967): *Le périglaciaire par l'image / Illustrated glossary of periglacial phenomena*, Travaux et documents du Centre d'études nordiques de l'Université Laval, n° 4, Presses de l'U.L., 237 p.
- HARE, F. K. (1959): *A photo-reconnaissance survey of Labrador-Ungava*, Geographical Branch, Mines and Technical Surveys, Ottawa, memoir n° 6, 83 p.
- HEIM, J. (1976): Étude palynologique d'une palse dans la région du Golfe de Richmond, Nouveau-Québec, Canada, *Cahiers de Géographie de Québec*, 20: 221-238.
- HILLAIRE-MARCEL, C. (1976): La déglaciation et le relèvement isostatique sur la côte est de la baie d'Hudson, *Cahiers de Géographie de Québec*, 20: 185-220.
- IVES, J. D. (1979): A proposed history of permafrost development in Labrador-Ungava, *Géographie physique et Quaternaire*, 33: 233-244.
- JACOBY, G. C. Jr. (1983): A dendroclimatic study in the forest-tundra ecotone on the east shore of Hudson Bay, in *Tree line ecology* P. Morissette et S. Payette, édit., Proceedings of the Northern Québec tree line conference, Centre d'études nordiques, Université Laval, *Nordicana*, 47: 95-100.
- KELLY, P. M., JONES, P. D., SEAR, C. B., GHERRY, B. S. G., et TAVAKOL, R. K. (1982): Variations in surface air temperatures: part 2. Arctic regions, 1881-1980, *Monthly Weather Review*, 110: 71-83.
- KERSHAW, G. P. et GILL, D. (1979): Growth and decay of palsas and peat plateaus in the Macmillan Pass-Tsichu River area, Northwest Territories, Canada, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16: 1362-1374.
- LACHENBRUCH, A. H. et MARSHALL, B. V. (1986): Changing climate: Geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic, *Science*, 234: 689-696.
- LAGAREC, D. (1973): Éléments de la morphologie cryogène du Golfe de Richmond, Nouveau-Québec, *Cahiers de Géographie de Québec*, 17: 465-482.
- (1976): Étude géomorphologique de palses dans la région de Chimo, Nouveau-Québec, Canada, *Cahiers géologiques*, 92: 153-163.
- (1980): *Étude géomorphologique de palses et autres buttes cryogènes en Hudsonie (Nouveau-Québec)*, Département de géographie, Université Laval, Thèse de Ph. D., 308 p.
- (1982): Cryogenetic mounds as indicators of permafrost conditions, northern Québec, *Proceedings, 4th Canadian Permafrost Conference* (Roger J. E. Brown memorial volume), p. 43-48.
- LAPRISE, D. (1986): *Évolution récente du pergélisol dans une tourbière à palses du golfe de Richmond (Québec nordique)*, Université Laval, Département de phytologie, thèse de M. Sc., 35 p.
- LAURIOL, B. (1982): *Géomorphologie quaternaire au sud de l'Ungava*, Paléo-Québec, n° 15, 174 p.
- LAURIOL, B. et GRAY, J. T. (1983): Un lac glaciaire dans la région du lac Minto — Nouveau-Québec, *Journal canadien des Sciences de la Terre*, 20: 1488-1492.
- LEBRUN, C. (1985): *Géomorphologie des soulèvements et des évidements rocheux en milieu périglaciaire, cuesta de Manitououoc, Nouveau-Québec*, Université Laval, Département de géographie, thèse de maîtrise, 218 p.
- LÉVESQUE, R. (1986): *Géomorphologie périglaciaire et cartographie automatisée du pergélisol aux rivières Nastapoca et Sheldrake, Nouveau-Québec*, Université Laval, Département de géographie, thèse de maîtrise, 144 p.
- McANDREWS, J. H. et SAMSON, G. (1977): Analyse pollinique et implications archéologiques, lac de la Hutte Sauvage (Mushuau Nipi), Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, 31: 177-184.
- MACKAY, J. R. (1972): The world of underground ice, *Association of American Geographers Annals*, 62: 1-22.
- (1983): Downward water movement into frozen ground, Western Arctic coast, Canada, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20: 120-134.
- (1984): The frost heave of stones in the active layer above permafrost with downward and upward freezing, *Arctic and Alpine Research*, 16: 439-446.
- MACKAY, J. R. et MACKAY, D. K. (1976): Cryostatic pressures in nonsorted circles (mud hummocks), Inuvik, Northwest Territories, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 13: 889-897.
- MATHIEU, C. (1983): *Morphogénèse holocène des dunes et des palses de la basse vallée du Koroc (Nouveau-Québec)*, Université de Montréal, Département de géographie, thèse de maîtrise, 198 p.
- MICHAUD, Y. (1985): *L'évolution des versants rocheux au golfe de Guillaume-Delisle, Hudsonie*, Université Laval, Département de géographie, thèse de maîtrise, 102 p.
- MICHEL, F. A. et FRITZ, P. (1978): Environmental isotopes in permafrost related waters along the Mackenzie valley corridor, *Proceedings, 3rd International Conference on Permafrost*, National Research of Canada, Vol. 1, p. 207-211.
- MORIN, H. (1985): *La dynamique holocène des combes à neige du golfe de Richmond (Québec nordique)*, Université Laval, Département de phytologie, thèse de Ph. D., 123 p.
- NICHOLSON, F. H. (1976): Permafrost thermal amelioration tests near Schefferville, Québec, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 13: 1694-1705.
- (1979): Permafrost spatial and temporal variations near Schefferville, Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, 33: 265-277.
- NICHOLSON, F. H. et GRANDBERG, H. B. (1973): Permafrost and snow cover relationships near Schefferville, *North American Contribution to 2nd International Permafrost Conference*, National Academy of Sciences, Washington, D.C., p. 151-158.
- PARKER, M. L., JOZSA, L. A., JOHNSON, S. G. et BRAMHALL, P. A. (1981): Dendrochronological studies of the coast of James Bay and Hudson Bay (part 1 and 2), in C. R. Harington, édit., *Climatic change in Canada*, National Museums of Canada, *Syllogeus* n° 33.
- PAYETTE, S. (1978): Les buttes rocheuses d'origine périglaciaire au Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, 32: 369-374.
- (1983): The forest-tundra and present tree-line of the Northern Québec-Labrador peninsula, in *Tree-line Ecology*, P. Morissette and S. Payette, édit., Proceedings of the Northern Québec Tree-line Conference, Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, *Nordicana*, 47: 3-24.

- (1984): Peat inception and climatic change in Northern Québec, in *Climatic changes on a yearly to millennial basis*, N. A. Möner et W. Karlen, édit., Reidel Publishing Company, p. 173-179.
- PAYETTE, S., FILION, L., GAUTHIER, L. et BOUTIN, Y. (1985): Secular climate change in old-growth tree-line vegetation of northern Québec, *Nature*, 315: 135-138.
- PAYETTE, S. et GAGNON, R. (1985): Late Holocene deforestation and tree regeneration in the forest-tundra of Québec, *Nature*, 313: 570-572.
- PAYETTE, S. et LAGAREC, D. (1972): Observations sur les conditions d'enneigement à Poste-de-la-Baleine, Nouveau-Québec, *Cahiers de Géographie de Québec*, 16: 469-481.
- PAYETTE, S., OUZILLEAU, J. et FILION, L. (1975): Zonation des conditions d'enneigement en toundra forestière, Baie d'Hudson, Nouveau-Québec, *Journal canadien de Botanique*, 51: 1037-1044.
- PAYETTE, S., SAMSON, H. et LAGAREC, D. (1976): The evolution of permafrost in the taiga and forest-tundra, Western Québec-Labrador peninsula, *Canadian Journal of Forest Research*, 6: 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*, 33: 339-358.
- PILON, J. A. (1982): *Étude de la couche active et du pergélisol dans la région de Baie aux Feuilles*, Ungava, Université de Montréal, Département de géographie, thèse de Ph. D.
- PILON, J., ANNAN, A. P., DAVIS, J. 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*, 33: 317-326.
- PISSART, A. et GANGLOFF, P. (1984): Les palses minérales et organiques de la vallée de l'Aveneau, près de Kujjuaq, Québec subarctique, *Géographie physique et Quaternaire*, 38: 217-228.
- POITEVIN, S. et GRAY, J. T. (1982): Distribution du pergélisol dans le bassin de la Grande Rivière de la Baleine, Québec, *Naturaliste canadien*, 109: 445-455.
- RAILTON, J. B. et SPARLING, J. H. (1973): Preliminary studies on the ecology of palsas mounds in northern Ontario, *Canadian Journal of Botany*, 51: 1037-1044.
- RICHARD, P. J. H. (1979): Contribution à l'histoire postglaciaire de la végétation au nord-est de la Jamésie, Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, 33: 93-112.
- (1981): Paléophytogéographie post-glaciaire en Ungava par l'analyse pollinique, *Paléo-Québec*, n° 13, 153 p.
- RICHARD, P. J. H., LAROUCHE, A. et BOUCHARD, M. A. (1982): Âge de la déglaciation finale et histoire postglaciaire de la végétation dans la partie centrale du Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, 36: 63-90.
- ROMANOVSKIJ, N. N. (1985): Distribution of recently active ice and soil wedges in the U.S.S.R., in *Field and Theory*, M. Church and O. Slaymaker, édit., University of British Columbia Press, Vancouver, p. 154-165.
- ROUSSEAU, J. (1968): The vegetation of the Québec-Labrador Peninsula between 55° and 60°N, *Naturaliste canadien*, 95: 469-563.
- SAMSON, H. (1975): *Évolution du pergélisol en milieu tourbeux en relation avec la dynamique de la végétation*, Golfe de Richmond, Nouveau-Québec, Université Laval, Département de phytologie, thèse de maîtrise, 158 p.
- SAVOIE, L. et GANGLOFF, P. (1980): Analyse pollinique d'une palse au site archéologique de Vieux-Port-Burwell (Killiniq), Territoires du Nord-Ouest, *Géographie physique et Quaternaire*, 34: 310-321.
- SEPPÄLÄ, M. (1986): The origin of palsas, *Geografiska Annaler*, 68A: 141-147.
- SEGUIN, M. K.- (1976): Observations géophysiques sur le pergélisol des environs du lac Minto, Nouveau-Québec, *Cahiers de Géographie de Québec*, 50: 327-346.
- (1978): Temperature-electrical resistivity relationship in continuous permafrost at Purtuniq, Ungava Peninsula, *Proceedings, 3rd International Conference on Permafrost*, N.R.C., Canada, p. 137-144.
- SEGUIN, M. K.- et ALLARD, M. (1984a): Le pergélisol et les processus thermokarstiques de la région de la rivière Nastapoca, Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, 38: 11-25.
- (1984b): La répartition du pergélisol dans la région du détroit de Manitounuk; côte est de la mer d'Hudson, Canada, *Journal canadien des Sciences de la Terre*, 21: 354-364.
- SEGUIN, M. K.- et CRÉPAULT, J. (1979): Étude géophysique d'un champ de palses à Poste-de-la-Baleine, Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, 33: 327-338.
- SHORT, S. K. et NICHOLS, H. (1977): Holocene pollen diagrams from subarctic Labrador-Ungava: vegetational history and climatic change, *Arctic and Alpine Research*, 9: 265-290.
- SMITH, M. W. (1977): *Computer simulation of microclimatic and ground thermal regimes: Test results and program description*, Dept. of Indian Affairs and Northern development, ALUR report n° 75-76-72, 74 p.
- (1985): Observations of soil freezing and frost heave at Inuvik, Northwest Territories, Canada, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 22: 283-290.
- SMITH, M. W. et RISEBOROUGH, D. W. (1983): Permafrost sensitivity to climatic change, *Permafrost 4th International Conference, Proceedings*, National Academy Press, Washington, D.C., p. 1178-1183.
- TAYLOR, A. et JUDGE, A. (1979): Permafrost studies in northern Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, 33: 245-252.
- THOM, B. G. (1969): New permafrost investigation near Schefferville, P.Q., *Revue de Géographie de Montréal*, 23: 317-327.
- WRIGHT, R. K. (1979): Preliminary results of a study on active layer hydrology in the discontinuous zone at Schefferville, Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, 33: 359-368.
- ZOLTAI, S. C. (1972): Palsas and peat plateaus in Central Manitoba and Saskatchewan, *Canadian Journal of Forest Research*, 2: 291-302.
- ZOLTAI, S. C. et TARNOCAI, C. (1975): Perennially frozen peatlands in the western arctic and subarctic of Canada, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 12: 28-43.