

## Altération des substrats rocheux et rôle du soulèvement gélocal dans la formation des champs de blocaille, en Hudsonie

### Bedrock Weathering and the Role of Frost-Heaving in Block Field Formation, Hudson Bay Area

### Veränderung der Fels-Substrate und die Rolle der Frosthebung bei der Bildung der Steinschuttfelder im Gebiet der Hudson Bay

Yves Michaud and Jean-Claude Dionne

Volume 41, Number 1, 1987

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/032661ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/032661ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (print)

1492-143X (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Michaud, Y. & Dionne, J.-C. (1987). Altération des substrats rocheux et rôle du soulèvement gélocal dans la formation des champs de blocaille, en Hudsonie. *Géographie physique et Quaternaire*, 41(1), 7-18.  
<https://doi.org/10.7202/032661ar>

Article abstract

Since the déglaciation (7500 yr. BP) and the retreat of the Tyrrell Sea, the eastern Hudson Bay cuestas are influenced by frost weathering processes. 27% of the surface of the volcanic-sedimentary formations mostly composed of basalt, dolomite and arkosic rocks has been weathered. Obviously, frost action is the main process in this region. Among the weathering processes, frost-heaving is well worth for its originality and intensity. In the Guillaume-Delisle area, more than 1800 frost-heaved bedrock features have been observed in a 16 km<sup>2</sup> area, giving a density of 110 features/km<sup>2</sup>. Frost-heaved bedrock features have been grouped into four categories: monolith, dome-shaped structure, chaotic structure and craterlike structure. Aside frost-shattering and frost-wedging, the bulk of detritus involved in frost-heaving is very important contributing to the destruction of the glacially sculptured bedrock surface. Since déglaciation, in the area, more than 25 000 m<sup>2</sup> of the bedrock surface have been destroyed by frost-heaving only. The fragments produced by frost-heaving contribute to block field development. The occurrence of this phenomenon requires a densely fractured and water-saturated rock surface, as well as numerous severe freeze-thaw cycles. Moreover, the presence of permafrost is likely to play a role in their development.

# ALTÉRATION DES SUBSTRATS ROCHEUX ET RÔLE DU SOULÈVEMENT GÉLIVAL DANS LA FORMATION DES CHAMPS DE BLOCAILLE, EN HUDSONIE

Yves MICHAUD et Jean-Claude DIONNE, Département de géographie et Centre d'études nordiques, Université Laval, Sainte-Foy, Québec G1K 7P4.

**RÉSUMÉ** Depuis la déglaciation (7500 ans BP) et le retrait de la mer de Tyrrell, les cuestas hudsoniennes sont soumises aux agents d'érosion périglaciaires. Les surfaces rocheuses composées principalement de basalte, de dolomie et d'arkose, montrent, en moyenne, un pourcentage d'altération de 27%. Bien que la gélifraction soit le processus dominant, le soulèvement géluvial a retenu l'attention en raison de son originalité et de son intensité. Ce mécanisme responsable de la formation des soulèvements rocheux périglaciaires joue aussi un rôle important dans la formation de champs de blocaille. Dans le secteur du golfe de Guillaume-Delisle, dans une aire de 16 km<sup>2</sup>, plus de 1800 édifices de soulèvement géluvial ont été observés, ce qui donne, en moyenne, 110 soulèvements/km<sup>2</sup>. Les formes d'éjection ont été regroupées en quatre grandes catégories: monolithes, monticules, chaos et édifices à dépression centrale. Le volume de débris impliqués dans les soulèvements est important. Il concourt à la destruction des substrats rocheux au même titre que la gélifraction et la gélidissolution. Dans le secteur étudié, plus de 25 000 m<sup>2</sup> de surface rocheuse ont été détruits par le soulèvement géluvial depuis la déglaciation. Comme les fragments éjectés demeurent sur place, il en résulte des champs de blocaille. La manifestation du phénomène requiert une surface rocheuse abondamment fissurée et saturée en eau ainsi que l'existence de cycles gel-dégel de grande amplitude. Le pergélisol jouerait aussi un rôle dans leur formation.

**ABSTRACT** *Bedrock weathering and the role of frost-heaving in block field formation, Hudson Bay area.* Since the deglaciation (7500 yr. BP) and the retreat of the Tyrrell Sea, the eastern Hudson Bay cuestas are influenced by frost weathering processes. 27% of the surface of the volcanic-sedimentary formations mostly composed of basalt, dolomite and arkosic rocks has been weathered. Obviously, frost action is the main process in this region. Among the weathering processes, frost-heaving is well worth for its originality and intensity. In the Guillaume-Delisle area, more than 1800 frost-heaved bedrock features have been observed in a 16 km<sup>2</sup> area, giving a density of 110 features/km<sup>2</sup>. Frost-heaved bedrock features have been grouped into four categories: monolith, dome-shaped structure, chaotic structure and crater-like structure. Aside frost-shattering and frost-wedging, the bulk of detritus involved in frost-heaving is very important contributing to the destruction of the glacially sculptured bedrock surface. Since deglaciation, in the area, more than 25 000 m<sup>2</sup> of the bedrock surface have been destroyed by frost-heaving only. The fragments produced by frost-heaving contribute to block field development. The occurrence of this phenomenon requires a densely fractured and water-saturated rock surface, as well as numerous severe freeze-thaw cycles. Moreover, the presence of permafrost is likely to play a role in their development.

**ZUSAMMENFASSUNG** *Veränderung der Fels-Substrate und die Rolle der Frosthebung bei der Bildung der Steinschuttfelder im Gebiet der Hudson Bay.* Seit der Eisabschmelzung (7500 Jahre BP) und dem Rückzug des Meeres von Tyrrell sind die Firste der Hudson Bay periglazialen Erosionseinflüssen ausgesetzt. Die felsigen Oberflächen, die hauptsächlich aus Basalt, Dolomit und Arkose bestehen, weisen im Durchschnitt einen Veränderungsprozentsatz von 27 % auf. Obwohl die Frostsprengung der beherrschende Prozess ist, hat die Frosthebung wegen ihrer Besonderheit und Intensität die Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Dieser für die Bildung periglazialer Felshebungen verantwortliche Mechanismus spielt auch eine wichtige Rolle bei der Bildung der Steinschuttfelder. Im Gebiet der Bucht von Guillaume-Delisle, in einem Gebiet von 16 km<sup>2</sup>, wurden über 18 000 durch Frosthebung entstandene Gebilde beobachtet, was durchschnittlich 110 Hebungen/km<sup>2</sup> ergibt. Die Auswurfformen wurden in vier große Kategorien eingeteilt: Monolithe, Hügel, Gebilde mit chaotischer Struktur und solche Kraterähnlicher Struktur. Das Volumen von an den Hebungen beteiligtem Schutt ist bedeutend. Es trägt zur Zerstörung der Fels-Substrate ebenso bei wie die Frostsprengung und die Frosttrennung. In dem untersuchten Gebiet sind durch die Frosthebung seit der Eisabschmelzung über 25 000 m<sup>2</sup> felsiger Oberfläche zerstört worden. Da die ausgestoßenen Fragmente an Ort und Stelle bleiben, entstehen Steinschuttfelder. Damit es dazu kommt, muß eine reichlich rissige und mit Wasser gesättigte Felsoberfläche vorhanden sein, und es muß Frost-Entfrostsungs-Zyklen großen Umfangs geben. Der Dauerfrostboden soll auch eine Rolle bei ihrer Bildung spielen.

## INTRODUCTION

Depuis la déglaciation (7500 ans BP) et le retrait de la mer de Tyrrell, les cuestas hudsoniennes sont exposées aux processus d'érosion périglaciaires dont le soulèvement géival. Ce mécanisme, responsable de la formation des soulèvements rocheux périglaciaires, contribue à la destruction de la surface glaciaire de référence et à la formation de champs de blocaille. Formes relativement fréquentes dans les régions subarctiques et arctiques, les soulèvements rocheux périglaciaires n'ont jusqu'à présent fait l'objet que de quelques études (YARDLEY, 1951; BOURNÉRIAS, 1972; DILABIO, 1978, 1982; DIONNE, 1978, 1981, 1983; PAYETTE, 1978; DYKE, 1979, 1981, 1984; FRENCH et GILBERT, 1982; LEBRUN, 1985; MICHAUD, 1985). Peu d'auteurs, cependant, ont attiré l'attention sur le rôle de ce phénomène dans l'altération des substrats rocheux (WASHBURN, 1979).

L'existence d'une surface rocheuse de référence d'âge connu, dans la région côtière du golfe de Guillaume-Delisle, en Hudsonie, a permis d'une part d'évaluer son degré d'altération et de destruction au cours de l'Holocène et, d'autre part, de mettre en évidence le rôle du soulèvement géival dans la destruction des substrats rocheux et la formation de champs de blocaille.

## MÉTHODOLOGIE

Les méthodes utilisées pour évaluer le pourcentage de destruction de la surface glaciaire de référence sont de deux ordres. On a d'abord calculé, à l'intérieur de places échantillons de 100 m<sup>2</sup>, la superficie totale de la surface glaciaire de référence altérée. Par la suite, une subdivision des affleurements rocheux selon leur degré d'altération a été effectuée à partir d'une appréciation visuelle de la surface détruite. L'ensemble du secteur étudié a été parcouru par deux ou trois observateurs au cours de deux saisons de terrain.

Dans le cas des soulèvements rocheux périglaciaires, un relevé exhaustif des formes a été réalisé. Les mesures faites concernent la morphométrie, la lithologie, le nombre de blocs, leurs dimensions, la position topographique et l'altitude. Les données recueillies ont été traitées et analysées grâce à un programme d'informatique. Diverses cartes et graphiques ont aussi été réalisés par procédé informatique (programme de cartographie par ordinateur).

## CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU MILIEU

Bien qu'observable sur l'ensemble des cuestas hudsoniennes, la météorisation des substrats rocheux fut plus précisément étudiée à la hauteur du golfe de Guillaume-Delisle (fig. 1). Le secteur choisi correspond à une aire de 25 km<sup>2</sup> situé en bordure de la mer d'Hudson, immédiatement au sud du Goulet (76°31' - 76°42' O, 56°05' - 56°09' N).

Ce secteur de la côte occidentale de la mer d'Hudson fait partie de la province géologique du Churchill. Il comprend des roches granitogneissiques, sédimentaires et volcaniques. Appuyées sur le socle cristallin, les formations monoclinales volcano-sédimentaires culminent vers 450 m dans le secteur

du golfe de Guillaume-Delisle; elles s'abaissent progressivement vers le nord et vers le sud (BEALS, 1968). Ce relief de cuesta comprend d'une part de grands revers faiblement inclinés (5° à 10°) vers le centre du bassin hudsonien et, d'autre part, des fronts escarpés tournés vers l'intérieur des terres (DIONNE, 1976; GUIMONT et LAVERDIÈRE, 1980).

Les lithologies rencontrées dans le secteur du Goulet (fig. 2) comprennent, de la base au sommet, de l'arkose, de la dolomie à stromatolites, des quartzites et du basalte (WOODCOCK, 1960). Les diverses formations rocheuses sont abondamment fissurées. La dolomie est plus particulièrement affectée par un grand réseau de diaclases orthogonales, entrecoupées obliquement par des fissures de tension et de décompression. Le basalte, qui est habituellement de type colonnaire, est affecté d'une part par un réseau de fissures primaires de type polygonal et, d'autre part, par des fissures secondaires verticales et obliques, orientées dans plusieurs

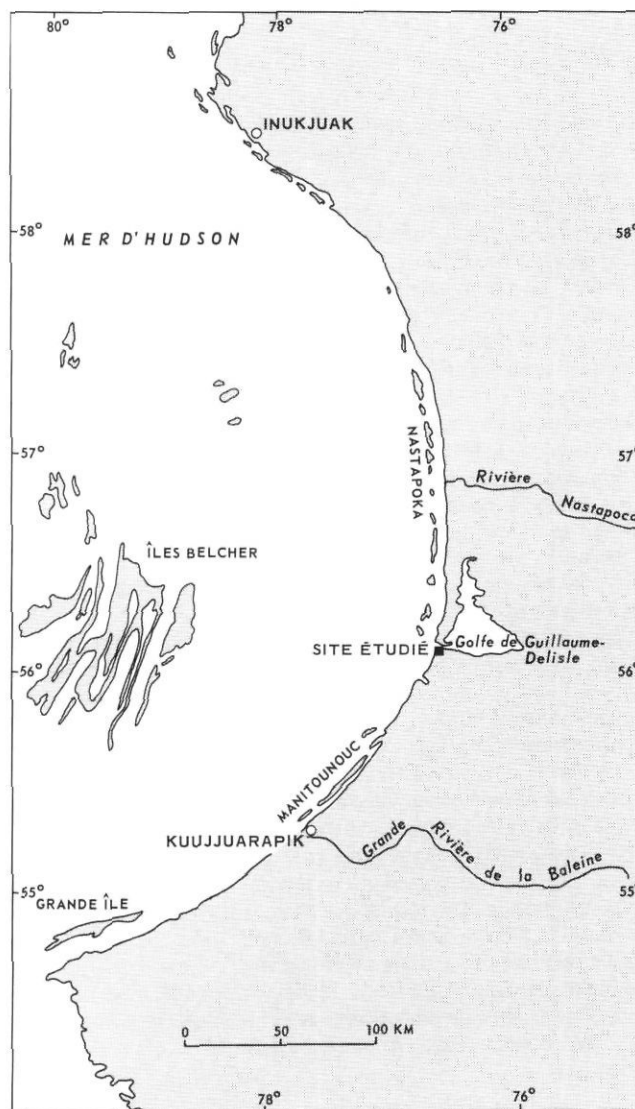


FIGURE 1. Carte de localisation du secteur étudié en Hudsonie. Location map of the study area, Hudson Bay.

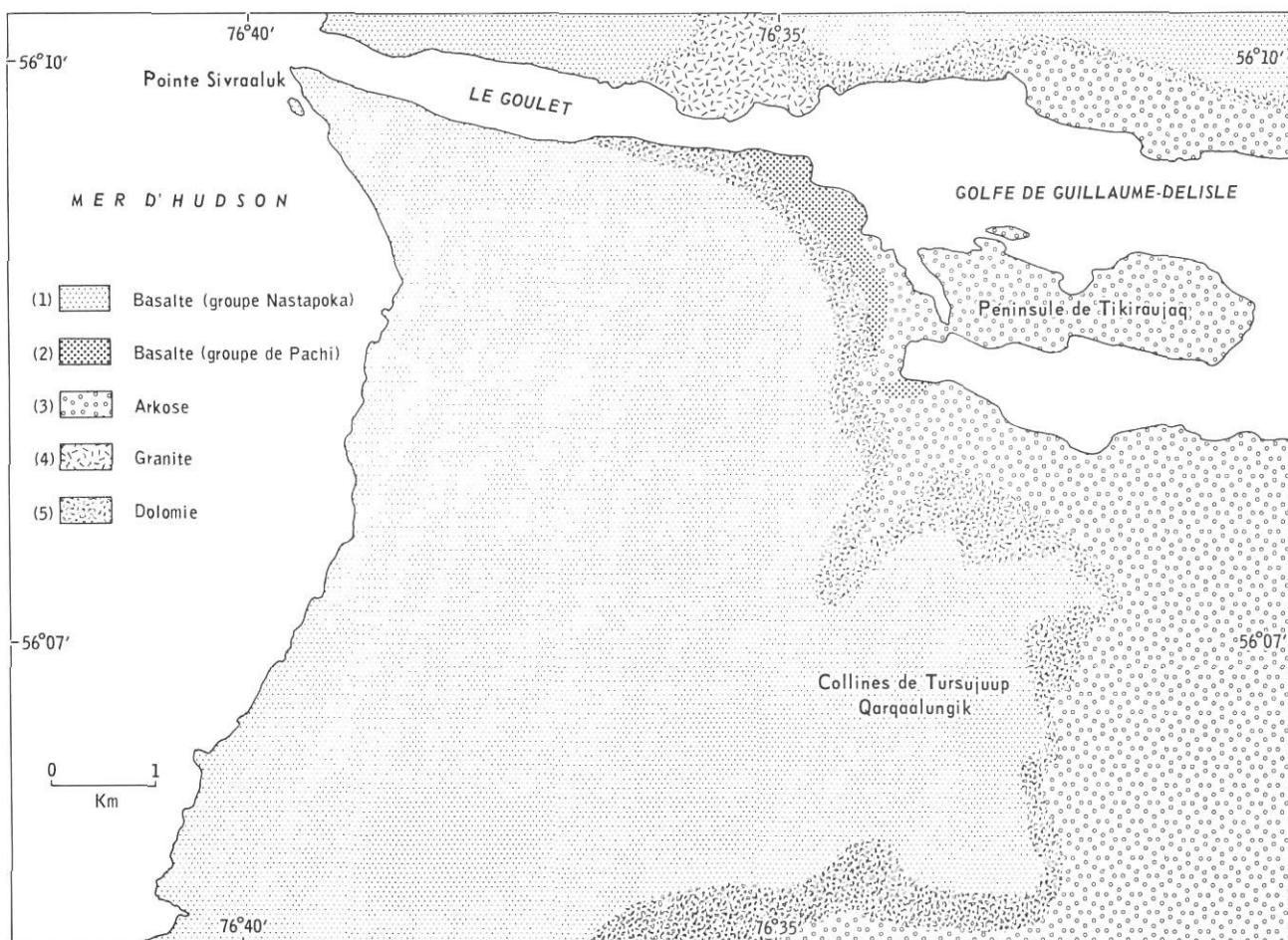


FIGURE 2. Carte géologique sommaire du secteur étudié au golfe de Guillaume-Delisle (d'après WOODCOCK, 1960).

Geological map of the study area in the Guillaume-Delisle Gulf area (after WOODCOCK, 1960).

directions. En coupe, on remarque des fissures horizontales à subhorizontales, qui divisent le basalte en laminats rocheux et présentent une pseudo-stratification sensiblement parallèle à la surface. La disposition fissurale d'origine variée est exploitée par les divers agents d'altération.

Au Quaternaire, la côte est de la mer d'Hudson a été façonnée par différents agents. La glaciation wisconsinienne a laissé une multitude de formes et marques d'abrasion sur les surfaces rocheuses qui sont bien conservées. Elles témoignent d'une direction unique d'écoulement glaciaire vers l'ouest variant de 250° à 300° (HILLAIRE-MARCEL, 1976).

Dans la zone côtière hudsonienne, lors de son retrait (7500 ans BP), l'inlandsis laurentidien a cédé la place aux eaux de la mer de Tyrrell. La limite marine maximale atteinte dans la région du golfe de Guillaume-Delisle avoisine 270 m (HILLAIRE-MARCEL, 1976).

Situées au Québec subarctique, les cuestas hudsoniennes sont soumises présentement à un climat de type périglaciaire caractérisé par des étés frais et humides et des hivers froids et relativement secs.

À défaut de station météorologique au golfe de Guillaume-Delisle, on a dû interpoler les données climatiques, à partir

des deux stations de l'Hudsonie les plus rapprochées, soit celles de Kuujuarapik et d'Inukjuak (tabl. I). La température moyenne annuelle de l'air est de  $-4,8^{\circ}\text{C}$ ; celle de janvier (le mois le plus froid) de  $-23,5^{\circ}$  et celle d'août (le mois le plus chaud), de  $10^{\circ}$ . Les précipitations totales sont en moyenne de 600 mm.

Les principales caractéristiques climatiques de cette région sont: 1) la fréquence élevée de brume et de nuages bas le long de la côte: 64% en été, dont 10% sous forme de brume épaisse (PLAMONDON-BOUCHARD, 1975); 2) la répartition très irrégulière de la couverture nivale (FILION et PAYETTE, 1976); 3) la combinaison d'un climat à caractère maritime et continental. Ce dernier dépend en grande partie de l'état de la mer d'Hudson. Lorsque la masse d'eau n'est pas gelée, une forte influence maritime affecte la côte, alors qu'à l'état gelé, on assiste à une chute brutale des températures (milieux continentaux). C'est pourquoi, l'automne et le printemps sont ponctués de nombreux cycles gel-dégel de type islandais, alors qu'en hiver, les températures atteignent parfois  $-50^{\circ}\text{C}$ , ce qui se rapproche du type sibérien.

En Hudsonie, la présence de pergélisol dans la roche en place a été mise en évidence récemment (BOTTERON et al., 1979; POITEVIN et GRAY, 1982; SEGUIN et ALLARD,



TABLEAU I  
Paramètres climatiques en Hudsonie

	Kuujuarapik	Golfe de Guillaume-Delisle <sup>1</sup>	Inukjuak
Latitude	55°28' N	56°05' N	58°45' N
T° moyenne annuelle	-4,3° C	-4,8° C	-6,7° C
T° moyenne de janvier	-22,8° C	-23,5° C	-25,2° C
T° moyenne d'août	10,6° C	10,0° C	8,5° C
Précipitations totales	660 mm	600 mm	400 mm
Chute de neige	260 cm	250 cm	200 cm
Nombre de jours de dégel	65	63	60
Nombre de jours de gel	300	302	305
Nombre de jours de gel avec au moins un cycle gel-dégel (1980)	99	97	93
	P (57) A (42)	P (57) A (40)	P (56) A (37)

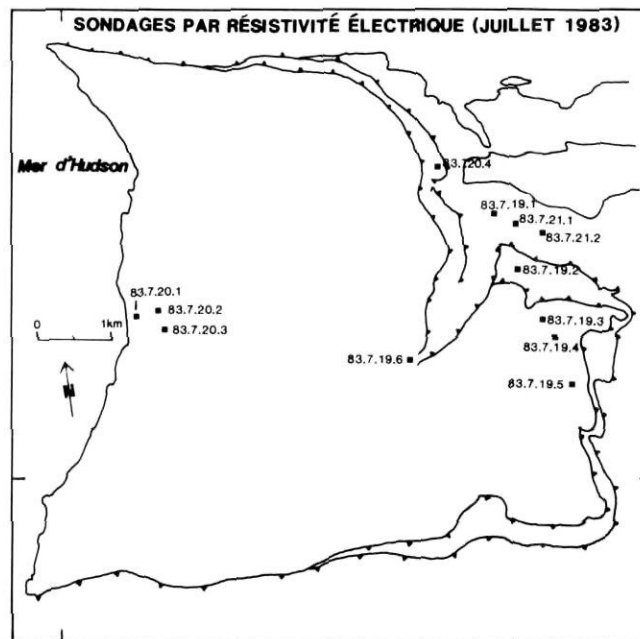
<sup>1</sup> valeurs interpolées à partir des deux autres stations.  
P = printemps; A = automne.

1984). Des sondages par résistivité électrique effectués à l'été 1983, au golfe de Guillaume-Delisle (fig. 3), ont confirmé la présence d'un noyau de pergélisol important dans les formations volcano-sédimentaires dans le secteur étudié. La masse de pergélisol détectée débute à partir d'une altitude d'environ 20 m pour se terminer au front de la cuesta. À la mi-juillet, l'épaisseur du mollisol varie de 1 à 1,5 m. À la fin de la saison de dégel, SEGUIN et ALLARD (1984, p. 358) estiment qu'il peut atteindre 10 m aux Manitounouc. Dans le secteur étudié, l'épaisseur du pergélisol varie de 3 à 53 m. Aucun pergélisol n'a toutefois, été trouvé dans l'arkose.

### LES PROCESSUS D'ALTÉRATION

Parmi les mécanismes d'altération, on a distingué cinq catégories (tabl. III). La fissuration comprend l'ensemble des fissures ouvertes affectant la surface. Les processus littoraux périglaciaires se rapportent principalement à l'action des glaces. L'altération chimique (corrosion et dissolution) affecte non seulement les roches carbonatées (dolomie), mais aussi les arkoses et le basalte. Les deux autres processus en cause sont le cryoclastisme (gélifraction) et la desquamation, un mécanisme non forcément lié au froid.

Depuis la déglaciation, ces agents ont altéré, en moyenne, 27% de la surface de référence, dans les trois lithologies du secteur étudié (tabl. II). L'action de ces divers agents a, ce-



N° de terrain	Altitude (m)	Substrat	Épaisseur dégelée (m)	Épaisseur gelée (m)
83.7.19.1	60	Arkose	1,5	3
83.7.19.2	220	Dolomie	1,5	4
83.7.19.3	355	Basalte	1,3	20
83.7.19.4	360	Basalte	1,5	53
83.7.19.5	400	Basalte	1,5	40
83.7.19.6	248	Champ de blocs	1	4
83.7.20.1	20	Basalte	1,5	10
83.7.20.2	35	Basalte	1,5	12
83.7.20.3	42	Sable sur basalte	1,5	5
83.7.20.4	125	Dolomie	1,5	16
83.7.21.1	90	Sable sur arkose	—	—
83.7.21.2	95	Sable sur arkose	—	—

FIGURE 3. Localisation des sondages par résistivité électrique (juillet, 1983).

*Electrical resistivity sounding sites (July, 1983).*

pendant, varié selon la lithologie du substrat rocheux. Dans le basalte et l'arkose, principalement affectés par les agents d'altération mécanique, 21% et 46% respectivement de la surface de référence a été détruite. Dans le cas de la dolomie, si on exclut les processus d'altération chimique, on obtient un pourcentage de météorisation de l'ordre de 18%.

Contrairement aux deux autres lithologies, la totalité de la surface dolomitique est affectée par la dissolution. Des veinules de quartz et de nodules de chert laissés en saillies, sur certains replats ont permis d'évaluer l'épaisseur moyenne de la couche érodée, soit entre 2 et 9 cm. Un taux moyen de dissolution de 6,5 mm par 1000 ans a été calculé (DIONNE et MICHAUD, 1985).

Les formes d'altération chimique affectant le basalte et l'arkose correspondent à de petites cavités de faible profondeur

(ordre du centimètre), localisées au droit d'inclusions minérales plus facilement altérables. Au total, l'altération chimique (corrosion) est peu importante dans les roches non carbonatées.

L'activité des agents d'altération fut mesurée en fonction de leur participation et de leur fréquence (tabl. III). La participation correspond au rapport, en pourcentage, entre la superficie affectée par un agent particulier et le pourcentage total de la superficie altérée. Cette valeur est en quelque sorte un pourcentage de recouvrement. Sous la rubrique *fréquence*, on indique le nombre de fois qu'on a mesuré un même type de phénomènes. Par exemple, pour l'ensemble des lithologies, la gélifraction s'est révélée l'agent le plus actif, avec une participation de 56% et une fréquence de 37%, soit 1337 formes mesurées. Par ailleurs, cette évaluation renseigne sur l'ordre de grandeur des formes produites. Ainsi, pour l'ensemble des lithologies, la *fissuration*, avec une par-

ticipation de 5% jumelée à une fréquence de 32%, témoigne d'une production de plusieurs formes de faible étendue, alors que le *littoral*, avec une participation de 31% et une fréquence de 10%, reflète un petit nombre de formes de grande taille.

Bien qu'on observe une certaine érosion différentielle en fonction de la lithologie, il a été impossible de déceler des gradients altitudinaux. Le relèvement isostatique très rapide pour les 200 premiers mètres (HILLAIRE-MARCEL, 1976, 1980; ALLARD et TREMBLAY, 1983), n'a pas permis aux agents subaériens d'étager le paysage d'une façon évidente. Les agents ont évolué davantage en fonction de la lithologie, de la fissuration et de la répartition de la couverture nivale, qu'en fonction de l'altitude et du temps.

### LE RÔLE DU SOULÈVEMENT GÉLIVAL

Parmi les processus d'altération, le soulèvement géluvial a retenu l'attention par son originalité et son intensité. Associé à la gélidisjonction et à la gélifraction, ce processus a pour effet de détruire la surface rocheuse de référence et de la transformer en champ de blocaille.

La terminologie utilisée pour qualifier les formes de soulèvement géluvial dans les substrats rocheux se révèle assez diversifiée. De nombreuses expressions, la plupart descriptives, ont été utilisées. En français, l'expression utilisée par BOURNÉRIAS (1972), *pyramides rocheuses d'éjection*, ne concerne que certaines formes. PAYETTE (1978) emploie plutôt l'expression générale *buttes rocheuses d'origine péri-glaciaire*. Malheureusement, cette expression peu explicite n'indique pas qu'il s'agit d'un mécanisme lié au soulèvement

TABLEAU II

Statistiques descriptives sur le pourcentage total de la superficie altérée

Lithologie	Min. (%)	Max. (%)	Moy. (%)
Ensemble	6	57	27
Basalte	6	46	21
Dolomie	13	29	18
Arkose	36	57	46

TABLEAU III

Évaluation des agents d'altération

Lithologie	Agent	Participation		Fréquence	
		%	Nombre	Pourcentage	
Basalte	Fissuration	1	500	36	
	Gélifraction	61	556	40	
	Desquamation	1	55	4	
	Littoral	34	105	8	
	Altération chimique	5	168	12	
Dolomie	Fissuration	30	557	57	
	Gélifraction	65	413	42	
	Desquamation	0	0	0	
	Littoral	7	12	1	
	Altération chimique	100	uniforme	100	
Arkose	Fissuration	1	27	3	
	Gélifraction	50	318	36	
	Desquamation	3	59	7	
	Littoral	29	75	9	
	Altération chimique	15	404	46	
Ensemble	Fissuration	5	1 142	32	
	Gélifraction	56	1 337	37	
	Desquamation	2	129	4	
	Littoral	31	355	10	
	Altération chimique	7	601	17	

gélival. DIONNE (1981) parle de *formes d'éjection périglaciaires* sur substrat rocheux. Comme il existe diverses formes d'éjection, LEBRUN (1985) a proposé une terminologie que nous avons reprise en partie.

Dans la région du golfe de Guillaume-Delisle, les soulèvements rocheux périglaciaires ont été regroupés en quatre grandes catégories: monolithes, monticules, chaos, édifices à dépression centrale.

#### A. LES MONOLITHES

La catégorie des monolithes s'avère le groupe le plus répandu et le plus diversifié. Il comprend quatre sous-types: les monolithes simples, composites, axiaux et de type manhattan.

##### 1) Les monolithes simples

Le monolithe simple est composé d'un seul bloc à figure géométrique variable (triangle, carré, rectangle, etc.). Il emprunte différents styles d'éjection. Dans la majorité des cas, on assiste à une éjection verticale du bloc (fig. 4), allant parfois jusqu'à l'éjection complète. De plus, lorsque localisés sur des versants en pente assez forte, les fragments tendent à être éjectés latéralement (*frost thrusting*).

##### 2) Les monolithes composites

Le monolithe composite comprend habituellement plusieurs fragments (4 à 12 en moyenne). D'allure massive, il donne des formes géométriques variées. Il arrive fréquemment que les plus gros éléments soulevés soient refragmentés par la

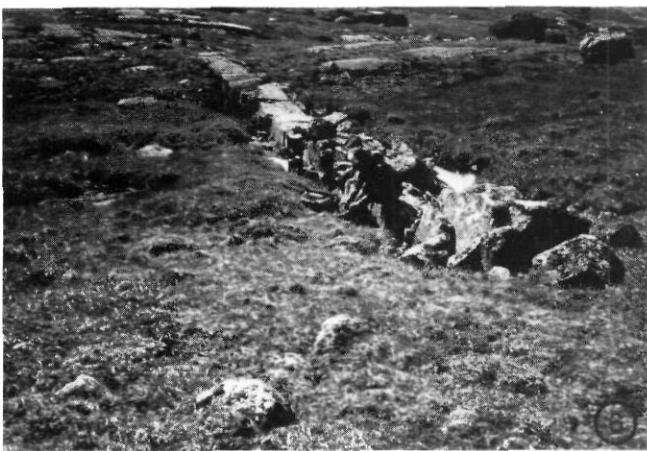


FIGURE 4. Monolithes simples d'éjection verticale, dans le basalte, au golfe de Guillaume-Delisle. La forme et la taille des blocs soulevés sont commandées par le réseau de fissures primaires.

*Frost-heaved blocks (monoliths) in basalt in Guillaume-Delisle Gulf area. The shape and the size of the heaved blocks are controlled by primary fractures.*

FIGURE 6. Monolithe axial dans le basalte; l'édifice fait une dizaine de mètres de longueur. Des fissures parallèles majeures contrôlent ce type de forme de soulèvement allongée.

*A longitudinal frost-heaved feature in basalt, about 10 m long. This linear feature is controlled by a major parallel fracture pattern.*



FIGURE 5. Monolithe composite dans le basalte montrant une re-fragmentation par cryoclastie de quelques blocs après le soulèvement massif initial, golfe de Guillaume-Delisle, Hudsonie.

*A composite monolith in basalt, showing subsequent frost shattering of the initial massive heaved blocks.*

FIGURE 7. Soulèvement gélival de type manhattan dans le basalte formé d'une trentaine de fragments.

*A manhattan type frost-heaved feature in basalt, made up by an agglomeration of about 30 fragments.*

suite (fig. 5), ce qui traduit une certaine évolution. Dans les soulèvements récents, les fragments sont rarement affectés par la cryoclastie.

3) Les monolithes axiaux

Les monolithes axiaux ont une forme allongée. Composés de plusieurs blocs, ils sont situés au droit de fissures majeures. Les édifices sont étroits mais relativement longs, excédant parfois une dizaine de mètres (fig. 6). Le style d'éjection généralement vertical est parfois accompagné d'éjection de type basculé (*tilted block*), c'est-à-dire que l'un des côtés du bloc est plus soulevé que l'autre. En somme, on pourrait parler de soulèvement en « touches de piano ».

4) Les manhattans

Le type *manhattan* correspond au soulèvement de fragments individuels. On en compte souvent de 10 à 40 qui sont concentrés dans une aire donnée. Le réseau est contrôlé par les diaclases (fig. 7). Ce type de soulèvement évoque une concentration de gratte-ciel new-yorkais, d'où son nom.

B. LES MONTICULES

Les monticules sont des édifices de soulèvement massifs composés de plusieurs blocs. Ils ont une forme en dôme dans laquelle les blocs sont davantage soulevés au centre

qu'à la périphérie (fig. 8). Ce type de forme s'apparente aux buttes rocheuses à crevasses décrites par PAYETTE (1978). À l'instar des monolithes, les monticules sont considérés comme des édifices de soulèvement initial (DIONNE, 1983).

C. LES CHAOS

Les chaos représentent des amas de blocs hétérométriques sans organisation apparente formant des édifices de dimensions variables mais d'ordre métrique (fig. 9). Les formes en éventail sont fréquentes (*bursting shaped feature*).

D. LES SOULÈVEMENTS À DÉPRESSION CENTRALE

Les soulèvements à dépression centrale sont circulaires. Ils sont composés d'un bourrelet de gélifractions en périphérie et d'une dépression centrale formant un petit cratère (fig. 10). Le bourrelet n'est pas toujours symétrique et peut être plus gros d'un côté. De même, la dépression n'est pas forcément située exactement au centre de l'édifice. La dissymétrie peut résulter aussi de la répartition des fragments, les plus grossiers étant concentrés sur un côté, les plus petits sur l'autre. C'est le cas de certains édifices d'éjection localisés sur des versants en pente, le bourrelet aval est alors formé de fragments plus gros que celui du côté opposé. Dans le cas des édifices situés sur un replat, le bourrelet est habituellement symétrique. Ce type d'édifice de soulèvement correspond au *crater structure* de DILABIO (1978).



FIGURE 8. Monticule d'éjection en dôme dans le basalte, en phase initiale de formation. À remarquer le résidu du tapis tourbeux et lichénique à la surface des blocs soulevés indiquant un soulèvement relativement récent.

*A recently heaved massive feature in basalt. Note the dome-shape feature and the residual peat cover.*

FIGURE 9. Édifice chaotique résultant de la gélifraction survenue après le soulèvement initial. Cette forme montre un stade d'évolution vers un édifice à dépression centrale.

*A chaotic frost-heaved feature showing active subsequent frost-shattering. The feature shows an evolution stage between the chaos and the crater structure.*

FIGURE 10. Édifice de soulèvement géival à dépression centrale symétrique, prenant l'allure d'un cratère. Le monticule fait 11 m de diamètre.

*A frost-heaved feature with a crater in the center about 11 m in diameter.*





### FRÉQUENCE DES SOULÈVEMENTS GÉLIVAUX

Sur les 16 km<sup>2</sup> d'affleurements rocheux parcourus, 1802 soulèvements rocheux périglaciaires (édifices) ont été observés. Il y avait aussi plusieurs centaines de fragments de petite taille (moins de 50 cm) un peu partout qui n'ont pas été inclus dans les données analysées.

La répartition des formes d'éjection (fig. 11) paraît assez uniforme. Près de 99 % des soulèvements sont localisés sur le revers basalitique de la cuesta. Si l'étendue couverte par

cette lithologie explique en partie l'abondance des formes de soulèvement, la nature même du substrat doit aussi être prise en considération. Les réseaux de fissures propres au basalte et la présence de pergélisol en profondeur créent, en effet, des conditions favorables à la formation des édifices de soulèvement.

Compte tenu de l'étendue restreinte de la dolomie et de sa position topographique (les plus hauts replats étant situés à une altitude de 150 m), les 17 soulèvements qui ont été observés dans ce type de substrat montrent qu'il est relati-

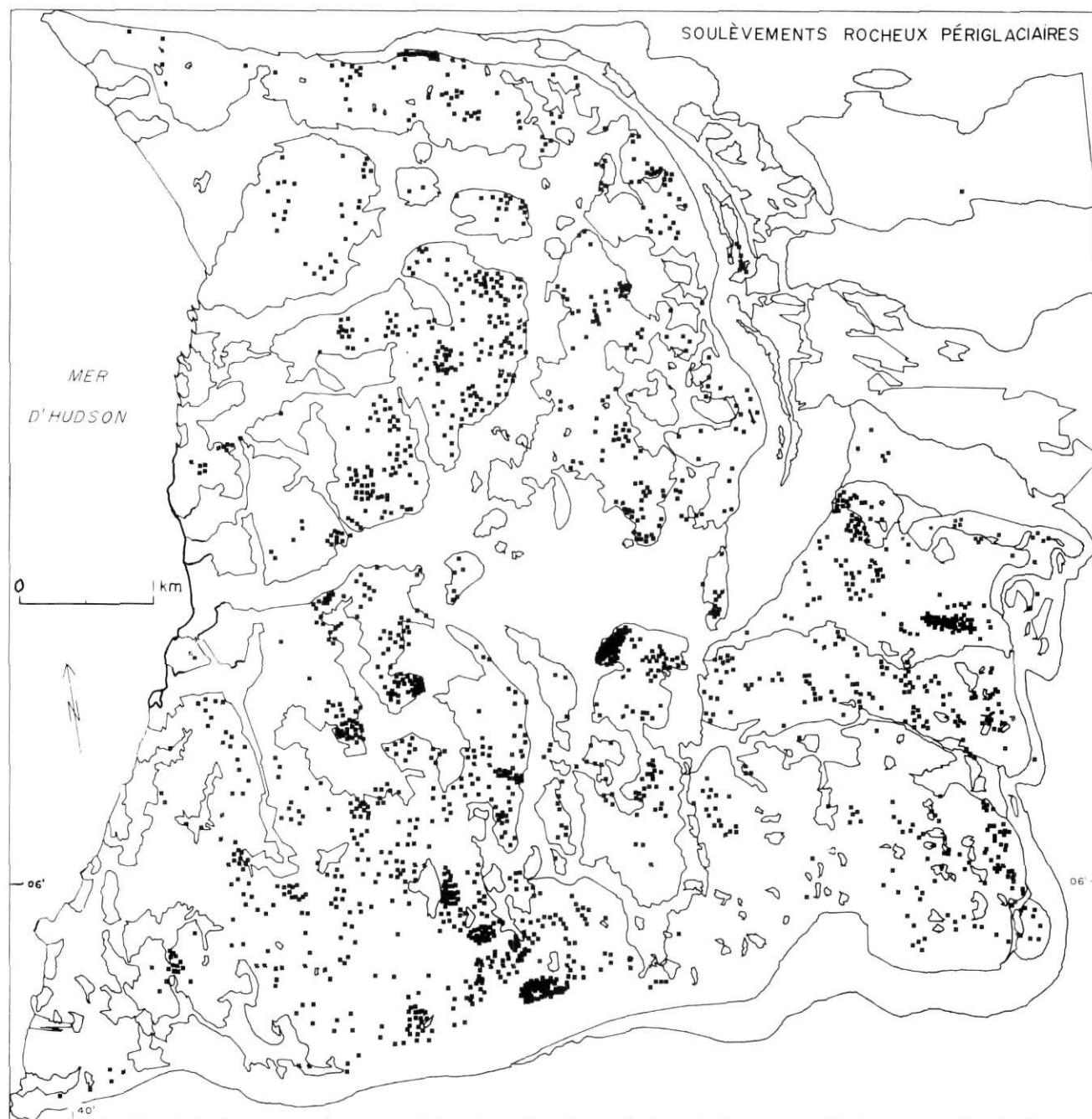


FIGURE 11. Répartition des formes de soulèvement rocheux périglaciaires dans le secteur étudié au golfe de Guillaume-Delisle, Hudsonie.

*Distribution of frost-heaved bedrock features in the study area, Guillaume-Delisle Gulf, Hudson Bay area.*

vement affecté par les processus du soulèvement géival. Il est important de souligner que plusieurs des édifices d'éjection observés comptent parmi les plus gros. La dimension des fragments est aussi impressionnante, certains mesurant quelques mètres de longueur. Aucun soulèvement n'a été observé sur l'arkose. La structure, le pendage des couches et la position topographique des replats d'arkose sont probablement les facteurs qui expliquent l'absence de formes de soulèvement géival dans l'arkose. Par ailleurs, il convient de mentionner qu'il existe quelques édifices de soulèvement géival dans des schistes et des grès schisteux des îles Bélanger et Ross (archipel des Nastapoka), en face du golfe de Guillaume-Delisle.

À la surface du basalte, plus de 90% des formes d'éjection observées sont sur des replats ou dans des dépressions humides, alors que les autres sont, soit au sommet de rochers profilés (3%), soit sur des versants latéraux (2%) ou encore du côté amont (1%) ou aval (3%) des affleurements rocheux, c'est-à-dire en bas de pente.

Les formes d'éjection les plus fréquentes sont les monolithes avec 61% de la distribution, suivies des soulèvements à dépression centrale avec 18%, des chaos avec 12% et des monticules avec 9%.

La taille moyenne d'un soulèvement rocheux périglaciaire est de 3,72 m de grand axe sur 2,43 m de petit axe et 0,58 m de hauteur, ce qui représente une superficie de 14,26 m<sup>2</sup> et un volume de 12,54 m<sup>3</sup>. Comme la taille des soulèvements rocheux périglaciaires est fonction de la fissuration, la dimension des édifices est très variable. Ainsi, certains soulèvements sont très petits (0,30 m de grand axe) et d'autres extrêmement gros (40 m de grand axe). Enfin, chaque soulèvement comprend une quantité variable de blocs centimétriques à métriques. 17% des formes sont composées d'un seul bloc alors que 39% en comprennent entre 2 et 10. Les édifices comprenant de 11 à 20 blocs, 21 à 50 blocs, 51 à 100 blocs et plus comptent pour 10 à 12% chacun.

À notre connaissance, c'est la première fois qu'une étude permet de cartographier le nombre de soulèvements rocheux périglaciaires dans une aire donnée relativement grande. Les 1802 soulèvements observés sur 16 km<sup>2</sup> d'affleurements dans la région du golfe de Guillaume-Delisle, donnent une densité de 110 soulèvements/km<sup>2</sup>. Cette forte concentration a forcément une signification morphologique. Il ne s'agit pas d'un processus périglaciaire occasionnel et épars, comme on l'a pensé jusqu'à récemment (WASHBURN, 1979, p. 80), mais bien d'un mécanisme efficace de l'altération des versants rocheux. En conséquence, les soulèvements rocheux devraient dorénavant recevoir une plus grande attention et faire partie du groupe des processus périglaciaires déjà bien connus comme la gélifraction et la gélidjonction.

### MÉCANISME DU SOULÈVEMENT GÉIVAL

De prime abord, une surface abondamment fissurée et saturée d'eau est essentielle à la manifestation du soulèvement géival (BOURNÉRIAS, 1972; DIONNE, 1981; LEBRUN, 1985). Selon DYKE (1979, 1981, 1984) et DIONNE, (1983), la pré-

sence de pergélisol serait un autre facteur important pour leur formation.

Aux îles Manitounouc, LEBRUN (1985) a mis en évidence, dans le basalte, un système de communication entre les fissures où l'eau peut circuler dans la couche active, pendant la période estivale. Ce système hydro-géologique est dit système ouvert et correspond généralement à des fissures de grandes dimensions. Parallèlement à ce système, un deuxième réseau de diaclases de second ordre (fissures généralement plus petites), peut se développer à la surface de la roche jusqu'à faible profondeur (30 cm environ). Comme ce réseau ne communique pas avec le système ouvert, il est dit système fermé. En fait, l'eau contenue dans les fissures ne peut pas être évacuée ou s'écouler par les fissures du système ouvert.

Dans le système fermé, l'eau de pluie et de fonte s'infiltré par les fissures verticales et pénètre dans la roche jusqu'au niveau des fissures horizontales situées près de la surface. L'hiver venu, le front d'engel pénètre en profondeur et forme une lentille de glace. Par augmentation de volume, cette dernière exerce alors des pressions autant verticales qu'horizontales et éjecte le bloc dans la direction la moins contraignante, c'est-à-dire vers le haut. Les pressions cryostatiques seraient donc à l'origine de la formation des petits monolithes (moins de 30 cm) et des formes du type manhattan.

Dans le système ouvert, l'eau circulant librement dans la couche active est concentrée dans les zones déprimées puis piégées entre le front d'engel et le plafond du pergélisol. L'eau ne pouvant être évacuée, deviendrait en surfusion et développerait des pressions hydrostatiques capables d'éjecter vers le haut le laminat rocheux, délimité par la pseudostratification: «... as freezing continues, the attempted expulsion of water produces the force for heaving» (DYKE, 1984, p. 397). Dès qu'il y a éjection, on assiste à une chute brutale de la pression à l'intérieur du système et à la formation d'une lentille de glace qui poursuit l'éjection (fig. 12). Pour qu'il y ait éjection, la contrainte en compression doit être supérieure à la pression atmosphérique, à la pression lithostatique et à la force de cohésion produite par le front d'engel. Des pressions de l'ordre de 400 kpa ont été mesurées à Forde Lake (DYKE, 1981, 1984). Le soulèvement des gros fragments (plus de 30 cm) résulterait de la combinaison des pressions cryostatiques et hydrostatiques (DYKE, 1981, 1984; DIONNE, 1983).

Les formes d'éjection ne résulteraient pas d'une explosion subite, mais bien d'un mouvement lent, progressif et intermittent, ce qui ne signifie pas que certains édifices ne peuvent être produits en une seule année. En réalité, l'édification des formes de soulèvement géival serait le résultat d'une succession de petites explosions, au rythme d'au moins une par hiver. Les mouvements enregistrés varient de 2 à 30 cm par explosion. Ils seraient cumulatifs. Enfin, les soulèvements rocheux périglaciaires actifs pendant une année ne le sont pas nécessairement l'année suivante. Tout dépend des conditions du milieu, forcément variables d'une année à l'autre, puisqu'elles sont dépendantes des conditions climatiques.

Au cours de leur éjection, les monolithes sont souvent affectés par la cryoclastie. Les gélifracas basculent alors sur le côté par gravité pour s'étaler en forme d'éventail ou produire

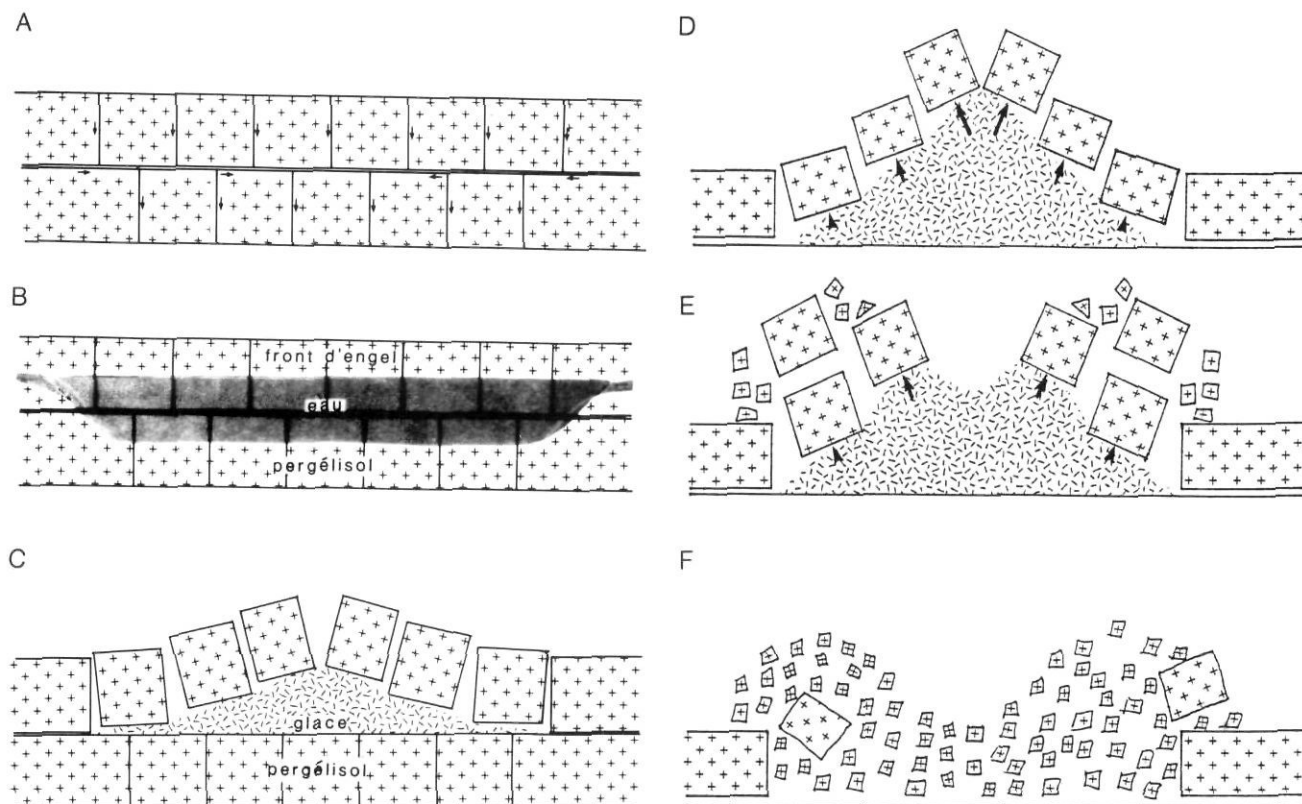


FIGURE 12. Schéma montrant le mécanisme de formation et d'évolution des édifices de soulèvement gélival sur substrat rocheux. En A, le substrat rocheux est caractérisé par deux systèmes de fissures, l'un vertical, l'autre horizontal, dans lesquelles l'eau s'infiltré. En B, concentration de l'eau entre le front d'engel et le pergélisol en profondeur. En C, formation d'une lentille de glace et soulèvement initial de fragments rocheux. En D et E, le soulèvement se poursuivant conduit à deux types d'édifices; d'abord un monticule en dôme, puis un monticule éventré ou en éventail. En F, phase terminale: le monticule est constitué d'un bourrelet périphérique de petits fragments gélifractés et d'une dépression centrale.

A schematic graph showing the mechanism of formation and the various stages of evolution of frost-heaved bedrock features. In A, the substrate is characterized by two fracture patterns, one vertical, the other horizontal, in which water is stocked. In B, water is concentrated between the freezing front and the underlying permafrost. In C, formation of an ice lense and initial heaving of bedrock fragments. In D and E, the subsequent heaving produces two types of features: a dome-shaped and a burst-like features. In F, final stage: the feature is characterized by a circular ridge made of small frost shattered fragments and a central depression.

des édifices éclatés. Ainsi naissent les chaos. Dans le cas des monticules (fig. 12), lorsqu'ils atteignent la maturité, les blocs éjectés sont alors gélifractés sur place. Les fragments tombent alors sur le pourtour pour former un bourrelet périphérique laissant une dépression centrale. En conséquence, les monticules évoluent normalement vers les édifices à dépression centrale.

L'absence de lichens à la base des fragments indique l'existence de soulèvements récents: «... it is probable that these lichen free surfaces have been exposed for less than 50 years» (DYKE, 1979, p. 245). De plus, la présence de débris glaciels et organiques au sommet de certains édifices de soulèvement témoignent d'une activité périglaciaire relativement récente (fig. 13). Parmi les soulèvements rocheux périglaciaires, observés au golfe de Guillaume-Delisle, plusieurs sont encore actifs; la plupart, cependant, ne l'est plus.

### FORMATION DE CHAMPS DE BLOCAILLE

À la longue, le soulèvement gélival a pour effet, d'une part, de détruire la surface rocheuse et, d'autre part, de la

transformer en un champ de blocaille. Certains auteurs dont DYKE (1981, p. 6) considèrent le soulèvement gélival comme un des processus initiaux à leur formation: «Frost heaving in a manner similar to that hypothesized for central district of Keewatin may have initiated the development of the block fields...» Il paraît évident que la multiplication des soulèvements gélivaux conduit graduellement à la formation d'une nappe de débris grossiers de la catégorie des felsenmeer ou des champs de blocaille.

Au golfe de Guillaume-Delisle, le quart de la surface rocheuse a été détruit ou altéré depuis la déglaciation et l'émergence des terres. Évidemment, tout n'est pas directement imputable au soulèvement gélival. La superficie totale détruite attribuable au soulèvement gélival est de l'ordre de 25 000 m<sup>2</sup>, soit moins de 1% de la surface détruite. À ce rythme, par le seul processus du soulèvement gélival, il faudrait un interglaciaire d'environ 100 ka pour détruire entièrement la surface glaciaire héritée. Mais comme d'autres processus de météorisation jouent aussi un rôle souvent plus important, la surface glaciaire de référence pourrait disparaître en moins de 30 ka. De son côté, DYKE (1978) suppose, pour le sud-est de l'île





FIGURE 13. Monticule d'éjection dans des schistes dans l'île Bélanger (archipel des Nastapoca). L'amas de débris glaciels et organiques à la surface témoigne d'un soulèvement relativement récent.

*A frost-heaved mound in schist on Île Bélanger (Nastapoca Archipelago). The presence of beach pebbles and a lichen carpet on the top of the mound, indicates a relatively recent heaving.*

de Baffin, qu'une période d'environ 20 ka est nécessaire pour la création d'un felsenmeer et plus de 100 ka pour la destruction de l'ensemble d'une surface à poli glaciaire. Le soulèvement géglival peut donc être considéré comme un processus non négligeable dans la formation de champs de blocaille.

## DISCUSSION

Au Québec, certains soulèvements encore actifs se trouvent dans des régions dont la température moyenne annuelle est de l'ordre  $-4^{\circ}$  à  $-4,3^{\circ}$  (DIONNE, 1981, 1983). Toutefois, la grande majorité des soulèvements encore actifs est localisée au nord de l'isotherme  $-5^{\circ}\text{C}$  au Québec subarctique et  $-7^{\circ}$  dans les Territoires du Nord-Ouest. Il apparaît difficile d'admettre que le processus fonctionne mieux sous un climat plus chaud que sous un climat plus froid (LEBRUN, 1985). Si c'était le cas, il devrait y en avoir dans les régions plus méridionales comme la Jamésie. Or, à notre connaissance, personne n'a jusqu'à maintenant signalé de soulèvements rocheux périglaciaires actifs ou reliques au sud de la limite actuelle du pergélisol discontinu au Canada. En conséquence, les périodes plus froides et plus humides seraient probablement plus favorables au soulèvement géglival que les périodes plus chaudes.

Depuis la fin de l'hypsithermal en Hudsonie, on retrouve seulement deux périodes froides et humides soit entre 2750 et 2350 ans BP et entre 750 à 100 ans BP (FILION, 1983). Aux îles Manitounouc, LEBRUN (1985) a obtenu par dendrochronologie des âges variant de 300 à 120 ans BP pour l'édification de soulèvements rocheux périglaciaires. Ces dates coïncident parfaitement avec une période froide reconnue soit le Petit Âge glaciaire (*Little Ice Age*) (LAMB, 1977; PAYETTE, 1980; GAGNON et PAYETTE, 1981; FILION, 1983).

Le rôle du pergélisol dans l'édification des formes de soulèvement géglival sur substrat rocheux ne fait pas encore l'unanimité. Il consisterait à élever de plancher de saturation et à colmater les fissures horizontales et verticales en profondeur (fig. 12). Ainsi, le pergélisol empêcherait l'évacuation de l'eau contenue dans la couche active et favoriserait le développement des pressions hydrostatiques nécessaires au soulèvement géglival. On s'explique mal comment dans un système hydrogéologique ouvert sans pergélisol, ce type de pression pourrait se développer. En effet, lors de la progression du front d'engel, l'eau contenue dans les fissures serait refoulée en profondeur ou évacuée hors de l'affleurement rocheux, par les fissures horizontales. Elle ne pourrait donc pas être piégée. À tous les endroits où il existe des formes actives ou récentes, la présence de pergélisol en profondeur a été confirmée. Dans le nord-ouest canadien, plus de 85% des sites connus sont localisés dans la zone de pergélisol continu. On ne connaît aucun site d'édifice de soulèvement géglival actif ou récent localisé en dehors des zones de pergélisol discontinu et continu (DIONNE, 1983). Cette distribution géographique paraît significative. Elle indique que si le pergélisol n'est pas rigoureusement nécessaire au soulèvement de fragments sur substrat rocheux, il joue quand même un rôle dans la majorité des cas en créant les conditions nécessaires au processus.

Au même titre que les coins de glace, les terrasses de cryoplanation, les felsenmeer, et autres formes périglaciaires (WASHBURN, 1980; HARRIS, 1981), les édifices de soulèvement géglival sur substrat rocheux constituent un indicateur valable de pergélisol (DIONNE, 1983).

## CONCLUSION

Les soulèvements rocheux périglaciaires sont des formes beaucoup plus répandues qu'on le croyait jusqu'à récemment. Plusieurs facteurs dont un apport important en eau, une roche abondamment fissurée, des cycles gel-dégel de grande amplitude et la présence de pergélisol jouent un rôle important dans leur formation. La croissance de lentilles de glace et le développement de pressions hydrostatiques à l'intérieur du substrat rocheux donnent naissance à ces formes.

Somme toute, le soulèvement géglival demeure un processus peu étudié et est encore considéré mineur parmi les processus périglaciaires (WASHBURN, 1979). La présente étude a permis de constater qu'il jouait pourtant un rôle non négligeable dans l'altération des substrats rocheux et la formation des champs de blocaille. Dans le secteur étudié, environ 25 000 m<sup>2</sup> de surface rocheuse ont déjà été détruites par ce processus. À ce rythme, cela prendrait au-delà de 100 ka ans avant que l'ensemble de la surface de référence soit détruite par ce seul agent d'altération.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Maurice K. Seguin, de l'Université Laval, pour sa collaboration aux relevés géophysiques pour mesurer l'épaisseur du pergélisol. Gilles Wiseman, alors étudiant au Département de géographie, a été d'une



aide précieuse sur le terrain en 1984. Marius Thériault du Département de géographie (U.L.) a fourni des conseils judicieux dans le traitement des données par informatique. Le Centre d'études nordiques a fourni un soutien matériel et financier substantiel fort apprécié. La présente contribution s'inscrit dans un projet de recherches sur l'évolution des versants rocheux en milieu froid subventionné par le F.C.A.R. (EQ 2454).

## RÉFÉRENCES

- ALLARD, M. et G. TREMBLAY (1983): La dynamique littorale des îles Manitounuk durant l'Holocène, *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., SP, BD. 47, p. 61-95.
- BEALS, C. S. (1968): On the possibility of a catastrophic origin for the Great Arc of Eastern Hudson Bay, dans *Science, History and Hudson Bay*, Beals, C. S. et Shenstone, D. A. (édit.), Dept. Energy, Mines and Ressources, Ottawa, p. 985-999.
- BOTTERON, G., GILBERT, C., LOCAT, C. et GRAY, J. T. (1979): Observations préliminaires sur la répartition du pergélisol dans le bassin de la grande rivière de la Baleine, Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 33, nos 3-4, p. 291-298.
- BOURNÉRIAS, M. (1972): Pyramides rocheuses d'éjection en milieu périglaciaire, Puvirnituq, N.-Q., *Revue de géographie de Montréal*, vol. 25, n° 2, p. 214-219.
- DILABIO, R. N. W. (1978): Occurrence of disrupted bedrock on the Goulburn Group, Eastern District of Mackenzie, *Geological Survey of Canada*, Paper 78-1A, p. 499-500.
- (1982): Recognition of frost-heaved outcrops, Athabasca Basin, Saskatchewan, *Geological Survey of Canada*, Paper 82-1A, p. 432.
- DIONNE, J.-C. (1976): Les grandes cuesta de la mer d'Hudson, *Geos*, vol. 5, n° 1, p. 18-20.
- (1978): Formes et phénomènes périglaciaires en Jamésie, Québec subarctique, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 32, n° 3, p. 187-247.
- (1981): Formes d'éjection périglaciaires dans le Bouclier laurentidien, Québec, *Revue de géomorphologie dynamique*, vol. 30, p. 113-124.
- (1983): Frost-heaved bedrock features: a valuable permafrost indicator, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 37, n° 3, p. 241-251.
- DIONNE, J.-C. et MICHAUD, Y. (1985): Observations sommaires sur l'altération chimique au golfe de Guillaume-Delisle, Hudsonie, *Annales de l'ACFAS*, vol. 52-53, p. 175.
- DYKE, A. S. (1978): Qualitative rates of frost-heaving in a gneissic bedrock on Southeastern Baffin Island, District of Franklin, *Geological Survey of Canada*, Paper 78-1A, p. 501-502.
- (1979): Bedrock heave in the central Canadian Arctic, *Geological Survey of Canada*, Paper 79-1A, p. 241-246.
- (1981): Bedrock heave in the central Canadian Arctic, *Geological Survey of Canada*, Paper 81-1A, p. 157-167.
- (1984): Frost heaving of bedrock in permafrost regions, *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, vol. 21, n° 4, p. 389-405.
- FILION, L. (1983): *Dynamique holocène des systèmes éoliens et signification paléoclimatique (Québec nordique)*, Québec, Université Laval, Faculté des Sciences, Thèse de doctorat (non publiée), 123 p.
- FILION, L. et PAYETTE, S. (1976): La dynamique de l'enneigement en région hémis-arctique, Poste-de-la-Baleine, Nouveau-Québec, *Cahiers de géographie de Québec*, vol. 20, n° 50, p. 275-302.
- FRENCH, H. M. et GILBERT, R. (1982): Periglacial phenomena near Churchill, Manitoba, *Naturaliste canadien*, vol. 109, p. 433-444.
- GAGNON, R. et PAYETTE, S. (1981): Fluctuations de la limite des forêts de mélèzes, rivière aux Feuilles, Nouveau-Québec: une analyse macro-fossile en milieu tourbeux, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 35, n° 1, p. 57-72.
- GUIMONT, P. et LAVERDIÈRE, C. (1980): Le sud-est de la mer d'Hudson: un relief de cuesta, dans *The Coastline of Canada*, S. B. McCann (édit.), *Geological Survey of Canada*, Paper 80-10, p. 303-309.
- HARRIS, S. A. (1981): Distribution of zonal permafrost landforms with freezing and thawing indices, *Erdkunde*, Band 35, Dept. 2, p. 81-89.
- HILLAIRE-MARCEL, C. (1976): La déglaciation et le relèvement isostatique sur la côte est de la Baie d'Hudson, *Cahiers de géographie de Québec*, vol. 20, n° 50, p. 185-220.
- (1980): Multiple component postglacial emergence, Eastern Hudson Bay, Canada, dans *Earth Rheology, Isostasy and Eustasy*, N. A. Mörner Toronto, Wiley and Sons, p. 215-230.
- LAMB, H. H. (1977): *Climate: present, past and future*, vol. 2, *Climatic History and the Future*, Londres, Methuen, 835 p.
- LEBRUN, C. (1985): *Géomorphologie des soulèvements et des évènements rocheux en milieu périglaciaire, cuestas de Manitounouk, Nouveau-Québec*, Québec, Université Laval, Département de géographie, Thèse de maîtrise non publiée, 218 p.
- MICHAUD, Y. (1985): *Évolution de versants rocheux au golfe de Guillaume-Delisle, Hudsonie*, Québec, Université Laval, Département de géographie, Thèse de maîtrise (non publiée), 102 p.
- PAYETTE, S. (1978): Les buttes rocheuses d'origine périglaciaire au Nouveau-Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 32, n° 4, p. 369-374.
- (1980): Fire history at the tree line in Northern Québec: a palaeoclimatic tool, *Proceedings of the Fire History Workshop*, Tucson, Arizona, p. 126-131.
- PLAMONDON-BOUCHARD, M. (1975): Caractéristiques et fréquence des nuages bas à Poste-de-la-Baleine en 1969, *Cahiers de géographie de Québec*, vol. 19, n° 47, p. 311-330.
- POITEVIN, J. et GRAY, J. T. (1982): Distribution du pergélisol dans le bassin de la grande rivière de la Baleine, Québec, *Naturaliste canadien*, vol. 109, p. 445-455.
- 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 Science*, vol. 21, p. 354-364.
- WASHBURN, A. L. (1979): *Geocryology: a survey of periglacial processes and environments*, Londres, Arnold, 406 p.
- (1980): Permafrost features as evidence of climatic change, *Earth Science Reviews*, vol. 15, p. 327-402.
- WOODCOCK, J. R. (1960): Geology of the Richmond Gulf Area, New-Quebec, *Proceeding of Geological Association of Canada*, vol. 12, p. 21-39.
- YARDLEY, D. H. (1951): Frost-thrusting in the Northwest Territories, *Journal of Geology*, vol. 59, p. 65-69.