

UNIVERSITÉ DE PARIS

GLACIERS ET RELIEF GLACIAIRE

par

M. E. de MARTONNE

de l'Académie des Sciences



Les Conférences
du
Palais de la Découverte

BR.
Geog.-Phy
38
1240

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

LIBRARY

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

1917

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

LIBRARY

**GLACIERS
ET RELIEF GLACIAIRE**

GLACIERS
ET RELIERS GLACIERS

Br. Géogr. physique

UNIVERSITÉ DE PARIS

38-7240

GLACIERS ET RELIEF GLACIAIRE

par

M. E. de MARTONNE

de l'Académie des Sciences



Conférence faite au Palais de la Découverte
le 21 Avril 1945

UNIVERSITÉ DE PARIS

GLACIERS ET RELIEF GLACIAIRE

M. E. de MARTONNE

de l'Académie des Sciences

Grand prix de l'Institut de France

1912-1913

GLACIERS ET RELIEF GLACIAIRE

I

IL EST PEU DE PROBLÈMES de géographie physique aussi controversés. Précisons-le d'abord et dissipons un malentendu.

Le glacier est un fait, le relief glaciaire est une conception théorique, d'après laquelle certaines formes de relief sont dues à l'action des anciens glaciers qui, à l'époque quaternaire, formaient sur la Scandinavie une calotte ressemblant à celle du Groenland actuel et descendaient jusqu'à la Bohême, ou encore occupaient toutes les vallées des Alpes en débordant jusqu'à Lyon, Bâle et Munich.

Nous considérerons spécialement ici les formes des vallées alpines, qui offrent des aspects inconnus dans les montagnes trop peu élevées ou situées dans des pays trop chauds pour avoir subi une pareille glaciation.

I. — PARTICULARITÉS DES VALLÉES GLACIAIRES. — Remontons la vallée de l'Isère jusqu'à la haute Tarentaise ou celle de l'Arve jusqu'à Chamonix, nous remarquerons toute une série d'anomalies qui ne permettent pas d'y voir des vallées fluviales normales.

Anomalies du profil en travers, qui offre une section assez large alors que la pente des versants est très accentuée, au point que les sentiers y rencontrent à chaque détour une coupure d'érosion torrentielle ou une cascade bondissant sur la roche. Le dernier trait indiquerait, dans les conditions normales, la jeunesse d'une vallée fluviale en plein creusement ; le premier au contraire suppose déjà une évolution avancée. Leur association donne la section en forme de U, qui s'oppose à la section en V de la vallée fluviale, et qu'on caractérise par le nom d'*auge glaciaire* (fig. 2 A).

Anomalies du profil en long : la pente du thalweg n'augmente pas régulièrement vers l'amont comme celle de la plupart des vallées fluviales. On voit alterner des sections en pente relativement faible où la rivière coule sur ses alluvions, et des secteurs où elle bondit sur de gros blocs, souvent au fond d'une gorge étroite. Ces gradins pour-

raient, il est vrai, n'être que des signes de jeunesse, par exemple dans notre Massif Central. Mais il ne s'agit pas seulement de ruptures de pente, explicables par l'inégale résistance des roches à l'érosion ; les vallées alpêtres offrent des *contrepentes* (fig. 1).

Après avoir franchi une de ces gorges que les anciens chemins évitaient par des grimpées de plusieurs centaines de mètres et où le chemin de fer disparaît dans un tunnel, on débouche dans une véritable plaine alluviale ou parfois s'étalent un ou plusieurs lacs. Comment attribuer cet ombilic au travail de la rivière qui tend au contraire à le faire disparaître, à la fois en sciant la gorge d'aval et en noyant la cuvette d'amont ? Le sondage du lac peut révéler des fonds de plus de 100 m. au-dessous du thalweg rocheux de la gorge. Celle-ci n'est donc pas simplement incisée dans le bord d'un gradin, mais dans une véritable barre solidement tirée en travers de la vallée, la

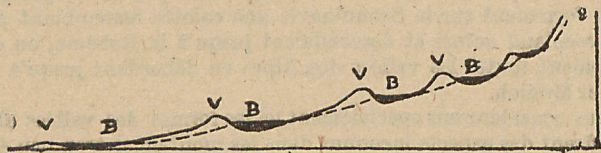


FIG. 1. — Profil longitudinal d'une « vallée glaciaire » alpine.
V : verrou ; B : bassin. Le pointillé indique le profil modifié par l'érosion fluviale post-glaciaire.

fermant comme un *verrou* et cette expression imagée est passée dans la langue internationale de la morphologie. Pour le creux d'amont, où les versants reculent, laissant la section de l'auge s'élargir, on parle simplement de *bassin*, ou pour préciser de *bassin de surcreusement*. (fig. 1).

Il serait cependant préférable de réserver le mot de *surcreusement* pour le cas où la vallée glaciaire est incontestablement creusée au-dessous du profil longitudinal le plus bas que puisse développer l'érosion normale des eaux courantes, le *profil d'équilibre*, qui est une courbe parabolique régulière. C'est ce qui est réalisé souvent dans la partie inférieure de nos grandes vallées alpêtres, particulièrement sur le versant italien, avec les grands lacs, allongés à la fois dans la montagne et dans la plaine de Piémont (lacs Majeur, de Côme, de Lugano, de Garde) dont le fond est parfois sensiblement au-dessous du niveau de la mer.

Notons enfin une particularité très commune des vallées alpêtres alpêtres, peut-être la plus pittoresque, en tout cas la plus surprenante : ce sont les cascades qui tombent sur le versant de l'auge au

débouché des vallées affluentes. Celles-ci dressent, si haut parfois au-dessus du fond de la vallée principale, leur profil en U, qu'il se découpe sur le ciel ; on peut vraiment parler de *vallées suspendues*. Là encore, il ne s'agit pas seulement d'un gradin (*gradin de confluence*, dit-on généralement), mais un verrou barre souvent le profil de l'auge suspendue, en amont duquel on découvre un bassin, parfois même un lac, comme le lac de Bissorte perché à 1000 m. au-dessus de la vallée de l'Arc, en Maurienne.

Tous ces traits anormaux du relief, dont chacun peut retrouver des exemples en rappelant les souvenirs d'excursions alpines, composent vraiment un paysage original, bien différent de celui des montagnes où les vallées n'ont pas été occupées par les glaciers. S'ils sont dus à la glaciation, il reste à expliquer comment celle-ci agit pour les réaliser.

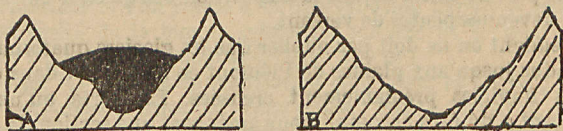


FIG. 2. — Profils schématiques, à gauche d'une vallée alpine au moment de la période glaciaire (le glacier en noir), à droite d'une vallée alpine sans glacier.

On y serait sans doute arrivé plus facilement sans un malentendu qu'il nous faut éclaircir.

II. LIT ET VERSANT. — Les « vallées glaciaires » de nos Alpes sont *actuellement* des vallées fluviales, où l'eau courante, travaillant au modelé, n'occupe qu'une part infime de la section, qui est proprement le *lit* fluvial, la presque totalité de la section étant formée par les *versants*. Il en était tout autrement pendant la période glaciaire, non-seulement parce que l'eau avait été remplacée par la glace, mais parce que le *lit* du glacier occupait une grande partie, souvent même la totalité presque de la section, les versants étant réduits d'autant. La disproportion entre l'étendue du lit et celle des versants est un fait capital, aussi important que la différence des fluides ; l'un s'écoule rapidement, l'autre très lentement, mais le premier n'agit que sur une surface infime par rapport à celle des versants, le second au contraire sur une surface très étendue (fig. 2).

Dans la vallée fluviale actuelle, le travail le plus important est celui qui est accompli sur les versants par des processus variés, qui tendent à en diminuer la pente moyenne en élargissant la section de

la vallée ; décomposition chimique et désagrégation mécanique des roches, ravinement torrentiel, glissement des débris fins ou éboulements des débris grossiers. Dans la vallée glaciaire quaternaire, les versants, relativement réduits, comme aux têtes de vallées alpines assez hautes pour être encore occupées par des glaciers, n'étaient attaqués que par la désagrégation mécanique sous l'influence du gel et par les éboulements ; le travail le plus important était accompli dans le lit.

Ce que nos yeux voient actuellement dans la plupart de nos vallées alpines, ce n'est donc pas en réalité une vallée au sens ordinaire du mot, mais le lit d'un fluide maintenant disparu ; sans doute le versant n'est-il pas négligeable, mais c'est de l'évolution du lit au quaternaire que dépendent presque toutes les particularités de ce que nous appelons les « vallées glaciaires », à part les quelques retouches qui ont pu être faites depuis la disparition des glaciers sur les pentes du lit, devenues pentes de versant.

Cependant on ne doit pas oublier que les glaciers quaternaires sont descendus jusqu'aux plaines de Piémont en s'écoulant dans de vraies vallées fluviales préalablement creusées. En sorte qu'un travail important a dû être accompli pour aménager une section de « vallée » en section de « lit ». Et, si l'aménagement n'a pas été parfait, certains traits des vallées préglaciaires ont pu ne pas disparaître complètement.

C'est sans doute pour ne pas avoir pris en considération ces relations entre le présent et le passé que certains savants ont méconnu le rôle morphologique des glaciers quaternaires, sous-estimé par les uns, exagéré par les autres ; qu'un A. Heim, profond connaisseur des glaciers suisses, a préféré demander à des mouvements du sol l'explication des contrepentes des « vallées glaciaires » ; qu'un Hess, après des années de travail sur les glaciers autrichiens, attribue au contraire aux glaciers tout le creusement des vallées ; qu'Allix demande aux derniers stades le même effort dans l'Oisans.

En présence de ces contradictions, on a pu se détourner de l'étude des glaciers actuels, trop réduits par rapport aux glaciers quaternaires, oubli singulier des conditions de similitude, qui sont dans ce cas plus favorables que dans bien des cas où on a recours avec succès aux expériences de laboratoire pour rendre compte d'un grand phénomène naturel.

Les variations des fronts de glaciers actuels nous offrent l'occasion de voir les formes de leur lit abandonné, les sondages permettent de connaître le profil du lit encore occupé, les mesures de vitesse et d'ablation servent à définir le mécanisme de l'écoulement et l'action de la glace sur son lit.

III. MÉCANISME DE L'ÉCOULEMENT DU GLACIER. — L'écoulement du glacier est un fait. On sait qu'il est à cheval sur la limite des neiges éternelles, se constituant au-dessus de cette limite par transformation des neiges qui ne peuvent fondre complètement au cours de l'été (c'est le *névé*), se dissipant par fusion totale à des altitudes d'autant plus basses que le névé est plus abondamment alimenté (c'est le glacier proprement dit ou *langue glaciaire*).

La descente de la glace est bien, malgré son apparente rigidité, un écoulement comparable à celui de l'eau, plus exactement à celui de l'acier ou de la cire, portés à une température suffisamment élevée ou soumis à une pression suffisamment forte. Une démonstration élémentaire en a été donnée depuis longtemps par l'expérience de la barre de glace, posée sur deux supports, qui fléchit sous la seule action de la pesanteur. La masse d'un grand glacier de nos Alpes représente un poids formidable si l'on songe à la dénivellation depuis le névé jusqu'à l'extrémité de la langue (plusieurs milliers de mètres) et aux épaisseurs constatées par sondage (300 à 500 m.)

Cependant les vitesses de translation constatées en surface restent infimes comparées à celles des cours d'eau : moins de 100 m. par an. La viscosité est en effet infiniment plus grande que celle de l'eau (qui n'est pas nulle). Des mouvements de glissements interviennent en outre. La masse du glacier n'est pas en effet homogène, mais est constituée par des feuillets formés dans le névé par l'alternance des résidus de fusion en été et en hiver, plus ou moins riches en air et en poussières. Ces feuillets glissent l'un sur l'autre dans la langue, où ils affleurent à la surface par la tranche, donnant les « ogives » de la Mer de glace par exemple.

Enfin, si les déformations internes ne suffisent pas, pour une descente plus rapide de la masse sur une pente trop forte, les tensions aboutissent à des cassures, origine des *séracs*, dont les formes fantastiques sont dues à l'élargissement des fentes par la fusion estivale.

Le mouvement du glacier est donc un phénomène complexe, qui se laisse pourtant résumer en parlant de *fluide visqueux* par analogie avec l'écoulement des rivières. Le travail d'érosion que les rivières accomplissent dans leur lit doit exister aussi dans le lit des glaciers, comparativement très réduit par la vitesse beaucoup plus faible, mais étalé sur un lit qui occupe souvent la plus grande partie de la section de la vallée.

Il faut encore noter, comme dans le cas des eaux courantes, que l'érosion du lit ne représente qu'une partie du travail accompli par le fluide disposant d'une force vive en rapport avec sa pente et avec sa masse. Une part importante revient à l'écoulement lui-même, qui doit vaincre la viscosité du fluide, une autre au transport des débris

(alluvions des rivières, moraines internes des glaciers). Le résidu peut être souvent réduit à très peu de chose. D'où les irrégularités du profil en long du lit des rivières aussi bien que des glaciers.

Il est rare de pouvoir observer un lit de rivière à sec dans sa totalité, alors que nos vallées alpines nous montrent à chaque pas un lit de glacier quaternaire. On peut faire constater des variations de profondeur très grandes relativement à la profondeur moyenne, parfois même de véritables barres rocheuses alternant avec des ombilics. A l'échelle du *lit fluvial*, ces irrégularités sont même plus importantes que les verrous et les bassins à l'échelle du *lit glaciaire*. De même on peut observer un lit d'affluent moins creusé que celui de la rivière principale, comparable à ce que nous appelons une vallée glaciaire suspendue et qui n'est qu'un lit de glacier affluent moins puissant et moins approfondi. Enfin on remarque que la section du lit fluvial se rapproche souvent d'une forme en U, les jambages, représentés par les berges, étant seulement très courts ; la différence avec l'auge glaciaire, où les jambages sont beaucoup plus grands, tient au volume du glacier, dont l'épaisseur est au moins 100 fois plus grande que la profondeur de la rivière. La section en U se rapprochant d'une demi-circonférence, est celle qui offre le plus de facilité à l'écoulement d'un fluide.

Faut-il donc croire que toutes les anomalies du relief de nos « vallées glaciaires » s'expliquent simplement par le fait qu'il s'agit de caractères communs à tous les *lits* de fluides, à condition de tenir compte de l'échelle ? Non sans doute, car la viscosité du fluide doit certainement intervenir.

Il est extrêmement rare qu'un cours d'eau perde contact avec la roche (c'est le cas dans les cataractes où l'eau *saute* sur un gradin structural : Niagara, Zambèze, etc..., ou simplement dans les cascades des torrents. La chose est courante pour le glacier, dont la viscosité l'empêche de se plier aux inégalités de son lit : pente longitudinale trop forte, étrangement du profil ou simple changement de direction du thalweg. Cependant la poussée irrésistible de l'énorme masse doit avoir raison des résistances : des crevasses s'ouvrent en surface, origine des séracs, qui sont comparables aux cascades des torrents. A ces cassures superficielles correspondent des cassures profondes, qui peuvent faire perdre le contact avec la roche (fig. 3). On en a fait la preuve en pénétrant sous des langues glaciaires jusqu'à plus de 100 m. du bord. La réussite de ce tour de force par Vallot, au Montanvers de la Mer de Glace, l'a décidé à se ranger dans le clan des observateurs hostiles à l'érosion glaciaire. En réalité, il avait simplement apporté une preuve décisive de l'extrême inégalité de cette érosion, réduite localement par la perte de contact avec le lit.

Les sondages pratiqués sur plusieurs glaciers des Alpes autrichiennes par Hess ont été l'occasion de déconvenues qui confirment l'existence de crevasses profondes aux ruptures de pente suffisantes pour donner des crevasses superficielles. Aucun des sondages placés ailleurs que sur un palier (Boden) n'a pu être poussé jusqu'à la roche, le gel du trépan suivant la perte du courant d'eau dans les crevasses profondes.

Nous touchons ici à un point capital, qui a échappé à la plupart des

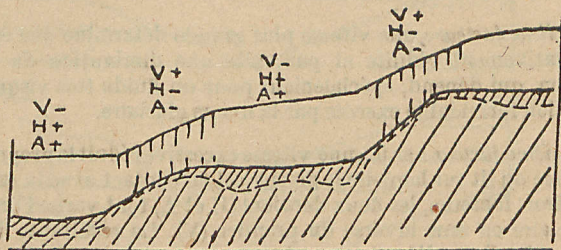


FIG. 3. — Coupe longitudinale schématique d'un glacier alpin avec deux ruptures de pente. Le gris oblique serré indique l'importance inégale de l'érosion.

géographes glaciologistes et dont la considération peut seule expliquer complètement les verrous et les vallées suspendues.

Résumons donc les acquisitions obtenues.

IV. — VARIATIONS DE L'ÉROSION DU LIT GLACIAIRE. — La plupart des formes d'apparence normale de nos « vallées glaciaires » sont en réalité des formes de *lit*, comparables aux formes de lits fluviaux, sauf la différence de l'échelle, 100 fois plus grande pour le moins dans le cas du glacier qui s'écoule très lentement et, par suite, occupe une très large section de sa vallée. On explique ainsi la section en U de l'*auge glaciaire*, les contrepentes du profil longitudinal, la succession des *verrous* et des *bassins* et même les gradins des *vallées suspendues*.

L'explication n'est cependant pas complète et ne saurait évidemment l'être sans tenir compte des conditions d'écoulement de deux fluides aussi différents que l'eau et la glace. Cette dernière est douée d'une viscosité telle que les variations de vitesse déterminées par les changements de la pente longitudinale et de la section du lit doivent amener des dislocations de la masse, d'où résulte une perte de contact avec la roche et par suite une réduction du pouvoir d'érosion.

Toute discussion des variations de l'érosion du lit glaciaire qui néglige ce facteur est incorrecte. Sans entrer dans les détails, ni essayer de chiffrer le poids à accorder aux différents facteurs, on peut constater le sens dans lequel ils agissent (fig. 3).

Premier facteur : à une augmentation de vitesse de l'écoulement due soit à une augmentation de la pente du thalweg (et donc de la pente superficielle du glacier); soit à un rétrécissement de la section (qui augmente aussi la vitesse) doit répondre évidemment une augmentation du pouvoir d'érosion.

Deuxième facteur : une vitesse plus grande détermine une épaisseur (H) relativement réduite et par suite une diminution du pouvoir d'érosion, qui dépend, spécialement pour un fluide très visqueux, de la pression formidable exercée par la masse glaciaire.

Troisième facteur : enfin une vitesse excessive réduit la proportion de la surface du lit sur laquelle le glacier est en contact avec la roche (A).

Sur trois facteurs, les deux derniers (H et A) font varier l'érosion du lit glaciaire en sens inverse du premier (V). La résultante doit être telle que les lieux d'érosion maximum se trouvent non sur les secteurs du profil longitudinal en pente la plus forte, (où l'on observe les séracs), mais dans les secteurs intermédiaires, là où le rapport V/HA atteint sa valeur maximum (fig. 3).

Ainsi seulement peuvent s'expliquer les contrepentes, comparativement plus communes dans les lits glaciaires que dans les lits fluviaux, particulièrement les verrous qui souvent barrent le débouché des vallées suspendues, ébauches naturelles d'un réservoir de force hydraulique disposant d'une grande hauteur de chute (comme à Bissorte en Maurienne, par exemple).

Le « surcreusement » considéré comme caractéristique des « vallées glaciaires » n'y règne donc pas partout. Il alterne avec un « sous-creusement » dont on ne tient pas assez compte et dont l'explication n'est vraiment satisfaisante qu'en fonction des variations du pouvoir d'érosion d'un fluide visqueux coulant dans un lit qui n'était pas préparé pour lui, puisqu'il a été une vallée fluviale.

Le « sous-creusement » devient le fait essentiel vers l'extrémité du glacier, d'autant plus que la langue descend au-dessous de la limite des neiges éternelles. La fusion de plus en plus active réduit en effet la masse glaciaire et le facteur épaisseur (H) agit de moins en moins. Il doit en résulter nécessairement la formation d'une cuvette ou d'un chapelet de cuvettes. C'est l'origine des grands lacs subalpins, qui débordent sur le Piémont italien particulièrement, maintenus sans doute à un niveau plus élevé par le barrage des moraines terminales,

mais réellement creusés dans la roche en place jusqu'au-dessous du niveau de la mer.

On voit tout ce qu'on peut tirer des connaissances sur la structure et le mouvement de nos glaciers actuels pour expliquer les formes de nos « vallées glaciaires » qui sont surtout des *lits* d'anciens glaciers de la période pléistocène. Cependant tout n'est pas clair à qui observe

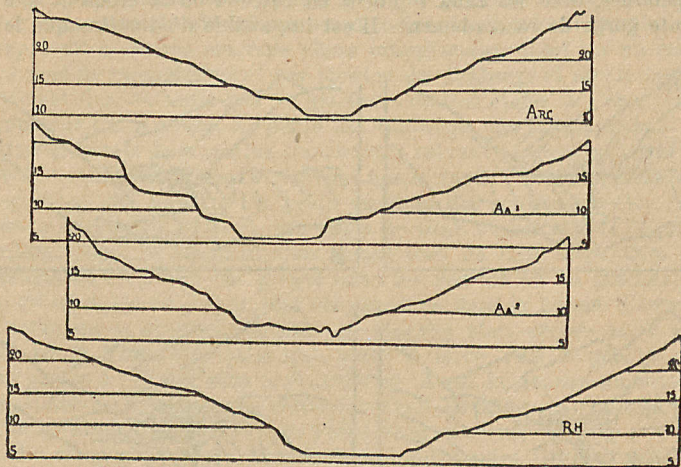


FIG. 4. — Profils de grandes vallées glaciaires d'après la carte suisse au 50.000^e et les levés au 20.000^e en France.
Rh : le Rhône dans le Valais. A : l'Aar.

attentivement les plus grandes de ces vallées, à moins d'aller un peu plus loin en considérant l'histoire géologique la plus récente.

V. — LE RELIEF FLUVIOGLACIAIRE. — Du point de vue proprement morphologique, il est certain que les caractères essentiels du relief des montagnes sont dûs au profil transversal de leurs vallées, à l'écartement plus ou moins grand des versants et aux discontinuités que peuvent offrir leurs pentes. Il ne peut en être autrement pour nos « vallées glaciaires ». L'observation montre que le profil en auge est loin d'être partout réalisé. C'est le cas seulement dans les plus hauts massifs, Pelvoux et Mont Blanc en France, Alpes Pennines et Massif de l'Aar en Suisse, Hohe Tauern en Autriche par exemple. Le profil des grandes vallées se rapproche souvent beaucoup plus, dans sa for-

me générale, d'un V assez largement ouvert. Il est vrai que les versants offrent des ruptures de pentes multiples, des paliers ou « replats » alternant avec de fortes pentes, qui déterminent la position des villages avec leurs cultures ou leurs prairies (fig. 4).

Si l'on n'envisage que les premières centaines de mètres au-dessus du fond des vallées, on peut y reconnaître le profil en auge. C'est à la hauteur du premier replat que débouchent le plus souvent les vallées suspendues, dont les eaux tombent en cascade ou se creusent une étroite gorge de raccordement. Il est impossible d'admettre que le

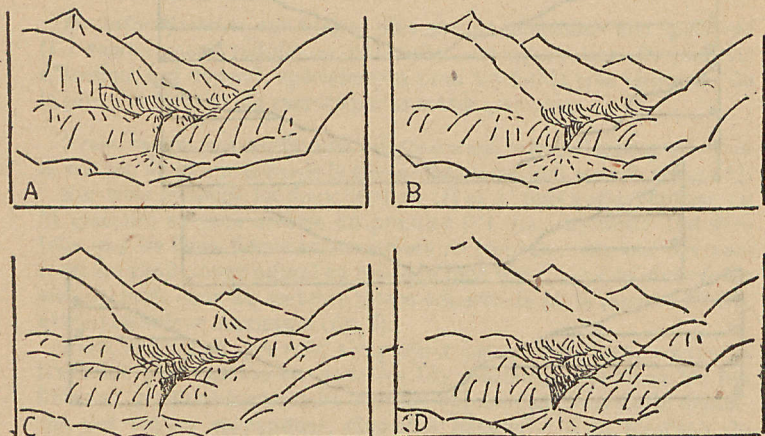


FIG. 5. — Schéma de l'érosion d'une vallée suspendue au cours de plusieurs périodes glaciaires et inter-glaciaires.

glacier ne soit pas monté plus haut ; des moraines, des polis et stries sur la roche s'observent souvent jusqu'à 1000 m. au-dessus du thalweg actuel. Parfois la vallée affluente est suspendue plus haut que le premier replat, souvent la rupture de pente de son profil longitudinal se répète à moins de 1 km. du débouché, avec une seconde gorge de raccordement au-dessus de la première (fig. 5).

Tous ces détails s'expliquent en rappelant que la glaciation n'a pas été continue pendant toute la période pléistocène. Nos « vallées alpines » ont donc été alternativement transformées en vallées glaciaires, c'est-à-dire à l'état de lit glaciaire sur la moitié au moins de leur profil transversal, et rendues à la condition de vallée fluviale. Rien d'étonnant à ce que nous y trouvions, combinés, les caractères

du modelé glaciaire avec ceux du modelé fluvial qui se poursuit actuellement sous nos yeux.

Dans les hautes vallées, où les glaciers sont encore parfois en vue, les phases interglaciaires ont été courtes, l'aspect de lit glaciaire domine. Dans les grandes vallées, comme le Graisivaudan, la Maurienne, le Valais, les glaciers ont pu disparaître assez longtemps pour que le modelé de la vallée fluviale prenne le dessus dans l'ensemble.

Le soulèvement des Alpes à l'époque pliocène avait déclenché partout, avant la glaciation, un offensive de l'érosion normale, qui reprenait à chaque nouvelle phase interglaciaire. C'est sur un relief en voie de rajeunissement par incision des thalwegs et rapide façonnement des versants, que les glaciers s'étaient étalés au début, rencontrant des ruptures de pente des thalwegs, des élargissements ou étranglements de la section transversale suivant la résistance plus ou moins grande des roches ou suivant que la vague d'érosion glaciaire a substitué aux gradins du profil en long des contrepentes en présence desquelles les eaux courantes se sont trouvées à la période interglaciaire. Il s'agissait alors, avant tout, de faire disparaître ces anomalies en sciant des gorges dans les verrous et les gradins de confluence, ou en accumulant des alluvions dans le bassin d'amont. Cependant le profil d'ensemble du thalweg était encore assez loin du profil d'équilibre pour que toute la force vive disponible fût employée à l'inciser plus profondément. Aussi la reprise du modelé glaciaire et le retour au modelé normal devaient se traduire par l'élaboration des mêmes forces à un niveau inférieur.

La complexité du résultat ne saurait surprendre. On peut discuter sur la classification et la chronologie des formes dans bien des cas. On ne peut cependant douter que toute la morphologie de nos vallées alpines résulte de la combinaison de formes de morphologie fluviale avec des formes de morphologie proprement glaciaire. Il serait donc juste de parler de relief « fluvio-glaciaire ».

C'est la conclusion qu'on voudrait voir retenir de cet exposé très résumé, dans lequel il ne pouvait être question d'entrer dans tous les détails techniques nécessaires à une démonstration rigoureuse.

