Explications et synthèse des variations de l'hydrographie sous-glaciaire du glacier d'Argentière, Mont-Blanc, grâce aux mesures de l'écoulement du glacier sur son lit rocheux de 1970 à 1998

Explanation and synthesis of hydrographic variations under the Argentière glacier (Mont-Blanc), thanks to glacier flow measurement on its rock bed from 1970 to 1998

par Luc Moreau,

Chamonix-Glaciologie, Association scientifique 1901

The French and Swiss company Emosson has for goal at the Argentière glacier to take the water under the glacier at a higher altitude from the dam. The first mission is to understand and prevent the hydrographic flow under the glacier. After 25 years in the right side, the stream suddenly changed his way in november 98 after an important volume of storming water to go back to the left side, talweg of the valley.

We are showing here that with the help of the sliding velocity measures of the glacier on its bed rock and measures taken above, we can detect the causes of the hydrographic fluctuations. We explain this flow variations by a slowing down of the glacier sliding caused by the decreasing at 2400 m since 1985.

The sliding velocity appears as the motor of this dynamics and the principal cause of the flow variations under the glacier.

With a fondamental point of view, ten years of sliding velocity measurements show that the sliding glacier appears to be regular and faster in the summer period. But sometimes, progressive acceleration during important thunder storm only in autumn are measured and illustrated here. These storming events are very important in the hydrographic fluctuations when the conditions under the glacier have changed.

I ■ INTRODUCTION

La compréhension de la variation du cours du torrent sous-glaciaire du glacier d'Argentière est un problème essentiel pour la société franco-suisse Emosson.

En effet, lorsqu'elles sont bien captées (jusqu'à 8 m³/sec au maximum), les eaux du glacier d'Argentière peuvent représenter jusqu'à 27% de la retenue, et étant donné leur écoulement gravitaire jusqu'au barrage d'Emosson, leur coefficient de rentabilité est remarquable (3,3 kW/h pour 1 m³).

Il est donc capital de savoir où passe le torrent principal sous le glacier et où il passera l'été suivant de manière à anticiper sur son nouvel itinéraire éventuel et effectuer les aménagements ou maintenance nécessaires dans les galeries et puits de captage (amélioration des collecteurs, débouchage des puits, nouveaux puits à creuser, etc.).

Tout le problème dans la prévision du passage du torrent consiste à connaître les éléments qui gouvernent son itinéraire.

II ■ LA TOPOGRAPHIE SOUS-GLACIAIRE : DEUX PASSAGES PRINCIPAUX

Le problème n'est pas simple sous 100 mètres d'épaisseur de glace et le limiter à la seule responsabilité de la topographie sous-glaciaire est une utopie ! c'est une réalité qui n'est valable qu'en terrain aérien. Sous le glacier, l'eau ne passe pas toujours au talweg (ligne rejoignant les points les plus bas de la vallée), d'autres processus comme la charge et pression du glacier sur le lit rocheux jouent sur l'étanchéité de l'interface glace-roche et le passage du torrent. Le talweg peut facilement se fermer et l'eau circuler à une altitude supérieure. C'est d'ailleurs ce que l'on a constaté à Argentière depuis 25 ans (talweg à 2181 m et torrent à 2205 m à 300 m en rive droite).

Cependant, il est évident que la morphologie du lit rocheux est un élément de base pour connaître les itinéraires torrentiels principaux.

1. Coupe verticale du lit rocheux du glacier d'Argentière, crête du verrou de Lognan.

Au glacier d'Argentière, les différentes reconnaissances effectuées à l'eau chaude depuis 25 ans par Emosson suite aux successives pertes des eaux ont permis d'obtenir un document topographique relativement précis (fig.1), mais principalement de la crête du lit rocheux du verrou d'une rive à l'autre (600 m de large). Tandis qu'aux abords, en amont et aval, de grandes zones restent encore inexplorées.

Deux passages principaux sont marqués sous la chute (fig. 1) :

— un talweg dans la partie centrale rive gauche en forme de col à 2181 m, écoulement du torrent avant 1970 (et en 1974, 2 mois),

— un passage en rive droite en sillon de 5 mètres de profondeur à 2205 m, écoulement de 1970 à novembre 1998.

Avec l'aide de toutes les cartes topographiques réalisées lors des reconnaissances à l'eau chaude à la base du glacier, une maquette en relief précise au 1/400^e a été réalisée [1] et a permis de mieux se rendre compte de la topographie précise générale et de la localisation des puits par rapport aux passages principaux.

La topographie et le talweg de la vallée glaciaire étant connus, nous remarquons que le torrent est cependant resté plus de 25 ans à une altitude supérieure de 25 mètres au talweg central et à 300 mètres de là en rive droite. C'est donc la dynamique du glacier lui-même avec sa **charge en pression et en mouvement sur le lit rocheux qui entraîne l'étalement** au talweg, partie centrale rive gauche en forme de col.

Là réside le problème, car il est impossible de mesurer les pressions du glacier sur le rocher en permanence, l'entreprise serait monstrueusement onéreuse...

Quels sont donc les moyens dont on dispose pour comprendre et anticiper sur les variations hydrographiques ?

III ■ GLISSEMENT DU GLACIER : RECHERCHE FONDAMENTALE ET APPLIQUÉE

C'est en fait un concours de circonstances qui nous a permis aujourd'hui de comprendre que l'on pouvait apporter des informations sur les variations de l'hydrographie sous-glaciaire grâce aux mesures du glissement du glacier sur son lit rocheux et de surface (LGGE Grenoble).

En fait, nous sommes passés d'une étude fondamentale à une étude appliquée. Quelques explications chronologiques s'imposent.

Suite à la découverte de cavités naturelles de décollement du glacier lors du creusement des galeries et puits de captages sous la chute de séracs de Lognan dans les années 1967-70, un laboratoire sous-glaciaire se met en place sous le glacier d'Argentière grâce à une collaboration entre R. Vivian et l'EDF. L'instrument principal de ce site scientifique sous-glaciaire unique est le cavitomètre. Cet instrument est constitué d'une roue au bout d'un bras qui mesure en continu le glissement du glacier dans une cavité naturelle de décollement, là où le glacier commence sa chute de 500 m de dénivelé vers l'aval (cavité S6, partie centrale rive gauche, à 20 m à l'aval du col-talweg).

À l'époque, d'importantes informations et données sont recueillies sur tous les phénomènes sous-glaciaires et notamment sur la manière dont glisse le glacier sur le rocher. R. Vivian, enregistre parfois des "saccades" dans ce glissement entrecoupées de périodes de glissement régulier [2]. D'autres auteurs ne mesurent qu'un glissement régulier [3].

En 1988, nous reprenons l'instrumentation du Laboratoire sous-glaciaire sous la responsabilité de R. Vivian, et tentons de travailler sur la façon dont glisse le glacier sur le rocher d'un point de vue fondamental puisque deux groupes se

2. Mesures du glissement depuis 1989.

3. Accélérations par précipitations d'orages, 1997-98.

démarquent, les "saccadistes", partisans d'un glissement irrégulier, et les "anti-saccadistes".

Nous essayons de comprendre quels sont les éléments qui influencent le mouvement d'un glacier : rugosité du lit, film d'eau, débits d'été, mise en charge par les orages, frottement, matériaux morainiques, nature et déformation de la glace basale, décollement du glacier, fusion/regel, chute de glace, séismes, gel à l'interface, artefacts, etc [4].

Nous tentons de comprendre pourquoi des mesures différentes ont été recueillies depuis que l'on mesure les glaciers, en surface, sur les rives ou sous le glacier. Il se pourrait aussi que les conditions glaciaires ou hydrographiques variables sur un même site puissent entraîner un glissement différent suivant les époques...

Nous figurons ici (fig.2) les mesures depuis 1989.

Par manque de données fiables et pour plus de clarté, nous avons préféré omettre les données entre 1992 et 1997.

Nous avons volontairement laissé des artefacts en 1989 (fig.2). Nous constatons que si une correction n'est pas apportée, il apparaît un glissement irrégulier.

Il y a eu ici un freinage de la roue par du sable collé sur le pneu toujours au même endroit. L'interface glace-roche est une zone très humide avec d'importants dépôts de matériel morainique fins (farine de roche) et grossiers (graviers, blocs) mais aussi d'arrivée d'eau subite : maintenir l'instrumentation dans des conditions optimales demande une surveillance et des vérifications fréquentes. Deux, voire trois visites sont nécessaire par semaine pour vérifier l'installation

et nettoyer les instruments. Des étalonnages sont régulièrement effectués pour fiabiliser les mesures.

Dans la figure 5 on constate le passage d'une pierre en même temps qu'une lubrification du glacier par d'importants débits orageux. Il faut ici bien étudier la variation verticale de position du bras de la roue pour comprendre qu'un bloc est passé sur la ligne d'écoulement de la roue. Sans cette correction, nous aurions vu ici un "à coup" dans le glissement. Cependant, malgré cette correction apportée, une accélération par l'eau a pu être décelée.

D'une manière générale, on constate que le glacier se **déplace plus vite en été qu'en hiver**. On mesure à la cavité S6, au départ de la chute de séracs et sous 100 mètres d'épaisseur de glace en moyenne 40 centimètres par jour en hiver et 30 % de plus en été soit 60 à 65 cm/j sur le lit rocheux.

Il y a donc une relation directe avec l'eau de fonte qui circule sous le glacier et qui lubrifie l'interface glace-roche. Ce processus a déjà été mesuré à la surface des glaciers et certains auteurs imaginaient un glissement plus important sur le lit rocheux, ce que nous confirmons ici par ces mesures.

D'autre part, des **accélérations progressives s'effectuent en automne suite à des précipitations orageuses importantes** (fig.3).

L'accélération passe progressivement de 2 à 5 cm/h (fig.4), voire 6 cm/h (fig.5), en fonction de la mise en pression des chenaux sous-glaciaires. A cette époque de l'année les débits de fonte étant moindres, les chenaux sont rétrécis,

4. Accélération du glissement du glacier d'Argentière par précipitations orageuses du 11 au 18 septembre 1997, déplacement filmé par caméra.

5. Accélération du glissement du glacier d'Argentière le 25 octobre 1998 par de forts débits d'orages et correction due au passage simultané d'une pierre (événement probablement responsable du basculement).

leur mise en pression en est donc facilitée. Il y a **lubrification et diminution du frottement** du glacier sur le rocher et la masse s'accélère progressivement.

Il n'y a pas de saccades proprement dites mais une progression dans l'accélération. Ces accélérations sont toujours le fruit des mises en pression par les importantes précipitations orageuses d'automne.

En 1997, une caméra vidéo placée durant 8 jours a filmé (fig.4) une belle accélération de 4 heures. Le film montre bien une progression dans l'accélération sans "à coup" (déclenchement de la caméra de 0,2 seconde toute les 10 minutes), [5]. Quatre heures après, le glissement ralentit. Une fois l'interface forcée par les importants débits, la pression diminue entraînant un ralentissement.

Il est important de souligner le fait que **s'il n'y a pas d'importantes précipitations orageuses avec mise en charge de l'interface, le glissement du glacier reste régulier.**

IV ■ LE GLISSEMENT DU GLACIER, MOTEUR DE LA DYNAMIQUE ET INDICATEUR DE L'HYDROGRAPHIE ?

Qu'est-ce qui nous permet de dire que l'accélération du glissement du glacier au talweg (la cavité S6 est à 20 mètres à l'aval du talweg central rive gauche) indique que de l'eau en pression est passée ?

Plusieurs éléments de réponse viennent confirmer notre idée.

Tout d'abord un glacier glisse en bloc sur le lit rocheux a priori. Il est donc impensable qu'une mise en pression et une lubrification sur une seule rive accélère un glacier tout entier de 100 m d'épaisseur sur 600 m de largeur qui glisse en bloc !

De même, si de l'eau accélère le glacier au centre, il est peu probable que l'accélération se répercute sur tout le glacier (cet aspect sera éclairci dans l'avenir puisqu'un second instrument vient d'être installé en rive droite dans une autre cavité naturelle de décollement du glacier, au droit du passage torrentiel 1972-1998).

La chute de séracs du glacier d'Argentière est une des plus bouleversées du massif du Mont-Blanc ; des chutes de glace sont visibles plusieurs fois par jour (vitesse du glacier au centre et en surface proche de 2 m/jour). Par conséquent,

dans un tel chaos de glace, il est possible qu'une partie du glacier s'accélère légèrement sans perturber le glacier et la chute entière.

De plus, au milieu de la chute, il existe depuis 1994, et ce suite à une décrue, un espace libre de glace appelé " le rognon rocheux " (comme dans les années 1970) qui permet à la masse suspendue en amont de bouger plus indépendamment que le reste du glacier. C'est justement au-dessus de cet espace que sont mesurées les vitesses de glissement du glacier dans la cavité S6, à quelques mètres du talweg. Une simple mise en pression de cette zone peut accélérer la masse de glace suspendue sans perturber le reste du glacier. Cette possibilité apparaît envisageable.

Un événement vient d'ailleurs confirmer cette idée puisque à la suite des précipitations orageuses des 24 et 25 octobre 1998, toute l'eau du glacier est revenue au talweg entraînant une belle accélération (fig.5).

Cela supporte le fait que, jusqu'à preuve du contraire c'est uniquement l'eau qui peut influencer le glissement très régulier du glacier d'Argentière [1]. L'eau joue un rôle plus important qu'on ne le pensait dans la dynamique glaciaire.

La recherche fondamentale est devenue appliquée. Le passage du torrent dans la zone centrale rive gauche, zone des mesures du cavitomètre, accélère le glissement du glacier. Grâce à ces accélérations mesurées, nous pouvons dire qu'une partie des eaux passent dans la partie centrale lors des mises en charge par les importantes précipitations orageuses.

Le glissement du glacier apparaît donc comme un indicateur du passage de l'eau dans la partie centrale. Il est donc intéressant de continuer ces mesures du glissement du glacier sur son lit de manière à recueillir des informations sur les accélérations et leurs fréquences qui permettent d'anticiper sur le passage des eaux au col/rive gauche.

D'autre part, ce genre d'événement orageux suffit à provoquer le basculement du torrent lors d'une situation du comportement du glacier favorable à ce renversement hydrographique.

Nous le remarquons en octobre-novembre 1998 (fig.5). C'est suite aux mises en charge de l'interface glace-roche que de nouveaux chenaux ont été créés vers la rive gauche et se sont maintenus grâce à une situation glaciaire de décrue favorable.

6. Vitesses de glissement, de surface et altitude moyenne à 2400 m, glacier d'Argentière, Mont-Blanc.

V ■ UNE CONNAISSANCE EMPIRIQUE DE LA DYNAMIQUE HYDROGRAPHIQUE SOUS-GLACIAIRE

Cette nouvelle situation hydrographique apparaissait prévisible puisque la morphologie glaciaire revenait à l'identique des années 1970 quand l'eau passait par la rive gauche [4].

Le problème de l'époque était que l'on ne connaissait pas l'hydrographie sous-glaciaire et ses caprices ainsi que la topographie précise du lit rocheux. Les captages se réalisaient de manière empirique, localisés non pas à la crête du verrou mais au milieu de la chute, sur la face aval du verrou de Lognan. Les eaux se dispersaient et disparaissaient des puits fréquemment.

Depuis 25 ans, les reconnaissances à l'eau chaude pour retrouver le torrent en rive droite (sillon à 2205 m, P14) en 1973, l'expérience des hydrauliciens ainsi que la maquette en relief nous ont permis de comprendre et proposer qu'en cas de retour du torrent en rive gauche, il fallait capter l'eau à la source (proposition de Moreau, 09.1996, rapport à Emossion), c'est-à-dire au col même avant sa dispersion dans la chute sur le verrou.

Un puits de sondage (S17) et un de captage (Puits 15) ont été creusés en 1998 juste en amont du col/talweg. Ces deux puits recueillent aujourd'hui 100% des apports sous-glaciaires depuis le 16 novembre 1998 !

A la vue de cette variation subite du torrent en octobre/novembre 1998, nous pouvons dire qu'un cycle de crue et décrue se termine. Nous comprenons mieux comment se pratique la variation du cheminement torrentiel sous-glaciaire. Nous pouvons faire la synthèse et mettre à plat les éléments qui interviennent sur l'itinéraire des eaux.

Dans cette analyse, il est intéressant de faire intervenir les vitesses de glissement sur le lit, de la surface et des altitudes moyennes du glacier au profil 4 à 2400 m juste en amont de la chute de séracs. (fig. 6).

On remarque que les trois courbes sont en phase.

Depuis 1990, selon les mesures du LGGE, la tendance moyenne est à la décrue, l'altitude moyenne a perdu 5 m (soit 2% de l'épaisseur) entre 1990 et 1998. Si l'on regarde les données de la vitesse, on passe dans le même temps de 125 m à 100 m, soit près de 25% de moins en vitesse de surface et de 207 m à 164 m de vitesse de glissement sur le lit, soit également près de 25% de variation.

Les variations d'altitude et donc d'épaisseur du glacier (250 mètres) ont une tendance à amplifier les variations de vitesses.

De même, si l'on prend les données LGGE de surface pour la crue du glacier, on remarque que pour la période 1975-1985, 2% de d'épaisseur supplémentaire seulement entraîne 40% de vitesse en plus (fig.7).

7. Effet de vidange du bassin supérieur du glacier d'Argentière et glissement plus rapide = cause de la variation hydrographique du torrent.

8. Cas d'une crue du glacier, bilan positif en amont de la chute torrent en rive droite (une flèche représente une action).

Comme l'avait suggérer Lliboutry, on peut donc dire que le bassin supérieur du glacier d'Argentière a tendance à se **vider** dans la chute de séracs de Lognan et à **réguler sa masse** en fonction du bilan positif ou négatif. Un surplus de masse entraîne une vitesse plus rapide sous l'effet d'un poids plus lourd. Comme une baignoire qui déborde, c'est la vitesse de débordement qui varie dans la chute de séracs plus que l'épaisseur de glace en amont.

A l'opposé, c'est le bassin aval de la chute qui récupère la variation amplifiée. Pour 5 m de glace en plus en amont de la chute, nous avons 15 m en plus à l'aval de la chute au profil 2 (LGGE).

Il y a un certain seuil d'épaisseur au-delà duquel le glacier se vidange dans la chute de séracs de Lognan et où les vitesses de glissement apparaissent comme le moteur de ce processus.

En parallèle, une vitesse de glissement supérieure sur le verrou entraîne un apport de glace supplémentaire sur la crête et au niveau du col central, talweg de la vallée. Il y a dans ce cas une étanchéité qui s'effectue qui oblige le torrent à s'écouler en rive droite (fig.7).

A l'opposé, lors d'une décrue (fig.8), l'apport de glace est amoindri par un ralentissement des vitesses de glissement du glacier et le passage central redevient possible avec l'aide d'importantes précipitations orageuses qui ouvrent les chenaux sous-glaciaires (cas de novembre 1998). Le ralentissement du glissement permet plus facilement le creusement des chenaux sous-glaciaires à l'interface et leur maintien s'en trouve facilité. Le rognon rocheux s'ouvre, preuve d'un apport de glace moindre sur le verrou.

9. Cas d'une décrue du glacier, bilan négatif en amont de la chute torrent au talweg rive gauche (une flèche représente une action).

VI ■ CONCLUSIONS

D'un point de vue fondamental, l'écoulement du glacier nous apparaît très régulier avec des vitesses de glissement plus rapides en été de 30 % environ. Cependant, on remarque des accélérations progressives dans les vitesses sur quelques heures seulement lors des mises en pression de l'interface glace-roche par les importantes précipitations orageuses d'automne. Cela permet de définir **les vitesses de glissement comme un indicateur du passage torrentiel**, souci premier de la société d'Eposson au glacier d'Argentière.

D'un point de vue hydrographique, après 25 ans en rive droite, le torrent est revenu en novembre 1998 au talweg central dans son itinéraire de 1965-70 à la suite d'un orage intense. Un cycle complet hydrographique se termine. On comprend mieux aujourd'hui ce basculement du torrent grâce aux mesures de surface et sous-glaciaires. La variation de l'apport de glace dû à des vitesses différentes lors des crues ou décrues explique assez bien ce basculement.

En effet, il semble que la masse de glace en amont de la chute a tendance à se réguler d'elle-même, se vidangeant dans le bassin aval par une vitesse de glissement plus rapide lors d'un gain de masse de glace non négligeable en amont de la chute.

Le glissement du glacier apparaît comme le moteur de cette dynamique. Plus le glacier est épais, plus il s'écoule rapidement dans la chute et plus le talweg central est étanche au torrent. Inversement, la décrue et les vitesses moins rapides de glissement permettent des apports de glace moindres et donc des pressions plus faibles au-dessus du talweg. L'ouverture de l'interface se trouve facilitée lors des mises en charge orageuses, et son maintien facilité. Le rognon s'ouvre, le rocher apparaît.

Etant donné l'état de décrue du glacier semblable à celui des années 1970 où le torrent s'écoulait en rive gauche, les précipitations orageuses de fin octobre 1998 ont suffi à faire basculer le torrent dans cet itinéraire antérieur.

Le nouvel instrument de mesure du glissement placé en février 99 en rive droite permettra d'affiner les modalités de l'écoulement du glacier sur son lit rocheux au centre et sur les bords et de récolter de précieuses informations sur d'éventuels passages torrentiels futurs.

Bibliographie

- [1] MOREAU, L., 1995. Comportement d'un glacier tempéré sur son lit rocheux, Glacier d'Argentière, Mont-Blanc, France, Etude effectuée au sein du site d'Eposson, Thèse de doctorat en Géographie Alpine, 311 p, Grenoble I.
- [2] VIVIAN, R., 1975, Les glaciers des Alpes Occidentales, Etude Géographique. Thèse d'Etat, 513 p.
- [3] REYNAUD, L., et AL, 1988, Caractéristiques de la vitesse de glissement de la glace sur le lit rocheux. Glacier d'Argentière, Massif du Mont-Blanc, France. C.R. Acad. Sci., Paris, t. 307, Série II, note présentée par C. Lorius, pp. 1519-1522.
- [4] MOREAU, L., 1995, Glacier d'Argentière : Hydroélectricité et glaciologie, Actes du 3e Symposium International "Cavités glaciaires et cryokarst en régions polaires et de haute montagne", Chamonix, 1-6 Nov. 1994, pp 17-23, 6 fig.
- [5] MOREAU, L., FAVRE, G., PAHUD, A., 1998, "Evidence of sliding acceleration of Argentière glacier on its bed rock by storming water flow", Société Hydrotechnique de France, section Glaciologie, réunion des 5-6 mars 98, Grenoble, 2p. et film vidéo de 3 minutes, sept. 1997.
- [6] MOREAU, L., 1992. Etude sur la relation entre les vitesses de glissement d'un glacier sur un verrou rocheux et son hydrologie (glacier d'Argentière, Massif du Mont-Blanc, France). II^e Symposium on glacier caves and karst on polar region. Miedzygorze, Fév. 1992, Pologne. International Working Group Glacier caves and Karst in Polar regions.
- [7] MOREAU, L., 1994, Intercorrélations entre l'hydrologie, l'hydrographie sous-glaciaire, les vitesses de glissement et la dynamique du glacier d'Argentière, Mont-Blanc. S.H.F., Section de Glaciologie, réunion du 10 et 11 mars 94, 4 p., non publié.
- [8] MOREAU, L., 1999, Explications et synthèse 1970-1998 des variations de l'hydrographie sous-glaciaire du glacier d'Argentière, Mont-Blanc, grâce aux mesures de l'écoulement du glacier sur son lit rocheux, S.H.F., Section de Glaciologie, réunion du 4 et 5 mars 99, 7 p., non publié.
- [9] REYNAUD, L., VINCENT, C., Mesures glaciologiques de surface, rapports annuels Eposson, Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, CNRS Grenoble.