

Zeitschrift:	Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali
Herausgeber:	Schweizerische Naturforschende Gesellschaft
Band:	90 (1907)
Artikel:	Le problème de l'érosion et du surcreusement glaciaires
Autor:	Brunhes, Jean
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-90156

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

LE PROBLÈME DE L'ÉROSION ET DU SURCREUSEMENT GLACIAIRES

PAR

le prof. Dr JEAN BRUNHES.

Recouvrant tous les faits de structure et se liant à tous les faits de démolition qui avaient préparé la morphologie actuelle des Alpes suisses et de la zone subalpine, les glaciers de l'époque quaternaire ont imprimé au sol helvétique de très visibles et généraux traits superficiels.

Il est impossible d'entreprendre aucune étude de sciences naturelles se rapportant à la Suisse sans tenir compte des faits glaciaires, et cette assemblée nous a montré d'une manière précise à quel point les géologues, botanistes et zoologistes se préoccupent à bon droit des destinées imposées à la partie de la terre émergée que nous habitons, par les quatre grandes glaciations. A fortiori, les géographes, dont le dessein premier est d'expliquer la forme du terrain, doivent-ils s'efforcer avant tout de discerner, dans le paysage et dans la structure terrestre, ce qui incombe à l'action glaciaire.

Je ne rappellerai pas ici les débuts de la glaciologie. Je me contenterai d'évoquer les grands noms de Charpentier, Venetz, Agassiz, et je mentionnerai surtout la perspicacité divinatrice de Jean-Pierre Perraudin, de ce paysan de Lourtier, qui observa tout à la fois les phénomènes de transport et les phénomènes d'usure par les glaciers. Dans

la brève et dense notice que notre collègue et ami, M. F.-A. Forel a consacrée à ce précurseur, il a reproduit les deux fragments documentaires les plus significatifs, et je me permets de vous les citer à mon tour :

Le premier est une page authentique de Charpentier :

« La personne que j'ai entendue pour la première fois émettre cette opinion (l'hypothèse qui attribue à des glaciers le transport des débris erratiques) est un bon et intelligent montagnard nommé Jean-Pierre Perraudin, passionné chasseur de chamois, encore vivant au hameau de Lourtier, dans la vallée de Bagnes. Revenant, en 1815, des beaux glaciers du fond de cette vallée, et désirant me rendre le lendemain dans la montagne de Mille au Saint-Bernard, je passai la nuit dans sa chaumière. La conversation durant la soirée roula sur les particularités de la contrée et principalement sur les glaciers qu'il avait beaucoup parcourus et qu'il connaissait fort bien. Les glaciers des montagnes, me dit-il alors, ont eu jadis une bien plus grande extension qu'aujourd'hui. Toute notre vallée jusqu'à une grande hauteur au-dessus de la Dranse a été occupée par un vaste glacier qui se prolongeait jusqu'à Martigny, comme le prouvent les blocs de roche qu'on trouve dans les environs de cette ville et qui sont trop gros pour que l'eau ait pu les y amener. Quoique le brave Perraudin ne fit aller son glacier que jusqu'à Martigny, probablement parce que lui-même n'avait peut-être guère été plus loin, et quoique je fusse bien de son avis relativement à l'impossibilité du transport des blocs erratiques par le moyen de l'eau, je trouvai néanmoins son hypothèse si extraordinaire, si extravagante même, que je ne jugeai pas qu'elle valût la peine d'être méditée et prise en considération ».

Le 2^{me} document est écrit par Perraudin lui-même :

« *Observations faites par un paysan de Lourtier.*

— Ayant depuis longtemps observé des marques ou cicatrices faites sur des rocs vifs et qui ne se décomposent

point (ces marques sont toutes dans la direction des vallons) et dont je ne connaissais pas la cause, après bien des réflexions, j'ai enfin, en m'approchant des glaciers, jugé qu'elles étaient faites par la pression ou pesanteur des dites masses, dont je trouve des marques au moins jusqu'à Champsec. Cela me fait croire qu'autrefois la grande masse des glaciers remplissait toute la vallée de Bagnes, et je m'offre à le prouver aux curieux par l'évidence, en rapprochant les dites traces de celles que les glaciers découvrent à présent. — Par l'observateur J.-P. Perraudin¹⁾.

Depuis lors, les naturalistes ont fait plus qu'observer les actions de détail des glaciers, ils ont tenté surtout de juger leur œuvre d'ensemble, et tour à tour cette œuvre est apparue comme plus grande, puis comme plus restreinte. Après avoir mis au compte des glaciers une part prépondérante du travail de démolition et d'érosion de nos régions montagneuses, les géographes ont été plutôt tentés de réduire le rôle démolisseur des glaciers et ils en ont fait par excellence des agents conservateurs du modelé. L'opinion générale en était là lorsqu'en 1899 le professeur Penck, alors professeur à l'Université de Vienne, aujourd'hui professeur à l'Université de Berlin, l'un des plus méthodiques explorateurs des Alpes et le maître de toutes les études de topographie glaciaire, profita du Congrès géographique international de Berlin pour attirer l'attention des observateurs sur l'importance du travail opéré par les glaciers. Les glaciers ont « surcreusé » les Alpes. Le mot était nouveau, ce mot d'*Übertiefung* que Kilian a très heureusement traduit par « surcreusement » ; et l'on peut dire aussi que l'idée était nouvelle ; à l'heure où elle fut si vigoureusement exprimée et si habilement défendue, elle était révolutionnaire. Depuis huit ans, géographes et glaciologues des Etats-Unis et des pays euro-

¹⁾ F.-A. Forel, *Jean-Pierre Perraudin* (*Bul. Soc. Vaudoise Sc. nat.*, XXXV, n° 132).

péens ont multiplié les recherches et les discussions pour élucider le problème du vrai rôle joué par les glaciers.

Penck et Brueckner viennent de nous donner l'énorme ouvrage *Die Alpen im Eiszeitalter*¹⁾ qui est la condensation de toutes les études fragmentaires sur le glaciaire des Alpes et en même temps le dossier original de leur propre théorie. Pour eux, les glaciers ont été les principaux facteurs de l'approfondissement des vallées alpines et, dans le glacier, c'est la glace qui est elle-même le facteur principal de l'arrachement et du surcreusement.

Que faut-il penser de cette thèse qui a été si féconde et comment pouvons-nous comprendre aujourd'hui le mécanisme destructif du travail par le glacier ? C'est à ces questions que je voudrais répondre le plus brièvement possible en examinant d'une manière critique les traits essentiels de la morphologie glaciaire. Après avoir soumis à l'analyse critique les faits caractéristiques généraux de ce modèle, je grouperai quelques faits morphologiques sporadiques mais qui n'en sont pas moins typiques et qui possèdent à ce titre une valeur exceptionnelle.

I.

Faits caractéristiques généraux de la morphologie glaciaire.

Si nous réduisons à l'essentiel les caractères de la morphologie des vallées glaciaires, nous pourrons les ramener à trois chefs :

1^o. — Le profil transversal de ces vallées est en U. Tandis que les vallées torrentielles toutes fraîches se tra-

¹⁾ Huit livraisons de ce grand ouvrage ont déjà paru à Leipzig, chez Tauchnitz : l'impression et l'illustration sont dignes du texte. Voir l'excellent article synthétique publié sur la partie suisse de ce livre par M. Paul Girardin, sous le titre, *Le modèle du Plateau suisse à travers les quatre glaciations* dans la *Revue de géographie annuelle* du prof. Vélain, I, 1906–1907, p. 339–371.

duisent en coupe verticale par un V très aigu et se traduisent aussi en plan par des courbes topographiques dessinant des V très aigus vers l'amont, les grandes vallées glaciaires comme la vallée du Rhône, la vallée de l'Aar, la vallée du Rhin, etc., se traduisent en coupe comme en plan par des U.

2°. — Le profil longitudinal d'une vallée glaciaire est un profil en escaliers. Tandis que le cours d'eau arrivé à maturité se rapproche de plus en plus du profil longitudinal régulier qui sera le profil d'équilibre, le glacier laisse à découvert après son retrait une vallée qui se décompose en paliers successifs. A chacun de ces paliers correspond même le plus souvent une topographie à courbes fermées, et l'on sait par ailleurs que cette topographie à courbes fermées est le trait caractéristique par excellence de la topographie des grands espaces, comme la Finlande ou le Norddeutsches Flachland, qui ont été ongtemps occupés par une calotte glaciaire.

3°. — Lorsque le glacier s'est retiré et que ses glaciers affluents se sont retirés aussi, on découvre un manque de correspondance entre le plafond des vallées affluentes et de la vallée principale. Tandis que la correspondance des niveaux résultant de l'érosion régressive paraît être le cas normal des confluents des réseaux hydrographiques, la discordance apparaît au contraire comme un fait de morphologie glaciaire. Cette différence de niveau au confluent est appelée par Penck *Mündungsstufe*, et nous avons proposé de l'appeler en français « gradin de confluence ».

Tous ces faits se rencontrent avec une étonnante et normale régularité dans tous les grands sillons alpins qui ont été les lits de grands fleuves de glaces, et ce sont bien en vérité des marques distinctives de la sculpture déterminée par les glaciers eux-mêmes.

Mais ces faits sont-ils aussi spécifiquement et exclusivement glaciaires qu'on semble le supposer? Sans nier, encore une fois, leur généralité et leur valeur expressive, nous voudrions, par une sorte de critique interne démon-

trer qu'il n'y a peut-être pas entre les procédés de travail du glacier et les procédés de travail des eaux courantes autant d'opposition ni une aussi forte antinomie qu'on le prétend.

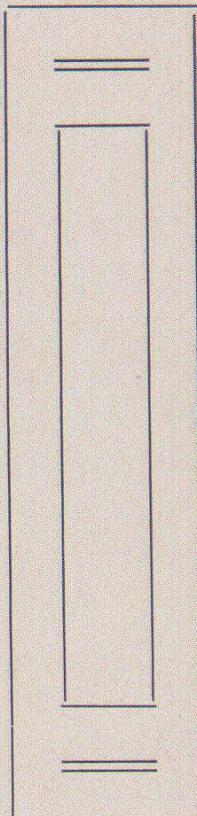
Constatons d'abord qu'en bien des points, le travail torrentiel et le travail proprement glaciaire voisinent et se mêlent. Là où des glaciers ont longtemps séjourné et où il ne se trouve pas aujourd'hui de cours d'eau défini, là, par conséquent où la morphologie est restée à peu près identique à celle qu'elle était sous la glace du glacier, nous découvrons des faits authentiques d'action torrentielle. Que sont en effet ces énormes marmites du *Gletschergarten* de Lucerne ou du seuil de Maloja sinon les effets des mouvements tourbillonnaires des eaux ruisseantes? On les appelle *Gletschermühlen*; mais ces « moulins de glaciers » ne sont que des moulins d'eaux tourbillonnant.

Reprendons l'un après l'autre les traits regardés comme caractéristiques de l'action glaciaire.

1°. *Profil transversal en U.* — Voici comment nous analysions les détails de ce type de profil en U dans un mémoire récent :

« Transportons-nous dans une vallée très nettement surcreusée, comme la vallée de la Lütschine Blanche à Lauterbrunnen, au pied du massif de la Jungfrau, et considérons le trog ou l'auge de cette vallée glaciaire en face de cette cascade du Staubbach que nous citions précisément tout à l'heure. Quels sont les deux éléments qui produisent la forme en U? Des parois verticales dans le haut, et vers le bas des pentes de puissants éboulis, dont les parties inférieures ont été çà et là reprises, remaniées et étalées par les eaux de ruissellement, terminant ainsi la pente normale raide de l'éboulement par la pente normale beaucoup plus douce du cône de déjection. Examinons chacun de ces éléments topographiques ou morpho-

a) FRONT DU
GLACIER DE
SAAS FEE O O
(VALAIS) O O



Le glacier s'est partagé en deux bras qui ont laissé subsister entre eux une longue échine rocheuse qui porte le nom de *Lange Fluh*. — De plus en avant de la langue droite du glacier (partie gauche de la figure), on constate, avec une très grande netteté, comment les eaux torrentielles sous-glaciaires de cette langue concentrées en deux chenaux latéraux principaux, travaillent elles-mêmes à leur tour à mettre en saillie une bosse rocheuse secondaire.

b) CONFLUENCE
DU GLACIER DE
VUIBEZ ET DU
GLACIER D'AROLLA
(VALAIS)



A son point terminus là même où il rejoint le glacier d'Arrolla (dont on voit bien vers le bas sur la figure la structure en andes alternantes), le glacier de Vuibez a laissé saillie vers le centre une énorme bosse de roche en place.





Le glacier d'Aletsch, en se réduisant de volume et en se retirant, a laissé à découvert des parties de son lit récent non seulement en avant de son front actuel, mais encore parfois sur le côté même du trop dans lequel il est logé; c'est ainsi qu'en descendant de Belalp et en abordant le glacier par sa rive droite, on traverse d'abord un lit latéral que les glaces n'occupent plus aujourd'hui et qui se trouve séparé du lit principal par une longue échine longitudinale de roche en place.

(Photographie de M. Jean Brunhes, 1906.)

logiques : les courbes des pentes dues soit aux éboulis soit au ruissellement n'ont rien de spécifiquement glaciaire ; et quant aux parois des falaises verticales, elles ne sont pas ou ne sont plus moutonnées ; elles ont cette irrégularité scoriaée qui résulte de l'éboulement et de l'écroulement. Donc si la forme d'ensemble du profil transversal est celle de l'auge, cette forme glaciaire résulte de la juxtaposition de deux parties qui n'ont rien de proprement glaciaire.

« Transportons-nous en un autre point des Alpes suisses, dans cette portion de trog glaciaire de la vallée de l'Aar qui est comprise entre la gorge de l'Aar et le lac de Brienz, entre Meiringen et Brienz, et que l'on peut si aisément dominer, puis juger, soit du haut du Kirchet, soit de la route du Brünig, soit de la chute supérieure du Reichenbach. Or comment est constitué ce trog typique, plus large et à fond plus plat que le précédent ? Le fond plat qui produit la base horizontale de l'U résulte du colmatage de l'Aar, et de toute évidence, c'est un élément morphologique fluvial. Quant aux deux parois donnant les branches de l'U, elles sont moins simples, plus hautes et plus étagées qu'elles ne l'étaient dans la vallée de la Lütschine Blanche à Lauterbrunnen : elles se composent de petits méplats séparés par des à-pic ; or, les méplats sont interprétés comme des lambeaux de terrasses glaciaires tandis que les parois des à-pic, sans porter aucune trace glaciaire, sont encore des parois d'écroulement. Et cette analyse nous conduit à cette conclusion inattendue : c'est que les éléments de la forme générale en U qui caractérisent le plus nettement l'U, c'est-à-dire la base horizontale et les branches verticales, ne sont pas glaciaires, tandis que les petits paliers échelonnés aux flancs des parois et qui interrompent la verticalité de ces falaises sont les seules portions du profil transversal qui représentent l'authentique morphologie glaciaire. Et ce que nous disons de la vallée de l'Aar, nous pourrions le dire

de la vallée du Rhône, de la vallée de l'Isère, de la vallée de l'Inn, de la vallée de l'Adige. Toutes ces grandes auges glaciaires ne sont constituées en auges caractérisées que par des éléments morphologiques qui relèvent de l'érosion des eaux courantes et des suites normales de cette érosion »¹⁾.

Mais allons plus loin. Certaines formes de vallées fluviales très jeunes se caractérisent aussi par un profil en U; tous ces lits de cours d'eau engagés et enfoncés dans des roches assez résistantes et qui portent le nom de canyon, — canyons du Colorado, du Tarn, de la Sarine, — sont constitués par un fond approximativement horizontal entre deux rives à peu près verticales, et le profil de ces vallées indiscutablement fluviales rappelle donc le profil en U des vallées ou des lits glaciaires.

2^o *Profil longitudinal en escaliers.* — Or, toutes les vallées fluviales qui sont jeunes comme le sont nos vallées alpines se décomposent également en escaliers. L'action des glaciers a préformé cette morphologie en escaliers, mais des cours d'eau d'autres pays qui n'ont pas subi de glaciations nous révèlent que les cours d'eau commencent leur travail de régularisation du profil par étapes comme par saccades, et que le lit de tout cours d'eau jeune se décompose en un chapelet de biefs plus ou moins brusquement séparés les uns des autres.

Quant aux courbes fermées que nous rencontrons dans le dessin topographique des pays glaciaires, nous les rencontrons aussi dans le figuré détaillé des lits de nos rivières. Si nous dressons, en effet, des cartes à grande échelle de ces lits fluviaux, nous voyons à quel point la fosse creusée au pied de la rive concave d'un méandre s'exprime nécessairement par des courbes fermées. Et

¹⁾ *Erosion fluviale et érosion glaciaire* dans *Revue de géographie annuelle*, I, 1906-1907, p. 284-285.

jusque dans les plus petits ravins, dans les minuscules chenaux des eaux courantes, nous découvrons, à notre grande surprise, sur la topographie du fond, de fréquentes courbes fermées. Ayant étudié de près toute une série de petits chenaux élémentaires, j'ai tenu à relever avec la plus grande précision l'allure vraie du lit, et j'ai imaginé pour cela d'en prendre des moules authentiques à l'aide d'une cire végétale dite *cérésine* qui fût à la fois assez souple pour respecter les moindres détails et assez rapide à se durcir pour que l'opération ne fût pas trop compliquée. J'apporte ici toute une collection de reliefs en plâtre obtenus d'après ces moules¹; et si nous examinons ensemble cette topographie-miniature, nous constatons que bien des tronçons de ces reliefs torrentiels qui sont ici en grandeur naturelle pourraient être aisément pris pour des levés topographiques de vallées glaciaires à $1/25000$ ou à $1/50000$. Défions-nous, je le veux bien, de ces ressemblances très apparentes entre phénomènes d'autant dissemblables dimensions, mais il n'en est pas moins vrai que, par l'analyse minutieuse des plus petits chenaux, puis des lits plus grands de ruisseaux, puis des lits de plus importantes rivières, etc., nous rejoignons d'une manière étonnamment analogue et continue la topographie qui est incontestablement torrentielle à la topographie qui passe pour être proprement glaciaire.

3^e *Gradins de confluence*. — Et nous pourrons en dire tout autant des gradins de confluence. Si nous contemplons, pour ainsi dire, de haut, tout un réseau hydrographique, nous voyons la nappe superficielle des affluents et la nappe superficielle du cours d'eau prin-

¹⁾ J'ai présenté à la Société helvétique ces reliefs eux-mêmes, et j'en ai publié, à titre de spécimens, deux levés topographiques à 1:4 faits par un de mes élèves, M. Cesare Calciati, dans l'article cité : *Erosion fluviale et érosion glaciaire (Revue de géographie annuelle, I, 1906-1907, fig. 4 et 5, p. 286 et 287)*.

cipal se rejoindre au même niveau. Ce raccord si curieux et comme prémedité paraît bien l'un des faits essentiels de la géographie proprement hydrographique. Mais si, plongeant notre regard au-dessous de la nappe supérieure, nous tentons, par des sondages, de vérifier l'allure vraie du fond, nous reconnaissons que très souvent le point de confluence de deux cours d'eau est marqué par un véritable gradin. Ce gradin est plus ou moins sensible, il tend à s'atténuer, à mesure que le fleuve vieillit, mais il existe, et il est souvent même, par rapport aux dimensions totales du lit en longueur et en largeur, de proportions tout à fait comparables aux gradins de confluence des lits glaciaires.

Il faut donc reconnaître que, s'il y a en toute vérité une morphologie glaciaire qui, par sa physionomie d'ensemble, s'oppose très nettement à la morphologie fluviale, les détails de cette morphologie, au lieu d'être rigoureusement le propre des faits glaciaires, rappellent des détails analogues de la morphologie fluviale.

II.

Faits sporadiques typiques de la morphologie glaciaire.

Lorsqu'on veut étudier l'action des eaux courantes sur le fond de leur lit, on peut, soit par l'observation, soit par des sondages, apprécier dans une certaine mesure la marche des faits ; mais, lorsqu'il s'agit de discerner l'action propre des glaciers sur leur fond, le problème est bien plus malaisé.

On peut essayer de pénétrer sous le glacier : Joseph Vallot a ainsi pénétré de quelques dizaines de mètres sous la Mer de glace ; Paul Girardin a tenté également un commencement d'exploration sous-glaciaire ; Flusin et Lory ont exploré la grotte du Grand névé de Belledone ; mais en mettant bout à bout tous les tronçons de lits actuel-

lement glaciaires que nous connaissons, nous serions bien en peine de faire un ruban de 500 mètres.

Un second procédé qui peut nous permettre d'approcher de la réalité des faits localisés sous le glacier, ce sont les forages ; l'on sait avec quel succès Bluemcke et Hess, à l'aide des magnifiques subventions du Club alpin autrichien et allemand, ont méthodiquement multiplié les forages sur le glacier d'Hintereis¹. Ces expériences ont été très fécondes. Toutes les données qu'elles ont fournies sur la vitesse et sur la température des différentes couches de glace des glaciers sont de tout premier ordre. Quant à la connaissance de la topographie du lit par ces points de forage nécessairement très espacés, et atteignant rarement la roche en place du fond, elle ne saurait qu'être fragmentaire.

Dans l'impuissance où nous sommes d'atteindre, pour ainsi dire, le fond du glacier, et de voir de nos propres yeux, en pleine activité, le mécanisme de son travail, il ne nous reste qu'un dernier moyen de tenter la découverte de ce que nous cherchons : c'est d'examiner les parties du sol terrestre qui ont été le plus récemment délaissées par les glaciers ; c'est là qu'on aura de toute évidence, le plus de chances de rencontrer les formes propres au modelé glaciaire dans un état de fraîcheur et de conservation qui autorise à en tirer quelques générales conclusions.

Les glaciers d'aujourd'hui sont presque tous en retrait. Après la grande période de crue de la première partie du XIX^e siècle, qui a marqué une des avancées les plus considérables des systèmes glaciaires survenues durant tous les temps historiques, il s'est manifesté un recul général de ces mêmes appareils qu'ont à peine atténué ou arrêté les petites oscillations de cette crue secondaire que Forel a spirituellement appelée « la crue fin du XIX^e siècle ».

¹⁾ Voir Paul L. Mercanton, *Forages glaciaires (Arch. Sciences physiques et naturelles, 110^e année, IV^e période, XIX, 1905, p. 367-379 et 451-471).*

Pour qui veut découvrir le vrai modelé glaciaire par l'étude des « laisses » glaciaires, l'heure est très opportune, puisque les glaciers sont en train de découvrir leur lit au lieu de tendre à le recouvrir.

1^o *Bosses*. — Or, parmi tous ces glaciers qui sont en pleine retraite, beaucoup laissent apparaître au milieu de leur dernière masse de glace des proéminences de roche en place, des bosses qui partagent même le plus souvent le fond du glacier en deux langues. Soit que la roche se trouve très nettement saillante, comme au glacier supérieur de Grindelwald, comme au glacier de Vuibez affluent du glacier d'Arolla, comme au glacier d'Oberaletsch, affluent du glacier d'Aletsch ; — soit que la présence de la proéminence centrale du fond se manifeste simplement par un bombement du glacier, — soit que cette saillie rocheuse présente l'apparence d'une longue échine découverte, en contact avec la glace, comme au glacier de Saas-Fee (Lange Fluh) ou immédiatement en avant du front actuel du glacier de Zanfleuron, — partout les phénomènes correspondent à une morphologie très distinctive, à savoir, le renflement du fond rocheux du lit du glacier vers son centre. Voir les figures des Planches VIII et IX : ces figures sont inédites et s'ajoutent par suite, sans aucun double emploi, aux documents photographiques déjà publiés dans *Erosion fluviale et érosion glaciaire* : c'est ainsi que la fig. 10, p. 298, de ce précédent mémoire représente la bosse du glacier supérieur de Grindelwald, et les fig. 11 et 12, p. 300 et 301 la bosse du glacier d'Oberaletsch.

2^o *Platten*. — Dès que nous descendons les vallées à la tête desquelles stationnent les glaciers actuels, en suivant par conséquent la route le long de laquelle ils ont si longtemps transporté leurs masses de glace, nous sommes encore frappés par des traits de relief qui rappellent à s'y méprendre ces bosses chauves que nous venons de noter

et de grouper : il s'agit de saillies en forme de croupes qui présentent des caractères si uniformes que, dans la plus grande partie des Alpes allemandes, les paysans leur ont spontanément donné le nom de *Platten*; ce terme générique évoque l'idée d'une espèce de seuil calleux; et très souvent aussi, sur la partie d'amont de cette croupe s'est établie une minuscule agglomération qui a profité de la situation et de l'orientation. Ces *Platten* sont arrondies et modelées selon le même type que les bosses proprement glaciaires ; elles sont séparées des deux versants de la vallée par deux dépressions qui les flanquent, et très souvent l'une de ces deux dépressions est aujourd'hui beaucoup plus profonde que l'autre, car elle est le siège actuel du lit torrentiel repris, creusé, approfondi par les eaux. Comme exemples de *Platten*, signalons celle que nous avons observée et déjà décrite dans le Loetschental, celle qui se trouve en avant du glacier d'Aletsch, en avant du glacier de Fiesch, celle aussi que l'on observe au-dessous du glacier de Durand (Val d'Anniviers), ou du glacier d'Uebeltal (Tyrol). (Voir les photographies de plusieurs de ces bosses dans l'article *Erosion fluviale et érosion glaciaire*).

3^o *Inselberge*. — Descendons encore plus bas dans les grandes vallées alpines. Ça et là, au milieu du fond, se dressent des îlots, parfois très doux de forme, souvent boisés, souvent aussi dominés par quelque château ou quelque petite ville, et qui doivent jouer dans nos recherches de topographie morphologique, un rôle aussi considérable que celui qu'ils ont effectivement joué en géographie humaine : monticules boisés de Salzbourg, butte de Riva, buttes de Sion, grand Belpberg du Quertal de l'Aar, entre Berne et Thoune, etc., tous ces vrais îlots se dressant au milieu des vallées glaciaires sont bien en vérité des *Inselberge*, ainsi que les a dénommés Penck, d'après l'un d'entre eux, le très célèbre Iselberg, situé près d'Innsbruk. Et, pour prendre des exemples tout proches de nous, et appartenant à la vallée de la Sarine, nous constatons deux

Inselberge très représentatifs : celui de Château d'Œx et celui de Gruyères. Dans le bassin de Château d'Œx, rempli de moraines et de cônes de déjection, une butte crétacique s'élève en plein milieu, représentant seule dans le sens transversal, le pointement des roches en place. A l'aval, et en avant de cette butte crétacique, s'en trouvent trois autres de plus en plus petites qui sont comme le prolongement longitudinal de cette crête centrale. C'est sur le plus élevé et le principal de ces *Inselberge* qu'a été construit le vieux château. Du pays d'En-haut, suivons le cours de la Sarine et arrivons à la Gruyère : la vallée est comme coupée par une petite élévation rocheuse qui s'allonge, celle-là transversalement ; et, sur cette saillie, ont été bâti le château et la petite ville de Gruyères. L'*Inselberg* de Gruyères est bien un *Inselberg*, séparé par une dépression très nette du versant de la rive droite et par une dépression moindre, quoique encore visible, du versant de la rive gauche. Un pédoncule rocheux rattache Gruyères à ce flanc gauche, mais ce pédoncule est si surbaissé que la voie ferrée électrique, récemment construite, le traverse par une petite tranchée, sans même qu'on ait eu besoin de construire un tunnel.

4^e *Barres*. — Un quatrième fait morphologique doit être encore rapproché des trois précédents.

Ce sont les barres, ces curieuses barres qui interrompent complètement le thalweg de quelques vallées alpines et qui sont souvent l'occasion et le lieu de vallées épigénétiques. Dans un mémoire qui remonte à 1901, le Professeur Lu-geon a étudié l'origine de ces cas d'épigénie. Je n'examinerai pas ici ces barres à ce point de vue, mais je les observerai au point de vue de leur forme générale. Qu'il s'agisse de la barre de St-Maurice dans le Valais, qui coupe la vallée transversale du Rhône supérieur, ou qu'il s'agisse du Kirchet à travers la vallée de l'Aar en amont de Meiringen, ou qu'il s'agisse encore des barres multiples de la Haute-Engadine, et notamment de la barre ro-

cheuse qui ferme la vallée en aval de St-Moritz déterminant le lac bien connu (voir fig. 6, 7 et 8 de notre mémoire *Erosion fluviale et érosion glaciaire*), etc., ces faits de topographie si originaux manifestent toujours une proéminence vers le milieu de la vallée. Les deux dépressions latérales ont été soumises à des destinées très variables : tantôt l'une d'elles est comblée de moraines, tantôt au contraire elle laisse voir encore la roche presque à nu ; tantôt l'autre a été vigoureusement approfondie par l'action tourbillonnaire des eaux courantes et nous offre aujourd'hui le spectacle d'une gorge à marmites, tantôt au contraire l'eau du ruisseau ou de la rivière présente s'étale sur l'ensellement d'origine glaciaire. Ce qu'il importe avant tout de noter, c'est la physionomie d'ensemble qui rattache directement ces formes à la forme des trois types d'accidents topographiques que nous avons précédemment analysés.

Entre tous ces faits, il existe une concordance trop nette pour que nous ne soyons pas autorisés à en tirer quelques conclusions. Il semble bien que là où le glacier est passé et où il a respecté sur son fond quelque relief en sensible saillie, il l'aït surtout respecté dans la partie qui correspond au milieu de son cours. Le glacier détermine ainsi une forme qui est tantôt *bosse*, tantôt *Platten*, tantôt *Inselberg* et tantôt *barre*, mais qui toujours révèle une plus grande activité de travail sur les bords qu'au centre. N'est-il pas légitime d'en déduire que la glace toute seule n'opère pas le creusement sous-glaciaire ? Là où la glace est le plus abondante et mue de la vitesse la plus grande, le creusement nous est révélé moins puissant. Là, au contraire, où se trouvent les principales zones de fusion, sur les deux côtés du glacier, là par conséquent où les eaux ont le plus de chance de se coaliser et de former des filets torrentiels plus ou moins continus et plus ou moins forts, il se trouve que le creusement semble, en général, être plus important.

C'est, d'autre part, un fait bien curieux que ce dédoublement quasi normal de l'émission torrentielle sous-glaçiaire ; lorsque les eaux échappent au glacier, elles tendent à se réunir et à ne plus former qu'un thalweg. Mais en bien des cas, les eaux sortent du glacier sous la forme de deux ou même de plusieurs chenaux correspondant approximativement aux deux flancs du glacier : ce phénomène, nous l'avons observé nous-même bien des fois et nous renvoyons tout simplement à la fig. de la Planche VIII A qui accompagne cette conférence ; les bonnes cartes topographiques nous le révèlent aussi, témoin le levé à $1/5000$ que Paul Girardin a fait du glacier des Evettes et qu'il a publié dans le premier numéro de la *Zeitschrift für Gletscherkunde* ; témoin aussi les nombreuses et élégantes feuilles déjà parues de la carte de l'Islande à $1/50000$; témoin le nouveau levé que M. Paul Girardin vient de publier à 1 : 5000 : *Le Glacier de Bézin en Maurienne* dans le *Bulletin de la Société neuchâteloise de Géographie* (XVIII, 1907) : voir la planche ainsi que tout ce qu'il est dit du double écoulement de part et d'autre de l'échine rocheuse terminale (de la page 84 à la page 87).

Signalons à titre de fait de confirmation cette curieuse expérience faite au glacier du Rhône, rapportée par Forel et à laquelle l'étonnement des deux glaciéristes qui en ont été les témoins donne une singulière valeur :

« Le 22 août, à 8 h. 30 du matin, nous avons versé 2 kilogrammes de fluorescéine, en solution sodique, dans un ruisseau qui longeait la rive droite du glacier, au pied de la grande moraine marginale, au lieu dit le *Golfe des Moraines*, en amont de la grande chute de glaces. Ce ruisseau d'un débit de $0^{m^3}2$ par seconde, se précipitait dans un puits pour se perdre dans le glacier.

« Après avoir versé la couleur dans ce ruisseau, pendant que nous descendions la Saas pour nous rapprocher de la porte du Rhône où nous voulions surveiller l'apparition de la fluorescéine, nous avons fait une constatation

intéressante. A 9 h. 15 environ, l'eau du ruisseau qui sort du flanc droit du glacier, à côté de la grande chute des glaces, et qui forme cascade de quelques dix mètres de hauteur avant de s'enfoncer de nouveau sous le glacier, nous apparut coloré en beau vert fluorescent. C'était notre ruisseau du Golfe des Moraines, qui, au lieu de descendre sous le corps du glacier, comme nous l'avions supposé, pour aller se jeter au milieu du thalweg, dans le torrent sous-glaciaire du Rhône, avait gardé pendant longtemps son indépendance, en restant latéral pour sortir même du glacier, et pour ne rejoindre le torrent principal que dans les derniers cents mètres de son trajet sous-glaciaire »¹⁾.

Lorsque nous constatons, d'une part, la « famille » si variée et si riche de ces faits morphologiques sporadiques, et, d'autre part, l'existence si fréquente du double écoulement torrentiel glaciaire, nous ne sortons pas de l'ordre des faits positifs, et ce que nous apportons comme dossier d'observations ne saurait être ni discuté ni contesté. A ce dossier nous ajoutons un essai d'interprétation de l'érosion glaciaire et, sur ce dossier nous l'appuyons, quitte à déclarer très nettement que là commence l'hypothèse et que là doit intervenir, si l'on veut, la discussion critique.

La coïncidence de ces faits indéniables nous amène, en effet, à croire que le facteur principal du creusement sous le glacier — et donc par le glacier, — ce sont les eaux courantes. Ces eaux sont toujours liées au glacier. Il n'y a pas de glacier qui ne subisse dans sa masse, et pour le moins en quelque saison de l'année, quelque effet de fusion ; des glaciers septentrionaux, qui, pendant de longs mois, donnent naissance à une très faible quantité d'eau de fusion fournissent, à certains moments et en certains cas, des eaux sous-glaciaires si abondantes

¹⁾) *Les variations périodiques des glaciers*, Dix-neuvième rapport, 1898 (Berne, 1899), p. 4.

qu'elles se traduisent par de véritables débâcles. Charles Rabot a très heureusement attiré l'attention sur la fréquence et sur l'importance de ces débâcles, ainsi que sur les conséquences de ces « coups d'eau » au point de vue des phénomènes de creusement violent et de dépôt rapide. Les appareils glaciaires qui n'auraient pas de torrent glaciaire creuseraient-ils, et les rares glaciers qui n'ont jamais exercé qu'une faible influence sur le relief ne seraient-ils pas précisément ceux qui seraient dépourvus de cet adjuvant si puissant?

En une série de mémoires antérieurs, j'ai montré à quel point l'action et la « tactique » tourbillonnaires expliquaient le pouvoir d'attaque des eaux courantes; les eaux torrentielles sous-glaciaires ont ce pouvoir parce qu'elles ont cette tactique. La glace n'a aucun moyen, ni correspondant ni équivalent, de multiplier à un tel degré sa force vive; et nous ne saurions comprendre qu'en recourant à une hypothèse gratuite des actions aussi importantes à mettre au compte de la glace toute seule. Les eaux sous-glaciaires qui circulent en général sur les deux flancs du glacier, travaillent là tout comme elles travaillent ailleurs. Elles attaquent le fond par places et par saccades; elles doivent tout naturellement créer au début deux sillons à peu près semblables à ces canyons ou à ces gorges que nous observons si souvent à ciel ouvert; et, vers le milieu du fond du glacier, là où les eaux semblent se réunir et s'accumuler avec moins de régularité, le travail est moindre et la roche reste en saillie. Après le travail des eaux et simultanément avec ce travail, la masse de la glace, qui est animée d'un mouvement très net de descente, agit à son tour par son poids et par son frottement; la glace opère son travail qui est un travail d'arrachage et de polissage, de nettoyage et de rabotage. La roche en marche qu'est le glacier s'arqueboute et s'appuie, pour ainsi dire, sur les deux sillons entamés par les eaux sous-glaciaires; sa prise sur la roche du fond est d'autant

plus grande ; et lorsque l'action dure longtemps, tous les reliefs du centre du cours sont eux-mêmes débités et emportés ; mais, lorsque le glacier se retire avant d'avoir puachever complètement son œuvre de creusement propre, les protubérances qui subsistent doivent avoir tout naturellement cette forme caractéristique de saillie vers le centre, que nous avons soigneusement décrite et signalée.

Ainsi s'expliqueraient tout à la fois et ces faits sporadiques et les faits caractéristiques généraux des vallées glaciaires : la liaison que nous avons établie entre certains éléments de la topographie regardée comme proprement glaciaire et de la topographie fluviale se comprendrait d'une manière toute naturelle, puisque à l'élaboration du trop glaciaire lui-même coopérerait, dans une certaine mesure, l'action des eaux courantes ; et, quant à la forme par excellence de ce trop, le profil transversal en U, il résulterait de la mise en présence de deux parois approximativement verticales appartenant aux deux canyons primitifs sous-glaciaires : le glacier comme agent incessant d'usure et de déblaiement parvient à la longue à supprimer tout relief central ; et, à ce même titre, il avive incessamment le pied de la « falaise » à peu près verticale de chacun de ces canyons latéraux, si bien que l'érosion latérale des versants n'existe pour ainsi dire pas : ils ne subissent que des actions de creusement direct et d'écroulement. En fin de compte, le lit du glacier est bordé de parois qui ont la raideur des flancs d'un canyon ou du mur presque vertical d'une falaise de roche dure battue par les vagues de la mer.

Conclusions

Le glacier creuse donc à sa manière, mais la glace ne travaille pas seule. Les eaux, les eaux sous-glaciaires, qui font partie intégrante de tout appareil glaciaire vivant, opèrent elles aussi à leur manière, et cette manière est la manière forte, la manière d'attaque vigoureuse à l'aide

des tourbillons. Un appareil glaciaire qui n'aurait aucune eau de fusion, qui ne serait jamais l'occasion de débâcle serait-il un facteur de creusement? Encore un coup, nous ne le pensons pas; et c'est sans doute à des cas de cet ordre, d'ailleurs assez rares, qu'il faudrait faire remonter la responsabilité des exemples qu'on a pu observer et citer de très faible ou de nulle érosion glaciaire.

En associant ainsi ces deux forces: actif creusement par les eaux courantes et rabotage par la glace, on explique toutes les formes essentielles des vallées dites glaciaires.

D'autres, en vérité, ont fait parfois appel, pour expliquer la morphologie glaciaire, à l'action des eaux, des eaux torrentielles, des eaux sous-glaciaires, mais en leurs hypothèses, et suivant leur raisonnement, il semble toujours que l'action des eaux corresponde à un « acte » déterminé, puis l'action de la glace à l'« acte » suivant. Cette alternance des « péripéties » tantôt glaciaires, tantôt fluviales, leur a fait concevoir des phases successives, phases de creusement torrentiel, phases de creusement glaciaire, et, pour eux, le creusement torrentiel impliquait presque nécessairement une période de retrait des glaces, une période de ruissellement préglaciaire ou interglaciaire.

Mon effort d'interprétation se rattache dans une certaine mesure, à ces théories qui joignaient la puissance d'érosion torrentielle à la puissance d'érosion glaciaire; mais il s'en distingue nettement par les relations qu'il suppose entre ces deux types d'érosion¹. Pas de succession

¹⁾ Mon collègue de Zurich, M. le professeur Früh, m'écrivait à la date du 13 décembre 1907: « D'après ma conférence à St. Gall lors de la réunion annuelle de la Société helvétique des sciences naturelles, vous pouvez constater que nous nous trouvons d'accord sur un point (Kilian, vous et moi, et tous les trois d'une manière indépendante), c'est que pendant l'époque quaternaire les vallées des Alpes et du Vorland alpin n'ont pas été modelées exclusivement par les glaciers. Et encore vous-même, vous allez plus loin: vous constatez, grâce à l'érosion sous-glaciaire, une érosion importante des

forcée, mais simultanéité. En même temps que la glace des glaciers, et sous le glacier, et à l'âge même du plein développement du glacier, et en proportion même de la masse de glace qui s'est accumulée dans le lit glaciaire, les eaux sous-glaciaires mènent leur train, et leur œuvre propre prépare l'arrachement et le façonnement final par la glace.

Eaux et glace travaillent ensemble, collaborent et coopèrent, s'entr'aident sans cesse pour l'œuvre définitive qui sera le trog glaciaire. L'érosion torrentielle sous-glaciaire est seulement guidée et comme nous l'avons dit ailleurs « disciplinée » par le glacier²; cette distribution des courants d'écoulement et la discipline de l'érosion fluviale qui en résulte suffisent à déterminer quelques-uns des traits essentiels et spécifiques de ce modèle défini qui est le modèle glaciaire. La collaboration érosive de l'eau et de la glace du glacier légitiment encore un coup la dénomination différentielle d'érosion glaciaire.

Conception moins abstraite, qui sépare moins les diverses forces et les divers facteurs travaillant à l'œuvre finale, et qui nous paraît, par son principe d'irrégulière brusquerie et de fréquente simultanéité, correspondre beaucoup plus à l'ensemble des faits réels que la géographie physique constate et qu'elle s'efforce d'expliquer.

glaciers puisque vous leur accordez la possibilité d'emporter une multitude de bosses, d'échines, de colonnes vertébrales entre les deux gorges latérales et fluvio-glaciaires que vous décrivez. Quant à votre manière d'expliquer la genèse du surcreusement, je ne suis pas encore persuadé; mais chaque observation faite par chacun de vous nous aidera à nous comprendre mutuellement ». — Voir d'ailleurs J. FRUEH, *L'érosion glaciaire au point de vue de sa forme et de son importance* (Compte rendu de la Société helvétique dans *Archives des Sc. phys. et nat.*, XXII, p. 351-354); et W. KILIAN, *L'érosion glaciaire et la formation des terrasses* (*La Géographie*, XIV, 1906, p. 261-274).

²⁾ Sur une explication nouvelle du surcreusement glaciaire (*Comptes rendus Académie Sciences*, séance du 5 juin 1906).
