

CONDITIONS

de l'Érosion Glaciaire Alpine

PAR

M. Emmanuel de MARTONNE

EXTRAIT DU COMPTE RENDU
du Congrès National des Sociétés Françaises de Géographie
30^e SESSION. — Roubaix 1911

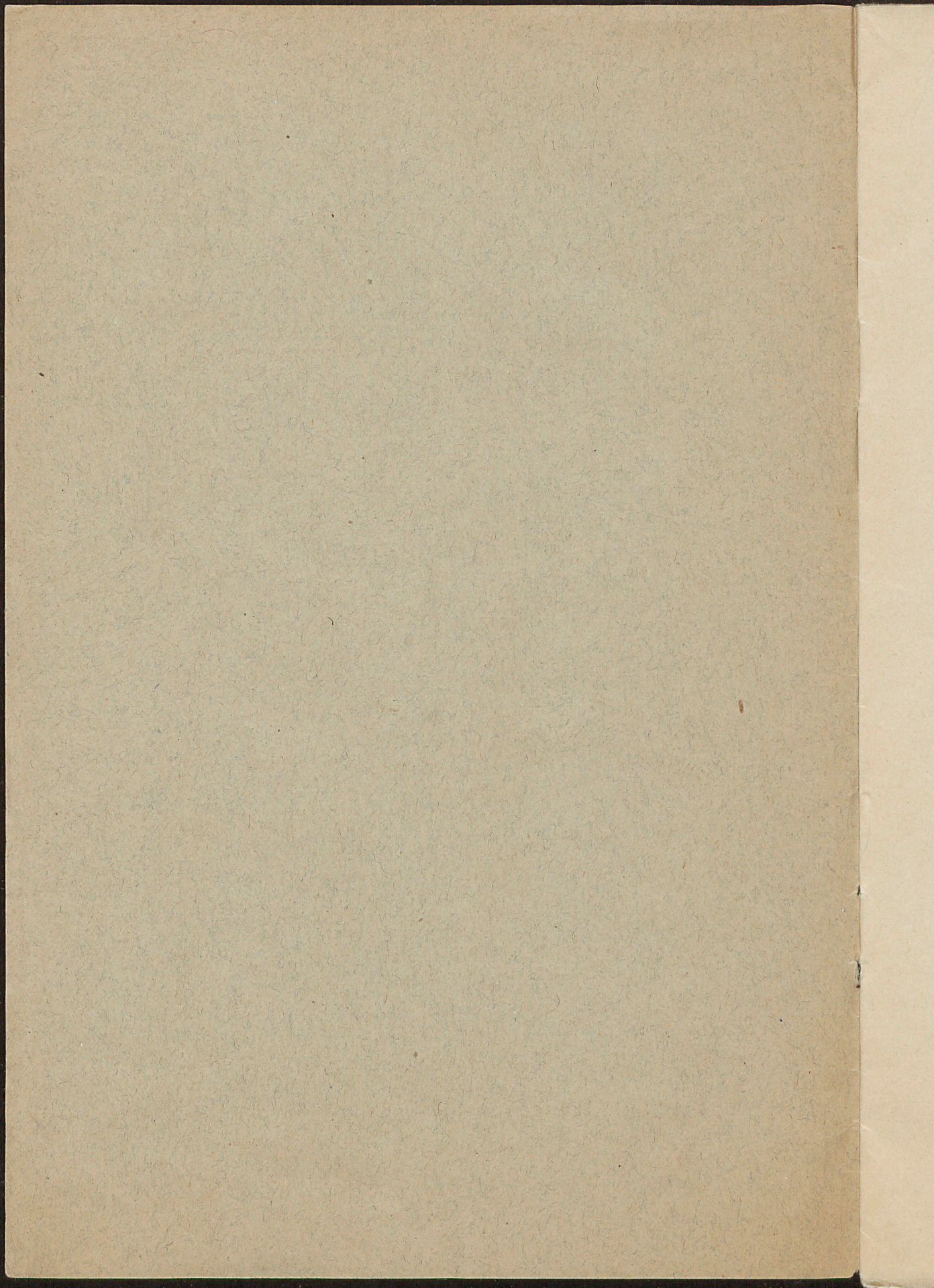
LILLE
IMPRIMERIE L. DANIEL


1912

Europe

X

369






CONDITIONS

DE L'ÉROSION GLACIAIRE ALPINE

Après les nombreux travaux géologiques récemment parus sur le quaternaire alpin, en particulier depuis la publication de l'œuvre monumentale de Penck et Bruckner: *Die Alpen im Eiszeitalter*, il n'est plus permis de douter que l'évolution des vallées alpines soit inséparable de l'extension glaciaire. Mais on discute encore sur la nature de l'influence exercée par les glaciers. La question, constamment remise sur le tapis, alimente les séances des Congrès internationaux de Géographie (Genève 1908) aussi bien que de Géologie (Stockholm 1910). L'observation des glaciers actuels n'a pas encore réussi à départager les géologues. Deux traités de glaciologie font autorité: celui de Heim et celui de Hess. Heim a toujours refusé aux glaciers quaternaires la moindre part dans l'approfondissement des vallées alpines. Hess attribue aux glaciers toute la sculpture des reliefs alpins, dépassant ainsi de beaucoup les idées de Penck lui-même, pour lequel les glaciers quaternaires ont seulement surcreusé des vallées déjà dessinées.

J'ai cherché la solution d'un conflit d'opinion qui divise les géographes de tous pays dans l'étude simultanée des formes d'érosion récentes qu'on peut observer, grâce au recul des glaciers alpins dans leur lit, et des théories physiques qui expliquent assez clairement les conditions de mouvement des glaciers (1). L'observation des lits glaciaires occupés lors de la dernière grande crue montre des traces évidentes d'érosion torrentielle et d'érosion glaciaire proprement dite. Les premières sont plus particulièrement localisées sur les ruptures de pente du thalweg, et indiquent la tendance bien connue des eaux courantes à approfondir leur lit en dessinant un thalweg à pente continue. Au contraire les

(1) Voir *C. R. Ac. des Sciences*, 27 décembre 1909 et 10 janvier 1910 et *Annales de Géographie* 1910, p. 289-317.



traces d'érosion glaciaire sont moins marquées sur les gradins et plus évidentes aux endroits où la pente diminue, marquant une tendance à exagérer les inégalités du profil longitudinal. Elles sont particulièrement frappantes sur le bord du lit, aux endroits étranglés et aux ruptures de pente, marquant une tendance du glacier à élargir plutôt qu'à approfondir son lit.

Ces observations m'ont permis de définir une forme topographique très frappante des vallées alpines, le gradin de front glaciaire scié de plusieurs gorges, forme active encore en bien des points où les glaciers actuels viennent se terminer, et qui existe partout où les glaciers quaternaires ont stationné, lors de leur recul, sur une rupture de pente. L'explication de cette forme ruine les théories, tirées de son observation exclusive, qui attribuaient aux torrents sous-glaciaires un rôle exagéré dans le modelé des vallées alpines (Brunhes).

L'inégale répartition des traces d'érosion glaciaire dans les lits des glaciers reste un phénomène énigmatique si l'on n'en cherche pas la raison dans l'étude des lois physiques du mouvement de la glace. J'ai été conduit par cette étude à une théorie mécanique de l'érosion glaciaire, qui m'a semblé propre à expliquer toutes les anomalies du modelé que présentent les vallées alpines, considérées comme d'anciens lits de glaciers (1).

On doit d'abord rappeler que le mouvement de la glace est extrêmement lent et que la vitesse varie très peu. C'est le mouvement propre aux « fluides visqueux ». Le frottement interne est considérable, l'adhérence au lit imparfaite, la plasticité a des limites, souvent dépassées, comme en témoignent les cassures. Le frottement sur le lit, qui est le principe même de l'érosion est notablement diminué par toutes ces causes et varie avec elles. L'érosion glaciaire ne peut donc être considérable, mais doit forcément se produire, avec des variations assez grandes, qui expliquent le caractère irrégulier du modelé.

Je crois devoir insister sur les points suivants, qui différencient les glaciers des cours d'eau : leur faible vitesse et leur grande épaisseur.

Les glaciers quaternaires ont eu jusqu'à 1.000 et 1 500^m d'épaisseur,

(1) Je laisserai ici de côté la discussion de la formule approximative donnée dans mon article des *An. de Géogr.* au moyen de graphiques, discussion qui sera d'ailleurs reprise avec plus de détails dans un mémoire en préparation.

les glaciers alpins actuels en ont plus de 100 (1). Deux conséquences importantes découlent de ce fait. Dans la vallée glaciaire, le lit occupe une place démesurée par rapport aux versants, c'est-à-dire aux pentes à l'air libre. Les conditions sont exactement inverses dans les vallées fluviales. C'est ce qu'ont oublié parfois ceux qui ont voulu comparer les formes d'érosion fluviale aux formes d'érosion glaciaire (2). La vallée glaciaire doit donc nécessairement tendre vers une forme très différente de la vallée fluviale. — Une seconde conséquence est l'énormité des pressions développées dans le lit glaciaire. C'est la pression qui devient le facteur essentiel de l'érosion, non la vitesse très faible. Ses variations, relativement très grandes, déterminées par la production des cassures et les déformations internes, rendent compte des variations du frottement contre le lit et des inégalités de l'érosion glaciaire.

La faible vitesse des glaciers a pu paraître à bien des esprits un argument péremptoire contre la réalité de l'érosion glaciaire. Il est évident qu'un volume d'eau égal à celui d'un glacier pourrait, s'il était renouvelé par des précipitations suffisantes, exercer, grâce à sa vitesse bien plus grande, une érosion incomparablement plus active. Mais la vitesse même des eaux courantes limite leur action ; elles s'écoulent relativement très vite, et ne peuvent attaquer qu'une faible partie de leur vallée. Le glacier, très lent à s'écouler, dure, et remplit la vallée presque toute entière. Aussi, malgré sa très faible vitesse, malgré l'insignifiante usure qu'il exerce sur son lit, laisse-t-il, après sa disparition des traces de son passage singulièrement significatives.

On peut considérer comme évident que l'érosion du glacier dépend du frottement qu'il exerce sur son lit ; on a donc la clef des variations de l'érosion en étudiant celles du frottement, d'abord dans le sens longitudinal, c'est-à-dire le long du *thalweg*, ensuite dans le sens transversal.

(1) Le seul glacier pour lequel on ait réussi plusieurs forages complets, l'Hintereisferner a montré une épaisseur de glace de près de 300^m. Sa longueur n'est pas la moitié de celle du glacier d'Aletsch. Ce beau résultat est dû aux efforts du savant glaciologue H. Hess.

(2) Notamment J. Brunhes, qui a présenté les analogies de forme des lits torrentiels avec les lits glaciaires, comme un argument contre l'érosion glaciaire (Érosion fluviale et érosion glaciaire, *Rev. An. de Géogr.* nouv. série I, 1906-07, p. 281-308). Le général Berthaut a au contraire très bien marqué les conséquences de cette distinction importante (*Topologie*, p. 264 sq.), sans connaître d'ailleurs les déductions de Penck et de Davis, antérieures même au travail de Brunhes.

J'ai donné une discussion détaillée des variations dans le sens longitudinal, dont je rappellerai seulement les résultats (1). Le frottement varie en raison directe de la vitesse, de la profondeur moyenne et de l'adhérence, en raison inverse de la pente superficielle. Les lieux de frottement maximum se trouvent, en dehors des extrémités du glacier (rimaye et langue terminale), au-dessus et au-dessous des ruptures de pente du profil longitudinal du lit. Ce n'est donc pas aux endroits où la pente superficielle est la plus forte, que l'érosion glaciaire est la plus intense, mais aux points où cette pente change, soit en plus, soit en moins. Cette conclusion, qui semble au premier abord paradoxale, s'explique si l'on songe à l'importance des variations de l'adhérence et de la profondeur moyenne. Les sections en pente forte ont beau avoir une vitesse plus grande, l'adhérence y est réduite par les cassures et la profondeur moyenne diminue très notablement.

Je pourrais citer un très grand nombre de faits d'observation qui confirment ces conclusions théoriques. Les constatations faites sur les gradins de front glaciaire récemment abandonnés y trouvent la seule explication logique. Ce sont ces constatations qui m'ont pendant longtemps arrêté, jusqu'au moment où j'ai été mis sur la voie de la théorie mécanique de l'érosion glaciaire. L'étude récente de divers glaciers n'a apporté que des confirmations frappantes aux conclusions énoncées en 1909.

Les sondages exécutés par H. Hess à l'Hinterseisferner et les études poursuivies au glacier de Trélatète par MM. Douxami et Bernard montrent l'extrême dureté de la glace et l'énormité des pressions dans les parties relativement planes, au-dessus des ruptures de pente. Toute augmentation de pente superficielle amène une décompression, qui se traduit, même en l'absence de cassures superficielles, par l'engloutissement des eaux de fonte la chute des piquets, l'impossibilité de pousser à fond les sondages (2).

(1) Érosion glaciaire et la formation des vallées alpines. *Ann. de Géog.*, 1910 p. 289-317.

(2) Ces observations ont été faites lors d'une visite à l'Hinterseisferner en 1910 au cours de laquelle j'ai eu la bonne fortune de pouvoir étudier les procédés de forage, qui ont conduit H. Hess, à de si beaux résultats, et ont été d'ailleurs si bien exposés par MM. Flusin et Bernard (Forages glaciaires à grande profondeur, *Min. Agricul. Dir. Hydraul. Serv. d'études des grandes forces hydr.* 1909). J'ai visité Trélatète également en 1910 avec M. Douxami.

Partout où j'ai pu observer le contact du glacier avec son lit, j'ai vu se vérifier la loi que le glacier, dans la région d'écoulement, a une tendance à perdre contact à chaque augmentation brusque de pente du lit. Dans les cas les plus favorables, il y a pour le moins disparition de la moraine profonde.

Sans vouloir multiplier les exemples, je citerai seulement pour finir un fait bien caractéristique. Le glacier du Rhone arrêté au pied de l'abrupt qui domine le bassin de Gletsch, a commencé depuis trois ans à dessiner un recul rapide. Une fenêtre s'est ouverte dans la belle chute de sérac, découvrant une portion du lit où la pente est très forte et où la vitesse était relativement considérable. On y constate l'absence presque complète de traces d'érosion glaciaire, alors que, au pied de la rupture de pente, les bords du bassin de Gletsch offrent des indices tout à fait nets de sapement latéral, datant du temps où le glacier atteignait Gletsch (milieu du XIX^e).

La loi mécanique des variations de l'érosion glaciaire dans le sens longitudinal paraît donc répondre aux faits. On peut montrer qu'elle explique logiquement la plupart des formes anormales des vallées alpines. Je ne reviendrai pas sur ces considérations déjà exposées assez longuement. Mais je crois bon d'insister sur les variations de l'érosion dans le sens transversal, qui n'ont point encore été suffisamment étudiées. C'est dans cette étude qu'on doit évidemment chercher l'explication du profil transversal des vallées glaciaires aussi anormal que leur profil longitudinal.

Ce profil a été depuis longtemps reconnu et caractérisé en disant que c'est un profil en U, qu'on oppose au profil habituel en V des vallées fluviales. Cette opposition a pu être justement critiquée (1). Car il y a des vallées fluviales en U : vallées remblayées, vallées calibrées par le développement complet des méandres (2). Mais ces vallées sont des vallées très mûres, tandis que les vallées glaciaires ont des caractères de jeunesse incontestables : grande profondeur et forte pente des versants. Ce qu'il y a d'anormal c'est la coexistence de ces traits de jeunesse avec la largeur relativement grande du fond qui est un caractère de maturité.

Lorsqu'on étudie les lits glaciaires récemment abandonnés, on

(1) Notamment par J. Brunhes. *Op. cit.*

(2) V. sur les vallées calibrées par méandres notre *Traité de Géographie physique*, p. 432-436.

reconnaît facilement que ces caractères sont en rapport avec une érosion assez intense du bord du lit, tendant à un élargissement et à une sorte de calibrage. Le fait est particulièrement net dans les étranglements et au bord des fortes ruptures de pente. Je rappellerai seulement parmi les exemples connus les grandes cannelures de Grindelwald, dont Baltzer a donné de superbes photographies (1) celles du Glacier des Bois au Mauvais Pas. La descente de la surface chez certains glaciers en recul a mis à jour un abrupt rappelant la berge d'un torrent, qui a été signalé, notamment au glacier d'Argentière, comme un indice de creusement actuel (2). Les hautes vallées où le recul définitif des glaciers quaternaires est certainement un événement historique ont, surtout dans les régions granitiques (Haute-Aar, Haut-Vénéon) toutes les apparences d'un conduit évidé sur les bords (3).

Les indices certains d'attaque latérale du lit glaciaire ont inspiré la théorie de J. Brunhes qui suppose l'existence de ravins sous-glaciaires latéraux dus à des torrents tels que ceux qu'on observe sur les fronts de glaciers. J'ai déjà signalé l'impossibilité d'étendre jusqu'à la zone du névé les constatations faites à l'extrémité inférieure du glacier où la fonte est le phénomène le plus important de l'activité glaciaire. Une explication plus vraisemblable du sapement latéral apparaît lorsqu'on considère les actions physiques qui s'exercent à la limite du lit et du versant de la vallée glaciaire.

Celui-ci est exposé à l'air libre dans un climat extrême, où les variations de température du sol sont très fortes et où la surface gèle presque chaque nuit. D'où une décomposition mécanique très active. La roche désagrégée s'écroule sur le glacier où elle forme la moraine superficielle, le versant tend à reculer en atténuant sa pente. Le lit glaciaire est attaqué par le frottement de la glace et de la moraine de fond. Mais cette attaque est favorisée par la décomposition mécanique de la roche en place sous l'influence des gels et dégels que déterminent les variations de pression. Ce phénomène, signalé et étudié expérimen-

(1) Baltzer. Studien am Untergrindelwaldgletscher. *N. Denkschr. Schw. Ges. f. Naturwiss.* XXXIII, 1898.

(2) V. notre *Traité de Géogr. physique*, pl. XXIII, B. — Cf. E. Chaix.

Quelques documents nouveaux sur les glaciers. *Le Globe*, XLVII, 1908, pl. V.

(3) V. notre *Traité de Géogr. physique*, pl. XXVIII, A. et l'Érosion glaciaire. *Ann. de Géogr.* 1911, pl. VI. B.

talement par Finsterwalder (1) a attiré spécialement l'attention de Salomon (2) qui lui a attribué une très grande importance. L'arrachement de blocs de rocher assez considérables, constaté sur le front de divers glaciers (packing des Américains) s'explique par l'élargissement des diaclases.

Si nous considérons le bord du glacier, nous voyons qu'il est attaqué à la fois (ou successivement, suivant les variations du glacier et la fusion plus ou moins accentuée) par la décomposition mécanique et l'éboulement à l'air libre, par la décomposition sous-glaciaire, et par le frottement. Les eaux de fonte y sont particulièrement abondantes, pénétrant partout les diaclases et les élargissant par le gel. L'arrachement est relativement favorisé et peut avoir lieu, sans que la poussée soit sensiblement plus forte qu'ailleurs.

Quelques-unes de ces idées ont été déjà développées à propos du rôle de la rimaye dans la formation des cirques, notamment par W. D. Johnson (3), F. E. Matthes (4) et récemment par Hobbs (5). J'ai moi-même signalé il y a 10 ans l'importance de la limite entre la zone des actions glaciaires et celle des actions subaériennes dans les cirques (6), en notant sa coïncidence avec la ligne de rupture de pente périphérique entourant le fond relativement plat. L'explication paraît devoir être cherchée dans les considérations que nous venons d'indiquer : mais en outre, il convient d'étendre les remarques faites dans la région du névé à la région du glacier d'écoulement. Le rôle des eaux de fonte dans l'élargissement des diaclases augmente vers l'aval, mais le glacier tend à perdre contact avec le bord du lit et les poussées qu'il y peut produire deviennent moins efficaces. Il semble donc qu'il y aura une région, où l'affouillement latéral du bord du glacier aura sa valeur maximum, région qui pourra, suivant les cas être plus ou moins loin de l'extrémité du névé.

(1) Voir H. HESS. Die Gletscher, p. 186.

(2) W. SALOMON. Die Adamellogruppe. *Abhandl. K. K. Geol. R. A. XXI*, heft 2, 1910. II^{er} Teil. Quartär, p. 435-486.

(3) An unrecognised process in glacial erosion. *Science N. S. IX*, 1899 p. 106.

(4) Glacial sculpture of the Bighorn mountains *21th An. Rep. U. S. Geol. Survey*, 1899-1900, p. 167-190.

(5) Characteristics of existing glaciers. 1911, part. I, ch. I.

(6) Sur la formation des cirques. *Ann. de Géogr.* 1901, p. 10-16 et Contributions à l'étude de la période glaciaire dans les Karpates méridionales. *Bul. Soc. géol. Fr.* 3^e S. XXVIII, 1900, p. 275-319.

Il reste à expliquer les marques d'attaque directe de la roche fraîche (cannelures, stries) et leur abondance aux lieux de ruptures de pente ou d'étranglements.

Rappelons la faible vitesse des glaciers. Si elle diminue encore sur les bords, comme dans tous les fluides en mouvement, d'autres facteurs peuvent compenser la réduction du frottement qui en résulte. Nous avons déjà indiqué que la pression est le principal facteur de l'érosion glaciaire. Dans les étranglements, l'effort accompli par le glacier pour s'adapter au lit augmente notablement la pression. Il en est de même à l'amont des ruptures de pente. Les études de Blumcke et Finsterwald à l'Hintereisfermer leur ont permis de démontrer l'existence d'un mouvement ascendant du glacier sur les bords (1).

On doit toujours revenir à la nature physique du glacier : fluide visqueux déformable jusqu'à une certaine limite, et que la pesanteur entraîne irrésistiblement vers l'aval. Quelque soit la forme du conduit sur lequel il se moule, il *doit* passer, fût-ce au prix d'une usure vigoureuse des bords de son lit. On a souvent décrit certaines percées fluviales étroites en disant que la rivière a *forcé* le passage. L'expression imagée et incorrecte pour les rivières, est la traduction fidèle de la réalité pour le glacier, car il remplit la plus grande partie de sa vallée, et il *force* vraiment son passage.

En résumé les caractères originaux des vallées glaciaires s'expliquent par les considérations suivantes :

1^o Grande étendue du lit glaciaire par rapport aux versants ;

2^o Tendance à l'élargissement du lit glaciaire par sapement des bords ;

3^o Erosion plus profonde en amont et aval de toute pente plus forte ou de tout étranglement.

Il n'est pas nécessaire d'attribuer aux glaciers quaternaires une puissance d'érosion considérable pour comprendre comment, dans ces conditions, des vallées fluviales transformées en lits glaciaires sur presque toute leur profondeur, ont acquis le modelé relativement anormal que nous y observons actuellement. D'une manière générale, on peut dire que l'invasion glaciaire quaternaire a donné aux Alpes des vallées de profondeur plus inégale et de largeur plus grande.

(1) Die Gletscherbewegung mit Berücksichtigung des senkrechten Anteils. *Zeitschr. f. Gletscherkunde* 1906, p. 1-20.

On a souvent opposé deux conclusions : l'une suivant laquelle le glacier conserve les formes en les protégeant contre l'érosion fluviale, l'autre suivant laquelle il érode plus profondément que la rivière. Toutes deux renferment une part de vérité. Un glacier peu épais protège son lit contre l'érosion fluviale sans pouvoir éroder notablement et cette protection est particulièrement sensible sur une forte pente. Un glacier épais est capable d'exercer une érosion très forte. Les phénomènes de vallées suspendues et les gradins du thaweg s'expliquent par là naturellement. Les contrepentes résultent à la fois de l'atténuation locale de l'érosion et de son activité plus grande là où l'épaisseur augmente en même temps que la pression et l'adhérence au lit. Quant à la section caractéristique des lits glaciaires, qu'on retrouve dans les vallées alpines, elle s'explique par l'intensité de la démolition près du bord du glacier, là où la roche est à la fois soumise à la dégradation sous-glaciaire et à la désagrégation subaérienne.

Emm. DE MARTONNE.

