

LA MER DE GLACE ET LES GLACIERS DU MONT -BLANC,

par Louis Reynaud¹



Fig.1 : La langue terminale de la Mer de Glace vue depuis les Aiguilles Rouges, entre Jorasses, Dent du Géant et face nord des Grands Charmoz. Sur les deux rives du glacier, les grandes moraines latérales constituent une caractéristique du paysage glaciaire alpin qu'on retrouve dans tous les massifs montagneux du globe, témoignage de l'extension maximale du Petit Âge de Glace. © Didier Hantz.

¹ - Membre du Comité Scientifique de la FFCAM, Fédération Française des Clubs de Montagne.
Maître de Conférence retraité de l'Université de Grenoble et du Laboratoire de Glaciologie du Cnrs.
louis.reynaud@sfr.fr

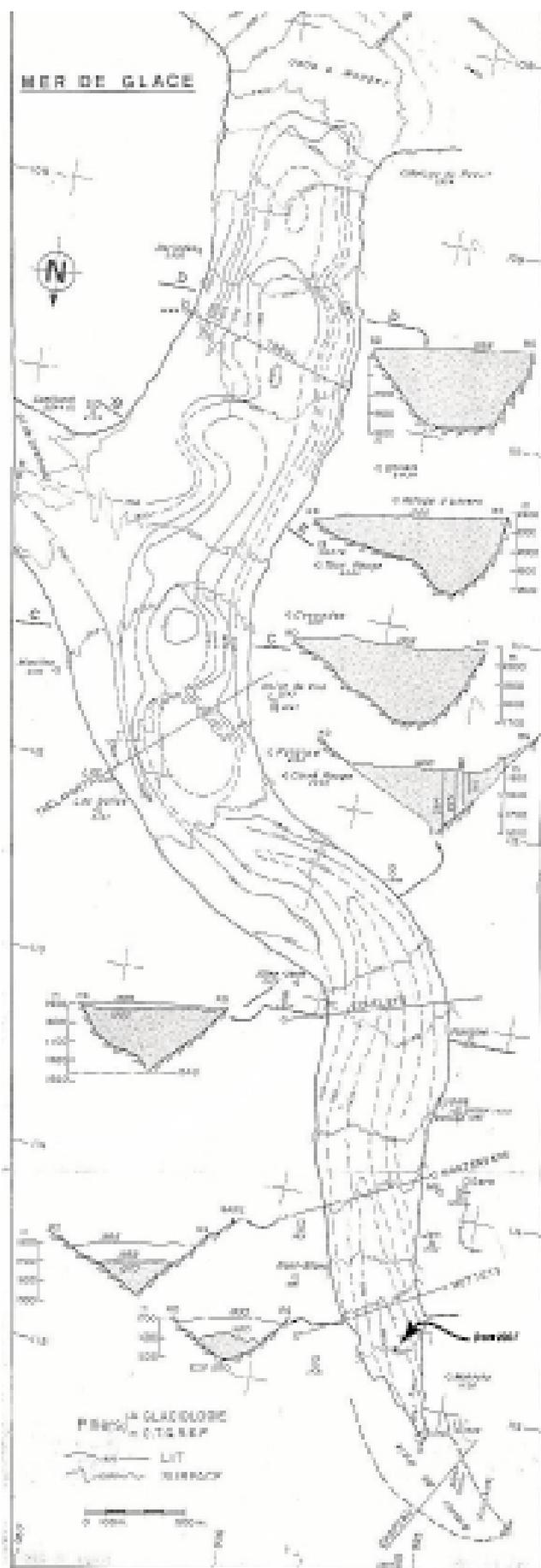


Fig.2 : Carte de la zone d'ablation de la Mer de Glace rassemblant les travaux de sondages EDF dans la partie basse et ceux du Laboratoire de Glaciologie du Cnrs, dans le secteur Trélaporte / Séracs du Géant. Fond de carte : 1/10 000 de l'IGN, photogrammétrie de 1958, d'après des documents et données du Laboratoire de Glaciologie-Cnrs, © L.Reynaud.

Les glaciers du Massif du Mont Blanc

Les glaciers du Massif du Mont Blanc s'étendent en France, Suisse et Italie ; ils couvrent quelque 150 km² (dont 110 km² en France) et la totalité des Alpes françaises en comporte 300 km². Il n'existe nulle part de massif où l'ensemble des glaciers soit aussi facilement visible et accessible à partir d'une vallée habitée. De Chamonix même, à 1 000 m d'altitude, on a devant les yeux le Glacier des Bossons depuis sa naissance au sommet du Mont-Blanc (4 807 m) jusqu'à la langue terminale qui se perd dans la forêt à 1 300 m d'altitude. Ces magnifiques glaciers ont attiré très tôt l'intérêt des touristes et des scientifiques. C'est ainsi que ceux du Mont-Blanc ont été illustrés par des gravures et des photographies, dès le 18^e siècle. De plus, ils ont fait l'objet de relevés assez réguliers depuis les années 1870. Ceci fait qu'aujourd'hui, le plus grand glacier des Alpes françaises, la Mer de Glace (12 Km de longueur, 40 km²) est aussi le mieux connu au monde, tant par les renseignements qu'on possède sur sa forme, en surface et en profondeur, que sur son mouvement, ainsi que sur ses variations au cours d'un peu plus d'un siècle (1870-2007). C'est une partie de ces observations qui vont être exposées, en parcourant la Mer de Glace depuis sa naissance sur le plateau du Géant (3600 m – 2800 m) jusqu'au bout de la langue terminale (1500 m), dont les variations de longueur seront examinées en même temps que celles de trois autres glaciers du même versant nord du massif dont elles en sont indissociables.

QU'EST CE QU'UN GLACIER ?

C'est un stock d'eau solide (neige, névé, glace) permanent à l'échelle humaine, ce qui ne l'empêche pas de se renouveler continuellement, par le jeu combiné de l'accumulation (chutes de neige, neige apportée par le vent ou par les avalanches) et de l'ablation (fonte). Il s'écoule en permanence des parties hautes où l'accumulation l'emporte, vers les parties basses où l'ablation domine, le débit solide étant maximal là où le bilan (accumulation/ablation) est nul. Bien que la pluie ait pu être observée très exceptionnellement au Col du Midi (3 600 m.), pratiquement toutes les précipitations au-dessus de 2 600 m, sur tous les glaciers du Mont-Blanc, ont lieu sous forme solide. Sur le toit de l'Europe, il s'accumule en moyenne 2,8 m d'eau par an (forage glaciologique à 4785 m, juin 1973), mais du fait du vent, l'accumulation de la neige est très variable dans cette région sommitale. A cette altitude, la fonte n'existe pas et la neige reste sèche, sa température à 10 m de profondeur, voisine de - 17 °C, représente la température moyenne annuelle du lieu. La transformation de la neige en glace s'y fait par recristallisation lente, dans des conditions semblables à celles qui prévalent au centre des grandes calottes de glace de l'Antarctique ou du Groenland.

Fig. 3 : Du Col du Dôme (4300 m) au sommet du Mont-Blanc en passant par l'observatoire Vallot et le refuge du CAF. Au premier plan, installation de forage pour les 140 à 160 m de profondeur de névé et de



glace. Température du névé, au-delà de 10 m voisine de -11°C. À ces altitudes, la fonte est exceptionnelle et l'accumulation de neige est constante tout au long de l'année. Ces zones n'ont que très peu varié en épaisseurs, au cours du 20^{ème} siècle, au contraire des langues terminales. © F.Rapetto.

EN DESCENDANT LA MER DE GLACE

La zone d'accumulation du plateau du Géant.

Plus bas, dans les cirques abrités, la hauteur de neige est considérable : 8 m à la fin de l'hiver sur la Vallée Blanche supérieure (3600 m). Mais, à cette altitude, la fusion estivale intervient. L'eau de fonte, en percolant dans la neige dès le mois de juin, la réchauffe et en fait disparaître le froid stocké au cours de l'hiver. La température de la neige est progressivement ramenée vers zéro degré et les cristaux de neige grossissent pour se transformer en névé. Le glacier est alors dit «tempéré» par opposition à la zone froide et sèche des zones sommitales, au-dessus de 4000 m d'altitude². La limite entre ces zones est généralement marquée par les rimayes³.

² - Pour plus de détails sur cette transformation de la neige en névé puis en glace consulter la brochure publiée par la FFCAM : « Les glaciers alpins, une histoire en mouvement », dans l'article sur « l'eau, la neige et la glace, histoire d'une métamorphose », page 4 à 11.

Au Col du Midi, à la fin de l'été, il reste en moyenne 6 m de névé ce qui représente une accumulation équivalente à 3 m d'eau. Pendant une quinzaine d'années, les couches successives de névé se transforment progressivement sous le poids des couches supérieures, en devenant de plus en plus denses.



Le passage à la glace imperméable s'effectue en un seul été vers 30 m de profondeur, dans l'eau de la nappe aquifère, qui s'alimente chaque été, à partir de la fonte du névé de surface. Sous ces 30 m de névé, il y a encore 150 m de glace pour atteindre le rocher (forage de 187 m, en juillet 1971, par le Laboratoire de Glaciologie.).

Toute cette glace formée sur le Glacier du Géant s'écoule vers les séracs qui marquent

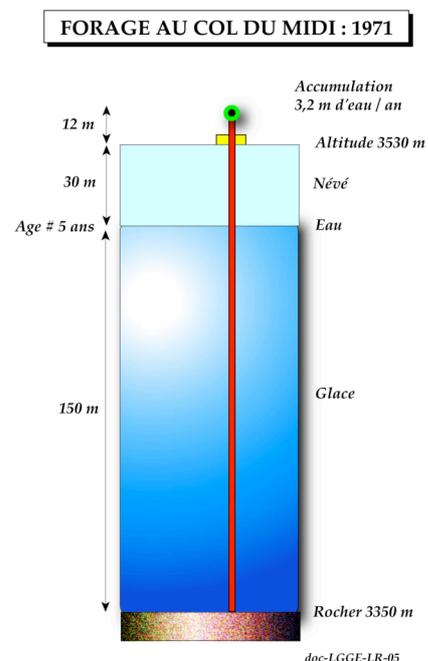
la fin de la zone d'accumulation et le début de la zone d'ablation.

Fig. 4 : Le Col du midi, sur le plateau supérieur du Géant, dominé par l'aiguille du Midi et le refuge des Cosmiques, vu du Col du Dôme, Juin 1994, © L.Reynaud.

Fig.5 Schéma du forage de 187 m, réalisé par le Laboratoire de Glaciologie du Cnrs, au Col du Midi en 1971, © L.Reynaud.

La zone d'ablation

Vers 2800 m, à la fin de l'été, cette limite est bien repérée par la *ligne de névé*⁴. En dessous de celle-ci, la glace nue apparaît : la fonte annuelle devient plus importante que l'accumulation. L'altitude de cette ligne de névé varie avec l'exposition : sur les versants Nord, à l'abri des sommets, elle descend jusqu'à 2 600m (Envers des Aiguilles), tandis



³ - Les rimayes sont ces grandes crevasses qui se développent au pied des parois rocheuses et marquent la séparation entre la partie du glacier fixée au rocher, généralement froide et celle emportée par l'écoulement de la masse.

⁴ -Vers la ligne de névé permanent en fin d'été, à 2800 m, au-dessus des Séracs du Géant, pour la Mer de Glace. Cette ligne de névé, très irrégulière, dépend des conditions locales d'enneigement locales et de l'exposition. En face sud, elle s'établit plus haut, vers 3000 m. Ce paramètre, bien repérable sur le terrain, traduit les conditions d'ensoleillement et d'enneigement locales et donne une bonne idée des raisons de l'existence des glaciers dans les différents massifs montagneux du globe. Cette ligne de névé s'abaisse progressivement vers les pôles, jusqu'à se trouver au niveau de la mer, comme au Groenland de l'Est ou en péninsule Antarctique : la seule façon d'évacuer le flux de glace est alors le vèlage d'icebergs. Vers l'équateur, elle remonte jusqu'à 6000 m : au Kilimandjaro, elle se situe actuellement au-dessus du sommet, d'où la disparition totale des fameuses « neiges éternelles » qui semblent programmées d'ici à une vingtaine d'années, malgré la légère augmentation des précipitations due au réchauffement.



que plein Sud, comme sur le Glacier de Talèfre, elle remonte vers 3000 m. Son altitude dépend aussi des années et fluctue de 150 m à 200 m autour de cette position moyenne, en fonction des caprices annuels du climat.

Fig. 6 : Les Séracs du Géant, les Vagues du tronçon du Tacul, et apparition des premières bandes blanches de Forbes, dominés par la Dent du Géant, où prend naissance le glacier des Périades, affluent de la rive droite de la Mer de Glace, © L.Reynaud.

Au sommet des séracs du Géant, à la Bédière, le glacier n'a que 80 m d'épaisseur et se déplace de 350 m par an, sur 1 km de largeur : il évacue 28 millions de m³ par an. Sa vitesse passe par un maximum dans la chute de séracs : 950 m/an, sous 40 m d'épaisseur. Sur le replat de la «Salle à Manger», le mouvement se ralentit, l'épaisseur augmente : 350 m/an sous 260 m de glace, et de nouveau c'est l'opposé dans la pente qui rejoint le glacier du Tacul.

Vitesses et épaisseurs s'ajustant à la largeur de la vallée, à chaque changement de pente du lit, tout comme dans une rivière.

Sur le replat dit du Tacul, le glacier se présente alors comme un cylindre régulier de 420 m de rayon et n'évacue plus que 23 millions de m³ par an, du fait de la fonte de la glace en surface.

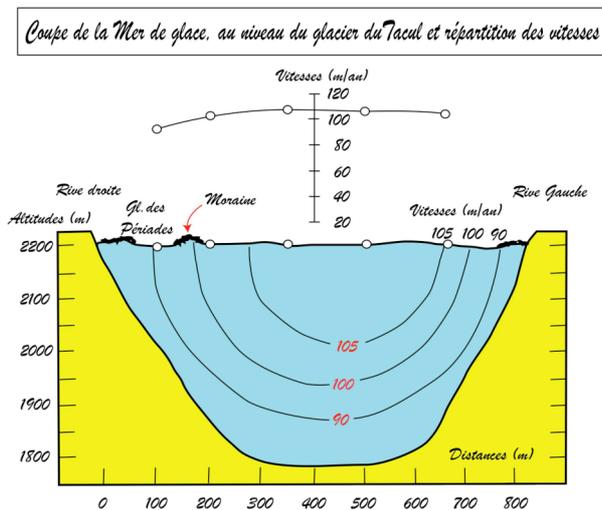


Fig.7 : Répartition de vitesses en surface et dans une section transversale du Glacier du Tacul, tronçon de La Mer de Glace à l'aplomb du refuge de l'Envers des Aiguilles. Dans la partie supérieure, un graphique de variation de la vitesse de surface, d'une rive à l'autre, mesures de 1973-74, © L.Reynaud.

Dans une section transversale à ce niveau (Fig. 7), la vitesse est pratiquement constante en surface au centre (100 à 107 m), par contre, elle

varie très rapidement dans la centaine de mètres près des rives, pour tomber à quelques mètres par an de glissement sur les bords.

En profondeur, les courbes d'égales vitesses peuvent être schématisées par des cercles concentriques avec une vitesse de glissement sur le lit, au centre, qui atteint les sept dixièmes de celle de la surface. Presque toute la déformation se situe dans la centaine de mètres juste au-dessus du lit⁵.

Les crevasses

Les crevasses s'ouvrent quand la traction que subit la glace est trop forte. L'ouverture se développe perpendiculairement à la direction de cette tension et leur formation s'accompagne d'un craquement sec. En zone d'ablation, leur profondeur est au maximum d'une trentaine de mètres car elles se referment, à la base, sous le poids de la glace des couches supérieures.

Dans le névé, de densité bien inférieure à la glace, les crevasses peuvent atteindre 50 m et plus : c'est le cas des rimayes et des grandes crevasses qui constellent le plateau supérieur du Géant. Dans un glacier de vallée de pente régulière comme celui du Tacul, la forte variation de vitesse près des bords (cf. Fig.7) due au frottement près des rives, est responsable des crevasses qui s'ouvrent approximativement à 45° de la rive en remontant vers le haut du glacier (cisaillement simple en mécanique). Si le glacier amorce une pente, des crevasses transversales apparaissent et rejoignent celles des bords en prenant une forme de croissant (Fig.4). Si, de plus, le lit forme un verrou⁶, un autre réseau de crevasses transversales vient se superposer aux précédentes. Pour des pentes fortes et des vitesses rapides, le glacier se morcelle en un chaos de séracs comme dans la chute de glace du Géant.

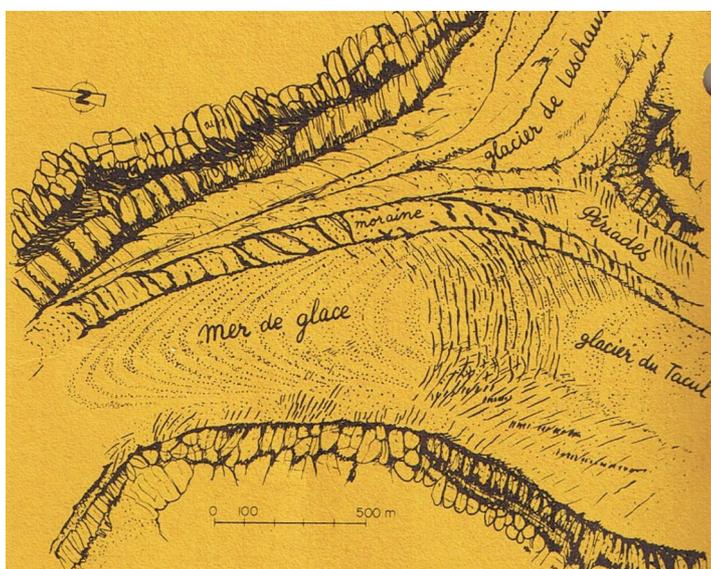


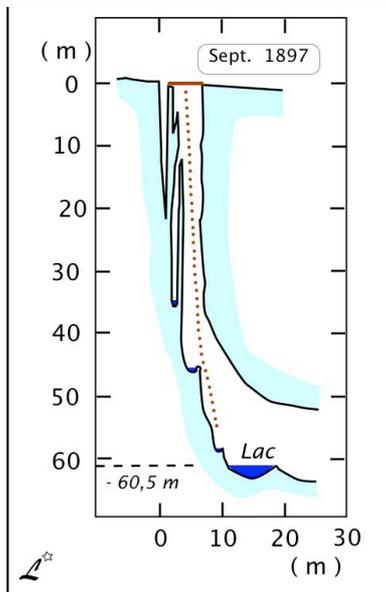
Fig.8 : Zone de la confluence avec le glacier de Leschaux montrant la disposition des moraines, des bandes de Forbes et la répartition des crevasses dans la petite chute de glace à l'aval du tronçon du Tacul. Les deux réseaux apparaissent bien opposés : les crevasses se forment toujours au même endroit tandis que les Bandes de Forbes, simple marquage de la glace, se déforment de plus en plus vers l'aval en cumulant les petites différences de déplacement entre les rives et le centre du glacier (d'après la couverture aérienne du CEMAGREF, octobre 1979).

Les moulins

Au niveau du profil de «Trélaporte» (Fig.1) se trouvent les fameux moulins où s'engouffrent bruyamment les ruisseaux (appelés bédières) qui recueillent l'eau de fonte de la surface.

⁵ - Il n'y a que les glaciers froids pour rester collés à leur lit, petits glaciers polaires ou d'altitude. En général, les glaciers sont soumis à leur base au flux géothermique, chaleur dégagée par la radioactivité naturelle des couches internes de la planète. Mais cette chaleur n'est responsable que de quelques millimètres de fonte par an, quantité négligeable dans le calcul du bilan local, devant l'ampleur des accumulations ou fusions de surface. Néanmoins, cela ramène le plus souvent la température des glaciers froids en surface au point de fusion à la base et peut même créer de grands lacs sous la calotte antarctique. Cette eau produite à la base joue le rôle d'un lubrificateur, permet un meilleur glissement et facilite le polissage des roches moutonnées. Une autre catégorie de glaciers, les glaciers à surges ou avances catastrophiques, doivent leur rupture d'équilibre au passage de conditions froides à celles tempérées à leur base. Il n'en existe pas dans les Alpes, mais ils sont nombreux dans les massifs montagneux froids et arides, comme des régions d'Himalaya, Andes, et surtout Groenland et Spitzberg.

⁶ - Verrou : colline rocheuse aux formes arrondies obstruant en partie la vallée glaciaire, constituée d'une roche suffisamment dure pour que l'érosion sous-glaciaire, malgré sa puissance, n'ait pu la faire disparaître.



le Glace et les Glaciers du Mt-Blanc : http://www.ffcam.fr/comite_scienti, Page 26 sur 26

Fig 9 : Coupe du Grand Moulin de la Mer de Glace. tel qu'il était en septembre 1897, d'après Joseph Vallot.

Fig. 10 : Le Grand Moulin vu d'hélicoptère, alimenté par la bédrière, en septembre 1988, © F.Leguen.



Ces moulins ont été visités notamment par Vallot qui en a exploré, au cours de l'automne 1897, le puits principal jusqu'à 60 m de profondeur (Fig.9 & 12). L'eau, à cette profondeur, emprunte des fissures dans la glace pour rejoindre la moraine rive droite, fissures que le travail de l'eau agrandit en de véritables canaux, bien que sa température soit seulement à 0°C. De tels conduits fossiles sont en effet visibles 1 km plus en aval des actuels moulins lorsqu'ils émergent

par suite de l'ablation. Ces moulins se forment en fait dès le mois de juin lorsque l'eau emprunte le trajet des crevasses. Les causes du crevassement du glacier à cet endroit, dues à la forme du lit et au mouvement du glacier, sont fixes ; chaque année, elles créent de nouvelles crevasses, donc de nouveaux moulins. On peut ainsi observer, à l'aval d'un moulin actif, d'anciens moulins espacés de quelques centaines de mètres⁷. L'observation du renouvellement des moulins montre que le même moulin peut

fonctionner pendant 2 à 3 ans avant l'ouverture d'un nouveau puits à l'amont. Les différentes topographies relevées dans ces moulins révèlent des caractéristiques semblables :

- un puits principal de 4 à 10 m de diamètre, d'une profondeur de 60 à 70 m,
- une galerie d'évacuation descendant en gradins successifs, formant une crevasse profonde et sinueuse,
- une direction de fuite vers la rive droite, dans le prolongement de premières crevasses marginales.

Fig. 11 : Conduit horizontal d'un ancien moulin apparaissant en surface, à l'aval, au bout de quelques années par suite de la fonte de surface. À l'arrière plan, au centre du conduit, un personnage donne l'échelle, © Ch.Vincent.



L'eau collectée par la bédrière qui s'engouffre dans le moulin ne rejoint donc pas directement le fond, comme représenté dans la plupart des schémas de manuels ou encyclopédies, car il y a ici encore 300 m d'épaisseur au moins et

la glace, en profondeur, ne résisterait pas à la pression exercée par les couches supérieures et se refermerait. L'eau rejoint donc la rive droite où elle circule à une profondeur permise par la pression de la glace.

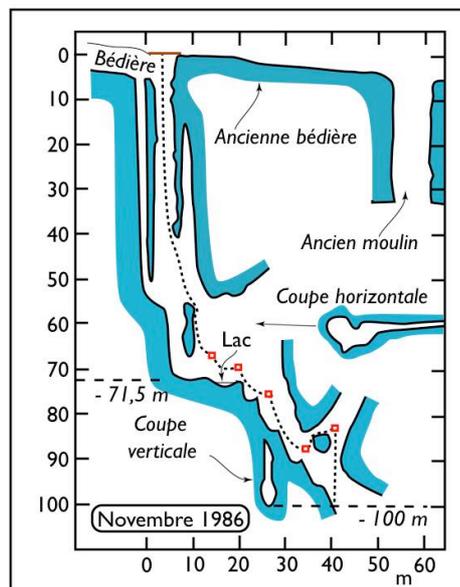
⁷ - Ces moulins ont été explorés de nouveau en 1986 et 1988 par les spéléologues de J. Lambertson et les glaciologues du Laboratoire de Glaciologie de Grenoble qui ont progressé jusqu'à 110 m de profondeur. Ces explorations ne peuvent se réaliser qu'en absence d'eau de fonte, en automne ou hiver, ou bien en détournant l'eau de la bédrière par un canal de déviation.

De même au Groenland, où les « Glacionautes » de J. Lambertson ont exploré de plus grands moulins alimentés par de gigantesques bédrières, au débit digne d'un fleuve, de l'ordre de 40 m³ par seconde. Les topographies étaient très semblables à celles décrites dans les Alpes, caractéristiques du travail de l'eau dans la glace. Chaque fois, l'exploration a été stoppée par un siphon, résultat de la fermeture du chenal en profondeur, une fois tari le fort courant d'alimentation, même dans le plus profond, de près de 200 m de puits unique (automne 1993, région de Kangerlussuaq).

Ensuite, le moulin se remplit partiellement d'eau provenant d'écoulements résiduels, ce qui empêche la fermeture du puits supérieur et facilite sa réouverture au printemps suivant.

Ce n'est qu'avec moins d'une centaine de mètres d'épaisseur de glace, vers le front du glacier, que ces différents courants d'eau peuvent former un torrent sous-glaciaire sur le lit, au centre de la vallée.

Fig 12 : Coupe du Grand Moulin d'après l'exploration de 1988 par les spéléologues de J. Lambertson et les glaciologues du Laboratoire de Glaciologie, © L.Reynaud.



La forme de la vallée glaciaire

Alors que la forme du lit rocheux depuis le glacier du Tacul jusqu'à «Trélaporte» est un profil classique en U, à l'aval des moulins, on passe à une forme en V (cf. Fig.1 & 7).



Cette morphologie correspond-elle à un aménagement ancien de la forme en U par l'érosion torrentielle lorsque le glacier s'était retiré ? En fait, il faut remarquer qu'à cet endroit la nature du lit rocheux change : du granite, il passe à des gneiss. La différence essentielle réside dans le système de fissures. Dans le granite, les fissures se développent dans toutes les directions, favorisant un débitage en formes arrondies (verrou ou surcreusement glaciaire), tandis que les gneiss, lités, marqués par une seule direction, se débitent en plaques. D'une façon générale, on n'observe les formes de vallées glaciaires en U que dans les couches massives de granit, jamais dans les gneiss, ou autres roches fortement litées⁸.

Les roches récemment découvertes sur les rives sont polies et striées, avec quelquefois des formes d'érosion en croissant : les coups de gouge (Fig n° 15).

Fig 13 : À 110 m de profondeur dans le Grand Moulin de la Mer de Glace : sur les parois apparaissent nettement l'alternance claire et sombre du feuilletage vertical responsable des Bandes de Forbes, légèrement inclinés vers l'aval, © JP Benoît.

⁸ - Les grandes vallées alpines, occupées par les grands glaciers quaternaires, présentent un profil à fond plat, qui a souvent été interprété comme le résultat du travail de la glace. En fait, le comblement alluvionnaire post-glaciaire nous cache le lit fossile de quelque 500 à 600 mètres, comme dans le Grésivaudan à l'amont de Grenoble, voire un kilomètre comme dans la vallée Valaisanne du Rhône, près de Martigny. La prospection géophysique y révèle, le plus souvent, une morphologie dissymétrique en V, selon le litage de la roche encaissante.

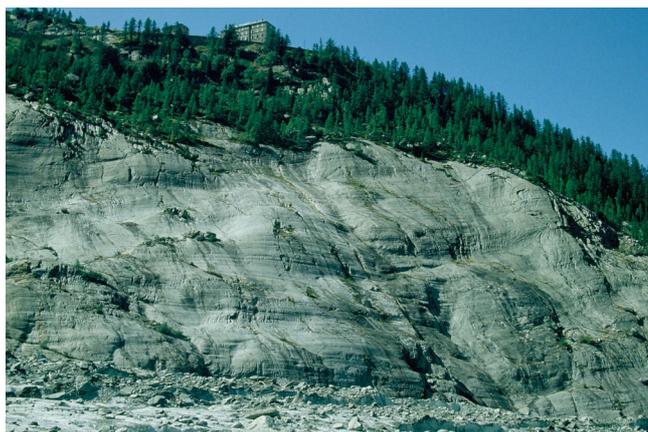


Fig. 14 : Sous le Montanvers, en rive gauche, apparaissent les roches du lit dégagé de glace depuis le maximum d'extension du Petit Âge de Glace vers 1820. Ces ondulations de roches polies et striées sont dites moutonnées, par la ressemblance avec les perruques d'autrefois que l'on faisait onduler avec une peau de mouton, © L.Reynaud.

sur la falaise de la rive gauche, à la hauteur de l'embranchement du sentier du refuge de l'Envers des Aiguilles, apparaissent les fameux « coups de gouge » dus à l'indentation provoquée par les blocs enchâssés dans la glace. Cet effort intense sur le lit rocheux et très localisé est en tout point semblable à celui de l'outil d'un tour ou fraiseuse réglé à un pas trop important : on dit que l'outil « broute » sur le métal, en produisant des marques en forme de croissant. Ces marques ressemblent à des pointes de flèches tournées dans la direction des stries sur la roche polie et orientées

dans le sens du mouvement du glacier. Ces marques facilitent le repérage des mouvements à la base des anciennes calottes glaciaires au profil de lit en pénéplaine (Scandinavie, bouclier canadien, etc.), © L.Reynaud.

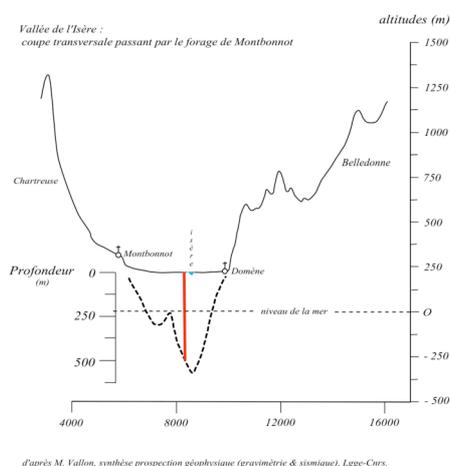


Fig. 16 : Coupe du fond de la Vallée glaciaire de l'Isère, telle que définie par les sondages effectués par les étudiants de la Maîtrise de Géophysique et forage de l'Observatoire de Grenoble pour étude des modifications apportées par un remplissage alluvionnaire de plusieurs centaines de mètres. Dessin Louis Reynaud, d'après M. Vallon.

La langue glaciaire

A partir des Échelets, à 1 900 m d'altitude, l'épaisseur du glacier diminue rapidement : sur 1,6 Km de longueur, de 300 m on passe à 180 m au niveau du Montanvers puis à 100 m aux Mottets (Fig. 2), car sur cette langue à basse altitude l'ablation estivale devient très forte : elle est de 9 m/an aux Échelets et croît jusqu'à 14 m/an aux Mottets. C'est pourquoi le débit annuel du glacier⁹, qui était de 11 hm³ au niveau des Échelets, tombe à 1 hm³ aux Mottets¹⁰.

⁹ - 1 hm³ représente le volume d'un cube d'un hectomètre de côté, soit : 100 x 100 x 100 = 10⁶ m³, un million de m³.

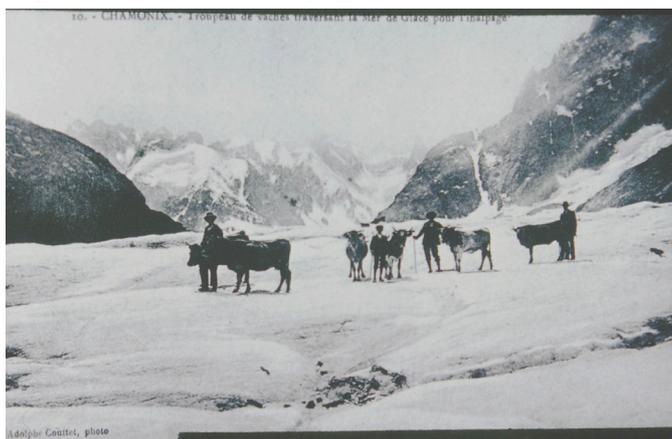
¹⁰ - L'épaisseur des plus grands glaciers se compte en centaines de mètres : c'est encore la géophysique, développée par les pétroliers, qui dès les années 1950 a servi à déterminer des épaisseurs dans le tronçon à l'aval des Échelets. Ceci dans le but d'étudier la faisabilité d'une « Grande chute » productrice d'électricité au Fayet, en collectant les eaux d'Argentière, Mer de Glace, Bossons et Tacconnaz. Surprise des commanditaires de la prospection sismique aux Échelets, quand le géophysicien Süstrunck révèle

Au début du siècle, la Mer de Glace se terminait beaucoup plus bas par le Glacier des Bois, aujourd'hui disparu. Elle occupait alors le col des Mottets, en vêtant les séracs directement dans la vallée. Son fort recul depuis, aggravé par la perte importante des années 1940 à 1950, met en évidence l'impressionnante moraine latérale, rive droite, édifiée au cours de l'avancée des années 1820.

À cette époque, on prenait pied directement sur la glace à une quarantaine de mètres plus bas que la gare du Montenvers, là où se développe l'imposante moraine latérale, rive gauche. Les anciennes gravures représentent le glacier avec une surface plus élevée et beaucoup plus tourmentée qu'elle ne l'est aujourd'hui, bien que les troupeaux aient eu à la franchir pour se rendre aux alpages de l'Allée Verte et du Plan du Dru sur la rive droite¹¹.

De nos jours, la surface est plus régulière et l'on aperçoit mieux un trait caractéristique de la Mer de Glace : les bandes de Forbes ou chevrons.

Fig. 17 : Carte postale de la fin du 19^e siècle, cliché d'Adolphe Couttet, montrant de jeunes vaches, ou génisses, de la race savoyarde tarine, sur la traversée de la Mer de Glace, vers le profil des Échelets. Cette zone, à la base de la chute de séracs, est en compression et assez régulière, sans crevasses, se prêtant mieux à la traversée du bétail.



Les Vagues au pied de la chute de séracs du Géant.

On observe souvent, à l'aval d'une chute de séracs, des ondulations plus ou moins marquées, appelées *Vagues*, comme le montre la figure n° 6, ci-dessus. Sur la Mer de Glace, elles sont assez développées, en forme de croissant, espacées de 200 m, avec des creux d'une dizaine de mètres pour les premières, où se rassemblent les eaux de fonte et les poussières qu'elles charrient. Puis, au cours de l'été, se creusent des déversoirs dans la glace, qui finissent par vider ces lacs temporaires, en formant un système de profonds canyons sinueux.

Ces vagues proviennent de la modulation du volume de glace passant dans cette zone pentue soumise successivement à l'accumulation hivernale et à l'ablation estivale, amplifiées par l'approfondissement du glacier en ce lieu. Elles finissent par disparaître totalement au bout d'un kilomètre environ, à la fois par diffusion de la bosse qui s'étale par plasticité de la glace et surtout par l'ablation qui s'exerce pleinement sur les bosses, alors que les creux restent plus longtemps protégés par le névé accumulé par le vent. La fonte annuelle moyenne, sur les bosses (2200 m d'altitude), atteint 4 à 5 mètres de glace par an.

250 m de profondeur, et exécution de forages de contrôle qui confirmèrent ces profondeurs extravagantes pour l'époque (cf. carte des épaisseurs). En effet, les traités de l'époque portaient des lits à une soixantaine de mètres, tout au plus. Le projet de captage fut donc abandonné, car des essais de percement de galeries au front de Mer de Glace ou de Tré-la-Tête, sous quelques dizaines de mètres, étaient déjà en bute au fluage rapide de la glace refermant les galeries, alors que sous des centaines, un tel projet devenait totalement irréalisable.

¹¹ - Ces alpages pauvres étaient destinés aux jeunes vaches, les génisses, plus lestes encore que les tarines adultes pour la traversée du glacier et le pâturage sur les pentes. Néanmoins, on entourait les sabots de chiffons pour éviter des blessures suites aux glissades. Cette pratique fut longtemps utilisée pour équiper les touristes dans le parcours Chamonix-Montenvers-Chapeau-Chamonix à dos de mulet, avec des chaussettes de laine, antidérapants facilement adaptables à tout type de chaussures. À la fin de la traversée du glacier, les chaussettes étaient récupérées sur la moraine rive droite, près d'un ruisseau qui depuis a acquis l'appellation officielle de « Torrent des Chaussettes », comme portée sur la carte au 25 000e de IGN.

Ce mécanisme périodique à l'origine des *vagues*, est intéressant pour l'observateur, dans une quelconque région glaciaire du globe, car il permet d'évaluer d'un seul coup d'œil le déplacement annuel de la glace au centre du courant : c'est la distance entre deux bosses successives.

Les bandes de Forbes.

Ces bandes, alternativement claires et sombres, naissent dans la zone de la chute de séracs du Géant, tout comme les vagues. Elles sont également annuelles, mais leur mécanisme de formation est différent. La glace qui franchit la chute de séracs à grande vitesse, sous de faibles épaisseurs, est très crevassée. Durant l'été, l'eau de fonte, ainsi que les poussières pénètrent dans les crevasses et les séracs sur une trentaine de mètres alors que le glacier n'a que 60 à 100 m d'épaisseur.

Par contre, au cours de l'hiver, c'est la neige qui, en s'accumulant dans les crevasses et sur le glacier, le protège des poussières. Cette alternance se traduit par un découpage de la surface en zones sombres et claires.

Fig. 18 : Bandes de Forbes vues depuis le sommet de la moraine, rive droite : alors qu'au loin les bandes apparaissent formées de parties claires et sombres, homogènes, de près, au premier plan, les parties claires sont en fait constituées de lambeaux blancs enchâssés dans la glace de surface plus sombre. Ces lambeaux proviennent du remplissage des crevasses



des séracs du Géant par la neige d'hiver, © C.Rado.

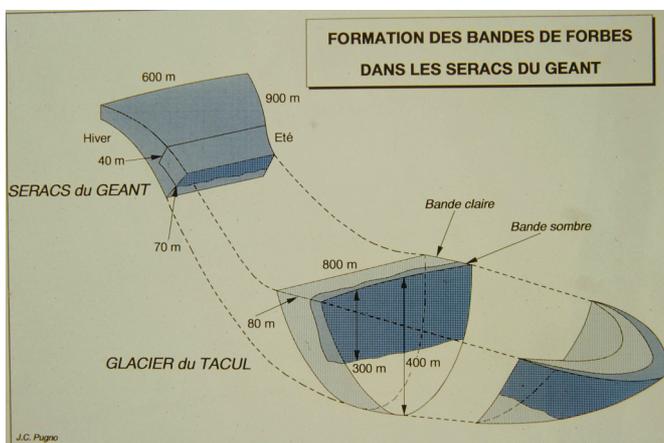


Fig. 19 : Sketch de formation des Bandes de Forbes dans une chute de séracs et marquage en profondeur, par suite de l'épaississement du glacier, sur le tronçon du Tacul, Graphe JC Pugno sur dessin L.Reynaud.

Par suite de la vitesse plus grande au centre du glacier, les bandes initialement transversales prennent leur allure de chevrons de plus en plus arqués avec le temps (Fig 19 et 8).

Mais, cela pourrait se passer dans d'autres parties très crevassées du glacier et ne suffit pas à expliquer la persistance des bandes sur 6 Km et aussi longtemps (une cinquantaine d'années). Cela est dû à l'épaississement du glacier sur le tronçon du Tacul : les parties marquées suivent l'écartement des lignes de flux en profondeur et, d'une hauteur initiale de 40 m, s'étirent jusqu'à 300 m (Fig 19).

Elles correspondent à un marquage en profondeur et ne disparaissent qu'au niveau du Montenvers, une fois que l'ablation de surface, sur une cinquantaine d'années successives, a fait totalement fondre la couche marquée¹². Ce repérage annuel et naturel de la surface est en fait d'une grande utilité : il a permis

¹² - D'une façon plus générale, seuls les glaciers sans chutes de séracs conservent jusqu'au front la structure sédimentaire des couches de neiges annuelles déposées en zone d'accumulation, soulignée par le dépôt des poussières éoliennes estivales (ex : le front du glacier d'Envers des Aiguilles, entre le refuge

la reconstitution de toute la série des vitesses annuelles sur cinquantaine d'années. Grâce aux photographies aériennes disponibles¹³, on a pu reconstituer les vitesses, à rebours, jusqu'en 1888, époque où Joseph Vallot avait entrepris sa série de mesures de déplacement annuel sur la langue terminale¹⁴.

Veine noire et Veine blanche.

Les glaciers débutent le plus souvent leurs parcours dans la clarté des névés sommitaux, mais recueillent ensuite beaucoup de matériaux, généreusement fournis par l'érosion des parois qui les bordent. Le courant central, issu du plateau du Géant est d'une relative pauvreté en débris morainiques, tandis que les courants des Périades, Leschaux et autrefois Talèfre, en mettant en commun leurs moraines, sur la rive droite, ont constitué cette Veine noire assez continue jusqu'au front. La langue terminale de la Mer de Glace semble envahie par les rochers et la moraine et ne cesse de surprendre le visiteur qui l'aperçoit, pour la première fois, au débouché du train, près de la Gare du Montenvers¹⁵, alors que les diverses représentations qui incitent à la visite, sur la place de Chamonix, la représentent en glace propre.

Cette couverture morainique modifie profondément la fonte en surface : un fin épandage de moraine augmente l'efficacité du rayonnement solaire en captant mieux la chaleur, tandis qu'une couche épaisse constitue une protection efficace. Car les graviers de taille inférieure à 2 cm ont tendance à s'enfoncer dans la glace, au contraire des blocs de rochers plus gros qui protègent un culot de glace et se perchent en

éponyme et la Fenêtre de Trélaporte). Avec les chutes de séracs, même si toutes les conditions ne sont pas réunies pour produire des bandes de Forbes annuelles, bien individualisées, le crevassement est responsable de marquage vertical du même type, qui vient se substituer à l'ordonnance sédimentaire et la fait totalement disparaître. Ensuite, avec le mouvement, ce marquage vertical bascule progressivement vers l'aval jusqu'à devenir parallèle au lit.

Ainsi, le front du glacier des Bossons exhibe de telles couches bien nettes à son front, qu'il faut se garder d'interpréter comme témoins de l'accumulation passée en amont de sa cascade de glace de plusieurs kilomètres.

¹³ - Les premières photos aériennes, destinées à la production de cartes, ont été réalisées, sur la Mer de Glace, dès 1939. Ce sont des photogrammétriques prises avec un objectif de très haute qualité, produisant le minimum de distorsion. D'abord sur plaques de verre, elles ont ensuite donné des formats argentiques de 20 x 20 cm, pour une meilleure définition. Utilisées en couples stéréo dans des restituteurs mécaniques ou numériques, elles permettent d'apprécier le relief et de tracer directement les courbes de niveau, pourvu que les deux clichés soient équipés de points de référence au sol, connus en coordonnées.

La Mer de Glace a été photogramétrée plus souvent que les autres glaciers, avec un gigantesque projet d'une carte au 10 000^e, qui bien qu'inachevée, a donné quelques magnifiques feuilles de cartographie terrain (Carte IGN, état de 1949). Il a ainsi été possible de suivre les Bandes de Forbes dans leurs parcours sur quelques années, par repérage des détails caractéristiques inchangés pour la reconstitution des trajets successifs.

¹⁴ - Le célèbre Joseph Vallot était un autodidacte, passionné de sciences, qui se consacra à l'étude de la haute montagne avec plusieurs membres de sa famille, tant dans son observatoire Vallot, à 4350 m, sur l'arête du Mont-Blanc, que sur les Glaciers. On lui doit plus particulièrement l'adaptation de la méthode de mesure des variations de vitesse en remplaçant les pierres peintes chaque année sur le profil origine, comme il le fit de 1891 à 1899, au pied du Montenvers. Cette méthode, fort heureusement adoptée par l'administration des Eaux & Forêts, dès 1907, a produit d'excellentes mesures sur un demi-siècle, pour de quelques glaciers témoins des Alpes françaises.

¹⁵ - On rencontre sur les langues glaciaires de curieux amas coniques apparemment constitués de sable sombre. Mais, à l'examen, seule une fine couche de matériau morainique sableux recouvre un noyau de glace. Ce sont d'anciennes crevasses où s'accumulèrent les fins débris entraînés par l'eau de fonte qui font saillie par suite de l'ablation exercée tout autour de la partie couverte. Ce phénomène illustre bien le rôle protecteur d'une couverture morainique, dès qu'elle atteint 1 à 2 cm d'épaisseur.

formant des Tables glaciaires¹⁶. Ainsi l'ablation annuelle (de juillet à septembre), d'une douzaine de mètres dans la veine de glace claire, au droit du Montenvers se réduit à 6 – 8 m dans la Veine noire, suivant l'épaisseur de la couverture morainique presque continue.

Sur la face sud du massif du Mont-Blanc, les glaciers de la Brenva et du Miage constituent des exemples de glaciers aux langues terminales totalement recouvertes d'une couverture morainique, fournie par les

écroulements incessants des gigantesques parois qui les ensèrent.

C'est d'ailleurs le cas des glaciers Andins et Himalayens, dans des massifs aux reliefs vigoureux.

Sous ces amoncellements de cailloux en surface, la glace est propre à part les stigmates de quelques anciennes crevasses, comme on peut le constater lors de la visite de la Grotte de la Mer de Glace, taillée manuellement sur une cinquantaine de mètres dans le corps du glacier¹⁷.



Fig. 20 : Bloc transporté par le glacier qui sera peut-être déposé au front d'ici quelques dizaines d'années et deviendra un bloc « erratique », comme ceux que l'on trouvait très à l'aval et dont on ne savait pas l'origine, étant de nature très différente de la roche en place, © L.Reynaud.

Fig. 21 : Front de la Mer de Glace, vu du Chapeau : la surface est largement couverte de matériaux morainique et sur la Veine Noire, rive droite, la couverture est continue, © L.Reynaud.



¹⁶ - Ces tables finissent minées par les rayons du soleil qui s'inclinent au cours de l'été et les blocs chutent vers le Sud, dans notre hémisphère nord. Leur inclinaison majoritaire peut donner une indication du Sud, en cas de brouillard pour l'alpiniste distrait qui a oublié la boussole (ou le GPS). Dans l'hémisphère sud, c'est le contraire, le soleil paraissant au Nord. Tandis que sur les glaciers équatoriens et tropicaux, le soleil étant près du zénith, se développent de hautes tables glaciaires dont les chapeaux finissent par chuter dans n'importe quelle direction.

¹⁷ - Contrairement aux représentations fréquentes dans des manuels ou encyclopédies, les coupes de glaciers ne sont généralement pas envahies par une profusion de blocs morainiques, ni à l'aplomb des moraines longitudinales de surface, ni sur le lit, par des moraines de fond. En effet, les différents sondages effectués pour des captages d'eau, au cours des 50 dernières années, ont révélé des intérieurs de glacier très propres. Quant aux lits, au voisinage des fronts, ils ne présentaient que très peu de blocs enchâssés dans la glace basale. Ce petit nombre suffit néanmoins à expliquer les stries et coups de gouge sur les roches moutonnées, car cela se passe sur des siècles et millénaires.



Fig. 22 : Table glaciaire, Cordillère Blanche, Pérou, Dans cette région proche de l'Équateur, le soleil se tient proche du zénith, toute l'année. La protection des blocs est donc plus efficace et les tables glaciaires peuvent atteindre plusieurs mètres de hauteur. © L.Reynaud.

Fig. 23 : La surface du premier plan, sous poudrée de poussière sombre, fond plus rapidement que la partie d'arrière plan, entièrement recouverte de cailloux. Le cône de débris morainique n'est protégé que par un à deux centimètres de sable mélangé à la cryoconite noire, cette poussière fine apportée par les vents, © L.Reynaud.



VARIATIONS DES GLACIERS DU MONT-BLANC

Les variations de longueur.

Ces glaciers n'ont pas toujours eu l'extension réduite que l'on observe de nos jours ; lors de la dernière grande glaciation (Würm), ils ont réoccupé et remodelé toutes les vallées alpines jusqu'au voisinage de Lyon, en laissant comme

carte de visite de nombreux « blocs erratiques »¹⁸. Depuis ces temps lointains (fin du Würm et maximum de froid il y a 16 000 ans), ils ont connu de nombreuses autres variations plus faibles. La dernière de ces variations a culminé dans les années 1600 à 1820, au cours du « Petit Âge de Glace (PAG) »¹⁹. Les glaciers du Mont-Blanc se sont alors largement avancés dans la vallée (Fig. 24).

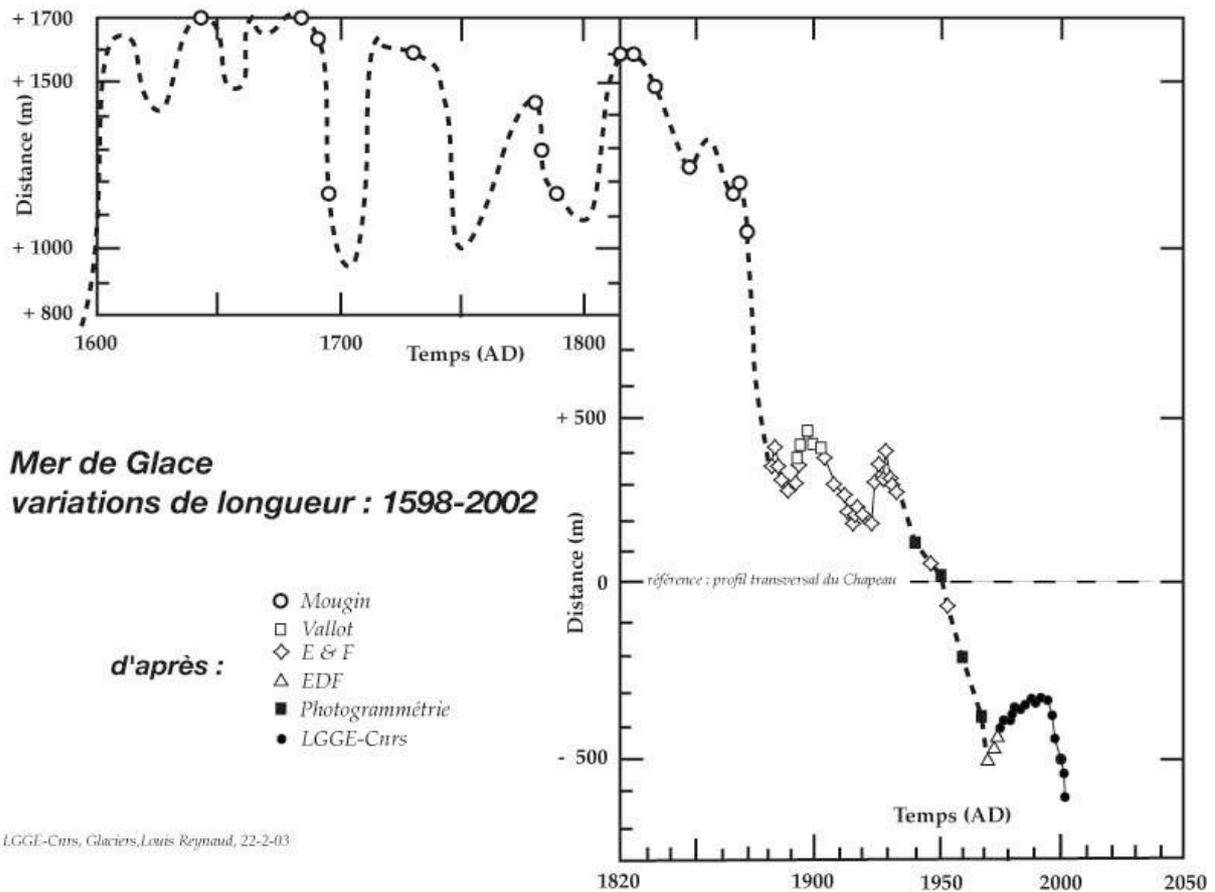
¹⁸ - Blocs ainsi appelés car ils n'étaient pas de même nature que la roche en place et semblaient avoir erré. Près de Gap, sur les pentes du Col Bayard, trône un bel exemplaire de granit du Pelvoux, qui reçut le nom de « Peïre Osel », Pierre Oiseau, car pour arriver là il devait au moins posséder des ailes. Leur mise en place fut longtemps attribuée à des épisodes de déluge, jusqu'à ce que s'impose l'idée de grands glaciers quaternaires. Cette théorie des Grandes Glaciations est relativement récente, avec un début dans les années 1850 et une popularisation vers les années 1880, ce qui suscita un grand intérêt dans le monde scientifique de l'époque ainsi que de mémorables batailles entre « Diluvianistes » (partisans d'épisodes diluviens) et « Glacialistes » convaincus de glaciations répétées. D'après la morphologie de ces vallées glaciaires, 4 grandes glaciations furent mises en évidence par leur moraines terminales. Aujourd'hui, grâce à divers travaux sur les amas morainiques et les variations de températures déduites de sédiments marins on en compte une bonne vingtaine sur les 2 derniers millions d'années. Les quatre dernières glaciations sont apparues sur un cycle d'environ 125 000 ans, les interglaciaires tempérés, semblables à l'actuel, s'étendant sur 15 à 20 000 ans.



Fig. 24 : L'aquarelle de S. Birman, datée de 1823, représente si fidèlement les sommets de l'arrière plan, qu'on peut lui accorder du crédit pour l'exactitude du front de la Mer de Glace, tronçon aujourd'hui disparu, autrefois appelé « Glacier des Bois », ainsi que pour la représentation du village des Praz et du hameau des Bossons. La proximité de ces masses de glace, tout près des habitations, devait créer une atmosphère lourde de menace et d'inconfort, tout le long de la vallée de Chamonix. Original exposé au Musée de Bâle. © collection Louis Reynaud.

Dès 1820, pratiquement tous les glaciers des Alpes ont entamé le recul qui se poursuit encore aujourd'hui. À partir des années 1860-70, les glaciers du Mont-Blanc ont fait l'objet de mesures systématiques. Actuellement quatre de ces grands glaciers du versant nord de la chaîne sont repérés annuellement pour leur longueur : Argentière, Mer de Glace et Bossons, ainsi que celui de Trient, situé en Suisse. La figure 26, où sont portées leurs variations depuis 1870, montre des avancées semblables en 1890, 1920 et 1970, entrecoupées de reculs, dont celui de la décennie 1940-50 constitue une caractéristique commune qu'on retrouve sur tous les autres glaciers de la chaîne des Alpes. En fait, cette simultanéité de variations, n'est pas aussi nette : on constate en effet que les maximums sont décalés dans le temps, particulièrement lors de la dernière crue des années 1980.

¹⁹ - Le Petit Âge de Glace (PAG), du 16^e au 19^e siècle, constitue le plus récent et le seul historique des nombreux caprices notables du climat qui ont émaillé notre interglaciaire depuis 10 000 ans. C'est pourquoi son étude fait actuellement l'objet d'attentions plus particulières, car il a intéressé la totalité de la planète, à peu près à la même époque, avec un abaissement de la température moyenne dans les Alpes évalué à $\frac{3}{4}$ °C. Dans ce massif, comme à Chamonix, grâce aux archives où ont été consignées les suppliques des habitants, on a une idée du premier maximum d'extension autour des années 1600 et après plusieurs importantes fluctuations, se produisit un ultime maximum semblable au premier vers 1820, pour la majorité des glaciers connus. Lors de cet épisode d'avancée du PAG, les glaciers ont édifié (ou rechargé) les imposants vallums morainiques qui constituent une signature semblable dans tous les massifs montagneux du globe.



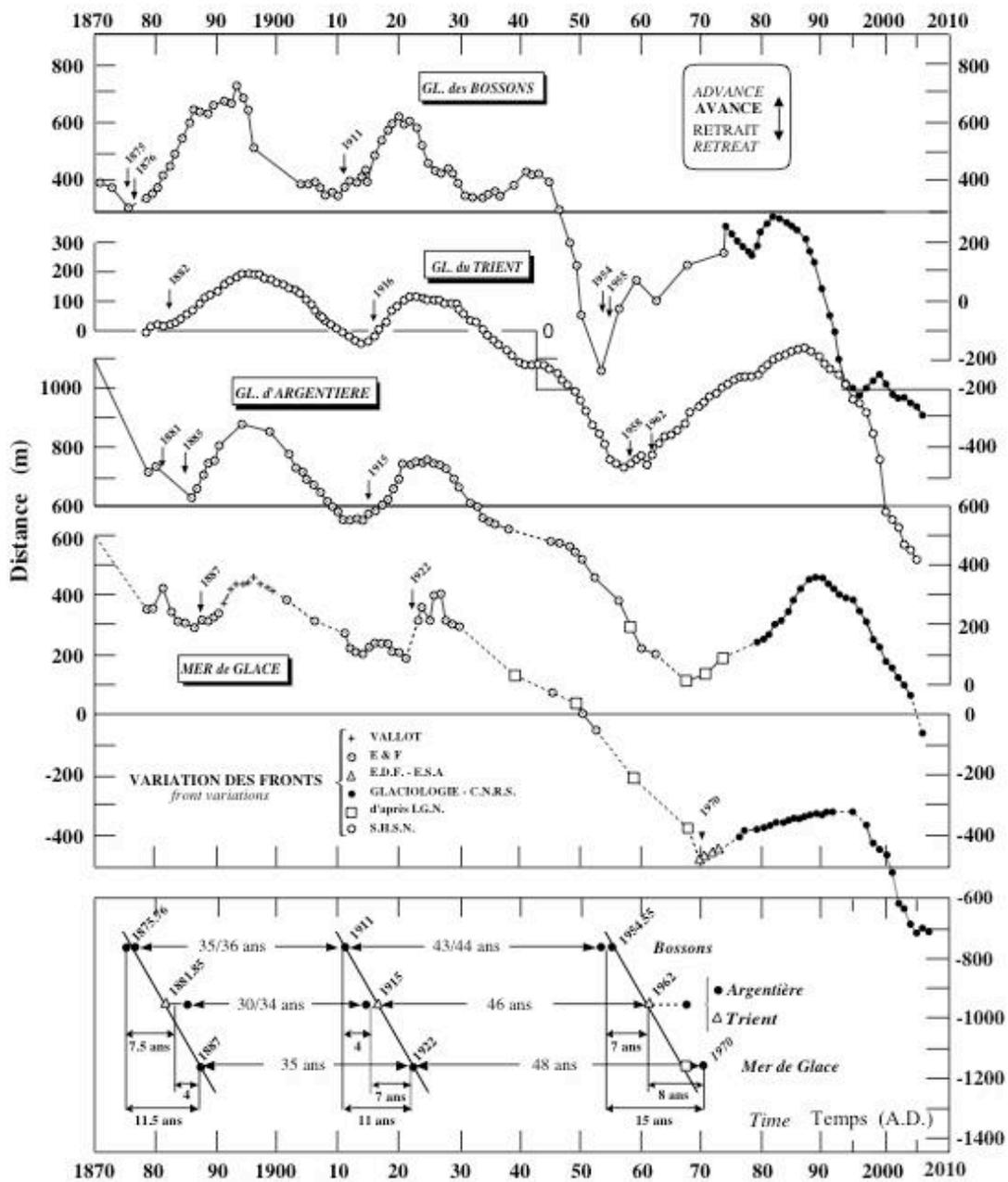
réf. : doc. LGGE-Curs, Glaciers, Louis Reynaud, 22-2-03

Fig. 25 : Variations de longueur de la Mer de Glace, de 1598 à 2000, d'après les données historiques rassemblées par Paul Mougín dans les années 1920 et publiées dans les « Études Glaciologiques » éditées par le Ministère de l'Agriculture, suivies mesures récentes portées plus en détail, sur la figure suivante. La première mention historique de « l'irruption » des glaciers de Chamonix dans la vallée date de 1598. Après un moyen âge relativement plus chaud, avec des glaciers très réduits (pratique de cols aujourd'hui encore recouverts de névés ou glaciers) se place une période d'avancée des glaciers qui culmine entre les années 1600 et 1820, tout le long des Alpes. Après 1820 débute la longue phase de recul continue, seulement entrecoupée de plusieurs ré avancées mineures, comme celles de 1850, 1890, 1920 et

Les reprises d'avancées des différents glaciers, lors de ces 3 crues récentes, donnent sur les courbes des coudes plus nets qui permettent l'analyse graphique du bas de la figure n° 26.

Chaque fois, c'est celui des Bossons qui réagit en premier, suivi de ceux d'Argentière et de Trient, 4 à 7 ans plus tard et finalement vient la Mer de Glace avec 11 à 15 ans de retard.

Ainsi, la variation d'un front constitue un signal caractéristique de la morphologie de chaque glacier, avec un temps de réaction qui dépend principalement de la longueur.



4 fronts, massif du Mont-Blanc, 1870-2007, doc. LGGE-Glacières. Dessin Louis Reynaud

Fig. 26 : Variations de longueur de 4 glaciers du même versant Nord du Mont-Blanc de 1870 à 2007 et analyse graphique des temps de réponse lors des 3 crues principales, au cours de cette période de suivis réguliers. D'après des documents et mesures du Laboratoire de Glaciologie-Cnrs, © L.Reynaud.

Fig. 27 : Carte des fronts de la Mer de Glace, d'après Mougin, les relevés des Eaux et Forêts et les mesures du Laboratoire de Glaciologie-Cnrs, © L.Reynaud.

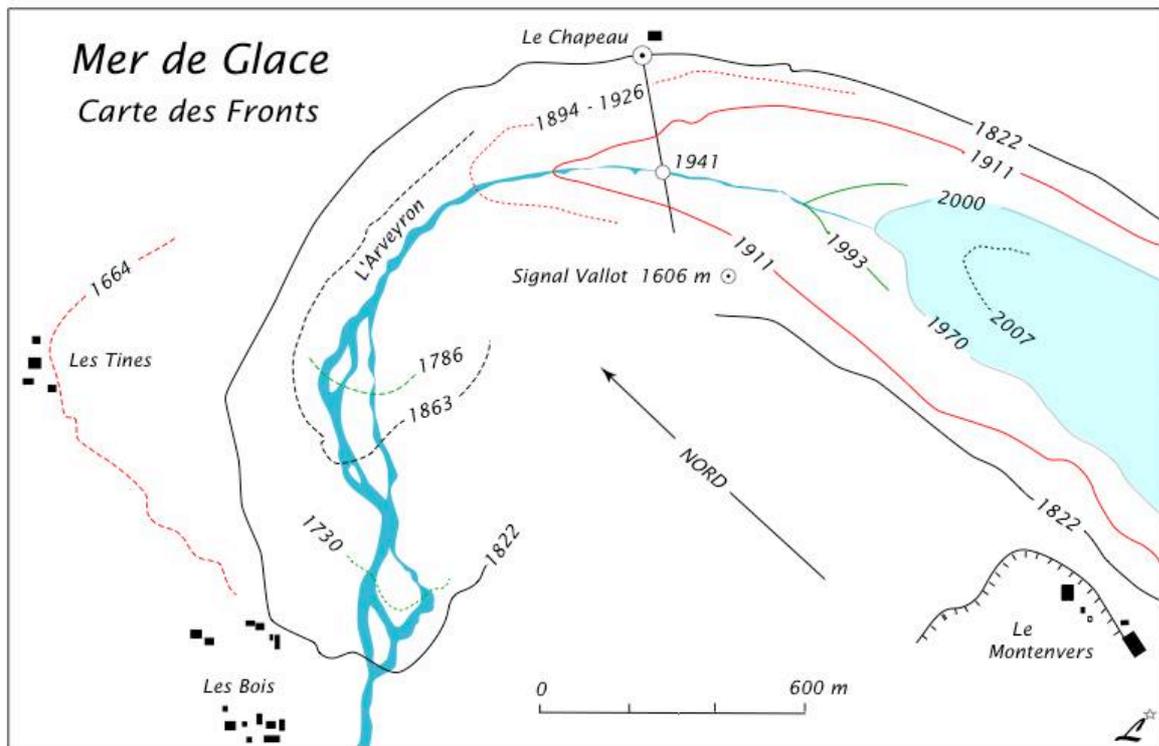


Fig. 28 : Naissance d'un lac de barrage morainique au front de la Mer de Glace, en 1999. Ce lac, comme prévu, n'a été que temporaire, finalement comblé par des écroulements de la moraine, rive droite.
© L.Reynaud.

Fig. 29 : Aux temps de la splendeur du Glacier des Bossons, qui s'était réavancé de 500 m depuis 1949 et couchait la végétation développée à l'aval, au printemps 1982. Noter la présence de deux visiteurs, dans les blocs, au front, pour apprécier l'échelle du cliché,
© L.Reynaud.



Les variations de niveau sur la Mer de Glace.

Que se passe-t-il tout le long du glacier lorsque se prépare une avancée ou un recul du front?

Pour l'analyser on dispose de relevés d'altitudes effectués en 5 profils en travers, sur la zone d'ablation de la Mer de Glace.

Pour la période 1957-1981, qui recouvre la fin de la grande décrue des années 40 à 50 et le début de la crue des années 1980 (Fig. 30), on constate que la reprise d'épaississement s'est étagée dans le temps pour les profils depuis Trélaporte en 1965 jusqu'aux Mottets en 1972. Ensuite, alors que les 4 profils du bas continuent d'augmenter, le profil du haut, Tacul, établi en 1970, ne cesse de décroître. De nos jours, les altitudes aux différents profils ne cessent de diminuer. Le mécanisme de fluctuation de niveau le long du glacier n'est donc pas une simple variation homogène, mais correspond plutôt à la propagation d'un excès de masse. En prenant comme début de passage les instants repérés par une flèche sur le graphique, on obtient, une vitesse de propagation de 500 m par an, ce qui est 5 fois la vitesse moyenne dans cette partie du glacier. Cette onde de crue s'élève à une hauteur maximale de 5 à 6 m, elle s'étale sur 7 Km²⁰.

²⁰ - Des mesures semblables, bien que moins continues dans le temps, révèlent un comportement identique sur les Glaciers d'Argentière et des Bossons. Il n'y a que quelques glaciers au monde, où de tels

Depuis 1985, s'est amorcée une baisse de niveau continue dont l'amplitude va en augmentant du haut vers le bas de la langue d'ablation (fig. n° 30).

Ces caractéristiques de propagation de l'onde de crue ont trouvé une application pratique immédiate lors de la dernière crue des années 1980. En effet, le gonflement du glacier au profil supérieur du Tacul allait se propager le long de la langue d'ablation pour se manifester 4 km plus bas, 8 années plus tard. Dès 1982 on a pu prévoir une menace pour la gare inférieure de l'ancien téléphérique de la Grotte de glace, pour les années 1986-87. Ce fut au printemps 1986, à cause d'un fort enneigement printanier, que le glacier, toujours en mouvement, entraîna un culot d'avalanche et cisaila le massif de béton de la gare inférieure.

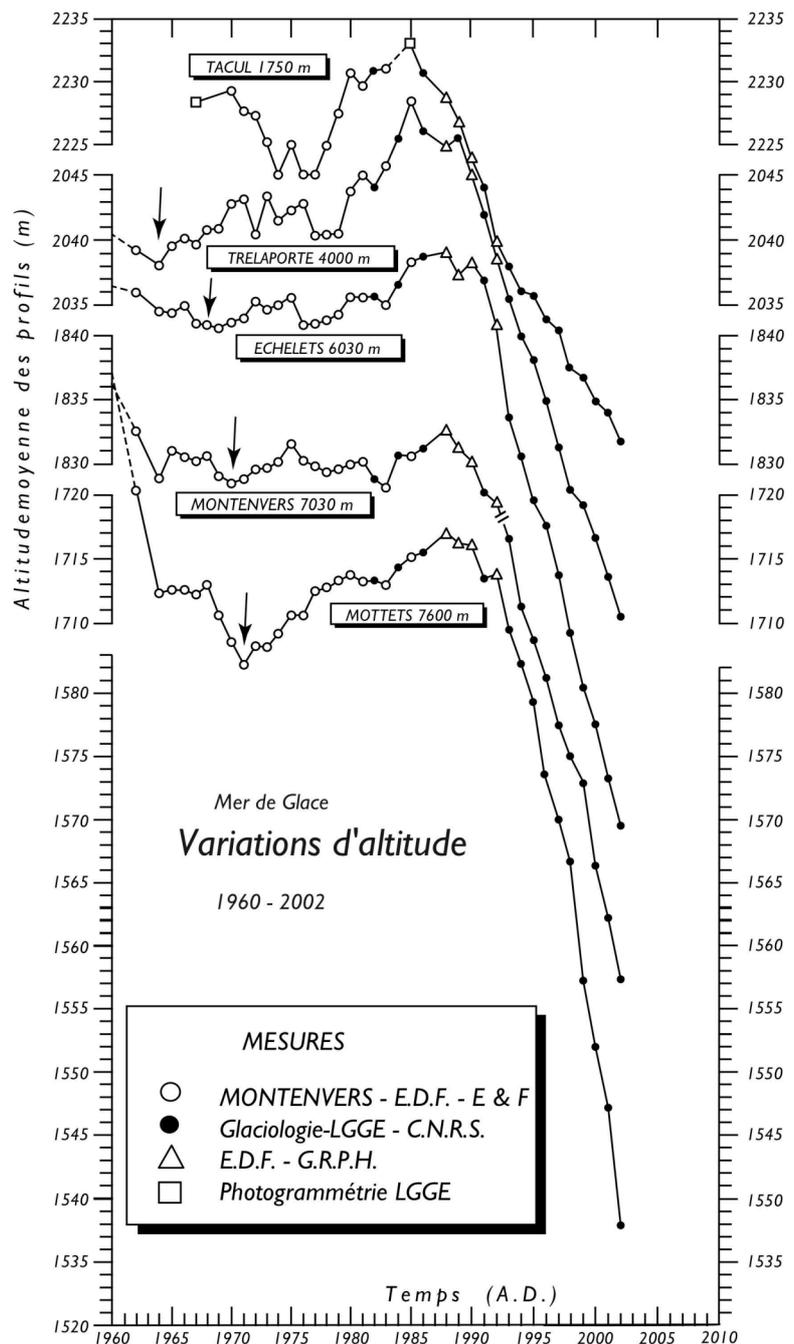


Fig. 30 : Variations des 5 niveaux de la Mer de Glace de 1960 à 2002 : après l'embellie des années 80,

tous les profils transversaux ont repris une forte décroissance allant de -1 m/an au profil du Tacul à près de -7 m/an à celui des Mottets.

Les chiffres portés sous le nom des profils sont les distances depuis le centre de la Chute de séracs du Géant, ce qui permet d'estimer la vitesse de propagation de l'onde de crue.

D'après des documents et mesures du Laboratoire de Glaciologie-Cnrs, © L.Reynaud.

suivis soient suffisamment longs pour permettre la mise en évidence du mécanisme de l'onde de crue ou encore d'onde cinématique, type de propagation bien connu par ailleurs en mécanique des fluides, applicables aux fleuves et canaux.

Fig. 31 : Mesures effectués à l'aide de balises pour déterminer localement chaque année la variation d'altitude de la surface, de bilan de masse et de vitesse.

Les variations de vitesse de déplacement.

Autrefois, les déplacements du glacier se mesuraient sur différents profils transversaux, dans des secteurs peu pentus pour que les pierres peintes utilisées comme repères ne glissent pas. Dans le but d'analyser la variation des vitesses tout le long courant de glace, en fonction des pentes, largeurs et épaisseurs, le Laboratoire de Glaciologie a installé une ligne de repères longitudinaux dès 1964.

Cet ensemble de données, porté sur la figure n°32, montre que les vitesses de déplacement en surface, dans l'axe du courant,

varient d'une année à l'autre comme si le changement se produisait tout le long du glacier (6 km) de la même quantité. En effet, on peut joindre les points d'une même année par des courbes sinueuses (en tirets) et presque parallèles entre elles.

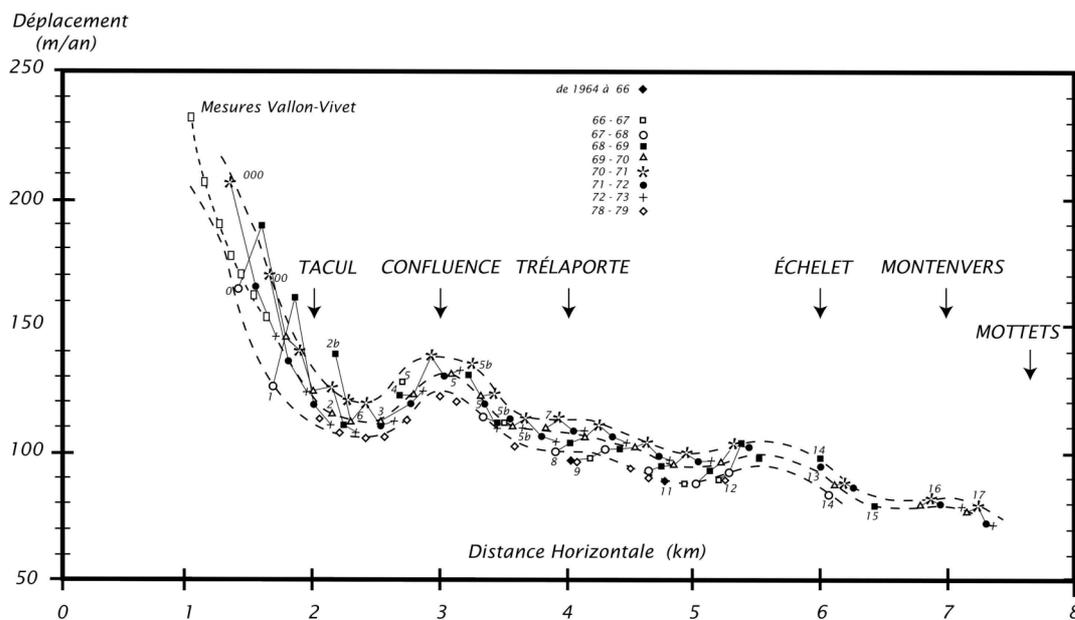
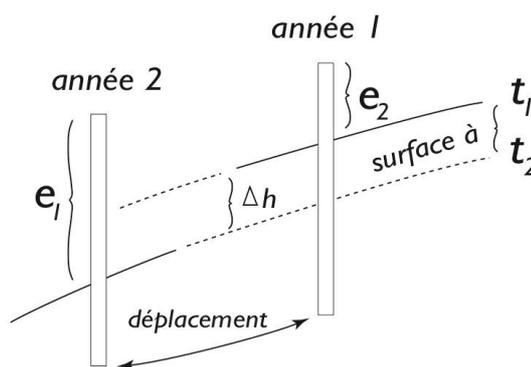


Fig. 32 : Mesures de vitesses en surface sur 6 Km de l'axe longitudinal de la Mer de Glace (Laboratoire de Glaciologie), à partir de la « Salle à Manger », au pied de la chute de séracs du Géant jusqu'au profil des Mottets, pour la période 1964 à 1979.

Les distances en Km, portées sur l'axe des abscisses, sont les distances mesurées sur un axe central curviligne dont l'origine a été choisie dans les séracs du Géant.

D'après des documents et mesures du Laboratoire de Glaciologie-Cnrs, © L.Reynaud.

D'autres résultats obtenus à partir du déplacement des bandes de Forbes, montrent que la vitesse constitue le paramètre de l'écoulement qui varie le plus à chacune des crues, comme si l'écoulement commençait à évacuer un surplus de masse par une accélération, plutôt que par un exhaussement de la surface. Lors d'une décrue, c'est l'opposé, avec une vitesse qui décroît fortement avant que l'épaisseur ne diminue.

Le bilan de masse glaciaire et ses variations

Quelle est enfin la cause de ces fluctuations de niveau et de longueur des glaciers, et l'origine des ondes de crues ? C'est bien sûr dans le rythme d'alimentations en neige qu'il faut la chercher et aussi dans la fusion estivale. Pour mesurer ces variations, le glacier doit être jaugé chaque année, en faisant le bilan entre ce qu'il a reçu l'hiver et perdu tout au cours de la belle saison. En zone d'accumulation, le gain s'obtient par pesée d'une colonne de névé restant à la fin de l'année. Plus bas, en zone d'ablation, la quantité de glace perdue est mesurée à l'aide de balises implantées à 10 ou 15 m de profondeur avec une sonde à jet de vapeur. Ces balises constituent des repères qui voyagent avec le glacier : on y relève non seulement l'ablation mais aussi les déplacements et la variation des niveaux annuels (Fig. 9). Ces différentes valeurs permettent de calculer le bilan de masse du glacier et d'exprimer le nombre de mètres cubes d'eau gagnés ou perdus chaque année. Pour plus de commodité, on en tire le bilan spécifique moyen sur toute la surface du glacier, gain ou perte de masse qui s'exprime en mètres d'eau.

Le bilan de masse, une année donnée, est différent d'un glacier à l'autre, suivant ses caractéristiques (exposition, altitude). Cependant au cours d'une longue période, comme celle des 30 années de mesures directes, les fluctuations de ces bilans de masse se révèlent très semblables sur de grandes régions comme celle des Alpes (500 Km de longueur). Cette homogénéité des fluctuations de l'alimentation du glacier présente plusieurs avantages. En premier lieu elle permet d'expliquer les caractéristiques de variation de longueur des différents glaciers à partir d'un même signal. En effet, les variations de longueur des glaciers (Fig. 26) présentent des caractéristiques similaires qu'on retrouve dans tous les autres enregistrements, aux temps de réponse près de chaque appareil. En pratique cela permet de passer à l'étude des fluctuations d'un glacier quelconque bien qu'on n'y ait pas réalisé de mesures de bilan dans le passé. Enfin cette homogénéité des fluctuations du bilan de masse glaciaire fournit un indice des variations climatiques. En analysant statistiquement les 30 années de mesures disponibles sur le glacier de Sarennes (massif des Grandes Rousses) en fonction des paramètres météorologiques, tels que précipitations et températures, recueillies à la station de Lyon Bron, il a été montré que les meilleures corrélations sont obtenues avec :

- les précipitations hivernales (octobre à mai), comptant pour 5%
- les précipitations de juin, pour 16%
- les températures de juillet et août pour 56% (d'après Martin 1977). Il est surprenant à première vue, que la corrélation fasse si peu de cas des précipitations hivernales, alors qu'elles constituent l'essentiel de l'alimentation. La raison en est que, cumulée sur 8 mois d'hiver, la quantité de neige est très peu variable d'une année à l'autre. Par contre au cours du mois de juin, à l'époque où le soleil est le plus efficace, car au plus haut dans le ciel, une petite pluie dans la vallée va se traduire par une mince couche de neige en altitude sur le glacier et, à cause surtout de sa blancheur, elle va retarder la fonte de plusieurs jours. Enfin, la température estivale en juillet et en août, très variable d'une année sur l'autre, explique la plus grande partie de cette corrélation qui au total rend compte de 77% des variations observées. C'est à dire que le rythme de vie de nos glaciers des Alpes est principalement déterminé par la saison d'été.

Une fois déterminée la relation statistique entre la fluctuation du bilan et celle des paramètres météorologiques, on peut reconstituer à partir de ces derniers, toute la série des fluctuations du bilan

depuis le début des mesures à la station. C'est ce qui explique le choix de la station de Lyon Bron, qui permet de remonter jusqu'en 1882, alors que les stations météorologiques voisines des glaciers ne débutent que très récemment²¹. C'est de cette façon qu'ont été reconstituées les variations du bilan de masse du glacier de Sarennes, avant le début des mesures en 1949, afin d'en comparer les variations à celles déduite des débits recueillis relevés sur l'émissaire du grand glacier d'Aletsch, le plus étendu du massif alpin²².

Sur la série reconstituée jusqu'en 1882, se retrouvent toutes les séquences de bilans favorables attendues comme celles autour des années 1890, 1920, 1940 et celle qui a débuté en 1977. De même, la fonte intense sur toute la décennie 1940-1950, cause d'un important retrait des langues glaciaires, comme la période actuelle, correspondent à des alimentations particulièrement déficitaires pour l'ensemble des glaciers.

Cependant on note que la reprise récente d'avancée des 4 glaciers portés sur la figure 26, étagée entre 1955 et 1970, n'est pas due à une période de bilans favorables, mais elle intervient malgré un bilan très voisin de la moyenne sur le siècle. En fait, cet état moyen, succédant à la décennie très déficitaire de 1940-50, a constitué pour des appareils réduits un surplus qu'ils ont traduit aussitôt par des augmentations de volume et un peu plus tard de longueur. Par contre la plus récente période de bilans favorables, débutée en 1977, juste après la grande sécheresse de 1976, a donné bien de vigueur aux ré avancées des langues des grands glaciers. De même, les petits glaciers du massif, réagissant beaucoup plus rapidement, avaient beaucoup progressé, en rejoignant des positions proches de leurs moraines de 1820 (PAG), comme ceux du Nant Blanc des Drus, ou du Plan de l'Aiguille. Ce nouvel état des glaciers qui a fait suite à une longue période de décrue, presque un demi siècle, leur avait redonné des formes semblables à celles des années 1920 et modifié profondément le paysage, que ce soit pour le promeneur ou pour l'alpiniste. En effet, les gonflements des surfaces avaient provoqué des systèmes de crevasses ou de séracs beaucoup plus développés. On observait de nouveau, en 1984 comme sur les photos anciennes, des séracs importants sur les langues d'Argentière ou des Bossons, morcelés en de grandes tours, les pinacles. Ces modifications des apparences en surface traduisent des changements dans les régimes d'écoulement et de telles périodes sont très utiles pour la compréhension des mécanismes mis en jeu, entre les causes et les conséquence des variations climatiques.

²¹ - La majorité des longues séries de température et précipitation fiables, exécutées de façon normalisée (abris), utilisant des appareils standards, ne débutèrent guère avant les années 1870, dans les grandes villes européennes. Les stations provinciales, plus proches des glaciers, sont plus récentes, initiées dans les années 1950 pour les plus anciennes, avec la création des centres météorologiques départementaux.

²² - Le grand glacier d'Aletsch, alimente le haut Rhône, dans le Valais. Ses dimensions sont, pour mémoire, à peu près le double de celles de la Mer de Glace, d'une longueur de 22 Km, 950 m d'épaisseur à la « Concordia Platz », il draine un bassin versant de 80 Km², contre respectivement : 11 Km, 420 m sur le tronçon du Tacul et 40 Km². Son torrent émissaire, la Massa, est capté pour une centrale électrique, depuis 1923 et son débit jaugé depuis ce temps là.

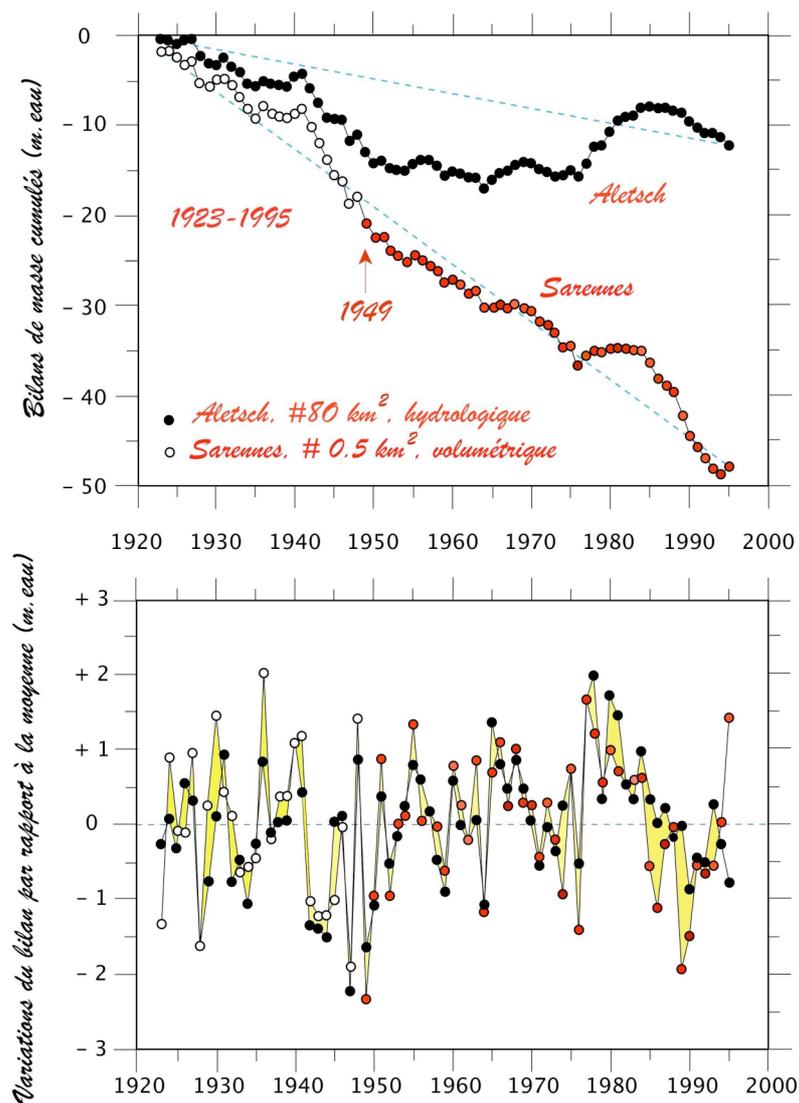


Fig. 33 : Comparaison des alimentations cumulées sur 2 glaciers éloignés comme Sarennes, massif des Grandes Rousses et Aletsch, Oberland Bernois, sur la période 1923 à 1995. La partie supérieure de la figure montre la décroissance moyenne d'épaisseur de chaque appareil avec une allure semblable autour de la moyenne d'évolution individuelle. La partie basse compare les variations de bilans, une fois les mesures débarrassées de la tendance locale d'évolution propre à chaque glacier, ce qui permet d'agrandir la figure et d'observer en détail les fluctuations annuelles. On obtient un signal très semblable pour ces 2 glaciers, malgré l'éloignement, la différence d'étendue et aussi de méthode d'observation par des équipes totalement indépendantes. Ainsi, malgré la grande variété des climats locaux, tout le long des Alpes, il existe une variation climatique, à peu près du même ordre de grandeur, non pas totalement répartie au hasard, mais distribuée selon des cycles d'une dizaine d'années, caractéristique déjà bien connue des amateurs de montagne et de ski.
 D'après Ch.Vincent et al, JGR, 109, D10104, 2004.

Malheureusement, ce fut une rude période pour tous les aménageurs de la haute montagne glaciaire. En effet, alors que la crue des années 1920, personne n'avait à s'en inquiéter ou à subir de dégâts, car rares étaient les équipements édifiés près des glaciers. Téléphériques, captages d'eau et aménagements touristiques ne débutent qu'à partir des années 1950, après une décennie de forte décrue. Ainsi, par commodité, les aménagements se placèrent au plus près de la glace, pour anticiper la décrue en cours. Hélas, dès 1970, la plus récente des ré avancée devenait manifeste et il fallut modifier des téléphériques, retrouver l'eau disparue des captages et établir de nouveaux cheminements pour prendre pied sur la glace. Ces mésaventures ne furent pas limitées aux seules Alpes françaises, mais se produisirent tout le long de l'arc alpin.

Aujourd'hui, les soucis des aménageurs proviennent du recul des glaciers et des baisses de niveau. Les questions qui se posent concernent la pérennité des ouvrages : le réchauffement en cours va-t-il permettre la rentabilité de l'installation, surtout si elle est nouvelle, sur une trentaine d'années ?

Comme la majorité des glaciers équipés n'ont pas bénéficié d'attentions comme la Mer de Glace, il est alors nécessaire de lancer une période de relevés locaux, pour préciser les caractéristiques propres du lieu.

- Conclusion

« On voit que pour démêler la réaction d'un glacier aux fluctuations du climat, il faut en mesurer le bilan tout le long, surveiller par des profils transversaux son niveau et sa vitesse (toujours à la même époque vers le 1er octobre pour s'affranchir des variations saisonnières). Si l'on ne mesure que la variation des fronts, les données sont plus difficiles à analyser, car, autant de glaciers, autant de cas distincts ... Ce n'est qu'en concentrant les études sur un petit nombre d'appareils qu'on arrive à les étudier à fond », selon Louis Lliboutry²³. Dans cette optique, ceux du Mont-Blanc et notamment la Mer de Glace, sont exceptionnels, car ils sont suffisamment développés pour présenter la plupart des caractéristiques morphologiques glaciaires qu'on ne retrouve que dispersées sur de plus petits appareils. De plus, ces différents traits glaciaires se développent ici avec force, à l'image des surfaces et des flux de glace mis en jeu, ce qui les rend bien plus évidents.

Enfin, les mesures actuelles viennent étoffer un riche héritage d'observations des variations, de prospections géophysiques, explorations, forages. bilans de masse, ceci sur une gamme d'altitude qui va du sommet du Mont-Blanc jusqu'aux fronts qui descendent très bas, dans ces vallées.

Ces observations régulières sont indispensables pour apprécier correctement, sur le long terme, les réels changements qui affectent ces masses glaciaires, pour en déduire l'impact réel des changements du climat et calibrer les modèles des évolution futures.

- **Remerciements** : Toutes ces descriptions des caractéristiques de la Mer de Glace et de ses variations n'ont été accessibles que par le travail ininterrompu d'individuels, d'institutions, de chercheurs, d'étudiants et de nombreux bénévoles, sur plus d'un siècle. Je voudrais rendre hommage à leur constance qui a permis cette connaissance. Enfin, j'ai puisé abondamment dans les documents du Laboratoire de Glaciologie du Cnrs, Grenoble et je remercie plus particulièrement Christian Vincent, Chef de l'équipe Glaciers et promoteur du programme d'Observation des Variations des Glaciers, qui m'a communiqué les plus récents relevés.

²³ - Louis Lliboutry (1922-2008), fonda le Laboratoire de Glaciologie du CNRS en 1958. Cet universitaire s'attaqua à l'études des difficiles problèmes posés par la glaciologie moderne et su attirer non seulement des chercheurs, mais aussi constituer une équipe de collaborateurs techniques pour aborder la mécanique de la glace tant en laboratoire que sur le terrain. C'est lui qui initia des études complètes, notamment sur la Mer de Glace, avec des prospections sismiques, carottages et mises en place de réseaux de balises, de même qu'il pilota des études plus théoriques sur les différentes facettes évoquées dans cette monographie.

POUR EN CONNAÎTRE D'AVANTAGE

B. FRANCOU et C. VINCENT : **Les Glaciers à l'épreuve du Climat**, 277 p, Éditions IRD et Belin, 2007.

CLUB ALPIN FRANÇAIS, Comité Scientifique : **Les Glaciers Alps Français : Une Histoire en Mouvement**, brochure, 50 p, 2008.

L. LLIBOUTRY. **Traité de Glaciologie**, Tome 1 : Glace, neige, hydrologie nivale; Tome 2 : Glaciers, variations du climat, sols gelés, Masson et C^{ie}, 1964-65.

H. MANSOUX : **Guide découverte des glaciers alpins**, 352 p, 2005, Ed Gap.

L. MOREAU et R. VIVIAN : **Dans le secret des glaciers du mont-blanc**, Ed. Glénat, 101p, 2000.

R. VIVIAN : **Les Glaciers des Alpes Occidentales**, thèse de géographie, Imprimerie Allier, Grenoble, 1975.

P. WAGNON, C. VINCENT, D. SIX et B. FRANCOU, **Glaciers, Forces et Fragilités**, Glénat, 2007.

SITE du Service d'Observation des glaciers, fournissant annuellement un résumé des principales caractéristiques de variations observées sur l'ensemble des glaciers témoins des Alpes Françaises :
<http://www-lgge.obs.ujf-grenoble.fr/ServiceObs/index.htm>

SITE du Club Alpin Français, pour ses publications : <http://www.ffcam.fr/publications.html>
et pour celles de son Comité Scientifique : http://www.ffcam.fr/comite_scientifique.html