

DYNAMIQUE DU PERGÉLISOL DISCONTINU ET CHANGEMENTS GLOBAUX DANS LE NORD DU QUÉBEC

Daniel LAGAREC et Véronique DEWEZ

Département de Géographie. Université d'Ottawa, 165, Waller, Ottawa, K1N 6N5

Résumé

Dans le nord du Québec, la distribution spatiale des formes dues au pergélisol (palses minérales et organiques) et à sa dégradation (mares de palses), ainsi que celles associées à sa présence occasionnelle (tourbières réticulées) s'explique à 80,2% par des combinaisons de variables climatiques. La procédure PEGASE, basée sur le concept d'entropie, a sélectionné les caractéristiques climatiques donnant la meilleure discrimination spatiale du gradient de pergélisol. La région étudiée s'organise ainsi en 5 groupes climatiques. Les groupes correspondant à des zones de pergélisol peu à non dégradé se distinguent par l'importance des variables thermiques par rapport aux variables hydriques. L'extension du groupe I (pergélisol quasi continu) correspond à des conditions très froides et très sèches toute l'année. Le groupe II (pergélisol abondant), le plus thermique, est déterminée par une température annuelle minimale très basse et une saison de croissance courte. Le groupe III (pergélisol dans les tourbières) correspond à des conditions thermiques plus clémentes, avec des étés longs mais frais. La dégradation du pergélisol en mares de palses (groupe IV) se caractérise par l'importance des facteurs hydriques, avec des précipitations abondantes. Enfin le groupe V, où l'extension du pergélisol est négligeable, se distingue par des conditions continentales, avec des étés longs et chauds, ainsi que des précipitations abondantes toute l'année. Ce gradient de pergélisol dans le nord du Québec s'exprime spatialement selon une composante NO-SE. Le patron mis en évidence est le résultat du réchauffement des années 1940, provoqué par un déplacement vers l'ouest de la vallée isobarique en altitude, permettant une influence accrue des masses d'air tropical. Le changement climatique résultant d'un doublement du CO₂ devrait se traduire dans la région étudiée par une augmentation de 3 à 5 °C de la température estivale, ainsi qu'un accroissement sensible des précipitations. L'application des données de 2 modèles à la zonation du pergélisol telle qu'établie par PEGASE suggère la disparition de celui-ci, sauf dans les sites les plus exposés. Les conditions seraient en revanche favorables à l'expansion des tourbières dans le nord de la péninsule d'Ungava.

Abstract

In Northern Québec, the spatial distribution of permafrost-related landforms (mineral and peat palsas), those related to its degradation (palsa-pools) and those associated with its sporadic occurrence (string-bogs) is almost entirely explained (80,2%) by combinations of climatic variables. The PEGASE program, based on the concept of entropy, has selected the climatic characteristics giving the best spatial division of permafrost occurrence. The study area is divided in 5 climatic groups. Those where permafrost degradation is neglectible or slight are characterized by the dominance of thermal variables over hydrological ones. The extension of group I (quasi-continuous permafrost) corresponds to very cold and dry conditions all year long. Group II (widespread permafrost) has a very low minimum annual temperature and a short growing season. By comparison, group III (permafrost within peat-bogs) has milder temperatures with longer cool summers. The degradation of permafrost in palsa-pools (group IV) is characterized by the importance of hydrological variables, with abundant precipitation. Finally, group V, where the extension of permafrost is neglectible, experiences continental conditions with long warm summers and abundant precipitation all year long. This permafrost zonation in Northern Québec presents a NE-SW orientation. This pattern, highlighted by the analysis, is the result of a warming which occurred in the forties and was caused by a westerly shift of an upper air trough, allowing for an increased influence of tropical air masses. In the study area, a doubling of CO₂ level should result in a warming of 3 to 5 °C in summer temperatures as well as in a significant increase in precipitation. The application of two climatic models to the permafrost gradient highlighted by the PEGASE procedure suggests its disappearance, except in the most exposed locations. The new climatic conditions would lead to the expansion of peat-bogs in the north of the Ungava peninsula.

Introduction

Dans le Québec subarctique, au sud du 59^{ème} parallèle, le pergélisol est essentiellement discontinu selon la carte la plus récente présentée par Allard et Séguin (1987). Il se rencontre le plus souvent sous forme de buttes aux

morphologies variées résultant de la ségrégation de glace dont la distribution, ainsi que celle des formes résultant de leur dégradation, nous renseigne sur l'état du pergélisol d'un point de vue spatial. La plupart des observations effectuées dans cette région indiquent qu'il est en voie de dégradation (Payette *et al.*, 1976; Dionne, 1978, 1984; Lagarec, 1980,

1982). Celle-ci a surtout été remarquée pour les années 1950 et semble attribuable au réchauffement global qui a marqué le XX^{ème} siècle (Morin et Payette, 1984; Payette et Filion, 1985; Guiot, 1985; Jacoby *et al.*, 1988).

Le réchauffement global dû à un doublement de la teneur en CO₂ de l'atmosphère appréhendé pour le XXI^{ème} siècle est, selon les différents scénarios proposés, plus important que celui que nous avons connu pendant cette période. Afin de pouvoir évaluer les effets de ce bouleversement pour le pergélisol du Québec, il convient, dans un premier temps, de déterminer les relations entre les paramètres climatiques actuels et le pergélisol, pour ensuite appliquer au modèle obtenu les changements climatiques envisagés par différents scénarios.

La région étudiée

La région étudiée s'étend approximativement entre les parallèles 53° et 58°30' N et du méridien 66° W à la mer d'Hudson (fig. 1).

LE RELIEF

Le relief est constitué principalement par le *plateau d'Ungava* (Ia), surface ondulée dont l'altitude varie entre 150 et 450 m. La couverture de dépôts meubles est peu épaisse et souvent limitée aux dépressions. Vers l'est et l'ouest, où l'altitude diminue, la transgression marine post-glaciaire a laissé des dépôts sableux et argileux plus épais. Vers le sud, cette surface est prolongée par le *plateau des lacs* (Ib) dont l'altitude s'élève progressivement jusqu'à

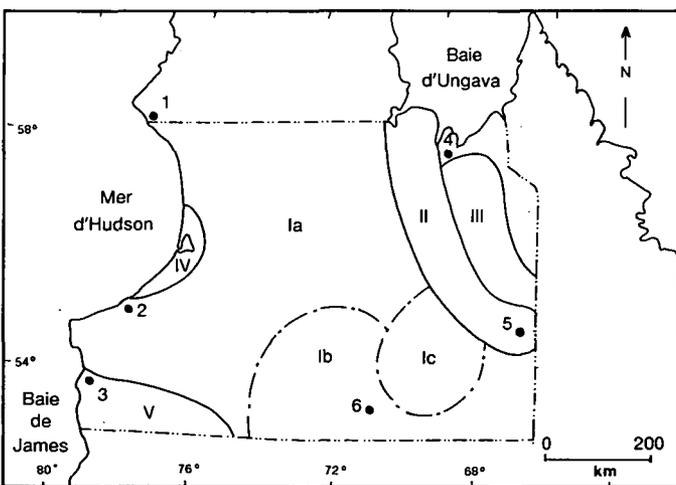


Figure 1. Localisation des régions physiographiques et des stations mentionnées. Ia: plateau d'Ungava Ib: plateau des Lacs Ic: hautes terres de la Caniapiscau. II: collines du Labrador. III: basses terres de la rivière à la Baleine. IV: cuestas d'Hudsonie. V: basses terres de la Radissonie 1: Inukjuak 2: Kuujjuarapik 3: Chisasibi 4: Kuujjuaq 5: Schefferville 6: Nichequon

900 m et qui offre l'aspect d'une plaine ondulée occupée par de nombreux lacs et dominée par des collines de roche en place atteignant 150 m de dénivellation; les dépôts glaciaires y sont épais. Le noyau de ce plateau est formé de collines très découpées, les *hautes terres de la Caniapiscau* (Ic), qui s'élèvent vers l'est jusqu'à l'escarpement dominant les *collines du Labrador* (II). Celles-ci appartiennent au géosynclinal du Labrador et forment une bande de crêtes et vallées sinueuses s'étendant du sud au nord; les sommets s'abaissent de 720 m au sud à 320 m dans la partie nord. Joutant cette zone, à l'est, les *basses terres de la rivière à la Baleine* (III) sont parsemées de collines dont l'altitude décroît vers le nord (de 600 à 240 m). Le littoral de la mer d'Hudson est bordé par les *cuestas d'Hudsonie* (IV) au nord de Kuujjuarapik, en pente douce vers l'ouest et formant vers l'est des falaises dont la dénivellation peut atteindre 300 m. Dans le coin sud-ouest, au sud de Chisasibi, la région englobe une partie des *basses terres de la Radissonie* (V) s'élevant progressivement vers l'est (jusqu'à 360 m). La transgression marine y a laissé des dépôts épais favorisant la formation de tourbières, la plus forte concentration au Québec.

LE CLIMAT

Sur le plan climatique, la région a une température moyenne annuelle variant de -3°C au sud à -6°C au nord. En janvier, les moyennes sont relativement homogènes et comprises entre -22,5 et -24,7°C, alors qu'en juillet, les écarts sont plus marqués entre le sud (13,6°C) et le nord (8,9°C). Dans l'ensemble les isothermes sont concaves et s'organisent selon un axe nord-ouest-sud-est; en hiver, leur concavité est tournée vers le nord et en été, vers le sud (Atlas climatique du Québec, 1978).

La même disposition se retrouve au niveau des précipitations. Au total, le sud reçoit plus de 750 mm par an et le nord à peine 350; de cela, 40 à 45 % tombent sous forme de neige. La hauteur maximale de neige au sol est observée dans les hautes terres de la Caniapiscau (110 cm) et décroît vers le nord et l'ouest où elle est de l'ordre de 60 cm.

L'allure générale des isothermes et des isohyètes reflète bien l'influence des différentes masses d'air à un moment ou à un autre de l'année. Selon Wendland et Bryson (1981), la saison hivernale est dominée par des masses d'air arctique ou polaire continental qui occupent le nord de la région pendant 8 mois et le sud pendant 6 mois. L'été voit l'apparition de masses d'air polaire maritime et d'autres en provenance du sud, contribuant à augmenter les températures et précipitations dans la partie méridionale et y permettant des amplitudes thermiques plus élevées qu'ailleurs. D'une manière générale, le climat estival est fortement influencé par la présence d'une vallée isobarique en altitude sur l'est du continent dont la position détermine la dominance d'un type de masse d'air ou d'un autre. Quand elle est située vers le littoral du Labrador, elle favorise la descente d'air arctique ou polaire continental sur la région; au contraire, une position plus occidentale, vers la mer d'Hudson, permet des incursions d'air méridional plus chaud et plus humide.

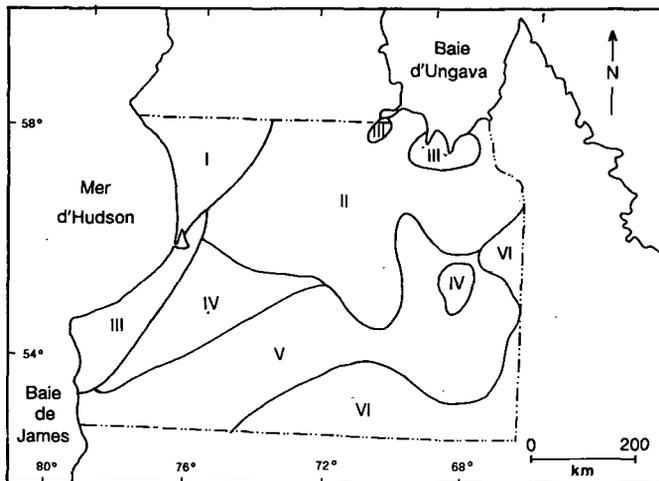


Figure 2. Distribution spatiale des unités géomorphologiques I: Pales minérales II: Complexe pales minérales/pales organiques III: Pales organiques IV: Pales organiques et mares de pales V: Mares de pales et tourbières réticulées VI: Tourbières réticulées

L'ÉTAT DU PERGÉLISOL

Une synthèse récente du pergélisol du nord du Québec a été proposée par Allard et Séguin (1987) dans laquelle le lecteur trouvera une bibliographie détaillée des travaux antérieurs.

Au nord du 59^{ème} parallèle, le pergélisol est continu, avec une épaisseur moyenne de 150 m. De l'ordre de 200 m à la Baie aux Feuilles (Gray et Pilon, 1976), il augmente jusqu'à près de 600 m à Purtuniqu (Séguin, 1978). Au sud de cette latitude, il est discontinu et peut se rencontrer aussi bien dans les dépôts meubles que dans la roche en place. Dans ce dernier cas, il atteint 120 m à Schefferville (Nicholson, 1979) et 180 m près de Kuujuarapik (Poitevin et Gray, 1982) sous des crêtes ou des collines dénudées. Dans les dépôts de surface, il apparaît principalement sous forme de buttes aux morphologies variées résultant de la formation de glace de ségrégation. Vers le nord, là où le pergélisol est très répandu, de telles buttes se retrouvent dans différents types de matériaux et forment des pales minérales. Dans celles-ci, le sol est gelé sur une épaisseur de l'ordre de 20 m (Payette *et al.*, 1976; Allard et Séguin, 1987). Vers le sud, le long du littoral de la mer d'Hudson, elles sont cantonnées aux tourbières où le rôle isolant de la tourbe permet le maintien du pergélisol sous forme de pales organiques. Au sud de la région étudiée, c'est le domaine des tourbières réticulées où le pergélisol est sporadique ou absent.

Les données disponibles sur la température du sol (Gray *et al.*, 1979, Nicholson, 1979; Séguin et Allard, 1984, 1987) dans la zone du pergélisol discontinu situent celle-ci autour de -2 à -3 °C et nous indiquent que le pergélisol est instable (Harris, 1986). Une esquisse de la distribution des températures moyennes du sol a été tentée (Lagarec, 1980) en utilisant la méthode de Kudryatsev (1959) qui évalue la différence de température entre l'air et le sol à partir de

l'amplitude thermique de l'air et de l'épaisseur de la neige au sol. Il apparaît, selon cette méthode, que les températures du sol dans la région étudiée seraient comprises entre +1 et -3 °C, ce qui correspond aux observations précitées et aux températures mesurées dans les stations de Kuujuaq et Schefferville.

Les formes mentionnées constituent donc des indicateurs de l'état du pergélisol et nous ont permis d'établir sa zonation en nous basant sur leur distribution spatiale. Evidemment, on retrouve rarement des formes pures mais plutôt des complexes regroupant généralement plusieurs types qui ont été identifiés par la forme dominante. A partir de la distribution des différentes formes établie par photo-interprétation (Lagarec, 1980), les formes ont été regroupées en six zones ou domaines spatiaux (fig. 2): les pales minérales (zone I), un complexe où coexistent pales minérales et organiques (II), les pales organiques (III); entre cette dernière zone et celle dominée par les tourbières réticulées (VI), deux complexes assurent la transition, l'un où les pales sont en voie de dégradation, mais où des individus subsistent (IV) et l'autre où les mares de pales se mêlent aux tourbières réticulées (V).

Les relations entre le pergélisol et le climat

MÉTHODOLOGIE

Une grille d'échantillonnage à maille carrée de 40 km a été superposée à ces zones, donnant la répartition suivante: zone I - 24 sites, zone II - 47 sites, zone III - 33 sites, zone IV - 78 sites, zone V - 30 sites et zone VI - 76 sites, pour un total de 288 sites.

Vingt variables climatiques (annexe I) ont été sélectionnées et subdivisées en classes selon les isohyètes et isothermes reproduits dans l'Atlas climatologique du Québec (1978) et l'Atlas climatique (1971). Pour chaque site, les classes correspondant aux vingt variables ont été attribuées.

On a utilisé la procédure divisive itérative PEGASE, basée sur le concept d'entropie, afin de sélectionner les combinaisons de caractéristiques climatiques donnant la meilleure discrimination spatiale des formes de pergélisol. Cette procédure a été décrite en détail par Phipps (1981), et appliquée à diverses analyses de paysage. Son utilisation en géomorphologie est expliquée par Dewez *et al.* (1984). Etant donné que différentes combinaisons climatiques, correspondant à des environnements différents, peuvent indiquer la présence d'une même forme, les sous-ensembles terminaux (SET) obtenus avec la procédure PEGASE ont été regroupés à l'aide d'une classification automatique de type centroïde, basée sur le critère d'information mutuelle.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Initialement, la répartition des 288 sites dans les six unités géomorphologiques donne une entropie de 1,69. Six

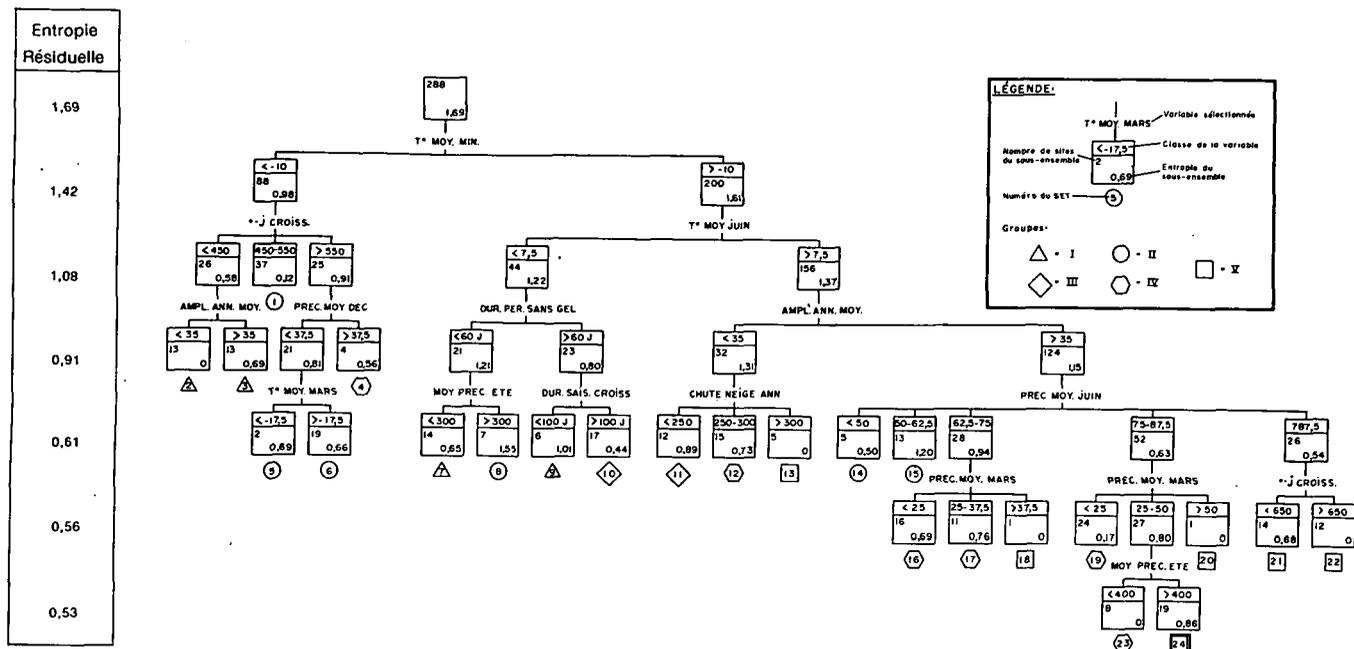


Figure 3 Dendrogramme des divisions de la procédure PEGASE.

paliers de division, aboutissant à 24 SET (fig. 3), permettent de réduire l'entropie à 0,53. La néguentropie, ou levé d'indétermination, est donc de 70%. Ce haut taux de redondance démontre que la distribution spatiale des unités géomorphologiques (et donc du gradient de pergélisol) peut s'expliquer dans une grande mesure à l'aide du climat.

Des 20 variables climatiques disponibles, la procédure en sélectionne 12 (tableau I), dont cinq jouent un rôle prépondérant dans la levée d'indétermination: la température moyenne minimale annuelle (23,7%), la température moyenne de juin (16,3%), les précipitations moyennes de juin (15,5%), les degrés-jours de croissance (14,4%) et l'amplitude annuelle (10,3%); ces cinq variables comptent en effet pour 80,2% de la néguentropie.

La classification réunit les 24 SET en cinq grands groupes, avec une perte d'information de 18%. Chaque groupe correspond à une forme dominante, puisque le groupe I rassemble 92% des sites à paises minérales, le groupe II, 76% des sites à mélange de paises minérales et organiques, le groupe III, 67% des sites à paises organiques, le groupe IV, 69% des sites à mares de paises et tourbières réticulées, et enfin le groupe V, 79% des sites à tourbières réticulées. Ces cinq groupes, issus de la classification et donc purement climatiques, forment spatialement des blocs compacts (fig. 4), organisés selon le même gradient de pergélisol que les zones géomorphologiques définies par photo-interprétation. Ceci prouve l'importance du climat dans l'organisation spatiale des formes périglaciaires du Québec nordique et nous permet d'effectuer un parallèle entre les groupes de la classification et les zones de photo-interprétation.

Le tableau I montre la contribution relative des variables climatiques dans chacun des groupes issus de la classification. Étant donné le caractère divisif de la procédure PEGASE, chaque sous-ensemble formé aux différents paliers est

considéré individuellement et seules certaines classes de la variable sélectionnée interviennent dans la néguentropie (fig. 3). De plus, les variables sélectionnées aux paliers 2 à 6 ne concernent pas tous les sites et contribuent donc seulement à la néguentropie de certains SET. Il s'ensuit que le tableau I présente des cases vides correspondant à des variables qui n'interviennent pas pour certains groupes. On constate tout d'abord que les groupes I à III (zone de pergélisol peu à non dégradé) se distinguent des autres par l'importance des variables thermiques (83,5 à 97,5% de la néguentropie) par rapport aux variables hydriques (2,5 à 16,5%). L'extension du groupe I (zone de pergélisol quasi

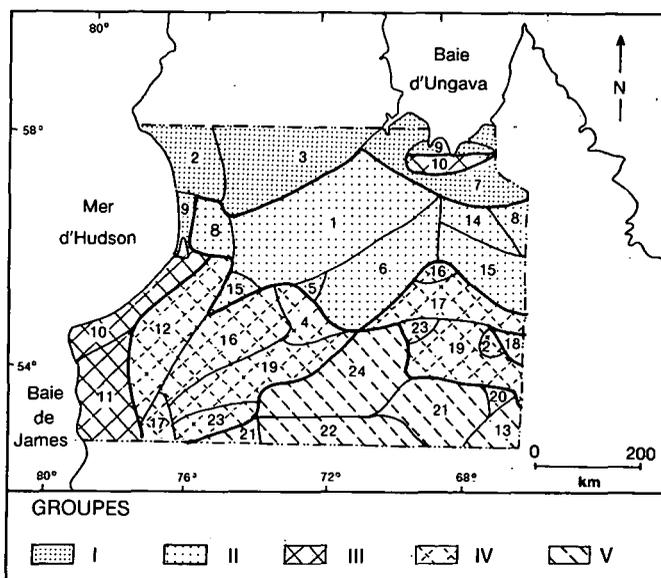


Figure 4 Localisation spatiale des sous-ensembles terminaux de la procédure PEGASE et des groupes issus de la classification.

Tableau I. Contributions relatives (%) des variables climatiques à la détermination des groupes.

VARIABLES	CLASSES	GROUPES					Ensemble
		I	II	III	IV	V	
T° minimale annuelle moy.	<-10°C	34.5	44.4		3.0		18.7
	>-10°C	3.1	2.2	7.8	6.4	7.0	5.0
Degrés-jours de croissance	<450°j	19.3					3.1
	450-550°j		34.1				9.5
	550-650°j		1.6		0.3	-3.2	-0.1
	>650°j					10.4	1.9
T° moyenne de juin	<7.5°C	14.4	2.9	21.3			5.1
	>7.5°C		4.6	9.3	18.8	20.1	11.2
Amplitude annuelle	<35°C	14.1		2.2	0.9	0.6	2.8
	>35°C	-2.6	4.1		13.3	16.2	7.5
Durée période sans gel	<60 j	0.3	0.1				0.1
	>60 j	4.7		23.2			2.9
Durée saison croissance	<100 j	-2.4					-0.4
	>100 j			19.5			1.8
T° moyenne de mars	<-17.5°C		0.2				
	>-17.5°C		3.1				0.9
SOUS-TOTAL		85.4	97.4	83.4	42.7	51.1	70.0
Total des précipitations d'été	<300mm	14.6					2.3
	300-400mm		-2.5		6.6		1.2
	>400mm					-1.8	-0.3
Chutes de neige annuelles	<250cm			16.6			1.5
	250-300cm				9.1		2.6
	>300cm					10.6	2.0
Précipitations moyennes de juin	<50mm		3.5				1.0
	50-62.5mm		-0.7				-0.2
	62.5-75mm				6.1	0.3	1.8
	75-87.5mm				17.5	16.8	8.1
Précipitations moy. décembre	>87.5mm					25.7	4.8
	<37.5mm		2.3				0.6
Précipitations moyennes de mars	>37.5mm				1.5		0.4
	<25mm				15.8		4.5
	25-37.5mm				2.1	-5.2	
	37.5-50mm				-1.4	1.5	-0.5
SOUS-TOTAL	>50mm					1.0	0.2
		14.6	2.6	16.6	57.3	48.9	30.0

continu) correspond à des conditions très froides et très sèches toute l'année (température annuelle minimale inférieure à -10 °C, moins de 450 degrés-jours de croissance, température moyenne de juin inférieure à 7,5 °C, amplitude annuelle moyenne inférieure à 35 °C et moyenne des précipitations estivales de moins de 300 mm). Le groupe II (zone à pergélisol abondant), le plus thermique, est déterminé à 44,4 % par une température annuelle minimale inférieure à -10°C et à 34,2 % par une saison de croissance courte (degrés-jours de croissance compris entre 450 et 550). Le groupe III (zone de pergélisol restreint aux tourbières) correspond à des conditions thermiques plus clémentes, avec des étés longs (42,8 %) mais très frais (21,3 %). Les chutes de neige y sont inférieures à 250 mm (16,5 %). La dégradation du pergélisol en mares de paises (groupe IV) se caractérise par l'importance des facteurs hydriques (57,6 %), avec des précipitations peu importantes en mars (15,8 %) mais assez abondantes en juin (17,6 %). Il s'agit d'un climat continental, à amplitude annuelle forte (14,2 %) et températures estivales clémentes (18,7 %). Enfin le groupe V,

où l'extension du pergélisol est négligeable, se distingue par des conditions continentales (16,7 %), avec les étés les plus longs (11 %) et les plus chauds (20 %) de la région étudiée. Les précipitations y sont abondantes tant en été (25,7 %) qu'en hiver (10,6 %).

Nous avons vu que quand les masses d'air arctique et polaire continental couvrent la région, au coeur de l'hiver, les températures sont relativement homogènes et les précipitations faibles. Au contraire, l'été, des masses d'air différentes se partagent le territoire et on retrouve une variété plus grande tant sur le plan thermique qu'hydrique. Il est donc normal, au total, que la zonation du pergélisol reflète surtout les caractères estivaux et que l'allure des groupes tels qu'ils apparaissent sur la figure 2 ait une géométrie de type estival, avec la concavité tournée vers le sud. Les parties plus septentrionales étant celles où les précipitations sont les moins importantes, il est compréhensible que les paramètres thermiques y soient plus déterminants. Aussi, les groupes I et II, où le pergélisol est abondant, sont essentiellement

déterminés par une dominance des masses d'air arctique et polaire continentale pendant la plus grande partie de l'année, d'où la brièveté de l'été.

Les paises organiques appartiennent à un climat dans lequel les influences pacifiques permettent d'augmenter la durée de l'été qui reste néanmoins frais. De plus, la faible influence polaire maritime contribue à expliquer la faiblesse du couvert nival dont le rôle dans le régime thermique des paises est déterminant. Dans la partie méridionale, les incursions plus fréquentes d'air polaire maritime voire tropical maritime sont responsables du net réchauffement estival et de l'augmentation des précipitations. D'où le rôle important joué par les variables hydriques pour différencier les groupes dans lesquels le pergélisol se dégrade ou est sporadique.

La dégradation des paises observée pour les années 1940-50 s'explique par le patron de circulation prévalant durant cette période. Celui-ci était caractérisé par une position plus occidentale de la vallée isobarique en altitude favorisant l'influence, en été, de masses d'air méridionales plus chaudes et plus humides et donc une extension vers le nord-ouest des limites de la zone des tourbières réticulées (Lagarec, 1987). La bonne concordance entre les formes du pergélisol et le climat nous a donc permis de préciser la spécificité de ces relations et d'entrevoir un modèle d'évolution du pergélisol advenant la modification des conditions climatiques.

LES EFFETS D'UN DOUBLEMENT DU CO₂

Les données des modèles

Puisque nous avons déterminé que 5 variables climatiques permettent d'expliquer les grandes lignes de la distribution du pergélisol, nous pouvons envisager de connaître les effets du doublement du CO₂ par l'intermédiaire des changements affectant ces variables.

Manabe et Wetherland (1986) utilisant le modèle du Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) prédisent un temps plus sec en été dans la partie médiane de l'Amérique du Nord qui se traduirait par une augmentation de la température estivale de 6 à 7°C et une diminution de l'humidité des sols de 20 à 30%. Les auteurs attribuent les conditions accrues de sécheresse à une évaporation intense à la fin du printemps.

Dans une étude plus récente, Singh (1988) expose les résultats pour le Québec de 2 scénarios issus de l'utilisation de 2 modèles différents. Le scénario A est aussi basé sur un modèle GFDL à maille de 4,4° de latitude par 7,5° de longitude alors que pour le scénario B, l'auteur utilise le modèle du Goddard Institute for Space Studies (GISS) dont la résolution spatiale est de 4° de latitude par 5° de longitude.

Pour la région étudiée, on peut déduire, selon le scénario A, une augmentation de la température moyenne annuelle, un peu plus forte au sud (4,3°C) qu'au nord (3,9°C), de sorte que l'isotherme 0°C passe 5° au nord de sa position actuelle, soit approximativement à la latitude de Kuujuarapik. Selon

le scénario B, le réchauffement est encore plus important, mais cette fois plus sensible au nord (5,8°C) qu'au sud (4,6°C) et l'isotherme 0°C se situe vers 56°N. L'augmentation des températures se retrouve pour toutes les saisons mais elle est dans l'ensemble plus importante en hiver. En janvier, le réchauffement est de l'ordre de 6 à 7°C avec le scénario A et de 7 à 10°C avec le scénario B, les valeurs les plus fortes se retrouvant, dans ce dernier cas, dans la partie nord.

En juillet, il est pratiquement identique pour les deux scénarios et de l'ordre de 3°C pour l'ensemble de la région étudiée. Il résulte de cette asymétrie des augmentations, une diminution substantielle de l'amplitude thermique annuelle, de 2 à 4°C pour le scénario A et de 4 à 7°C pour le scénario B; néanmoins, le patron reste sensiblement le même qu'actuellement avec les maxima dans le coin sud-est.

Si, dans l'ensemble, l'effet du réchauffement sur les températures de janvier et de juillet en est essentiellement un de translation des isothermes, les distributions des précipitations sont quant à elles plus altérées et très différentes selon le scénario envisagé.

Ainsi, en juillet, alors que le patron actuel montre un gradient décroissant du sud-est vers le nord-ouest, le scénario A se traduit par une forte augmentation sur le plateau de la Caniapiscou et un gradient de même direction mais plus accentué; le scénario B implique peu de changements à l'est, mais une augmentation substantielle au sud de la région.

Nous sommes conscients que ces résultats ont été obtenus à partir de modèles imparfaits et avec une maille très grossière pour l'échelle à laquelle nous travaillons. Toutefois, ils suivent assez bien les patrons actuels. En fait, seules certaines températures prédites pour janvier par le scénario B dépassent de plus de 2 écarts-types la moyenne des données pour la période 1938-76. Les augmentations de précipitations restent en deçà des maxima relevés pour la même période.

LES CONSÉQUENCES POUR LA DISTRIBUTION DES FORMES

Nous avons vu précédemment que des valeurs particulières de quelques paramètres climatiques permettent d'expliquer pour l'essentiel la zonation des formes et, par suite, l'état du pergélisol. Les déplacements de ces valeurs en réponse au réchauffement anticipé devraient nous permettre de prédire l'évolution du pergélisol selon les scénarios proposés.

L'isotherme de -10°C pour la température minimale moyenne annuelle contribue à séparer les groupes où le pergélisol est répandu (I et II) des autres où il est en voie de disparition ou sporadique. Comme on peut estimer que l'augmentation de température envisagée affecte à peu près également les minima et les maxima, il en résulte que l'isotherme en question passera au nord de la péninsule.

Le deuxième paramètre en importance est celui de 7,5°C pour la température moyenne de juin qui oppose les groupes

I et III aux groupes IV et V. Considérant que l'augmentation de juillet est la plus faible de celles calculées par Singh (1988) dans la région, une valeur de +3°C identique à celle de juillet nous semble minimale pour juin. Dans ce cas, l'isotherme de 7,5°C passerait à l'ouest de la péninsule vers 58° de latitude et à l'est, vers 59°.

L'amplitude thermique moyenne annuelle contribue à souligner les contrastes les plus forts, soit la zone où le pergélisol est le plus répandu (groupe I) à celle où il est sporadique (groupes IV et V). Selon les deux scénarios, la valeur de 35°C qui sert de limite, n'apparaît plus dans la région en raison de la forte diminution des amplitudes.

Les degrés-jours de croissance servent surtout à séparer la zone des paises minérales de celle du complexe paises minérales/paises organiques (groupes I et II) par l'intermédiaire de l'isoligne de 450 degrés-jours. L'augmentation générale des températures estivales repousse cette limite au nord d'Inukjuak.

Enfin, des précipitations moyennes de juin supérieures à 75 mm permettent de mieux mettre en évidence la zone où le pergélisol est pratiquement absent (groupes IV et V). Si nous appliquons aux pluies de juin les coefficients de variation prédits pour juillet, ce qui paraît très optimiste, on n'observerait aucun changement selon le scénario B, alors qu'au contraire avec le scénario A, l'isohyète 75 mm aurait un tracé pratiquement nord-sud, à proximité du 74ème méridien. C'est donc dire que le nouveau patron des formes en relation avec le climat sera très différent de celui que nous avons analysé.

Le processus de dégradation du pergélisol déjà important dans le groupe IV, sans doute favorisé par le réchauffement qui a débuté vers la fin du XIXème siècle, va s'accroître au point où le pergélisol devrait pratiquement disparaître sauf dans la partie nord de la péninsule d'Ungava où la présence éventuelle de tourbe peut permettre son maintien sous forme

de paises. Il pourra, bien entendu, continuer à survivre de manière sporadique dans les sites exposés et où l'altitude le permettra. La dégradation du pergélisol, avec la perturbation du drainage qui en résulte, combinée à des précipitations accrues et des températures plus élevées devrait favoriser le développement de tourbières dans la région au cours du prochain siècle.

Conclusion

L'extension des formes dues au pergélisol et à sa dégradation, ainsi que celle des tourbières réticulées où le pergélisol est sporadique s'explique à 80,2% par des combinaisons de variables climatiques. Celles-ci se trouvent à définir les facteurs externes influençant le régime thermique des sols. Le XXème siècle a déjà connu une certaine diminution de l'aire du pergélisol discontinu. Le changement climatique résultant du doublement du CO₂ devrait se traduire dans le nord du Québec par une augmentation substantielle des températures, surtout sensible en hiver, et à un degré moindre des précipitations. L'application des données des différents scénarios au modèle climatique de zonation du pergélisol nous amène à conclure à une disparition quasi totale de celui-ci de la région étudiée, sauf en des sites particulièrement exposés, et à l'apparition de conditions favorables à l'expansion des tourbières dans le nord de la péninsule d'Ungava.

Remerciements

Les auteurs remercient M. Phipps, du département de Géographie de l'Université d'Ottawa, de les avoir initiés à son programme PEGASE et de leur avoir permis de l'utiliser. Donald Desmarais a dessiné les figures. Les critiques et commentaires constructifs de M.-K. Seguin et d'un lecteur anonyme ont permis d'améliorer ce texte.

ANNEXE: Liste des variables

1. Température annuelle moyenne
2. Température annuelle moyenne des maxima
3. Température annuelle moyenne des minima
4. Température mensuelle moyenne de mars
5. Température mensuelle moyenne de juin
6. Température mensuelle moyenne de septembre
7. Température mensuelle moyenne de décembre
8. Chutes de neige annuelles
9. Précipitations totales annuelles
10. Précipitations mensuelles moyennes de mars
11. Précipitations mensuelles moyennes de juin
12. Précipitations mensuelles moyennes de septembre
13. Précipitations mensuelles moyennes de décembre
14. Amplitude annuelle moyenne
15. Durée annuelle moyenne de l'hiver
16. Durée annuelle moyenne de la saison de croissance
17. Nombre annuel moyen de degrés-jours de croissance
18. Durée annuelle moyenne de la période sans gel
19. Moyenne des précipitations d'été (mai à septembre)
20. Altitude

Références

- ALLARD, M. et M.K. SEGUIN, 1987. Le pergélisol au Québec nordique: bilan et perspective.— *Géogr. phys. Quat.*, 38: 165-184.
- ATLAS CLIMATOLOGIQUE DU QUEBEC, 1978. Température-précipitation.— Service de la Météorologie, Direction Générale des Eaux, Ministère des Richesses Naturelles, Québec, 42 planches.
- DEWEZ, V., D. LAGAREC & M. PHIPPS, 1984. The distribution of some periglacial landforms in Northern Quebec (Canada) as related to climate: an information system approach.— Notes de recherche n° 47, Dépt de Géographie, Université d'Ottawa, 35p.
- DIONNE, J.C., 1978. Formes et phénomènes périglaciaires en Jamésie, Québec subarctique.— *Géogr. phys. Quat.*, 32: 187-247.
- DIONNE, J.C., 1984. Pales et limites méridionales du pergélisol dans l'hémisphère nord: le cas de Blanc-Sablon.— *Géogr. phys. Quat.*, 38: 11-25.
- GRAY, J.T. & J.A. PILON, 1976. Permafrost distribution at Tasiujaq (Leaf Basin) on the southwest coast of Ungava Bay, New Quebec.— *Rev. Géogr. Montréal*, 30: 367-373.
- GRAY, J.T., J.A. PILON & J. POITEVIN, 1979. Le pergélisol et la couche active dans la toundra forestière au sud de la Baie aux Feuilles.— *Géogr. phys. Quat.*, 33: 253-264.
- GUIOT, J., 1985. Reconstruction of seasonal temperatures and sea-level pressures in the Hudson Bay area back to 1700.— *Climat. Bull.*, 19, 2: 11-59.
- HARRIS, S.A., 1986. Permafrost Distribution, Zonation and Stability Along the Eastern Ranges of the Cordillera of North America.— *Arctic*, 39, 1: 29-38.
- JACOBY, G.C., I.S. IVANCIU & L.D. ULAN, 1988. A 263-year record of summer temperature for Northern Quebec reconstructed from the tree-ring data and evidence of a major climatic shift in the early 1800's.— *Paleogeogr. Paleoclimat. Paleocology*, 64: 69-78.
- KUDRYATSEV, V.A., 1959. Temperature, thickness and discontinuity of permafrost.— Pages 219-273 in *Principles of geocryology, Part I, General geocryology, Chap. VIII, Academy of Sciences of the USSR, Moscow; Technical Translation n°1187, NRC, Ottawa, 75 p.*
- LAGAREC, D., 1980. Etude géomorphologique de pales et de buttes cryogènes au Nouveau-Québec.— Thèse Ph.D., Univ. Laval, Québec, 291 p.
- LAGAREC, D., 1982. Cryogenetic mounds as indicators of permafrost conditions, Northern Québec.— *Proc. 4th Can. Permafrost Conf., Calgary, Alberta, 1981: 43-48.*
- LAGAREC, D., 1987. Changements climatiques récents et dynamique du pergélisol dans le nord du Québec.— Résumés, 12ème Congrès INQUA, Ottawa: 205.
- MANABE, S. & R.T. WETHERLAND, 1986. Reduction in summer soil wetness induced by an increase in atmospheric carbon dioxide.— *Science*, 232 (4750): 626-628.
- MORIN, A. & S. PAYETTE, 1984. Expansion récente du mélèze à la limite des forêts (Québec nordique).— *J. Can. Bot.*, 62, 7: 1404-1408.
- NICHOLSON, F.H., 1979. Permafrost spatial and temporal variations near Schefferville, Nouveau-Québec.— *Geogr. phys. Quat.*, 33: 265-277.
- PAYETTE, S., H. SAMSON & D. LAGAREC, 1976. The evolution of permafrost in the taïga and in the forest-tundra, Western Quebec-Labrador peninsula.— *Can. J. of Forest Res.*, 6, 2: 203-220.
- PAYETTE, S. & L. FILION, 1985. White spruce expansion at the tree line and recent climatic change.— *Can. J. Forest Res.*, 15, 1: 214-251.
- PHIPPS, M., 1981. Information theory and landscape analysis.— Pages 57-64 in Tjallingii S.P. & A.A. de Veer (eds). *Perspectives in Landscape Ecology*, Wageningen, Pudoc.
- POITEVIN, J. & J.T. GRAY, 1982. Distribution du pergélisol dans le bassin de la Grande Rivière de la Baleine, Québec.— *Nat. Can.*, 109: 445-455.
- SEGUIN, M.K., 1978. Temperature- electrical resistivity relationship in continuous permafrost at Purtuniq, Ungava Peninsula.— Pages 137-144 in *Proc. 3rd Int. Conf. on Permafrost, NRC, Ottawa, 1978.*
- SEGUIN, M.K. & M. ALLARD, 1984. Le pergélisol et les processus thermokarstiques de la région de la Rivière Nastapoca, Nouveau-Québec.— *Géogr. phys. Quat.*, 38: 11-25.
- SEGUIN, M.K. & M. ALLARD, 1987. La géophysique appliquée au pergélisol, Québec nordique: historique et développements récents.— *Géogr. phys. Quat.*, 41: 127-140.
- SINGH, B., 1988. Impacts d'un changement climatique sur les ressources naturelles du Québec.— *Sommaire du Changement climatique, Environnement Canada, SCC-88-08, 11 p.*
- WENDLAND, W.M. & R.A. BRYSON, 1981. Northern Hemisphere Airstream Regions.— *Monthly Weather Rev.*, 109: 255-270.
- WILSON, C., 1971. Le climat du Québec. Atlas climatique.— *Etudes climatologiques 11, Service de la Météorologie du Canada, Ottawa, 365 p., 74 planches.*