

Article

« L'enneigement et la dynamique du pergélisol : l'exemple du détroit de Manitounuk, Québec nordique »

Yann Roche et Michel Allard

Géographie physique et Quaternaire, vol. 50, n° 3, 1996, p. 377-393.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/033107ar>

DOI: 10.7202/033107ar

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

L'ENNEIGEMENT ET LA DYNAMIQUE DU PERGÉLISOL : L'EXEMPLE DU DÉTROIT DE MANITOUNUK, QUÉBEC NORDIQUE

Yann ROCHE* et Michel ALLARD, Centre d'études nordiques et Département de géographie, Université Laval, Sainte-Foy, Québec G1K 7P4.

RÉSUMÉ Le régime nival d'un plateau de pergélisol situé le long du rivage du détroit de Manitousuk, au Québec subarctique, a été étudié en détail pendant plusieurs hivers consécutifs. Ce régime nival dépend surtout du régime éolien, lequel détermine le patron d'accumulation de la neige en conjonction avec les conditions de surface, notamment le relief et le couvert végétal. Un modèle de potentiel d'enneigement, établi en fonction des pentes, des orientations et de la forme des versants, ainsi que du couvert végétal, est proposé. Ce modèle, entériné à partir des valeurs observées, a permis de faire ressortir le lien entre la végétation arbustive et le régime éolien et leur effet sur les variations locales du couvert nival. On peut donc envisager de produire, à partir d'éléments tels que les données sur les vents, la cartographie du couvert végétal et la modélisation de la topographie, un modèle de prévision de l'enneigement dans les régions subarctiques devenues instables en raison de l'équilibre thermique précaire du pergélisol et de la dynamique des populations végétales.

ABSTRACT *Snow cover regime and permafrost dynamics: The example of the Manitousuk Strait, Northern Québec.* The snow cover regime over a permafrost plateau located along the shore of the Manitousuk Strait was monitored in detail for several winters. The pattern of snow accumulation and distribution depends essentially upon wind direction and speed, in conjunction with surface conditions, particularly topography and vegetation cover. A snow accumulation potential model was built, based on slope, aspect and shape, and on structure of the vegetation cover. Results of this model illustrate the strong link between winds and vegetation cover and their combined impact on snowdrifting. Using wind speed and direction data as well as a detailed mapping of vegetation cover, it is useful to apply such an accumulation model in subarctic regions where permafrost is highly sensitive to any modification of the surface conditions.

ZUSAMMENFASSUNG *Schneebeziehungen und Dynamik des Permafrostbodens: Das Beispiel der Meerenge von Manitousuk, nördliches Québec.* Man hat die Schneebeziehungen auf einem längs des Ufers der Meerenge von Manitousuk gelegenen Permafrostboden-Plateau im subarktischen Québec während mehrerer aufeinanderfolgenden Winter im Detail studiert. Dies System der Schneeakkumulation ist vor allem vom Windsystem abhängig, welches zusammen mit den Oberflächenbedingungen, vor allem dem Relief und der Pflanzendecke, das Muster der Schneeakkumulation bestimmt. Es wird ein Modell der potentiellen Schneeakkumulation vorgeschlagen, das in Abhängigkeit von den Hängen, der Orientierung und der Form der Abhänge sowie der Pflanzendecke erstellt wurde, dies aufgrund der beobachteten Werte erstellte Modell hat es ermöglicht, die Beziehung zwischen der Buschvegetation und dem Windsystem und ihre Auswirkung auf die örtlichen Variationen der Schneedecke hervorzuheben. Es ist also möglich, ausgehend von Elementen wie den Daten zu Winden, der Kartographie der Pflanzendecke und der Modellierung der Topographie, ein Modell zur Voraussage der Schneeakkumulation in den subarktischen Regionen zu erstellen, welche wegen des unsicheren thermischen Gleichgewichts des Permafrostbodens und der Dynamik der Vegetationspopulationen schwankend geworden sind.

INTRODUCTION

Le pergélisol et le régime thermique du terrain en un site donné dépendent étroitement du climat. Cependant, les facteurs climatiques responsables du régime thermique interagissent de façon complexe entre eux et à travers la surface du sol. En effet, les températures de l'air, le bilan radiatif et les précipitations agissent de façon combinée sur une surface dont les propriétés dépendent du couvert végétal, de l'humus, de l'humidité, de la microtopographie et de la texture du sol (Lunardini, 1991 ; Williams et Smith, 1989). En plus de ces facteurs, le régime d'accumulation et l'épaisseur de la neige jouent un rôle prépondérant car ils limitent les pertes de chaleur, amortissant ainsi l'effet du froid atmosphérique dans le sol. Dans les régions subarctiques où les précipitations solides sont importantes et les températures moyennes annuelles de l'air relativement proches du point de congélation, les variations de la répartition du couvert nival vont jusqu'à régir la répartition spatiale des zones de pergélisol et des secteurs non gelés en milieu de pergélisol discontinu (Thom, 1969 ; Nicholson, 1976, 1978, 1979 ; Lévesque *et al.*, 1986, 1988). La répartition inégale de la neige au sol est même le facteur clé lié à la création et au maintien de formes périglaciaires très répandues comme les buttes cryogènes et les palses qui ne prennent naissance que dans les secteurs quasi dépourvus de couvert nival (Seppälä, 1990 ; An et Allard, sous presse). La répartition du couvert de neige est intimement liée à la topographie, laquelle permet l'accumulation de la neige arrachée au sol et transportée par le vent dans les dépressions du relief, ainsi qu'aux structures végétales qui ralentissent la vitesse des vents et favorisent la sédimentation. Des liens généraux entre la végétation et l'épaisseur accumulée de neige au sol ont déjà été établis au Québec nordique (Payette et Lagarec, 1972 ; Filion et Payette, 1976, 1978, 1982 ; Granberg, 1973, 1988).

Pour mieux comprendre et éventuellement prévoir l'enneigement différentiel en relation avec la répartition du pergélisol, une approche de modélisation qui tient compte du relief et du couvert végétal comme étant les facteurs dominants de l'enneigement au sol a été mise au point. Les résultats de ce modèle, appliqués à un plateau de pergélisol typique, sont comparés à des mesures réelles prises à la fin de deux hivers successifs, en avril, soit juste avant le début de la fonte. Des observations faites sur l'enneigement à l'automne, ainsi que sur la densité et la stratigraphie du couvert nival dans une aire de grande accumulation permettent par ailleurs de mieux comprendre la dynamique de l'enneigement et le rôle thermique de la neige. Finalement, l'influence de la dynamique modélisée sur les profils thermiques du pergélisol et sur le thermokarst est démontrée.

LE SITE D'ÉTUDE

MORPHOLOGIE

Le territoire d'analyse est situé au Québec nordique, à près de 50 km au nord-est du village de Kuujuaaraapik (fig. 1). La région est caractérisée par un climat subarctique et par de fortes influences maritimes, ce qui se traduit par des étés frais (la moyenne du mois d'août à Kuujuaaraapik est de 10,6°C) et

des hivers rigoureux (moyenne de janvier : -22,8°C). Les températures moyennes annuelles, mesurées sur 30 ans, sont de -4,3°C (Wilson, 1968). La proximité de la mer d'Hudson, dont la partie sud-est est totalement prise dans les glaces de cinq à six mois par an, inhibe en partie les précipitations hivernales. Environ 60 % des précipitations solides, ou approximativement 25 cm, tombent en novembre et décembre, avant que la banquise n'établisse son emprise. Dans la région, le pergélisol est sporadique à l'intérieur des terres, mais il est discontinu sur le littoral même (Allard et Séguin, 1987).

Le site à l'étude est constitué d'un plateau de pergélisol d'une hauteur maximale de 6 m, mesurant environ 200 m sur 160 m (fig. 2). Localisé sur le littoral du détroit de Manitounuk, le site fait partie d'une série de plateaux et de buttes cryogènes formant le long du littoral un chapelet d'îlots de pergélisol. Ces formes périglaciaires se sont toutes développées dans des limons argileux de la Mer de Tyrrell, portant parfois une couverture discontinue et très mince (quelques décimètres) de sables d'émersion (Dionne, 1978 ; Michaud *et al.*, 1994 ; Séguin et Allard, 1984). Les buttes et les plateaux de pergélisol ne portent aucune couverture tourbeuse. De nombreuses mares de thermokarst leur sont associées, surtout vers l'intérieur des terres et sous couvert forestier. Les limons pergélisolés sont riches en glace de ségrégation, soit une moyenne de 40 % par volume. Dans le plateau étudié, le pergélisol atteint de 14 à 16 m de profondeur, selon des forages mécaniques et des mesures thermiques (Caron, 1995). Compte tenu du taux d'émersion de la côte de l'ordre de 1 m par siècle (Allard et Tremblay, 1983 ; Bégin *et al.*, 1993) et de la localisation en marge de l'estran actuel, le pergélisol ne peut guère être plus vieux que 150 à 200 ans (Allard *et al.*, sous presse).

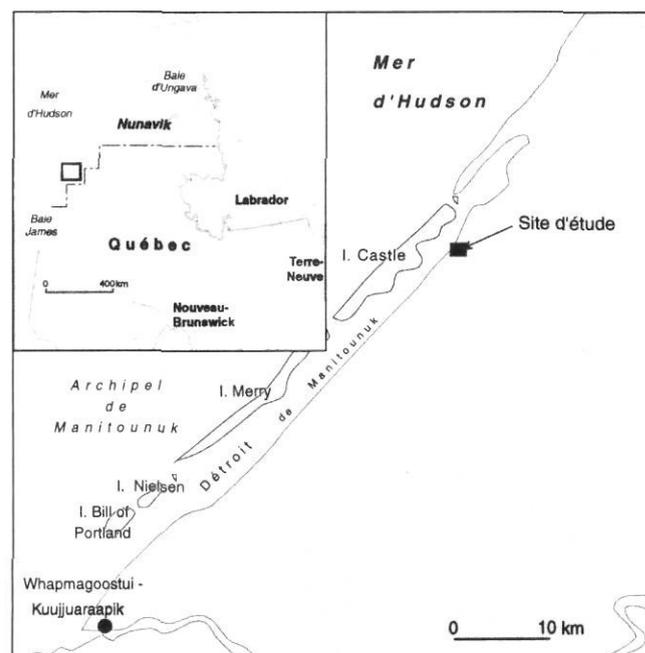
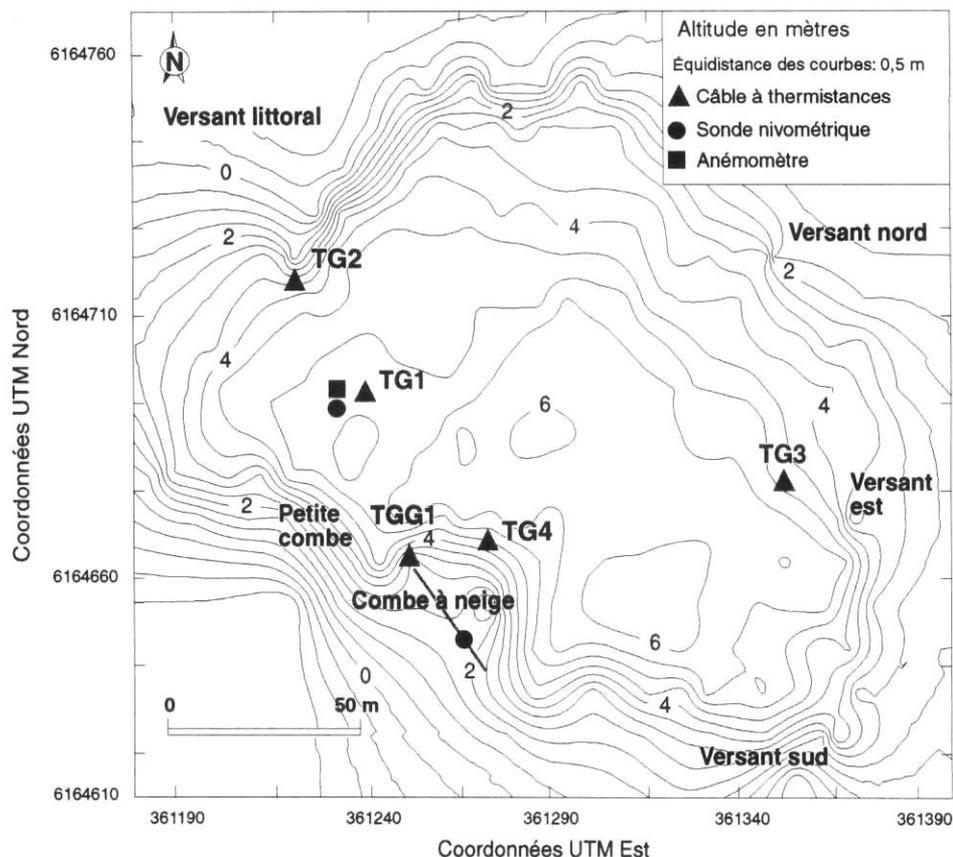


FIGURE 1. Localisation du site étudié.

Location of the study site.

FIGURE 2. Topographie du plateau et emplacement des instruments de mesures thermiques et nivales.

Topographic map of the plateau and location of the instruments for thermal and snow measurements.



Le sommet du plateau, relativement plat dans l'ensemble, présente quelques ondulations de 50 cm à 1 m de dénivellé et quelques sillons évasés et peu profonds (30 à 70 cm). Les versants sud et sud-ouest sont abrupts et découpés de festons qui constituent des combes à neige (Mathieu et Payette, 1987), tandis que les versants est et nord-est sont en pente douce (fig. 2). Le versant littoral, attaqué par les vagues de tempête, est caractérisé par une falaise instable.

ÉLÉMENTS DU RÉGIME THERMIQUE DU PERGÉLISOL

Durant la période des travaux de terrain, quatre câbles à thermistances, identifiés TG1, TG2, TG3 et TG4 ont fourni des températures à la surface du sol et dans le pergélisol (fig. 2). Le câble TG1, relié à un système d'acquisition automatique de données et ayant fonctionné de 1988 à 1993 (avec quelques interruptions et un arrêt complet durant l'hiver 1991-1992 en raison du piétinement par un troupeau de caribous), permet de décrire le régime thermique en un point du plateau dans un secteur dépourvu de neige. Les thermistances employées ont une précision supérieure à 0,1°C. Il s'agit de thermistances Fenwald UUB31J1, calibrées dans un bain cryostatique. Les câbles avaient été installés en août 1987 ; les perturbations thermiques liées aux forages hydrauliques ont eu le temps de se résorber avant le début de cette étude.

Présentées à la figure 3a sous forme de moyennes quotidiennes pour la période du 15 juillet 1990 au 7 mai 1991, les courbes de températures montrent clairement la pénétration et l'atténuation de l'onde de froid hivernale avec la profon-

deur, en réponse quasi directe aux variations thermiques de l'air et de la surface. Le mollisol à ce point de mesure atteint 90 cm d'épaisseur vers la fin du mois d'août. La thermistance située à 50 cm de profondeur enregistre une longue période zéro au début de l'hiver avant le changement de phase de l'eau du mollisol. Un effet comparable, c'est-à-dire une stagnation du profil thermique à quelques dixièmes de degrés sous 0°C, se fait sentir jusqu'à 2 m de profondeur pendant plusieurs semaines. Ce délai correspond au temps requis pour le regel de la fraction d'eau non gelée dans le pergélisol. En effet, les limons peuvent contenir jusqu'à 15-20 % d'eau à des températures de l'ordre de -1°C (Fortier *et al.*, 1991 ; Haoulani *et al.* 1993).

Les autres câbles, non automatisés, fournissent des lectures ponctuelles que l'on retrouve à la figure 3b. Ces profils instantanés traduisent des conditions d'enneigement très différentes. En août, les températures près de la surface sont similaires d'un point à l'autre, quoique le câble TG3 soit un peu plus frais, probablement parce qu'il est situé à l'ombre de quelques arbres. Les profils de mars et d'avril montrent un net décalage entre TG2, non enneigé et TG3 où l'on observe un couvert de neige de 30 à 40 cm. Il en résulte que TG3 conserve un profil un peu moins froid jusqu'à 10-12 m de profondeur. Le profil du câble TG4, implanté à mi-versant dans la grande combe à neige (fig. 2), ne varie guère, si ce n'est juste sous la surface du banc de neige qui atteint un mètre d'épaisseur à cet endroit. Entre 12 et 16 m de profondeur, les graphiques de la figure 3b traduisent des

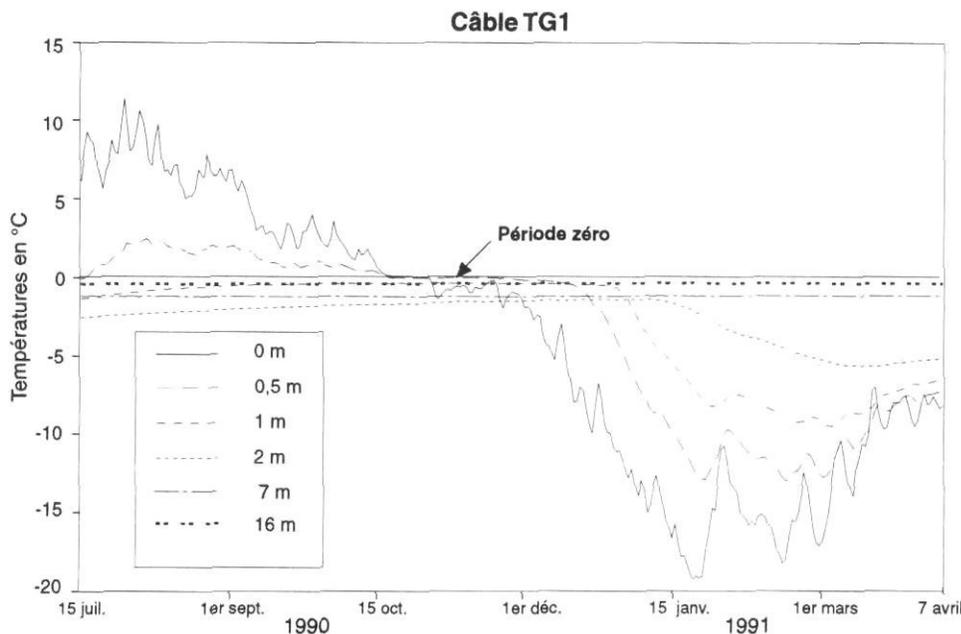


FIGURE 3a. Courbes de température à différentes profondeurs au site TG1. Les valeurs représentées sur le graphique sont des moyennes quotidiennes.

Temperature curves at various depths in TG1. Values on the graph are daily averages.

oscillations de faible amplitude (moins de $0,6^{\circ}\text{C}$), vraisemblablement parce que la thermistance est proche du point de congélation et influencée par l'humidité ambiante. L'ensemble du profil TG4, dont la température est voisine de 0°C de 2 à 16 m, montre que le pergélisol ne répond plus aux sollicitations climatiques dans la combe à neige. La masse du pergélisol n'est plus en équilibre avec le climat et subit une dégradation, laquelle est cependant ralentie à cause de la chaleur latente de fusion de l'abondante glace de sol et des pertes de chaleur vers la masse plus froide du centre du plateau. L'ensemble des câbles à thermistances reflète donc l'important rôle des conditions générales d'enneigement sur le régime thermique du pergélisol.

Alors qu'en 1988-89 et 1989-90, les températures moyennes de l'air étaient respectivement de $-7,85^{\circ}\text{C}$ et de $-5,40^{\circ}\text{C}$, celle de la surface (thermistance située au contact de la couverture de mousse et du sol minéral) au site très peu enneigé de TG1 a varié entre $-1,80^{\circ}\text{C}$ et $-2,18^{\circ}\text{C}$.

INSTRUMENTATION ET MESURES DU COUVERT NIVAL

Les modes d'accumulation de la neige sur le plateau de pergélisol et ses versants ont été observés au cours de cinq visites hivernales sur le site. La visite de novembre 1990 a permis de constater la façon dont se répartissait le couvert neigeux au cours de la période charnière, qui va de la fin octobre au début décembre, durant laquelle surviennent 60 % des précipitations nivales (Filion et Payette, 1976). Les observations effectuées en mars 1988, en avril 1990 et 1991 ainsi qu'en avril 1993, sont plus nombreuses et variées que les précédentes. Elles permettent de dégager une compréhension générale de la répartition du couvert nival en fonction du relief et de la végétation. Le rôle des arbres et des arbustes, individuels ou en peuplements, a même pu être observé à l'occasion de tempêtes survenues lors des visites, ce qui a permis la conception de la figure 4, qui schématise

la relation neige-relief. Les versants les plus exposés sont comblés dès novembre, la neige ayant tendance à être compactée par le vent, surtout dans les couches superficielles du couvert nival. Au ras de la surface du plateau, le vent, perturbé par les obstacles qu'il rencontre, forme de légères et éphémères accumulations dans l'axe du flux par rapport à ces obstacles. Dans la combe, sous le vent, un effet de « vortex » apparaît, provoquant de petits tourbillons qui forment une petite corniche qui progresse latéralement. Par la suite, la combe est progressivement saturée et l'effet de ces tourbillons cesse d'être visible.

Une grille de 10 m de côté marquée de piquets, installée durant l'été 1990, a servi de référence pour les mesures d'altitude et d'enneigement. À chacun des points, l'altitude a été mesurée avec un niveau électronique de marque GDD™. Cette grille a servi à établir le plan topographique du plateau (fig. 2). Pour améliorer la qualité de l'interpolation ultérieure, des mesures supplémentaires ont été prises à chaque rupture de pente importante rencontrée le long des axes de mesure principaux. À l'automne 1990, des mesures d'épaisseur et de densités du couvert nival ont été effectuées avec une sonde Mount Rose là où il y avait déjà des accumulations de neige, donc surtout sur les versants. En avril 1990 et 1991, les mesures ont été prises à tous les points de la grille, de façon à dresser la carte de l'enneigement lorsque, à la fin de l'hiver, la redistribution éolienne de la neige a permis le comblement des dépressions selon un profil aérodynamique (fig. 4) (Filion et Payette, 1976).

Un câble muni de thermistances (TGG1) et relié à un enregistreur de données a été déployé en travers de la grande combe à neige et enfoui dans l'humus. Le but recherché était de mesurer la température de la surface sous différentes épaisseurs de neige, estimées à partir de la hauteur des arbustes au niveau de chacune des thermistances. Les valeurs fournies par TGG1 ainsi que les épaisseurs de neige correspondantes apparaissent à la figure 12 et au tableau I. De plus,

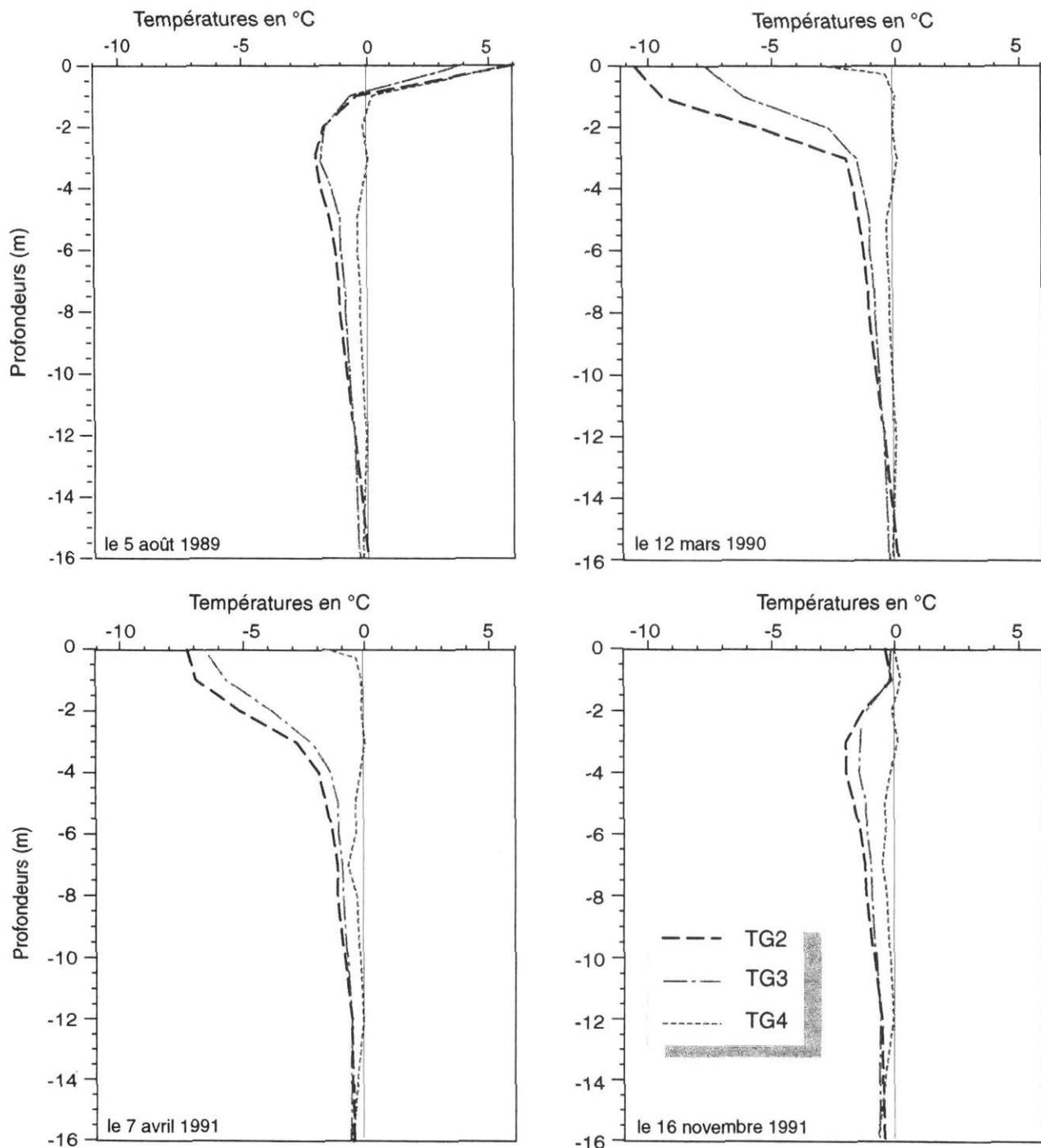


FIGURE 3b. Profils verticaux de températures à TG2, TG3 et TG4.

Temperature profiles for cables TG2, TG3 and TG4.

deux sondes nivométriques (UDG01 de Campbell Scientific™) ont été fixées, la première sur le dessus du plateau, à TG1, la seconde dans le creux de la combe à neige. Enfin, lors des visites en avril 1990 et 1991, des coupes ont été creusées à travers le banc de neige de la grande combe afin de détecter des phases d'accumulation, d'érosion, de fonte et de sublimation au cours de l'hiver.

Un anémomètre, installé à trois mètres de hauteur, à proximité du câble TG1, montre que les vents soufflent en

dominance du secteur sud-ouest avec des vitesses moyennes quotidiennes de 3-4 m/s (fig. 5). Quelques périodes de forts vents (5-10 m/s) surviennent en automne et au début de l'hiver. Durant l'hiver, les tempêtes peuvent s'accompagner de vents de 10 m/s provenant du sud-ouest, du sud-sud-est et du nord-est.

La surface du plateau peut donc être balayée en hiver de presque toutes les directions, sauf directement du sud-est, secteur où s'étend la forêt d'épinettes blanches (*Picea*

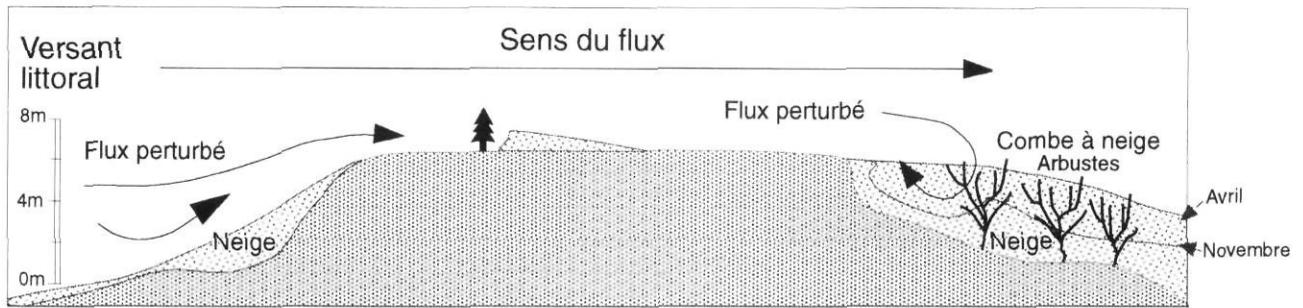


FIGURE 4. Relations générales entre le vent, la topographie et les arbustes.

General relationships between wind, topography and shrub cover.

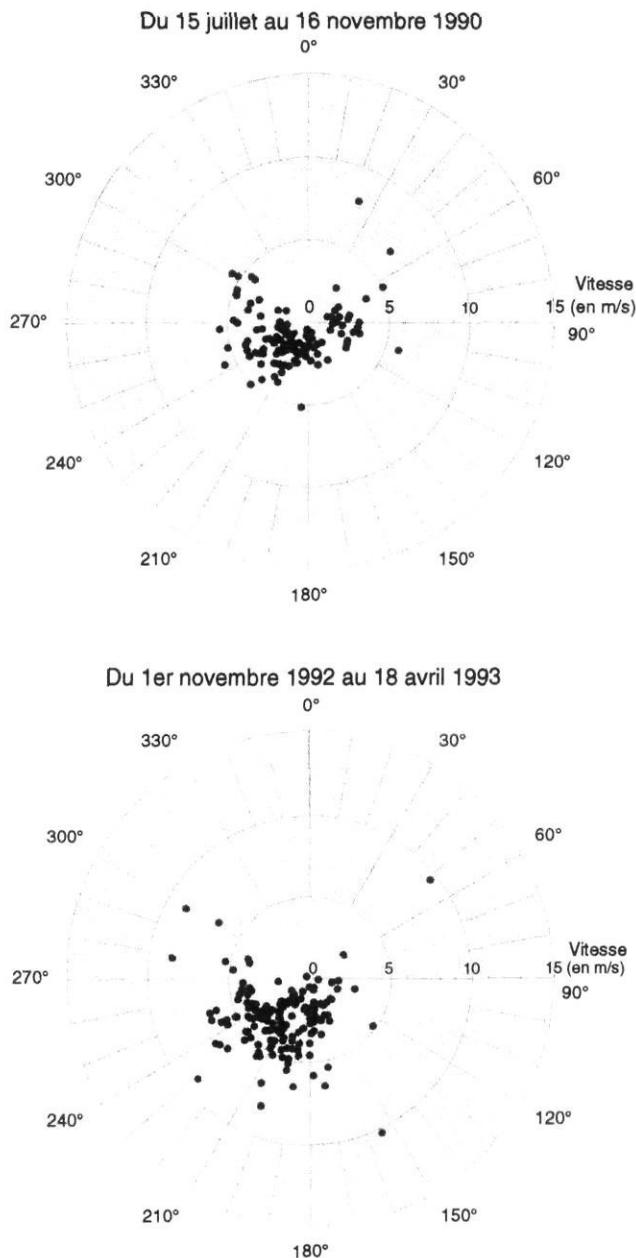


FIGURE 5. Orientation et vitesse des vents. Chacun des points représente une moyenne journalière.

Wind speed and direction. Each point represents a daily average.

glauca), les vents ont donc tendance à déplacer la neige depuis les espaces côtiers ouverts vers la forêt.

RÉSULTATS

LE RÉGIME D'ACCUMULATION

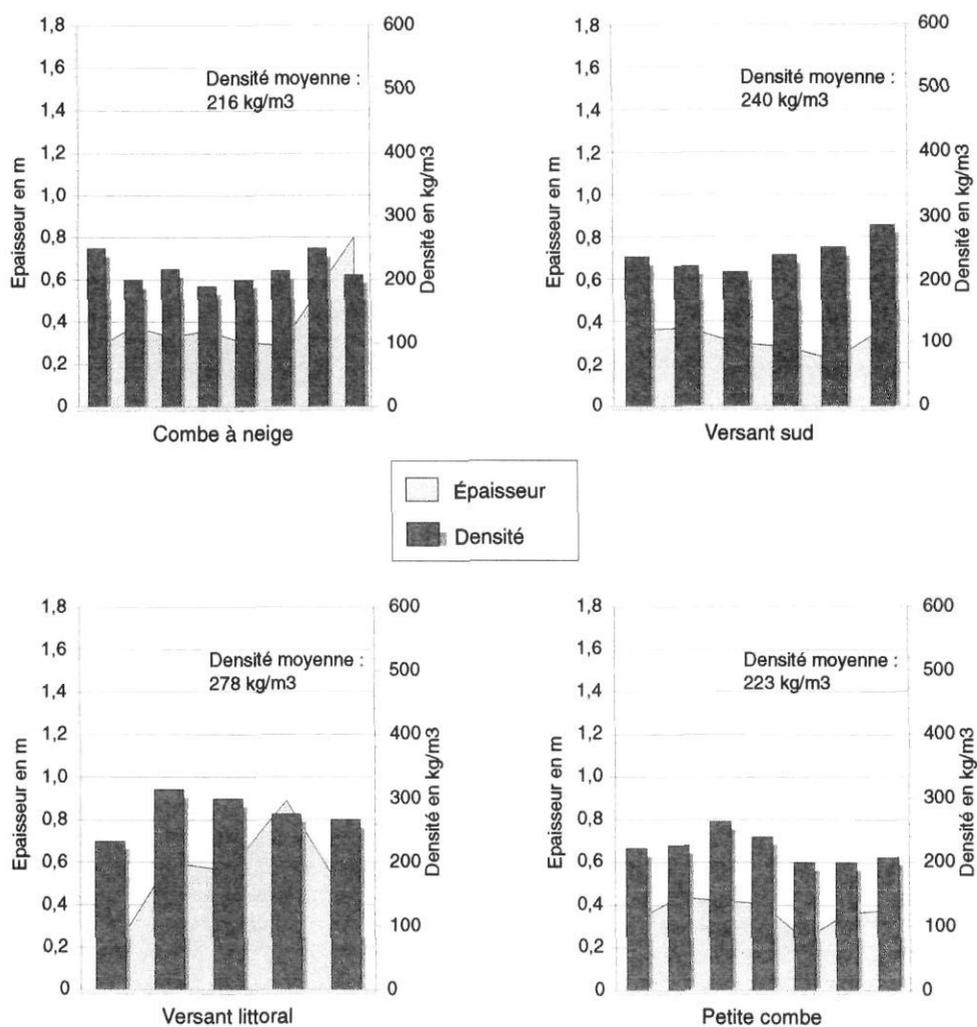
Les figures 6 à 11 décrivent différents aspects du régime d'accumulation nivale du plateau. Dès la mi-novembre, les versants recueillent d'importantes quantités de neige (fig. 6 et 7). Le versant littoral est ainsi déjà comblé à 75 % sous l'effet des vents d'ouest qui plaquent la neige contre la micro-falaise, ce qui représente une épaisseur moyenne d'environ 80 cm. Le versant sud, boisé, en retient presque autant, tandis que les deux combes qui échancrent le flanc sud-ouest ont déjà recueilli beaucoup de neige sans encore être remplies. La quantité de neige y doublera presque au cours de la saison froide (fig. 7). Au début de l'hiver, le sommet et le versant nord sont presque dépourvus de neige. La base du versant nord recueillera plus de 80 cm de neige au cours de l'hiver, mais le sommet restera virtuellement dénudé.

Les figures 6 et 7 décrivent les variations d'épaisseur d'un versant à un autre et au cours de l'hiver, plus précisément de novembre 1990 à avril 1991. On peut aussi voir l'évolution des densités et la localisation des zones où le couvert neigeux est le plus dense. La distribution spatiale des densités évolue au cours de l'hiver. En novembre, c'est sur le versant littoral que l'on retrouve les plus fortes densités, sous l'effet de la compaction éolienne (fig. 6). En avril, c'est dans la grande combe à neige que les densités sont maximales, phénomène attribuable aux métamorphismes destructif et de fusion qui se déclenchent durant l'hiver au sein des importantes accumulations neigeuses. Quant à la densité globale (mesurée sur l'épaisseur totale) de la couverture nivale, elle augmente du début à la fin de l'hiver, passant de l'ordre de 210-280 kg/m³ à 320-370 kg/m³. Cette densification générale résulte du métamorphisme survenu après dépôt et de la présence de couches compactées par le vent et de croûtes de glace engendrées par les périodes de réchauffement et les pluies occasionnelles (Roche, 1994). En termes de régime thermique, cette densification a pour effet de réduire le pouvoir isolant d'une importante couverture nivale.

Les données fournies par les deux sondes nivométriques illustrent clairement la différence de régime nivale entre le sommet du plateau et le creux de la combe à neige (fig. 8), même si la sonde du sommet a été détruite par les forts vents du

FIGURE 6. Épaisseurs et densité de neige sur les versants du plateau, 15-17 novembre 1990. (sondages individuels). Chacune des colonnes représente une mesure à la sonde Mount Rose.

Snow depth and density on the slopes of the plateau, November 15-17, 1990 (single probings). Each column represents one Mount Rose measurement.



28 décembre 1990. Le tapis nival sur le plateau connaît à l'intérieur de quelques jours, voire en quelques heures, des périodes d'accumulation et d'érosion mais il ne dépasse jamais de manière durable 15 cm d'épaisseur. Les précipitations accompagnées de vents qui y ont déposé 10-15 cm de neige le 31 novembre en ont laissé 40 cm dans le fond de la combe, ce qui est très révélateur du régime d'enneigement du plateau. La déflation survenue dans les heures suivantes est à l'origine d'une accumulation supplémentaire dans la combe.

Les observations sur le site ont permis de constater que le schéma dépôt-érosion demeurait inchangé au cours de l'hiver (fig. 9). La neige continue de s'accumuler par à-coups dans la combe, au gré des tempêtes et des périodes venteuses (cinq durant l'hiver 1990-1991), ces accumulations étant entrecoupées de périodes à peu près stables. Probablement en raison de certaines variations dans la direction des vents, la combe connaît aussi des périodes d'érosion pouvant emporter 10 à 20 cm de neige. Cependant, ces fluctuations apparentes de la hauteur de la congère peuvent aussi être attribuables à d'autres causes comme des périodes de sublimation, de compaction, de fonte lors de pluies et, plus

probablement, à la migration de rides et de micro-dunes dans le champ du capteur sonique de l'instrument.

La dynamique d'enneigement se manifeste aussi dans la stratigraphie de la congère (fig. 10). En effet, on observe qu'elle est constituée d'une alternance de couches de neige propre associées à des chutes importantes et de couches de neige dites d'érosion où se mêlent brindilles et débris de lichens prélevés à la surface du plateau. Quelques croûtes glacées, attribuables aux pluies ou à de brèves périodes de fonte ou de sublimation, sont intercalées dans la séquence. Vers le bas du profil, on trouve une couche définie dans la littérature sous le terme de *depth hoar*, neige métamorphosée par compaction et sublimation, au contact du sol. Cette couche consiste en de gros cristaux lâches et renferme de nombreuses poches d'air ; elle est supportée par les taillis denses des branches basses des arbustes. Provenant du réchauffement basal causé par les pertes de chaleur du sol sous-jacent, sa densité relativement faible contribue au rôle isolant du couvert nival.

Compte tenu du métamorphisme basal, il est hasardeux d'associer les couches observées avec les périodes d'accumulation, surtout au début de l'hiver. Cependant, on peut

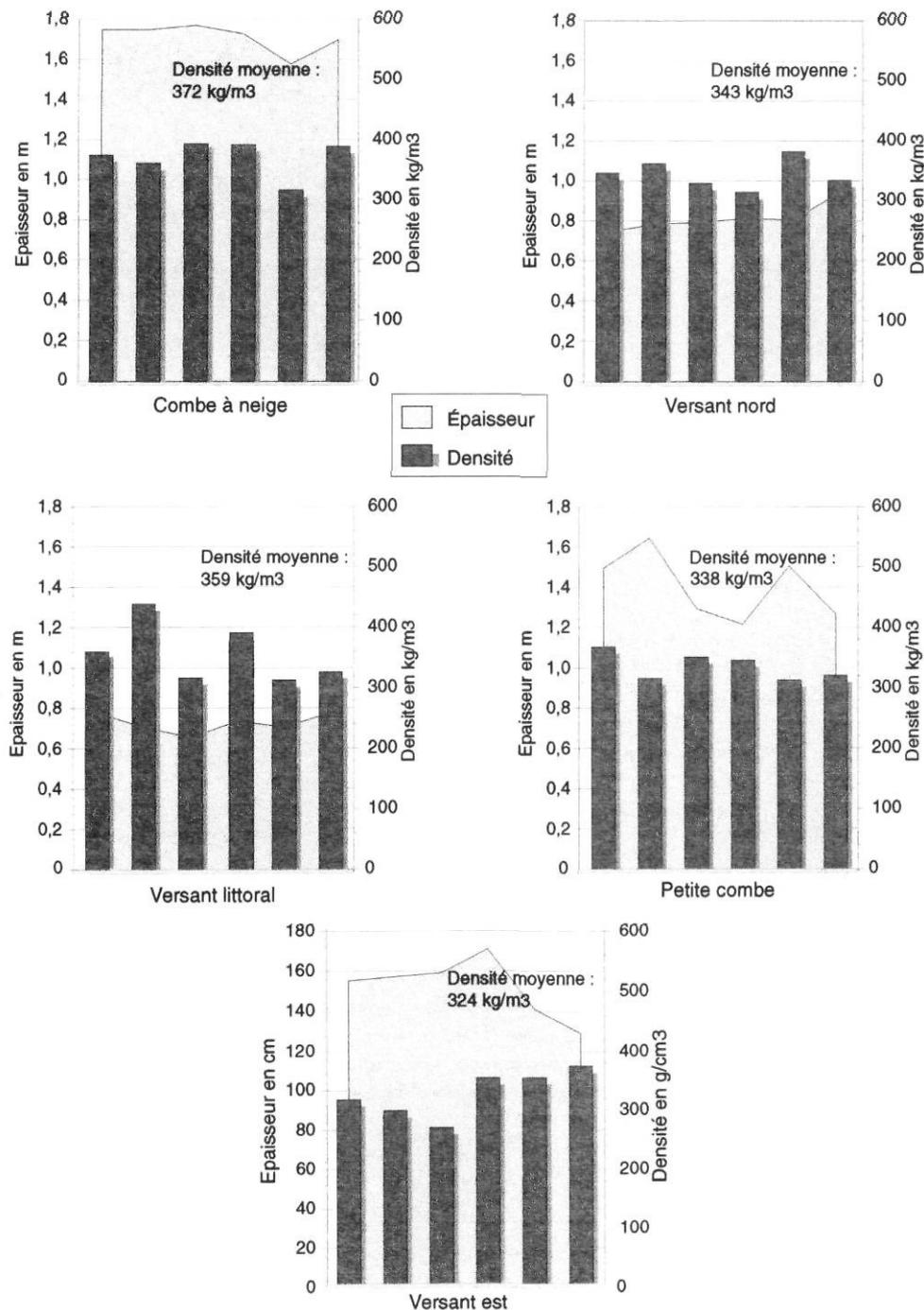


FIGURE 7. Épaisseurs et densité de neige sur les versants, mi-avril 1991. Chacune des colonnes représente une mesure à la sonde Mount Rose.

Snow depth and density on the slopes of the plateau, mid-April 1991. Each column represents one Mount Rose measurement.

penser que la période d'accumulation n° 3 de la figure 8, qui couvre la première moitié de janvier, correspond à une phase d'érosion du couvert nival environnant. Durant cette période, l'épaisseur de la couche de neige passe en effet de 98 à 121 cm. Les périodes d'accumulation 4 et 5 traduisent plutôt des chutes de neige fraîche (fig. 8 et 10).

Les isopaches (lignes d'égale épaisseur) du couvert nival montrent que le sommet, près du littoral et presque dépourvu de végétation, ne recueille finalement que très peu de neige. Vers l'intérieur où les arbres sont plus abondants et le relief légèrement accidenté s'accumulent de 20 à 30 cm de neige. Les grandes concentrations se situent donc sur les versants

et dans les dépressions périphériques, comme le confirme la figure 11. Pour faciliter la lecture de la figure, les épaisseurs inférieures à 1 mètre ont été tracées en gris, soulignant la distribution périphérique des accumulations importantes.

La figure 12 donne les températures le long du câble TGG1 dans la combe à neige à proximité de la surface du sol et en fonction de la hauteur des arbustes, cette dernière constituant une approximation du couvert nival à la fin de l'hiver. Le sol est complètement protégé des fluctuations thermiques de l'air quand la hauteur des taillis dépasse 60 cm. Les valeurs extrêmes et les moyennes enregistrées indiquent qu'à partir de cette hauteur la température moyenne annuelle de la surface

FIGURE 8. Mesures en continu du couvert nival sur le plateau et dans la combe à neige, hiver 1990-1991. L'épaisseur critique de 60 cm est dépassée dès la première semaine de décembre.

Continuous measurements of snow cover on the plateau and in the snow patch, winter 1990-1991. The critical depth of 60 cm is reached by the first week of December.

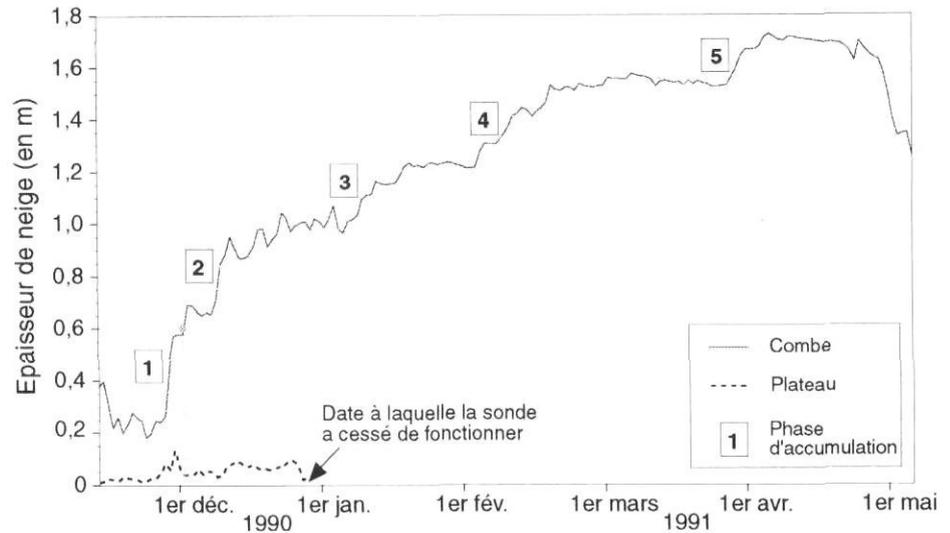


FIGURE 9. Enneigement du plateau. En haut : formes en « queue de comète » sur le sommet du plateau (avril 1990) ; au centre : sommet du plateau entièrement déneigé (novembre 1990) ; en bas : vue du versant du côté du littoral (avril 1990).

Snow cover on the plateau. Upper: trailing spit landforms on top of the plateau (April 1990); centre: top of the plateau without any snow cover (November 1990); bottom: view of the littoral side.

du sol est égale ou supérieure à 0°C (tabl. I). Dans ces conditions le pergélisol ne peut se maintenir ni se former. Les accumulations nivales de 70 à 90 cm propres à ces taillis sont d'ailleurs considérées comme un « seuil limite » inhibant de façon générale la formation de pergélisol au Québec subarctique (Thom, 1969 ; Filion et Payette, 1976 et 1978 ; Nicholson, 1978 ; Desrochers et Granberg, 1988).

MODÉLISATION DU RÉGIME NIVAL

1. Approche empirique

La modélisation a été entreprise avec l'intention de reproduire spatialement l'enneigement en faisant interagir les variables de terrain pertinentes, à savoir le relief et le couvert végétal. Les variables spatialisées sont semi-quantitatives et reposent sur des divisions scalaires (classes de couverture végétale, de pente, d'orientation) définies selon les seuils critiques établis à partir des mesures de terrain. La confrontation du résultat obtenu avec la carte des mesures réelles d'enneigement permet de comprendre les causes d'erreur, de tirer des interprétations supplémentaires et de mieux cerner la complexité de la dynamique nivale.

Les variables considérées comme pouvant avoir un effet sur l'enneigement sont de deux ordres : 1) les facteurs topographiques : pente, orientation et forme des versants ; 2) les types de végétation. Chacune des variables a été divisée en classes dont les valeurs ont été spatialisées dans le logiciel IDRISI (Eastman, 1992) selon une taille de pixel de 1 m².

Les variables d'ordre topographique ont été dérivées à partir des mesures de nivellement réalisées le long de la grille de terrain. Les classes de pentes obtenues (fig. 13a), d'abord réparties selon leur histogramme de fréquences, ont ensuite été réduites au nombre de quatre quant à leur incidence sur

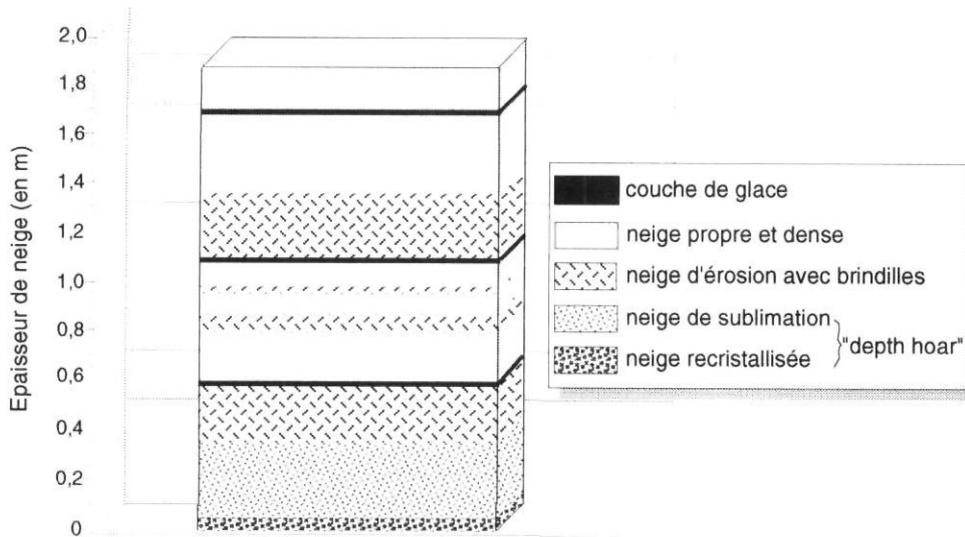


FIGURE 10. Stratigraphie de la congère dans la combe à neige, en avril 1991.

Snow stratigraphy in the snow patch, April 1991.

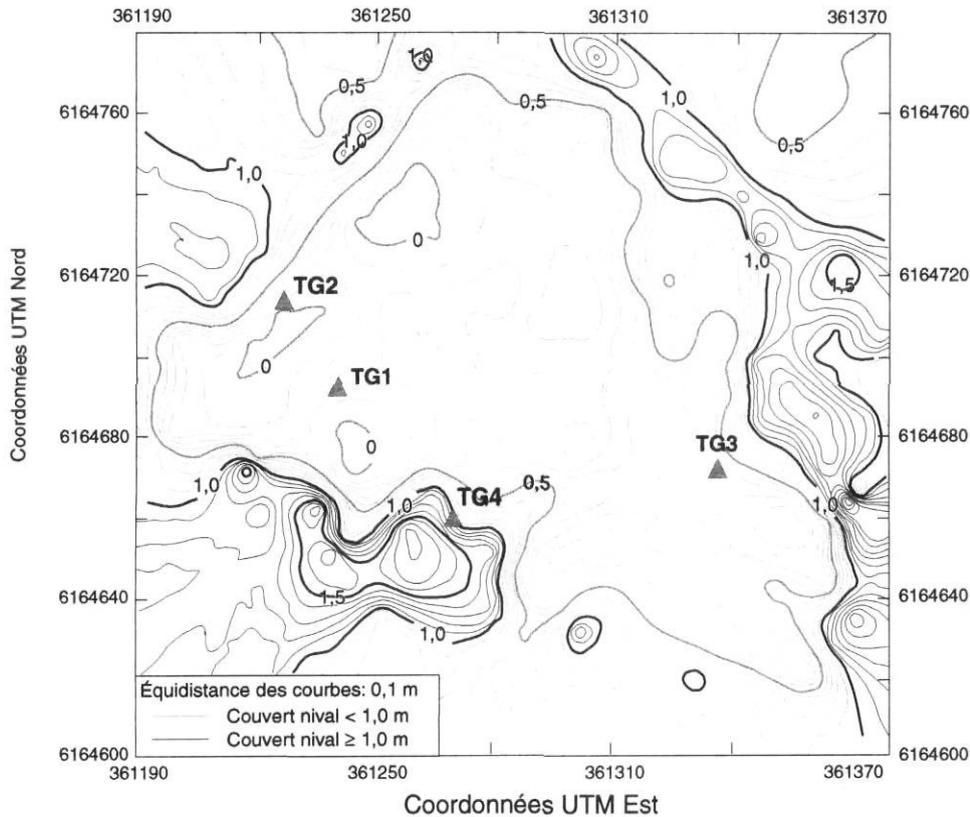


FIGURE 11. Lignes d'égalé épaisseur (isopaches) du tapis nival en avril 1991.

Isopachs of snow cover in April 1991.

l'enneigement (tabl. II). L'orientation des versants ayant aussi un effet potentiel quant à la redistribution éolienne, la classification retenue va des versants des plus exposés aux vents (130 à 270°) aux mieux abrités (000 à 090° et 300 à 360°), en passant par deux classes intermédiaires (270 à 300° et 090 à 130°) (fig. 13d).

Comme les concavités tendent à retenir davantage la neige, la forme générale des ondulations de terrain a été ajoutée à l'analyse, en soustrayant à la matrice originelle des altitudes une autre matrice dans laquelle la valeur d'élévation de chaque pixel a été pondérée par la moyenne des altitudes

des huit pixels contigus. L'image ainsi obtenue a été reclassée de manière à faire ressortir d'un côté les pentes présentant des profils convexes, défavorables à l'enneigement et de l'autre les pentes présentant des profils concaves ou plans, favorables ou neutres en termes d'accumulation nivale (fig. 13b).

Les données spatiales sur le couvert végétal ont été obtenues en numérisant par balayage une photographie aérienne du site datant de l'été 1990. Quatre classes simples ont été retenues (fig. 13c) : les lichenaies, les sphaignes, les saulaies et les pessières. Les formations basses sont peu

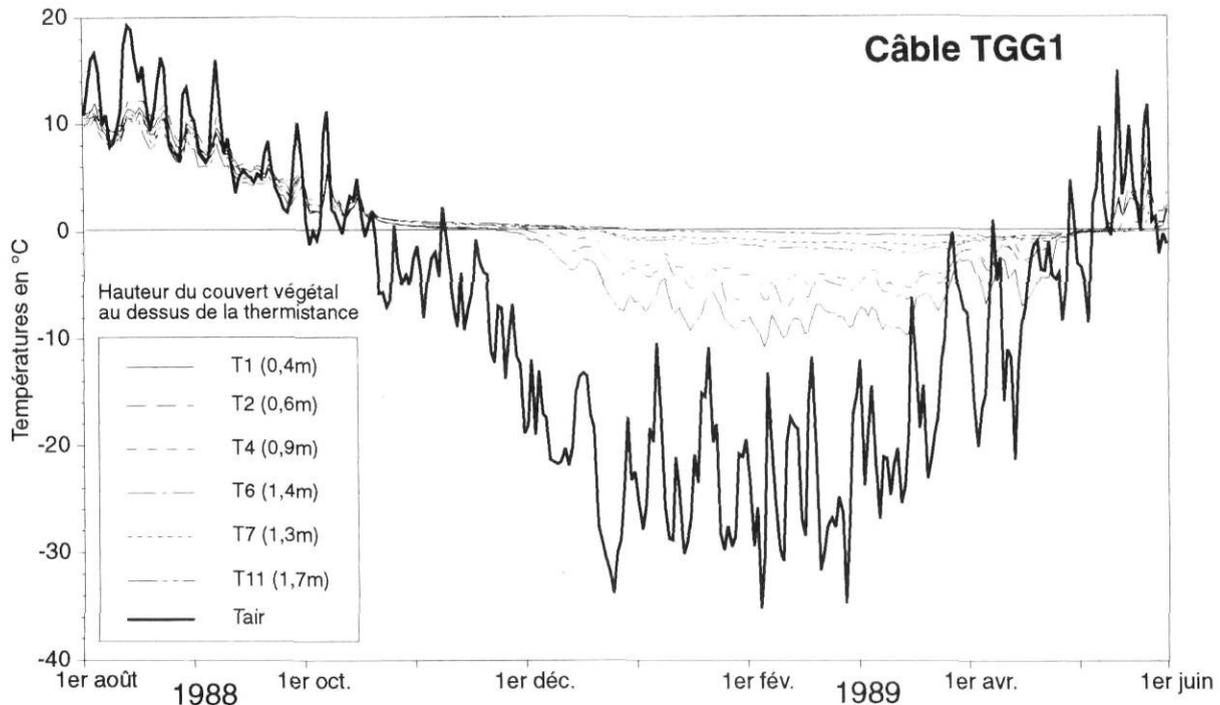


FIGURE 12. Courbes de température sous un couvert arbustif de hauteur variable dans la combe à neige (câble TGG1). *Temperature profiles under a vegetation canopy of variable height in the snow patch (cable TGG1).*

TABLEAU I

Valeurs extrêmes et moyennes des températures de l'air et du sol sous des taillis arbustifs de hauteurs différentes (câble TGG1)

T (°C)	période	T ₁ (0,4 m)	T ₂ (0,6m)	T ₄ (0,9M)	T ₆ (1,4 m)	T ₇ (1,3 m)	T ₁₁ (1,7 m)	T air
Maximum	1988-1989	12,04	11,08	12,49	11,01	11,12	10,74	19,25
	1989-1990	15,35	12,30	18,26	12,74	14,13	12,75	25,49
Minimum	1988-1989	-10,80	-7,43	-5,51	-2,13	-1,36	-0,56	-35,24
	1989-1990	-11,34	-7,12	-7,78	-3,23	-2,01	-1,25	-34,14
Moyenne	1988-1989	-1,05	0,03	0,68	1,44	1,51	1,61	-7,85
	1989-1990	0,07	1,13	2,27	2,14	2,40	2,36	-5,40
Amplitude	1988-1989	22,83	18,51	18,00	13,15	12,48	11,30	54,49
	1989-1990	26,69	19,42	26,04	15,97	16,14	14,00	59,62

Les valeurs indiquées entre parenthèses correspondent à la hauteur de la végétation arbustive au-dessus de chacune des thermistances, ces dernières étant situées juste sous la couche de sphaignes (d'environ 5 cm d'épaisseur dans cette partie du plateau).

propices à l'enneigement, quoique les sphaignes soient reliées indirectement à la problématique, en raison de leur concentration dans de très légères dépressions linéaires. Les saulaies et les pessières, selon les observations générales, sont situées dans des endroits favorables à l'accumulation de la neige.

La superposition des matrices selon les pondérations déduites des observations de terrain a donné comme résultat la carte du potentiel d'enneigement apparaissant à la figure 14. Il s'agit d'un modèle du régime d'accumulation nivale dérivé des variables de terrain. Pour comparaison ultérieure avec d'autres images matricielles, les classes d'enneigement potentiel se sont vues attribuer des valeurs moyennes d'épaisseur de neige correspondante. La première classe, celle des

secteurs défavorables à l'accumulation nivale, comprend les épaisseurs de neige inférieures à 10 cm. La classe moyennement favorable correspond aux valeurs oscillant entre 10 et 30 cm. La troisième classe, favorable à l'enneigement, englobe les épaisseurs comprises entre 30 et 70 cm. Quant à la dernière classe, très favorable à l'accumulation nivale (donc très défavorable au pergélisol), elle s'étend entre les valeurs de 70 et 200 cm (fig. 14). Les pondérations de chacune des variables initiales sont présentées sous forme récapitulative dans le tableau II, ainsi que les classes d'enneigement potentiel qui leur ont été attribuées.

2. Vérification du modèle

La fiabilité de cette classification peut être vérifiée par le biais d'une comparaison avec les représentations du couvert

nival du 14 avril 1991 et du 16 avril 1992 (fig. 15a et 15b). Il faut toutefois tenir compte du fait que celles-ci ont été obtenues par interpolation de mesures ponctuelles effectuées à tous les 10 m sur l'ensemble du plateau et qu'il ne s'agit que de représentations instantanées de la répartition nivale pour une journée donnée. Ces « instantanés » correspondent toutefois à la période de l'hiver où le couvert nival subit la moins grande variabilité temporelle et présentent donc les conditions les plus proches par rapport à une carte du couvert nival potentiel.

Les tendances que les cartes traduisent rejoignent les connaissances initiales du régime nival du site. L'enneigement est minimal à nul sur le dessus du plateau cryogène, le secteur le plus dégarni se situant du côté des versants nord-ouest et ouest. Les versants est et sud-ouest sont les plus enneigés pendant les deux années d'étude, en dépit (pour le versant sud-ouest) d'une exposition supposément défavorable. Quant au versant nord-ouest, il présente une forte différence d'une année à l'autre : son couvert végétal est essentiellement constitué de muscinaies alors que ceux des deux

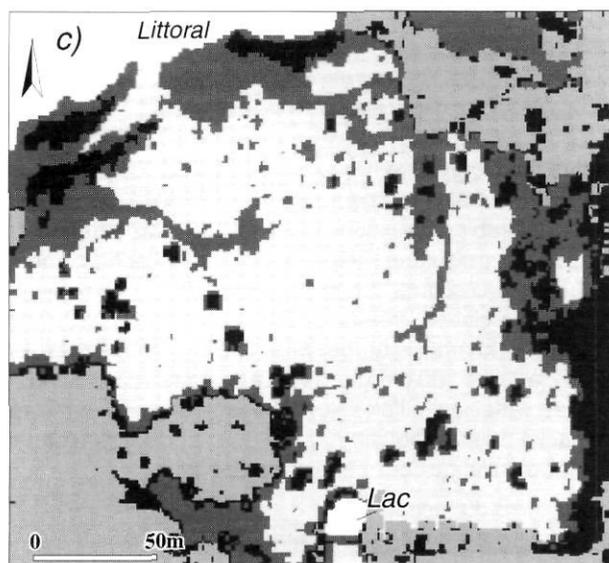
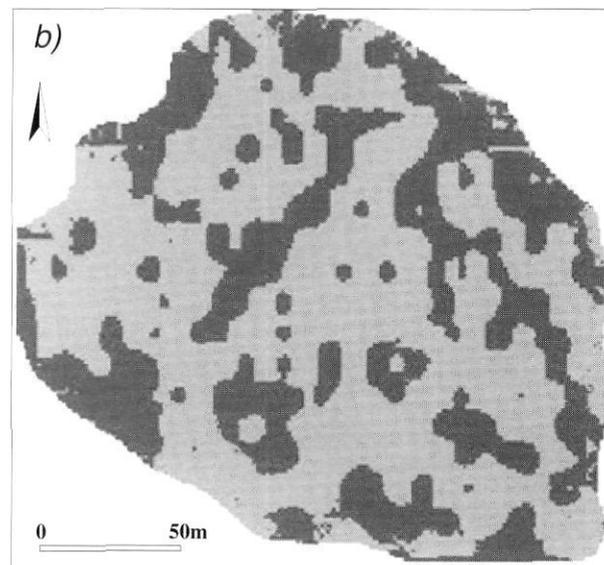
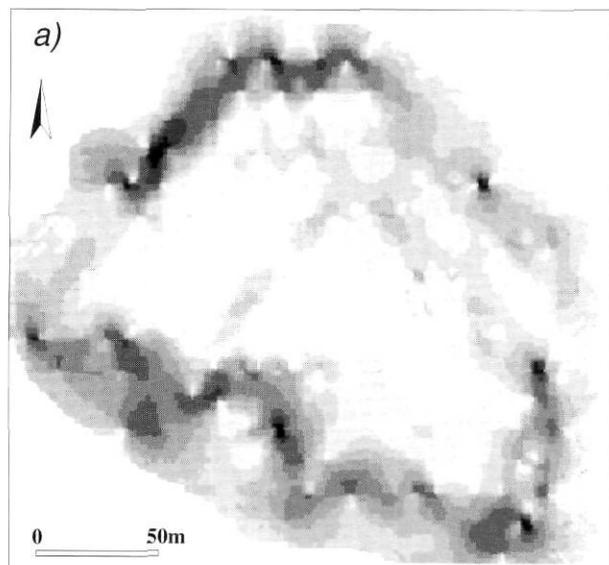


FIGURE 13. Cartes numérisées en mode matriciel des paramètres introduits dans le modèle : a) pentes ; b) formes des versants ; c) couvert végétal.

Raster-based maps of the parameters introduced in the model: a) slopes; b) convexity / concavity; c) vegetation cover.

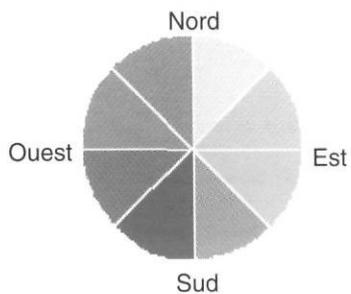
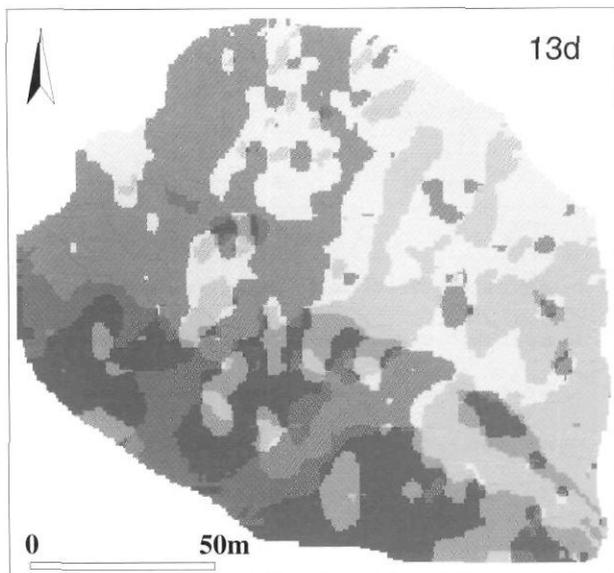
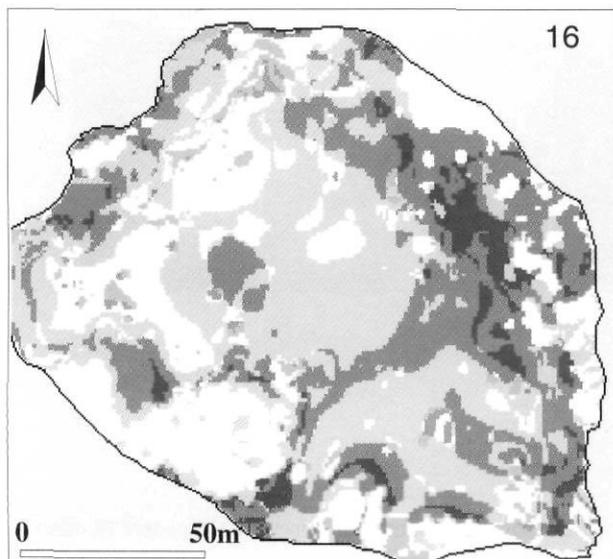
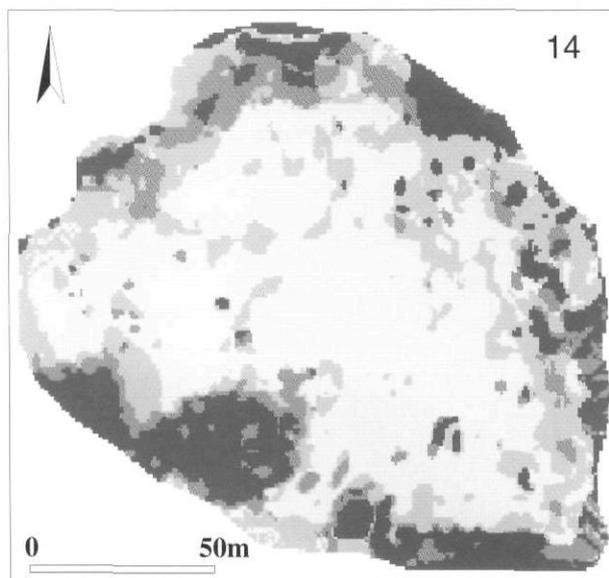


FIGURE 13d. Carte numérisée en mode matriciel des paramètres introduits dans le modèle : orientation des versants.

Raster-based map of the parameters introduced in the model: slope aspects.

Potentiel d'enneigement	
	Défavorable (0 - 9cm)
	Moyen (10 - 29cm)
	Favorable (30 - 69cm)
	Très favorable (70 - 200cm)

FIGURE 14. Carte (modèle) d'enneigement potentiel.
Snow accumulation potential.



	(3 classes)	
	(2 classes)	Sous-estimation
	(1 classe)	
		Correspondance
	(1 classe)	
	(2 classes)	Surestimation
	(3 classes)	
	Secteurs situés hors limites	

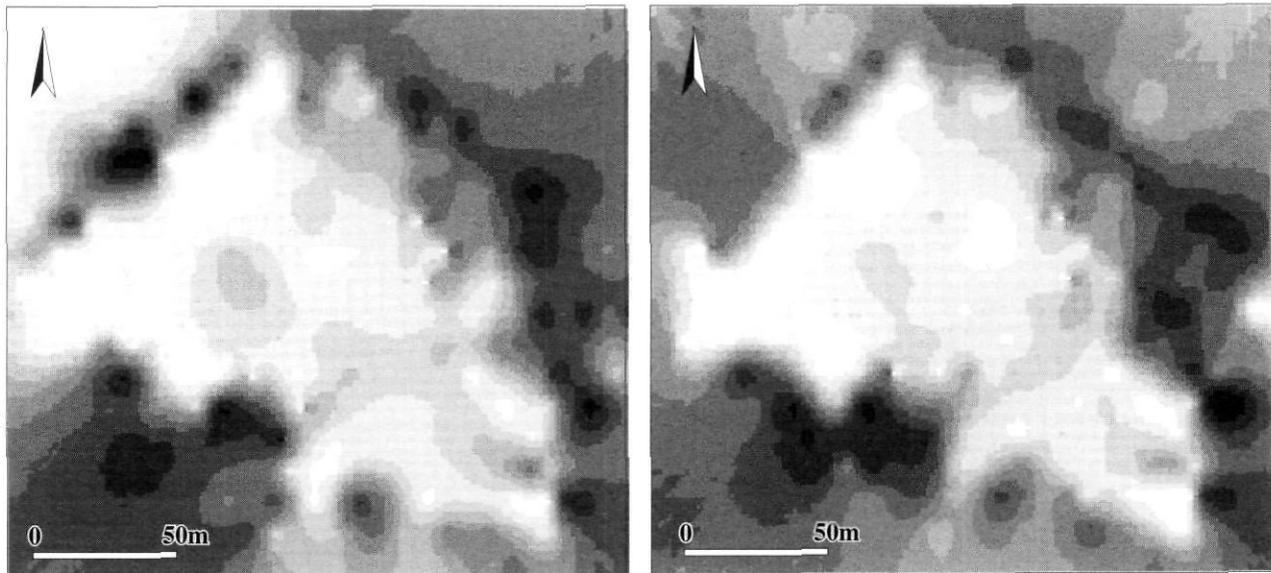
FIGURE 16. Carte matricielle des résidus entre le modèle et les mesures de terrain.

Raster-based map of the residuals between the model and the field measurements.

TABLEAU II
Classes d'enneigement potentiel en fonction des variables de base

Orientations	Pentes Forme	2 Lichens				3 Sphaignes				4 Épinettes				5 Saules			
		1 0 - 4° 35 - 55°	2 4 - 8°	3 8 - 15°	4 15 - 35°	1 0 - 4° 35 - 55°	2 4 - 8°	3 8 - 15°	4 15 - 35°	1 0 - 4° 35 - 55°	2 4 - 8°	3 8 - 15°	4 15 - 35°	1 0 - 4° 35 - 55°	2 4 - 8°	3 8 - 15°	4 15 - 35°
		1 130 - 270°	1 Convexe	Classe A	Classe A	Classe A	Classe B	Classe B	Classe A	Classe B	Classe B	Classe B	Classe C	Classe C	Classe C	Classe C	Classe D
	2 Concave	Classe A	Classe B	Classe B	Classe B	Classe B	Classe B	Classe C	Classe C	Classe C	Classe C	Classe C	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D
2 270 - 300°	1 Convexe	Classe A	Classe A	Classe A	Classe B	Classe A	Classe A	Classe B	Classe B	Classe C	Classe C	Classe C	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D
	2 Concave	Classe A	Classe B	Classe B	Classe B	Classe B	Classe B	Classe C	Classe C	Classe C	Classe C	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D
3 90 - 130°	1 Convexe	Classe A	Classe A	Classe B	Classe A	Classe A	Classe B	Classe B	Classe B	Classe C	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D
	2 Concave	Classe A	Classe B	Classe B	Classe B	Classe B	Classe B	Classe C	Classe C	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D
4 0 - 90° 300 - 360°	1 Convexe	Classe A	Classe A	Classe B	Classe B	Classe A	Classe B	Classe C	Classe C	Classe C	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D
	2 Concave	Classe A	Classe B	Classe C	Classe C	Classe B	Classe C	Classe C	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D	Classe D

Classe A : potentiel d'accumulation très faible à faible (0 à 9 cm de neige durant l'année) ; classe B : potentiel moyen (10 à 29 cm de neige) ; classe C : fort potentiel d'accumulation (30 à 69 cm de neige) ; classe D : très fort potentiel d'accumulation (70 à 200 cm de neige).



FIGURES 15. Couvert nival numérisé en mode matriciel, a) 14 avril 1991, b) 16 avril 1992. Raster-based maps of snow cover a) april 14, 1991; b) april 16, 1992.

autres versants sont respectivement arbustif et arborescent. Le rôle régulateur du couvert végétal se trouve ici confirmé, au point qu'on peut le considérer dans la région du détroit de Manitounuk comme l'élément fondamental du régime nival.

Le logiciel IDRISI comprend les outils d'analyse statistique permettant de vérifier quantitativement et qualitativement la fiabilité d'une simulation. La moyenne des deux cartes d'enneigement a d'abord été calculée, puis l'image moyenne résultante regroupée en quatre classes, ajustées à celle du modèle d'enneigement potentiel. Les classes d'enneigement moyen mesuré et d'enneigement potentiel ont donc pu être comparées pixel par pixel.

Le coefficient de corrélation établi dans IDRISI entre la matrice d'enneigement moyen et celle de la figure 14 atteint 0,81, ce qui correspond à un coefficient de détermination de 66 %. Cela signifie que le modèle du potentiel d'enneigement explique à 66 % l'accumulation moyenne mesurée sur le site. Compte tenu du nombre élevé d'observations, ces coefficients sont statistiquement significatifs, même si la distribution des mesures d'enneigement présente une déviation vers la gauche. Il était toutefois nécessaire de pousser un peu plus avant la vérification du modèle d'enneigement. Pour ce faire, une matrice de résidus a été obtenue en soustrayant la matrice des moyennes d'accumulation nivale à celle de l'enneigement potentiel (fig. 16).

Cette matrice de résidus est révélatrice de la fiabilité du modèle. Les surestimations et les sous-estimations par rapport à la réalité ne révèlent pas vraiment une organisation spatiale structurée. On remarque que les zones blanches, qui indiquent les correspondances entre le modèle et la réalité, se retrouvent au niveau des valeurs extrêmes (les combes à neige d'une part et les parties les plus dépourvues de neige d'autre part). Les facteurs de base ont donc été correctement combinés dans ces situations d'absence ou de surabondance de neige.

Un autre phénomène apparaît de façon marquante à la figure 16 ; d'importantes sous-estimations se retrouvent dans la partie est de la butte, dans des secteurs caractérisés par la relative proximité des épinettes blanches. Il semble qu'il faille considérer des zones tampons autour des secteurs où la densité des épinettes est en voie de devenir assez importante et non seulement aux endroits effectivement colonisés. En effet, le modèle est fondé sur des facteurs locaux, statiques, et il ne reproduit pas les processus aérodynamiques propres aux vents au ras du sol et aux changements de la morphologie de surface liés à l'enneigement lui-même.

DISCUSSION

La caractéristique principale du régime nival du plateau est sa grande variabilité spatiale et temporelle à l'échelle saisonnière. Les forts vents de la mer d'Hudson balayent de façon quasi continue la neige au sol. Dès l'automne, période au cours de laquelle surviennent à la fois plus de la moitié des précipitations solides et les plus grandes vitesses de vent, le rôle majeur du vent sur la distribution de l'enneigement commence à se faire sentir. En hiver, ce rôle devient d'autant

plus déterminant que les précipitations se font moins abondantes, la redistribution éolienne devenant alors importante dans la dynamique du couvert nival.

Le vent ne se contente pas de redistribuer la neige, il a aussi tendance à compacter la couche supérieure du tapis nival, surtout dans les secteurs les plus exposés. Ce phénomène de compaction entraîne la formation d'une croûte glacée très dure, en dessous de laquelle une neige très peu dense subsiste durant tout l'hiver.

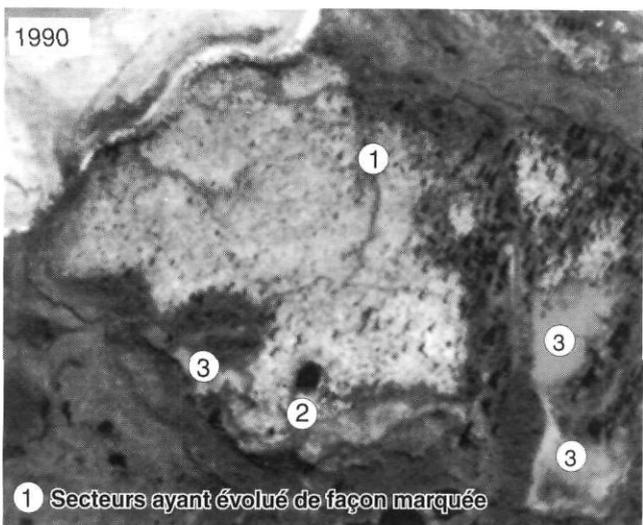
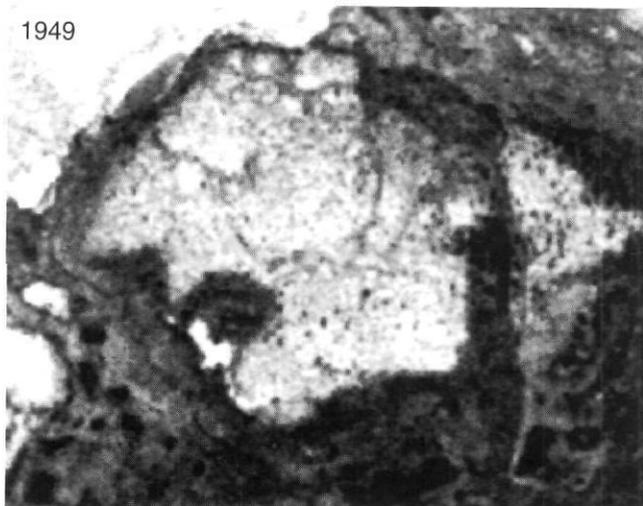
Les deux campagnes de mesures de l'enneigement menées en avril 1991 et 1992 (fig. 15) permettent de constater qu'en dépit de variations interannuelles, on peut identifier un patron récurrent d'accumulation de la neige d'un hiver à l'autre. Ainsi le sommet du plateau est-il presque toujours dépourvu de neige, surtout dans sa partie nord-ouest, la plus exposée aux vents venant de la mer d'Hudson. À l'opposé, la grande combe à neige et le versant sud-est du plateau reçoivent régulièrement des accumulations supérieures à 70 cm que l'on identifie comme le seuil limite permettant l'isolation du sol par rapport aux fluctuations majeures de température. La mise en évidence de ce patron rend particulièrement intéressants les résultats du modèle de potentiel d'enneigement et, en tout état de cause, justifie le recours à un modèle de ce genre.

Les conditions climatiques qui prévalent à proximité du rivage du détroit de Manitounuk et sur une bonne partie du sommet du plateau, c'est-à-dire en milieu ouvert, sont favorables au développement du pergélisol. Les profils thermiques en TG1 et TG2 sont typiques de ce secteur. À TG3, vers l'intérieur, sur le sommet, l'accumulation de 30 à 40 cm de neige est à l'origine d'un profil thermique plus chaud, mais le pergélisol se conserve encore très bien.

À l'inverse, la plupart des versants, notamment nord-est, est, sud-est et sud-ouest, sont caractérisés année après année par d'importantes accumulations nivales dont l'effet isolant provoque le réchauffement du pergélisol, comme en témoigne le profil thermique du câble TG4. Ce dernier ne fond toutefois pas, du fait d'échanges latéraux de chaleur et de la teneur élevée en glace, mais il apparaît beaucoup moins froid que le noyau principal de pergélisol et isolé des variations thermiques de l'air.

Alors que le sommet et la partie côtière du plateau connaissent des conditions propices au maintien du pergélisol, les versants moins exposés (sud-ouest et à est) favorisent un enneigement notable, conditions favorables à un réchauffement du sol et au thermokarst. Une fois engendrées, les dépressions thermokarstiques favorisent à leur tour le développement de populations arbustives et les accumulations nivales récurrentes, ce qui contribue à la dégradation localisée du pergélisol. Sur le plateau étudié, on observe ce phénomène en deux endroits, soit au niveau des flancs enneigés et dans la partie sud-est du sommet de la butte, où un sillon de drainage orienté sud-ouest-nord-est semble se développer et où le pergélisol semble être en voie de dégradation lente.

La modélisation précédente et les hypothèses d'évolution thermokarstique déterminée par le couvert nival ont été confirmées par la comparaison de deux photographies aériennes



1 Secteurs ayant évolué de façon marquée

FIGURES 17. Photographies aériennes du plateau à 40 ans d'intervalle. 1 : Creusement d'un sillon ; 2 : apparition d'une nouvelle mare de thermokarst ; 3 : agrandissement de mares préexistantes.

Aerial photographs of the plateau 40 years apart. 1: Deepening and expansion of a furrow; 2: Formation of a new thermokarst pond; 3: Expansion of an existing thermokarst pond.

du site prises à 40 années d'intervalle (fig. 17a et b). Les deux photographies ont été prises en été, respectivement en 1949 et en 1990. On y distingue nettement la présence d'axes préférentiels de dégradation du plateau de pergélisol (dont ce sillon SO-NE, identifié par le chiffre 1 sur la fig. 17b). L'analyse de ces photographies aériennes a donc permis de confirmer la correspondance existant sur le terrain entre les zones d'accumulation préférentielle et le thermokarst récent. Un petit lac de thermokarst est présent en 1990 là où il n'y avait visiblement pas de dépression notable en 1949 (secteur (2) de la fig. 17b). On note aussi dans certaines parties du plateau l'agrandissement de mares préexistantes (secteurs (3) de la fig. 17b), notamment celle située à proximité de la grande combe à neige et celles s'étendant à l'est du plateau, dont l'expansion a provoqué dans l'intervalle l'envoyage d'une partie boisée du plateau.

CONCLUSION

L'étude détaillée de l'enneigement autour du plateau de pergélisol de Manitounuk confirme le rôle dominant de la végétation, surtout arbustive, sur la répartition du couvert nivale. En facilitant l'accumulation nivale, la végétation modifie les conditions thermiques de surface et favorise le développement du thermokarst, lequel contribue à son tour au creusement de dépressions qui vont favoriser l'enneigement. Le phénomène a donc tendance, une fois déclenché, à s'auto-entretenir, mais il est vraisemblablement déclenché par une colonisation progressive du terrain par la végétation, facilitée par des conditions microtopographiques et microclimatiques dont l'effet catalyseur peut être déterminant.

Avec l'apport de données sur les vents, la cartographie du couvert végétal et des conditions de terrain, on peut donc espérer produire un modèle de prévision de l'enneigement dans la toundra forestière. Le lien fondamental entre le régime éolien, la végétation et l'enneigement constitue un aspect majeur dont il faut tenir compte si l'on veut évaluer les effets des changements climatiques dans les régions subarctiques devenues instables en raison de l'équilibre thermique précaire du pergélisol et la dynamique des populations végétales. D'autre part, il est évident, à l'échelle locale du moins, que les données brutes sur les précipitations solides ne sont pas d'une grande utilité pour modéliser localement le régime thermique du pergélisol, puisque la neige est en grande partie redistribuée. Actuellement, la mosaïque des zones enneigées et non enneigées n'est pas considérée dans les modèles climatiques.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par les fonds CRSNG et FCAR, la Commission géologique du Canada et une bourse du Conseil international d'études canadiennes. Elle a été réalisée au Centre d'études nordiques et les auteurs tiennent à remercier MM. Charles Côté et André Larivière, gérants de la station de Kuujuarapik, Jocelyn Lauzon, assistant de terrain, ainsi que Richard Fortier, Richard Lévesque et Janusz Frydecki, professionnels de recherche et le professeur Wayne Pollard, de l'Université McGill, pour leur aide. Merci également à M. Yves Bégin, pour tous ses judicieux conseils et notamment pour ses commentaires sur une version préliminaire du présent article, ainsi qu'à MM. Hardy Granberg et Daniel Lagarec, les deux lecteurs critiques de la revue.

RÉFÉRENCES

- Allard, M., Caron, S. et Bégin Y., sous presse. Climatic and ecological controls on ice segregation and thermokarst : The case history of a permafrost plateau in Northern Québec. *Permafrost and Periglacial Processes*.
- Allard, M. et Tremblay, G., 1983. Les processus d'érosion littorale périglaciaire de la région de Poste-de-la-Baleine et des îles Manitounuk sur la mer d'Hudson. *Zeitschrift für Geomorphologie Suppl.* Bd 47 : 27-60.
- Allard, M. et Seguin, M.K., 1987. Le pergélisol au Québec nordique, bilan et perspectives. *Géographie physique et Quaternaire*, 41 : 141-152.
- An, W. et Allard, M., 1995. Mathematical approach to modelling palsa formation : Insights on processes and growth conditions. *Cold Regions Science and Technology*, 23 : 231-244.

- Bégin, Y., Bérubé, D. et Grégoire, M., 1993. Downward migration of coastal conifers as a response to recent land emergence in eastern Hudson Bay, Québec. *Quaternary Research*, 40 : 81-88.
- Caron, S., 1995. Les cryofaciès et la dynamique d'un plateau de pergélisol au détroit de Manitounuk, Hudsonie. Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université Laval, Québec, 132 p.
- Desrochers, D.T. et Granberg, H.B., 1988. Schefferville snow-ground interface temperatures. *Permafrost, Proceedings of the 5th International Conference*, Trondheim, Norvège, p. 67-72.
- Dionne, J.-C., 1978. Formes et phénomènes périglaciaires en Jamésie subarctique. *Géographie physique et Quaternaire*, 32 : 187-247.
- Eastman, R.J., 1992. IDRISI, version 4.0. User's Guide. Clark University, Worcester.
- Filion, L. et S. Payette, 1976. La dynamique de l'enneigement en région semi-arctique, Poste-de-la-Baleine, Nouveau-Québec. *Cahiers de Géographie du Québec*, 20 (50) : 275-302.
- 1978. Observations sur les caractéristiques physiques du couvert de neige et sur le régime thermique du sol à Poste-de-la-Baleine. *Géographie physique et Quaternaire*, 32 : 71-79.
- 1982. Régime nival et végétation chionophile à Poste-de-la-Baleine, Nouveau-Québec. *Naturaliste canadien*, 109 : 557-571.
- Fortier, R., Lévesque, R., Allard, M. et Seguin, M.K., 1991. Caractérisation du pergélisol de buttes cryogènes à l'aide de diagraphies électriques au Nunavik, Québec. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2 : 79-93.
- Granberg, H.B., 1973. Indirect mapping of the snow cover for permafrost prediction at Schefferville, Québec. *Permafrost Proceedings of the 2nd International Conference*, Yakutsk, U.R.S.S., p. 113-120.
- 1988. On the spatial dynamics of snowcover-permafrost relationships at Schefferville. *Permafrost, Proceedings of the 5th International Conference*, Trondheim, Norvège, p. 159-164.
- Haulani, H., Bouchard, C., Roche, Y., Cames-Pintaux, A. et Allard, M., 1993. Comparison of numerical modelling with measurements of permafrost thermal regime at a discontinuous site in Northern Québec. *Proceedings of the 4th International Symposium on Thermal Engineering and Science for Cold Regions*, Hanover.
- Lévesque, R., Allard, M. et Seguin, M.K. 1988a. Le pergélisol dans les formations quaternaires de la région des rivières Nastapoka et Sheldrake, Québec nordique. *Nordica*, 51 : 23 p.
- 1988b. Regional factors of permafrost distribution and thickness, Hudson Bay Coast, Québec. *Permafrost, Proceedings of the 5th International Conference*, Trondheim, Norvège, p. 199-204.
- Lunardini, V.J., 1991. *Heat Transfer with Freezing and Thawing*. Developments in Geotechnical Engineering 65, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Mathieu, C. et Payette, S., 1987. Chronologie ¹⁴C et développement des combes à neiges du Lac à l'Eau Claire, Québec nordique. *Géographie physique et Quaternaire*, 41 : 97-108.
- Michaud, Y., Allard, M., Parent, M., Paradis, J.S., Ménard, E., Fortin, M. et Bégin, C., 1994. Cartographie préliminaire des zones pergélisolées dans le secteur du détroit de Manitounuk et de la Petite Rivière de la Baleine, Hudsonie. Commission géologique du Canada, dossier public 2845, 34 p. (cartes et annexes).
- Nicholson, F.H., 1975. Snow depth mapping from aerial photograph for use in permafrost prediction. *Proceedings of the 32nd Eastern Snow Conference*, Manchester, p. 124-136.
- 1978. Permafrost distribution and characteristics near Schefferville, Québec : Recent Studies. *Proceedings of the 3rd International Conference*, Edmonton, 1 : 428-433.
- 1979. Permafrost spatial and thermal variations near Schefferville, Nouveau-Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 33 : 265-277.
- Payette, S. et Lagarec, D., 1972. Observations sur les conditions d'enneigement à Poste-de-la-Baleine, Nouveau-Québec. *Cahiers de Géographie de Québec*, 26 (39) : 469-481.
- Roche, Y., 1994. Variation du couvert nival et dynamique du pergélisol au détroit de Manitounuk, Hudsonie. Thèse de doctorat, Département de géographie, Université Laval, Québec, 190 p.
- Seguin, M.K. et Allard, M., 1984. La répartition du pergélisol dans la région du détroit de Manitounuk, côte est de la mer d'Hudson, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 21 : 354-364.
- Seppälä, M., 1990. Depth of snow and frost on a palsamire, Finnish Lapland. *Geografiska Annaler*, 72A : 191-201.
- Smith, M.W. et Williams, P.J., 1989. The frozen Earth, fundamentals of geocryology. *In Studies in Polar Research*. Cambridge University Press, 306 p.
- Thom, B.G., 1969. New permafrost investigations near Schefferville, P.Q. *Revue de géographie de Montréal*, 23 : 317-327.
- Wilson, C.V., 1968. Notes on the climate of Poste-de-la-Baleine, Québec. Université Laval, Centre d'études nordiques, Travaux divers 24, 93 p.