

CREVASSES, SERACS, MOULINS ET CAVITES SOUS GLACIAIRES

Louis Reynaud
laboratoire de glaciologie et
géophysique de l'environnement,
54, rue Molière,
Domaine Universitaire, BP 96,
38402 Saint-Martin-d'Hères.

culières (mécaniques ou hydrauliques) qui en font des réseaux. Pour le glaciologue, ce sont en plus des occasions d'avoir un aperçu sur la constitution de la glace en profondeur et même, dans certains cas exceptionnels, d'explorer les conditions de glissement à la base du glacier. C'est une partie de ces informations fondamentales qui sont présentées dans cet article, ainsi qu'une bibliographie permettant d'accéder aux articles plus détaillés sur le sujet.

Les crevasses

Les failles dans un glacier, naturelles ou non, en sont les caractéristiques les plus apparentes et les plus dangereuses. L'utilisation des domaines englacés passe souvent par leur réduction, leur aménagement ou leur contournement. Ces accidents dans la continuité du matériau ne sont pas distribués au hasard, ils correspondent à des situations parti-

Elles apparaissent quand la tension que subit la glace dépasse ses capacités de déformation. Ainsi, il n'est pas nécessaire d'avoir des ruptures de pentes pour que la surface se crevasse. Dans une vallée glaciaire rectiligne les distributions de vitesses sont telles dans la masse du glacier qu'elles provoquent de forts cisaillements dans les zones marginales où elles varient rapidement, à cause du frottement exercé par les rives. Elles

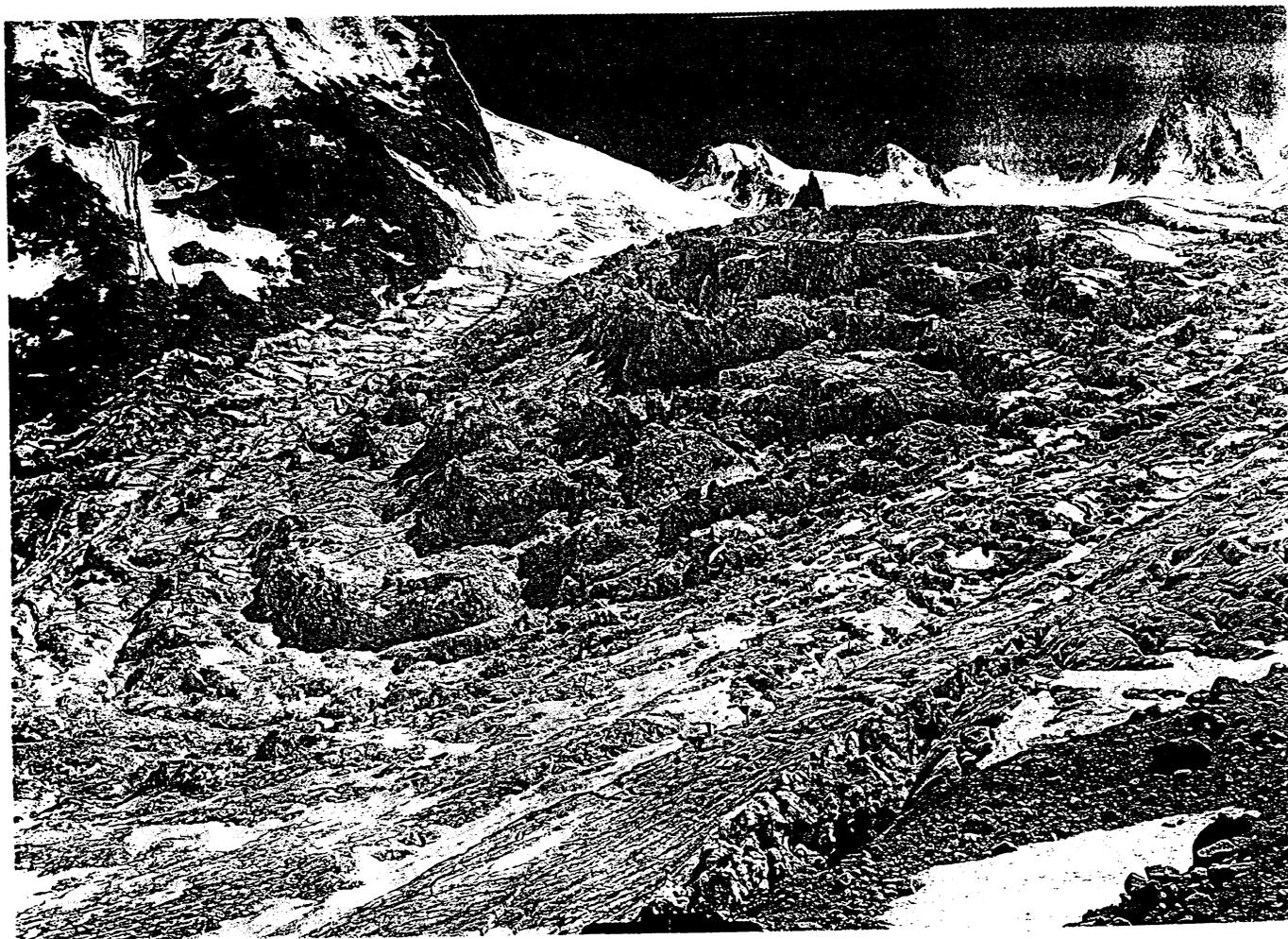


Fig. 1 : Les Séracs du Géant sur la Mer de Glace (document Lgge, 1960)

peuvent même naître à quelque distance des bords, là où le frottement sur le lit passe par un maximum (Nye 1965 a, Reynaud, 1973).

Cependant, les vallées glaciaires n'étant pas régulières sur de grandes longueurs, à cet état de cisaillement simple vient se rajouter :

- a) soit un effet de compression longitudinale, qui a tendance à leur donner une concavité vers l'amont,
- b) soit un effet d'extension, comme à l'amont d'une chute de séracs, avec concavité vers l'aval.

Dans ce dernier cas, lorsque le gradient de vitesse positif (extension) est suffisamment important, les crevasses transversales apparaissent rejoignant celles marginales des deux rives pour former des arcs réguliers (fig. n° 3).

De même, quand le crevassement du cas b est fort, les deux réseaux naissant sur les rives viennent se recouper au centre du glacier en débitant la surface en parallélépipèdes pour former des tours : les pinacles.

Ces formes vigoureuses, très souvent représentées par les artistes du siècle dernier lorsque les glaciers étaient en crue, sont caractéristiques d'une forte déformation. Elles avaient disparu depuis la dernière crue des années 1920, mais on les a retrouvées au cours des années 80 à la suite de la reprise d'avancée récente des glaciers.

D'une façon générale, le crevassement donne en surface une image simple ou compliquée de l'état de contrainte que subit la glace lorsqu'elle franchit la zone observée. Les efforts subis et les crevasses qui en résultent sont donc caractéristiques du lieu. Au cours du temps, leurs traits principaux, bien que plus ou moins accusés, suivant l'état d'écoulement, semblent immuables : il ne faudrait pas en déduire que la glace est immobile !

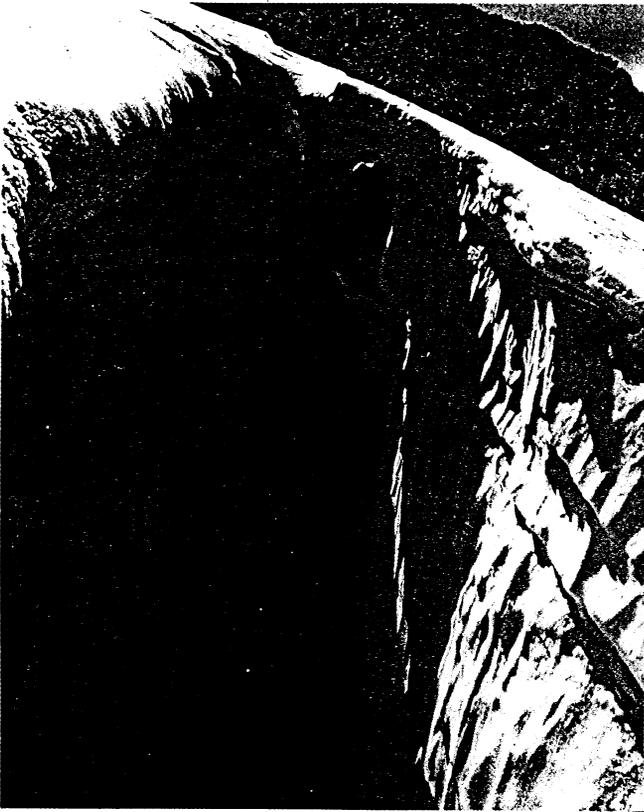


Fig. 2 : Crevasse en zone de névé, sur le glacier de Lognan (oct. 88). A la fin de la saison, le pont de neige n'existe plus que sur les commissures, et les parois montrent les accumulations annuelles successives séparées par les fines couches de poussières estivales (cliché Ch. Vincent).

Les séracs

C'est une forme extrême d'un crevassement intense, on dit même un chaos de séracs. De nombreux glaciers dans les Alpes présentent sur leurs parcours cette forme d'écoulement entre un plateau supérieur et la langue inférieure. Celle des séracs du Géant sur la Mer de Glace a été plus particulièrement étudiée pour y déterminer les distributions de vitesse et d'épaisseur car c'est un cas favorable d'observation de rapides changements dans tous les paramètres de l'écoulement pour en déduire des relations ou tester des modèles mécaniques sur le terrain (fig. n° 1 et 4).

Ces zones sont quelquefois responsables de l'apparition de formes morphologiques particulières à la surface du glacier lorsque les conditions spécifiques sont réunies au cours du parcours, comme les vagues ; ou bien les Bandes de Forbes. Elles génèrent aussi des ondes cinématiques qui se propagent sur la langue terminale à la suite des modifications d'écoulement global provoquées par des changements d'alimentation (bilan de masse) (Reynaud, 1988).

En bref, les conséquences dynamiques de l'existence de zones de séracs dans un glacier sont telles qu'on aurait tendance à simplifier radicalement la classification morphologique en proposant de séparer les glaciers en deux sous-ensembles :

- ceux qui ne possèdent pas de chutes et présentent des variations de longueurs en cours du temps assez modérées, très semblables à celles de leur alimentation (petits glaciers : Gébroulaz, Sarennes ou grands glaciers : Unteraar, Aletsch),
- et ceux qui, par suite de l'existence d'une (ou plusieurs) rupture de niveau, sont le siège de phénomènes d'amplification des variations d'alimentation et montrent des fluctuations de leurs langues inférieures beaucoup plus spectaculaires (Argentine, Mer de Glace, Bossons...).

Au pied de certaines chutes de séracs existe une catégorie de

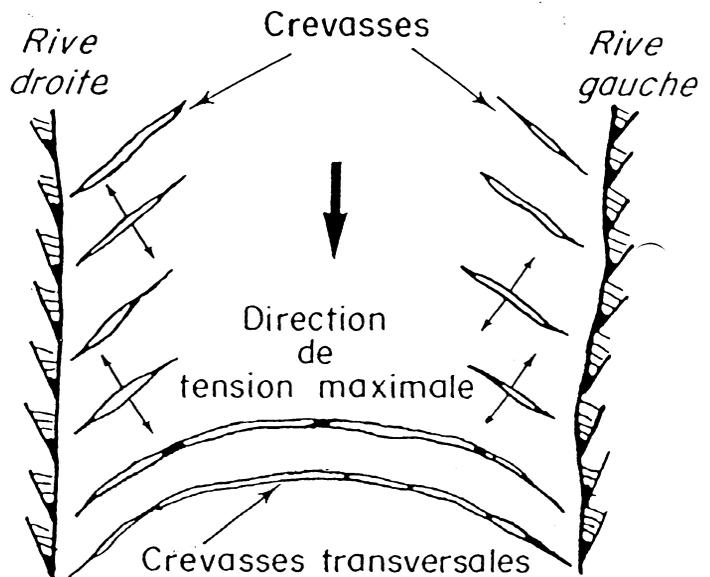


Fig. 3 : La distribution des crevasses en surface donne une image des efforts subis par la glace. Pour une vallée rectiligne sans cassure de pente, on observe des crevasses dans les zones près des rives là où la déformation est la plus importante. Ces crevasses remontent des rives vers l'intérieur du glacier à peu près à 45°. Dès qu'intervient une rupture de pente, suffisante pour produire un allongement supérieur à la résistance de la glace, il apparaît des crevasses transversales qui rejoignent les crevasses marginales pour former des arcs réguliers.

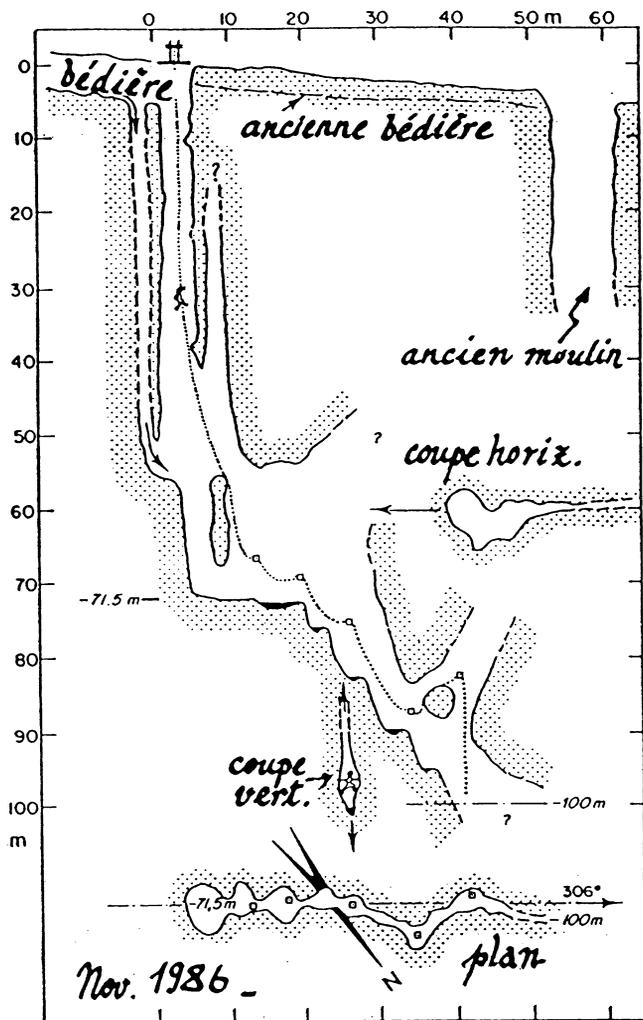


Fig. 6

jugé par les spéléologues très semblable à celui effectué dans les karsts, bien que les moulins soient creusés en 1 ou 2 ans tandis que les précédents se sont formés sur une bien plus longue période de temps.

La partie inférieure, à 100 m de profondeur, s'était probablement déjà refermée depuis 1 ou 2 mois par suite de l'absence du fort courant d'eau qui l'avait maintenue ouverte au cours de l'été.

En effet, à ces profondeurs, pour les mêmes raisons invoquées plus haut pour les crevasses, les parois verticales de glace fluent et se rapprochent. Ce mécanisme est confirmé par les observations effectuées dans les galeries de reconnaissance d'EDF sous 100 m de glace près du front de la même Mer de Glace. Le diamètre de ces galeries se réduisait au tiers de leur valeur initiale en seulement 3 semaines (Charpentier et al. 1972).

Dans ces conditions il faudrait venir plus tôt dans la saison, juste après les plus grosses eaux et s'arranger avec le débit d'étiage nocturne de la bédrière.

C'est ainsi qu'une tentative eut lieu en septembre 1987. Malheureusement, même une petite quantité d'eau chutant verticalement d'une soixantaine de mètres rendit l'exploration impossible.

La troisième exploration a eu lieu en septembre 1988 et il fut décidé cette fois de détourner la bédrière. Cette opération de creusement occupa intensément 2 spéléologues et 3 glaciologues pendant 4 jours et finalement la confection d'un barrage ad hoc permit d'assurer une exploration à sec au cours de la nuit.

La topographie du moulin réalisée à cette occasion (fig. n° 7) révèle les mêmes caractéristiques pour le puits principal que

celle des deux levés précédents. En revanche, la galerie étroite empruntée par l'eau à partir de la base du puits (- 65 m) se développait cette fois-ci presque horizontalement sur 120 m de longueur, tandis que les méandres dans le plan horizontal étaient fortement marqués. Ce n'est qu'à partir de 120 m que la haute galerie redevenue brusquement à la forme d'un étroit conduit plongeait par une suite de petits puits verticaux.

Malheureusement, à près de 100 m de profondeur la progression était stoppée par un syphon.

L'existence de ce syphon explique l'absence du fort courant d'air qui habituellement circule dans les moulins et qui véhicule des odeurs particulièrement nauséabondes, comme en 1987, semblables à celles qui proviennent des égouts.

L'origine de ces odeurs est probablement due à l'accumulation et à la dégradation des débris organiques contenus dans la cryoconite que charrie l'eau de fonte depuis la surface.

Ainsi, 3 expéditions consécutives au grand moulin de la Mer de Glace ont été stoppées vers 100 m de profondeur et le problème de savoir comment circule l'eau à l'intérieur du glacier reste entier.

Cependant on a pu constater que les topographies depuis 1897 donnaient une morphologie très semblable pour le puits principal ainsi que pour la galerie de fuite entre 60 et 100 m de profondeur.

Les profondeurs variables du puits principal s'expliquent probablement par la différence de débit estival, mais aussi par le fait que les moulins ne sont pas forcément annuels ; ainsi

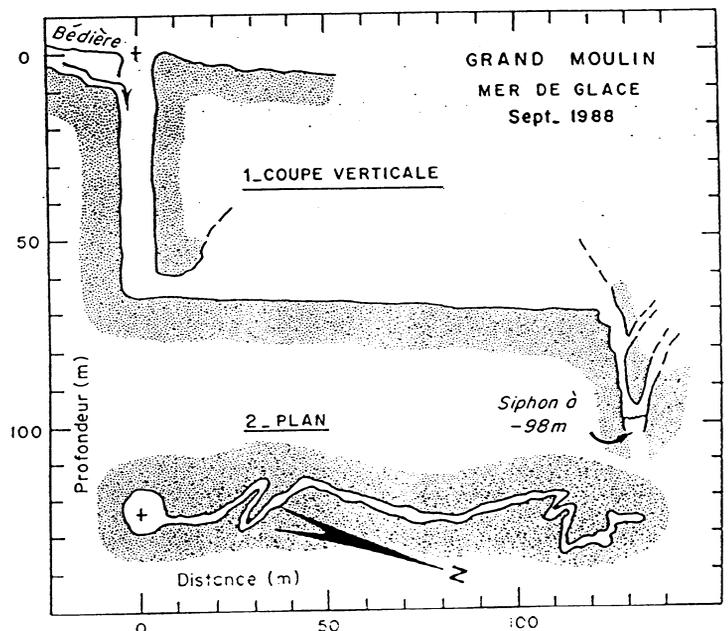


Fig. 7

Cartographie des Moulins :

fig. 5 : en septembre 1897 d'après Fontaine (Vallot 1898)

fig. 6 : en novembre 1986

fig. 7 : en septembre 1988.

Les morphologies aux différentes époques mettent en évidence :

- un puits vertical (simple ou multiple, suivant l'ancienneté du Moulin) de profondeurs voisines, respectivement 60, 71 et 65 m,
- une partie horizontale plus ou moins importante, formée d'une galerie étroite très développée verticalement et présentant de nombreux méandres,
- une succession de petits puits reliés entre eux par des conduits cylindriques.

celui de 1988 était le même que celui de 1987 et a donc été creusé sur 2 années consécutives (en octobre 1989, on a constaté que c'était encore celui de 1987 qui fonctionnait).

D'autre part, la direction générale prise par les galeries à la base du moulin semble bien suivre la direction principale du crevassement venant de la rive droite, bien marquée en surface à 200 m environ de l'embouchure supérieure du moulin.

Sans qu'on puisse l'affirmer, il y a donc là des indications suffisantes pour penser que l'eau du moulin ne va pas directement au fond (350 m d'épaisseur) mais rejoint la rive droite par une série de conduits, ceux-là mêmes qui apparaissent dans les crevasses près de la surface un kilomètre plus bas, dans la Veine Noire, par suite des ablations successives qui sont de 6 à 8 m de glace/an dans cette région.

En ce qui concerne la structure du glacier en profondeur, les parois du puits comme celles des hautes galeries ont permis de suivre l'étalement en profondeur des célèbres Bandes de Forbes qui marquent régulièrement la surface de la langue sur 6 km depuis la chute de séracs du Géant. On a pu constater que ce marquage s'étend en profondeur au moins jusqu'à 100 m et que l'inclinaison des bandes au centre du glacier est encore celle que l'on mesure près de la surface dans les crevasses. Ce résultat dans sa simplicité est néanmoins très important, car il vient justifier les hypothèses faites lors de la reconstitution des vitesses d'écoulement de la Mer de Glace pendant le dernier siècle, à partir de ce marquage annuel et naturel constitué par les Bandes de Forbes (Lliboutry et Reynaud, 1981).

Enfin, ces circulations d'eau qui amènent les failles existantes dans le corps du glacier montrent que des fissures même légères peuvent se propager à des profondeurs importantes, de l'ordre de 100 à 120 m.



Exploration de la galerie horizontale du moulin 1988 vers la côte - 100 m. (Cliché J.-P. Benoist).

Les cavités sous glaciaires

Une autre façon de pénétrer sous le glacier pour y observer et décrire les mécanismes physiques qui interviennent au contact glace-lit (rocheux ou non) consiste à utiliser les accès offerts par les porches et les galeries de torrents émissaires ou bien les cavités naturelles sur le lit.

Alors que les glaciers créés par les torrents ou apparaissant à l'aval de quelques bosses près du front ne permettent qu'exceptionnellement de progresser d'une cinquantaine à une centaine de mètres au plus (hormis quelques glaciers d'Islande avec des sources géothermales chaudes) mais toujours dans un environnement où l'eau a considérablement modifié les conditions de contact, en revanche les cavités naturelles atteintes par des reconnaissances de localisation de l'eau offrent la possibilité de pénétrer dans l'intimité du contact glace-lit.

Les premières reconnaissances sous glaciaires ont été effectuées dès 1941 sur le glacier de Tré la Tête, et en 1944 sous la Mer de Glace. Dans les deux cas il s'agissait de définir les possibilités de capter le torrent sous glaciaire à bonne altitude (Waeber, 1943, Ract-Madoux et M. Reynaud, 1951). Ces deux reconnaissances dans la glace, en suivant le lit rocheux, ont apporté bon nombre d'informations essentielles sur la qualité de la glace, sa température, les déformations rapides des galeries et aussi dans les techniques les mieux adaptées pour les forer. Elles ont débouché sur des cavités naturelles assez impressionnantes mais malheureusement ces accès étaient temporaires et ils ont rapidement disparu.

Il en est tout autrement des cavités sous glaciaires découvertes par EMOSSON SA dans la chute de Lognan au glacier d'Argentière. Là, la pente du lit rocheux est de l'ordre de 40 à 45° et le glacier en de nombreux endroits décolle, sa rigidité étant suffisante sous une soixantaine de mètres d'épaisseur pour former des cavités obliques de forme variable, pouvant atteindre 4 à 5 m de décollement, 30 à 50 m de longueur, sur des largeurs plus importantes encore pour les plus grandes (Vivian et Bocquet, 1973).

Dans ces cavités où le déplacement de la glace est voisin d'1 m par jour, la glace est moulurée, réplique du lit qu'elle vient de quitter, en présentant des copeaux comme si le rocher rabotait le glacier.

Cette glace présente des veines très propres, puis d'autres, voisines pourtant, avec une glace d'accrétion où sont inclus sur 20 à 30 cm des matériaux morainiques fins (sables, graviers) disposés en couches inégales. Cette disposition est caractéristique d'une formation par fonte et regel au passage des bosses sur le lit rocheux.

On y rencontre aussi des blocs de rocher enchassés de dimension variable, depuis le décimètre jusqu'au mètre.

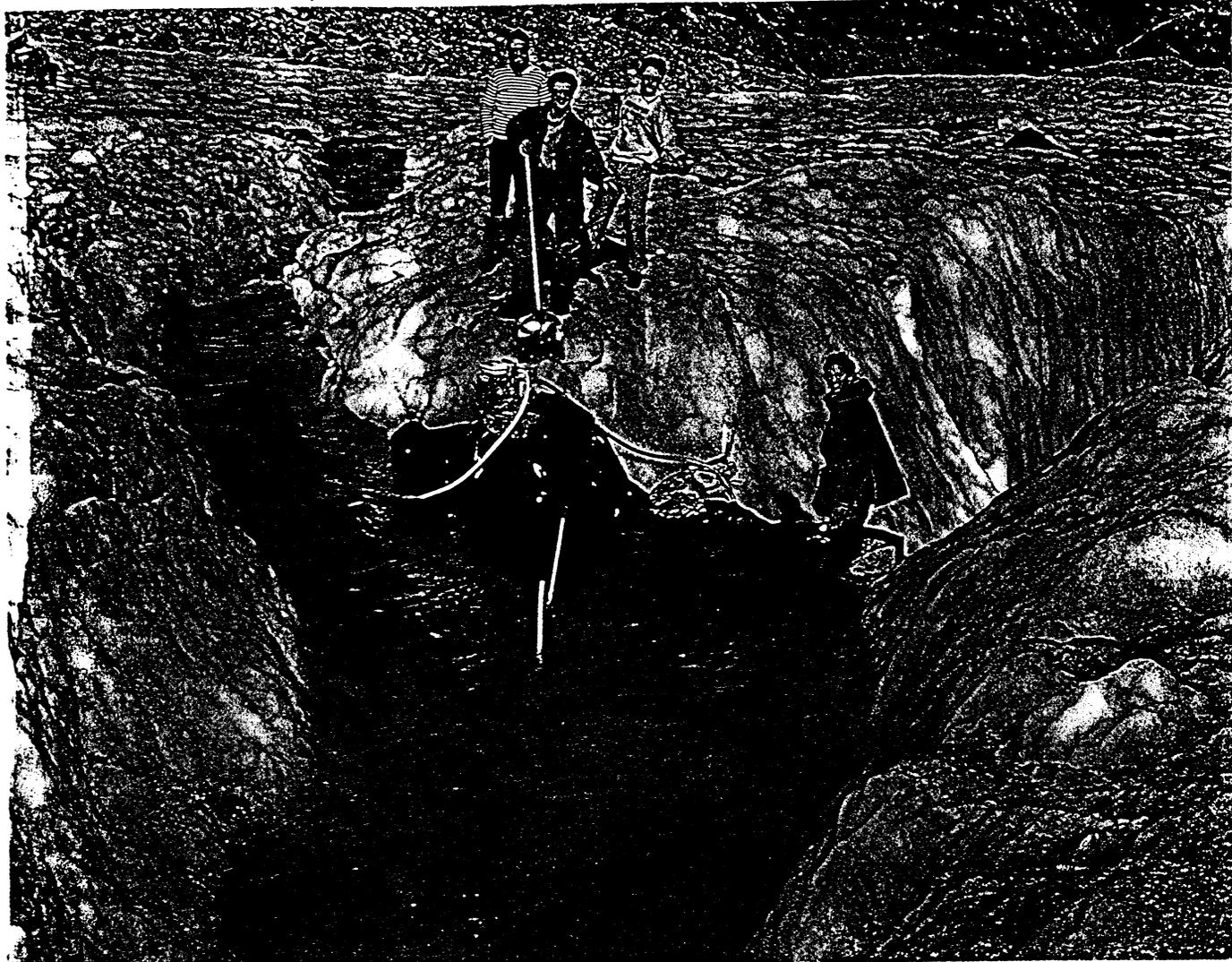
Ce transport de matériaux semble limité à la couche basale car les forages à la vapeur, une fois dépassés les 30 premiers centimètres, n'ont jamais rencontré d'obstacles et ont donné l'impression de s'effectuer en glace pure.

En plus de l'observation, ces cavités de décollement permettent de mesurer la vitesse de glissement en continu et de décrire le mouvement fin du glacier. Contrairement à ce qui a souvent été proposé, on n'a pas trouvé de mouvement saccadé pendant deux années de relevés mais au contraire un mouvement très continu, même sur le lit d'une chute de séracs.

Ce qui laisse à penser qu'en d'autres lieux moins pentus, mais crevassés et souvent plus épais, le mouvement doit être au moins aussi monotone. Cependant, la vitesse peut varier régulièrement et présenter des extremums en hiver comme en été (Reynaud et al. 1988).

LOUIS REYNAUD

Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique
de l'Environnement, CNRS*



Barrage de la Bédière en septembre 1988 et canal de dérivation pour assécher le moulin au moins pendant l'étiage nocturne (cliché L. Reynaud)

BIBLIOGRAPHIE

- NYE (J.F.) - 1965. The flow of a glacier in a channel of rectangular, elliptic or parabolic cross-section. *Journal of Glaciology*, Vol. 5, n° 41, p. 661 - 690.
- LLIBOUTRY (L.) - 1975. *Traité de Glaciologie*, Tome 2, Masson Paris.
- LLIBOUTRY (L.) ; REYNAUD (L.) - 1981. Global dynamics of a temperate glacier, Mer de Glace, and past velocities deduced from Forbes bands. *Journal of Glaciology*, vol. 27, n° 96, p. 207-226.
- RACT-MADOUX (M.) ; REYNAUD (M.) - 1951. *Exploration des glaciers en profondeur*, La Houille Blanche, A, mai 1951, p. 1-13.
- REYNAUD (L.) - 1973. Flow of a valley glacier with a solid friction Law. *Journal of Glaciology*, vol. 12, n° 65, o 251 - 258.
- REYNAUD (L.) - 1973. *Etude de la dynamique des séracs du Géant*. Thèse 3^oc. Université J. Fournier, Grenoble, 58 p.
- REYNAUD (L.) - 1987. The november 86 survey of the Grand Moulin on the Mer de Glace, Mont-Blanc, France. *Journal of Glaciology*, vol. 33, n° 113, p. 130 - 131.
- REYNAUD (L.) - 1988. *Le Glacier d'Argentière*, plaquette 16 p. éditée par les Réserves Naturelles de Haute-Savoie, Château de Rubins, 74700 Sallanches.
- REYNAUD (L.) - 1988. *Le Glacier de Gébroulaz*, plaquette 20 p., éditée par le Parc National de la Vanoise, 135 Dr Julliard, 73001 Chambéry.
- REYNAUD (L.) - 1988. Caractéristiques de la vitesse de glissement de la glace sur le lit rocheux. *Glacier d'Argentière*, Mont-Blanc, France. Avec D. Donnou, J. Perrin, C. Rado, R. Ribola et C. Vincent. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 307, série II, p. 1 519 - 1 522.
- VALLOT (J.) - 1988. *Exploration des moulins de la Mer de Glace*. *Annales de l'observation du Mont-Blanc*, t.-3, p. 183 - 190.
- VIVIAN (R.) ; BOCQUET (G.) - 1973. Subglacial Cavitation Phenomena under the Glacier d'Argentière, Mont-Blanc, France. *Journal of Glaciology*, vol. 12, n° 66, p. 439 - 451.
- WAEBER (M.) - 1943. Observations faites au glacier de Tré la Tête à l'occasion de l'aménagement d'une prise d'eau sous glaciaire. *Revue de Géographie Alpine*, XXXI, 3, p. 319 - 344.