OBSERVATIONS FAITES AU GLACIER DE TRÉ-LA-TÊTE

A L'OCCASION DE L'AMÉNAGEMENT D'UNE PRISE D'EAU SOUS-GLACIAIRE

par M. WAEBER

Objet des recherches.

La Société d'Electrochimie, d'Electrométallurgie et des Aciéries Electriques d'Ugine a, dès 1923 [1], équipé le lac de la Girotte, dans les montagnes du Beaufortin, en réservoir d'accumulation saisonnière pour régulariser la partie de son domaine hydraulique aménagée sur le Bon Nant, l'Arly et le Doron de Beaufort.

Ce lac, situé à 1720 m. d'altitude, a une capacité utile de 29 millions de m^3. Ses eaux actionnent, sous une chute totale de 1370 m., une série d'usines échelonnées le long du Doron de Beaufort jusqu'à Albertville, en fournissant annuellement 80 à 90 millions de kwh.

Pour satisfaire de nouveaux besoins d'énergie, ladite société a entrepris d'accroître de 15 millions de m^3 le volume de la retenue

Le bassin versant naturel du lac étant peu étendu, il avait fallu, dès l'origine, pourvoir à son alimentation par une installation de pompage avec une hauteur de refoulement de 500 m., qui fut en son temps la plus importante des Alpes. En outre, divers bassins voisins furent mis à contribution pour fournir au lac le complément nécessaire à ce remplissage. L'une de ces dérivations, la plus importante, longue de 4,7 kms, lui amène les eaux du haut Bon Nant, affluent de l'Arve, capté au Plan Jovet, à 1910 m. d'altitude. Mais ces apports seront, dorénavant, insuffisants pour assurer le remplissage du lac surélevé.

[1] *La Houille Blanche*, mai-juin 1922 : Les usines hydroélectriques de la Compagnie P. Girod, à Ugine, par V. Sylvestre. — Troisième Congrès de la Houille Blanche, Grenoble, 1926. Tome II, Usines hydroélectriques de la Société d'Electrochimie, d'Electrométallurgie et des Aciéries électriques d'Ugine. Vallée du Doron de Beaufort, p. 1429; Travaux de percement du lac de la Girotte, p. 1637.

Parmi les diverses possibilités envisagées pour parfaire son alimentation, la Société d'Electrochimie a fixé son choix sur la dérivation de l'émissaire du glacier de Tré-la-Tête. Ce torrent présente le grand avantage d'avoir un régime complémentaire de celui des autres affluents du lac : en années chaudes et sèches, la fusion accrue du glacier compensera heureusement les déficits dont on souffre actuellement. C'est ainsi que, durant les années 1941 et 1942, de caractères météorologiques opposés, le torrent de Tré-la-Tête a débité 43 et 54 millions de m^3, tandis que les apports actuellement disponibles tombaient de 44,5 à 29,6 millions de m^3. Avec l'adduction du torrent de Tré-la-Tête, la somme des apports dérivables dans le lac aurait à peine varié, se maintenant aux environs de 72 et 70 millions de m^3.

La dérivation se fera au moyen d'un tunnel de 5,3 kms qui se développe au pied des contreforts du Mont Tondu et doit se raccorder à celle du Bon Nant. De l'altitude de la galerie existante découlait nécessairement celle de son extension vers Tré-la-Tête, d'où un obstacle sérieux : le glacier descend plus bas que le niveau du tunnel. Pour pouvoir dériver les eaux par gravité, on devait accepter le principe d'une prise d'eau sous la glace, innovation originale.

Il a donc fallu procéder à des recherches pour étudier la morphologie du lit du glacier, reconnaître l'emplacement où devait aboutir la galerie de dérivation et fixer les dispositions à adopter pour la prise d'eau. Les observations faites à cette occasion font l'objet du présent mémoire [2].

Situation.

Le glacier de Tré-la-Tête (pl. I), situé au Sud-Ouest du Mont-Blanc, est le troisième en importance du versant français de ce massif; il prend sa source au Col Infranchissable (3349) et reçoit sur rive droite les névés du Dôme de Miage (3669) et de l'Aiguille de la Bérangère (3425), sur sa rive gauche les neiges descendant de l'Aiguille de Tré-la-Tête (3917), de l'Aiguille des Glaciers (3815) et du Mont Tondu (3133). Son névé est orienté du Nord au Sud, son dissipateur coule de l'Est à l'Ouest. Sa surface, dans l'état actuel, est de 10,8 km^2, sa longueur de 7,2 kms, l'altitude moyenne de son bassin versant, de 2860 m.

Depuis que ce glacier a été cartographié avec plus ou moins d'exactitude, il semble qu'il ait été continuellement en retrait. Selon

[2] Toutes ces recherches ont été entreprises par le Service des Etudes hydrauliques de la Société d'Electrochimie, d'Electrométallurgie et des Aciéries électriques d'Ugine.

les tomes III et V des *Etudes Glaciologiques* [3], son front descendait :

— en 1730, d'après le cadastre sarde, à 240 m. en amont du pont de Combe Noire à la Laya (altitude approximative, 1527 m.);

— en 1864, selon la carte de l'Etat-Major, il s'arrêtait à 1040 m. du dit pont (altitude, 1675 m.);

— en 1908, il avait encore reculé de 770 m. et s'arrêtait à 1820 m.;

— en 1916, il descendait encore à 1869;

— actuellement, il s'arrête à 1900 m., en recul de 180 m. par rapport à 1908.

Les petites crues des années 1890 et 1920 notamment ne semblent pas s'y être manifestées autrement que par un épaississement passager du névé et du dissipateur, sans avancement du front; du moins n'y voit-on pas de moraines de quelque importance indiquant des oscillations durant la phase de retrait.

Dans son état actuel (pl. II et III), le front du glacier présente une certaine analogie avec celui du glacier des Bois à Chamonix : le lobe majeur, au Nord, se termine dans une gorge étroite, profonde et très inclinée (pente moyenne 30 %), dont l'extrémité visible forme sous le glacier un canyon franchi par une série de cascades (pl. IV et V); sur rive gauche, un deuxième lobe, moins important, vient mourir sur un gradin de roches moutonnées à contrepente, constituant l'un des flancs de l'auge glaciaire et séparé de la gorge par un îlot rocheux très saillant; le glacier venait encore y buter en 1910, tandis que sa masse principale s'enfonçait dans la gorge comme une trompe d'éléphant. Cette terrasse latérale se termine par une falaise abrupte assimilable aux rochers des Mottets de la Mer de Glace.

La pente superficielle, modérée dans l'ensemble, ne s'accélère que vers la langue terminale qui s'achève par une paroi impraticable.

Galeries de recherche sous la glace.

L'aspect général du front du glacier permettait de supposer que son lit se poursuivait avec une pente analogue à celle observée à l'aval et que l'on atteindrait au bout de quelques dizaines de mètres l'emplacement prévu pour la prise d'eau.

C'est dans cette attente que fut entreprise, en septembre 1941, la perforation, dans la glace, d'une grotte horizontale pour rechercher le point où cet horizon recoupait le talweg. Une première galerie fut attaquée de la rive gauche du lobe majeur, au fond d'un couloir qui le séparait de la roche encaissante, en un point situé à

[3] Ministère de l'Agriculture, Service des Grandes Forces hydrauliques. *Etudes Glaciologiques*, t. III, 1922, t. V, 1925. Paris, Imprimerie Nationale.

quelque 35 m. du front. Sa cote d'entrée était de 1921,50; orientée dans une direction trop transversale, elle vint buter, au bout de 34 m. seulement, sur la rive droite. Celle-ci présentait une inclinaison de 45° environ; elle était dominée par un à-pic, de telle sorte que le glacier n'épousait pas le contour du rocher, mais s'en écartait de plusieurs mètres en formant voûte, ce qui permit d'explorer cette rive sur une longueur de 25 m. Au boût de peu de jours, on put constater que cette galerie transversale se déformait rapidement. La voûte se déportait vers l'aval par rapport au radier, tout en s'abaissant. Au milieu, le radier s'affaissait en formant cuvette, rendant la circulation impossible.

Une nouvelle galerie (A-D, fig. 2) fut attaquée à partir de la première, à 10 m. de l'entrée, orientée vers l'axe présumé du glacier. Subissant des déformations plus homogènes, elle a pu être conservée jusqu'en octobre dernier. Ce n'est qu'au bout de 88 m. que l'on retrouva le rocher de la rive droite. Celui-ci fut suivi pendant 48 m. (D-J); puis on chercha à se rendre compte de la distance de la rive gauche au moyen d'une traversée oblique J-K qui retomba sur le rocher après 10 m. seulement. A partir du point K, la galerie de recherche fut poussée en gardant le contact approximatif avec la rive gauche.

A 32 m. au-delà, une lacune entre la roche et la glace permit d'établir un puits M et de descendre jusqu'au talweg qui, en cet endroit, à 200 m. de distance du front du glacier, se trouve à la cote 1915,6, soit 15,6 m. plus haut qu'à la sortie du torrent. Un deuxième puits a été aménagé dans des conditions analogues à 32 m. plus loin (O); le talweg s'y trouva à la cote 1917,7. On continua la galerie principale qui rejoignit le fond de la gorge, à la cote 1921, après un parcours de 66 m. (point U); soit à 286,5 m. depuis l'entrée. Le lit fut encore suivi durant 6 m., jusqu'en V, à 300 m. en ligne droite du front du glacier. En cet endroit, la surface était à la cote 2055, soit à 134 m. au-dessus du talweg.

A partir des puits, deux galeries de 30 m., longeant le torrent sous-glaciaire, furent aménagées l'une vers l'amont jusque sous Q, l'autre vers l'aval jusque sous K (pl. VI A).

En cours de février, les chutes de neige ayant rendu difficile l'accès de la grotte, un tronçon de galerie A-A', de 20 m., fut percé vers l'extérieur à partir de la bifurcation des deux tunnels primitifs. A cette époque, la galerie initiale, dans sa partie non entretenue, s'était déjà complètement refermée après s'être abaissée au point de devenir impraticable.

En outre, des saignées transversales, au droit des puits et aux extrémités des diverses galeries, furent poussées jusqu'au contact avec les deux bords de la gorge. Ces travaux étaient terminés courant avril.

Postérieurement, une tranchée transversale a été ouverte au fond du glacier à l'emplacement envisagé pour le barrage et sur toute la section de celui-ci, donnant donc une section droite complète de la gorge sur une hauteur de 10 mètres.

Les principales constatations faites sous le glacier sont les suivantes :

Morphologie.

La pente du cours d'eau sous-glaciaire est médiocre en comparaison de celle de l'émissaire extérieur, puisqu'elle n'atteint que 7 % sur 300 m. à partir du front; encore les rapides de la sortie sont-ils inclus dans cette moyenne. A l'amont, la pente est plutôt de 5 à 6 %. A en juger par la pente superficielle du glacier, celui-ci s'écoule presque à coup sûr dans une auge fortement inclinée, taillée en trait de scie par la gorge sous-glaciaire qui se poursuit du reste à l'extérieur avec un caractère analogue et une profondeur de plus de 100 m. (pl. VI C et VI D). Le lit sous-glaciaire comporte donc une gorge de profondeur inconnue, mais probablement très considérable dont le fond seul a été exploré.

Cette gorge, en forme de U, avec des surplombs latéraux fréquents, est très étroite : 3 à 6 m. au niveau du torrent, guère davantage quelques mètres au-dessus. Tant qu'ils ne sont pas nettement surplombants, ses murs présentent fréquemment des traces de poli glaciaire; ces surfaces polies sont toutefois bien moins généralisées que dans le lit majeur du glacier actuellement découvert; il semble que la roche n'y ait subi qu'un commencement d'usure. Aucune marmite n'a été mise à découvert sous le glacier, tandis qu'on peut en observer une, énorme, en contre-bas de la passerelle de chantier; elles abondent par contre le long du cours du torrent situé en dehors de l'extension historique du glacier, donnant l'impression qu'elles sont bien plus fluviales que glaciaires.

Quant à l'origine de cette gorge, à en juger par l'orientation quasi verticale des stries du rocher, dont nous reparlerons plus loin, on peut douter que l'action directe du glacier ait été l'instrument primaire de l'érosion en profondeur; on comprendrait mieux qu'elle se soit manifestée en élargissant la gorge; les stries sont un témoin de cette action, mais, quantitativement, le résultat en apparaît fort médiocre. On pourrait au contraire avancer que le glacier, en protégeant la gorge des alternances de gel et de dégel, exerce plutôt sur elle une action conservatrice et la maintient dans sa fraîcheur primitive, en l'empêchant de dégénérer en vallée en V.

Nous serions tenté d'y voir plutôt le fait de l'érosion du torrent sous-glaciaire ou celui d'un torrent circulant à ciel ouvert en une

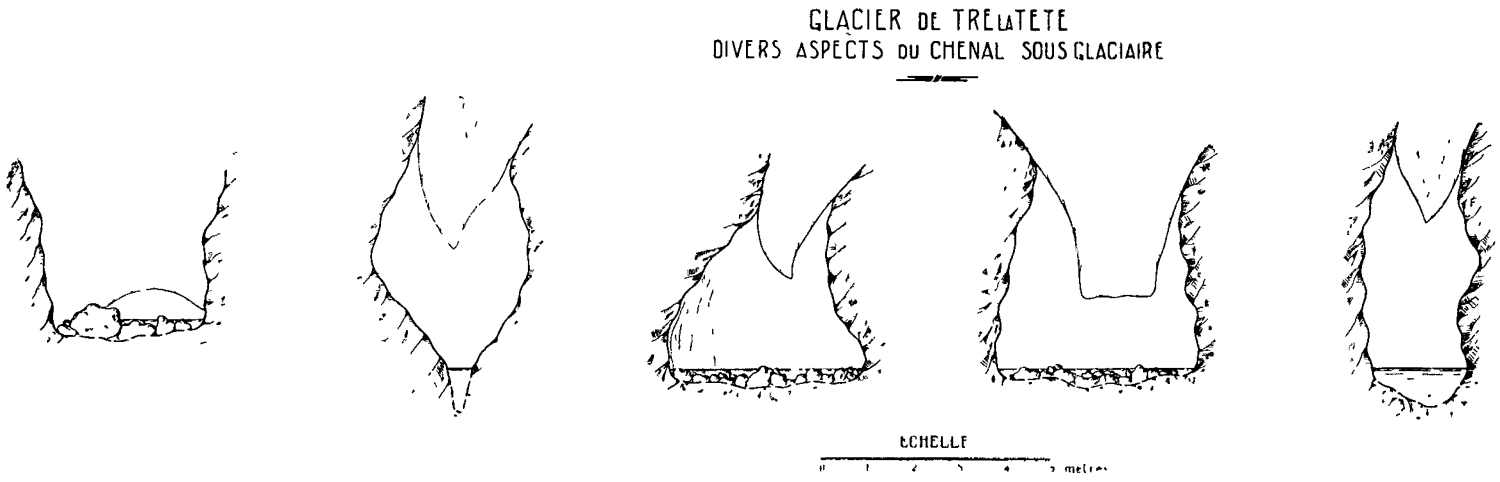


Fig. 3. — Divers aspects du chenal sous-glaciaire.

période interglaciaire. Ces deux modes d'écoulement ne diffèrent au reste pas plus dans leur essence que dans leurs effets : sauf le cas de crues subites pendant lesquelles le chenal sous-glaciaire, trop exigu, peut se mettre momentanément en charge — encore ce phénomène n'est-il pas de longue durée, le torrent ayant tôt fait de ronger la glace qui le gêne —, l'écoulement sous-glaciaire, à moins de contre-pente, reste un écoulement libre.

Mais, à vrai dire, sur la part revenant à l'érosion fluviatile ou glaciaire dans l'élaboration de la morphologie alpine, les meilleurs esprits sont encore loin d'un accord [4].

Températures.

Durant tout l'hiver, la température de l'air, à partir d'une trentaine de mètres de l'entrée, s'est maintenue au-dessus de 0°. Les flaques d'eau de la galerie n'ont jamais gelé. Les coups de pioche ont libéré au cours de l'hiver, en plusieurs points, des poches liquides qui, jaillissant pendant quelques secondes à très forte pression, étaient redoutées des ouvriers.

Le température de l'eau sous le glacier à la mi-février était de 0°3, celle de l'air, de 0°. Au 1er juin, on a mesuré les valeurs suivantes : eau de fonte superficielle, à l'ombre, 0°5; torrent sous-glaciaire, 0°6; roche fraîchement dégagée de sa couverture de glace, 0°3; air dans la galerie, 1°3 à 2°. La galerie de dérivation qui longe le glacier à une distance d'une vingtaine de mètres avait, en janvier, une température de + 1°, tandis qu'à la même altitude mais à 40 m. de la surface, en moyenne, on mesurait, dans la galerie qui s'en éloigne, une température de 5 à 6°.

En été, l'air aspiré par le torrent sous-glaciaire circulait en remontant la galerie de visite et y déterminait, au voisinage de l'entrée, une fusion intense. En hiver, par contre, l'entrée de la grotte

---

[4] Au cours des travaux de cet hiver, nous avons eu la possibilité de suivre le talweg sous-glaciaire sur une centaine de mètres à l'aval du barrage (fig. 3).

Les formes de la gorge sont beaucoup plus variées que nous ne nous l'étions figuré d'abord. Les profils en V les plus étroits (1 m. de large pour 2 m. de profondeur) alternent avec les profils en U; les premiers coïncident généralement avec les zones en forte pente; les derniers correspondent aux replats et sont fréquemment encombrés de galets (phot. pl. VI à pl. IX A).

Les surplombs sont ici presque la règle; aussi la glace n'arrive-t-elle que péniblement à s'insinuer jusqu'au fond de la gorge en minces pendentifs cannelés, perdant tout contact avec la roche et qui se maintiennent fréquemment à plusieurs mètres au-dessus de l'eau.

La gorge, dans cette région, est assez sinueuse et porte les traces évidentes d'une érosion essentiellement fluviale : le lit du torrent et le bas des berges sont extrêmement lisses, polis mais non striés avec des amorces de marmites. Sur la majeure partie de ce parcours, il est invraisemblable que la glace descende jamais jusqu'au voisinage du niveau des basses eaux. Comme agent de l'approfondissement de la gorge, l'érosion glaciaire paraît ici totalement exclue.

était tapissée d'une épaisse couche de givre provenant de l'air saturé d'humidité qui gelait au sortir du glacier.

Contact entre roche et glace.

Le contact de la glace avec les parois latérales de la gorge est généralement intime. Cependant, lorsque la roche forme des saillies importantes, une lacune reste ouverte à leur abri entre roche et glace, formant d'étroites cavernes de plusieurs mètres de hauteur.

En certains endroits proches de la surface, où la galerie de recherche repose sur un radier de rocher, il se forme, au commencement de l'hiver, au contact de la roche et du glacier, un bourrelet de glace de quelques centimètres d'épaisseur : l'eau qui suinte à la base du glacier regèle au contact de l'air extérieur.

Au fond de la gorge, la glace forme voûte sur le torrent, laissant au-dessus de l'eau un vide de 60 à 80 cms à la clef. Nulle part, jusqu'à la fin de l'hiver, la glace ne touchait l'eau. Elle en restait séparée dans ses points bas par un vide de 10 à 20 cms. En bien des endroits la glace se terminait par une surface horizontale, bien que l'eau n'ait pas eu l'occasion de la toucher depuis l'automne.

A la première crue, l'eau entrant en contact avec la glace la fait fondre en quelques heures, remplaçant la voûte par un plafond horizontal.

Toutefois, lors d'une crue d'orage violente (débit d'environ 20 m^3/sec.), la galerie de visite a été envahie jusqu'au puits aval par le torrent qui y déposa du sable et de nombreux blocs de glace et s'y creusa un chenal de plusieurs décimètres de profondeur.

Il nous a même été donné d'observer précédemment un spectacle beaucoup plus grandiose : à l'occasion, vraisemblablement, de la rupture d'un lac morainique situé à côté du signal des Eaux et Forêts dénommé Roche polie [5], un flot de l'importance du torrent sous-glaciaire, surgit en jet violent des crevasses de la rive gauche et se répandit sur le glacier, balayant sa moraine sur près de la moitié de sa largeur.

Torrent glaciaire.

Le débit du torrent de Tré-la-Tête est observé régulièrement depuis deux ans. Le poste de jaugeage, muni d'un limnigraphe enregistreur, est installé peu en amont du confluent de Tré-la-Tête et du Bon Nant. Il embrasse un bassin versant de 21,3 km^2

[5] *Opus* cité plus haut.

dont environ 17,9 sont drainés par la dérivation. La surface actuelle du glacier constitue un peu plus de 50 % du bassin. Les débits de ces deux années correspondent à des tranches d'eau de 2.031 et 2.532 m/m d'épaisseur.

Sur ce total, 56 et 49 % se sont écoulés pendant les deux mois de juillet et août; 96 et 93 % durant les six mois de mai à octobre.

Le débit d'étiage tombe à la station de jaugeage à 2,5 l./s.km^2, mais doit être compris entre 1 et 1,5 l./s.km^2 à la sortie du glacier qui, en février dernier, ne fournissait pas plus d'une vingtaine de litres.

Le débit de fonte maximum a été en 1942 de 11,8 m^3/sec., ce qui, ramené à la surface strictement glaciaire, est voisin de 1 m^3/sec.km^2. La plus forte moyenne journalière due à la fonte a été de 8,57 m^3/sec.

Les fluctuations diurnes sont très considérables pendant toute la belle saison. Leur importance relative va en croissant du printemps, où elles sont atténuées par la fonte plus régulière de la neige, jusque vers la fin août. Il est difficile d'en donner un résumé objectif, car il faudrait éliminer certaines journées à fonte réduite ou à précipitations abondantes; toutefois, si l'on prend comme critérium les périodes de beau temps à oscillations stabilisées, on constate que les minima et maxima de ces débits atteignent en 1942, par rapport au module du jour considéré, les moyennes suivantes :

en juin	.....	78 et 124 %
juillet	.....	68 et 149 %
août	.....	64 et 154 %
septembre	.....	67 et 145 %
octobre	.....	69 et 132 %

Au cours d'une même journée, les débits extrêmes imputables à la fonte varient dans un rapport qui atteint assez fréquemment 1 : 2,5 et parfois même 1 : 2,75.

Les écarts les plus marqués ont été, en 1942, ceux de fin juillet où les débits oscillaient entre 4 et 10,3 m^3/sec. et ceux de la mi-août avec des sautes de 3 à 7,5 m^3/sec. Ces deux années n'ayant pas été caractérisées par des chaleurs excessives, on peut s'attendre à observer par la suite des chiffres de fonte encore plus considérables.

Matériaux entraînés par la glace.

Au milieu de la gorge, la glace, généralement pure, est d'un beau bleu à la lumière du jour; celle-ci ne la traverse toutefois pas sur plus de 20 m. Vers la sortie de la grotte, des bandes d'une grande transparence et très homogènes, au point qu'on peut y

discerner les impuretés à près d'un mètre de profondeur, alternent avec des zones parsemées d'amas de bulles d'air.

Par contre, sur les bords du canyon, on rencontre des veines de glace sale, formées de sable et de graviers; ces derniers, qui ont dû se déposer à plat sur le glacier, se retrouvent fréquemment disposés de champ. Ces veines sont sensiblement verticales et tracées dans des plans longitudinaux parallèles à ceux des parois. Elles semblent provenir du rabattement, vers le fond et le bord, des nappes boueuses en arc de cercle observées à la surface de bien des glaciers et attribuées par certains auteurs [6] aux dépôts de poussières tombées en été sur le récepteur et qui, après avoir été recouvertes par les précipitations ultérieures, réapparaîtraient dans le dissipateur à des intervalles réguliers qui correspondraient à la progression annuelle du glacier [7]. Cette déformation des couches boueuses, qui sont comme aspirées par la gorge sous-glaciaire, apparaît actuellement d'une manière particulièrement frappante en section droite au glacier inférieur de Grindelwald qui se termine, dans une gorge analogue, par une falaise verticale de plus de 150 m. de haut (pl. VIII A); elle s'accorde parfaitement avec les mouvements de la glace dont il sera question plus loin.

Quelques cailloux isolés se rencontrent aussi dans la glace. Ils sont solidement enchâssés et anguleux. Leurs dimensions sont rarement considérables.

Dans le lit du torrent se trouvent quelques blocs très volumineux (parfois de plusieurs mètres cubes). Solidement coincés dans la gorge et très arrondis, ils doivent y séjourner depuis longtemps et avoir subi un long polissage. Mais, pour autant qu'on puisse s'en rendre compte par l'aspect du lit du torrent et le peu de pierres rencontrées au cours de la perforation des galeries, il ne semble pas que le charriage de gros matériaux soit très important.

La moraine de fond, constituée principalement par un lit de boue de faible épaisseur, généralement 0 à quelques millimètres, et quelques blocs épars sertis dans la glace, est tout à fait insignifiante, en comparaison de la moraine superficielle qui recouvre totalement la langue terminale du glacier, pour autant que les cailloux arrivent à s'y maintenir en équilibre.

Dans le corps du glacier, les cailloux sont également rares. On doit admettre que les blocs, tombés dans les crevasses de la partie supérieure du glacier, n'arrivent que rarement à descendre jusqu'au fond. Généralement, ils réapparaissent dans la moraine superfi-

---

[6] Voir entre autres : Uber Firn und Gletscher, par Rudolf Streiff. *Les Alpes*, sept. 1940 (éditées par le Club Alpin Suisse).

[7] J. Vallot les met en relation avec les chutes de séracs qu'il considère comme nécessaires à leur formation, mais à Tré-la-Tête cette explication est en défaut, vu l'absence de séracs de quelque importance.

cielle dès qu'ils sont libérés par la fusion de la glace qui les entourait. Il en résulte la formation vers la langue terminale de la plupart des glaciers de plages continues de cailloux qui recouvrent progressivement les lambeaux de glace restée propre entre les moraines.

Mouvement des couches superficielles du glacier.

On peut observer, dans une grotte naturelle située sur la rive gauche du front, que la glace avance très sensiblement. Les cannelures laissées par le rocher dans la glace peuvent se suivre jusqu'à la sortie de la grotte profonde d'une quinzaine de mètres (voir pl. VII A, à gauche). Elles dénotent un mouvement horizontal et même ascendant.

Ce mouvement a été suivi exactement d'après le déplacement de quatre pointerolles plantées dans le radier de la galerie de sortie entre A et A'. En 39 jours, du 12 avril au 21 mai, ces points, situés à proximité immédiate du front, à 20 m. au-dessus du sol, ont avancé de 95, 76, 81 et 75 cms, tandis qu'ils s'abaissaient de 25, 31, 35 et 25 cms, indiquant une progression journalière de 2 cms environ.

Durant l'hiver 41-42, le mouvement superficiel, relativement plus rapide qu'à la base, s'est manifesté sur le front par des porte à faux séparés des couches profondes par des plans de clivage horizontaux, tandis qu'à la fin de l'hiver suivant, la falaise terminale, immobilisée à la base, se boursouflait et éclatait comme l'écorce d'un arbre.

Au cours de l'été 1942, la vitesse superficielle du glacier a été observée par triangulation au moyen de quatre balises enfoncées dans la glace, les deux premières sur le profil dit du « Mauvais Pas » observé par les Eaux et Forêts [8], les autres à l'aplomb de l'extrémité de la galerie de recherche et de l'emplacement du barrage. En 21 jours, du 20 août au 10 septembre, les balises situées sur le profil du Mauvais Pas, à 2070 et 2080 m. d'altitude, se sont avancées de 2,25 et 2,23 m., la surface du glacier s'abaissant à leur pied de 2,02 et 1,88 m. dont 1,14 et 1,37 m. imputables à l'ablation mesurée par le déchaussement des balises, et 0,88 et 0,51 correspondant à la descente du glacier. Quant aux balises situées plus à l'aval, aux cotes 2055 et 2011, elles se sont déplacées en 9 jours, du 1er au 10 septembre, de 75 et 63 cms, la glace s'abaissant de 69 et 57 cms, dont 36 et 48 dus à l'ablation.

Les mouvements des filets de glace aux points supérieurs observés sont donc, en moyenne d'une fin d'été chaud et sec, de 10 à 11 cms par jour dans le plan horizontal et de 7 à 8 cms par jour pour les points situés plus à l'aval.

---

[8] *Op. cité.*

Ablation.

En ces points où la glace est à peu près entièrement recouverte d'une mince couche de pierres, l'ablation a été, durant cette courte période d'observation, de 6 cms par jour pour les points supérieurs, 4,7 pour les points inférieurs, ce qui correspondrait à un débit moyen de ces parties du glacier, de 620 et 485 l./s.kmq. [9].

Au total, durant la belle saison, l'ablation a été supérieure à la normale. La langue terminale du glacier, en dessous de la cote 2150, a été relevée topographiquement à deux reprises. La première fois, le 28 avril 1942, le bas du glacier était déjà découvert et, dans le haut, la mire pouvait être enfoncée jusqu'au contact de la glace. L'opération a été renouvelée le 10 septembre.

Dans cet intervalle, l'affaissement moyen de la surface du glacier a été de :

5 m. entre les cotes 2150 et 2110, surface généralement propre, en pente de 23 %, orientée vers W.-NW.;
8 m. entre les cotes 2110 et 2050, surface recouverte de moraine, pente 33 à 46 %, orientation W.;
3,8 m. entre les cotes 2050 et 2010, surface recouverte de moraine, pente 33 %, orientation W.;
5 m. entre les cotes 2010 et 1940, surface en glace vive, forte pente de 50 %, orientation W.,
soit, en moyenne, 5,30 m.

Le recul de la langue terminale a été, en une année, de 9 m. en moyenne.

Enfin, durant cette campagne d'été, la galerie de visite s'est raccourcie jusqu'à la mi-septembre de plus de 20 m., amenant la disparition complète du massif de glace qui séparait les deux entrées (pl. II B, VII B, VIII B, XI A), donnant ainsi la mesure de l'ablation horizontale d'une paroi de glace pure inclinée à 55° vers l'Ouest.

---

[9] Il est intéressant de confronter ces chiffres avec ceux de l'émissaire. Pendant ces 21 jours, le torrent a débité à la station de jaugeage 9.360.000 m³ dont on peut déduire approximativement, pour tenir compte du ruissellement, le 60 % des précipitations de la période (76.7 mm. à Tré-la-Tête avec un bassin versant : 21,3 km²); restent 8.300.000 m³ provenant d'un bassin englacé estimé à 10,8 km², ce qui donnerait, pour la fonte de la surface totale du glacier, un débit d'environ 430 l./s.km², à opposer aux 620 l./s.km² cités plus haut pour la fonte de la langue terminale. Dans la deuxième période, l'écoulement a été de 3.560.000 m³ et les précipitations de 8,1 mm. seulement, d'où un écoulement dû à la fonte de l'ordre de 415 l./s.km².

Malléabilité de la glace.

La glace, en profondeur, est très malléable. Une planche, abandonnée dans la galerie de base, s'incruste dans le plafond qui s'abaisse de 10 cms sans la faire fléchir. La galerie se resserrait à une allure telle que, dans son développement final, deux ouvriers devaient y travailler en permanence pour maintenir le passage. Celui-ci devint impossible après trois semaines d'abandon.

Dans les régions où la galerie n'était séparée du rocher que par une couche de glace de 1 à 2 décimètres, celle-ci se déformait sous l'effet des poussées verticales en se plissant dans le vide comme les nappes d'une coupe géologique, ce qui semblerait prouver, à l'encontre de l'opinion prédominante, que la glace est fort malléable, même sous de faibles pressions. Sa température est probablement un facteur essentiel de la plasticité (pl. X A et X D). Lors de nos dernières visites sous-glaciaires, nous avons pu observer les mêmes phénomènes à une beaucoup plus grande échelle (voir pl. XI B).

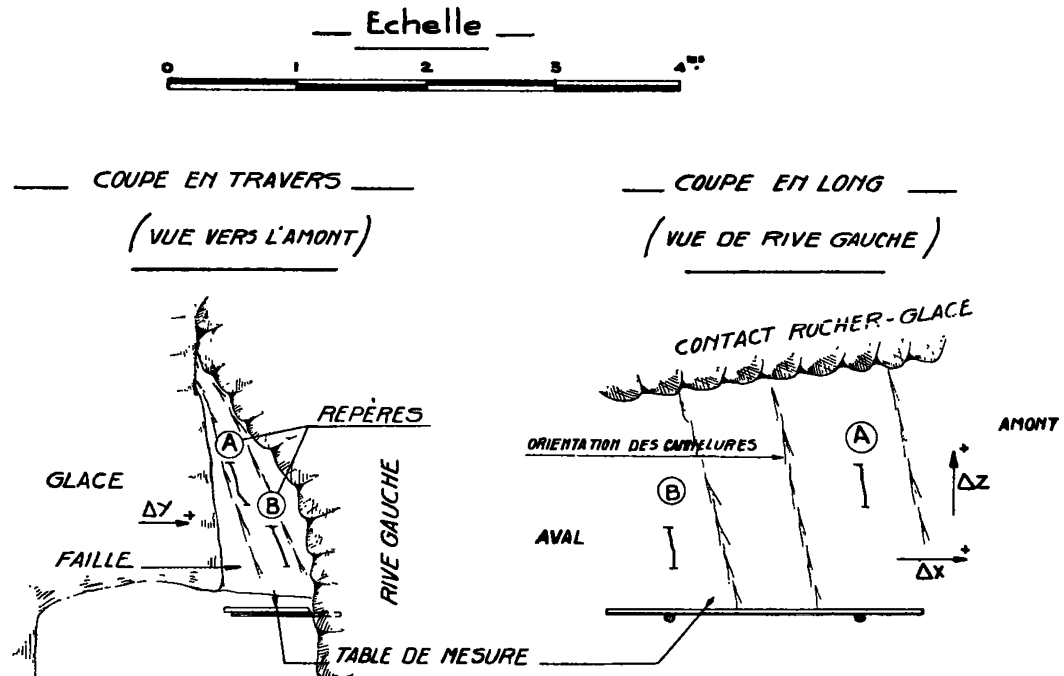
Mouvement des couches profondes du glacier.

Une des constatations les plus surprenantes résultant des recherches effectuées est celle des modalités de l'écoulement de la glace dans le canyon sous-glaciaire.

Dès l'abord, l'attention fut attirée par des stries [10] verticales ou inclinées avec un fruit de 1/10 à 1/5 et parfois même plus vers l'amont, burinées par le glacier dans la roche encaissante entre les points L et M du plan de la fig. 2 (pl. IX B). Ces stries sont en complète discordance avec les couches de la roche, assez voisines de l'horizontale. Au droit du premier puits (M), on pouvait observer une zone où la glace conservait sur plusieurs mètres, après un surplomb du rocher, des cannelures reproduisant l'empreinte du contour de l'obstacle qu'elle venait de quitter. La glace présente ainsi sur toute la hauteur qu'elle parcourt avant de retrouver le contact avec le rocher, soit, parfois, 5 à 6 m., l'allure d'une gigantesque jupe plissée; l'orientation de ces plis, inclinés vers l'amont, illustre à l'évidence le sens du mouvement de la glace (fig. 4). Or, ces cannelures sont voisines de la verticale, et, en maints endroits, elles sont inclinées assez fortement vers l'amont du glacier (pl. X C).

Dans toute la partie profonde, on pouvait constater le même phé-

[10] Voir aussi à ce sujet, dans *Les Alpes*, mai 1940, des observations analogues faites dans la gorge du glacier inférieur de Grindelwald : Gletscherschliffe in der Lütschinenschlucht, par Raimund von Klebelsberg.



DATES DES MESURES	TABLEAU DES MESURES					
	A			B		
	Δx	ΔY	ΔZ	Δx	ΔY	ΔZ
13.4.42						
20.4.42	+ 0,5	-1,5	- 2,5	+0,5	+1 5	- 1,5
23.4.42	0	-0,5	- 2	- 0 5	+0 5	- 2,5
27.4.42	+ 0,5	-0,5	- 2	+0.5	0	- 2
6.5.42	+ 1	-2,5	- 4	+ 1	+ 1	+ 1
16 5 42	+ 1	-1,5	- 6	+0,5	+3	- 3
26.5 42	+ 2	+1	- 8	+ 2	+ 2	- 4
16 6 42	- 1	+7,5	- 9	+ 0	+ 5	- 15
TOTAL	+ 4	+15	- 33,5	+4	+13	- 33

Fig. 4. — Mesure en cm. des mouvements des cannelures d'une paroi de glace quittant la roche en surplomb.

nomène et, particulièrement, à l'extrémité aval de la zone accessible le long du torrent, sur la rive droite à l'aplomb du point J, une paroi de 5 m. de haut présentait cet aspect jusqu'au fond de la gorge en un endroit où l'écoulement de la glace n'avait pu être influencé par les travaux.

Mesure des mouvements du glacier dans la gorge.

Pour étudier de plus près ce phénomène, des mesures de déplacement de la glace furent faites par rapport à des points fixes de la roche encaissante.

Un fil d'acier fut tendu entre des crochets scellés dans les rochers des deux rives et l'on commença par mesurer la distance horizontale au câble de burins enfoncés de 50 cms environ dans la glace du parement amont. Mais les burins, même traités en happes de scellement, étaient rapidement expulsés de leur alvéole. On se contenta dans la suite de marquer, par une tache de couleur, les points de repère formés d'une croix taillée dans la glace.

Les premières observations, effectuées au cours du mois de mars dans les galeries transversales les plus courtes, ne furent pas concluantes, les déplacements étant insignifiants.

De plus, on se rendit bientôt compte que les galeries se rétrécissant en cours d'opérations, les déplacements enregistrés ne pouvaient être que la résultante du mouvement d'ensemble de la galerie et du rapprochement des parois.

Une nouvelle série de mesures fut entreprise dans la galerie oblique J-K, longue de 10 m., à une distance de 160 m. du front, sous 86 m. de glace et à 10 m. au-dessus du fond (fig. 5). On repéra par rapport au câble 8 profils espacés de 1 m. Sur chacun des profils, on mesura, à de fréquents intervalles, les coordonnées rectangulaires de 4 points situés sur les parements amont, aval, au plafond et au radier. Ces opérations furent poursuivies du 13 avril au 16 mai et interrompues à cette date par la nécessité de remettre la galerie au gabarit voulu pour assurer la circulation. Les mouvements observés durant ce laps de temps ont conservé une allure régulière et progressive, aux inexactitudes de mesure près. Ils sont détaillés dans le tableau I qui permet de tirer les conclusions suivantes :

TABLEAU I. — Déplacements cumulés des points de repère observés dans la galerie oblique J-K du 13 avril au 16 mai 1942, en cms.

		Points	MOUVEMENT VERTICAL POSITIF VERS EN BAS					MOUVEMENT LONGITUDINAL POSITIF VERS L'AVAL					MOUVEMENT TRANSVERSAL POSITIF VERS LA RIVE GAUCHE				
			20/4	23/4	27/4	6/5	16/5	20/4	23/4	27/4	6/5	16/5	20/4	23/4	27/4	6/5	16/5
PAREMENT AMONT	Riv. dr.	1	1	1,5	3,5	6	9	1	1,5	2,5	4	6	6	6,5	7	5	8
		2	2	4	5	3,5	6	2	3	4,5	12,5	13.5	4,5	4,5	3	8,5	9
		3	1	2	3,5	7	11,5	1,5	3,5	5,5	8,5	12	5.5	3,5	5	6,5	7
		4	0,5	2	4,5	15	17	3,5	5,5	7,5	14	16.5	3,5	2	3	3	4
		5	1	1,5	4	9	13,5	4	6	8,5	13	18	6,5	5	6	4,5	6
	Riv. g.	6	1,5	3	5,5	9	13,5	2,5	5	6,5	8,5	11,5	4	6.5	9	9	10
		7	1,5	3,5	5,5	8,5	13	3	5	6,5	8	12	2,5	5	9.5	9	10
		8	1	1	4	9	13	1,5	3	4,5	5,5	9	3.5	1,5	8.5	11	12
PAREMENT AVAL	Riv. g	16	1	4	7	12	17	- 4	- 5,5	- 8	- 12	- 16	4	4	9	3.5	5
		15	6	8,5	15	13	19	- 3 5	- 5	- 7	- 10	- 16	9	5,5	10,5	2	3
		14	4	5	8	12	16,5	- 4	- 5,5	- 8	- 12	- 18	0	4.5	2	1,5	1,5
		13	2	4	7,5	12	15	- 5	- 5,5	- 7,5	- 12.5	- 18	2,5	4	3,5	4	5
	Riv. dr	12	6	7,5	10	14	19	- 3	- 4	- 7	- 12,5	- 16	0	1	0,5	1	2
		11	4,5	8	9	14,5	17.5	- 3.5	- 5,5	- 8	- 10,5	- 15,5	2,5	4	0	0	1
		10	5	6	11	13,5	17	- 4,5	- 6	- 8	- 13	- 18	1	0	- 3	2	3
		9	5	2	5	7,5	9	- 4,5	- 6,5	- 7,5	- 12,5	- 18	- 1	0	1,5	3	4
CALOTTE	Riv. dr.	17	5,5	7,5	10,5	7,5	7,5	- 1,5	- 2	- 4	1	1,5	3	3,5	3,5	1	1,5
		18	6	8,5	11	17.5	21	- 0,5	- 3	0	1,5	10	2,5	0	3,5	4	5
		19	6	8.5	11	20,5	24,5	1	3	3	5	8	3	3	3	3,5	5
		20	6	8	11,5	17	25	2	3	4,5	7,5	11	2,5	3	3,5	3	5,5
	Riv. g.	21	6	8	11	19	25	3	3,5	5	8,5	12	2.5	3,5	3,5	4	7
		22	6	8	11,5	20	26	1,5	1,5	2	3	6	3	4,5	5	6	6.5
		23	6.5	8,5	12,5	20,5	29.5	0	0	0	0	0	2,5	3	5	8	8,5
		24	7	9	13	22,5	30	- 1	- 1	- 1,5	0	0	3	3	4	4	5
RADIER	Riv. dr.	32	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2
		31	- 0,5	- 0,5	0	1,5	1,5	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2,5
		30	0	- 0,5	0,5	1,5	2,5	0	0	0	2	2,5	0	2	2	1	1,5
		29	- 0,5	- 1	- 0,5	1	2	0	0	- 1	2	2	0	1	1,5	1	1,5
	Riv. g.	28	0	- 0,5	0,5	2	3	0	0	- 1.5	1,5	2	0	1	1	1	1,5
		27	0	- 0,5	1,5	3	4	0	0	0	0	2,5	0	7	8	2	2,5
		26	0	- 0,5	0	1	2	0	0	0	0	0,5	0	0	3,5	2,5	3,5
		25	0,5	- 1	- 1	2	1	0	0	0	1	1,5	0	0	1,5	1,5	2

N. B. — Les mouvements transversaux, mesurés avec une équerre, sont sujets à caution.

1) *Mouvement de fermeture de la galerie.* — On constate de prime abord que la galerie se referme rapidement, à l'allure de 1 cm. environ par jour en largeur, et 2/3 de cm. en hauteur. Le mur amont subit une poussée vers l'aval, son vis-à-vis témoigne d'une poussée encore plus active en sens contraire. Le plafond s'abaisse nettement tandis que le radier est à peu près stable.

2) *Déplacements simultanés vers l'amont sur les bords, et vers l'aval au milieu.* — On peut admettre, sans s'écarter beaucoup de la réalité, que la vitesse de fermeture de la galerie est du même ordre de grandeur sur toute sa périphérie. Si l'on détermine le déplacement moyen des quatre points observés dans chaque profil, les mouvements de fermeture s'annulant deux par deux, on aura une bonne approximation du mouvement résiduel de l'ensemble du profil. Cette résultante a une composante assez uniforme (de 4 à 6,2 et en moyenne de 4,8 cms) dans la direction rive gauche, provenant principalement d'une disposition asymétrique des parois encaissantes, la rive gauche étant surplombante, tandis que la droite a un fruit d'environ 1 : 2. La composante située dans un plan perpendiculaire au fil d'acier montre qu'il n'y a pas, dans l'ensemble, de déplacement longitudinal sensible : le mouvement observé est de 2,3 cms vers l'amont sur les deux rives, et de 4 cms aval au milieu de la gorge. Mesuré parallèlement à l'axe de la gorge, ce mouvement se réduit même à une avance de 2 cms au milieu, et à un recul de 4 à 5 cms sur les rives. La glace paraît esquisser sur les bords un mouvement à contre-pente, analogue à celui d'un torrent coulant entre des berges très rugueuses.

3) *Torsion de la galerie.* — L'examen des mouvements individuels des parois permet de dégager un mouvement de torsion du milieu de la galerie vers l'aval, les déplacements en ce sens l'emportant sur les tendances inverses et étant le plus sensibles au plafond et sur le parement aval. C'est le même mode de déformation qui s'était déjà manifesté de toute évidence dans la première galerie qu'il avait fallu rapidement abandonner.

4) *Prépondérance des mouvements verticaux.* — Autre phénomène remarquable et inattendu : le déplacement vertical, dans ces couches profondes, l'emporte de beaucoup sur les mouvements longitudinaux de l'un ou l'autre sens puisqu'il atteint 9 cms sur rive droite, 16 cms au milieu et sur rive gauche, 13,5 cms en moyenne pour l'ensemble des 32 points, soit 4,5 mm. par jour.

En résumé, aussi invraisemblable que cela paraisse, le mouvement principal du glacier en ces points de la gorge est donc un mouvement *vertical* d'affaissement, plus important au milieu que

près des parois. Le mouvement longitudinal est secondaire. Il est dirigé vers l'amont sur les bords et vers l'aval au centre avec, en moyenne, une légère prépondérance pour le mouvement amont : 1,8 cm. On pourrait être tenté d'attribuer cette allure paradoxale du mouvement des couches profondes du glacier à des conditions topographiques particulières et toutes locales. Mais, en réalité, elle se manifeste tout le long de la galerie, entre les points I et U, partout où l'on dispose de points de repères. Il a déjà été fait mention de la glace cannelée voisine du point M (fig. 4); le mouvement y a été observé du 13 avril au 16 juin. Les points de repères sont descendus de 33 cms, soit à la vitesse de 5,15 mm. par jour, en se déplaçant de 4 cms vers l'amont et de 14 cms vers la rive gauche, ce dernier mouvement imputable à la déformation plastique de la glace non soutenue par le rocher.

Une autre série de mesures fut exécutée dans une galerie transversale de 5,8 m. de long, au fond de la grotte, au point U, sous 130 m. de glace (fig. 6). On y suivit le mouvement de trois séries de trois points situés sur les côtés et le plafond de la galerie à 1, 2 et 3 m. de la rive droite. Ces mesures furent interrompues par l'arrivée de la crue de printemps.

En 43 jours, du 13 avril au 26 mai, le parement amont s'est avancé en moyenne de 9,5 cms, en glissant de 2 cms sur la rive gauche et en descendant de 28 cms, tandis que les points du parement aval exécutaient un mouvement de 15 cms vers l'amont avec glissement latéral de 7 cms et un affaissement de 26 cms, et que ceux du plafond, en se déplaçant vers l'aval de 2 cms et vers la rive gauche de 4 cms, s'abaissaient de 35 cms. Le glacier épouse étroitement sur rive droite les contours du rocher, tandis que, sur l'autre rive, il en était séparé par la galerie de recherche.

Nous avons donc affaire à un mouvement presque essentiellement vertical descendant, d'une amplitude moyenne de 28 cms, soit 6 1/4 mm. par jour, avec une légère composante vers l'amont de 3 cms en moyenne et un tassement vers la rive gauche de 4,5 cms.

Enfin, une tranchée transversale ayant été établie dans la gorge jusqu'au talweg, à l'emplacement présumé de l'axe du barrage de prise d'eau, on y a observé le déplacement de trois séries de points situés sur les parements amont, aval et en calotte (fig. 7).

Les mesures furent entreprises le 3 juin 1942 et répétées jusqu'au 26 juillet. A cette dernière date, un crampon de fixation du câble fixe tendu à travers la galerie commençait à être envahi et déformé par la glace et les mesures furent suspendues. La dernière série d'observations fournit par conséquent pour les points les plus proches de la rive gauche des cotes minima d'abaissement. La tranchée de recherche, large à l'origine de 70 cms environ, n'en avait

plus à la fin juillet que 30 à 40 et paraissait, en octobre, sur le point de se refermer. (Voir pour le détail des mesures le tableau II.)

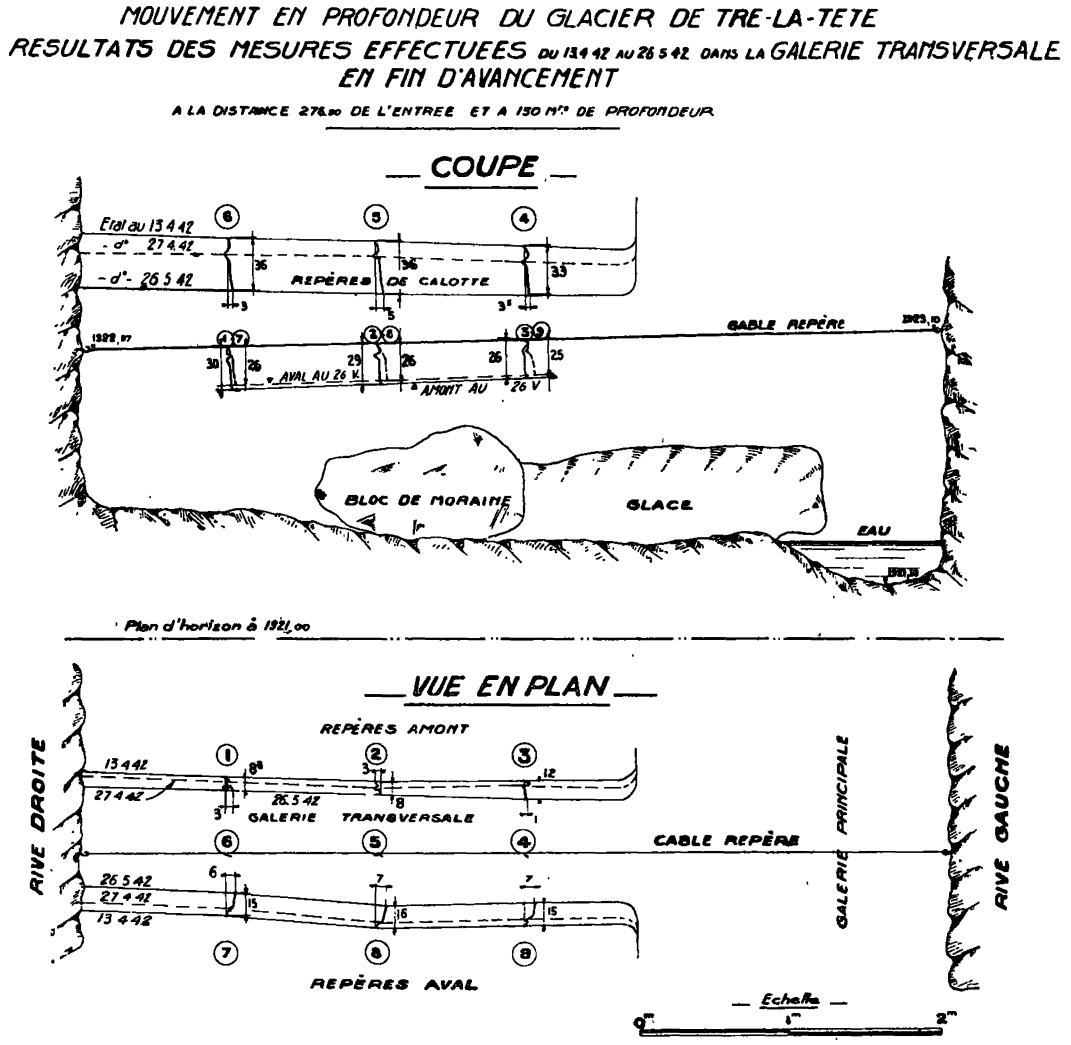


Fig. 6. — Mouvement en profondeur du glacier de Tré-la-Tête.

En résumé :

Le mouvement descendant vertical reste le principal; il est à peine plus accentué au milieu de la galerie que sur la rive droite; les moyennes de l'affaissement des parements des quatre profils donnent vers la rive droite 43 et 43 cms, au centre 45 et 44 cms,

soit 8,25 mm. par jour, tandis que la calotte s'abaisse de 57 cms en moyenne.

Le mouvement transversal semble dû principalement à la forme déversée de la gorge et à la saignée pratiquée sur une assez grande longueur le long de la rive gauche (pour reconnaître l'aspect de la paroi au point de débouché de la future galerie de dérivation). La glace, non soutenue, s'est dirigée de ce côté au point qu'une rimaye d'une trentaine de cms s'est formée le long de la rive droite, du côté du parement amont, d'où les forts déplacements transversaux.

Les déplacements longitudinaux (dans le sens du talweg) ont confirmé la tendance au mouvement régressif puisque le parement aval est remonté vers l'amont en moyenne de 27,5 cms, tandis que le parement amont n'est descendu vers l'aval que de 9,5 cms, soit, en moyenne, un déplacement vers l'amont de 9 cms; les points en calotte, plus proches du parement amont que de l'aval, ont subi un mouvement analogue au premier, c'est-à-dire vers l'aval.

La galerie de dérivation pratiquée sur rive gauche ayant été percée tout récemment, l'accès à cette partie du glacier vient d'être rétabli. On a retrouvé les restes, très déformés, de cette tranchée. Les repères encore identifiables ont été nivelés. En 186 jours, du 26 juillet au 29 janvier 1943, les points des parements se sont encore abaissés de 1,26 à 1,60 m., soit 1,44 en moyenne ou 7 3/4 mm. par jour, contre 7,85 mm. pour la période entière de 240 jours; ceux de la calotte sont descendus de 1,79 à 1,88 m.; dans ces derniers chiffres est comprise la déformation du plafond qui formait un ventre, à tel point qu'en certains endroits, il descendait au niveau des points des parements.

Ainsi, l'allure de la descente du glacier est restée remarquablement constante. On remarquera au reste que toutes ces mesures, exécutées sur des profils très peu distants et renouvelées à de brefs intervalles, font ressortir des mouvements d'une vitesse très uniforme dans le temps et variant d'une façon lentement graduée suivant les lieux. Nulle part, sauf dans le cas d'un décollement accidentel avec formation de crevasse, on n'a constaté de mouvement saccadé ni de glissement localisé dans un plan de clivage. Toutes les déformations se sont montrées progressives; ce sont celles d'une masse plastique ou du moins lentement malléable.

La résultante des mouvements vertical et horizontal a un fruit incliné vers l'amont de 1/4 environ. Remarquons que le glacier est en recul prononcé; son mouvement propre doit être assez faible et il est bien possible qu'en période de crue, le fruit du mouvement d'ensemble dans la gorge se redresse en se rapprochant de la verticale ou même en la dépassant. Néanmoins, les stries gravées dans la roche encaissante de la gorge sous-glaciaire sont pareillement déversées. Vu la rareté des cailloux qui les ont burinées, elles ne

TABLEAU II. — Déplacements cumulés des points de repère observés à l'emplacement du barrage du 3 juin 1942 au 26 juillet, complétés par quelques observations du 29 janvier 1943.

		Points	MOUVEMENT VERTICAL POSITIF VERS LE BAS					MOUVEMENT LONGITUDINAL POSITIF VERS L'AVAL				MOUVEMENT TRANSVERSAL POSITIF VERS LA RIVE GAUCHE			
			16 VI	27 VI	6 VII	26 VII	29 I	16 VI	27 VI	6 VII	26 VII	16 VI	27 VI	6 VII	26 VII
PAREMENT AMONT	Centre	9	10	20	28	45		2	3	5,5	5	2,5	22	23	27
		10	10,5	20	29	47	207	3,5	5,5	7,5	9,5	30	28	29	33
	Riv. dr.	11	14,5	20	27,5	46	196	4	7	9	13	31	32	34	39
		12	14,5	23	32	50		2,5	5,5	8,5	10,5	31	32	34	39
PAREMENT AVAL	Centre	4	12	19	27	43	189	- 8	- 13	- 21	- 27	3.5	4,5	6	8
		3	12	19	25	43	179	- 8	- 15	- 20	- 30	3	6	7,5	9,5
	Riv. dr.	2	9	18	25	40	166	- 8	- 14	- 19	- 29	6	6	8	10
		1	9	15	22	36		- 6,5	- 12,5	- 15,5	- 24,5	4,5	5	6,5	8
CALOTTE	Centre	5	15	28	38,5	57		6	8	7	9	3	4	6	8
		6	16,5	28	41	61	249	2	4	4	10	3	3	6	8
	Riv. dr.	7	14,5	27	38	58	237	2,5	3	4	6	2	0	3	6
		8	13,5	25	36	54		1	2	3	6	2	0	1	2

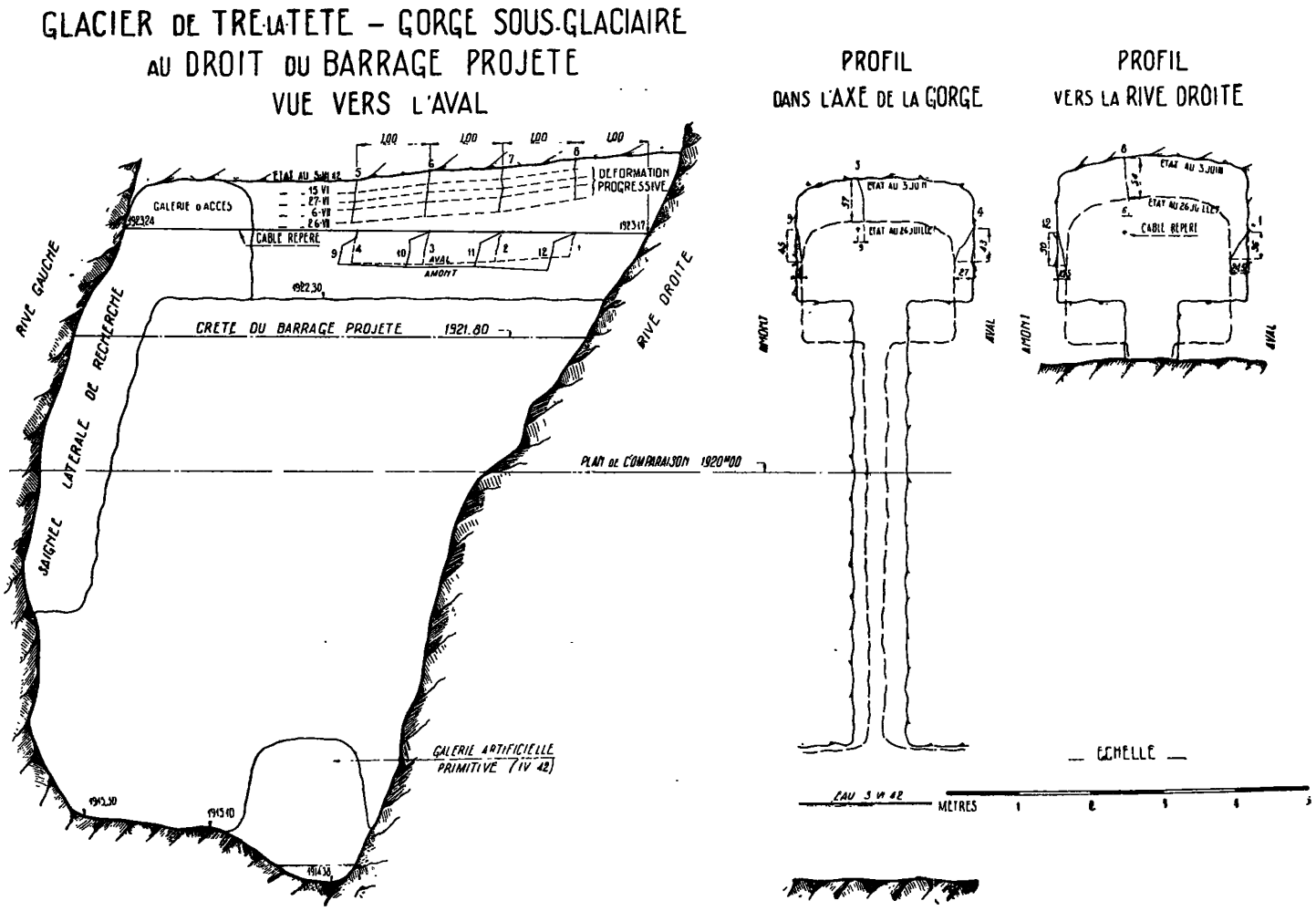


Fig. 7. — Gorge sous-glaciaire au droit du barrage projeté.

peuvent être toutes de fraîche date et l'on n'en remarque pas qui se coupent; elles sont exactement parallèles (pl. X D).

Bref, sur une longueur de 130 m., la glace contenue dans la gorge sous-glaciaire descend presque verticalement, à l'allure de 4,5 à 8,25 mm. par jour ou 1,65 à 3 m. par an. Nécessairement, elle fond en fournissant annuellement 1,5 à 2,7 m^3 d'eau par m^2.

Fusion sous-glaciaire.

Cette constatation fournit un nouvel élément à la détermination de la fusion sous-glaciaire qui, pour ce cas particulier, se révèle beaucoup plus considérable qu'on ne l'admet généralement puisque, ramenée à une surface d'un km^2, elle correspondrait à un débit de 50 à 85 l./sec.

Nous sommes loin des 7 à 10 mm. de fusion annuelle attribuée par certains auteurs au rayonnement de la chaleur terrestre, et même des 9 cms dont pourrait fondre un grand glacier du fait du travail fourni par sa descente dans la vallée, (Fallwärme) [11].

Bien entendu, il ne s'agit ici que d'un cas spécial qu'il n'est pas question de généraliser. On peut essayer d'expliquer cette fusion intense par la localisation concentrée d'un travail important de déformation de la glace incluse dans le canyon, qui exerce une sorte de freinage sur le mouvement des couches de glace superficielle, d'où dégagement de chaleur et fusion anormale. D'autre part, dans cette gorge étroite et profonde, un grand périmètre de roche encaissante transmet la chaleur terrestre à un mince lambeau de glace. Cette action doit s'y faire sentir avec une efficacité bien plus considérable que ce ne peut être le cas pour un glacier contenu dans un large lit en forme d'auge.

Enfin, on serait tenté d'attribuer la majeure partie de cette fusion à l'action du torrent sous-glaciaire qui, attaquant la glace par dessous, déblayerait l'espace nécessaire à la descente des couches supérieures. Toutefois, le mouvement de descente conservant une grande intensité pendant les basses eaux, alors que le torrent n'intervient pas et que le chenal sous-glaciaire s'est stabilisé aux dimensions du régime d'hiver, cette explication n'est pas entièrement pertinente [12].

---

[11] Erdwärme und Gletschertemperatur. *Les Alpes*, nov. 1937, par A. Hoïl.

[12] Cette impression est encore renforcée par les dernières explorations le long du talweg : la glace restant suspendue à une assez grande hauteur dans la gorge, elle fond néanmoins fortement en plein hiver en fournissant d'abondantes gouttières et jusqu'à des filets d'eau continus.

La glace en ce fond de gorge présente des cristaux de dimensions exceptionnelles, assez faciles à détacher de la masse; les fissures capillaires, élargies par la fonte, les délimitent d'une façon très nette, comme les pièces d'un jeu de puzzle atteignant parfois plus de 20 cms de longueur (pl. XII A et XII B).

Mesure de la pression de la glace.

On avait pensé pouvoir mesurer la pression de la glace au moyen d'un vérin, muni d'un manomètre et exerçant sa pression sur le plafond et le radier de la galerie sous 120 m. de glace, par l'intermédiaire de planches convenablement dimensionnées; mais les résultats de ces essais n'ont pas été concluants, en raison entre autres du déplacement relatif des deux points d'appui. Le vérin, mis en charge pour exercer une pression de 7.500 kgs sur une surface de 900 cm², soit 8,3 kgs/cm², n'indiquait plus, après 80 heures d'essai, qu'une pression de 3,5 kgs/cm².

L'installation de témoins sonores ou d'indicateurs de pression au moyen de quartz piézoélectrique n'était pas réalisable dans les conditions actuelles en raison de la précarité des communications avec l'extérieur de la galerie et des délais de livraison. Cet essai dut être différé.

On s'est donc contenté dans la suite d'observer la tenue au flambage de liteaux calibrés de sections diverses coincés verticalement dans la galerie de recherche à quelque 260 m. de distance du front, à environ 120 m. de profondeur. Leurs extrémités étaient coupées d'équerre. Ils étaient calculés au flambage de façon à supporter une pression exercée sur leurs extrémités, donnée par la formule

$$\frac{\pi^2 E}{\left(\frac{l}{i}\right)^2}$$

où l est la longueur entre appuis.

En admettant pour le module d'élasticité la valeur $E = 10.000$ kgs/cm², ces liteaux devaient pouvoir supporter des pressions comprises entre 40 et 4 kgs/cm². Aucun de ces témoins n'a montré de trace de fatigue. Ils se sont enfoncés progressivement dans la glace à l'allure du rétrécissement de la galerie. Sur ce résultat, l'essai a été modifié en calant les liteaux sur des plaques d'appui carrées de 7 et de 15 cm. de côté. Les deux derniers témoins avaient comme dimensions 1280 × 28 × 18 et 1195 × 35 × 28 mm.

Le plus faible, qui devait pouvoir supporter une pression de 1,67 kgs/cm², se cintra, tandis que le second résistait, indiquant une pression inférieure à 2,0 kgs/cm².

Ces essais ne peuvent prétendre donner plus qu'un ordre de grandeur des pressions régnantes dans les couches profondes de la glace de la gorge, car la malléabilité joue un rôle assez mal défini, probablement très variable avec la vitesse de la glace; en outre, les pressions unitaires peuvent varier fortement avec la grandeur des

surfaces d'appui. Peut-être même, des mesures pratiquées à l'intérieur de la masse donneraient-elles des résultats très différents. D'après les diverses constatations faites, la glace se détourne en se déformant des obstacles, tels que saillies rocheuses, assez massifs pour lui résister. Nous avons même pu observer en un point comme une tournure de glace rappelant la forme et les dimensions d'une défense de mammouth. Des fers scellés dans la roche et atteints par la glace se courbent par contre facilement. Les blocs de moraines internes sont très solidement sertis dans la glace et peuvent concentrer sur un seul point la pression d'une grande surface, d'où les stries du rocher.

CONCLUSIONS

Les divers phénomènes que l'on vient de présenter ont-ils une portée générale?

Selon toute vraisemblance, certaines constatations doivent se vérifier dans la plupart des appareils de quelque importance, telles les températures se maintenant en profondeur au-dessus du point de congélation, la persistance d'une voûte sous-glaciaire peu résistante à l'érosion, la vitesse réduite en profondeur et sur les bords de la glace du dissipateur, sa malléabilité, et, si le glacier glisse sur un fond rocheux, la médiocrité de la moraine de fond.

Par contre, la prédominance de la composante verticale du mouvement et, en corrélation avec elle, la déformation des stries boueuses, l'intensité de la fusion, puis les mouvements tourbillonnaires et rétrogrades, la faiblesse de la pression, nous paraissent liés à la présence d'une gorge sous-glaciaire. Les proportions de celle-ci, sa largeur et sa pente, ainsi que celle du lit majeur du glacier, sans compter l'incidence des phases de crue et de décrue, doivent avoir sur ces particularités une très large influence.

Peut-être les travaux d'aménagement de la prise et les expériences que nous en fournira l'exploitation permettront-ils d'étendre nos connaissances, surtout si une phase de crue nous donne l'occasion d'observer dans quelle mesure elle est de nature à modifier l'allure des phénomènes un peu mystérieux qui se passent dans les profondeurs d'un glacier.