

Glace de ségrégation, soulèvement du sol et phénomènes thermokarstiques dans les régions à pergélisol (1)

par A. PISSART

Professeur Associé à l'Université de Liège.

Résumé. — Une fente de gel observée sur l'île de Banks (Arctique canadien) montre que des lentilles de glace de ségrégation peuvent apparaître à la partie supérieure du pergélisol lorsque se produit en surface une accumulation éolienne. Une faible élévation du niveau du pergélisol peut entraîner l'apparition de masses importantes de glace de ségrégation. Ce phénomène est inverse mais comparable à celui qui, par un léger abaissement de la surface du pergélisol, provoque l'apparition d'affaissements thermokarstiques.

Summary. — An ice wedge observed on Banks Island (Canadian Arctic) shows that lenses of segregated ice may form in the upper part of the growing permafrost during the accumulation of wind-blown deposits. A slight rise in the level of the permafrost table may lead to the appearance of considerable masses of segregated ice. This phenomenon is inverse but comparable to that which, by slight lowering of the permafrost table, induces thermokarst subsidence.

I. — OBSERVATIONS SUR L'ÎLE DE BANKS

La figure 1 montre une fente de gel à remplissage de glace apparue dans des sables éoliens accumulés sur l'île de Banks près de la rivière Thomsen (lat. 73° 40', long. 119° 55'). Cette fente de gel est très particulière. En effet, si la glace qui la constitue présente dans sa partie inférieure et sa partie supérieure gauche un aspect verticalement lité, caractéristique de la glace de fente de gel, la partie supérieure droite montre

(1) Cette recherche a été réalisée grâce à une bourse du Conseil des Arts du Canada qui m'a permis de travailler dans l'Arctique pendant l'été 1974. Sur le terrain, j'ai reçu un support matériel complet de la Commission géologique du Canada (projet 64.0004) et du « Polar Continental Shelf Project ». Je tiens à assurer de ma gratitude les responsables de ces organismes et spécialement le D^r B. CRAIG et le D^r G. HOBSON pour l'aide qu'ils m'ont accordée. Par ailleurs, la fente de gel montrée par la photo 1 a été dégagée en collaboration avec J. S. VINCENT de la Commission géologique du Canada dans le cadre d'une étude des dépôts éoliens de l'île de Banks. Plusieurs assistants nous ont aidé à effectuer ces dégagements dont M. Marc St Onge. Je les en remercie vivement.

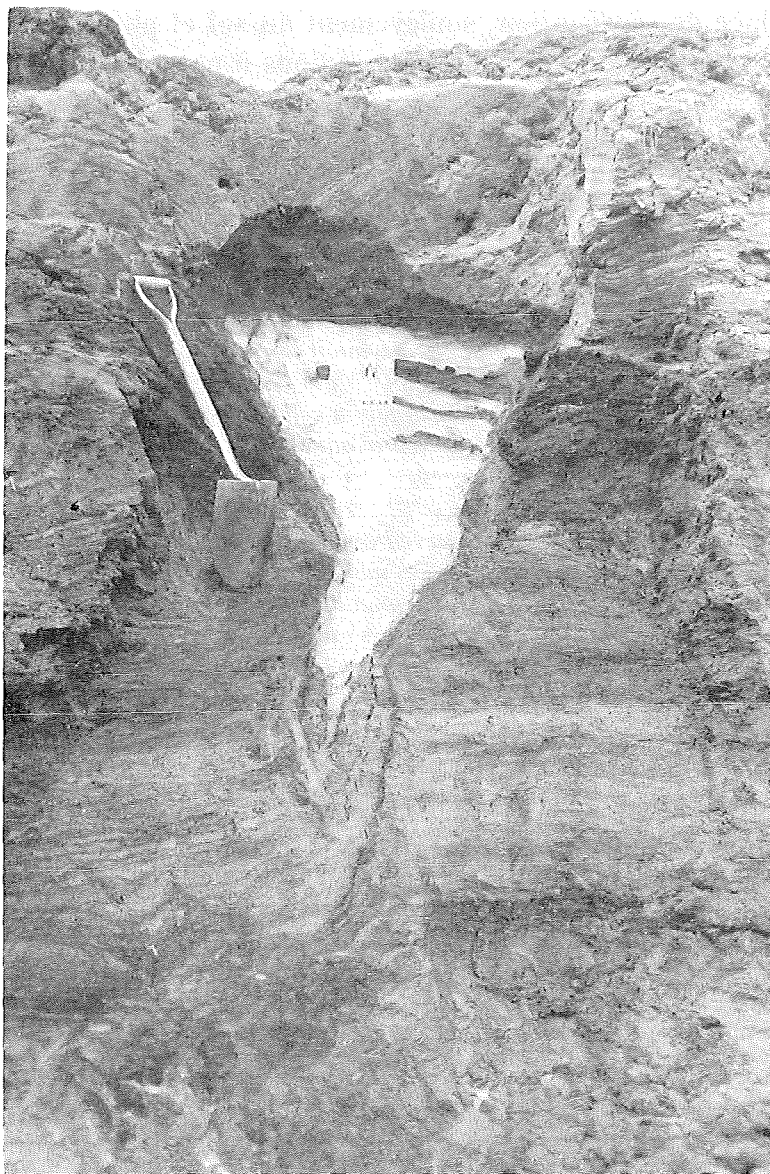


FIG. 1. — Photo d'une fente de gel développée dans des sables éoliens sur l'île de Banks, près de la rivière Thomsen.

par contre des couches de glace stratifiées horizontalement et alternant avec des couches minérales. Il ne peut donc s'agir de glace de fente de gel. Par ailleurs, il est évident que cette glace horizontale est apparue après la glace de fente de gel sur laquelle elle repose, et donc qu'elle a grandi de bas en haut.

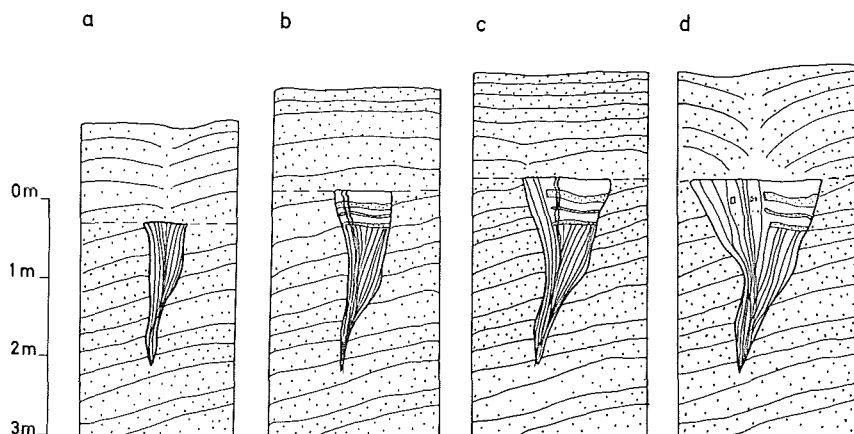


FIG. 2. — Schémas de la formation de la fente de gel montrée sur la figure 1. En a, fente de gel à remplissage de glace; en b et c, apparition de glace de ségrégation accompagnant une accumulation de sables éoliens en surface et développement de la fente de gel; en d, fente de gel de la figure 1.

L'interprétation de la genèse de ce coin de glace est décrite sur la figure 2 que nous commenterons brièvement. En a, une fente de gel à remplissage de glace s'est constituée au milieu des sables éoliens. En b, l'accumulation de sables à la surface du sol a déterminé l'élévation de la surface et en conséquence l'élévation du sommet du pergélisol. Cette élévation du sommet du pergélisol s'est accompagnée de l'apparition de lentilles de glace de ségrégation, tandis que la fente de gel continuait à s'agrandir. En c, l'accumulation continue des sables a permis la croissance de nouvelles masses de glace de ségrégation tandis que s'élargissait progressivement la fente de gel. On parvient ainsi à la figure d, qui correspond à l'image de la photo 1.

II. — MÉCANISME DE LA CROISSANCE DE LA GLACE DE SÉGRÉGATION À LA PARTIE SUPÉRIEURE DU PERGÉLISOL

Les mécanismes de croissance de la glace de ségrégation à la limite inférieure du sol gelé (fig. 3 a) et à la limite supérieure du pergélisol (fig. 3 b) diffèrent simplement par les directions opposées à la fois de la pro-

gression du gel et du mouvement de l'eau. Dans un cas comme dans l'autre, les conditions indispensables pour qu'apparaisse la glace de ségrégation restent :

- 1) l'existence d'eau dans le sol ;
- 2) un gel lent ;
- 3) un sédiment à granulométrie fine.

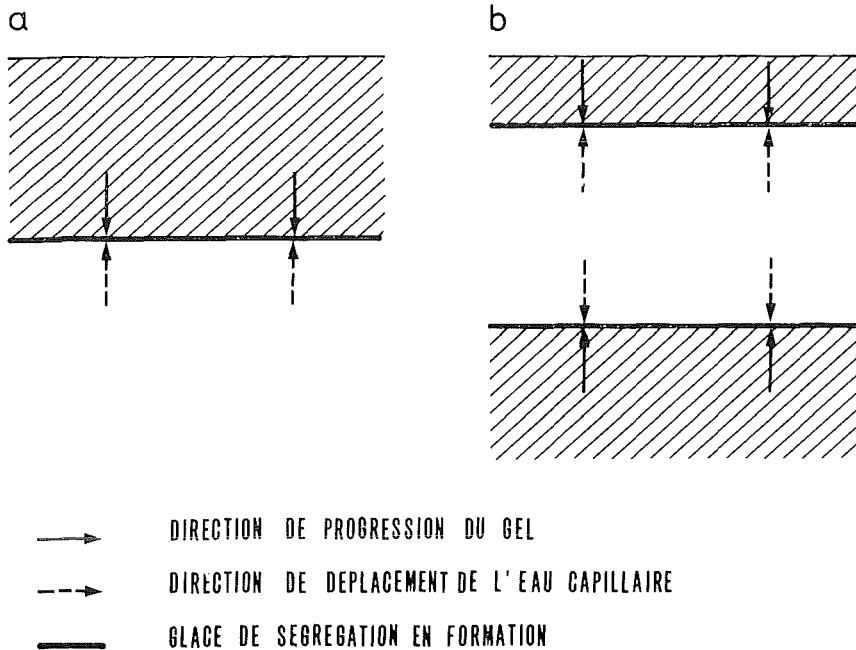


FIG. 3. — Progression du gel et mouvement de l'eau lors de l'apparition de glace de ségrégation : a. dans un sol en train de geler depuis la surface; l'eau est attirée depuis la profondeur; b. au moment du gel automnal de la zone active surmontant le pergélisol; l'eau migre non seulement vers la surface, mais aussi vers le sommet du pergélisol où se constitue de la glace de ségrégation. (Les hachures représente les sols gelés)

Ces conditions sont parfaitement remplies au sommet du pergélisol. En effet, l'existence d'eau à la partie sommitale du pergélisol est fréquente vu son imperméabilité. Par ailleurs, un *gel lent* s'y produit en automne au moment où le gel progresse de bas en haut au sommet du pergélisol. Ce phénomène est bien apparent sur le graphique des températures du sol à Fairbanks que reproduit A.L. Washburn (1973, p. 46). Ce graphique montre en effet qu'en octobre, la prise par le gel de la zone active s'effectue non seulement depuis la surface, mais aussi depuis le sommet du pergélisol. Cette progression du gel, de bas en haut, est très

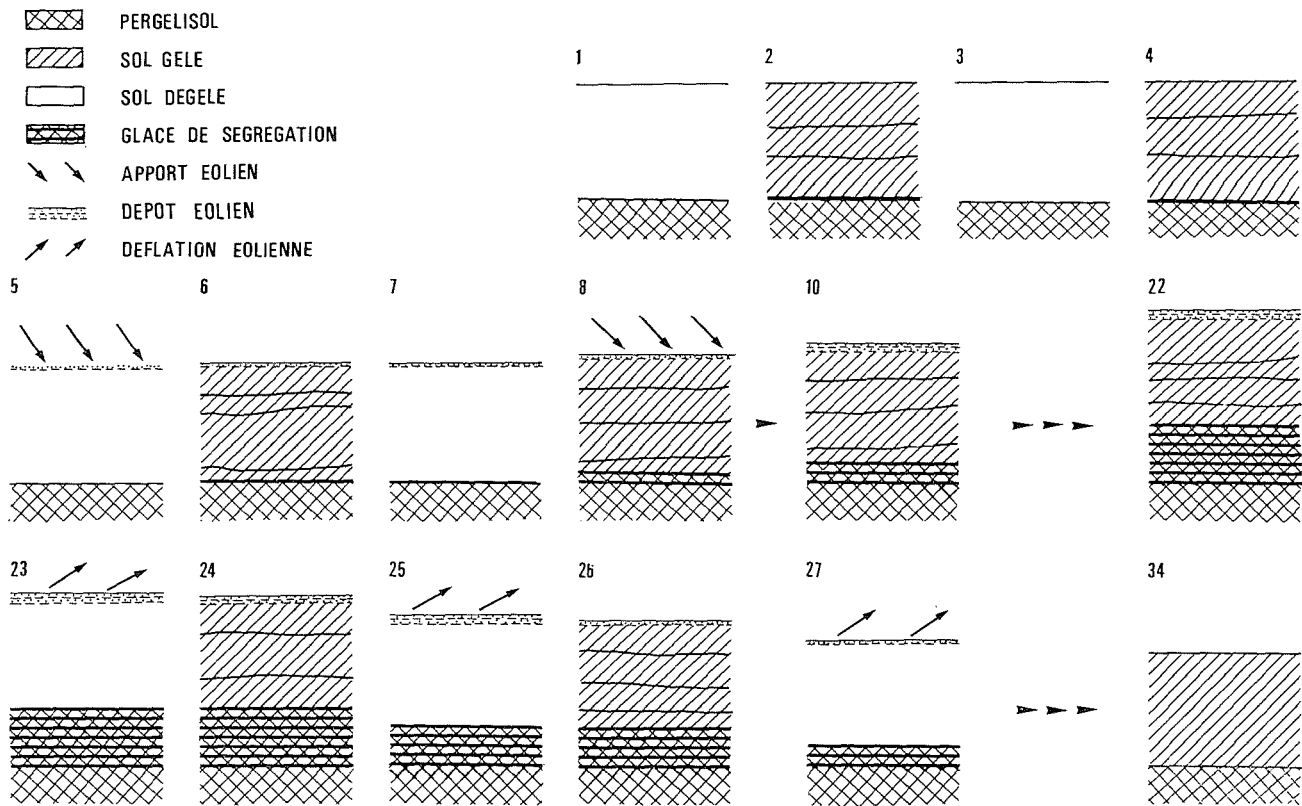


FIG. 4. — Apparition et disparition de lentilles de glace de ségrégation : 1 à 4, cycles annuels pour un niveau de pergélisol constant; 5 à 22, accumulation de glace de ségrégation en relation avec une élévation du sommet du pergélisol contrôlée par une accumulation éolienne; 23 à 24, fusion de la glace du sol à la suite de phénomènes de déflation abaissant l'altitude du sommet du pergélisol.

lente puisqu'elle provient seulement de la transmission du froid accumulé en profondeur.

En automne donc, si la granulométrie du sédiment est adéquate, apparaissent à la limite supérieure du pergélisol une ou plusieurs lentilles de glace de ségrégation. Dans un milieu où les conditions climatiques ne varient pas, où aucune accumulation ne se produit à la surface et où les conditions de surface, et spécialement la couverture végétale, restent identiques, ces lentilles de glace apparues dans la zone active disparaissent l'été suivant (fig. 4, n° 1 à 4). Si, par contre, la surface du pergélisol s'élève, la lentille de glace est incluse dans le pergélisol et est conservée (fig. 4, n° 5 à 22).

Il est important de remarquer qu'une légère élévation du sommet du pergélisol peut déterminer l'apparition d'épaisses lentilles de glace comme le montre la figure 4. En effet, la croissance de lentilles de glace de ségrégation se fait en soulevant toutes les couches supérieures et donc, si la croissance s'effectue à la limite du pergélisol, en soulevant toute l'épaisseur de la zone active. Ainsi, ce mécanisme peut engendrer l'apparition de masses de glace fort importantes dans le sol ; elles se constituent avant tout dans les régions humides où beaucoup d'eau existe au contact du pergélisol.

Remarquons que ce mécanisme est l'inverse de celui qui produit des affaissements thermokarstiques. Ceux-ci apparaissent quand le contact pergélisol/zone active s'abaisse et pénètre dans des masses de glace qui étaient conservées dans le pergélisol. La fusion de ces masses de glace se poursuit, en effet, jusqu'au moment où un nouvel équilibre est atteint, c'est-à-dire au moment où la zone active ne progresse plus dans des masses de glace qui existent dans le pergélisol (fig. 4, n° 23 à 34).

III. — DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES

Ce n'est pas la première fois que la croissance de lentilles de glace de ségrégation à la partie supérieure du pergélisol est décrite. Ce mécanisme est cependant peu cité dans la littérature occidentale. Le seul auteur à l'avoir clairement expliqué en Amérique du Nord est, à notre connaissance, J. Ross MacKay (1972, p. 10) qui a dénommé cette glace *aggradational ice*. Il a précisé qu'elle apparaissait quand le sommet du pergélisol s'élève peu à peu en incorporant les lentilles de glace formées à la base de la zone active. Selon le même auteur (p. 40), ce type de glace est associé à toutes les causes qui peuvent déterminer l'élévation du pergélisol, à savoir un changement climatique, l'accumulation de matériel à la surface, ou l'apparition d'une couverture organique. En 1973, H. French et P. Egginton (p. 204) ont signalé la présence possible de cette glace sur l'île de Banks.

En U.R.S.S., ce type de glace paraît mieux connu. E.M. Katasonov en 1967, 1969 et 1973 en a donné le mécanisme et expliqué ainsi les énormes accumulations de glace de ségrégation que les participants aux Congrès de Yakutsk de 1969 et de 1973 ont pu observer dans la vallée de la Léna et de l'Aldan ; ces accumulations sont fort comparables à la glace de sol massive que J. Ross MacKay (1971, 1972, 1973) a décrite dans le delta du Mackenzie. Quatre articles publiés par les Russes à l'occasion de la seconde conférence internationale sur le pergélisol (Yakutsk, 1973) ont attribué une grande importance à ce type de glace : E.M. Katasonov (1973, p. 84) parle de sédiments gelant syngénétiquement avec le dépôt, phénomène que I.D. Danilov (1973, p. 81) dénomme cryosyngénétique et A.I. Popov (1973, p. 89) syncryogénétique. Ce phénomène et l'apparition de glace de fente de gel donnent aux dépôts de ce type une structure cryogène que B.I. Vtyurin (1973, p. 98) appelle syngénétique.

Comme J.R. MacKay (1972) l'a montré toutefois, ce type de glace n'est pas seulement associé à une sédimentation superficielle. Elle peut aussi se former si, pour une autre cause, la surface du pergélisol s'élève. Aussi, plutôt que de souligner la dépendance avec la sédimentation — ce que font les Russes en utilisant le terme cryosyngénétique — pourrait-on employer, en français, pour cette glace de ségrégation apparue au sommet du pergélisol, le terme de glace de ségrégation *sus-pergélisol*.

IV. — IMPORTANCE PRATIQUE DE CETTE GLACE DU SOL

B.I. Vtyurin (1973, p. 99) a souligné l'importance dans l'URSS septentrionale de la glace de ségrégation ; de nombreux auteurs, mais surtout J.R. MacKay (1971, 1972, 1973) ont fait de même en Amérique du Nord. Comme le soulignaient J.R. MacKay et R.F. Black (1973, p. 187), la fréquence et l'épaisseur de la glace de ségrégation est apparue récemment dans l'Arctique du Canada et de l'Alaska à la suite des nombreux sondages effectués pour la recherche pétrolière. Cette glace n'est généralement pas pure, mais est formée de glace interstratifiée avec des lits de matières minérales de granulométrie fine. Le poids de la glace par rapport à celui de la matière minérale est d'au moins 250 % et souvent même de 1 000 % sur des épaisseurs verticales qui atteignent souvent 10, 20 ou même 30 m d'épaisseur (J.R. MacKay et R.F. Black, 1973, p. 187).

En s'accumulant dans le sol à faible profondeur, en même temps d'ailleurs que de la glace de fente de gel, cette glace de ségrégation présente une importance pratique considérable. Toute perturbation même minime de la surface du sol qui a pour effet d'abaisser la limite pergélisol/zone active risque, en effet, de provoquer la fusion de cette glace et donc

de déclencher des phénomènes thermokarstiques considérables. De tels phénomènes ont été décrits récemment par beaucoup d'auteurs, entre autres en Sibérie par T. Czudek et J. Demek en 1970 et dans l'Arctique canadien par H. French et P. Egginton en 1973.

Enfin, soulignons que cette glace de ségrégation sus-pergélisol a pu exister dans nos régions, au cours du Quaternaire, au moment où s'accumulaient les loess. Il faut en tenir compte lorsque l'on s'efforce d'interpréter les structures affectant les dépôts éoliens mis en place au moment où existait un pergélisol.

BIBLIOGRAPHIE

- T. CZUDEK and J. DEMEK. — *Thermokarst in Siberia and its influence on the development of lowland relief*, dans *Quaternary Research*, n° 1, 1970, pp. 103-120.
- I. D. DANILOV. — *On the position of Cryolithogenesis in the general scheme of the polar lithogenesis*, dans *II. International Conference on Permafrost (USSR, Yakutsk, 16-28 July 1973). Abstracts of papers*. Publishing house « Nauka », Moscow, 1973, pp. 80-81.
- H. M. FRENCH and P. EGGINTON. — *Thermokarst development, Banks Island, Western Canadian arctic*, dans *North American Contributions. Permafrost second international Conference*. National Academy of Sciences, Washington, 1973, pp. 203-212.
- E. M. KATASONOV. — *Features of deposits formed under permafrost conditions*, dans *Arctic and Alpine environments* (N. E. Wright, Jr. and W. H. Osburn, eds), Indiana University Press, 1967, pp. 237-240.
- E. M. KATASONOV and P. A. SOLOV'EV. — *Guide to trip round central Yakutia. Paleogeography and periglacial phenomena*, dans *International symposium « Paleogeography and periglacial phenomena of Pleistocene »*. Yakutsk, 1969, 87 p.
- E. M. KATASONOV and M. S. IVANOV. — *Guidebook. Cryolithology of Central Yakutia (Excursion on the Lena and Aldan Rivers)*, dans *II. International Conference on Permafrost*. USSR Academy of Sciences. Section of Earth Sciences, Siberian division, Yakutsk, 1973, 38 p.
- E. M. KATASONOV. — *Frost action facies analysis as the principal method of cryolithology*, dans *II. International Conference on Permafrost (USSR, Yakutsk, 16-28 July 1973). Abstracts of papers*. Publishing house « Nauka », Moscow, 1973, pp. 84-85.
- J. ROSS MACKAY. — *The origin of massive icy beds in Permafrost, Western arctic coast, Canada*, dans *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 8, n° 4, 1971, pp. 397-422.
- J. ROSS MACKAY. — *The world of underground ice*, dans *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 12, n° 1, 1972, pp. 1-22.
- J. ROSS MACKAY. — *Problems in the origin of massive icy beds, Western arctic, Canada*, dans *North American Contribution. Permafrost second international Conference*. National Academy of Sciences, Washington, 1973, pp. 223-228.
- J. ROSS MACKAY and R. F. BLACK. — *Origin, composition and structure of perennially frozen ground and ground ice : a review*. *North American Contributions*, dans *Permafrost second international Conference*. National Academy of Sciences, Washington, 1973, pp. 185-192.
- T. L. PEWE and P. V. SELLMANN. — *Geochemistry of permafrost and quaternary stratigraphy*, dans *North American Contributions. Permafrost second international Conference*. National Academy of Science, Washington, 1973, pp. 166-170.
- A. I. POPOV. — *Cryolithogenesis*, dans *II. International Conference on Permafrost (USSR, Yakutsk, 16-28 July 1973). Abstracts of papers*. Publishing house « Nauka », Moscow, 1973, pp. 89-90.
- B. I. VTYURIN. — *Regularities of distribution and quantitative estimation of underground ice within the territory of the USSR*, dans *II. International Conférence of Permafrost (USSR, Yakutsk, 16-28 July 1973). Abstracts of papers*. Publishing house « Nauka », Moscow, 1973, pp. 98-99.
- A. L. WASHBURN. — *Periglacial processes and environments*. Edward Arnold Ltd, 25, Hill Street, London, 1973, 320 p.