

Article

« Géophysique et dynamique holocène de plateaux palsiques à Kangiqsualujjuaq, Québec nordique »

Emile Gahé, Michel Allard et Maurice K.-Seguin

Géographie physique et Quaternaire, vol. 41, n° 1, 1987, p. 33-46.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/032663ar>

DOI: 10.7202/032663ar

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

GÉOPHYSIQUE ET DYNAMIQUE HOLOCÈNE DE PLATEAUX PALSQUES À KANGIQSUALUJJUAQ, QUÉBEC NORDIQUE

Émile GAHÉ, Michel ALLARD et Maurice K.-SEGUIN; les deux premiers auteurs: Département de géographie et Centre d'études nordiques; le troisième auteur: Département de géologie et Centre d'études nordiques, Université Laval, Sainte-Foy, Québec G1K 7P4.

RÉSUMÉ Les plateaux palsiques étudiés sont localisés dans une vallée près de Kangiqsualujuaq, le long de l'estuaire du George, à quelque 15 km du littoral de la baie d'Ungava. Le fond de la vallée a émergé des eaux de la mer D'Iberville et a été occupé par un lac avant 5400 BP. Une tourbière a commencé à se développer et à progresser au détriment du lac il y a environ 4500-4300 BP. L'aggradation du pergélisol près du lac actuel, au centre de la vallée, a eu lieu vers 1800-1600 BP; le soulèvement géral a été plus tardif en bordure du plateau palsique, soit vers 800 BP. Selon les méthodes géophysiques employées en surface et dans les trous de forage (résistivité électrique, polarisation provoquée, polarisation spontanée et électromagnétisme), l'épaisseur du mollisol varie de 30 à 80 cm et celle du pergélisol, de 3,5 m à plus de 15 m. On note également la présence de taliks sous les dépressions topographiques qui percent le plateau. La méthode de calorimétrie *in situ* et les mesures de la teneur en eau avec une sonde à neutron ont permis de déterminer la composition du mollisol et du pergélisol. L'utilisation de toutes ces méthodes sur le même site donne une connaissance précise des propriétés physiques du milieu et une bonne perception de l'extension verticale et horizontale du pergélisol. Le concept de morcellement des plateaux palsiques en palses isolées le long de «lignes de fusion» dans le pergélisol est appuyé par les résultats des méthodes d'investigation électriques.

ABSTRACT *Geophysics and Holocene dynamics of the peat plateaus at Kangiqsualujuaq, northern Québec.* The peat plateaus investigated are located in a valley close to the village of Kangiqsualujuaq along the George River Estuary some 15 km from Ungava Bay. The valley bottom emerged from the D'Iberville Sea and was occupied by a lake at least some 5400 BP. A peat bog started to develop and invaded the lake some 4500-4300 years ago. The permafrost growth close to the present lake, in the center of the valley, occurred at about 1800-1600 BP; frost heaving in the periphery of the present peat plateau took place somewhat later, around 800 BP. Surface and down-the-hole geophysical methods (electrical resistivity, induced polarization, self potential and electromagnetic) show that the thickness of the active layer ranges from 30 to 80 cm while that of permafrost extends from 3.5 to 15 m. The presence of taliks under the topographic depressions dissecting the plateau was noticed. The *in situ* calorimetric method and measurements of relative water content using the neutron probe allowed the determination of the active layer and permafrost composition. The use of these methods on the same site yielded a good resolution of the physical properties of the medium and a fair understanding of vertical and horizontal extents of permafrost. The concept of parting of peat plateaus into isolated palsas along «linear thawing zones» in permafrost is supported by the results of electrical methods.

ZUSAMMENFASSUNG *Geophysik und Holozän-Dynamik der Palsen-Plateaus bei Kangiqsualujuaq, nordisches Québec.* Die untersuchten Palsen-Plateaus befinden sich in einem Tal nahe bei Kangiqsualujuaq, entlang der Mündung des George-Flusses, ungefähr 15 km entfernt von der Küste der Bucht von Ungava. Die Talmulde ist aus dem Meer von Iberville aufgetaucht und wurde vor 5400 BP von einem See eingenommen. Vor ungefähr 4500-4300 BP begann sich ein Torfmoor zu bilden und auf den See überzugreifen. Die Ausdehnung des Dauerfrostbodens in der Nähe des heutigen Sees im Zentrum des heutigen Tals geschah gegen 1800-1600 BP; die Frosthebung fand am Rand des Palsen-Plateaus später statt, etwa gegen 800 BP. Aus den an der Oberfläche und in den Bohrlöchern verwendeten geophysikalischen Methoden (elektrischer Leitungswiderstand, provozierte Polarisation, spontane Polarisation und Elektromagnetismus) geht hervor, daß die Dicke des Auftaubodens zwischen 30 und 80 cm variiert und die des Dauerfrostbodens zwischen 3,5 m bis zu mehr als 15 m. Man bemerkt auch das Vorkommen von Taliks unter den topographischen Senken, die das Plateau durchbohren. Die Wärmemessungsmethode *in situ* und die Messungen des Wassergehalts mit einer Neutronensonde machen es möglich, die Zusammensetzung des Auftaubodens und des Dauerfrostbodens zu bestimmen. Die Verwendung all dieser Methoden an derselben Stelle führt zu einer genauen Kenntnis der physikalischen Eigenschaften des Milieus und vermittelt eine gute Vorstellung der vertikalen und horizontalen Ausdehnung des Dauerfrostbodens. Das Konzept der Zerstückelung der Palsen-Plateaus in getrennte Palsen entlang der "Auffaulinien" im Dauerfrostboden wird durch die Ergebnisse der elektrischen Forschungsmethoden gestützt.

INTRODUCTION

Les paises sont des buttes de pergélisol d'échelle métrique et décimétrique comprenant au moins deux caractères distinctifs: 1) elles se développent dans des tourbières et sont composées soit de tourbe, soit d'un matériel meuble minéral recouvert, en majeure partie, d'une épaisseur notable de tourbe; 2) le pergélisol dans ces formes contient presque uniquement de la glace de ségrégation interstratifiée avec des couches minérales et alimentée originellement par une nappe phréatique libre. Lors de la formation, le pergélisol progresse depuis la surface et c'est la croissance des lentilles de glace qui entraîne le soulèvement géluvial de la butte (SEPPÄLÄ, 1972; PISSART, 1983; ZOLTAI, 1975; ALLARD *et al.*, 1986). Les buttes tourbeuses dont le gonflement est dû au gel d'eau sous pression appartiennent plutôt à la famille des hydrolacololithes et n'ont rien à voir avec les paises (NELSON *et al.*, 1985; OUTCALT *et al.*, 1986). Lorsque les terrains tourbeux soulevés par la glace de ségrégation occupent une surface plus vaste, la forme s'apparente au plateau plutôt qu'à la butte isolée; on parle alors de plateau palsique (PAYETTE *et al.*, 1976), équivalent de l'anglais *peat plateau* (ZOLTAI et TARNOCAI, 1981; ZOLTAI, 1972; BROWN et KUSPCH, 1974). Dans les régions à paises ayant subi du thermokarst, il est fréquemment impossible de faire la distinction entre une paise autonome et une butte résiduelle d'un plateau palsique dégradé; on tend à accepter aussi parmi les paises les buttes édifiées suivant ce second mode de formation (LAGAREC, 1980; WASHBURN, 1983a, 1983b; ALLARD *et al.*, sous presse).

Au Québec nordique les études descriptives et stratigraphiques de paises, accompagnées de datations et d'analyses polliniques, commencent à abonder (HAMELIN et CAILLEUX, 1969; HEIM, 1976; LAGAREC, 1980; SAVOIE et GANGLOFF, 1980; GANGLOFF et PISSART, 1983; MATHIEU, 1984; RICHARD, 1981; COUILLARD et PAYETTE, 1985; ALLARD et SEGUIN, sous presse). Au cours de l'étude de ces formes, les sondages géophysiques ont avant tout été faits selon la méthode de résistivité électrique (SEGUIN, 1976; SEGUIN et CRÉPAULT, 1979; SEGUIN et ALLARD, 1984; ALLARD *et al.*, sous presse). Dans la majorité des travaux géophysiques on a employé la même approche, à savoir un sondage par paise selon la configuration de Schlumberger, avec les électrodes de potentiel généralement plantées au sommet du monticule. De tels sondages permettent d'estimer l'épaisseur du pergélisol sous chaque butte et donnent lieu à des compilations statistiques pour établir soit des relations entre les dimensions des buttes et l'épaisseur du pergélisol, soit des distributions spatiales de classes d'épaisseurs (DESBIENS *et al.*, 1985; BLAIS, 1985; ALLARD *et al.*, sous presse; LEVESQUE, en préparation). Au Québec, seul LAGAREC (1980) a cartographié la distribution du pergélisol sous une paise en utilisant la configuration de Wenner.

Le présent travail reconstitue sommairement l'évolution holocène d'un milieu lacustre et tourbeux pour expliquer l'origine d'un complexe de plateaux palsiques et de paises et en décrit la morphologie. Il présente surtout les résultats d'une approche géophysique globale qui demande plus de précision dans l'utilisation des méthodes électriques habituelles et qui fait appel aux nouvelles méthodes comme l'électromagnétisme

et la polarisation provoquée (GAHE et SEGUIN, 1985). Des mesures dans des trous de forage et le long de sondes thermo-électriques verticales viennent également préciser les relations entre, d'une part, les propriétés physiques de la tourbe et des sédiments à différentes étapes d'engel et, d'autre part, leurs propriétés électriques.

Les plateaux palsiques étudiés sont localisés près du village de Kangiqsualujuaq, le long de l'estuaire du fleuve George, à quelque 15 km du littoral de la baie d'Ungava (fig. 1).

CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET CHRONO-STRATIGRAPHIQUE

Le site étudié se situe à la limite des arbres; en effet, bien que densément boisés d'épinettes noires et de mélèzes, les fonds de vallée immédiatement au sud de Kangiqsualujuaq contiennent les derniers peuplements forestiers d'importance avant le littoral de la baie d'Ungava. La limite régionale des arbres apparaît en effet maintenue à quelques kilomètres de la côte grâce à l'influence climatique de la baie. À partir du site étudié, la limite des arbres suit parallèlement, de vallée en vallée, le tracé de la côte jusqu'à la baie de Keglo, à 40 km au nord-est (PAYETTE, 1983). La correspondance générale remarquée par ALLARD *et al.* (sous presse) entre la distribution des paises et la limite des forêts s'applique donc à la région. En effet, la tourbe disparaît rapidement au nord du village et on ne trouve plus le long du littoral que des buttes minérales de pergélisol.

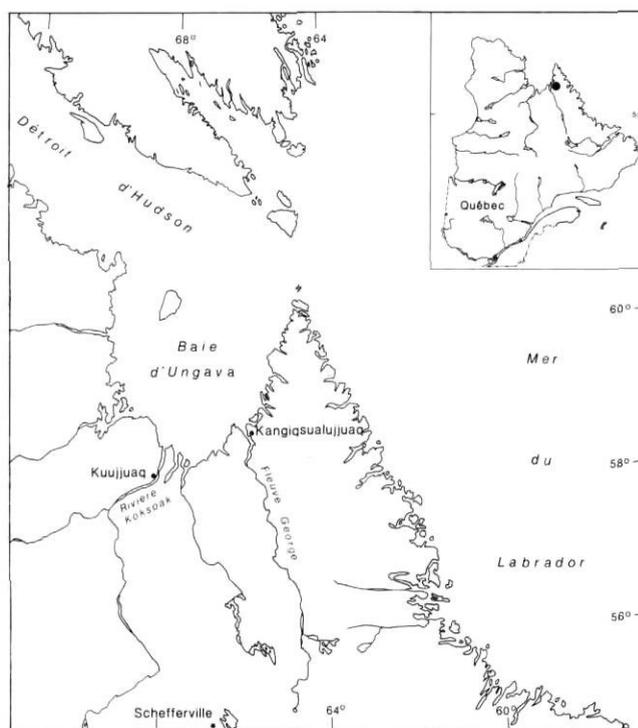


FIGURE 1. Localisation du site de Kangiqsualujuaq, Québec nordique.

Site location of Kangiqsualujuaq, northern Québec.

La température moyenne annuelle peut être estimée entre $-5,4^{\circ}\text{C}$ et -6°C , alors que les températures de janvier et de juillet seraient respectivement de l'ordre de -23°C et de 10°C (GAGNON et FERLAND, 1967; WILSON, 1971). Notre propre station météorologique, installée récemment, a enregistré une température moyenne de $9,4^{\circ}\text{C}$ en août 1985 et de $-19,6^{\circ}\text{C}$ en janvier 1986. La température depuis la surface du sol jusqu'à 2 m de profondeur a été mesurée sporadiquement à l'aide d'une sonde à thermistances installée en permanence dans la partie la plus élevée du complexe palsique (fig. 2). Le mollisol atteint 80 cm d'épaisseur et les températures à 2 m de profondeur varient entre $-0,38^{\circ}\text{C}$ à la fin de la saison de dégel et $-4,76^{\circ}\text{C}$ à la mi-février. La température moyenne annuelle du pergélisol à la même profondeur est d'environ $-2,1^{\circ}\text{C}$ (fig. 3).

Les deux plateaux palsiques étudiés se situent au fond d'une vallée encaissée entre deux crêtes rocheuses et orientée NNO-SSE. Ils bordent un lac peu profond (fig. 2). Le fond de la vallée, à 36 m d'altitude, est comblé de limons de la mer D'Iberville recouvert d'un pavage de blocs et de galets entremêlés de sable mal trié. Ce dernier faciès est typique, à l'échelle de la région, des estrans à blocs glaciels; il s'agit d'un faciès intertidal caractérisant la phase d'émersion du site. Ce faciès est visible sur le lit peu profond du lac du côté est, de même qu'en coupe stratigraphique sous les sédiments organiques (fig. 4). Par ailleurs, les blocs glaciels affleurent ici et là sur les plateaux palsiques aux endroits où la tourbe est plus mince; le dallage de pierres entre la tourbe et les limons marins a d'ailleurs occasionné beaucoup de problèmes de forages avec des tarières motorisées et des carottiers munis de couteaux en carbure; à toutes fins pratiques il faut un carottier muni d'une bague à diamant pour le traverser.

Deux types de sédiments organiques se trouvent dans la partie superficielle du pergélisol. On note en premier lieu des sédiments lacustres, d'étendue limitée et déposés par-dessus le dallage de blocs glaciels; ils ont été observés et échantillonnés dans une coupe en bordure du lac actuel. Par endroits la tourbe repose sur les sédiments lacustres ou sur le dallage glacial. Son épaisseur varie de quelques centimètres à 1,15 m; en de rares endroits, sur les bombements, elle est absente, probablement érodée.

Deux coupes décrites avec suffisamment de détails (A et B, fig. 4) permettent de situer chronologiquement le développement de la tourbière et d'avancer quelques remarques sur le développement des plateaux palsiques. La coupe A a été faite à la pelle à partir d'une falaise de 3,4 m de hauteur dans le pergélisol en bordure du lac, alors que la coupe B a été creusée dans un versant. La coupe C (fig. 4) n'est qu'un simple trou creusé à la pelle, situé à l'autre extrémité du plateau palsique et qui a permis la collecte d'un échantillon pour datation ^{14}C .

La coupe A commence au niveau du lac par le dallage de blocs glaciels qui s'y trouve enfoui sous 3,13 m de sédiments organiques. Une couche de débris végétaux s'insinue entre eux; l'analyse sommaire des restes végétaux (54 pièces dénombrées; Alain Larouche, communication écrite) révèle un mélange de débris d'arbustes, incluant du saule, des plantes

aquatiques et de petits fragments ligneux pouvant être interprété comme une laisse de débris organiques dans un bassin lacustre peu profond. Deux datations ^{14}C ont été faites sur des échantillons différents, les âges obtenus sont 5140 ± 70 (UL - 96a) et 5410 ± 110 (UL - 269). De 3,13 m à 1,13 m, se situe une unité stratigraphique composée de limons et de sables très fins entremêlés de débris organiques et dont la composition en micro-fossiles ne laisse aucun doute quant à l'origine lacustre. On y trouve en effet des restes de micro-faune aquatique comme *Daphnia* sp. et *Cristatella mucedo* de même que des graines de plantes aquatiques comme *Potamogeton* sp. De 1,13 m à 93 cm, le faciès devient plus pauvre en limon et passe du gris au noir, probablement à cause d'une plus grande abondance de fins débris de bois et de matière organique colloïdale. Ce lit assure la transition avec la tourbe sus-jacente qui, compte tenu du taux estimé d'accumulation des sédiments lacustres ($0,28$ cm/an), a dû commencer à s'accumuler vers 4300 BP. De 93 cm à 20 cm, la coupe montre une tourbe fibreuse. Des racines vivantes, des tiges de plantes et des mousses composent le tapis superficiel d'environ 20 cm d'épaisseur. Un échantillon a été prélevé immédiatement sous ce couvert végétal superficiel et nettoyé des racines vivantes avant d'être daté et analysé. La composition de l'échantillon (126 pièces comptées), regroupant *Vaccinium oxycoccos*, *Ledum groenlandicum* (ou *decumbens?*), *Kalmia polifolia*, des lichens et *Cenococcum geophilum*, indique un assèchement du milieu qui, tout probablement, est dû au soulèvement de la surface au-dessus du niveau de la nappe phréatique à l'occasion de l'aggradation du pergélisol. Ceci a dû se produire vers 1640 ± 70 BP (UL - 97a).

La séquence stratigraphique de la coupe B commence, à la base, par les limons marins interstratifiés de glace de ségrégation et surmontée du dallage glacial, qui est d'ailleurs omniprésent sous les sédiments organiques. L'âge ^{14}C de la matière organique associée, ici aussi, aux blocs, est de 4640 ± 70 BP (UL - 95). Un échantillon de tourbe, à 45 cm de profondeur a donné un âge ^{14}C de 2800 ± 60 BP (UL - 118), tandis qu'un échantillon de tourbe prélevé juste sous le couvert des plantes et des racines actuelles et nettoyé des radicules profondes (ALLARD *et al.*, sous presse) a donné un âge de 850 ± 60 BP (UL - 94a), lequel devrait représenter approximativement l'âge du soulèvement géival dans cette partie du plateau palsique.

À la coupe C, la tourbe fait 50 cm d'épaisseur par-dessus le dallage de blocs et seul l'échantillon de tourbe sommitale a été daté dans le but d'estimer au moins grossièrement l'âge du soulèvement géival dans cette partie du plateau. La date obtenue est de 1780 ± 70 BP (UL - 271).

GÉOMORPHOLOGIE DU COMPLEXE DE PLATEAUX PALSQUES

Qu'il s'agisse de bombements locaux ou de dépressions tourbeuses, les accidents du relief qui affectent les plateaux palsiques sont susceptibles de correspondre en profondeur à des variations de la répartition spatiale ou de l'épaisseur du pergélisol. Les mesures géophysiques ont servi particu-

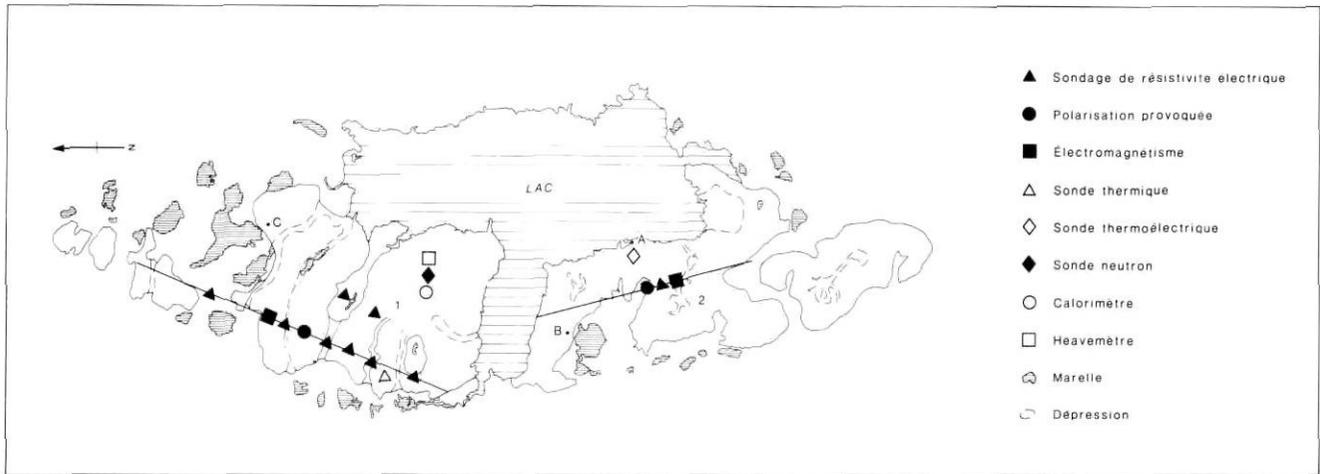


FIGURE 2. Plan du complexe palsique, y compris le lac et les mares de thermokarst. Les symboles indiquent la localisation des transects, des sondages et des différents types de sondes.

Plan of the palsic complex with the lake and the thermokarst ponds. Symbols show the sites of transects, soundings and various types of probes.

THERMOSONDE (1985-86)

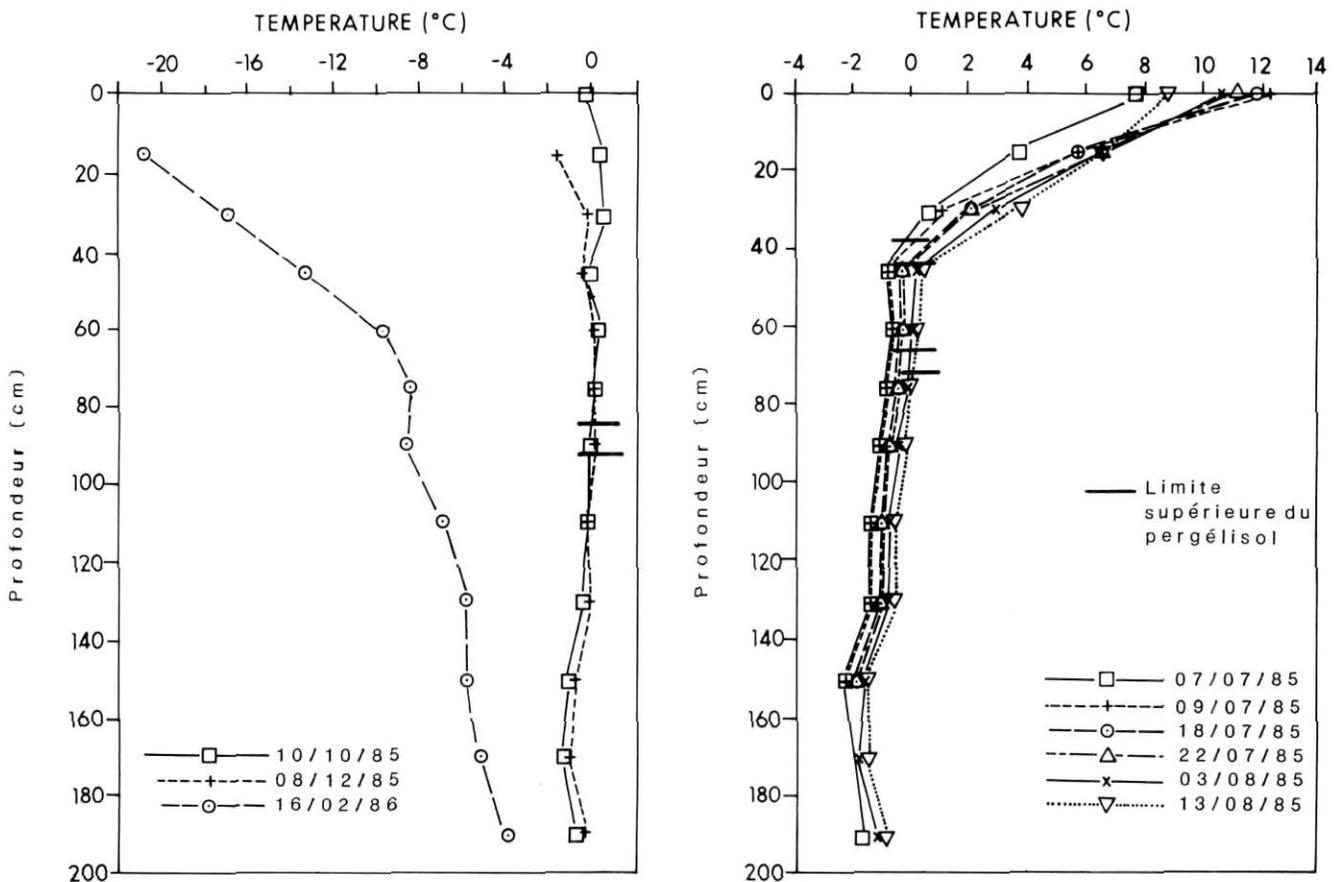


FIGURE 3. Courbes de températures, jusqu'à 2 m de profondeur. La figure 2 donne la localisation de la sonde thermique.

Temperature curves (2 m deep); see Figure 2 for thermal probe location.

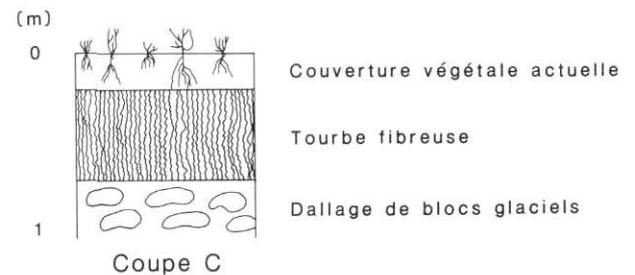
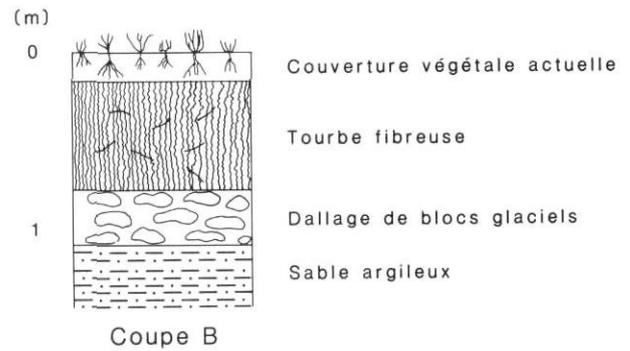
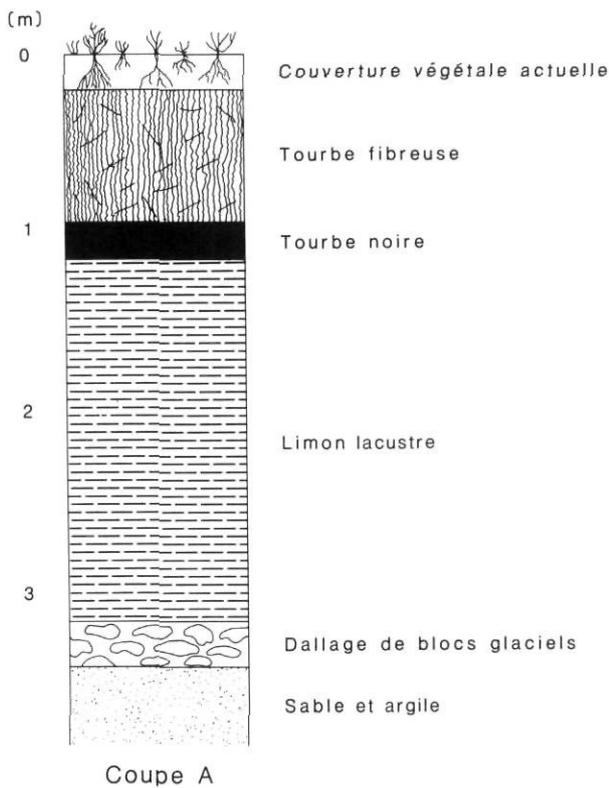


FIGURE 4. Coupes stratigraphiques A, B et C.
Stratigraphic sections A, B and C.

lièrement à vérifier cette relation entre la morphologie et la géométrie de la masse de pergélisol.

Les deux plateaux palsiques principaux sont séparés par un appendice du lac. Le plateau sud fait 350 m de longueur et 3,5 m à 4 m de hauteur. Le plateau nord est de forme à peu près rectangulaire, mesurant 170 m × 110 m environ. Un troisième plateau beaucoup plus petit et une palse isolée le prolongent vers le nord. Au nord du lac, une série de bourrelets arbustifs entourant sept mares de thermokarst montrent que le plateau a probablement régressé de ce côté (fig. 2). Sur le flanc ouest des plateaux palsiques, une série de mares s'échelonnent entre le pied de la paroi rocheuse et le terrain pergélisolé.

La surface du plus grand plateau palsique est relativement plane à l'exception d'un alignement de bombements le long de sa bordure ouest. Ces bombements sont séparés les uns des autres par des ensembles, ou seuils, tous d'orientation transversale au grand axe du plateau palsique. Trois dépressions ovales, au plus long axe lui aussi transversal à celui des plateaux, sont occupées par des tourbières à sphaignes sans pergélisol. En effet, les sondages avec une tige métallique de même que les mesures de résistivité électrique n'y ont décelé aucun gel en été. Ces dépressions tourbeuses localisent donc des taliks ouverts à travers la masse de pergélisol.

Les ensembles entre les bombements et les dépressions tourbeuses s'enlignent entre eux. Les mares de thermokarst et les paises isolées du plateau partagent la même orientation. Ce patron géomorphologique laisse voir que les plateaux

palsiques tendent à être morcelés par un processus qui les subdivise en lanières transversales. Des excavations à la pelle dans tous les ensembles et ailleurs sur les plateaux confirment l'absence de coins de glace ou de fissures dans le pergélisol et le long desquels ce morcellement pourrait prendre place (ALLARD *et al.*, sous presse; LAGAREC, 1976, 1980, 1982).

LES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Les variations d'épaisseur du pergélisol ont été mesurées le long de transects par résistivité électrique, polarisation provoquée, toutes deux en configuration dipôle-dipôle, et par la méthode électromagnétique avec séparations multiples et multi-fréquentielle. La représentation graphique des résultats obtenus par ces trois méthodes permet une vue en coupe au droit des transects. La topographie le long des transects ayant été mesurée avec un niveau électronique GDD, les profils laissent voir la répartition des propriétés électriques et électromagnétiques du sol sous le relief des plateaux palsiques (fig. 5). L'emploi simultané de trois méthodes géophysiques sur les mêmes profils et le long desquels les stations de mesure échelonnées aux 10 m sont nombreuses, raffine les interprétations relatives au pergélisol et permet une meilleure résolution pour la mesure de son épaisseur. Des sondages de résistivité électrique et de polarisation provoquée selon la configuration de Schlumberger (SEGUIN, 1976; SEGUIN et ALLARD, 1984) ont aussi été faits pour mesurer en certains points l'épaisseur du pergélisol; certains d'entre eux sont localisés sur les transects de façon à permettre une

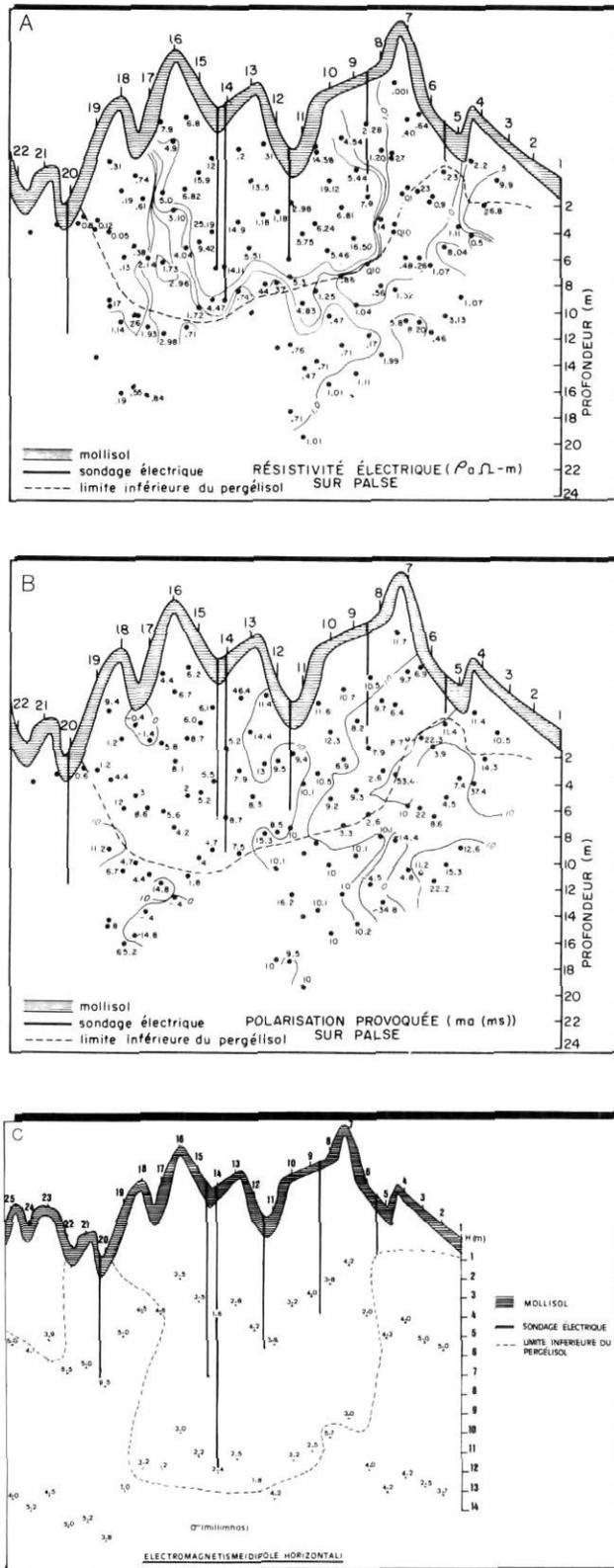


FIGURE 5. Profils topographiques et géophysiques le long du transect sur le plateau palsique nord. La figure 2 donne la localisation du transect.

Geophysical and topographic profiles along a transect on the northern peat plateau; see Figure 2 for transect location.

vérification des valeurs obtenues par la configuration dipôle-dipôle. D'autres sont dispersés sur les plateaux afin de détecter d'éventuels taliks. Les caractéristiques des appareils utilisés sont présentées au tableau I.

En plus de ces méthodes de surface, deux instruments différents ont été installés dans les trous de forage: 1) un tuyau d'accès en aluminium de 1,85 m pour une sonde à neutron (Hydroprobe, modèle 503 DR) afin de mesurer les variations de la teneur en eau le long d'un profil vertical et 2) une sonde thermo-électrique fixe qui jumelle à tous les 20 cm une thermistance (Fenwald UUB 31J1) et une électrode, jusqu'à 2 m de profondeur. Ainsi il est possible de suivre les changements de propriétés électriques du sol en fonction de son état (gelé ou non gelé), de sa température et de sa teneur en eau selon les phases du gel et du dégel et suivant les changements saisonniers de température dans le pergélisol. Les forages nécessaires à l'installation de ces sondes ont été réalisés avec un carottier à diamant de 5 cm de diamètre, ce qui a permis l'observation de la glace du sol dans les couches supérieures du pergélisol.

Enfin, le pergélisol du plateau palsique nord a été percé de part en part par un forage vertical au jet d'eau (VEILLETTE et NIXON, 1980, p. 19). Cette méthode ne permet pas la récupération d'échantillons; cependant une compilation minutieuse des résistances offertes à la pénétration du train de tuyaux par les couches de glace permet une évaluation grossière de l'épaisseur du pergélisol et la nature des sédiments évacués avec l'eau du trou de forage donne une idée sommaire de la stratigraphie.

TRAITEMENT ET SIGNIFICATION DES DONNÉES

Les données recueillies le long des transects dipôles-dipôles peuvent être considérées comme des valeurs ponctuelles de résistivité, de conductivité et de chargeabilité à diverses profondeurs le long du profil selon l'espacement entre les électrodes disposées en surface. L'interprétation et le tracé d'isolignes entre les points dégagent une image de la distribution de ces paramètres dans le substrat. Dans les profils de résistivité, le tiret représentant la base du pergélisol sépare simplement l'ensemble des valeurs élevées de l'ensemble des valeurs basses, les sols gelés étant sensiblement plus résistants. Le même principe d'interprétation de la limite inférieure du pergélisol s'applique aux profils d'électromagnétisme, la conductivité étant simplement à l'inverse de la résistivité. Quant aux profils de polarisation provoquée, la limite inférieure du pergélisol passe là où il y a une baisse importante de chargeabilité (dans le domaine des temps, la chargeabilité M est le rapport du voltage secondaire sur le voltage primaire, c'est une unité sans dimension exprimée en millisecondes) et l'interprétation est aidée par la comparaison avec les données de résistivités électriques; on note le passage à des valeurs négatives sous le pergélisol. Les sondages selon la configuration Schlumberger sont quant à eux présentés de façon conventionnelle sur graphique log-log, avec la résistivité ou la chargeabilité en ordonnée et la distance ($AB/2$ en abscisse).

TABLEAU I

Les types d'instrumentation géophysique

Résistivité électrique	Polarisation provoquée	Électromagnétisme
<p>Résistivitémètre: ABEM digital SAS 300 Fréquence: 4Hz Caractéristique: l'émetteur injecte un courant sélectionné d'avance par l'opérateur (0,2 à 20 m A) et le receveur couplé d'un micro-processeur mesure le voltage (± 1 à ± 500 V), le micro-processeur contrôle les mesures et calcule automatiquement les résistances du sol ($R = \Delta v / I$) qui sont transformées digitalement en kilohm, ohm ou milliohm. On lit directement la résistance électrique.</p>	<p>L'équipement de polarisation provoquée comprend un émetteur type Lobo M-3 et d'un receveur type Mk III. Caractéristiques de l'émetteur: — tension de sortie maximale: 1800 volts — courant maximal = 1,5 A — étendue de résistance = 100 à 6200 ohms — période d'un cycle: 2, 4, 8 ou 16 secondes. Receveur: Onze échelles de mesure du voltage primaire (V_p) au récepteur permettent d'obtenir une résolution de 0,1 % entre 10^{-6} et 10 volts. Cet appareil permet de mesurer le potentiel (V_p) et les chargeabilités.</p>	<p>EM34-3 de Geonics de type Slingram avec émetteur et receveur mobiles. Appareil multifréquentiel (0,4 KHz, 1,6 KHz et 6,4 KHz) à multiséparation (40 m, 20 m et 10 m) opérant dans les configurations géométriques coplanaires verticale et horizontale. La conductivité apparente est lue directement et est exprimée en millimhos par mètre. Les échelles de sélection de conductivités sont: 0-3, 10, 30, 100, 300 millimhos par mètre.</p>

Les données de chargeabilité, de polarisation spontanée et de températures mesurées le long de la sonde thermo-électrique sont simplement présentées en fonction de la profondeur.

RÉSULTATS

LA RÉPARTITION ET L'ÉPAISSEUR DU PERGÉLISOL

a) Méthodes employées en surface

Huit sondages de résistivité électrique (configuration de Schlumberger) ont été réalisés sur les deux plateaux palsiques nord et sud. Ces sondages se répartissent comme suit: cinq dans les dépressions, deux sur une butte et un sur la bordure en sphaigne d'une mare sur le plateau palsique nord, tandis qu'un seul sondage électrique a été effectué sur le plateau palsique sud. Les résultats de résistivité électrique sur le plateau palsique nord donnent une épaisseur du pergélisol de l'ordre de 15 m au droit des buttes. Cette valeur se compare plutôt bien avec les données de forage hydraulique, alors que le train de tuyaux n'a plus rencontré la résistance de couches assimilables à de la glace dans l'argile à partir de 18-19 m de profondeur. Cependant, dans les ensembles séparant les buttes (fig. 5), l'épaisseur du pergélisol varie de 3 à 12 m. On dénote également la présence de taliks entre les stations 5 et 6, ainsi qu'entre les stations 19 et 22 (dépression entre le plateau nord (1) et le petit plateau tels que décrits ci-haut) et l'absence du pergélisol dans la dépression à sphaignes. La présence de talik entre les stations 5 et 6 peut s'expliquer par la position du sondage en bordure d'une mare, où l'influence calorifique de la masse d'eau a provoqué la fonte complète à cet endroit. Par contre, un sondage de résistivité électrique effectué à seulement 1,20 m de distance du rebord de la dépression indique la présence d'un pergélisol de 3,5 m d'épaisseur. L'absence du pergélisol dans l'ensemble entre les stations 19 et 22, identifiée par la résistivité (fig. 5 et 6) et vérifiée par un trou creusé à la pelle (2 m),

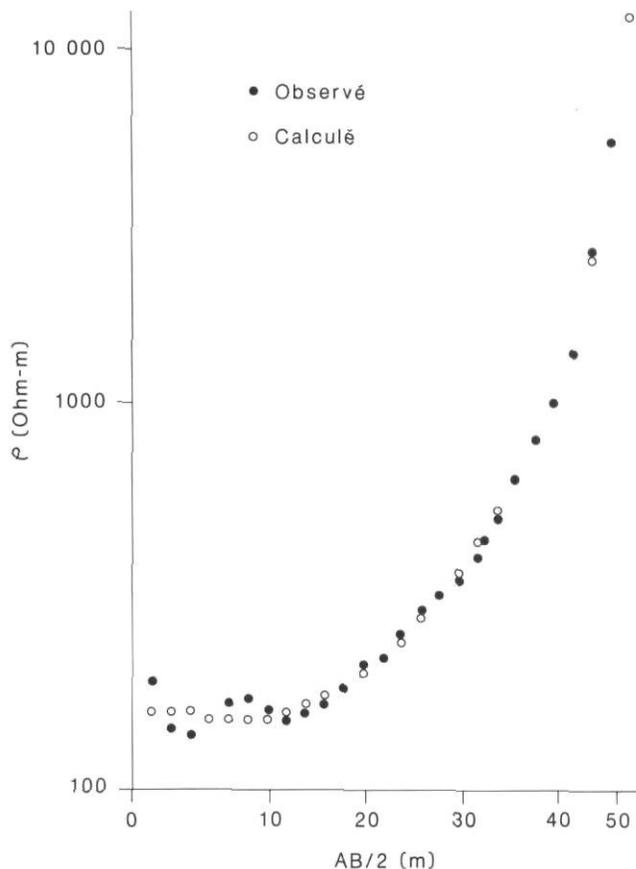


FIGURE 6. Sondage de résistivité électrique dans une dépression. Les basses résistivités enregistrées aux faibles profondeurs indiquent l'absence de pergélisol.

Electrical resistivity sounding in a hollow. Low resistivity at shallow depths are related to the absence of permafrost.

peut s'expliquer par la dégradation du plateau palsique à cet endroit permettant des suintements entre les deux mares situées à chacune des extrémités de la dépression.

La deuxième méthode électrique utilisée sur le plateau est la polarisation provoquée dont les paramètres mesurés sont la chargeabilité et la résistivité électrique. Les résultats du profilage de résistivité électrique montrent une variation de l'épaisseur en fonction de la topographie, c'est-à-dire que le pergélisol est plus épais sous les buttes et moins épais ou pratiquement absent sous les dépressions (fig. 5a). Le tireté indique la limite basale du pergélisol et constitue la ligne de passage de la zone résistante à la zone non résistante avec des contrastes de résistivités de 1,5 à 16 par endroits. Le profil de chargeabilité se superpose bien à celui de la résistivité et la limite basale du pergélisol se caractérise par une diminution de chargeabilité qui atteint souvent des valeurs négatives (fig. 5b). La combinaison des deux paramètres donne une épaisseur moyenne de pergélisol de l'ordre de 15 m. Les valeurs de conductivité obtenues par méthodes électromagnétiques montrent un passage des faibles aux fortes valeurs de conductivité. Ce passage représenté en tiretés constitue la limite inférieure du pergélisol riche en glace (fig. 5c). Ce profil est relativement superposable à ceux de la résistivité électrique et de la chargeabilité. Il montre clairement la présence du talik entre les stations 19 et 22, où on observe des contrastes de conductivité de 1,1 à 2. La combinaison des trois méthodes montre qu'il existe une relation très étroite entre la topographie et l'épaisseur du pergélisol. Cette relation peut s'expliquer par l'absence de pergélisol dans certaines dépressions et la présence du pergélisol dans d'autres avec une épaisseur variable suivant la profondeur de la dépression.

Sur le plateau sud, un sondage de résistivité électrique combiné avec la polarisation provoquée (fig. 7) a été réalisé près de la coupe A. On note une augmentation de la résistivité apparente dans la première partie de la courbe, partie qui correspond de haut en bas à la stratigraphie suivante : tourbe dégelée/tourbe et sédiments organiques gelés/dallage de blocs glaciels. Le dallage de blocs correspond à la partie descendante de la courbe et constitue la zone de passage entre les sédiments lacustres et les sédiments marins (limon argileux) dont les 11 premiers mètres sont gelés et le reste dégelé. Quant aux courbes de chargeabilité, il a été impossible de lire les valeurs de chargeabilité dans les 4 premiers mètres, l'influence de la tourbe gelée très résistante ne permettant pas d'obtenir des valeurs fiables. Par contre, il faut noter la présence de chargeabilité négative entre 8 et 12 m. Elle indique le passage du pergélisol à une zone non gelée. L'épaisseur du pergélisol est environ de 12 à 15 m.

La figure 8 montre les pseudo-sections de résistivité électrique et de chargeabilité obtenues par la méthode de polarisation provoquée sur le plateau sud. La résistivité électrique montre la présence d'un talik entre les stations 11 et 12. La présence de ce talik s'explique par le fait que les stations se situent dans la partie effondrée du plateau par suite de la dégradation du pergélisol. Les pseudo-sections de chargeabilité, outre le talik, détectées par la résistivité électrique, indiquent la présence d'un talik en profondeur entre les

stations 7 et 8, identifié grâce au contraste de chargeabilité dans la zone. La zone entre les stations 7 et 8 est une dépression qui s'élargit vers le nord-ouest, où la chaleur latente de la masse d'eau souterraine circulant entre le lac et la mare de thermokarst a dû faire fondre le pergélisol. Notons également l'irrégularité de la base de la masse de glace en relation avec la topographie (déjà décrite) de la surface.

b) Méthodes employées dans les trous de forage

Les sondes thermo-électriques. Grâce aux électrodes disposées sur la sonde, nous avons tenté de mesurer par tranches de 20 cm la résistivité électrique active, la résistivité passive, le potentiel spontané et la chargeabilité. Dans le cas des résistivités actives, on excédait les capacités de lecture de l'appareil parce que la tourbe gelée est un matériau trop résistant. Nous nous attarderons donc à la résistivité passive. Les résultats obtenus montrent qu'au mois de juillet, le passage des basses aux hautes résistivités électriques se situait entre

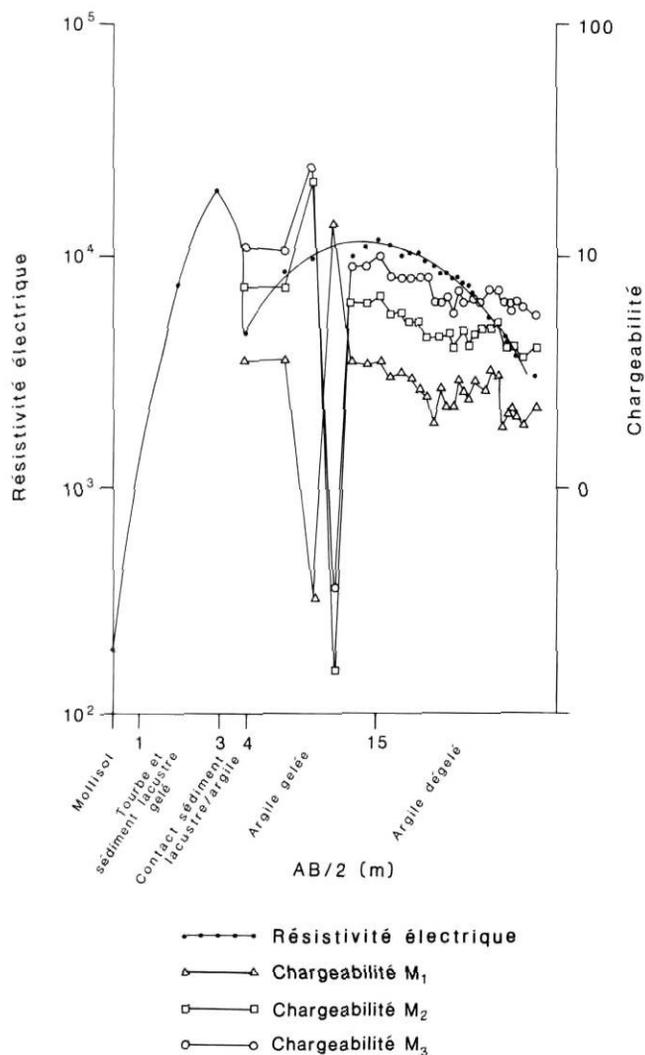


FIGURE 7. Sondages de résistivité électrique et de polarisation provoquée combinés sur le plateau sud.

Combined electrical resistivity and induced polarization soundings on the southern peat plateau.

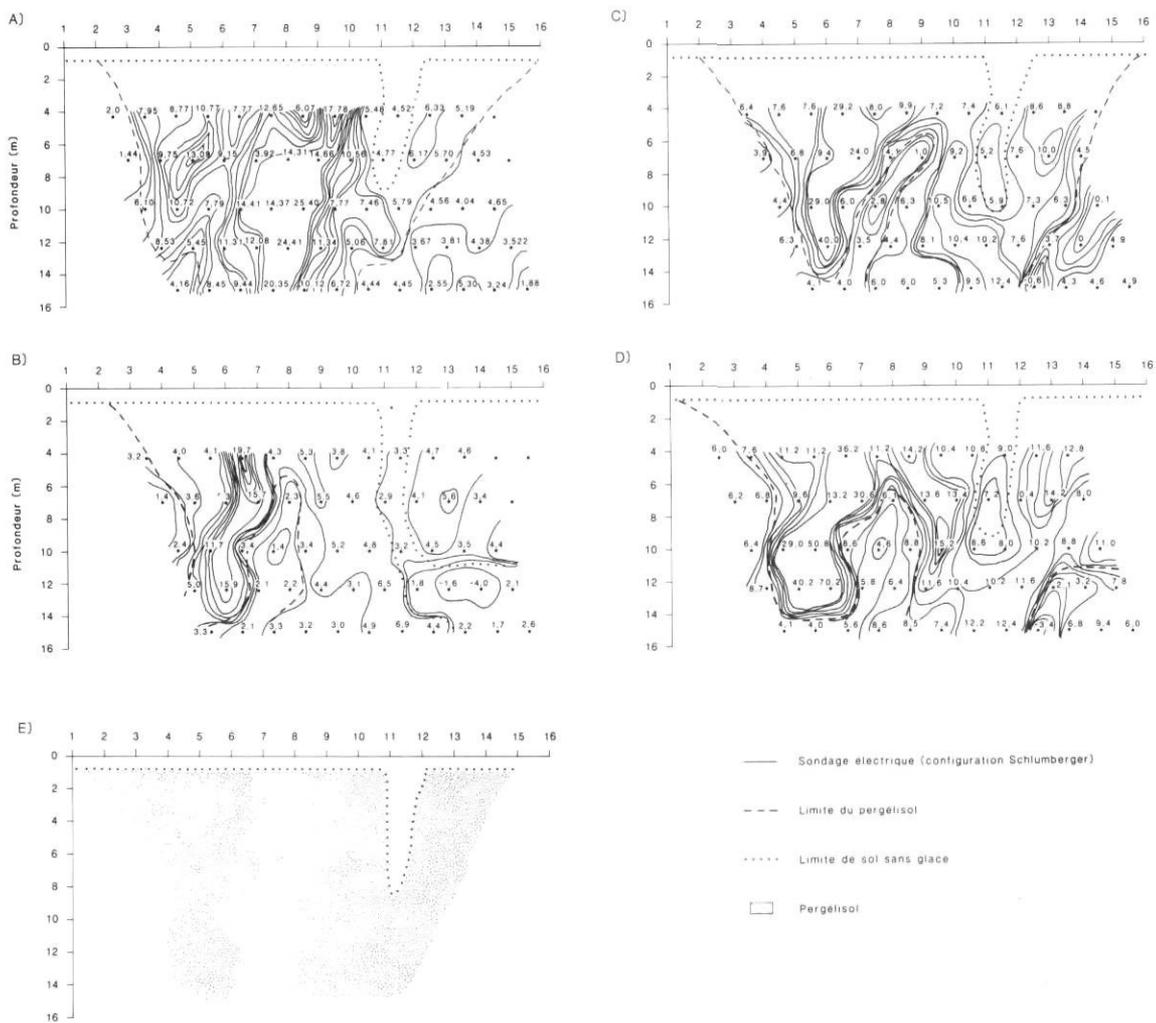


FIGURE 8. Pseudo-sections de résistivité électrique (A) et de chargeabilité (B = chargeabilité M_1 , C = M_2 , D = M_3) sur le plateau sud, ainsi que l'interprétation d'ensemble de la répartition du pergélisol (E).

Electrical resistivity pseudo-section (A), chargeability pseudo-section (B = chargeability M_1 , C = M_2 , D = M_3) on the southern peat plateau and general interpretation of permafrost distribution (E).

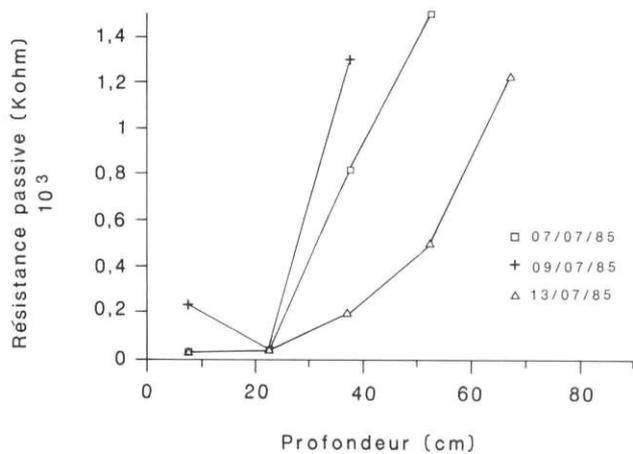
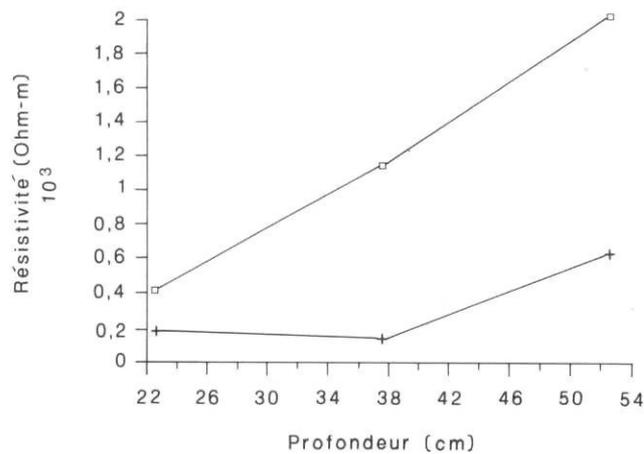


FIGURE 9. Résistivité électrique dans le trou de forage au site de la sonde thermo-électrique (fig. 2).



Electrical resistivity in a drill hole at the site of the thermoelectrical probe (Fig. 2).

22 cm (7 et 9 juillet) et 38 cm (22 juillet) (fig. 9); pendant la deuxième semaine d'août, ce passage était localisé au front de dégel ou interface mollisol/pergélisol, puisque nous savons qu'un sol dégelé est moins résistant qu'un sol gelé. Pendant les mêmes périodes, l'isotherme 0°C passait de 37 cm à 65 cm. Les valeurs de chargeabilité mesurées dans le même trou le 13 août 1985 situent l'interface mollisol/pergélisol à 65 cm; ceci se traduit par un changement de polarité positive à une polarité négative. Dans cet exemple (fig. 10), la chargeabilité négative se trouve dans la partie gelée comme nous l'avons observé précédemment sur la courbe de chargeabilité obtenue par un sondage en surface. Le changement de polarité s'observe également lorsque l'on atteint la base du pergélisol par la méthode de polarisation provoquée (fig. 5 et 8), phénomène observé aussi en Chine par HUANG *et al.* (1983), selon qui il correspond à la limite inférieure du pergélisol. Partant de nos résultats et de ceux des auteurs précités, nous avons considéré ce changement de polarité comme l'un des critères pour situer les limites supérieure et inférieure du pergélisol (fig. 7 et 8).

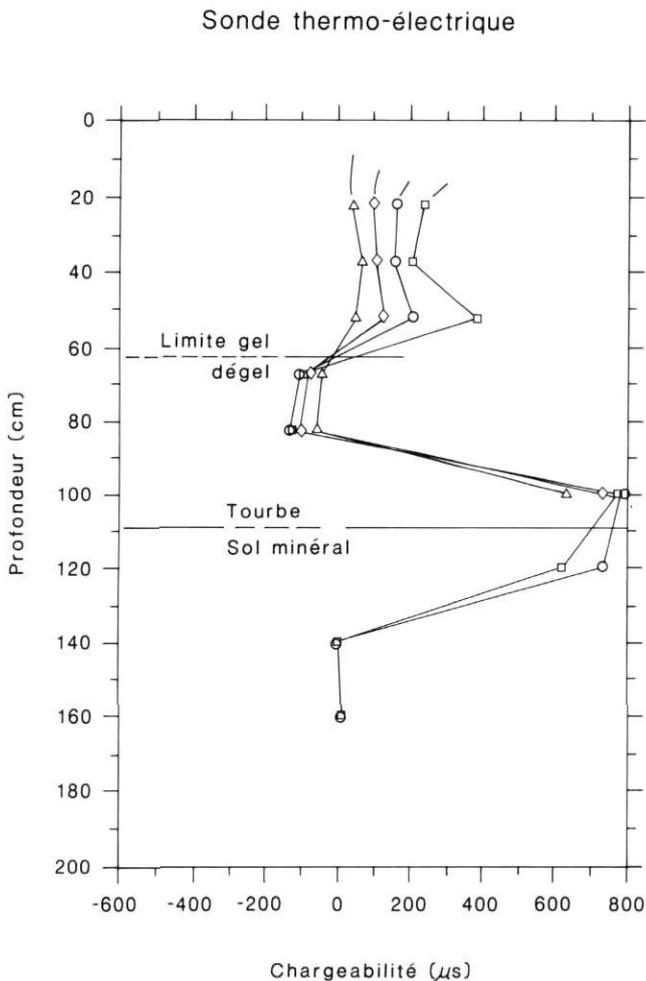


FIGURE 10. Chargeabilité dans le trou de forage au site de la sonde thermo-électrique (fig. 2).

Chargeability in a drill hole at the site of the thermoelectrical probe (Fig. 2).

La polarisation spontanée est une autre propriété physique mesurée au cours du même forage. Les seuls travaux existant sur la polarisation spontanée sont ceux de BOROVITSKI (1976), PARAMESWARAN et MAKAY (1983) et finalement PARAMESWARAN et JOHNSTON (1985). Tous ces auteurs ont observé qu'il y a production de potentiel électrique spontané lors du dégel du sol. Dans le cas où les deux électrodes de potentiel (P_1 , P_2) sont mobiles, on constate des déplacements du front de dégel du début juillet au début d'août de 37 cm à 67 cm de la surface respectivement. Ce niveau se caractérise par une polarisation spontanée positive dont l'amplitude est grande au début de juillet et s'atténue au mois d'août (fig. 11a). Au mois d'octobre, le front de dégel s'est déplacé à 70 cm de la surface et la différence de potentiel est presque égale à zéro. Par contre, au mois de décembre 1985 et de février 1986, on note une inversion de polarité. La pointe négative du potentiel descend au fur et à mesure que le front d'engel descend. D'après HANLEY et RAO (1982), la chute du potentiel électrique résulte d'une diffusion lente des cations (K , Ca^{2+} , Fe^{3+}) du front de gel vers la région gelée. Compte tenu des résultats obtenus, nous en déduisons que les maxima du potentiel électrique spontané correspondent au front du gel et les minima à des gradients élevés de température. Lorsqu'une électrode (P_1) reste fixe et sert de référence en surface tandis que l'autre (P_2) est mobile (fig. 11b), on observe une pointe négative de grande amplitude de potentiel dans la tourbe, et ce, jusqu'au mois d'août. Cette pointe correspond à l'isotherme 0°C qui se situe alors à 40 cm de la surface; il permet donc de situer le front de dégel. Le potentiel est presque nul lorsqu'on reste dans la tourbe gelée, mais en approchant de la base de la tourbe (100 cm), le potentiel devient positif pour atteindre sa plus grande amplitude à 115 cm, qui correspond au contact entre la tourbe et les sédiments lacustres. Nous pouvons donc affirmer que les pointes du potentiel électrique spontané sont associées à un changement d'état du milieu ou à un changement de milieu.

Les mesures prises à l'aide de la sonde à neutrons entre juillet et décembre 1985 montrent que durant la période de juillet à août, la teneur relative en eau dans le trou de forage est restée à peu près constante. En décembre, on note qu'il y a pompage de l'eau vers le haut pendant le gel (cryosuccion), ce qui a pour effet d'enrichir en eau et en glace la zone située entre 10 et 30 cm; tandis qu'entre 30 et 60 cm on observe un appauvrissement en eau. Il existe donc une relation entre le gradient de température de la surface jusqu'à 60 cm de profondeur et la teneur relative en eau (fig. 12).

c) Composition du pergélisol

1) Site B-2

Le site B-2 se situe dans la zone de la sonde à neutrons, sur le plateau palsique nord (1). La mesure calorimétrique au site B-2, le 5 juillet 1985 (SEGUIN *et al.*, en préparation) signale un contenu en eau de 15 % ou moins dans le pergélisol à une température de 0 à $-2,5^{\circ}C$. Le contenu en glace, plus variable, fluctue entre 30 et 50 %. La proportion des constituants solides du pergélisol (tourbe et particules minérales) varie de 30 à 55 %. On note la présence d'une lentille de

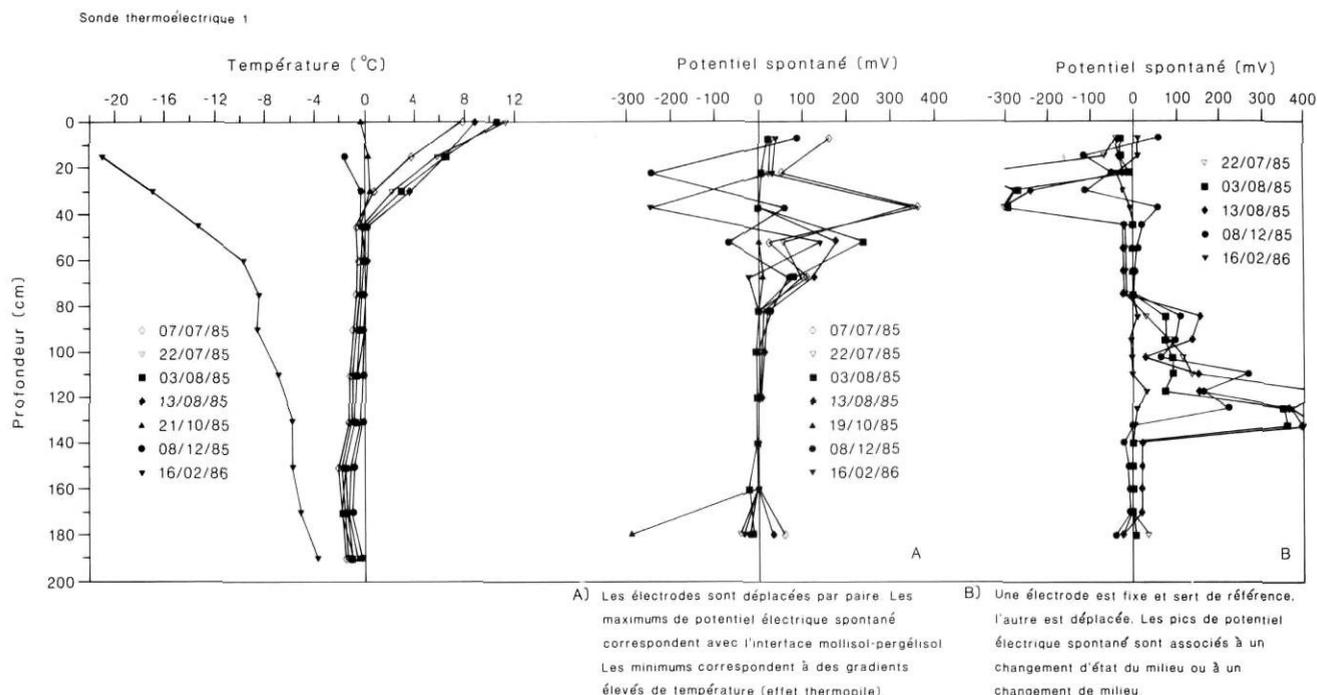


FIGURE 11. Polarisation spontanée au site de la sonde thermoélectrique ainsi que les variations correspondantes de température.

Self potential at the site of the thermoelectrical probe with corresponding temperature variations.

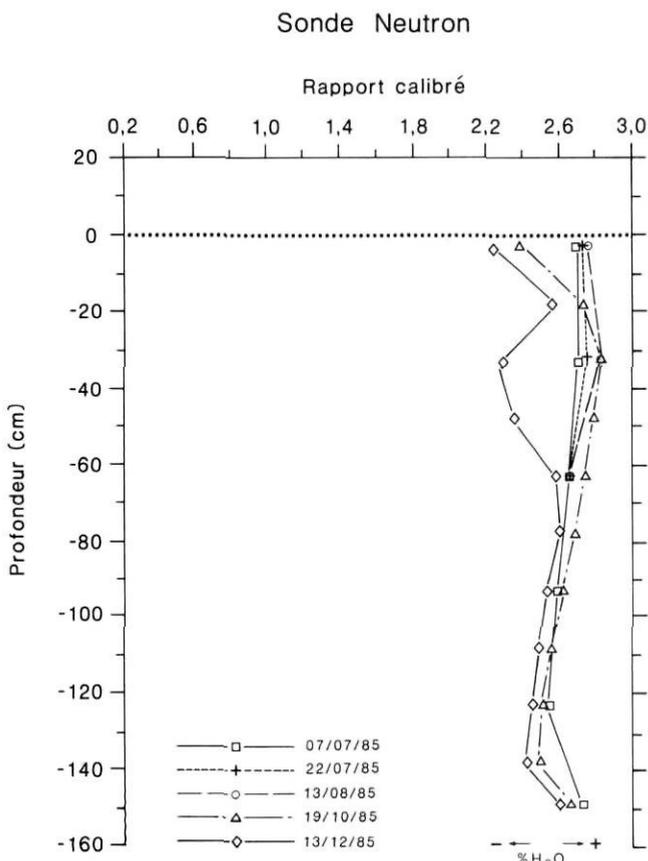


FIGURE 12. Teneur relative en eau. Relative water content.

glace à une profondeur approximative de 120 cm. La densité de la partie solide est très basse et varie entre 0,25 et 0,50 ($g\text{cm}^{-3}$), correspondant à celle de la tourbe. Les analyses texturales de la composition de la partie solide indiquent 90 % de matière organique en surface. Ce pourcentage diminue à 80 % jusqu'à 60 cm de profondeur pour demeurer constant (moyenne 70 %) jusqu'à 20 cm de profondeur, le reste étant constitué d'eau et de glace. La porosité est relativement constante et fluctue entre 10 et 25 % (fig. 13a).

2) Site B-4

Ce site, situé sur le plateau palsique sud, est caractérisé en juillet par un pourcentage en eau de 20 % qui décroît légèrement avec la profondeur dans le pergélisol (SEGUIN *et al.*, en préparation). Le pourcentage en glace est constant à 70 % au-delà de 90 cm de profondeur. En comparant le site B-4 au site B-2, on constate que le premier est plus riche en glace que le second au niveau de la couche de tourbe.

DISCUSSION ET CONCLUSION

L'émersion du site à l'étude a été suivie de la formation d'un lac vers 5400 BP. Ce lac, un peu plus grand que le lac actuel, était bordé d'une tourbière qui a progressé à son détriment vers 4600-4300 BP.

Le soulèvement géival au centre de la vallée, près du lac, a eu lieu vers 1800-1600 BP durant une période de formation de pergélisol (ALLARD *et al.*, sous presse). Ce soulèvement fut plus tardif en bordure de plateau palsique, soit vers 800 BP.

Le plateau a connu une dégradation récente, si on se fie à son morcellement en plateaux plus petits et en palses ré-

siduelles. On note également la présence des mares de thermokarst avec bourrelets résiduels.

Les relevés géophysiques confirment partiellement la configuration des plateaux et leur morcellement apparent transversalement à leur plus grand axe. En effet, les résultats des relevés signalent la présence de taliks dans les dépressions tourbeuses et de zones moins résistantes dans le pergélisol sous certains seuils ou sillons topographiques transversaux à l'axe des plateaux. Ces résultats démontrent qu'il y a fusion

le long de ces creux linéaires. Le réchauffement du pergélisol et sa fusion peuvent être dus premièrement à l'effet isolant des congères en traînées sur le plateau et dont l'épaisseur augmente au fur et à mesure que se crée la dépression, et deuxièmement à l'effet thermique et au suintement entre les mares en périphérie, dans l'axe des sillons et les mares de thermokarst sur le plateau. On devra installer des câbles à thermistors afin de suivre la dégradation thermique probable du pergélisol pendant une longue période et de vérifier ces nouvelles hypothèses.

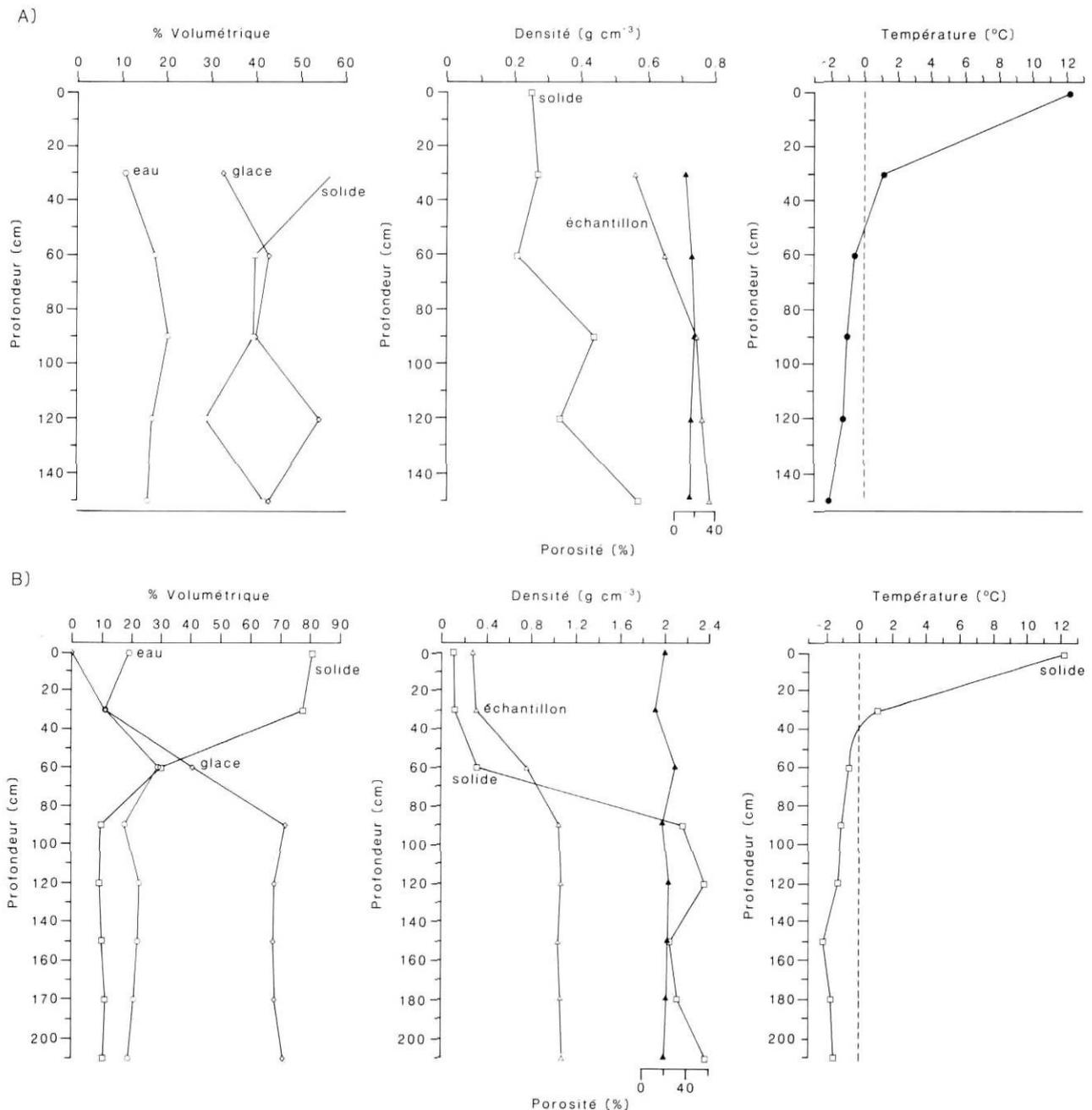


FIGURE 13. Composition du pergélisol (solides minéraux et organiques, glace, eau) le 4 juillet 1985 au site du trou d'accès hole for the neutron probe on July 4, 1985 (A) et le 5 juillet 1985 au site de la sonde thermo-électrique (B).

Permafrost components (organic and mineral solids, ice and water) at the site of access hole for the neutron probe on July 4, 1985 (A), and at the site of the thermoelectrical probe on July 5, 1985 (B).

Quoi qu'il en soit, les inégalités des propriétés électriques et électromagnétiques en concordance avec le morcellement du relief indiquent une dégradation contrôlée géométriquement, comme l'ont déjà noté plusieurs chercheurs (LAGAREC, 1980, 1982; ALLARD *et al.*, sous presse; COUILLARD et PAYETTE, 1985). Mais on n'observe pas sur ce plateau de structures telles que les coins de glace le long desquelles une fonte accélérée serait facilitée.

Les résultats de la polarisation provoquée et de l'électromagnétisme, combinés au résultat de la résistivité électrique, permettent de suivre les inégalités des distributions verticale et horizontale du pergélisol. Les changements de polarité des chargeabilités au toit et à la base du pergélisol sont très importants pour la délimitation verticale du pergélisol. Selon les résultats obtenus, il serait très pertinent de mieux cerner les relations entre la température du pergélisol, sa composition et les propriétés électriques pour le bénéfice des recherches futures.

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 Quebec), *Canadian Journal of Earth Sciences*.
- ALLARD, M., SEGUIN, M. K. et LEVESQUE, R. (sous presse): Genesis classification and terminology, *Proceedings of the First International Conference in Geomorphology*, Manchester, September 15-21, 1985.
- BLAIS, R., ALLARD, M. et SEGUIN, M. K. (1985): L'épaisseur du pergélisol sous les palses de la région de la rivière Sheldrake, Québec nordique, *Annales de l'ACFAS*, vol. 52-53, n° 1.
- BROWN, R. J. G. and KUSPCH, W. (1974): *Permafrost terminology*, NRC, Canada, Tech. Mem. n° 111, 62 p.
- BOROVITSKI, 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*, vol. 5, p. 65-70.
- COUILLARD, L. et PAYETTE, S. (1985): Évolution holocène d'une tourbière à pergélisol, Québec nordique, *Canadian Journal of Botany*, vol. 63, p. 1104-1121.
- DESBIENS, J., SEGUIN, M. K. et ALLARD, M. (1985): Statistiques descriptives sur les épaisseurs du pergélisol discontinu au Québec, *Annales de l'ACFAS*, vol. 52-53, n° 1.
- GAGNON, R. J. et FERLAND, M. (1967): *Climat du Québec septentrional*, Québec, Serv. Météo., ministère des Richesses naturelles, M.P. -10, 111 + 110 p., 36 p.
- GAHÉ, É. et SEGUIN, M. K. (1985): Géophysique du pergélisol à Kangiqsualujuaq, Québec nordique, *Annales de l'ACFAS*, vol. 52-53.
- 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, p. 119-132.
- HAMELIN, L.-E. et CAILLEUX, A. (1969): Les palses dans le bassin de la Grande-Rivière de la Baleine, *Revue de Géographie de Montréal*, vol. 23, n° 3, p. 329-337.
- HANLEY, T. O. D. et RAMACHANDRA RAO, S. (1982): Electrical freezing potentials and the migration of moisture and ions in freezing soils, *Proceedings of the Fourth Canadian Permafrost Conference*, National Research Council of Canada, p. 453-458.
- HEIM, J. (1976): Étude palynologique d'une palse de la région du Golfe de Richmond (Nouveau-Québec, Canada), *Cahiers de Géographie de Québec*, vol. 20, p. 221-238.
- HUANG, YIZHI, GU ZHONGUREI, ZENG ZONGGONG, HE YIXIAN, et LIU JIUREN (1983): A Geophysical method for permafrost survey in China, *Proceedings of the Fourth International Conference on Permafrost*, National Academy Press, p. 520-524.
- LAGAREC, D. (1976): Étude géomorphologique de palses dans la région de Chimo, Canada, *Cahiers géologiques*, 92, p. 153-162.
- (1980): *Étude géomorphologique de palses et autres buttes cryogènes en Hudsonie (Nouveau-Québec)*, Université Laval, Département de géographie, thèse de doctorat, 308 p.
- (1982): Cryogenetic mounds as indicators of permafrost conditions, Northern Quebec, *Proceedings Fourth Canadian Permafrost Conference*, Calgary, NRC, Ottawa, p. 43-48.
- MATHIEU, C. (1984): *Morphogenèse des dunes et des palses de la basse vallée du Koroc (Nouveau-Québec)*, mémoire de maîtrise en Sciences, Département de géographie, Université de Montréal, 209 p.
- NELSON, F. E., OUTCALT, S. I., GOODWIN, C. W. et HINKEL, K. M. (1985): Diurnal thermal regime in Peat-covered palsa, Toolik Lake, Alaska, *Arctic*, vol. 38, n° 4, p. 310-315.
- OUTCALT, S. I., NELSON, F. E., HINKEL, K. M. et MARTIN, G. D. (1986): Hydrostatic-system palsas at Toolik Lake, Alaska: field observations and stimulation, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 11, p. 79-94.
- PARAMESWARAN, V. R. et JOHNSTON, G. H. (1985): Electrical potentials developed during thawing of frozen ground, *Proceedings of the Fourth International Symposium on Ground Freezing*, Sapporo, 5-7 August 1985.
- PARAMESWARAN, V. R. et MACKAY, J. R. (1983): Field measurements of electrical potentials in permafrost areas, *Permafrost, Proceedings of the Fourth International Conference*, Alaska, National Acad. Press, Washington, D. C., p. 962-967.
- PAYETTE, S. (1983): The forest tundra and present Tree-line of the northern Québec-Labrador Peninsula, in *Tree-line Ecology. Proceedings of the Northern Québec Tree-Line Conference*, P. Morisset et S. Payette, édit., Nordicana, 47, p. 3-23.
- 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*, vol. 6, p. 203-220.
- PISSART, A. (1983): Pingos et palses: un essai de synthèse des connaissances actuelles, in *Mesoformen des reliefs in Heutegen Periglazibraum*, H. Poser et E. Schunke, édit., Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften in Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Dritte Folge, 35, p. 48-69.
- RICHARD, P. J. H. (1981): *Paléophytogéographie postglaciaire en Ungava par l'analyse pollinique*, Paléo-Québec, n° 13, 153 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*, vol. 34, n° 3, p. 301-320.
- SEGUIN, M. K. (1976): Observations géophysiques sur le pergélisol des environs du lac Minto, Nouveau-Québec, *Cahiers de géographie de Québec*, vol. 50, n° 20, p. 327-346.

- SEGUIN, M. K.- et ALLARD, M. (1984): Le pergélisol et les processus thermokarstiques de la région de la rivière Nastapoca, Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 38, n° 1, p. 11-25.
- 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*, vol. 33, n° 3-4, p. 327-338.
- SEPPÄLÄ, M. (1972): The term «palsa», *Zeitschrift für Geomorphologie*, Neue Folge, Band 16, p. 463.
- VEILLETTE, J. J. et NIXON, F. M. (1980): *Portable drilling equipment for shallow permafrost sampling*, Geological Survey of Canada, Paper 79-21, 35 p.
- WASHBURN, A. L. (1983a): What is a palsa? in *Mesoformen des Reliefs in Heutigen Periglaziabraum*, H. Poser et E. Schunke, édit., Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften in Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Dritte Folge, 35, p. 34-37.
- (1983b): Palsas and continuous permafrost, *Permafrost Proceedings of the Fourth International Conference*, Alaska, Nat. Acad. Press, Washington, D.C., p. 172-1377.
- WILSON, C. (1971): *Atlas climatique du Québec*, Service de l'environnement atmosphérique du Canada, Toronto, 180 p.
- ZOLTAI, S. C. (1972): Palsas and peat plateaus in central Manitoba and Saskatchewan, *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 2, n° 3, p. 291-303.
- (1975): Perennially frozen peatlands in the western Arctic and Subarctic of Canada, *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 12, p. 83-143.
- ZOLTAI, S. C. et TARNOCAI, C. (1981): Some nonsorted patterned ground types in northern Canada, *Arctic and Alpine Research*, vol. 13, n° 2, p. 139-151.