

Les buttes minérales cryogènes dans les basses terres de la rivière aux Feuilles, Nouveau-Québec

The Cryogenic Mineral Mounds of the Leaf River Lowlands, Nouveau-Québec

Minerale Frosthügel in den Tiefländern des «Rivière aux Feuilles» Flusses, Neues Québec

Serge Payette and Maurice K.-Seguin

Volume 33, Number 3-4, 1979

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1000369ar>
DOI: <https://doi.org/10.7202/1000369ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (print)
1492-143X (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Payette, S. & K.-Seguin, M. (1979). Les buttes minérales cryogènes dans les basses terres de la rivière aux Feuilles, Nouveau-Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 33(3-4), 339–358. <https://doi.org/10.7202/1000369ar>

Article abstract

The sandy terraces in the mid-section of the Leaf River (58°15'N, 72°W) are generally underlain by permafrost. An estimated maximum permafrost thickness of 35 m was measured by electrical resistivity soundings. The main permafrost landforms found in mineral sediments are respectively convex and flat cryogenic mineral mounds. As proposed from stratigraphical and ¹⁴C data, permafrost became active only after 3000 years BP. Significant permafrost expansion was recorded during a cold period sometime after 450 years BP. Under permafrost conditions, the sandy terraces were less permeable, which probably caused more water to flow downstream. The convex mounds represent landforms resulting from permafrost aggradation, under the influence of the growing volume of segregation ice. During the twentieth century a minor climatic amelioration has been probably responsible for thermokarst activity. Many flat mounds originated probably from this period, due to local permafrost regression, namely in linear depressions where running water thawed frozen sediments. The cryogenic mineral mounds form particular periglacial landforms, distinct from those associated with bayd zharakhs-alas system.

LES BUTTES MINÉRALES CRYOGÈNES DANS LES BASSES TERRES DE LA RIVIÈRE AUX FEUILLES, NOUVEAU-QUÉBEC*

Serge PAYETTE et Maurice K.-SEGUIN, respectivement du Département de phytologie et du Département de géologie, Université Laval, Sainte-Foy, Québec G1K 7P4.

RÉSUMÉ Les basses terrasses sableuses du cours moyen de la rivière aux Feuilles (58°15' N, 72° O) sont généralement affectées par la présence du pergélisol, dont l'épaisseur maximale estimée est de 35 m. Les buttes minérales cryogènes à sommet convexe et à sommet plat représentent les principales formes périglaciaires reliées aux manifestations du pergélisol en milieu minéral. Une coupe stratigraphique pratiquée dans un ensemble buttes convexes-dépressions et la datation ¹⁴C de sédiments organiques enfouis ont permis de suivre l'évolution du pergélisol. Les données suggèrent que le pergélisol est devenu actif après 3000 ans AA. À la faveur de périodes froides quelque temps après 450 ans AA, le pergélisol a connu une expansion importante. Les sédiments sableux pergélisolés sont devenus imperméables; une intensification du drainage superficiel a augmenté l'apport d'eau vers les parties aval où se gonflaient les buttes convexes. Ces buttes constituent des formes d'aggradation du pergélisol, par suite de l'accroissement en volume de la glace de ségrégation. Au cours du XX^e siècle, le faible réchauffement climatique a probablement favorisé l'activité thermokarstique. Les conditions hydrologiques ont été modifiées. De nombreuses buttes à sommet plat ont pu se former au cours de cette période, grâce à la dégradation du pergélisol dans les dépressions linéaires de ruissellement. Les buttes minérales cryogènes représentent des formes périglaciaires originales, différentes de celles associées au système baydzharakhs-alas.

ABSTRACT The cryogenic mineral mounds of the Leaf River lowlands, Nouveau-Québec. The sandy terraces in the mid-section of the Leaf River (58°15'N, 72°W) are generally underlain by permafrost. An estimated maximum permafrost thickness of 35 m was measured by electrical resistivity soundings. The main permafrost landforms found in mineral sediments are respectively convex and flat cryogenic mineral mounds. As proposed from stratigraphical and ¹⁴C data, permafrost became active only after 3000 years BP. Significant permafrost expansion was recorded during a cold period sometime after 450 years BP. Under permafrost conditions, the sandy terraces were less permeable, which probably caused more water to flow downstream. The convex mounds represent landforms resulting from permafrost aggradation, under the influence of the growing volume of segregation ice. During the twentieth century a minor climatic amelioration has been probably responsible for thermokarst activity. Many flat mounds originated probably from this period, due to local permafrost regression, namely in linear depressions where running water thawed frozen sediments. The cryogenic mineral mounds form particular periglacial landforms, distinct from those associated with baydzharakhs-alas system.

ZUSAMMENFASSUNG Minerale Frosthügel in den Tiefländern des «Rivière aux Feuilles» Flusses, Neues Québec. Die sandigen Terrassen im Mittellauf des «Rivière des Feuilles» Flusses (58°15'N, 72°W) sind im Allgemeinen von Dauerfrost unterlegt. Eine geschätzte maximale Dicke von 35 m Dauerfrost, wurde durch elektrische Resistenzsondierungen gemessen. Die hauptsächlichen Dauerfrost Landformen, die in Mineralsedimenten gefunden wurden, sind jeweils konvexe und flache kryogenische Mineralhügel. Wie aus stratigraphischen und ¹⁴C Daten angenommen, wurde der Dauerfrost erst um 3000 Jahre v.u.Z. aktiv. Bedeutende Dauerfrostausdehnung wurde während einer Kälteperiode um ca 450 Jahre v.u.Z. aufgezeichnet. Unter Dauerfrostverhältnissen waren die sandigen Terrassen weniger durchlässig, was wahrscheinlich talwärts einen grösseren Wasserstrom verursachte. Die konvexen Hügel repräsentieren Landformen, die durch Dauerfrostaggradation unter dem Einfluss wachsender Mengen Segregationseises entstanden sind. Im Zwanzigsten Jahrhundert ist eine kleinere Klimaverbesserung wahrscheinlich für die thermokarst Aktivität verantwortlich. Viele flache Hügel stammen aus dieser Zeit, auf Grund von örtlichem Dauerfrostrückgang, namentlich in lineären Vertiefungen, wo fließendes Wasser gefrorene Sedimente auftaute.

* Contribution du Centre d'études nordiques de l'université Laval.

INTRODUCTION

Au sein de la zone de pergélisol discontinu d'Amérique du Nord (BROWN, 1970) apparaissent de nombreuses formes de terrain associées aux processus périglaciaires. Parmi ces formes, les buttes minérales cryogènes (ou cryergiques) sont peu connues ou ignorées; elles n'ont pas leur place dans le récent ouvrage de WASHBURN (1973); le travail de BROWN (1976) sur le pergélisol au Québec-Labrador ne les mentionne pas, l'aire d'étude étant généralement située au sud de ces formations.

Les buttes minérales cryogènes sont au milieu minéral ce que les paises sont au milieu tourbeux. Cette constatation d'ordre général ne saurait toutefois traduire toute la complexité des processus morphogénétiques responsables de leur formation et de leur diversité (PAYETTE *et al.*, 1976). Ces buttes correspondent à un ensemble de formes reliées essentiellement à l'évolution progressive et régressive du pergélisol dans les sédiments minéraux, en l'absence d'une couche de tourbe. C'est dans cette perspective que LAGAREC (1973) a établi de façon préliminaire une typologie des principales formes cryogènes en milieu minéral rencontrées au golfe de Richmond.

Le vocabulaire associé aux formes de terrain issues de la dynamique interne du pergélisol est loin d'être uniforme (CZUDEK et DEMEK, 1970; HAMELIN et COOK, 1969; MACKAY et BLACK, 1973; WASHBURN, 1973). Malgré l'augmentation du nombre de travaux sur le pergélisol, il n'est pas certain que ce problème soit résolu à court terme. L'expression butte minérale cryogène n'échappe pas à la critique, car elle embrasse plusieurs formes de terrain d'origines diverses, bien que liées aux manifestations du pergélisol et surtout de la glace du sol. Entre les divers types de pingo (PORSILD, 1938; MULLER, 1959; HOLMES *et al.* 1963; MACKAY, 1962) et les paises (ÅHMAN, 1977; PAYETTE *et al.*, 1976; PISSART, 1974; SVENSSON, 1975; ZOLTAL, 1972; ZOLTAL et TARNOCAL, 1971) existent probablement des formes intermédiaires dont certaines correspondent, dans l'état actuel de nos connaissances, aux buttes minérales cryogènes. Les pingos se rapportent essentiellement aux buttes minérales, sans couche de tourbe dans la partie sommitale, construites par l'action de glace d'injection (MULLER, 1959; MACKAY, 1962; WASHBURN, 1973). Les buttes minérales cryogènes étudiées dans le présent travail et ailleurs (PAYETTE *et al.*, 1976) doivent leur existence à la glace de ségrégation et à son évolution par la trame des processus thermokarstiques. Elles doivent être distinguées des paises proprement dites. Ces dernières se localisent dans les tourbières, avec un couvert de tourbe d'épaisseur variable. Dans un ouvrage récent, ÅHMAN (1977, p. 144) définit ainsi les paises: «*Today palsas*

are defined as hillocks with a frozen core formed by a build-up of segregated ice in mineral soil, or in peat, with a cover of peat from 1 m or less to 7 m thick.» Sous couvert forestier ou non, les buttes minérales cryogènes ne possèdent pas en surface d'horizon tourbeux. Il est, cependant, évident que de nombreuses formes intermédiaires lient ces deux grands ensembles de formes pergélisolées. Bien qu'existe une grande similitude des processus morphogénétiques entre ces formes organiques, minérales et organominérales (PAYETTE *et al.*, 1976), l'usage d'une typologie bien articulée s'impose. À la suite de ÅHMAN (1977), DIONNE (1978) estime que ces formes peuvent être regroupées sous le terme collectif de paises. Les formes modales issues des dépôts minéraux, tourbeux et mixtes méritent d'être distinguées avec clarté. Il est souhaitable qu'un comité scientifique se penche sur ce problème de terminologie. En attendant, l'expression buttes minérales cryogènes sera employée dans le présent travail.

Sous le couvert des buttes minérales cryogènes apparaît ainsi un vaste champ de phénomènes pergélisoliques à décrire, classer et interpréter. L'étude du pergélisol en milieu minéral à la rivière aux Feuilles s'inscrit dans cette perspective et vise un but plus global en tentant de situer son évolution dans le contexte actuel et paléo-écologique. Les manifestations morphologiques du pergélisol sont le résultat d'un ensemble de facteurs écologiques interdépendants dont les multiples combinaisons s'expriment dans la dimension espace-temps. Ces considérations amènent à poser l'hypothèse que les buttes minérales cryogènes de l'hémi-Arctique québécois (PAYETTE, 1976), et plus particulièrement celles des basses terres de la rivière aux Feuilles (58°15'N, 72°O; fig. 1), comprennent à la fois des formes modernes de l'activité du pergélisol et des formes héritées d'une évolution paléoclimatique principalement post-hypsithermale.

CADRE GÉOGRAPHIQUE ET ÉCOLOGIQUE

Les basses terres du cours moyen de la rivière aux Feuilles forment une dépression linéaire à une altitude moyenne de 100 m au sein du plateau ungavien formé de roches granito-gneissiques d'âge archéen. De part et d'autre de la vallée, le plateau atteint une altitude moyenne de 300 m. La région a été déglacée entre 7000 et 6500 ans AA (PREST, 1969). Les modalités de la déglaciation le long du cours moyen de la rivière aux Feuilles semblent différentes de celles de la côte occidentale de la baie d'Ungava (GANGLOFF *et al.*, 1976). En effet, on a pu noter les marques d'un ancien niveau lacustre, notamment dans les vallées adjacentes à la rivière aux Feuilles. Lors de la déglaciation, il semble s'être formé un lac proglaciaire dont le niveau



FIGURE 1. Localisation de la région étudiée.

Location map of the studied area.

maximal aurait atteint une altitude moyenne de 225-230 m dans la région considérée. La présence de till d'ablation sur des bombements granitiques d'altitude inférieure au niveau proglaciaire suggère la présence de culots de glace pendant une bonne partie de cette phase. Au-delà de la ligne de partage des eaux entre les bassins de la mer d'Hudson et de la baie d'Ungava, la régression de l'inlandsis vers l'intérieur de la péninsule a probablement favorisé la formation d'une série de lacs proglaciaires de dimension et de longévité variables (PAYETTE *et al.*, 1978). Les recherches de LAURIOL *et al.* (1979) sur la déglaciation et la transgression de la mer d'Iberville dans le secteur sud-ouest de la baie d'Ungava devraient en préciser la nature et les modalités.

Les terrasses proglaciaires sont peu individualisées et présentent généralement une inclinaison marquée; elles diffèrent nettement des terrasses fluviales subhorizontales, retrouvées dans la vallée de la rivière aux Feuilles. L'ensemble des formes de terrain est affecté par les processus périglaciaires associés à la nivation, la gélifluxion, la géliturbation et la gélifraction. Tous les terrains non boisés sont abondamment recouverts de formes périglaciaires à figuration variable, dont les plus

communes sont les gradins de solifluxion et les cercles sans triage. La région se caractérise aussi par la présence de nombreuses combes à neige d'exposition nord, nord-est et est.

Les basses terres de la région forment un sillon forestier bordé au nord et au sud par la toundra arbus-tive. La végétation appartient au domaine écoclimatique du mélèze (*Larix laricina* (DuRoi) K. Koch) et de l'épi-nette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP), tel que décrit par PAYETTE (1976). Les pessières à épinettes noires se retrouvent dans les milieux protégés situés à une altitude inférieure à 150 m; les mélèzaies peuvent atteindre une altitude d'environ 200 m et forment la limite des forêts. Les formations arbus-tives d'épinettes noires (krummholz) transgressent cette limite vers le nord, sur une distance pouvant varier entre quelques dizaines et une centaine de kilomètres.

Les sols de la région sont relativement diversifiés. Malgré l'importance des processus périglaciaires engendrant des perturbations dans l'horizonation originale des profils, les brunisols dystriques dégradés et les podzols humo-ferriques occupent une assez grande étendue. Une étude préliminaire des conditions de la pédogenèse de cette région suggère que de nombreux sols portent les marques de paléoclimats distincts. Les caractéristiques des paléosols de la région devraient jeter quelque lumière sur la nature de la pédogenèse postglaciaire en zone hém-arctique (PAYETTE et GAGNON, 1978; PAYETTE, en prép.).

MÉTHODES

Les buttes minérales cryogènes des basses terres de la rivière aux Feuilles ont été étudiées le long d'un segment d'environ 5 km de longueur. Des observations relatives à la morphologie et aux conditions écologi-ques des buttes ont été prises simultanément avec des mesures d'épaisseur du mollisol et du pergélisol (août 1976). La nature du couvert végétal, l'estimation de la hauteur de neige (PAYETTE *et al.*, 1973), le type de sol et de substrat représentent les principaux éléments du milieu pris en considération dans les stations étudiées. Un ensemble buttes-dépressions long de 68 m a été décrit en rafraîchissant une coupe natu-relle sur les flancs de deux buttes contiguës; une des-crition stratigraphique détaillée a été faite en invento-riant à un mètre d'intervalle les profils verticaux. Quatre échantillons organiques ont été pris et datés par la méthode du ^{14}C .

L'instrumentation et le mode de prise des mesures d'épaisseur du pergélisol, basés sur le principe de la résistivité électrique, ont déjà été décrits en détails ail-leurs (SEGUIN, 1976). L'emploi de la méthode de résis-tivité électrique en courant direct et de basse fréquence pour délimiter les aires pergélisolées a été préconisée

par les géophysiciens soviétiques (FROLOV, 1976). La configuration de Schlumberger a été employée, comme dans l'étude sur le pergélisol de la région du lac Minto (SEGUIN, 1976), en raison de la rapidité d'exécution des relevés et de la grande résolution des détails reliés aux variations de la résistivité électrique. Le tableau I fournit les valeurs des paramètres AB/2, MN/2 et K utilisées lors des sondages électriques.

TABLEAU I

Paramètres de la configuration de Schlumberger

$\frac{AB}{2}$ (m)	$\frac{MN}{2}$ (m)	$K = \frac{\pi (AB)^2}{4 MN}$	$\frac{AB}{2}$ (m)	$\frac{MN}{2}$ (m)	$K = \frac{\pi (AB)^2}{4 MN}$
1	0,5	3,1416	28	2,0	615,8
2	0,5	12,57	30	2,0	706,9
3	0,5	28,26	32	2,0	804,2
4	0,5	50,27	32	4,0	402,1
6	0,5	113,12	34	4,0	454,0
8	0,5	201,1	36	4,0	508,9
10	0,5	314,2	38	4,0	567,1
10	1,0	157,1	40	4,0	628,3
12	1,0	226,2	42	4,0	692,7
14	1,0	307,9	42	8,0	346,4
16	1,0	402,1	46	8,0	415,5
18	1,0	508,9	50	8,0	490,9
20	1,0	628,3	54	8,0	572,6
20	2,0	314,2	58	8,0	660,5
22	2,0	380,1	62	8,0	754,8
24	2,0	452,4	66	8,0	829,6
26	2,0	430,9	70	8,0	962,2

Une interprétation préliminaire des sondages électriques a été faite en employant les courbes types publiées par la Compagnie générale de Géophysique (1955, 1963), le Rijkswaterstaat de Hollande (1969) et ORELLANA et MOONEY (1972). À chaque jour, dès le retour du terrain, on procède à la confection des courbes et à leur première interprétation; ceci permet une progression et une orientation plus sûres de la collecte des observations. Les données ont par la suite été traitées en laboratoire de manière à obtenir les résistivités vraies et les épaisseurs des divers dépôts étudiés. La méthode itérative de ZOHDY (1974b, 1975) a été utilisée. Le programme mathématique est également celui de ZOHDY (1973, 1974a); de légères modifications y furent apportées pour l'adapter aux problèmes spécifiques du présent travail.

Les résultats de cette étude ont une valeur relative; seules les mesures directes par forage et profils thermiques nous renseignent de façon complète sur les caractéristiques du pergélisol. Il reste que l'utilisation de la technique de la résistivité électrique est recommandable dans les régions éloignées et inhabitées.

CARACTÉRISTIQUES DES BUTTES MINÉRALES CRYOGÈNES

1. CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE

Les basses terres de la vallée de la rivière aux Feuilles sont composées d'affleurements archéens et de sédiments quaternaires. Ces derniers occupent cependant une plus grande superficie et sont dominés par des sables de granulométrie variable disposés en strates subhorizontales. Des tourbières minérothrophes (fen) avec paises et plateaux palsiques recouvrent les dépressions humides.

De nombreuses formes d'érosion et d'accumulation glacielles apparaissent le long des berges de la rivière et ressemblent en tous points à celles décrites par DIONNE (1976) dans la région de la Grande Rivière. Les buttes minérales cryogènes se retrouvent principalement dans les terrasses sableuses et graveleuses à proximité de la rivière (fig. 2). Il existe trois niveaux de terrasse: environ 3, 6 et 10 m. La terrasse inférieure constitue une banquette alluviale soumise annuellement au glaciol de débâcle. Dans certaines sections du segment étudié, le contact entre la banquette alluviale et le plan d'eau de la rivière se fait graduellement; on y observe une dominance des phénomènes d'érosion glacielle (arbustes arrachés et érodés, parterre végétal labouré et radeaux de végétation). Lorsque le contact entre le plan d'eau et la banquette alluviale est abrupt, on remarque la présence de blocs glaciels le plus souvent isolés sur le replat; les marques d'érosion glacielle y sont moins nombreuses. En fonction des caractéristiques physiques de la rivière et de ses berges, les formes d'accumulation glacielle sont abondantes et parfois imposantes par leur dimension.

Des crêtes de poussée glacielle peuvent facilement atteindre 3 m de hauteur, notamment dans les secteurs où le cours de la rivière est sinueux. La forme la plus commune demeure le cordon de blocs glaciels de dimensions variables, allant de 10 m à plus d'une centaine de mètres de longueur. Sur le sommet de plusieurs cordons, des blocs sont densément recouverts de lichens crustacés (notamment du genre *Rhizocarpon*), preuve de l'ancienneté des cordons. Plusieurs atteignent une hauteur de 8 m au-dessus du niveau moyen (estival) de la rivière et sont alignés subparallelément à cette dernière. Ils sont encore en développement et ont tendance à s'allonger et pénétrer dans la rivière. Leur évolution peut entraîner le barrage d'une petite banquette alluviale ou d'un ruisseau. Les alignements glaciels sont localisés près de la rivière, en aval des terrasses non glaciellisées (fig. 3). C'est là que les buttes minérales cryogènes atteignent leur hauteur maximale. L'essentiel du domaine glacielle actuel dans le segment étudié se limite à une bande n'excédant pas la largeur d'une centaine de mètres. Les autres replats de terrasse ne sont pas affectés par l'activité glacielle.



FIGURE 2. Vue aérienne des terrasses sablo-graveleuses de la rivière aux Feuilles et buttes minérales cryogènes. La rivière coule vers la droite, c'est-à-dire vers l'est.

Aerial view of the sandy terraces along the Leaf River and cryogenic mineral mounds. The river flows from left to right, i.e. eastwards.

2. MORPHOLOGIE DES BUTTES MINÉRALES CRYOGÈNES

Les buttes minérales cryogènes comprennent trois catégories principales. La première catégorie concerne des buttes convexes ou à sommet légèrement arrondi,

recouvertes d'une végétation basse dominée principalement par les lichens (surtout *Cladonia*), le bouleau glanduleux (*Betula glandulosa* Michx.) et quelques Éricacées. Une végétation forestière peut parfois être observée sur certaines buttes. La forme générale des buttes varie; toutefois, les formes circulaires et ellipti-



FIGURE 3. Glaciel actuel le long de la rivière aux Feuilles; crête de poussée de 6-7 m de hauteur.

Contemporary drift ice deposits along the Leaf River.



FIGURE 4. Coulée de sable de recouvrement et de plaques de végétation sur le flanc d'une butte cryogène.

Sand flow and vegetation cover on the side of a cryogenic mound.

ques dominant. Elles ont un diamètre moyen de 25-30 m et une hauteur variant entre 3 et 8 m; certaines d'entre elles atteignent parfois 10 à 12 m. Les plus hautes, dont la convexité est prononcée, sont caractérisées par la présence d'ostioles. Le profil des buttes est parfois régulier, épousant la forme d'un dôme; dans plusieurs cas, les versants sont découpés en gradins. Les flancs exposés à la rivière sont généralement en pente raide. On observe à l'occasion des glissements de matériel minéral et des plaques de végétation (fig. 4). D'importantes sections des flancs sont parfois emportées vers le bas des pentes et érodées par les eaux de la rivière. Les buttes sont séparées les unes des autres par la présence de dépressions étroites mais profondes d'où s'écoulent souvent des ruisselets. Les buttes à sommet convexe sont surtout situées près de la rivière. Leur limite distale (par rapport à la rivière) peut être aussi tranchée que leur limite proximale, lorsqu'elle aboutit à une dépression lacustre; elle est cependant moins nette quand les buttes s'adossent directement au replat des terrasses intérieures.

Les buttes de la deuxième catégorie présentent généralement un sommet plat et sont dans la majorité des cas recouvertes d'une végétation forestière. Les pessières à épinettes noires et cladonies sont le type de forêt le plus répandu; on retrouve aussi des pessières à épinettes noires et mousses et des mélèzaies à mousse et à arbustes. Les buttes sont de dimensions très variables (plusieurs dizaines à quelques centaines de mètres de longueur et de largeur); la forme générale correspond au polyèdre, parfois au rectangle. Des dépressions linéaires peu profondes (de 1 à 2 m) et à fond plat, colonisées par des mélèzaies, des saulaies (surtout *Salix planifolia* Pursh et *S. argyrocarpa* An-

derss.) et des bétulaies, séparent les buttes. Certaines buttes à sommet plat sont sous couvert lichénique et arbustif. On y retrouve à l'occasion des macrofossiles arborescents. Des ostioles apparaissent parfois au sommet des buttes. Le profil des buttes à sommet plat est la plupart du temps uniforme, malgré la présence d'un microrelief légèrement accidenté. Le contact entre les dépressions linéaires et les buttes est tantôt graduel, tantôt abrupt. Une mince couche de tourbe humique sous un horizon organique de type mor recouvre certaines buttes; ces dernières s'apparentent aux paises; de nombreuses formes de transition apparaissent dans l'aire des buttes minérales à sommet plat.

La troisième catégorie de buttes minérales cryogènes comprend des monticules localisés sur la banquette alluviale. Les buttes sont généralement de petites dimensions; elles n'excèdent pas 2 m de hauteur sur une dizaine de mètres de longueur. Elles montrent un profil en gradins séparés par des ruisseaux ou des mares. Une végétation arbustive et muscinale colonise les flancs, alors que les sommets sont surtout dominés par une végétation lichénique, muscinale et arbustive. Le parterre muscinal des buttes est parfois traversé de nombreuses fentes longitudinales et radiales formant un réseau polygonal (fig. 5). Les fentes peuvent atteindre quelques dizaines de centimètres de profondeur. De petites lentilles de glace pure occupent une partie des fentes. Ces dernières ont plusieurs mètres de longueur. Elles peuvent être retracées jusqu'aux berges dénudées et même sous le niveau estival de la rivière, ce qui laisse entendre qu'elles se forment principalement lors de l'étiage d'automne. Des ferruginisations linéaires permettent un repérage relativement facile des fentes.



FIGURE 5. Fentes de gel dans le parterre végétal des buttes cryogènes.

Frost-wedges in the vegetation cover of a cryogenic mound.

3. ACTIVITÉ THERMOKARSTIQUE

C'est dans l'aire des buttes convexes que l'on observe la plus grande concentration de dépressions circulaires, linéaires ou autres. Les plus importantes dépressions sont remplies d'eau et se retrouvent toujours au contact des buttes convexes et des buttes à sommet plat. Les dépressions linéaires peuvent avoir plusieurs centaines de mètres de longueur. Les dépressions circulaires ont des dimensions similaires à celles des buttes convexes (fig. 6). L'épaisseur de leur tranche d'eau est parfois de 1 à 2 m, mais davantage chez les plus grandes.

Les mares sont d'origine thermokarstique et s'insèrent au sein d'un réseau de dissection polygonal; les points de rencontre des côtés des polygones déterminent l'emplacement des plus importantes dépressions. Les rebords des mares sont soit en pente douce, soit en gradins, témoignant de l'affaissement généralisé des sédiments minéraux. Des bourrelets périphériques (PAYETTE *et al.*, 1976; SAMSON, 1975; DIONNE, 1978), communs dans les tourbières à paises le long de la côte de la mer d'Hudson, ou des ramparts (PISSART, 1974), n'ont pas été observés. Cependant, des arbres morts sont parfois rencontrés dans les mares. Les rebords se caractérisent aussi par la présence de nombreux arbres penchés, associés à l'instabilité des dépôts meubles. L'activité thermokarstique se déroule plus ou moins intensément selon les milieux; des tapis de lichens fruticuleux (des genres *Cladonia*, *Cetraria*, *Alectoria*, *Stereocaulon*, etc.) et d'arbustes bien conservés sont immergés sous quelques centimètres d'eau; leur submersion paraît récente. Les nombreux types de végétation retrouvés dans les mares suggèrent toutefois une activité thermokarstique échelonnée sur une période relativement longue. La végétation hydrophile est repré-



FIGURE 6. Dépression thermokarstique entre les buttes cryogènes.

Thermokarstic depression between cryogenic mounds.

sentée par des formations à *Menyanthes trifoliata* L., *Equisetum*, *Carex aquatilis* Wahl. et différentes espèces de mousses (notamment *Sphagnum* et *Depranocladus*). Quelques petites mares subissent un entourage.

Dans le secteur des buttes à sommet plat, l'activité thermokarstique est sinon faible, du moins peu apparente. Sur les buttes proprement dites, elle se résume à de petits effondrements locaux, engendrant un microrelief chaotique. Son influence sur le couvert forestier est soulignée par la présence d'arbres penchés, couchés et parfois déracinés. Au niveau du sol, on note à l'occasion la formation d'un réseau polygonal secondaire subdivisant la butte en de nouvelles unités morphologiques. Une végétation hygrophile a alors tendance à envahir les dépressions linéaires nouvellement formées. Les rebords de buttes présentent une morphologie d'origine thermokarstique reliée à la subsidence, à l'écaillage et même au basculement en plaques des sédiments. Les arbres sont soit penchés, couchés ou déracinés. L'érosion des flancs a pour résultat d'élargir les principales dépressions linéaires.

4. ÉPAISSEUR DU MOLLISOL ET DU PERGÉLISOL

La figure 7 montre les résultats d'un sondage vertical au sein d'une butte à sommet convexe (sondage n° 2). L'épaisseur du mollisol est de 60 cm ($\rho = 1,5 \times 10^4 \Omega\text{-m}$) et celle du pergélisol de 13 m ($\rho = 3,5 \times 10^5 \Omega\text{-m}$). Une analyse plus détaillée des résultats, en utilisant le programme mathématique modifié de ZOHDY (1974a), donne une épaisseur de 63 cm de mollisol ($\rho = 1,1 \times 10^4 \Omega\text{-m}$) et de 14,8 m de pergélisol ($\rho = 3,1 \times 10^5 \Omega\text{-m}$). Ce sondage a été effectué dans une butte non forestière, représentative des buttes convexes, où la résistivité électrique est de $1,5 \times 10^5 \Omega\text{-m}$ et la base du pergélisol à 16 m de profondeur.

Un deuxième exemple de sondage effectué sur une butte forestière à sommet plat est représenté à la figure 8. On y a découvert un mollisol de 80 cm d'épaisseur ($\rho = 5 \times 10^4 \Omega\text{-m}$), un pergélisol de 5 m d'épaisseur ($\rho = 4,5 \times 10^5 \Omega\text{-m}$) et 24 m de sédiments meu-

bles ($\rho = 2 \times 10^5 \Omega\text{-m}$) reposant sur la roche en place. En utilisant le programme modifié de ZOHDY (1974a), on obtient respectivement une épaisseur de 47 cm de mollisol ($\rho = 4,81 \times 10^4 \Omega\text{-m}$), de 6,6 m de pergélisol ($\rho = 1,52 \times 10^5 \Omega\text{-m}$) et de 19 m de sédiments meubles ($\rho = 1,60 \times 10^5 \Omega\text{-m}$) avant d'atteindre la roche en place.

L'ensemble des résultats relatifs à l'épaisseur et à la résistivité du mollisol et du pergélisol, de même que la profondeur de la roche en place, sont rassemblés dans le tableau II. Une soixantaine de sondages électriques ont été effectués et distribués plus ou moins uniformément dans les stations où l'on retrouve les trois types de buttes minérales cryogènes. Un groupement des données (moyenne et écart des valeurs d'épaisseur du mollisol et du pergélisol) en fonction du couvert végétal montre des différences importantes de l'épaisseur du pergélisol et de la résistivité électrique entre les buttes boisées et les buttes non boisées (tabl. III).

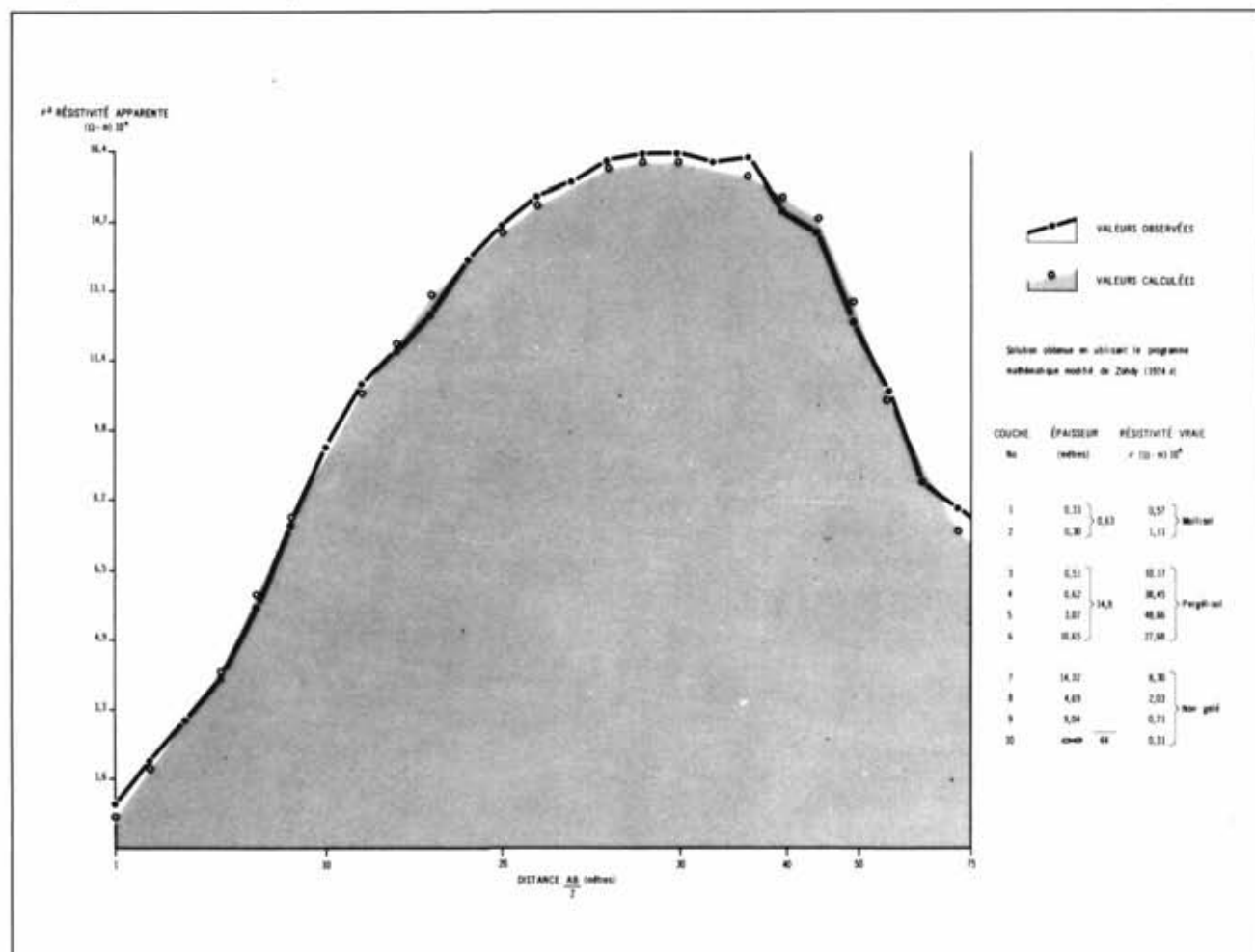


FIGURE 7. Caractéristiques d'un sondage électrique dans une butte convexe. *Characteristics of an electrical sounding on a convex mound.*

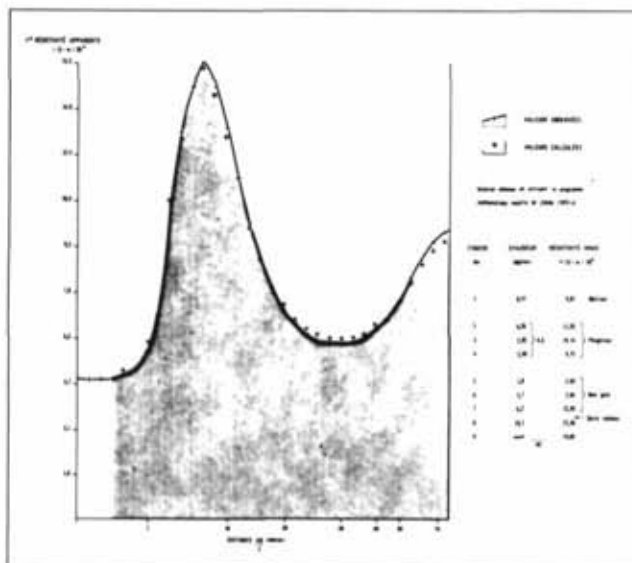


FIGURE 8. Caractéristiques d'un sondage électrique dans une butte à sommet plat.

Characteristics of an electrical sounding on a flat mound.

Les buttes boisées correspondent presque essentiellement aux buttes à sommet plat et les buttes non boisées à celle de la première et de la troisième catégories. Les buttes non boisées se caractérisent par une épaisseur moyenne de pergélisol sensiblement plus grande que celle des buttes boisées. Le pergélisol y est, en général, deux ou trois fois plus épais. Malgré un écart relativement grand des épaisseurs de pergélisol, le nombre élevé de sondages électriques permet une telle comparaison. Le pergélisol est en moyenne plus épais dans les buttes boisées dominées par l'épinette noire que dans celles dominées par le mélèze ou par des formations mixtes. Cette différence semble due à un couvert de neige plus mince et à une moins grande pénétration de la radiation solaire dans le sous-bois des forêts d'épinettes noires. Par l'intermédiaire de la taille des bouleaux nains, la hauteur de neige moyenne estimée dans les pessières à épinettes noires se situe entre 50 et 80 cm, alors qu'en forêt mixte elle fluctue autour de 90 à 100 cm. Sur les buttes non boisées, la végétation basse ne peut maintenir en moyenne que 20 à 30 cm de neige. Des mesures plus complètes devront être prises pour évaluer l'influence du couvert nival sur l'évolution du pergélisol dans la vallée de la rivière aux Feuilles, comme cela a été fait dans la région de Schefferville (ANNERSTEN, 1966; THOM, 1969; GRANBERG, 1973; NICHOLSON et GRANBERG, 1973).

Les sondages électriques effectués dans quelques fens révèlent la présence d'un pergélisol dont l'épaisseur varie entre 3,5 et 25 m. Le pergélisol est souvent absent dans les dépressions linéaires, notamment entre

les buttes à sommet plat, et probablement sous les grandes mares thermokarstiques. Les dépressions non affectées par un ruissellement de surface actif et continu ont parfois des sédiments minéraux pergélisolés sur 15 m d'épaisseur.

On peut affirmer que l'ensemble de la région étudiée, compte tenu des résultats des sondages géophysiques, se caractérise par la dominance spatiale du pergélisol. À l'exception de quelques zones de ruissellement et de mares, le pergélisol présente une répartition continue. Ceci suggère que la région de la rivière aux Feuilles voisine ou est à la marge de la zone de pergélisol continu. Sur les hautes terres précambriennes bordant la vallée, il est probable que le pergélisol ait une répartition continue et que son épaisseur se rapproche des valeurs obtenues à Tasiujaq (baie aux Feuilles, embouchure de la rivière aux Feuilles près de la baie d'Ungava) par GRAY et PILON (1976). Des forages permettraient de vérifier le bien-fondé de cette affirmation.

5. STRATIGRAPHIE DES BUTTES À SOMMET CONVEXE ET DES DÉPRESSIONS PÉRIPHÉRIQUES

Une stratigraphie détaillée de ce complexe a été réalisée le long d'un affleurement naturel sur la rive nord de la rivière aux Feuilles. Une reconstitution de cette coupe est présentée à la figure 9; quelques photographies permettent de visualiser l'agencement des divers sédiments (fig. 10 à 15). Vingt-quatre échantillons des principales unités lithologiques furent recueillis. Les résultats de l'analyse granulométrique apparaissent au tableau IV. Le numéro des échantillons est indiqué au lieu de prélèvement dans la coupe (fig. 9). Toutes les unités sédimentaires analysées sont des sables relativement bien triés. Pour les besoins de la description, nous désignons les buttes et les dépressions étudiées par les symboles suivants: B et D se réfèrent respectivement à la butte et à la dépression de la partie gauche de la coupe, B' et D' à celles de la partie droite de la coupe.

a) Répartition et forme des unités sédimentaires

Du point de vue sédimentaire, les dépressions D et D' se distinguent nettement des buttes B et B'. Les buttes sont constituées d'une assise de sable très fin limoneux de couleurs gris foncé et jaune, parcourue par des ferruginisations de figurations variables linéaire et flammée. Cette assise occupe un volume particulièrement important en B' et n'est recouverte que d'une mince couche de sable moyen, parfois graveleux, au voisinage de D'. Elle est traversée de nombreuses microfailles; des unités sédimentaires discordantes sont emballées dans l'assise limono-sableuse et proviennent vraisemblablement des strates sommitales. La stratigraphie originelle de B' devait ressembler à celle de B, où de nombreuses couches de sable moyen et grossier recou-

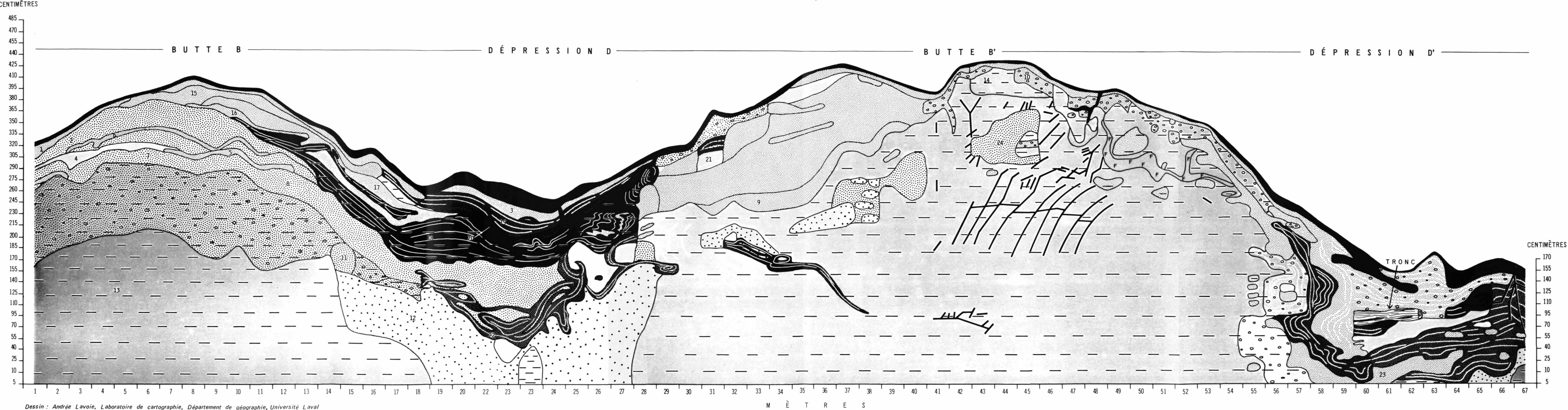
TABLEAU II

Données analytiques des sondages électriques verticaux

N° sondage	Mollisol		Pergélisol		Roche en place (profondeur en m)
	Résistivité électrique ($\Omega\cdot m$) $\times 10^4$	Épaisseur (m)	Résistivité électrique ($\Omega\cdot m$) $\times 10^4$	Épaisseur (m)	
1	1,10	0,63	31,2	14,8	>19
2	1,66	1,04	16,2	11,3	>12
3	1,13	0,85	11,4	18,8	>21
4	1,80	0,44	10,6	25,8	~26
5	12,99	1,11	28,7	24,3	26
6	0,69	0,68	4,7	14,5	>16
7	5,01	0,86	17,0	21,3	~22
8	0,34	8,14	3,2	0	—
9	9,20	0,97	49,2	7,2	>8
10	1,36	2,24	30,6	22,5	25
11	3,01	0,88	23,8	16,9	—
12	0,16	3,22	1,6	24,9	~30
13	4,26	0,35	~15	3,1	—
14	0,84	0,94	5,4	35,4	—
15	1,71	0,64	8,2	21,2	—
16	24,57	0,72	72,2	6,4	—
17	1,60	2,01	8,2	3,6	—
18	3,44	0,86	10,0	26,4	29
19	0,96	0,82	5,5	7,6	—
20	1,58	0,99	17,3	14,1	—
21	4,81	0,47	15,2	6,6	25?
22	3,57	0,46	20,3	20,9	—
23	0,64	0,98	4,4	11,9	—
24	1,56	0,68	6,3	1,9	15
25	1,80	1,92	12,8	~23?	—
26	1,98	0,78	17,5	28,7	—
26-2	2,92	1,64	4,0	30,0	—
27	1,89	0,43	19,4	16,1	32
27-2	2,45	0,71	24,4	8,3	26
28	1,32	1,03	7,5	17,3	33
28-2	2,71	0,78	7,9	18,8	39
29	4,47	1,19	17,8	8,3	44
30	0,33	2,19	15,6	4,8	—
31	1,39	0,39	7,0	20,5	21
32	3,82	1,79	11,2	7,9	37
33	1,17	5,87	3,4	0	38
34	0,89	3,76	10,7	~7	—
35	0,63	1,82	5,6	2,2	44
36	0,31	5,58	2,1	0	—
37	1,72	0,38	5,6	15,8	43
38	3,01	0,99	48,2	6,7	—
39	1,15	5,42	3,2	24,9?	33
40	2,93	2,71	6,3	4,4	31
41	0,48	3,92	2,9	0	—
42	1,61	0,70	7,4	2,8	—
43	1,68	0,75	17,3	0,8	—
44	3,36	0,90	13,8	1,6	18
45	0,69	2,89	7,7	1,9?	47
46	6,80	1,01	27,8	11,8?	—
47	1,18	0,95	17,7	10,4?	41
48	1,08	1,84	9,8	18,5?	—
49	3,02	2,61	9,9	17,9?	35
50	0,58	2,17	1,4	2,8?	44
51	2,81	0,66	8,2	1,8	51
52	1,17	0,76	11,6	1,6	37
53	2,18	0,71	5,9	3,3	26
54	0,71	0,38	7,2	3,5	25
55	0,79	1,06	1,5	0	—
56	1,77	0,64	5,5	6,2	—
57	1,36	1,12	5,6	15,3	—
58	2,82	0,69	8,3	0,8	51

FIGURE 9. Coupe stratigraphique d'un complexe buttes minérales cryogènes-dépressions.
Stratigraphic cross-section of a cryogenic mineral mounds-depressions complex.

COUPE STRATIGRAPHIQUE D'UN COMPLEXE BUTTES MINÉRALES CRYOGÈNES - DÉPRESSIONS
(Rivière aux Feuilles, Nouveau-Québec)

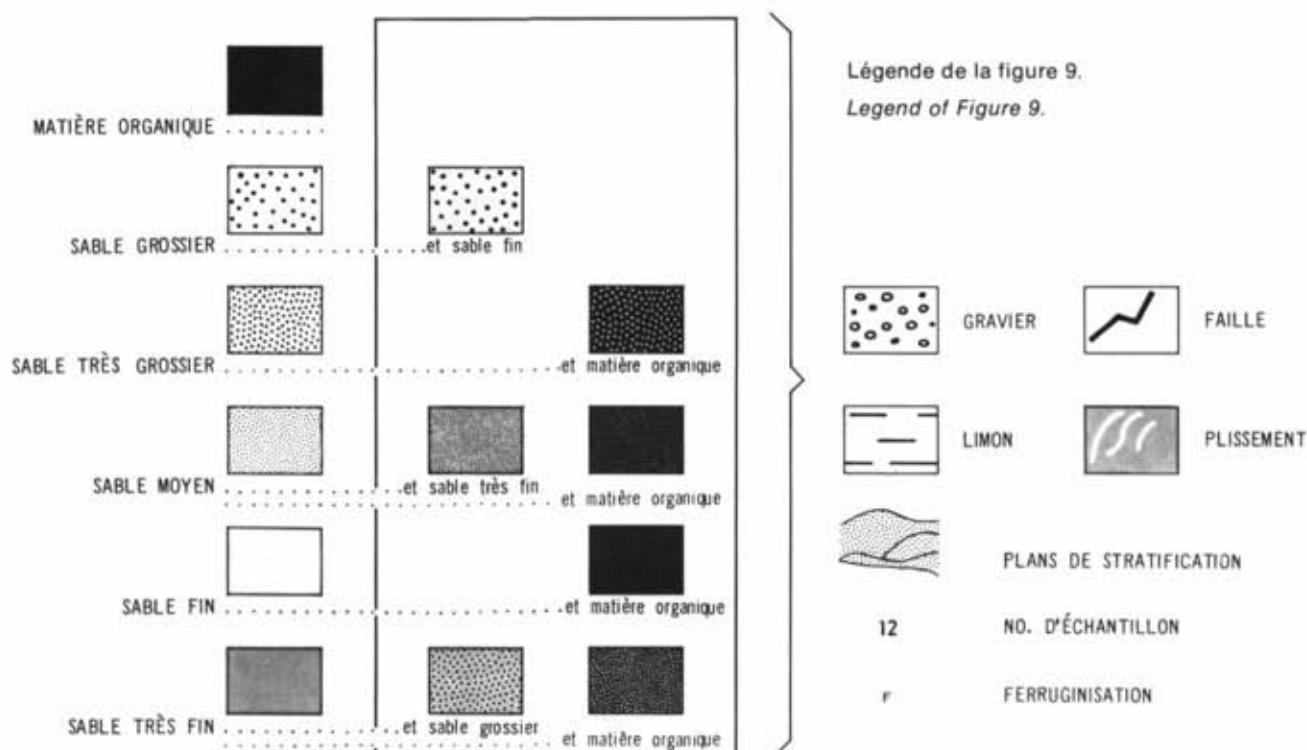


Dessin : Andrée Lavoie, Laboratoire de cartographie, Département de géographie, Université Laval

TABLEAU III

Importance du pergélisol selon les milieux écologiques associés aux buttes minérales cryogènes

Milieux écologiques	Nombre de mesures (N)	Résistivité électrique ($\Omega\text{-m}$) $\times 10^4$		Épaisseur du pergélisol		N° Sondage
		Moyenne	Écart	Moyenne	Écart	
<i>Milieux forestiers</i>						
Pessière à épinette noire	12	19,2	1,5-72	9,3	0,8-25	16,27,31,38 39,43,44,49, 50,51,53,27-2
Mélèze	2	10,0	5,5-15	5,4	3,1-8	13,19
Forêt mixte: mélèze-épinette noire	5	10,1	5,6-17	8,6	1,9-16	20,21,24,37, 40
Fens	4	5,8	1,7-10	15,3	3,5-25	6,12,48,54
Dépressions (eaux courantes)	10	5,6	1,6-16	3,0	0-15	8,30,33,36 41,42,55,56, 57,58
<i>Milieux non forestiers</i>	28	15,5	4,1-49	16,3	1,7-35	1,2,3,4,5,7, 9,10,11,14, 15,17,18,22, 23,25,26,28, 29,32,34,35, 45,46,47,52, 26-2,28-2



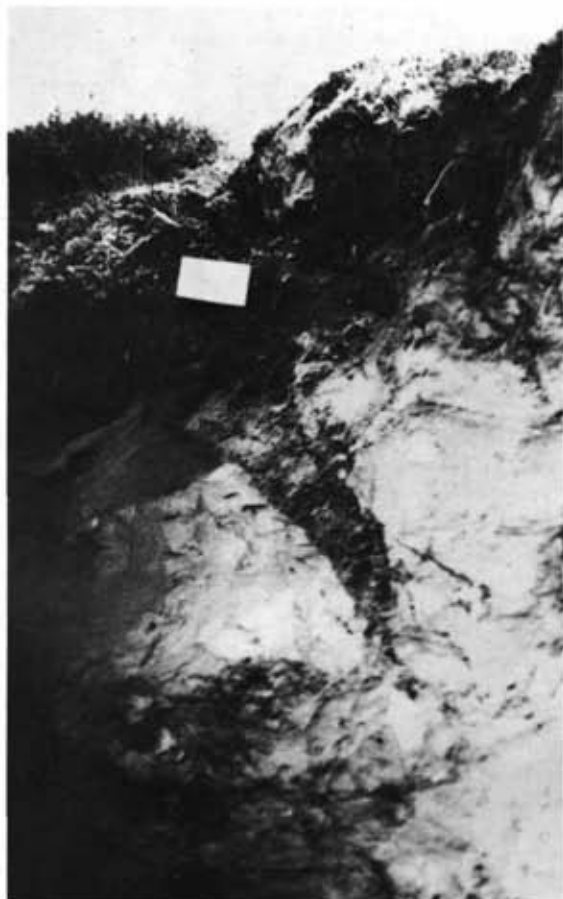


FIGURE 10. Fissure du mètre 42. (voir fig. 9)
Crack in the 42nd metre. (see Fig. 9).

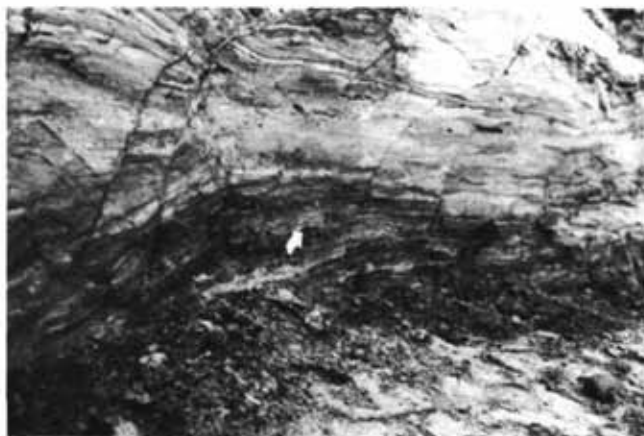


FIGURE 11. Mouvements ascendant et tangentiel des sédiments sous l'influence du gel (voir fig. 9, butte b B').
Upward and tangential movements of sediments affected by frost.

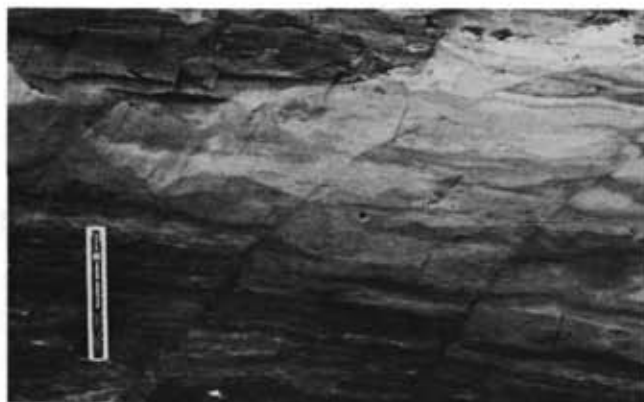


FIGURE 12. Microfailles et décrochement des sédiments de l'assise de la butte B' (voir fig. 9).

Small fault and slide of sediments at the base of mound B' (see Fig. 9).

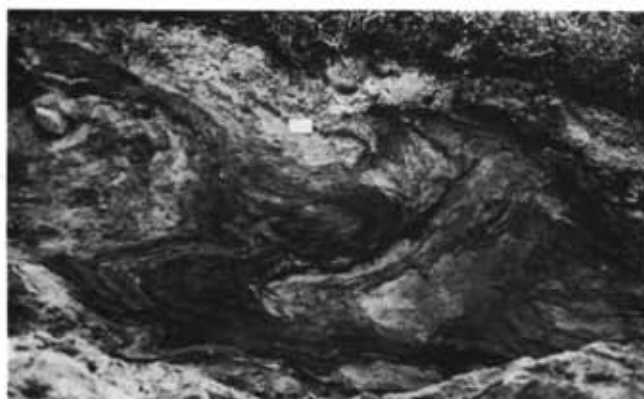


FIGURE 13. Plissement et enfouissement des sédiments dans la dépression D' (voir fig. 9).

Folding and burying of sediments in depression D' (see Fig. 9).



FIGURE 14. Tronc d'arbre enfoui dans la dépression D et âgé de 470 ± 90 ans AA (Qu-466) (voir fig. 9).

Tree trunk buried in depression D' dated 470 ± 90 years BP.



FIGURE 15. Empilement de matières organiques et minérales dans la dépression D' (voir fig. 9).

Piling up of organic and mineral matter in depression D' (see Fig. 9).

vrent l'assise limono-sableuse. Les dépressions sont formées d'une alternance de sédiments sableux et de sédiments organiques. Toutes les strates des dépressions sont plus ou moins fortement plissées. Les buttes sont recouvertes d'un horizon organique mince de type mor renfermant à plusieurs endroits des charbons de bois. Des traces de feu sont aussi notées dans la matière organique enfouie sous quelques centimètres de sable éolien trouvé à l'occasion dans la partie sommitale des buttes. L'horizon organique de surface des dépressions est plus épais; sa texture fibreuse et sa structure massive le distinguent nettement de celui des buttes. De minces bandes de sable moyen traversent cet horizon.

En se référant à la figure 9, la description de la coupe stratigraphique permet de préciser l'évolution des buttes en fonction de l'activité du pergélisol. Ainsi, l'orientation générale des microfailles affectant l'assise de B' suggère un mouvement ascendant puis tangentiel des sédiments vers la dépression D' (fig. 11). L'exhaussement de la partie droite de B' a occasionné le

glissement des strates sableuses sommitales le long de la pente vers D'. Ce phénomène a, d'une part, causé le plissement des strates alors existantes en D' (fig. 13) et, d'autre part, permis leur enfouissement graduel par la descente des matériaux sableux peu cohérents en provenance de B'. Cette activité se poursuit en surface, où l'on observe l'accumulation de plaques de végétation renversées et basculées.

Toute la section de la butte B' comprise entre le mètre 42 et la dépression D' a été soumise à un régime de pergélisol intense. En plus des nombreuses microfailles (fig. 12) soulignant l'action de la glace de ségrégation, d'importantes fissures apparaissent aux mètres 42 et 48. On ne peut pas affirmer que ces deux fissures sont du même âge; il est possible qu'elles se soient formées à deux époques différentes. La fissure du mètre 42 (fig. 10) est probablement apparue le long d'un plan correspondant au contact de l'assise gelée (section droite de B') et de l'assise non gelée (section gauche de B'). L'allure de la fissure du mètre 48 et des matériaux adjacents suggère une origine distincte reliée au glissement des sédiments. La partie supérieure de l'assise située entre les mètres 43 et 54 présente d'ailleurs une structure particulière, le plus souvent grumeleuse et alvéolaire, attestant que le matériel a déjà été tixotropique; elle ressemble, en effet, à celle du matériel retrouvé actuellement dans les ostioles. Les ferruginisations observées entre les deux composantes structurales de l'assise devaient correspondre à l'interface mollisol-pergélisol. Lors des mouvements de l'assise pergélisolée, le mollisol a glissé, entraînant le mélange de certaines strates et le déplacement d'autres sédiments vers le bas des pentes.

La section à la gauche de B' a évolué d'une manière différente. La partie sommitale de la butte semble avoir adopté un mouvement plutôt tangentiel vers la dépression D. Tout d'abord, l'assise n'était pas totalement gelée; elle devait être très humide, voire saturée. Ces conditions ont favorisé un glissement général vers la dépression D de la partie supérieure des sédiments de la butte, accompagné d'une légère subsidence à l'interface assise gelée-assise non gelée (mètre 42). Le déplacement des sédiments à l'état non gelé est confirmé par l'absence de microfailles et la présence de plications dans les sables limoneux de l'assise au voisinage de la dépression D. Ensuite, le glissement vers la dépression D a non seulement causé le plissement des strates de la dépression, mais une partie des sédiments minéraux, organiques et organo-minéraux de la section de droite a été happée par l'assise sous le front de glissement. Les conditions sédimentaires et stratigraphiques des deux dépressions sont semblables. Les plissements affectant les dépôts des deux dépressions soulignent qu'ils ont été formés sous un régime de mollisol.

TABLEAU IV

Composition granulométrique des sédiments minéraux des buttes convexes et des dépressions périphériques: coupe stratigraphique

Échantillon n°	Gravier 2 mm	Sable très grossier 2-1 mm	Sable grossier 1-0,5 mm	Sable moyen 0,5-0,25 mm	Sable fin 0,25-0,1 mm	Sable très fin 0,1-0,05 mm	Limons et argiles 0,05 mm
1	0,7	0,8	4,5	49,5	35,2	8,9	0,4
2	1,7	4,1	22,4	47,0	16,0	5,8	2,6
3	1,6	1,5	3,8	56,0	31,8	5,3	0,2
4	1,4	1,9	6,9	14,6	30,5	38,2	7,4
5	0,6	2,0	20,7	58,9	14,3	3,3	0,2
6	3,4	4,6	20,2	44,5	17,6	7,6	2,2
7	0,6	0,7	13,0	68,2	14,3	2,5	0,7
8	0,0	1,0	20,3	59,3	18,0	1,3	0,1
9	2,9	1,7	10,7	56,2	22,6	5,2	0,8
10	19,0	8,7	15,7	22,4	15,2	14,3	4,8
11	11,7	12,4	17,4	26,6	23,5	7,4	1,1
12	25,4	4,9	5,2	14,0	36,1	12,7	1,7
13	0,4	0,5	1,3	5,2	25,9	50,7	16,0
14	2,6	6,6	7,8	6,5	16,5	36,3	23,8
15	1,4	2,4	7,9	36,8	25,6	18,4	7,7
16	1,3	1,6	16,6	53,2	19,7	6,1	1,7
17	2,2	2,8	16,6	51,1	20,6	5,9	0,8
18	2,0	1,2	6,2	19,2	24,4	30,1	17,0
19	10,0	3,1	8,2	52,8	22,7	3,0	0,2
20	5,1	2,8	8,5	40,8	24,0	14,1	4,7
21	0,9	1,3	1,3	4,8	46,4	35,3	9,9
22	4,0	7,3	12,2	23,3	17,9	22,5	12,9
23	0,8	1,4	4,4	27,5	51,4	13,6	1,0
24	26,0	9,4	16,9	22,4	16,9	6,7	1,7

Les conditions litho-stratigraphiques dans la butte B montrent que l'activité du pergélisol est peu importante. Les matériaux de couverture peu cohérents sont en place et présentent une stratification concordante. De faibles plications dans les sédiments apparaissent aux mètres 10, 14, 17 et 18, suggérant un léger déplacement de l'assise limono-sableuse sous l'action de la glace de ségrégation. Elle ne semble pas pour le moment exercer d'effets significatifs sur la configuration des dépôts. Elle a cependant contribué à hausser et arrondir la forme de la butte. Conditionnée par un ensemble de variables écologiques, son évolution ultérieure peut converger vers une situation semblable à celle de la butte voisine. On a pu estimer chez cette dernière une épaisseur de 14 m de pergélisol; de plus, il semble que le front de gel pénètre sous la rivière (niveau estival), car on y a mesuré 5 m de pergélisol.

Si l'on considère la différence de hauteur existant entre les sommets des assises des buttes B et B', on peut calculer le déplacement relatif vers le haut des sédiments sous l'influence de la glace du sol. Une différence de hauteur de 2,1 m est obtenue entre les sommets respectifs des assises. Ceci suggère que l'exhaus-

sement minimal de la butte B' est de l'ordre de 2 à 3 m, car il n'est pas prouvé que le sommet de l'assise de la butte B corresponde au niveau original. De plus amples mouvements ont pu s'effectuer, ailleurs, dans la région étudiée, puisque de nombreuses buttes à sommet convexe sont plus hautes que la butte B'.

b) Datations ^{14}C des sédiments organiques enfouis

Pour préciser l'origine et l'évolution du pergélisol, on a échantillonné quelques sédiments organiques enfouis. Deux échantillons furent pris à la base des strates organiques les plus profondes de la coupe, correspondant en principe à l'âge le plus ancien. Un premier échantillon a été pris à la base de la strate organique du mètre 34; le deuxième échantillon a été recueilli au mètre 32 dans la partie supérieure de la strate organique. Ces échantillons sont reliés stratigraphiquement aux couches organiques les plus profondes des dépressions D et D'. Les deux autres échantillons furent respectivement récoltés au-dessus de ces couches, dans du matériel sédimentaire d'enfouissement de la dépression D' et relié à l'activité périglaciaire de la butte B' (fig. 14 et 15). Les âges ^{14}C des quatre échantillons sont présentés au tableau V.

TABLEAU V
Âge ^{14}C et caractéristiques des
sédiments organiques enfouis

Échantillon	Âge ^{14}C	Caractéristiques
Qu-466	470 $\pm$ 90	tronc d'arbre enfoui dans un sédiment sableux de D"
Qu-465	1660 $\pm$ 80	tronc d'arbre enfoui dans un sédiment sableux de D" à quelques dizaines de centimètres sous Qu-466
Qu-467	3040 $\pm$ 110	fragment de tige d'arbuste (?) situé dans la partie supérieure de la strate organique enfouie dans la matrice de sable très fin limoneux au mètre 32
Qu-464	3710 $\pm$ 110	partie basale de la strate organique enfouie dans la matrice de sable très fin limoneux au mètre 34; les matériaux organiques semblent constituer une ancienne laisse de rivière (brindilles, fragments de petites branches et de feuilles)

DISCUSSION

La répartition et l'importance du pergélisol dans la vallée de la rivière aux Feuilles (section du cours moyen: 58°15'N, 72°O) ont été précisées grâce à la technique de résistivité électrique (SEGUIN, 1974, 1976). Les résultats montrent que le pergélisol possède une répartition discontinue, bien qu'il soit présent dans plus de 80% de l'aire étudiée. Cette situation pourrait dépendre des caractéristiques topographiques et climatiques de la région. Il semble que la vallée de la rivière aux Feuilles forme une enclave de pergélisol discontinu dans une zone de pergélisol continu associée au plateau précambrien. L'épaisseur maximale estimée de pergélisol dans la vallée est de 35 m, soit une dizaine de mètres de plus que celle notée dans la région du lac Minto (SEGUIN, 1976).

Le couvert végétal exerce une influence sur le pergélisol. Il modifie le bilan radiatif au niveau du sol et détermine une pénétration variable de l'onde du gel, à cause de la nature du manteau nival lors des temps froids de l'année (FILION et PAYETTE, 1978). Les sommets non boisés des buttes convexes, exposés et peu enneigés pendant l'hiver, favorisent l'établissement et le maintien du pergélisol. Les buttes boisées peuvent se caractériser par un microclimat plus frais, mais une plus grande épaisseur de neige contrebalance son action. Ces quelques observations ne sauraient cependant suffire à expliquer les différences d'épaisseur de pergélisol entre les buttes à sommet convexe, non boisées, et les buttes à sommet plat, boisées.

Les principaux dépôts minéraux constituant l'essentiel des diverses buttes cryogènes possèdent tous une matrice à dominance sableuse. Leur granulométrie ressemble à celle des buttes à sommet convexe étudiées du point de vue stratigraphique (tabl. IV). En comparaison avec les argiles, des sédiments aussi grossiers ont un faible pouvoir de rétention d'eau. Ces conditions ne favorisent guère la formation d'un volume important de glace de ségrégation, ce qui peut rendre compte en grande partie de la différence existant entre les buttes boisées sur argile, retrouvées près de la mer (PAYETTE et al., 1976), et les buttes sur sable, communes au-delà de la zone de submersion marine. Le régime thermique du sol argileux sous microclimat forestier est vraisemblablement différent de celui du sol sableux. Bien que les données disponibles sur ce sujet au Nouveau-Québec soient incomplètes, elles permettent néanmoins de penser que le couvert arborescent exerce une influence importante sur l'aggradation du pergélisol en milieu argileux.

Il devient donc évident que d'autres variables doivent être retenues, en plus de la nature du couvert végétal et du couvert nival et des types de substrat, pour expliquer les différences d'épaisseur du pergélisol et de morphologie entre les buttes à sommet plat et à sommet convexe. Les aspects reliés à la répartition des buttes minérales cryogènes et des formes thermokarstiques peuvent fournir quelques éléments à ce chapitre; ils devraient permettre de reconstituer leur évolution.

Les buttes convexes occupent une position spécifique le long de la rivière, au pied ou dans la partie aval des zones de ruissellement provenant des buttes à sommet plat et du plateau précambrien. Elles sont en quelque sorte au point de rencontre des eaux de la rivière et de ses petits affluents. Une telle répartition a déjà été notée au golfe de Richmond (LAGAREC, 1973). Il y a là non pas seulement un simple fait de répartition, mais bien la présence de phénomènes génétiquement reliés. Une constatation semblable peut être faite en ce qui regarde les formes thermokarstiques. Les grandes et profondes dépressions thermokarstiques sont aux buttes à sommet convexe ce que les petites dépressions thermokarstiques peu profondes sont aux buttes à sommet plat.

L'organisation du réseau hydrographique des terrasses fluviales sur lesquelles se dessinent les buttes minérales cryogènes est une manifestation morphologique de l'influence des eaux de ruissellement sur l'évolution du pergélisol. La forte densité des ruisseaux sur les terrasses sableuses est redevable à la présence du pergélisol qui rend imperméable les sédiments. L'eau de ruissellement aboutit à la rivière et alimente le pergélisol des rebords de terrasse. En dépit d'une faible capacité de rétention d'eau, les sables gelés s'enrichissent en glace de ségrégation dont le volume croissant

favorise le gonflement des sédiments sous forme de buttes convexes. En position distale, les buttes à sommet plat ne bénéficient pas d'un tel apport en eau de ruissellement; leur évolution ne conduit généralement pas à la formation de buttes gonflées.

Au cours du développement des formes de terrain associées au pergélisol, apparaissent des phénomènes thermokarstiques et physiques (glissement, subsidence, exhaussement, fracturation, etc.), résultant en un changement morphologique de la surface des terrasses (rapport taille/volume des buttes, par exemple). L'évolution du pergélisol peut favoriser la formation de nouveaux reliefs en buttes et en creux décrivant un réseau polygonal, ou même accentuer tout relief pré-existant. La dégradation du pergélisol reliée à un réchauffement climatique intensifie l'activité thermokarstique. L'écoulement superficiel, parfois pelliculaire, des eaux a tendance à diminuer lorsque le pergélisol perd graduellement son importance spatiale. Les eaux de drainage pénètrent plus profondément dans les sédiments et l'érosion thermokarstique agrandit les dépressions de ruissellement; la dégradation des formes pergélisolées s'exerce principalement sur leurs bordures. L'érosion thermique a ainsi pour effet d'isoler progressivement des masses de pergélisol et de favoriser la formation de buttes résiduelles, comme c'est le cas des buttes à sommet plat. L'eau libérée ou mise en circulation lors d'une période thermokarstique s'ajoute au volume des eaux de drainage superficiel exportées vers l'aval, au contact des buttes à sommet convexe. Cette circulation accélère l'érosion de la bordure des buttes et forme dans les dépressions fermées, là où l'écoulement vers la rivière peut être bloqué, des nappes lacustres de formes et de dimensions variables. Les mares circulaires et linéaires au contact des buttes à sommet convexe et à sommet plat en témoignent.

RECONSTITUTION DE L'ÉVOLUTION DES BUTTES MINÉRALES CRYOGÈNES

En tenant compte des observations présentées dans ce travail, on peut établir un modèle évolutif approximatif des buttes minérales cryogènes du cours moyen de la rivière aux Feuilles, depuis leur origine jusqu'à nos jours. Les étapes suivantes sont proposées:

- a) La mise en place des sédiments sableux s'est vraisemblablement faite en milieu fluvial. Les sédiments ont donné naissance à des terrasses uniformes, faiblement inclinées vers le lit de la rivière. La surface originelle devait être plane ou légèrement ondulée.
- b) À en juger par la présence de sédiments organiques en profondeur, la surface des terrasses était exondée, il y a environ 3700 ans AA. Cependant l'exondation de la partie sommitale des dépôts ne s'est produite qu'aux environs ou après 3000 ans AA.

c) L'installation du pergélisol dans les terrasses affectées actuellement par les deux principaux types de buttes minérales cryogènes s'est probablement faite après 3000 ans AA. Il y a donc lieu de croire que le pergélisol est devenu actif dans les basses terres de la rivière aux Feuilles entre 3000 ans AA et aujourd'hui. Ceci ne signifie évidemment pas que le pergélisol ait été absent ailleurs dans la région. Dans l'Ouest canadien, par exemple, ZOLTAI et TARNOCAL (1975) ont pu estimer que le pergélisol est devenu actif dans les tourbières, il y a environ 3000-4000 ans.

d) Une période d'aggradation du pergélisol s'est manifestée quelque temps après 450 ans AA. On retrouve dans la dépression D' un tronc d'arbre enfoui daté de cette époque. L'arbre devait pousser sur la butte B'; la remontée de l'assise a provoqué le glissement puis l'enfouissement des matériaux de surface peu cohérents ainsi que de la végétation en place. Par ailleurs, l'enfouissement d'un macrofossile daté à 1660 ± 80 ans AA présente quelque difficulté d'interprétation. Ce macrofossile se situe à quelques centimètres au-dessous de celui daté à 470 ± 90 ans AA (tabl. V). Deux hypothèses peuvent être retenues: 1) l'enfouissement des deux fossiles s'est fait au cours de deux périodes distinctes, correspondant respectivement à deux périodes d'aggradation du pergélisol; 2) l'enfouissement des deux fossiles s'est fait en même temps, soit au cours d'une seule période d'aggradation du pergélisol que l'on pourrait situer après 450 ans AA. Dans l'état actuel de nos connaissances, nous retenons la deuxième hypothèse pour les raisons suivantes: a) les deux macrofossiles sont enfouis dans le même dépôt, à quelques centimètres l'un de l'autre; aucune discontinuité morphologique et lithologique n'a été observée dans le matériel d'enfouissement, suggérant qu'ils ont été ensevelis au cours de la même période; b) il existe actuellement en surface de nombreux macrofossiles d'âge variable témoignant de la présence des espèces arborescentes depuis la déglaciation jusqu'à aujourd'hui (GAGNON, en prép.). Le macroreste daté vers 1600 ans AA aurait pu alors côtoyer à l'air libre la végétation de la butte B' avant la période d'enfouissement. D'autres observations permettraient de préciser l'importance de la période périglaciaire après 450 ans AA et de vérifier l'existence éventuelle d'autres périodes d'aggradation du pergélisol.

L'enfouissement des fragments de bois dans la dépression D' est relié à l'exhaussement de la butte B'. Des buttes à sommet convexe se seraient formées au cours de cette période froide. Les dépôts situés en position distale devaient aussi être pergélisolés. Des changements dans le drainage ont sans doute suivi l'apparition du pergélisol. L'écoulement de surface serait devenu plus important et aurait contribué au gonflement des buttes convexes. L'évolution morphologique des

buttes se poursuit actuellement. On observe sur certaines pentes de buttes convexes le glissement simultané de plaques de végétation vivante composées d'arbustes et de lichens ainsi que de sable de couverture.

Soulignons que les traces de feu trouvées dans l'horizon FH des deux buttes convexes B et B' pourraient être contemporaines de celles que l'on a échantillonnées à environ 2 km vers le nord-est. Des dates de 445 ± 135 et de 460 ± 155 ans AA (respectivement GX-5280 et GX-5281) ont été obtenues à partir de deux échantillons de charbon de bois provenant d'un milieu forestier et d'un milieu lichénique. Il est possible que ce feu ait aussi affecté les buttes B et B'. Bien qu'aucune trace de feu n'ait été observée sur l'arbre fossilisé, ceci ne signifie nullement qu'elles n'aient jamais existées; elles ont pu disparaître depuis ce temps à cause de la dégradation du tronc.

e) La détection d'une période froide après 450 ans AA n'exclut pas le fait que le pergélisol ait pu prendre de l'expansion dans les basses terres plus tôt. Les données radiochronologiques sont insuffisantes à ce sujet. Pendant le XX^e siècle, un réchauffement climatique a engendré une dégradation du pergélisol, plus ou moins importante selon les milieux. L'étude des structures d'âge permet de constater des signes de réchauffement climatique chez les populations forestières (PAYETTE et GAGNON, 1979; Morin, en prép.) et arbustives (Gilbert, en prép.). L'érosion thermique affecte les buttes convexes, reliées à l'aggradation du pergélisol, mais aussi les buttes à sommet plat, reliées en grande partie à la dégradation du pergélisol.

Il faut souligner que ce réchauffement climatique n'est pas suffisant pour entraver la formation actuelle du pergélisol. En effet, on note dans la région une intense activité périglaciaire reliée à une détérioration climatique récente, depuis au moins 1970 (PAYETTE, en prép.). En tenant compte des relations établies dans la répartition du pergélisol en milieu minéral et organique (PAYETTE *et al.*, 1976), le milieu minéral est plus sensible que le milieu organique aux fluctuations du pergélisol. Sur la banquette alluviale, les petites buttes minérales cryogènes semblent être en voie de formation; elles coexistent toutefois avec des mares thermokarstiques, situées dans le prolongement de zones de ruissellement. Un équilibre fragile s'est établi entre les formes pergélisolées et thermokarstiques. Des observations détaillées sur la dégradation du pergélisol en milieu tourbeux ont été faites au Manitoba (THIE, 1974). On a pu noter que depuis 150 ans environ la dégradation du pergélisol est plus importante que son expansion. Une étude plus complète dans la vallée de la rivière aux Feuilles permettrait de préciser l'intensité des processus thermokarstiques contemporains.

CONCLUSION

Les buttes minérales cryogènes des basses terres du cours moyen de la rivière aux Feuilles font partie d'un même système dynamique déterminé, par l'évolution progressive et régressive du pergélisol. Cette évolution suit la trame des événements climatiques actuels et anciens caractérisée par des fluctuations thermiques dont l'incidence sur la formation, l'expansion et la régression du pergélisol provoque des changements écologiques majeurs de l'environnement. Par ailleurs, nous insistons sur le fait que les résultats de la présente étude ne fournissent évidemment pas d'information sur la partie inférieure du pergélisol. L'interprétation paléo-écologique présentée dans ce travail ne peut être confrontée pour le moment avec les données de la palynologie régionale.

Les buttes à sommet plat sont associées à l'évolution régressive du pergélisol. Ce sont des buttes résiduelles formées au cours de périodes d'intense activité thermokarstiques. Les buttes à sommet convexe proviennent du gonflement des sédiments par la croissance des lentilles de glace lors de périodes froides. Elles sont formées à partir d'une surface plane ou ondulée, appartenant ou pas au domaine des buttes à sommet plat. Des buttes convexes auraient pu se former à partir des buttes à sommet plat, notamment au cours de la dernière période froide, les conditions propices à leur formation étant reliées à des changements d'importance du réseau hydrographique. Cette éventualité ne peut être exclue, d'autant plus que nous ne connaissons pas la période d'installation du pergélisol et les conditions climatiques qui ont assuré son évolution. On ne peut écarter à ce propos l'origine polygénétique de certaines formes, comme c'est du reste le cas chez les palses issues de la dégradation d'un plateau palsique; certaines d'entre elles présentent un sommet plat, d'autres un sommet convexe associé au gonflement des sédiments sous-jacents, suite à un changement des conditions hydrologiques du système tourbeux (PAYETTE *et al.*, 1976).

Des travaux récents (BASTIN *et al.*, 1974; PISSART, 1974; SVENSSON, 1975) suggèrent qu'il pourrait exister de nombreux intermédiaires entre les palses et les pingos. Interprétés pendant de nombreuses années comme des vestiges de pingos, les viviers de Hautes-Fagnes de Belgique semblent être les restes de buttes minérales gonflées par la glace de ségrégation (PISSART, 1974). Ces buttes se seraient apparemment formées à une époque où la température moyenne annuelle était à peine inférieure à 0°C, sous un régime de pergélisol discontinu. Ces données contrastent avec celles du Nouveau-Québec, sachant que les palses non boisées les plus méridionales de la baie de James se trouvent au nord de l'isotherme annuel de -3°C (DION-

NE, 1978). Les formes décrites par PISSART (1974) ressemblent à celles de l'Europe du Nord-Ouest et de la Fenno-Scandinavie (CAILLEUX, 1976; MAARLEVELD, 1975; SEPPALA, 1972; SPARKS *et al.*, 1972; SVENSSON, 1975; WATSON, 1971, 1975). L'ensemble de ces formes fossiles semblent se rapprocher davantage des buttes minérales cryogènes, surtout du type à sommet convexe, que des pingos. Cependant, les buttes minérales cryogènes étudiées au Nouveau-Québec se localisent dans des régions où la température moyenne annuelle varie entre -4° et -6°C , au sein de la zone de pergélisol discontinu. Certaines buttes convexes, comme celles de la région étudiée, ont pu se former lorsque le pergélisol avait une répartition continue, notamment au cours des périodes froides des derniers millénaires. Finalement, d'autres types de buttes minérales cryogènes ont déjà fait l'objet d'études dans les Territoires du Nord-Ouest (ZOLTAI et PETTAPECE, 1973, 1974) ou ailleurs en milieu arctique (LUNDQVIST, 1969; CAILLEUX et TAYLOR, 1955). Toutes ces observations font ressortir l'urgence d'une classification et d'une terminologie cohérentes, telles que proposées par MACKAY et BLACK (1973). S'ajoutent à ces formes construites les buttes dégagées par l'activité thermokarstique; les buttes à sommet plat appartiennent à cette catégorie. Elles n'ont cependant aucune parenté avec les baydjarakhs décrits par CZUDEK et DEMEK (1970), pas plus d'ailleurs que les buttes à sommet convexe. La présence actuelle ou ancienne de coins de glace à l'emplacement des dépressions contiguës aux buttes convexes et aux buttes à sommet plat le long de la rivière aux Feuilles n'a pu être confirmée. La stratigraphie des couples dépressions-buttes suggère que les terrains n'ont pas été affectés par des réseaux polygonaux de coins de glace. Les buttes et les dépressions étudiées ne font donc pas partie d'un système alas-baydjarakhs. À cet effet, les hypothèses de LAGAREC (1973) et de GANGLOFF *et al.* (1976) n'ont pu être vérifiées. Une telle morphologie associée à la dynamique des coins de glace et du thermokarst n'a pas encore été mise en évidence au Nouveau-Québec.

REMERCIEMENTS

Nous remercions bien sincèrement M. Jean-Claude Dionne, Environnement-Canada, pour avoir accepté de critiquer le manuscrit. La collaboration de M. Pierre Laisalle du ministère des Richesses naturelles du Québec est très appréciée en ce qui concerne la datation au ^{14}C de quatre échantillons. Sans l'aide dévouée de Mlle Sophie Martel et de MM. Camille Choquette, Paul Comtois, Jean Deshayes et Réjean Gagnon, ce travail n'aurait pu être mené à bonne fin. L'étude a bénéficié de l'appui financier du Centre d'études nordiques de l'université Laval, du Conseil national de la recherche

du Canada et du ministère de l'Éducation du Québec (programme FCAC). Andrée Lavoie, Louise Marcotte et Serge Duchesneau ont confectionné les figures.

RÉFÉRENCES

- ÅHMAN, R. (1977): *Palsar i Nordnorge*, Meddel. Lunds Univ., Geogr. Inst. avhand. 78, 165 p.
- ANNERSTEN, L. J. (1966): Interaction between surface cover and permafrost, *Biul. Perygl.*, 15: 27-33.
- BASTIN, B., JUVIGNÉ, E., PISSART, A., et THOREZ, J. (1974): Étude d'une coupe dégagée à travers un rempart d'une cicatrice de pingo de la Brackvenn, *Ann. Soc. Géol. Belgique*, t. 97: 341-358.
- BROWN, R. J. E. (1970): *Permafrost in Canada*, Univ. of Toronto Press, Toronto, 234 p.
- (1976): *Études du pergélisol au Québec et à Terre-Neuve (Labrador)*, Cons. nat. rech. Can., Div. des recherches sur le bâtiment. Bull. Tech. n° 449, Ottawa, 101 p.
- CAILLEUX, A. (1976): Les pingos quaternaires de France, *Rev. Géogr. Montr.*, 30: 374-379.
- CAILLEUX, A. et TAYLOR, G. (1954): *Cryopédologie, étude des sols gelés*, Actualités scientifiques et industrielles 1203, Expéditions polaires françaises, Missions Paul-Émile Victor IV, Paris, 218 p.
- COMPAGNIE GÉNÉRALE DE GÉOPHYSIQUE (1955): *Abaques de sondage électrique*, Geophysical Prospecting, vol. 3, Suppl. n° 3, 50 p.
- (1963): *Abaques de sondage électrique / Master Curves for Electrical Sounding*, European Ass. of Exploration Geophysicists.
- CZUDEK, T. et DEMEK, J. (1970): Thermokarst in Siberia and its influence on the development of lowland relief, *Quat. Res.*, 1: 103-120.
- DIONNE, J.-C. (1976): Le glacier de la région de la Grande Rivière, Québec subarctique, *Rev. Géogr. Montr.*, 30: 133-153.
- (1978): *Formes et phénomènes périglaciaires en Jamésie*, Québec subarctique, *Géogr. phys. Quat.*, 32: 187-247.
- FILION, L. et PAYETTE, S. (1978): Observations sur les caractéristiques physiques du couvert de neige et sur le régime thermique du sol à Poste-de-la-Baleine, Nouveau-Québec, *Géogr. phys. Quat.*, 31 (1), p. 71-79.
- FROLOV, A. D. (1976): *Elektrischeckhie i ouprougie ovoistva kriogenniek porod*, Nedra, Moscou, 255 p. (en russe).
- GANGLOFF, P., GRAY, J.T. et HILLAIRES-MARCEL, C. (1976): Reconnaissance géomorphologique sur la côte ouest de la baie d'Ungava, Nouveau-Québec, *Rev. Géogr. Montr.*, 30: 339-348.
- GRANBERG, H. B. (1973): Indirect mapping of the snow cover for permafrost prediction at Schefferville, P. Q., *Proc. Second Int. Conf. Permafrost*, North American Contr., U.S. Nat. Acad. Sc. Washington.

- GRAY, J. T. et PILON, J. (1976): Permafrost distribution at Tasiujaq (Leaf Basin) on the south west coast of Ungava Bay, New Quebec, *Rev. Géogr. Montr.*, 30: 367-373.
- HAMELIN, L.-E. et COOK F. A. (1967): *Le périglaciaire par l'image / Illustrated glossary of periglacial phenomena*, Presses de l'Univ. Laval, Travaux et Documents du Centre d'études nordiques, Québec, 237 p.
- HOLMES, G. W., HOPKINS, D. M. et FOSTER, H. L. (1963): Distribution and age of pingos in interior Alaska, *Int. Conf. Permafrost Proc.*, Lafayette, U.S. Nat. Res. Council. Publ. 1287: 88-93.
- LAGAREC, D. (1973): Éléments de la morphologie cryogène du Golfe de Richmond, Nouveau-Québec, *Cah. Géogr. Qué.*, 17: 465-482.
- LAURIOL, B., GRAY, J. T., HÉTU, B. et CYR, A. (1979): Le cadre chronologique et paléogéographique de l'évolution marine depuis la déglaciation dans la région d'Aupaluk, Nouveau-Québec, *Géogr. phys. Quat.*, 33: 189-203.
- LUNDQVIST, J. (1969): Earth and ice mounds: a terminological discussion, in *The Periglacial Environment: Past and Present*, T. L. Péwé, édit., McGill-Queen's Univ. Press, p. 203-215.
- MAARLEVELD, G. (1975): Remnants of frostmounds (Netherlands), *Compte rendu du Colloque de géomorphologie périglaciaire*, Station scientifique des Hautes-Fagnes, Université de Liège, Belgique, p. 1-3.
- MACKAY, J. R. (1962): Pingos of the Pleistocene Mackenzie River delta area, *Geogr. Bull.*, 18: 21-63.
- MACKAY, J. R. et BLACK, R. F. (1973): Origin, composition, and structure of perennially frozen ground and ground ice: a review, *Proc. Second Int. Conf. Permafrost*, North American Contr., U.S. Nat. Acad. Sc., Washington: 185-192.
- MITCHELL, G. F. (1971): Fossil pingos in the South of Ireland, *Nature*, 230: 43-44.
- MULLER, F. (1959): Beobachtungen Über Pingos, *Medd. om Grønland*, 153 (3): 1-127.
- NICHOLSON, F. H. et GRANBERG, H. B. (1973): Permafrost and snow relationships near Schefferville, *Proc. Second Int. Conf. Permafrost*, North American Contr., U.S. Nat. Acad. Sc., Washington: 151-158.
- ORELLANA, E. et MOONEY, H. M. (1972): *Two and three layer master curves and auxiliary point diagrams for vertical electric sounding using Wenner Arrangement*, Intersciencia, Madrid.
- PAYETTE, S. (1976): Les limites écologiques de la zone hémiaïrctique entre la mer d'Hudson et la baie d'Ungava, Nouveau-Québec, *Cah. Géogr. Qué.*, 20: 347-367.
- PAYETTE, S., FILION, L. et OUZILLEAU, J. (1973): Relations neige-végétation dans la toundra forestière du Nouveau-Québec, Baie d'Hudson, *Naturaliste can.*, 100: 493-508.
- PAYETTE, S., LÉGERE, A. et GAUTHIER, R. (1978): *La flore vasculaire de la région du lac Minto*, Nouveau-Québec, Provancheria n° 8, Univ. Laval, Québec, 42 p.
- PAYETTE, S., SAMSON, H. et LAGAREC, D. (1976): The evolution of permafrost in the taïga and in the forest-tundra, western Québec-Labrador Peninsula, *Can. J. For. Res.*, 6: 203-220.
- PAYETTE, S. et GAGNON, R. (1979): Tree-line Dynamics in Northern Québec, *Holarctic Ecology* (sous presse).
- PISSART, A. (1974): Les viviers des Hautes Fagnes sont des traces de buttes périglaciaires. Mais s'agissait-il réellement de pingos? *Ann. Soc. Géol. Belgique*, t. 97: 359-381.
- PORSILD, A. E. (1938): Earth mounds in unglaciated Arctic Northwest America, *Geogr. Rev.*, 28: 46-58.
- PREST, V. K. (1969): *Retreat of Wisconsin and recent ice in North America*, Geol. Surv. Can., carte n° 1257A.
- RYKSWATERSTAAT, the NETHERLANDS (1969): *Standard graphs for resistivity prospecting*, European Ass. of Exploration Geophysicists.
- SAMSON, H. (1975): *Évolution du pergélisol en milieu tourbeux en relation avec le dynamisme de la végétation*, Golfe de Richmond, Nouveau-Québec, thèse de M.Sc., Univ. Laval, Québec.
- SEGUIN, M. K. (1974): État des recherches sur le pergélisol dans la partie centrale de la fosse du Labrador, Québec subarctique, *Rev. Géogr. Montr.*, 28: 343-356.
- (1976): Observations géophysiques sur le pergélisol des environs du lac Minto, Nouveau-Québec, *Cah. Géogr. Qué.*, 20: 327-346.
- SEPPALÄ, M. (1972): Pingo-like remnants in the Peltajarvi area of Finnish Lapland, *Geogr. Ann.*, 54 (ser. A): 38-45.
- SPARKS, B. W., WILLIAMS, R. B. C. et BELL, F. C. (1972): Presumed ground-ice depressions in East Anglia, *Proc. R. Soc. London*, A 327: 329-334.
- SVENSSON, H. (1975): Palsas and pingos in the Scandinavian countries, *Compte rendu du Colloque de géomorphologie périglaciaire*, Station scientifique des Hautes-Fagnes, Univ. de Liège, Belgique, p. 16-26.
- THIE, J. (1974): Distribution and thawing of permafrost in the southern part of the discontinuous permafrost zone in Manitoba, Arctic, 27: 189-200.
- THOM, B. G. (1969): New permafrost investigations near Schefferville, P. Q., *Rev. Géogr. Montr.*, 23: 317-327.
- WASHBURN, A. L. (1973): *Periglacial processes and environments*, Edward Arnold, Londres, 320 p.
- WATSON, E. (1971): Pingos in Central Wales, *Geol. J.*, 7: 381-392.
- (1975): Remains of pingos in the British Isles, *Compte rendu du Colloque de géomorphologie périglaciaire*, Station scientifique des Hautes-Fagnes, Univ. de Liège, Belgique, p. 10-15.
- ZODHY, A. A. R. (1973): A computer program for the automatic interpretation of Schlumberger sounding curves over horizontally stratified media, *NTIS Publ.*, n° Pb 232-703, U.S. Dept. Interior, p. 1-32.
- (1974a): A computer program for the calculation of Schlumberger sounding curves by convolution, *NTIS Publ.*, n° Pb-232-056, U.S. Dept. Interior, p. 1-14.
- (1974b): Use of Dar Zarrouk curves in the interpretation

- of vertical electrical sounding data, *U.S. Geol. Surv. Bull.*, n° 1313-D: 1-43.
- (1975): Automatic interpretation of Schlumberger sounding curves using modified Dar Zarrouk functions, *U.S. Geol. Surv. Bull.*, n° 1313-E: 1-41.
- ZOLTAI, S. C. (1972): Palsas and peat plateaus in Central Manitoba and Saskatchewan, *Can. J. For. Res.*, 2: 291-302.
- (1974): Tree distribution on perennially frozen earth hummocks, *Arct. Alp. Res.*, 6: 403-411.
- (1975): Perennially frozen peatlands in the Western Arctic and Subarctic of Canada, *Can. J. Earth Sc.*, 12: 83-143.
- ZOLTAI, S. C. et PETTAPECE, W. W. (1973): *Studies of vegetation, landform and permafrost in the Mackenzie valley: Terrain, vegetation and permafrost relationships in the Northern part of the Mackenzie valley and Northern Yukon*, Environmental-Social Committee, Northern Pipelines, Task Force on Northern Oil Development, Report n° 73-4, Ottawa, 105 p.
- ZOLTAI, S. C. et TORNACAI, C. (1971): Properties of a wooded palsa in northern Manitoba, *Arct. Alp. Res.*, 3: 115-129.