

Les Trous à Cryoconite du Glacier Gilman (Nord de l'île d'Ellesmère)

Par Michel Brochu *

Résumé: A l'intérieur d'une aire-témoin située sur le glacier Gilman (au Nord de l'île d'Ellesmère) le diamètre et la profondeur de 225 trous à cryoconite ont été mesurés. Des mesures comparatives ont été faites en amont et en aval de l'aire-témoin, ainsi qu'à proximité des parois rocheuses du glacier. Comme résultats principaux, on peut retenir que le diamètre des trous à cryoconite augmente d'amont en aval et de l'axe médian du glacier vers les côtés de celui-ci; quant à la profondeur, on note une légère augmentation du milieu vers les côtés et des variations irrégulières d'amont en aval.

Zusammenfassung: In einer Probefläche auf dem Gilman-Gletscher im Norden von Ellesmere Island wurden Durchmesser und Tiefe von 225 Kryokonitlöchern bestimmt. Vergleichsmessungen wurden oberhalb und unterhalb der Probefläche sowie in der Nähe von Felswänden durchgeführt. Als Hauptergebnis ist festzuhalten, daß der Durchmesser der Kryokonitlöcher von oben nach unten sowie von der Mittelachse zu den Seiten hin zunimmt; bei der Tiefe sind ein leichtes Ansteigen von der Mitte zu den Seiten hin und unregelmäßige Veränderungen von oben nach unten festzustellen.

Ces trous dont le fond est recouvert d'une mince couche de particules minérales foncées ont été signalés depuis longtemps à la surface des glaciers de diverses parties du Globe, notamment à la surface des glaciers groenlandais et alpins.

Bien que les mentions de ce phénomène soient assez nombreuses dans la littérature scientifique (voir bibliographie donnée par R. T. GAJDA [1958]), les mesures systématiques, les études à fondement numérique sur ce sujet sont plus rares. Nous retiendrons les deux des plus importantes: 1°. E. v. DRYGALSKI, (1897) a apporté les premières mesures précises et nombreuses sur les trous à cryoconite de trois localités groenlandaises dont les noms et les coordonnées sont les suivants: Itivdlarssuq (70° 45' Nord, 50° 10' Ouest); les fjords Sermiliq (70° 35' Nord, 50° 20' Ouest) et le glacier Karajak (70° 25' Nord, 50° 15' Ouest). 2°. R. T. GAJDA (1958), dont l'étude détaillée, fondée sur de nombreuses statistiques, a été réalisée aux environs de la base de Thulé, au Groenland (76° 34' Nord et 68° 15' Ouest).

Les deux études précitées ont été effectuées sur la côte ouest Groenland à 6 degrés de différence en latitude. Jusqu'à nos propres recherches sur le Glacier Gilman, en 1958, les observations de R. T. GAJDA, en août 1949, étaient les plus septentrionales qui aient été effectuées sur ce sujet, la limite connue et observée statistiquement des trous à cryoconite se trouve donc reculée de la latitude de Thulé (76° 34' N) à celle du glacier Gilman (82° 08' N) soit de 5° 34' de plus vers le Nord.

Le glacier Gilman est une importante langue glaciaire qui prend naissance à partir de la plus vaste calotte glaciaire de l'île d'Ellesmère, dont les glaciers septentrionaux descendent jusqu'à l'océan Glacial Arctique. Le glacier Gilman est orienté NW-SE; sa longueur est d'environ 25 km, et sa largeur de 4 km; il culmine à 1600 m, la limite des neiges éternelles est à 1200 m et le front du glacier est à 440 m, l'ablation s'effectue donc sur une tranche d'altitude de 760 m et sur une distance de 19 km.

L'ablation, à l'altitude du camp du glacier (et de l'aire-témoin de cette étude), a été de 65,5 cm, en 1958 et de 30 cm, en 1959. Le mouvement du glacier est estimé à ± 6 cm par jour. Les eaux de fonte du glacier Gilman se jettent dans le lac Hazen dont l'altitude est de 157 m et qui est situé à environ 10 km du front du glacier.

Pour ce qui touche à la limite méridionale des trous à cryoconite, d'une part, R. v. KLEBELSBERG (1948) donne pour le Groenland, le 68° de latitude nord; d'autre part,

* Dr. Michel Brochu, Centre d'Etudes Arctiques (La Sorbonne), 6, rue de Tournon, Paris VIe.

L. LLIBOUTRY (1965) dans son traité de Glaciologie, apporte la précision suivante: "Ils sont très abondants dans les régions arctiques, à la périphérie de l'inlandsis groenlandais principalement, mais aussi dans certains glaciers alpins."

Signalons, en outre que, pour sa part, KALESNIK, dans son traité également sur la Glaciologie (1964), a consacré quelques pages aux trous à cryoconite et aux formes voisines. Il présente, comme L. LLIBOUTRY très peu de mesures statistiques: il rappelle les mesures de NORDENSKJOLD (profondeur allant jusqu'à 1 mètre, diamètre allant de quelques millimètres jusqu'à 1 mètre et plus) et celles de E. v. DRYGALSKI.

KALESNIK est peut-être, de tous les auteurs, celui qui fait ressortir le plus clairement ce qui distingue les trous à cryoconite des trous de fonte différentielle peu profonds dus à la présence, à la surface de la glace, de fragments minéraux de dimension supérieure au millimètre: ce sont "les trous méridiens qui ont, d'habitude, 10-30 cm de profondeur (parfois 0,8 à 1 m) la même largeur et une longueur de 0,7 à 1,5 m. Ils ont une forme semi-circulaire; en projection horizontale, l'arc est convexe vers le Nord (en raison de l'incidence des rayons solaires à midi), et la corde de l'arc est au Sud, les parois s'enfonçant obliquement vers le Nord."

I. — MÉTHODE

A. — Dans l'aire-témoin de 100 m de côté située à une altitude de 1035 m et qui a servi de base à nos observations de glaciomorphologie, les mesures ont été effectuées de la façon suivante:

Le nombre, le diamètre et la profondeur des trous à cryoconite ont été mesurés à l'intérieur de cinq surfaces de 1 m², situées à chaque angle de l'aire-témoin et au centre de celle-ci: ceci afin d'éviter tout choix, plus ou moins subjectif, dans la détermination de ces carrés d'échantillonnage d'un mètre.

Des mesures sur la profondeur et le diamètre des trous à cryoconite ont été faites à tous les 2 m, suivant 2 cheminements en X, à partir des angles de l'aire-témoin, afin de corroborer les mesures des carrés de 1 m; par une méthode analogue des mesures ont été effectuées au pourtour des micromares de fonte du glacier, dans le lit des bédrières, au sein et le long des bourrelets de glace.

Chaque série d'observation à l'intérieur de l'aire-témoin a porté sur 25 mesures de diamètre et de profondeur, les trous étant choisis au hasard, au sein des surfaces de 1 m².

B. — En dehors de l'aire-témoin, des mesures comparatives ont été faites en amont et en aval de celle-ci et le long des versants rocheux du glacier, aux balises d'ablation. En raison de l'éloignement et du manque de temps, ces mesures comparatives portent, chacune, sur un nombre d'observations moins nombreuses que celles qui ont été effectuées sur l'aire-témoin; nous les croyons cependant révélatrices des différences qui existent entre l'aire-témoin et les autres parties du glacier.

Les mesures sont exprimées par les médianes, qui sont beaucoup plus commodément déterminables que les moyennes et que l'on peut estimer aussi représentatives.

A ces mesures, sont le plus souvent accolées le maximum et le minimum afférents à chaque série d'observation. Ces valeurs servent à donner une idée de l'écart par rapport à la médiane. Comme on le verra, par la suite, les écarts sont un des principaux caractères de différenciation entre divers groupes de trous à cryoconite, selon leur localisation à la surface du glacier.

II. — OBSERVATIONS

A. — *Mesures dans l'aire-témoin*

Cette aire-témoin est située à une altitude de 1035 m, à 14 km en amont du front de la

langue du glacier et à 5 km, environ, en aval, de la limite des neiges permanentes. Elle est placée au centre de l'axe d'écoulement du glacier. Les versants rocheux sont à égale distance, soit, environ, 2 km de chaque côté.

1°. — Densité.

Pour estimer la densité des trous à cryoconite, tous ceux de diamètre égal ou supérieur à 1 cm ont été comptés, dans les cinq différents carrés de 1 m² (1 à chaque angle et 1 au centre); cette limite inférieure a été choisie, car le diamètre et la profondeur, surtout, des trous de diamètre plus petit deviennent difficilement mesurables. En outre, pour les trous de diamètre inférieur à 1 cm, il est souvent difficile de discerner la limite entre de véritables trous à cryoconite et de petits orifices de dégel de quelques millimètres.

Dans les cinq carrés de 1 m², la densité médiane des trous à cryoconite est de 60 (max. 75, min. 52).

2°. — Profondeur.

Pour l'ensemble des 3 carrés d'angle de 1 m de côté (dans le 4e, celui de l'angle SE, le gel de l'intérieur des trous a empêché les mesures), du centre et des 2 cheminements en X, la profondeur médiane est de 18,2 cm (max. médian 18,5 cm; min. 10,5 cm).

Dans l'ensemble de l'aire-témoin, la profondeur maximale absolue est de 26 cm et la profondeur minimale est de 8 cm. Le Tableau 1 montre que certaines valeurs de profondeur semblent groupées en petites aires, dont on peut observer, sur le glacier, qu'elles ont environ quelques dizaines de mètres carrés.

| | Densité au m ² | Nombre de mesures | Profondeur en cm | | | Diamètre en cm | |
|------------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------------------|------|------|----------------|------|
| | | | Méd. | Max. | Min. | Méd. | Max. |
| Aire-témoin | | | | | | | |
| Centre | 75 | 25 | 14,5 | 19 | 8 | intérieur gelé | |
| Angle SE | 66 | 25 | intérieur gelé, mesures impraticables | | | | |
| Angle SW | 50 | 25 | 18,5 | 20 | 17 | 3,3 | 5,5 |
| Angle NE | 60 | 25 | 18 | 20 | 15 | 1,8 | 2,5 |
| Angle NW | 52 | 25 | 10,5 | 12 | 8,5 | 2,4 | 3 |
| Médiane | 60 | | | | | | |
| Cheminement NS ¹⁾ | | 50 | 18,5 | 26 | 14 | 2 | 6,5 |
| Cheminement EW ¹⁾ | | 50 | 18,5 | 22 | 12 | 2,5 | 3,8 |
| Médiane des médianes | 60 | total: 225 | 18,2 | 20 | 13 | 2,4 | 3,8 |

¹⁾ Cheminement en X à l'intérieur de l'aire de 100 m de côté: mesures tous les 2 m.

Tab. 1: Caractéristiques dimensionnelles des trous à cryoconites sur une aire-témoin de 100 m de côté (glacier Gilman).

Tab. 1: Größenordnung der Kryokonitlöcher in einer Probestfläche von 100 m Seitenlänge (Gilman-Gletscher).

Les angles NW et NE en offrent d'excellents exemples: les trous de l'angle nord-ouest ont une profondeur médiane de 10,5 cm (max. 12, min. 8,5), ceux de l'angle nord-est ont, par contre, une profondeur médiane plus représentative de la médiane d'ensemble: 18,2 cm (max. 20; min. 13 cm).

3°. — Diamètre.

Le diamètre médian est de 2,4 cm (max. médian 3,3 cm; min. médian 2 cm). La médiane des diamètres maximaux est de 3,8 cm. Le diamètre maximal absolu est de 6,5 cm.

On notera que, de toute façon, le diamètre maximal absolu et la médiane des diamètres maximaux ne s'écartent pas tellement du diamètre médian.

Il faut donc retenir que, pour l'ensemble de l'aire-témoin, les trous à cryoconite ont une profondeur médiane de 18,2 cm correspondant à un diamètre médian de 2,4 cm. La densité médiane y est de 60 au m².

4°. — Mesures en milieux spéciaux.

Au cours des observations effectuées dans l'aire-témoin, il a été noté que les profondeurs, tout spécialement, avaient des ordres de grandeurs particuliers pour certaines localisations déterminées. La plupart des mesures spéciales, dont il est question à la suite, ont été prises en milieu aqueux¹⁾: au sein des bédrières et des micromares de fonte du glacier, ou dans le voisinage immédiat de celles-ci.

Le tableau 2 montre que, dans ces milieux aqueux et à glace moins consistante, le diamètre et la profondeur sont plus grands que sur une glace plus ferme.

Cela est particulièrement notable pour les profondeurs, dont les médianes sont supérieures à celle de l'ensemble de l'aire-témoin, qui est de 18,2 cm: la différence est de 1,1 cm et de 6,8 cm au voisinage immédiat de deux mares, de 3,8 cm le long d'une bédrière et, enfin, de 14,5 cm au sein d'une crête ou bourrelet le long d'une bédrière.

Les profondeurs maximales et minimales sont nettement plus fortes que les profondeurs correspondantes sur l'ensemble de l'aire-témoin (Tableau 2).

| | Nombre de mesures | Profondeur en cm | | | Diamètre en cm | |
|---|-------------------|-----------------------|------|------|----------------|------|
| | | Méd. | Max. | Min. | Méd. | Max. |
| Dans mares de fonte | 25 | mesures impraticables | | | 4 | 11 |
| Autour d'une 1ere mare de fonte | 25 | 19,3 | 21 | | 2,5 | 6,5 |
| Autour d'une 2eme mare de fonte | 25 | 25 | 39 | 19 | 3 | 7,5 |
| Au sein d'une bédrière (tous les 5m environ) | 25 | 14 | 19 | 12 | 3 | 7 |
| Le long d'une bédrière (tous les 5m environ) | 25 | 22 | 30 | 16 | 3,5 | 5 |
| Au sein d'une microcrête en relief le long d'une bédrière | 25 | 32,7 | 39 | 27,5 | 3,3 | 11 |

Tab. 2: Diamètre et profondeur des trous à cryoconite en milieu aqueux (1) sur l'aire-témoin du glacier Gilman.

Tab. 2: Durchmesser und Tiefe der Kryokonitlöcher im Naßbereich der Probestelle des Gilman-Gletschers.

B. — Mesures comparatives en d'autres points du glacier Gilman

Il était indispensable que les mesures effectuées sur l'aire-témoin fussent comparées à d'autres observations faites à divers endroits du glacier. D'après ces observations comparatives, c'est incontestablement le diamètre qui subit les changements les plus marqués, selon les diverses localisations des trous à cryoconite sur le glacier.

En effet, le diamètre augmente, d'amont en aval, suivant l'axe médian du glacier et transversalement en allant du milieu de la langue (aire-témoin) vers les bords.

1°. — Accroissement du diamètre d'amont en aval. De la balise d'ablation M 3 située le plus en amont, à 1059 m d'altitude, et où le diamètre médian est de 1,5 cm, aux balises M 15 W (997,3 m), M 17 (937 m) et M 18 (916 m) on a un diamètre médian de 3, de 5 et de 3,5 cm, mais au-dessous de M 19 le diamètre médian se maintient à une valeur supérieure à 10 cm; cependant, comme l'indique le Tableau 3, cette augmentation du diamètre, avec la baisse d'altitude ne semble pas régulière. Ceci est sans doute dû, pour une part, aux hasards de l'échantillonnage.

Pour les balises M 19 (883 m), M 20 (859 m) et M 21 (829 m 6 m) le diamètre médian est respectivement de 18,5 (max. 36 cm), 16 cm (max. 113 cm) et 12 cm (max. 52 cm).

Cet accroissement brusque du diamètre à partir de M 19 coïncide avec une dénivellation de 33 m entre ce point et M 18 soit une pente de 33‰ alors qu'en amont de la balise M 18 la pente est en général de 10‰. Par contre, en aval de M 19 elle a une valeur médiane de 33‰.

¹⁾ Milieu aqueux: il s'agit de certains points de la surface du glacier, comprenant soit des bédrières proprement dites, soit des dépressions remplies d'eau au sein et autour desquelles la glace est très spongieuse, soit des zones de glace plus spongieuse gorgée d'eau, mais sans dépression importante.

| Balise d'ablation | Altitude en m | Nombre de mesures | Profondeur en cm | | | Diamètre en cm | |
|-------------------|---------------|-------------------|------------------|------|------|----------------|------|
| | | | Méd. | Max. | Min. | Méd. | Max. |
| M3 | 1058,8 | 25 | 13,5 | 14,5 | 13 | 1,5 | 2,8 |
| M9 | 1049,7 | 25 | 14,5 | 16,5 | 9 | 1,3 | 3 |
| Aire-témoin | 1035 | 25 | 18,2 | 20 | 14,5 | 2,4 | 3,8 |
| M15 W1 | 997,5 | 25 | 14 | 14,5 | 13 | 3 | 4,3 |
| M16 | 962,2 | 25 | 8,2 | 11,5 | 5 | 2,5 | 4 |
| M17 | 936,7 | 25 | 7,2 | 12,5 | 4 | 5 | 15 |
| M18 | 916,3 | 25 | 3,3 | 8 | 1,5 | 3,5 | 12,7 |
| Est 1) | | | 26,2 | 28,5 | 24 | | |
| M19 | 883,1 | 25 | 22 | 86 | 6 | 18,5 | 36 |
| M20 | 858,7 | 25 | 16 | 40 | 10 | 16 | 1,13 |
| M21 | 829,6 | 25 | 19,2 | 33,5 | 5 | 12 | 52 |

1) Côté est du glacier, à environ 200 m du versant rocheux, vis-à-vis M 18 et perpendiculairement à l'axe médian du glacier.

Note: Les observations n'ont pu être effectuées aux balises M 22, M 23 et M 24 situées en aval de M 21, dans l'axe médian du glacier.

Tab. 3: Dimensions comparatives des trous à cryoconite à la surface du glacier Gilman (de l'amont à l'aval).

Tab. 3: Vergleichsgrößen der Kryokonitlöchern an der Oberfläche des Gilman-Gletschers (von oben nach unten).

En aval de la balise d'ablation M 19, une autre caractéristique du diamètre des trous à cryoconite est la croissance de leur dimension maximale vers l'aval. En conséquence de cela, l'écart par rapport à la médiane est souvent dans un rapport du double au triple et parfois même plus, alors que dans l'aire-témoin et immédiatement en amont ou en aval, les écarts du diamètre médian au diamètre maximal sont, en général, de 1 à 2 cm, soit un rapport de $\frac{1}{3}$ à $\frac{1}{10}$. (Tableau 4).

| Balise | Altitude en m | Profondeur en cm | | Diamètre en cm | |
|-------------|---------------|------------------|------------|----------------|------------|
| | | E. positif | E. négatif | E. positif | E. négatif |
| M3 | 1058,8 | 1 | 0,5 | 1,3 | 0,5 |
| M9 | 1049,7 | 2 | 5,5 | 1,7 | 0,3 |
| Aire-témoin | 1035 | 1,8 | 5,5 | 1,4 | 1,4 |
| M15 W1 | 997,5 | 0,5 | 1,5 | 1,3 | 2 |
| M16 | 962,2 | 3,3 | 6,5 | 1,5 | 1,5 |
| M17 | 936,7 | 5,3 | 3,2 | 10 | 4 |
| M18 | 916,3 | 4,7 | 1,8 | | |
| Est | | 2,3 | 2,2 | 9,2 | 2,5 |
| M19 | 883,1 | 44 | 16 | 16,5 | 17,5 |
| M20 | 858,7 | 24 | 6 | 97 | 15 |
| M21 | 829,6 | 14,3 | 14,2 | 40 | 11 |

Tab. 4: Ecart des dimensions maximales et minimales des trous à cryoconite par rapport à la médiane sur le glacier Gilman (de l'amont à l'aval).

Tab. 4: Abweichung der Maximal- und Minimalgrößen der Kryokonitlöcher auf dem Gilman-Gletscher vom Durchschnittswert (von oben nach unten).

2°. — Accroissement du diamètre près des versants rocheux. Quatre séries de mesures montrent que le diamètre médian des trous à cryoconite est de beaucoup supérieur aux valeurs trouvées à une distance de 500, ou 1000 m ou plus, vers le milieu du glacier. Alors que dans l'aire-témoin, où le diamètre médian est 2,4 cm (max. médian 3,8 cm), sur les bords de la langue, à environ 200 m des parois rocheuses, les diamètres médians sont de 20 et de 51 cm, avec des dimensions maximales de 76 et 172 cm. Encore ici, l'on perçoit que, pour un même point d'observation, l'écart de la dimension maximale à la médiane est du double au triple de la médiane.

Un terme de transition est fourni par les observations faites à la balise M 6, située à 500 m du versant est du glacier et à 1500 m, environ, de l'aire-témoin: le diamètre médian y est de 4 cm (max. 7 cm). On notera que le diamètre décroît, en même temps que la valeur de l'écart entre le diamètre médian et maximal. (Tableau 5).

Plus en aval, on note la même tendance: au piquet M 15 M 1 (altitude 997, 5 m), éloigné de tout versant rocheux, le diamètre médian et le diamètre maximal sont respectivement

| Balise (M) ou point d'observation (P) | Altitude en m | Distance au versant le plus près | Profondeur en cm | | | Diamètre en cm | |
|--|---------------------|--|------------------|-----------|------|----------------|------|
| | | | Méd. | Max. | Min. | Méd. | Max. |
| { p1 (Est) | 1000 | 100 | 26 | 74 | 22 | 20 | 76 |
| | p2 (Est) | 1030 | 200 | inobservé | — | 51 | 1,72 |
| | M6 (Est) | 1037 | 600 | inobservé | — | 4 | 7 |
| { Aire-témoin (axe central) | 1035 | 2000 | 18,2 | 20 | 14,5 | 2,4 | 3,8 |
| { M 15 E 2 (Est) | 983 | 800 | 22 | 35 | 9,5 | 15 | 94 |
| | M 15 W (axe médian) | 997,5 | 2200 | 14 | 14,5 | 13 | 3 |

Les 2 accolades réunissent chacune une série de mesures effectuée des côtés au centre du glacier dans le sens Est-Ouest.

Tab. 5: Dimensions comparatives des trous à cryoconite à la surface du glacier Gilman (des côtés au milieu).
Tab. 5: Vergleichsgrößen der Kryokonitlöcher an der Oberfläche des Gilman-Gletschers (von der Seite zur Mitte).

de 3 et 4,3 cm, alors qu'à la balise 15 E2, située à 160 m d'une paroi rocheuse, le diamètre médian est de 15 cm (max. 94 cm).

3°. — Profondeur.

a) Le Tableau 3 montre, que pour la profondeur des trous à cryoconite, il n'y a pas, selon leur position sur le glacier, de variation aussi systématique que pour le diamètre: à la balise la plus amont, elle est de 13,5 cm (max. 14,5 cm); de 18,2 cm médianes de toutes les mesures (max. 20 cm), dans l'aire-témoin; plus en aval, aux balises M 16 et M 17, elle décroît à 8,2 cm (max. 11,5 cm) et 7,2 cm (max. 12,5 cm), puis aux balises M 18 et M 19, elle remonte respectivement à 26,2 cm (max. 24 cm) et à 22 cm (max. 86 cm). Enfin aux balises M 20 et M 21, la médiane est respectivement de 16 cm (max. 40 cm) et de 19,2 cm (max. 33,5 cm). Il s'agit donc d'une légère diminution par rapport aux deux balises précédentes.

Au total, il ne semble pas qu'il y a de variation systématique de profondeur d'amont en aval du glacier.

Cependant, comme pour le diamètre, les écarts des maximaux à la médiane augmentent nettement d'amont en aval, mais pas d'une façon régulière, en raison probable des hasards de l'échantillonnage; cet écart passe de 1,2 cm, dans l'aire-témoin, à 5,3 cm à la balise M 17, puis, à 24 cm et 14 cm pour les deux dernière balises (M 20 et M 21).

Le tableau 3 montre que les écarts de la médiane à la profondeur minimale augmentent, aussi, d'amont en aval.

b) Les mesures prises sur les côtés du glacier, non loin des parois rocheuses, montrent une légère augmentation de la profondeur par rapport à celles observées au centre du glacier, comme le montre le Tableau 6.

Il est à noter que les écarts de la médiane aux valeurs maximales et minimales de la profondeur sont assez importants: soit 54 et 20 cm pour les deux séries de mesures, alors que, dans l'aire-témoin, l'écart médian est de 3,7 cm.

4°. — Synthèse des mesures.

Des données qui précèdent, il faut retenir les points suivants qui caractérisent les trous à cryoconite du glacier Gilman:

a) Le diamètre a très nettement tendance à augmenter d'amont en aval, de même l'écart entre le diamètre médian et maximal pour toutes les séries de mesures.

| Balise d'ablation (M) ou point d'observation (P) | Altitude en m | Distance au versant en m | Profondeur en cm | | Diamètre en cm | |
|--|------------------|--------------------------------|------------------|------------|----------------|------------|
| | | | E. positif | E. négatif | E. positif | E. négatif |
| p1 (Est) | 1000 | 100 | 48 | 4 | 56 | 19 |
| p2 (Est) | 1030 | 200 | inobservé | — | 120 | 50 |
| M6 (Est) | 1037 | 600 | inobservé | — | 3 | 3 |
| Aire-témoin (axe médian) | 1035 | 2000 | 1,8 | 5,5 | 1,4 | 1,4 |
| M 15 E 2 (Est) | 983 | 800 | 13 | 12,5 | 79 | 14 |
| M 15 W 1 (axe médian) | 997,5 | 2000 | 0,5 | 1,5 | 13 | 2 |

Les 2 accolades réunissent chacune une série de mesures effectuées d'un des côtés au centre du glacier dans le sens Est-Ouest.

Tab. 6: Ecart (E) des dimensions maximales et minimales des trous à cryoconite par rapport à la médiane sur le glacier Gilman (des côtés au milieu).

Tab. 6: Abweichung der Maximal- und Minimalgrößen der Kryokonitlöcher auf dem Gilman-Gletscher vom Durchschnittswert (von der Seite zur Mitte).

b) Il n'y a pas de variation systématique de profondeur d'amont en aval, bien qu'elle augmente le long des versants du glacier, par rapport à la profondeur médiane mesurée au milieu du glacier, perpendiculairement aux versants rocheux.

Comme pour le diamètre, cependant, l'écart entre la profondeur (médiane et maximale) d'une série augmente d'amont en aval et du centre vers les côtés.

c) Dans l'aire-témoin, les profondeurs semblent groupées par zones d'ordre de grandeur donné, de telle sorte que certaines zones ont des profondeurs systématiquement supérieures ou inférieures, de quelques centimètres, aux valeurs obtenues dans la zone voisine.

Il appert que les trous situés dans les zones humides et à glace spongieuse, c'est-à-dire où le pied enfonce, sont systématiquement plus profonds que ceux qui sont situés dans les zones à glace plus ferme.

Il ne semble pas y avoir de rapport systématique entre la profondeur et le diamètre, c'est-à-dire qu'à une augmentation de diamètre ne correspond pas une augmentation parallèle, ou dans la même proportion, de la profondeur des trous à cryoconite, ainsi par exemple, dans l'aire-témoin, la profondeur médiane est de 18,2 cm pour un diamètre médian de 2,4 cm, alors qu'à la balise d'ablation M 21, la profondeur est du même ordre de grandeur (19,2 cm), mais le diamètre médian est de 12 cm.

d) La densité des trous à cryoconite, qui est de 60 au m² dans l'aire-témoin, diminue d'amont en aval, et du centre du glacier vers les côtés, en raison inverse de l'accroissement de diamètre.

C. — Nappe phréatique du glacier

L'examen des trous à cryoconite a permis d'étudier l'existence d'un phénomène du plus haut intérêt qui, semble-t-il, n'a pas encore été décrit comme tel, pour les glaciers du Haut-Arctique.

Les trous à cryoconite sont, en période de dégel, tous remplis d'eau. Le niveau de l'eau, les jours de fonte, est normalement situé entre 2 et 10 cm au-dessous de l'orifice des trous.

Une courte période de gel fin juillet (1958) a permis les constatations suivantes:

1°. — Les jours de gel (—1 à —3° C), une mince pellicule de glace d'une épaisseur égale ou inférieure au millimètre, recouvre le plan d'eau du trou; ceci n'est que normal, dès lors que la température descend au-dessous de 0° C.

2°. — Le point, le plus intéressant est que, contrairement à ce qui se passe pour la surface d'un lac, cette pellicule de glace quelques heures après sa formation ne repose pas sur le minuscule plan d'eau des trous mais sur le vide, en demeurant fixée aux parois des trous à cryoconite.

3°. — Au terme de ces quelques jours de gel, il y a, assez souvent, deux ou trois pellicules de glace superposées (chacune correspondant à une nuit de gel) et ne reposant jamais sur l'eau, qui se trouve tout au fond du trou.

Il arrive même que l'eau soit absente. Il ressort donc que le niveau de l'eau, à la surface du glacier, en période estivale, est loin d'être constant et qu'il est lié à un mécanisme qui sera expliqué dans la partie réservée à l'interprétation.

D. — Mesures comparatives au Groenland

1°. — Le tableau 7 fait état des données comparatives sur les trous à cryoconite actuellement connues sur le Globe; la plupart ont été effectuées au Groenland. Il y en a relativement peu de très détaillées. Les mesures de Roman GAJDA (1958) qui sont, à la fois, les plus complètes et, géographiquement, les plus rapprochées des nôtres, offrent certaines analogies avec les valeurs présentées plus haut: d'une part, les mesures de cet auteur montrent un très net accroissement de diamètre de l'amont à l'aval, selon les 3 secteurs d'observation étudiés en bordure de l'inlandsis groenlandais, dans la région de Thulé, par 76° 34' de latitude nord.

Il semble, contrairement aux observations du glacier Gilman, y avoir un accroissement de la profondeur vers l'amont du glacier. Cette différence est extrêmement intéressante par le problème qu'elle pose.

| Auteur | Région | Diamètre en cm | | Profondeur en cm | |
|-----------|---------------------------------|-------------------|---------|--------------------|----------|
| | | moyen | maximal | moyenne | maximale |
| GADJA | Thulé (Groenland) | 5—15 | 26,5 | 10—15 | 32 |
| | Localité I | 10—15 | | 5—10 | |
| | Localité II | 5—10 | | 10—15 | |
| | Localité III | 5—10 | | 15—20 | |
| DRYGALSKI | NW Groenland | 5—10 | | 40—50 | 66 |
| BROCHU | Glacier Gilman (aire-témoin) | 2,4 ¹⁾ | 3,8 | 18,2 ¹⁾ | 20 |

¹⁾ Médiane dans le cas du glacier Gilman.

Tab. 7: Trous à cryoconite, mesures comparées dans diverses régions de l'hémisphère nord.

Tab. 7: Kryokonitlöcher — Vergleichswerte aus verschiedenen Regionen der Nordhemisphäre.

Les profondeurs moyennes données pour le Groenland par E. v. DRYGALSKI (1897), sont de 40 à 50 cm.

2°. — Mentionnons, pour mémoire, qu'à la surface du lac Hazen, aucune observation de trous à cryoconite, proprement dits, n'a été faite, malgré que certaines parties de la glace fussent recouvertes d'une couche de poussière, au printemps 1958.

Cependant, j'ai pu observer des trous verticaux cylindriques ou ovoïdes de quelques centimètres à plus d'un mètre (selon les époques d'observation) et dus à la fonte de petits cailloux et de déjections de Boeufs musqués (*Ovibos moschatus*), lesquelles ont, généralement, la dimension d'une mûre.

III. — INTERPRETATION

Il est connu, depuis longtemps, que les trous à cryoconite sont un phénomène de fonte différentielle. Tous les auteurs s'accordent là-dessus. La meilleure interprétation synthétique est donnée par L. LLIBOUTRY (1965) dans son traité de Glaciologie, p. 381: „On a dit que l'ablation criblait la glace d'une infinité de trous verticaux. C'est dans ces trous que la cryoconite s'accumule. Ces trous pénètrent ensuite dans la glace polycristalline ancienne sous-jacente, dont les cristaux ont des formes arrondies et quelques millimètres à 2 centimètres de diamètre et s'approfondissent jusqu'à ce que la cryoconite soit à l'abri des radiations solaires. En même temps, les trous à cryoconite se sont réunis pour en former de plus gros, donnant, au bout de plusieurs années, naissance à de grands baquets plein d'eau qui peuvent avoir un demi-mètre de diamètre et autant de profondeur.

L'horizon à cryoconite descend au fur et à mesure que se poursuit l'ablation, restant toujours à la même distance de la surface du glacier.

GERDEL et DROUET ont fait remarquer que lorsque la cryoconite est à 50 cm de profondeur, la lumière doit traverser plus d'un mètre de glace pour y parvenir; une telle épaisseur de glace absorbe 99% de la lumière incidente." L'avant-dernier paragraphe est en contradiction avec les écarts de profondeur très importants mesurés à la surface du glacier Gilman. Il resterait à préciser, d'une part, comment naissent, à proprement parler, les trous à cryoconite: il semble bien qu'il y a, au début, la concentration d'une quantité plus importante de poussière, à partir de certaines irrégularités de la neige, puis, le soleil aidant, le phénomène s'amorce et s'accroît jusqu'à ce qu'un état d'équilibre s'établisse: diamètre et profondeur d'un certain ordre de grandeur, pour une situation, pour une orientation, pour une latitude et pour une altitude données. Il est même très probable que, sur une même surface, où les trous à cryoconite ont la même profondeur et le même diamètre, il s'agit, en fait, de plusieurs générations de trous, encore qu'il ne soit pas possible de préciser plus avant cette hypothèse.

Il est, aussi, presque certain que les mêmes trous se perpétuent d'année en année, et que, d'année en année, ils évoluent parallèlement à eux-mêmes, sans modification notable de profondeur ou de diamètre une fois qu'ils ont atteint leur état d'équilibre, c'est-à-dire, une profondeur et un diamètre médians, pour un endroit donné.

Considéré dans cette optique, le diamètre des trous à cryoconite serait, surtout dans la partie aval du glacier, où les écarts à la médiane sont importants, un indicateur de l'ancienneté des trous, les plus grands étant les plus anciens (phénomène de coalescence), et les plus petits, les plus récents; pour ce qui est de l'origine de la poussière appelée cryoconite, question que nous n'avons pas abordée, ici, KALESNIK (1965) précise: „Il est maintenant établi que la cryoconite est un sédiment complexe composé de poussière rocheuse apportée par le vent, de poussières météoriques, de cendres volcaniques, de particules d'excréments d'oiseaux, de pollen, d'algues, de simples micro-organismes, etc." Tous les auteurs sont d'accord sur cette interprétation.

Au sujet des problèmes posés par les diverses observations qui précèdent, les interprétations suivantes paraissent pouvoir être proposées.

Relativement à la plus grande profondeur des trous à cryoconite dans les zones de glace spongieuse et près des micromares de dimensions décimétriques que l'on trouve à la surface de la glace, il s'agit très vraisemblablement d'une forme de fonte différentielle évoluant dans des conditions particulièrement favorables: en effet, l'albédo de la neige gorgée d'eau semble inférieur à celui de la glace plus dure, ce qui rend compte de la profondeur plus grande et d'un diamètre légèrement supérieur aux valeurs observées sur la surface voisines dont la glace est généralement plus ferme.

Relativement à la variation du niveau de l'eau dans les trous à cryoconite, les observations décrites plus haut, permettent de penser qu'il existe, près de la surface du glacier, une sorte de nappe phréatique dont les variations sont extrêmement sensibles aux moindres changements de température et spécialement aux baisses de température. On a vu qu'il était possible d'enregistrer ces changements grâce aux deux ou trois pellicules de glace successives laissées à chaque période de gel: ces pellicules étant l'indice des diverses phases de l'abaissement du niveau de la nappe. Comme sur la terre ferme, l'eau de la nappe phréatique se concentre, à ciel ouvert, dans des cours d'eau qui sont, ici, les bédrières. Mais sur le glacier, il n'y a pas, comme sur la terre ferme, d'obstacles à l'écoulement, tels des sols plus ou moins imperméables, des barres rocheuses, ni, bien entendu, de végétation avec ses enchevêtrements de racines: d'après la grande vitesse de réaction de la nappe phréatique aux variations de températures, il semble que la porosité de la tranche de glace permettant à l'eau de s'infiltrer est analogue à celle du sable et peut-être même, lui est-elle supérieure.

Le décalage d'écoulement de l'eau imbibant la masse de la glace explique que, même pendant une période de plusieurs jours sans fonte, les bédrières principales continuent de couler abondamment, sous réserve, naturellement, que la baisse de température ne soit inférieure que de quelques degrés au point de congélation; s'il en était autrement, les sous-écoulements seraient presque instantanément taris par le gel rapide de la partie superficielle du glacier.

Il n'a pas été possible de mesurer l'épaisseur de cette nappe phréatique, mais comme hypothèse de travail, il est permis de considérer qu'elle équivaut, au moins, à la profondeur des trous à cryoconite, dès lors que l'on observe des variations de niveau analogues pour les trous à cryoconite d'un même secteur. Conformément aux observations de terre ferme, la nappe phréatique du glacier a vraisemblablement une courbe se raccordant au fond du talweg des bédrières.

En aval du glacier, où les bédrières ont un à deux mètres de profondeur, le niveau phréatique est vraisemblablement si profond qu'il est en-dessous du fond des trous à cryoconite. Ceci explique que ceux-ci, dans cette zone, soient assez souvent vides d'eau, bien qu'ils soient situés à une altitude où la fonte est plus forte qu'en amont.

Des expériences de coloration à la fluorescéine auraient un grand intérêt théorique et pratique pour la connaissance de l'hydrologie des glaciers arctiques, tout spécialement en ce qui concerne la circulation pouvant exister entre les trous à cryoconite, la nappe phréatique et les bédrières.

Relativement à l'accroissement du diamètre des trous à cryoconite, d'amont en aval et près des versants du glacier, il semble que ce soit là un, phénomène de plus forte absorption de la chaleur solaire sur les parois des trous d'une part, grâce à l'abaissement de l'altitude d'amont en aval, et d'autre part, grâce au rayonnement de la chaleur des versants sur le glacier, tout au moins, sur ses parties qui sont à proximité des versants; à ce rayonnement, s'ajoute, tout probablement, un effet de conductibilité. Le résultat, à l'échelle des trous à cryoconite, semble être que la chaleur solaire d'incidence directe et que la chaleur rayonnée complémentaire sont absorbées, pro parte, par la pellicule noirâtre qui tapisse le fond des trous et les approfondit, ces deux types de chaleur sont aussi réfléchis, pro parte, ce qui a pour effet d'accroître assez rapidement (à l'échelle séculaire) la circonférence des trous, c'est ce qui expliquerait l'augmentation progressive des valeurs moyennes du diamètre d'amont en aval. Deux facteurs éminemment favorables au progrès de la fonte des trous à cryoconite s'ajoutent à la chaleur incidente et rayonnée: ce sont, d'une part, une insolation très importante, supérieure à 70% du temps possible dans la région du lac Hazen et, d'autre part, les vents extrêmement faibles qui caractérisent cette région et qui réduisent, au minimum, la dispersion de la chaleur.

Les très importants écarts dans les mesures de diamètre et aussi, de profondeur, en partie, entre la médiane et les valeurs maximales et minimales, autorisent à poser, comme hypothèse, que les trous dont le diamètre est le plus grand seraient les plus anciennement formés, alors que les trous à diamètre plus restreint seraient d'origine beaucoup plus récente. Il est bien entendu que, pour les trous à diamètre considérable, il est raisonnable de supposer que le noyau primitif de poussière de cryoconite s'est accru de nouveaux apports de poussière qui ont trouvé un piège tout préparé, il faut également envisager comme origine, la coalescence de plusieurs trous plus petits.

Si les trous à cryoconite à diamètre modeste de l'aire-témoin n'ont peut-être que quelques décennies ou quelques centaines d'années, il serait à envisager que les trous de 30 à 50 ou 100 cm de diamètre, dans la partie inférieure du glacier, puissent avoir plusieurs siècles et même quelques millénaires. Et si l'on admet, théoriquement, qu'une série de trous à cryoconite de 1 cm se trouvant en amont du glacier, prend 1 millénaire pour atteindre vers l'aval, un point X du glacier où le diamètre médian des trous est de 20 à 50 cm, l'augmentation du diamètre des trous serait un processus extrêmement lent, de l'ordre de 2 à 5 cm par siècle ou de 0,02 à 0,05 m par année, ce qui confirmait une relative stabilité des trous à cryoconite, dans le temps et dans l'espace, tout au moins à une échelle décennale et séculaire.

Un autre problème d'interprétation se pose: comment expliquer que parallèlement à l'accroissement du diamètre de l'amont vers l'aval, il n'y ait pas de nette augmentation de la profondeur sur le glacier Gilman, alors que R. GAJDA (1958) a observé, au Groenland, une diminution marquée de profondeur d'amont en aval; il a attribué ce phénomène à une action plus forte du soleil sur la glace que sur la matière noire recouvrant le fond des trous à cryoconite. Dès que cela se produit, pour des raisons d'exposition et d'altitude surtout, la profondeur diminuerait en raison même de la fonte différentielle dont les facteurs sont inversés: en effet, la matière mélanocrate limite ici l'action du soleil, parce que plus l'épaisseur de la couche à cryoconite s'accroît, plus elle restreint l'approfondissement du trou, cette couche faisant, en quelque sorte, fonction d'isolant.

Nous sommes entièrement d'accord sur cette interprétation. La connaissance du cycle annuel complet d'évolution des trous à cryoconite est d'importance capitale et il convient d'énoncer quelques idées à titre d'hypothèse de travail, bien qu'aucune observation n'ait été faite par personne postérieurement au mois d'août.

On peut donc penser qu'après le premier gel définitif (j'ai personnellement observé des gels intermittents), une pellicule de glace se forme au niveau phréatique où est survenu le gel, l'eau continue à baisser en raison de son évacuation par les bédrières, laissant un vide de X centimètres entre le fond des trous et la ou les pellicules de glace.

La neige commence à tomber soit en août, soit en septembre, et remplit partiellement les trous. Le premier chasse-neige, qui peut survenir aussi bien en septembre qu'en octobre, emplit les trous de particules de neige, et nivelle, d'une façon générale, les irrégularités de la surface du glacier: bédrières, micromares, microbombements, etc; à l'occasion de vents particulièrement forts, la neige est compactée et indurée au point que le pied nu peut s'y enfoncer, comme c'est le cas dans toutes régions à toundra. Ce stade est sans doute atteint, dès le mois de novembre. Il est alors à présumer qu'il n'y a aucune autre évolution jusqu'en avril ou mai, alors que le soleil, par sublimation, enlève une tranche importante de la neige accumulée en hiver jusqu'au début de la fonte, vers la mi-juin. Le pourcentage de neige enlevée respectivement, par la sublimation et par la fonte, est inconnu, mais il varie sûrement selon l'altitude au sein de la zone d'ablation du glacier. Une chose apparaît en tout état de cause, comme probable, c'est que les rayons solaires n'ont pas à sublimer ou à fondre la neige sur toute la profondeur des trous à cryoconite, puisque que le tiers ou la moitié de la profondeur

est occupé par le vide (espace protégé de l'invasion de la neige par la ou les pellicules à glace de la fin de l'été). Cette remarque vaut pour la partie amont du secteur d'ablation; le diamètre médian des trous devient si important, en aval, qu'une pellicule ne pourrait subsister longtemps en raison de la portée trop grande pour une si faible épaisseur; nous avons vu, par ailleurs, que, dans ce secteur, les trous à cryoconite retiennent peu d'eau, dans leur fond, au coeur de l'été, et que, de ce fait, les pellicules de glace constituent un phénomène plus rare. Ainsi, dans ce secteur, les premiers chasse-neige d'automne doivent colmater entièrement et, jusqu'au fond, les trous à cryoconite. Cette obturation nivale est ensuite indurée par le vent au cours de l'hiver.

IV. — CONCLUSION

Les trous à cryoconite méritent des recherches beaucoup plus poussées. Il serait, à l'échelle mondiale, suprêmement intéressant d'en déterminer très exactement la répartition, et d'en présenter pour chaque région, une description fondée sur des valeurs numériques (diamètre, profondeur, et densité).

Il serait, de même, extrêmement intéressant d'étudier, au moyen de la fluorescéine, notamment, la profondeur de la nappe phréatique des glaciers, les fluctuations de son épaisseur et la vitesse des sous-écoulements. Cela serait particulièrement utile en vue des applications aux sols de terre ferme, en raison des facilités qu'offre la glace qui a l'avantage d'être partiellement translucide.

Bibliographie

- Antrushin, N. (1956): Samolyoty razrushayut lyod. *J. Grazhdanskaya Aviatsiya*, 4, p. 33. Moscou.
- Bishop, B. C. (1957): Shear moraines in the Thule area, Northwest Greenland. *Snow, Ice and Permafrost Research Establishment*, p. 35. Washington.
- Blanck, E., H. Poser, M. und E. U. Oldershausen (1932): Über Kryokonitvorkommnisse im ostgrönländisches Packeis und ihre chemische Zusammensetzung. *Chemie der Erde*, Band VII, p. 434—440.
- Brandt, B. (1931): Über Kryokonit in der Magdalenenbucht in Spitzbergen. *Z. für Gletscherkunde* 19, pp. 125—126.
- Drygalski, E. v. (1897): Grönland-Expedition der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin 1891—1893, Band 1, p. 93—103, Berlin.
- Gajda, R. T. (1958): Cryoconite phenomena on the Greenland ice cap in the Thule area. *Le Géographe canadien* no 12, pp. 35—44, 5 fig.
- Harder, P. (1908): En Ekskursion til Grönlands Indlandsis. *Meddl. Dansk geol.*, 3, p. 233. Copenhague.
- Hartmann, G. (1891): Der Einfluß des Treibeises auf die Bodengestalt der Polargebiete. *Verein für Beiträge zur Geographie des festen Wassers; Wissenschaftliche Veröffentlichungen*, 1, pp. 173—286.
- Hobbs, W. H. (1911): Characteristics of existing glaciers, pp. 162—169. Toronto.
- Holst, N. O. (1886): Berättelse om en år 1880 i geologiskt syfte företagen resa till Grönland. *Geologiska undersökning. Afhandlingar och uppsatser. Ser. C. No. 81*, pp. 37—48. Stockholm.
- Jensen, K. H. (1878): Expeditionen til Sydgrönland. *Meddl. om Grönl.*, 1, p. 61.
- Kalesnik, S. J. (1964): *Traité de Glaciologie (en russe)*. Moscou.
- Kaveev, K. H. (1938): Tslindricheskie uglubienia na poverkhnosti lednika Nordenshel'da Novaya Zemlya. *Problemy Arktiki*, No. 3, pp. 134—135. Moscou.
- Kayser, O. L. (1928): The Inland Ice: In: *Greenland, Vol. I*, pp. 357—422, Copenhague-Londres.
- Klebelberg, R. v. (1948): *Handbuch der Gletscherkunde und Glazialgeologie*. 1028 p., Vienne.
- Konovalov, I. and Shcherbakova, R. (1957): Ispolzovanye energi solnechnoi radiatsyi dla uskorennyay tayanaya snega i lyoda. *Vodnyy Transport*, 11 Novembre 1957, p. 3. Moscou.
- Laktionoff, A. F. (1957): The effects of ice upon shipping routes, sea and river ports and the means to combat it. *Proc. 19th. Navigational Congress*, pp. 177—217. Londres.
- Lliboutry, L. (1965): *Traité de Glaciologie*, 1039 p., Paris.
- Lorenzen, J. T. (1884): To petrographiske notiser. *Svenska vetenskapsakademium öfversigt af förhandlingar*, 41, pp. 187—93. Stockholm.
- Meinardus, W. (1930): Arktische Böden. In: *Blanck, E., ed.: Handb. der Bodenlehre*, pp. 27—96, 3, Berlin.
- Nansen, F. (1892): *Wissenschaftliche Ergebnisse von Dr. Nansens Durchquerung von Grönland 1888. Geol. und Hydrog. Ergebnisse*, II, pp. 53—103, Berlin.
- Nordenskjöld, N. E. (1870): Redegörelse för en expedition till Grönland ar. *Vetensk.-Akad. Förh.* 10, p. 22. Stockholm.
- Nordenskjöld, N. E. (1875): Cryoconite found 1870, July 19th—25th, on the inland ice, east of Auleitsvik Fjord, Disco Bay, Greenland. *Geol. Mag., Decade II, Vol. II*, pp. 157—162.
- Nordenskjöld, N. E. (1885): Den Andra Dickonska Expedition til Grönland dess inre Isöken och dess Ostkust. Stockholm.

- Nordenskjöld, N. E. (1928): The Geography of Polar Regions. p. 122 and 253—254. New York.
- Okko, V. (1956): Glacial drift in Iceland, its origin and morphology. Acta Geog., 15, pp. 1—136.
- Philipp, H. H. (1912): Über die Beziehungen der Kryokonitlöcher zu den Schmelzschalen und ihren Einfluß auf die Ablationsverhältnisse arktischer Gletscher. Deutsche Geol. Gesellschaft, B. Monatsberichte, 64. pp. 489—505. Berlin.
- Poser, H. (1934): Über Abschmelzformen auf dem ostgrönländischen Packeise und Landeise. Z. für Gletscherkunde, 21, pp. 1—20.
- Sharp, R. P. (1949): Studies of superficial debris on valley glaciers. Am. J. Sci., 247, pp. 289—315.
- Steinbock, O. (1936): Kryokonitlöcher und ihre biologische Bedeutung; Z. für Gletscherkunde, 24, pp. 1—21.
- Swithinbank, C. (1950): The origin of dirt cones on glaciers. J. Glaciology, 1, pp. 461—465.
- Teichert, C. (1935): Die Bedeutung des Windes in arktischen Gegenden. Natur und Volk, 65, pp. 619—628.
- Tolner, H. (1938): Aufbau und Eisgehalt von Altschneefeldern und deren Oberflächenformen im Bereich der Klass-Billenbai auf Spitzbergen. Naturhistorisches Museum, Archiv für Polarforschung, Jahresbericht, 1, pp. 18—32. Vienne.
- Vlodavets, V. I. (1936): Zametka o naveiannom mineralnom osadke vo I'dahk. Vsesoiuznyi arkticheskii Institut, Trudy, 33, pp. 79—85. Leningrad.
- Wagner, A. (1938): Zur Entstehung von Kryokonitlöchern. Z. für Gletscherkunde, 26, pp. 129—137.