

EMMANUEL DE MARTONNE

QUELQUES DONNEES NOUVELLES SUR LA JEUNESSE DU RELIEF PREGLACIAIRE DANS LES ALPES

EXTRAIT DU:

„Recueil de travaux offert à M. Jovan Cvijić par ses amis et collaborateurs
à l'occasion de ses trente-cinq ans de travail scientifique“

IMPRIMERIE D'ÉTAT

DU ROYAUME DES SERBES, CROATES ET SLOVÈNES
BELGRADE — 1924

Europe

X

370

QUELQUES DONNÉES NOUVELLES SUR LA JEUNESSE DU RELIEF PRÉGLACIAIRE DANS LES ALPES

On se propose dans les pages suivantes d'appeler l'attention sur certains faits nouveaux, qui semblent de nature à éclairer une question très discutée: l'origine des formes glaciaires alpines.

Nous pouvons montrer dans les Alpes maritimes françaises des verrous et des vallées suspendues en dehors de la limite de la glaciation. Nous trouvons ces formes dans la basse Vésubie où des glaciers n'ont pas pénétré, et nous les cherchons vainement dans la haute Vésubie où leur présence est certaine. Pour trouver le mot de cette énigme et faire ressortir toute la signification de ces faits, une révision des travaux les plus récents sur l'origine des formes glaciaires alpines est nécessaire.

I

Il y a une vingtaine d'années, les idées les plus répandues à ce sujet étaient celles que A. Penck avait magistralement exposées dans son grand ouvrage, écrit en collaboration avec Brückner: Les Alpes à l'époque glaciaire. La plupart des traits originaux du relief alpin, vallées en gradins avec bassins et verrous, vallées suspendues, lacs subalpins, étaient considérés comme l'oeuvre exclusive des glaciers quaternaires; le relief préglaciaire avait dû être un relief de maturité, que l'action glaciaire avait complètement défiguré. Penck était sur ce point absolument d'accord avec W. M. Davis¹. Les contestations ne venaient que d'adversaires systématiques de l'érosion glaciaire comme Heim, Bonney, Martel, ou des savants opposés à toute explication unilatérale comme W. Kilian, J. Brunhes.

En 1910 et 1911 j'ai présenté une théorie nouvelle, d'après laquelle les conditions du modelé alpin apparaissent singulièrement plus complexes². L'étude morphologique d'un certain nombre de vallées des Alpes françaises et suisses, m'avait montré que le point faible de la théorie de A. Penck et W. M. Davis était la supposition d'un relief préglaciaire ayant le caractère de la maturité. C'était trop

demander au glacier (Kilian et Brunhes l'avaient bien senti) que de lui attribuer tout le rajeunissement quaternaire. La genèse des formes glaciaires alpines s'expliquait beaucoup mieux par une érosion glaciaire modérée, mais très inégale, conditionnée par un relief préglaciaire assez heurté, tel que doit être celui d'une montagne rajeunie par un soulèvement récent. Penck, pas plus que Davis, n'avait tenté d'expliquer le mécanisme de l'érosion glaciaire. J'ai essayé d'en rendre compte, en faisant appel aux lois du mouvement des glaciers, et en discutant une formule de frottement. Le résultat, d'accord avec la répartition des marques d'érosion dans les lits de glaciers récemment abandonnés, était que les ruptures de pente et les étranglements sont des lieux de moindre érosion. Or, des ruptures de pente et des étranglements devaient exister dans les vallées préglaciaires et ont dû être le point de départ de la formation des verrous et des contrepentes.

La guerre mondiale m'a empêché de poursuivre ces études, et des circonstances qui n'en sont pas indépendantes ont attiré encore pendant quelque temps mon attention sur d'autres régions et d'autres problèmes. En passant en revue maintenant ce qui a été publié depuis par les géographes et géologues suisses, allemands et autrichiens, je constate une évolution aboutissant à une sorte de désarroi dans les rangs de ceux qu'on pourrait appeler les glacialistes.

Au premier moment, tandis que la théorie que j'ai exposée en 1910 et 1911 ralliait en France et en Suisse même les suffrages de savants comme Kilian, Lugeon, Nussbaum, l'école de Penck réagissait violemment. Dans un important mémoire sur le Surcreusement du Tessin, où il suit fidèlement les directrices du maître, Lautensach soumettait à une critique serrée ma formule de frottement et rejetait complètement mes conclusions³. Depuis, Lehman dans son étude de l'Adamello et même J. Sölch, beaucoup plus dégagé de l'influence du maître, se sont contentés de renvoyer à la discussion de Lautensach, considérée comme décisive.

Pourtant des observateurs impartiaux, travaillant sur le terrain en différents points des Alpes, commençaient dès 1912 à reconnaître la jeunesse du relief préglaciaire. L'analyse morphologique rigoureuse des vallées affluentes de la Salzach dans les Hauts Tauern, conduit Distel⁴ à des conclusions d'autant plus remarquables qu'il ne paraît connaître ni mon rapport de mission dans la même région⁵, ni mes études antérieures sur les vallées alpines en général. La jeunesse des vallées préglaciaires ne peut être mise en doute dans les Tauern; l'auge glaciaire est d'abord une forme de rajeunissement fluviatile transformée par le glacier; les vallées aveugles (Trogsschluss) sont des têtes de vallées rajeunies.

Presqu'en même temps, Nussbaum, analysant les formes de la vallée de la Viège⁶ reconnaissait l'impossibilité de les expliquer

comme des formes de maturité modifiées par la glaciation: les vallées suspendues étaient déjà mal raccordées avec la vallée principale avant l'arrivée des glaciers.

Ampferer a exposé en 1915 une théorie, dont le point essentiel est que les formes glaciaires résultent de la transformation de formes de rajeunissement⁷.

L'évidence est telle qu'un élève de A. Penck, étudiant les Alpes de Styrie est amené à formuler des conclusions semblables⁸. D'après J. Sölch, la maturité préglaciaire des vallées est inconcevable; les Alpes étaient sous le coup d'un soulèvement récent à la fin du pliocène⁹; les vallées principales s'étaient creusées plus vite que les vallées secondaires, qui avaient des ruptures de pente à leur confluent¹⁰; l'oeuvre des glaciers quaternaires n'a guère consisté en somme qu'à élargir des vallées jeunes, déjà profondément creusées¹¹.

Dans un mémoire récent, J. Sölch va encore plus loin¹². L'expression de certaines idées y est presque identique à celle que j'ai donnée plus de 10 ans avant, bien que mes travaux ne soient cités qu'une fois en passant. D'accord avec moi sur la jeunesse du relief préglaciaire, l'auteur semble même ne plus guère accorder d'importance à l'érosion glaciaire; l'idée du surcreusement paraît presque abandonnée.

Mais il y a plus. Un des points capitaux de la théorie de Penck était l'explication des lacs subalpins et des grandes vallées alluviales comme des bassins de surcreusement, contrairement à la théorie de Heim, qui y voyait des vallées noyées ou remblayées par suite d'un affaissement. La vallée longitudinale de l'Inn était considérée comme le type de la vallée surcreusée; les terrasses du Mittelgebirg d'Innsbruck étaient dues au remblaiement provoqué par le glacier du Zillertal bouchant la vallée de l'Inn déjà libre de glace pendant une phase interglaciaire de retrait. Or, une étude détaillée du Mittelgebirg et notamment de la fameuse brèche de Hötting a conduit Ampferer à rejeter complètement cette interprétation¹³. Ses arguments paraissent décisifs, mais l'interprétation nouvelle qu'il propose est assez extraordinaire et n'est appuyée d'aucune preuve convaincante: la vallée de l'Inn aurait subi des mouvements alternatifs de soulèvement et d'affaissement; les affaissements ont déterminé l'alluvionnement, les soulèvements l'érosion des dépôts, découpés en terrasses. Voici pourtant que l'auteur des „Alpen im Eiszeitalter“ se rallie lui-même à cette théorie! Dans une série d'articles récents¹⁴ il reconnaît qu'Ampferer a complètement ruiné son explication du Mittelgebirg; un lac, produit par affaissement a réellement occupé la vallée de l'Inn, comme celles de l'Enns et de l'Isar même; les deltas des lacs pourraient être retrouvés à des altitudes très différentes, indiquant un soulèvement postérieur¹⁵. Penck avoue qu'il y a du vrai dans la théorie de Heim, jadis énergi-

quement rejetée par lui: le bord des Alpes a vu réellement des affaissements, suivis depuis de soulèvements, sauf là où les lacs ont persisté

Le géographe non spécialisé dans les questions alpines, et qui suit l'opinion moyenne, peut se demander de quel côté s'orienter désormais.

S'il est au courant de la théorie brillante, mais trop simple, exposée jadis par Penck, en même temps que de celle, évidemment plus compliquée et moins claire, que j'ai formulée en 1910, peut-être aura-t-il l'impression que le savant géographe de Berlin aurait été mieux inspiré en ne rejetant pas un essai nouveau, qui corrigeait plutôt qu'il ne ruinait son interprétation des formes alpines. Les faits se sont accumulés et il n'est plus possible de parler d'un relief de maturité préglaciaire dans les Alpes. On doit reconnaître que les traits originaux du relief alpin sont dus au rajeunissement qui a conditionné l'érosion glaciaire, comme je l'ai indiqué il y a 20 ans; sinon, l'action même des glaciers sera mise en doute et la voie est ouverte à toutes les spéculations tectoniques¹⁶.

Il semble qu'une épreuve décisive pourrait être faite par l'étude d'une région montagneuse soumise évidemment pendant le quaternaire à un rajeunissement vigoureux et où la glaciation a été limitée de façon qu'on puisse observer côte à côte l'effet du rajeunissement suivi et non suivi de l'action glaciaire. Les Alpes Maritimes offrent précisément cette occasion.

II

Le premier contact avec les vallées débouchant sur la côte de Nice donne l'impression de montagnes méditerranéennes attaquées par une érosion furieuse. Le Var, la Tinée et la Vésubie confluent

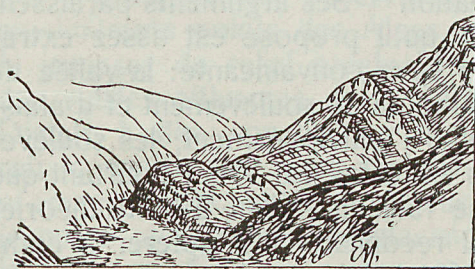


Fig. 1. — Le Verrou de la Mescla vue de l'aval.

dans des gorges où le lit de la rivière est parfois réduit à une seule marmite, où la lumière ne pénètre pas en hiver, où la route a peine à se glisser au prix de tunnels et d'encorbellements. En grim pant les sentiers en lacets qui menent aux villages pittoresquement perchés sur des pitons d'apparence inaccessible, on ne voit que ravinements sauvages dans les schistes noirs crétacés ou les couches rouges du Permien, escarpements calcaires massifs et gradins répétés de strates marneuses. De formidables traînées d'éboulis descendent des crêtes.

Le géographe familier avec les formes des vallées glaciaires des Alpes centrales est frappé d'en retrouver l'apparence ici même. Les barres sciées par la Tinée, la Vésubie, et même le Var ressemblent aux verrous (fig. 1 à 3).

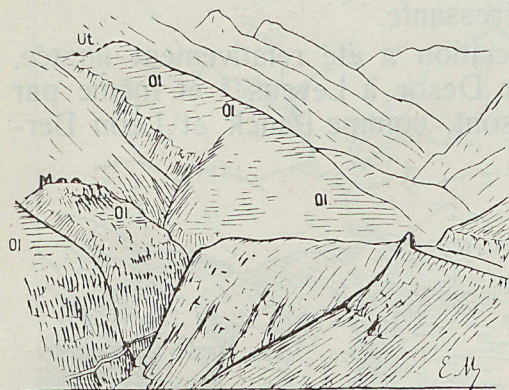


Fig. 2. — Verrou à l'entrée des gorges de Duranus sur la Vésubie, vue vers l'amont.

Ut. = Utelle M. = Grandes Millaut, Ol. = Terrasses avec oliviers.

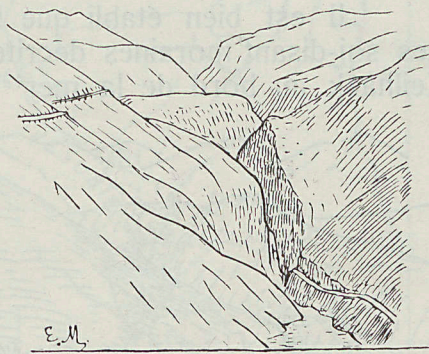


Fig. 3. — Le même verrou vue de l'amont.

Les vallées secondaires débouchent le plus souvent près de gorges impraticables, plusieurs ont vraiment l'aspect de vallées suspendues avec gorges de raccordement (fig 4 à 6); les vallons les

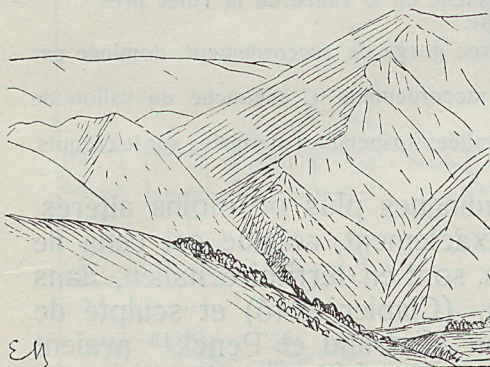


Fig. 4. — Debouché du vallon de Frasse sur la Vésubie.

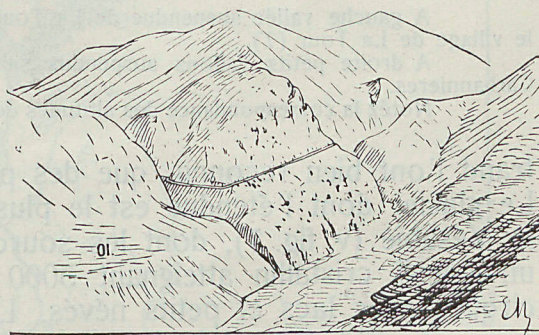


Fig. 5. — Debouché du vallon de St. Colombran sur la Vésubie.

moins importants restent absolument en l'air, des cascades en tombant aux grandes pluies de printemps et d'automne (fig 6).

Pourtant on cherche vainement les dépôts glaciaires. La carte géologique détaillée (feuilles de Nice et de St. Martin Vésubie) n'en marque que dans la haute Vésubie. Alors qu'une excursion rapide dans les hautes vallées de Savoie ou du Dauphiné montre partout les crêtes des moraines latérales et permet de voir dans les entailles des torrents la structure caractéristique des moraines avec blocs striés, rien de

pareil ne se révèle avant d'avoir atteint les têtes même des vallées principales.

L'étude morphologique et glaciologique des Alpes Maritimes est pénible et difficile¹⁷; elle révèle des faits singuliers, mais dont la signification est particulièrement intéressante.

Il est bien établi que la glaciation a été relativement limitée. Les soi-disant moraines décrites par Desor à Levens¹⁸ et même par Keilhack au bord de la mer¹⁹, ne sont, comme Penck et Léon Ber-

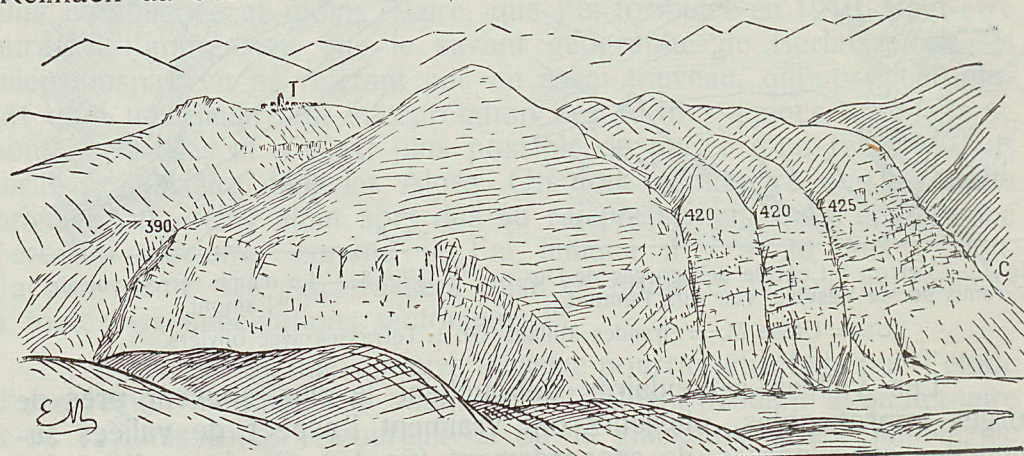


Fig. 6. — Vue panoramique sur le versant gauche de la vallée de la Tinée près de Courbaisse.

A gauche vallée suspendue de La Tour avec gorge de raccordement, dominée par le village de La Tour (T).

A droite petits vallons suspendus sans raccordement, C débouché du vallon de Carbannières.

Notéz la correspondance des altitudes des vallées suspendues marquées sur le croquis.

trand l'ont bien reconnu, que des poudingues plus ou moins altérés. Le glacier dont l'étendue est le plus exactement connue est celui de la Vésubie (v. fig. 7), dont les sources sont en territoire italien, dans un massif cristallin atteignant 3000 m. (Clapier 3046) et sculpté de cirques avec lacs et petits névés. Léon Bertrand et Penck¹⁹ avaient supposé qu'il débordait dans la vallée de Bramafama, affluent de la Tinée, en franchissant le col de St. Martin. J'ai trouvé, à 750 m.

Légende de la figure 7.

1, 2, 3, 4 = Delta pliocène du Var (1 = Surface d'érosion inférieure; 2 = Surface d'érosion moyenne; 3 = Surface d'érosion supérieure; 4 = Lambeaux sans surface d'érosion nette). — 5 = Terrasses quaternaires. — 6 = Moraines. — 7 = Limites du glacier de la Vésubie. — 8 = Verrou. — 9 = Grande gorge. — 10 = Vallée suspendue avec gorge de raccordement. — 11 = Vallée suspendue sans raccordement. — 12 = Crêtes et sommets alpins à cirques glaciaires. — 13. = Cols. — 14 = Crêtes et sommets secondaires.

Abréviations: Bl. Bollène — Bt. Berthémont — Bv. Belvédère — CL. Clans — Ch. Chastagne — C.S.M. Col de St. Martin — D. Duranus — Lv. Lévieux — Lt. Lantosque — MS. La Mescla — SC. St. Colombar — SJ. St. Jean la Rivière — S.M. St. Martin Vésubie — S.S. St. Sauveur de Tinée — Ut. Utelle — V. Villars.

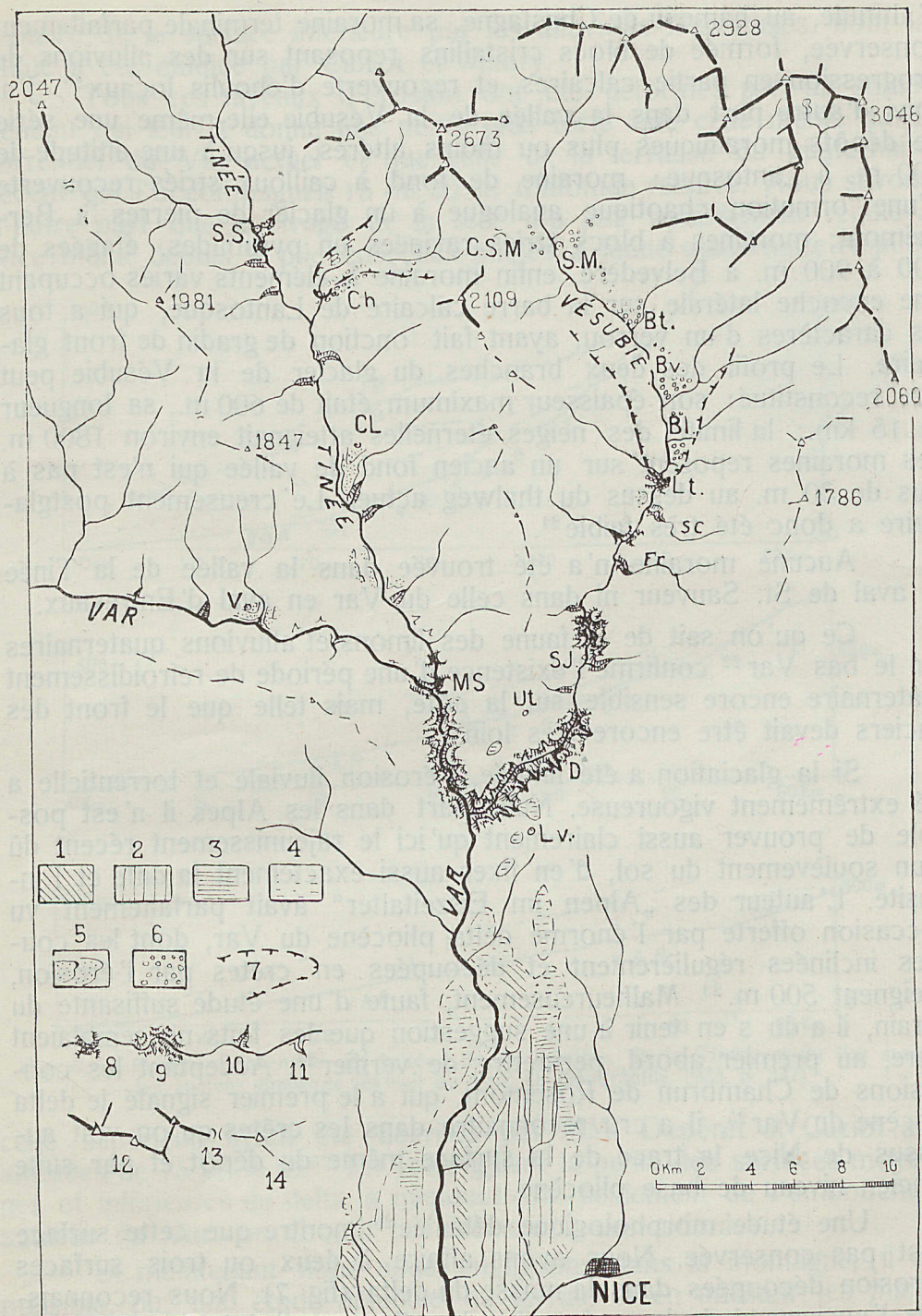


Fig. 7. — Carte morphologique des vallées des Alpes Maritimes (Var inférieur, Tinée, Vésubie),
échelle environ 1:300.000.
(voir la légende sur la page 126).

d'altitude, au hameau de Chastagne, sa moraine terminale parfaitement conservée, formée de blocs cristallins reposant sur des alluvions de progression en partie calcaires, et recouverte d'éboulis locaux²⁰. J'ai suivi d'autre part dans la vallée de la Vésubie elle-même une série de dépôts morainiques plus ou moins altérés, jusqu'à une altitude de 500 m. à Lantosque: moraine de fond à cailloux striés recouverte d'une formation chaotique analogue à un glacier de pierres à Berthémont; moraines à blocs striés ravinées en pyramides, étagées de 700 à 900 m. à Belvédère, enfin moraine à éléments variés occupant une encoche latérale sur la barre calcaire de Lantosque, qui a tous les caractères d'un verrou, ayant fait fonction de gradin de front glaciaire. Le profil des deux branches du glacier de la Vésubie peut être reconstitué: son épaisseur maximum était de 600 m., sa longueur de 15 km.; la limite des neiges éternelles atteignait environ 1800 m. Les moraines reposent sur un ancien fond de vallée qui n'est pas à plus de 30 m. au dessus du thalweg actuel. Le creusement postglaciaire a donc été très faible²¹.

Aucune moraine n'a été trouvée dans la vallée de la Tinée en aval de St. Sauveur ni dans celle du Var en aval d'Entrevaux.

Ce qu'on sait de la faune des limons et alluvions quaternaires sur le bas Var²² confirme l'existence d'une période de refroidissement quaternaire encore sensible sur la côte, mais telle que le front des glaciers devait être encore très loin.

Si la glaciation a été limitée, l'érosion fluviale et torrentielle a été extrêmement vigoureuse. Nulle part dans les Alpes il n'est possible de prouver aussi clairement qu'ici le rajeunissement récent dû à un soulèvement du sol, d'en fixer aussi exactement la date et l'intensité. L'auteur des „Alpen im Eiszeitalter“ avait parfaitement vu l'occasion offerte par l'énorme delta pliocène du Var, dont les couches inclinées régulièrement et découpées en crêtes par l'érosion, atteignent 500 m.²³ Malheureusement, faute d'une étude suffisante du terrain, il a dû s'en tenir à une suggestion que les faits ne semblaient guère, au premier abord, permettre de vérifier²⁴. Acceptant les conclusions de Chambrun de Rosemont, qui a le premier signalé le delta pliocène du Var²⁵, il a cru reconnaître dans les crêtes qu'on voit au-dessus de Nice la trace de la surface même du dépôt et par suite l'ancien niveau de base pliocène.

Une étude morphologique détaillée²⁶ montre que cette surface n'est pas conservée. Nous avons affaire à deux ou trois surfaces d'érosion découpées dans la masse du delta (fig. 7). Nous reconnaissons l'ancienneté de la surface la plus élevée à l'altération des cailloux cristallins, et au passage latéral à des cônes de déjections locaux (Cabanes 350 m. Apremont 450 m.); nous pouvons fixer l'âge qua-

ternaire de la surface inférieure par les alluvions limoneuses, dont la faune a été étudiée par Caziot et Maury.

Tous ces niveaux d'érosion ont été déformés par un soulèvement qui leur a donné une pente plus forte que celle même du lit torrentiel du Var actuel et que celle de la terrasse du quaternaire récent qui l'accompagne à 15 ou 20 m. d'altitude relative. Nous savons d'autre part que le rivage de la mer n'a pas notablement reculé à Nice même depuis le pliocène; des plages à faune quaternaire et plio-

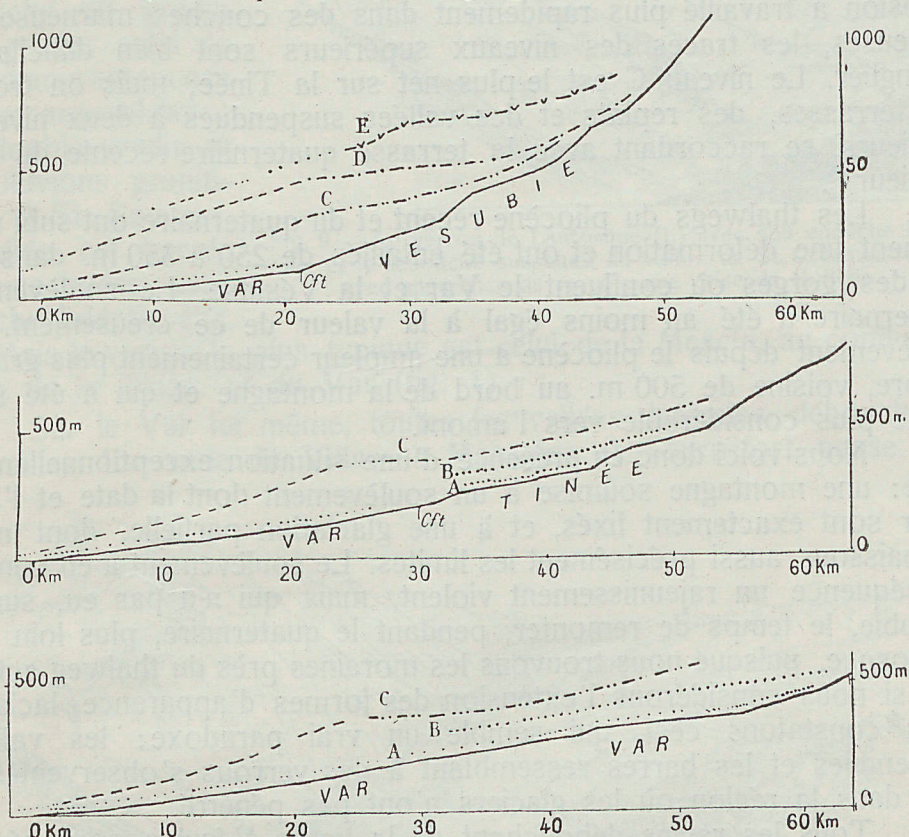


Fig. 8. — Profils d'ensemble des vallées de la Vésubie, de la Tinée, et du Var avec les anciens thalwegs (extrait du Ann. de Géographie 1923, p. 337).

cène supérieur ayant été décrites par MM. Depéret et Caziot aux altitudes de 15 et 30 m.²⁷ En prolongeant la pente des surfaces moyennes et inférieures du delta à quelques km. seulement de l'embouchure actuelle du Var, on aboutit précisément à ces altitudes.

Si maintenant nous nous engageons dans la montagne, il est possible, par une étude détaillée du terrain et en utilisant les plans-directeurs au 1:10.000, de retrouver les traces des anciens fonds de vallée correspondant aux surfaces d'érosion du delta et aux lignes de rivage du même âge.

Les vallées suspendues et les replats qu'on observe au dessus des gorges de la basse Vésubie s'ordonnent en deux séries (C et D), correspondant à la surface inférieure et à la surface moyenne du delta. Ces anciens thalwegs montent avec une pente inférieure à celle du thalweg actuel et viennent se raccorder avec le thalweg préglaciaire vers Lantosque et Belvédère. On retrouve des rudiments d'un niveau supérieur (E) qui correspond peut-être à l'ancienne surface du delta, actuellement disparue (fig. 8). Sur la Tinée et le Var, où l'érosion a travaillé plus rapidement dans des couches marneuses et argileuses, les traces des niveaux supérieurs sont bien difficiles à distinguer. Le niveau C est le plus net sur la Tinée; mais on trouve des terrasses, des replats et des vallées suspendues à deux niveaux inférieurs, se raccordant avec la terrasse quaternaire récente du Var inférieur²⁸.

Les thalwegs du pliocène récent et du quaternaire ont subi visiblement une déformation et ont été entaillés de 250 à 350 m. dans les grandes gorges où confluent le Var et la Vésubie. Le soulèvement quaternaire a été au moins égal à la valeur de ce creusement. Le soulèvement depuis le pliocène a une ampleur certainement plus grande encore, voisine de 500 m. au bord de la montagne et qui a été sans doute plus considérable vers l'amont.

Nous voici donc en présence d'une situation exceptionnellement nette: une montagne soumise à un soulèvement dont la date et l'ampleur sont exactement fixés, et à une glaciation partielle, dont nous connaissons aussi précisément les limites. Le soulèvement a eu comme conséquence un rajeunissement violent, mais qui n'a pas eu, sur la Vésubie, le temps de remonter, pendant le quaternaire, plus loin que Lantosque, puisque nous trouvons les moraines près du thalweg actuel. Or, si nous considérons l'extension des formes d'apparence glaciaire, nous constatons ceci, qui semble un vrai paradoxe: les vallées suspendues et les barres ressemblant à des verrous s'observent surtout dans la région où les glaciers n'ont pas pénétré.

Tous les ravins débouchant de la basse Vésubie sont réellement suspendues, leurs eaux dégringolent en cascades par des abîmes inabordables. Le débouché du vallon de St. Colombar (fig. 5) ou celui du vallon de Frace (fig. 4) rappellent à s'y méprendre telle vallée suspendue du Valais ou de la Tarentaise. Or, le glacier n'est certainement pas descendu plus loin que Lantosque, qui est sur un verrou à double gorge, dont une remplie de moraine (fig. 9). Au-delà apparaît une sorte de bassin largement érodé. La vallée reste très large jusqu'à St. Martin-Vésubie, si l'on fait abstraction de l'encaissement récent dans les dépôts détritiques, bien que la pente du thalweg continue à être très forte. Nous trouvons des moraines, mais nous cherchons des verrous et des vallées suspendues.

Ainsi, pas de formes glaciaires là où le glacier a certainement séjourné, et des formes glaciaires là où il n'a pas pénétré!...

En remontant le Var et la Tinée, nous trouvons aussi des vallées suspendues et des barres ressemblant à des verrous bien longtemps avant d'avoir approché de la limite de la glaciation. Le vallon de la Tour offre un débouché en gradin avec gorge; celui de Bramafama est encore plus remarquable avec son double gradin et ses alluvions granitiques. A St. Sauveur, la vallée est barrée par une bosse avec encoche latérale (fig. 10). Mais le verrou le plus typique est celui de la Mescla, au confluent même de la Tinée et du Var (fig. 1).

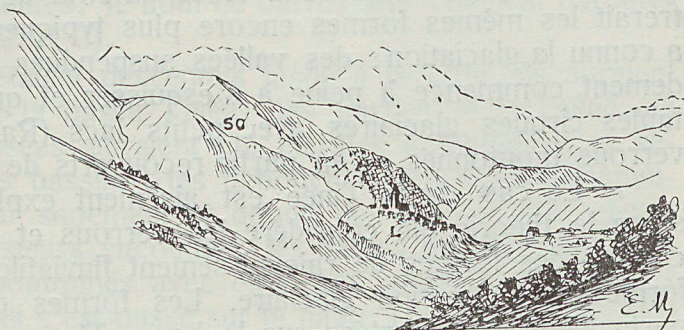


Fig. 9. — Le verrou de Lantosque (L) avec son encoche latérale, et le débouché suspendu du vallon de St. Colombran (SC) avec apparence de verrou, vue prise de Bollène.

Sur le Var lui même, toutes les vallées latérales débouchent en gradins. La route de Villars à Massoins et Tournefort passe de

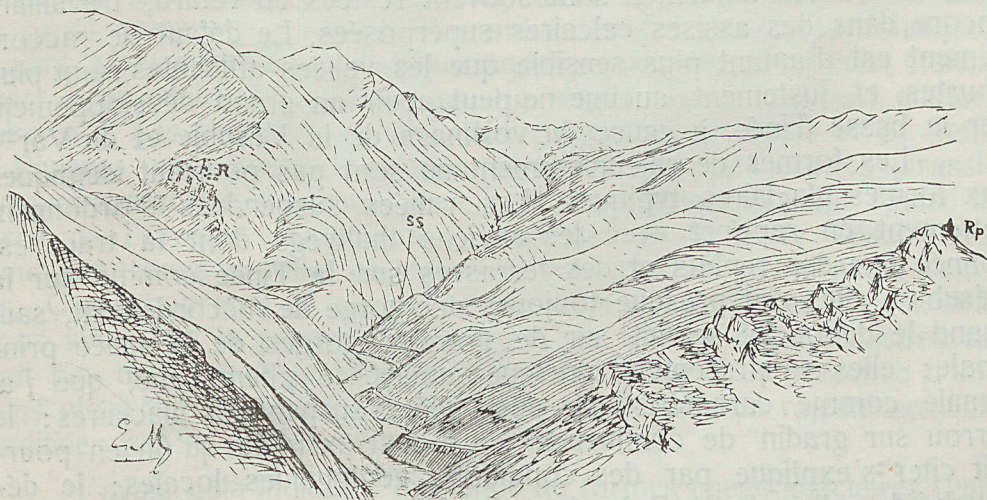


Fig. 10. — Panorama sur la haute Tinée près du Castel d'Irougne.

SS = Verrou de St. Sauveur (le village caché derrière), R = Roure.

Rp = Rimplas.

Au fond cirques glaciaires et vallées suspendues.

l'un à l'autre en se tenant à 200 m. au dessus du fleuve. Entre Puget-Théniers et Entrevaux, on ne voit à droite et à gauche que petites vallées suspendues.

Nous ne citons que quelques exemples. A chaque pas on trouve les mêmes apparences des formes glaciaires dans des vallées qui n'ont pas connu la glaciation, mais qui ont été violemment rajeunies par l'érosion normale.

La haute vallée de la Tinée du côté de St. Etienne nous montrerait les mêmes formes encore plus typiques et dans une région qui a connu la glaciation: des vallées suspendues où la gorge de raccordement commence à peine à s'esquisser et qui se terminent en véritables cirques glaciaires avec petits lacs (Rabuons, Vens, etc), des verrous moutonnés et en partie recouverts de moraines (St. Dalmas).

Le cas de la Tinée est aisément explicable, mais seulement selon la théorie qui considère les verrous et les vallées suspendues comme des formes de rajeunissement fluvial plus ou moins transformées par l'action glaciaire. Les formes de rajeunissement sont particulièrement heurtées sur la basse Tinée, à cause de l'hétérogénéité des couches géologiques, violemment plissées: les barres ressemblant à des verrous sont toujours formées par les calcaires compacts du jurassique ou du crétacé. Le verrou de la Mescla résulte du fait que la Tinée a rencontré en s'enfonçant sur place un bombement anticlinal calcaire. Quand la Tinée a atteint des formations meubles, schistes noirs jurassiques, marnes crétacées, couches rouges du Permien, ou Trias gypseux, elle a rapidement enfoncé son thalweg, mais les vallées affluentes sont souvent restées en retard, travaillant encore dans des assises calcaires superposées. Le défaut de raccordement est d'autant plus sensible que les vallées affluentes sont plus courtes, et, justement, aucune ne peut avoir un grand développement sur la basse Tinée, à cause du voisinage de la Vésubie et du Var²⁹.

Les formes de rajeunissement ne sont pas pourtant identiques aux formes glaciaires typiques. Les vallées suspendues s'ordonnent nettement en rapport avec les anciens thalwegs dont la trace est donnée par des replats et des terrasses sur la Tinée comme sur la Vésubie; elles ont presque toujours une gorge de raccordement, sauf quand le débouché se fait sur de grandes gorges de la vallée principale; elles ne présentent presque jamais ce phénomène, que j'ai signalé comme caractéristique des vallées suspendues glaciaires: le verrou sur gradin de confluence³⁰. Le seul exemple qu'on en pourrait citer s'explique par des conditions géologiques locales: le débouché du vallon de St. Colombar (fig. 5) se trouve dans une masse de calcaires jurassiques reposant sur le Trias (gypses et cargneules), dans lequel est entaillée la Vésubie, et recouvert de couches crétacées moins résistantes dans lesquelles est creusé le cours moyen de la petite rivière qui a pu y élargir notablement la section de sa vallée; un étranglement devait déjà exister au confluent avant l'enfoncement récent du thalweg de la Vésubie, que son affluent n'a pu suivre.

Quant aux barres ressemblant à des verrous, il leur manque les roches moutonnées et les encoches latérales caractéristiques. Le plus souvent ce sont des plateformes, traces d'anciennes surfaces d'érosion qui ont disparu à l'amont et à l'aval par l'érosion rapide de formations moins résistantes; le nom de barres leur convient parfaitement (ex Duranus fig. 2 et 3).

Si les glaciers étaient descendus jusqu'à la côte, ils auraient transformé l'aspect de la basse Tinée; les parties de la vallée qui ne sont pas très encaissées auraient été élargies notablement et seraient devenues de vrais bassins; les débouchés des vallées suspendues auraient reculé par sapement et donné des gradins plus élevés avec des verrous à plusieurs encoches; les barres seraient devenues de véritables verrous moutonnés avec encoches latérales et placages de moraines. C'est ce qui s'est passé sur la haute Tinée; et les formes glaciaires y seraient plus frappantes et plus heurtées si le modelé avait affecté des roches aussi variées que dans le cours inférieur, au lieu de se faire dans une masse de gneiss assez homogènes.

Nous pouvons maintenant expliquer l'absence de verrous et de vallées suspendues sur la haute Vésubie, en dehors des têtes de sources elles-mêmes.

Depuis la frontière jusqu'à Lantosque, la vallée, creusée dans le Trias ou le Permien peu résistants, avait acquis avant la glaciation un profil assez évasé; les vallées affluentes (Fenestre, Gordolasque) avaient à peu près la même importance que la vallée principale, étaient aussi profondes et aussi larges. La vague de creusement quaternaire n'a pas remonté au delà des gorges de Duranus et St. Jean la Rivière; ces entailles sauvages dans les masses calcaires jurassiques et crétacées superposées ici par les plissements ont épuisé la force de l'érosion remontante. Le glacier de la haute Vésubie n'a donc pas trouvé un relief de rajeunissement avec des contrastes heurtés. C'est pourquoi il n'a donné ni vallées suspendues ni verrous. Nous avons ici la preuve décisive que les formes dites glaciaires ne sont pas dans les Alpes absolument inséparables de la présence d'anciens glaciers; en réalité ce sont bien des formes de rajeunissement, modifiées par le glacier quand il les rencontre.

J'avais déjà indiqué l'existence de formes pseudoglaciaires (vallées suspendues et barres rappelant les verrous) dans les montagnes soumises à un rajeunissement vigoureux sans action glaciaire³¹ Sölch lui même note dans les Alpes de Styrie que les vallées suspendues se trouvent à la fois dans les parties soumises à la glaciation et dans celles qui y ont échappé³². On pourrait aisément faire la même démonstration dans les Pyrénées; la vallée du Tet notamment offre des gradins de confluence avec gorge de raccordement tout à fait remar-

quables bien au-dessous des derniers moraines. D'après l'examen de la carte, il semble qu'on trouverait en Corse l'occasion d'observations; analogues. Mais nous avons dans la Vésubie un cas particulièrement intéressant: la haute vallée préglaciaire ayant un certain caractère de maturité, les formes dites glaciaires (verrous et vallées suspendues) y font défaut; la basse vallée vigoureusement rajeunie offre des vallées suspendues et des barres ressemblant aux verrous, auxquelles ne manque que l'empreinte glaciaire. L'épreuve et la contre-épreuve!

III.

Le rajeunissement du relief préglaciaire des Alpes ne peut pas être mis en doute; c'est bien ce rajeunissement qui a été le point de départ des anomalies du relief glaciaire. La théorie qui voulait expliquer ce relief comme entièrement dû aux glaciers travaillant sur un relief de maturité doit être définitivement rejetée.

Dès lors on est conduit, soit à réduire à rien l'oeuvre des glaciers et à chercher l'explication des anomalies non explicables par l'érosion fluviale dans d'hypothétiques mouvements du sol; soit à admettre une théorie qui fait dériver ces anomalies de certains accidents d'un relief rajeuni par les eaux courantes et modifié par l'érosion des glaciers gênés dans leur écoulement régulier.

C'est vers la première solution que paraissent pencher, en désespoir de cause, ceux qui voulaient autrefois trop demander aux glaciers. La seconde solution est pourtant celle qui répond le mieux aux faits, et il n'est pas douteux qu'elle rallierait tous les suffrages, si les conditions de l'érosion glaciaire nous étaient suffisamment bien connues, de façon à ce que les lois mécaniques de l'écoulement rendent compte de la valeur et des variations de l'érosion dans le sens longitudinal et transversal.

Malheureusement le problème n'a jamais été abordé sérieusement que par l'auteur de ces lignes. Ce premier essai ne pouvait être sans imperfections; mais les faits nouveaux révélés de tous côtés par l'étude du relief alpin montrent que la base était solide. Le point de départ est bien un relief rajeuni et non un relief de maturité. Les arguments spéciaux par lesquels on a cru pouvoir ruiner la théorie en question gardent-ils néanmoins leur valeur? Il nous semble difficile de terminer cet exposé sans l'examiner³³.

C'est dans le mémoire de Lautensach sur le surcreusement du Tessin qu'ont été réunies toutes les objections formulées contre ma théorie mécanique de l'érosion glaciaire³⁴.

Rappelons les points essentiels de cette théorie.

Le glacier est un fluide visqueux qui coule sous l'influence de la pesanteur. Comme tous les fluides, il tend à donner à son lit une section en forme de demi-cercle; d'où l'élargissement du lit glaciaire par sapement latéral, tendant à donner le profil caractéristique de l'auge glaciaire à la partie du lit du glacier qui correspond à la partie rajeunie de la vallée préglaciaire. Comme tous les fluides, il érode par frottement et les variations du frottement doivent expliquer celles de l'érosion. Fluide visqueux, il subit des déformations internes qui absorbent une partie de sa force vive; il est divisé en lames qui glissent l'une sur l'autre et traversé de crevasses, d'autant plus développées que sa vitesse est plus grande. Les glissements internes et les cassures diminuent la pression et le frottement externe.

Les variations du frottement dans le sens longitudinal dépendent évidemment de la vitesse (v), de la pente (α), de la profondeur ou épaisseur des glaciers (h), de la densité de la glace (D) et de l'adhérence du glacier à son lit (A). J'ai groupé ces éléments dans une formule, où la pente intervient, d'après les données de l'hydraulique

$$F = g v^2 h D A \cos \alpha.$$

Tous les faits révélés par l'étude des glaciers actuels montrent que la densité varie peu, que la vitesse est faible et relativement uniforme, que la profondeur est considérable et très variable, que l'adhérence enfin varie aussi notablement en fonction de la pente et de la profondeur. Il est établi que les variations de la vitesse d'un côté, de l'adhérence et de la profondeur de l'autre, sont de signe contraire. Les plus grandes vitesses sont là où la pente superficielle est la plus forte; on constate justement sur ces ruptures de pente une diminution de l'épaisseur du glacier et une réduction de l'adhérence sous l'influence des cassures et des glissements internes. Il n'est donc pas possible de douter que les maxima du frottement ne sont pas aux ruptures de pente, mais au-dessus et au-dessous. Or, des ruptures de pente existaient certainement dans les glaciers quaternaires, par suite du rajeunissement préglaciaire, soit qu'il y eut de vraies barres coupées de gorges, dans les vallées, devenues les lits des glaciers, ou de simples rétrécissements de la section de la vallée; il y avait des gradins correspondant aux points terminaux atteints par la vague d'érosion remontante et au débouché des vallées secondaires imparfaitement raccordées.

J'ai essayé de traduire graphiquement les variations des différents facteurs du frottement, de façon à en montrer la résultante. Lautensach n'a pas compris qu'il s'agissait d'une démonstration; ces courbes sont, dit-il, sans valeur aucune, puisque les coefficients des différents facteurs ont été fixés arbitrairement. En réalité j'ai essayé

plusieurs coefficients et choisi ceux qui donnaient les courbes répondant le mieux aux faits révélés par l'étude des glaciers actuels. Nous n'avons pas d'autre possibilité tant que l'observation et l'expérimentation n'auront pas réussi à fixer avec plus de précision les conditions complexes du mouvement des glaciers.

La partie en apparence la plus décisive de l'argumentation de Lautensach est celle qui, en s'attaquant à la formule, élimine par des substitutions le facteur $\cos \alpha$, dont la présence indique une variation du frottement en sens inverse de la pente. Pour y arriver, il introduit la valeur de la vitesse (v) en fonction de la profondeur (h) et de la pente (α)

$$v = k \sqrt{h \operatorname{tg} \alpha}$$

Bien qu'il y ait une erreur dans le développement, le résultat est exact, et $\cos \alpha$ est éliminé. Mais est-il permis de réaliser dans une formule un seul des facteurs, sans s'occuper d'autres facteurs qui peuvent contenir les mêmes éléments que ceux introduits par une réalisation partielle? Evidemment non. Si nous évaluons la vitesse (v) en fonction de h et de α , nous devons en faire autant pour l'adhérence (A) qui varie proportionnellement à la profondeur et inversement à la pente. En introduisant

$$A = \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha}$$

on aboutit au résultat $F = g D h^3 \cos \alpha$.

On peut regretter que je n'ai pas fait dès le début cette simplification; car elle est très intéressante et montre clairement l'importance capitale de la profondeur, autrement dit de l'épaisseur du glacier. C'est par son poids que le glacier agit surtout.

Lautensach a-t-il soupçonné le péril que cachait pour sa démonstration la réalisation du facteur A ? Il a contesté en tous cas l'évaluation que j'ai donné de l'adhérence en fonction de la pente et de la profondeur. D'après cette formule, dit-il, on aurait $A = \infty$ pour $\alpha = 0$; c'est-à-dire qu'on ne pourrait faire bouger un bloc de glace sur une surface horizontale „das würde sagen dass man ein Eisblock auf einer horizontalen Fläche nicht schieben kann.“ L'erreur du raisonnement n'apparaît pas au premier abord; à la réflexion on en découvre deux très graves.

La phrase citée prouve clairement que Lautensach n'envisage pas l'adhérence telle que je l'ai définie: le contact plus ou moins parfait du glacier avec son lit; l'objection est donc sans valeur.

On peut même contester la conclusion à propos de l'adhérence telle que l'entend Lautensach. En réalité la pente n'est nulle que

si le bloc de glace a une épaisseur uniforme; dans ces conditions il ne bougera pas de lui-même sur une surface horizontale. Mais on peut le faire bouger (schieben); cela équivaut à lui appliquer une force, dont l'équivalent serait, s'il était laissé à lui-même, une augmentation d'épaisseur d'un côté. Lautensach a oublié que c'est la pente superficielle que j'ai désigné par α .

Il est vrai qu'il me reproche de ne pas considérer la pente du fond. Il a raison de dire qu'elle varie plus que la pente superficielle; mais il nous est impossible de connaître exactement ces variations et elles se reflètent, plus ou moins amorties, dans celles de la pente de surface. Celle-ci mérite donc d'être considérée; d'autant plus qu'elle ne dépend pas seulement de la pente du fond, comme la discussion vient de le montrer.

Ainsi voilà deux objections, présentées avec une rigueur impressionnante, mais qui se révèlent à l'examen, complètement dépourvues de fondement. Le reste de l'argumentation ne mérite pas une discussion sérieuse. Je n'y vois que de fausses interprétations, peut être excusables si je n'ai pas réussi à exposer assez clairement mes idées, si même, peut être, je n'ai pas su leur donner, dans un premier effort, toute la précision désirable.

Je n'ai jamais prétendu, comme on me le fait dire, que l'érosion est maximum là où le glacier n'a pas de pente superficielle. Je n'ai pas omis de considérer les variations de largeur du lit, comme on me l'objecte, ni supposé des variations de l'épaisseur indépendantes de la pente. J'ai précisément remarqué qu'un étranglement augmente l'épaisseur du glacier et par suite l'érosion, mais a comme conséquence une rupture de pente superficielle, qui amène un déplacement du lieu d'érosion maximum vers l'aval.

Je n'ai pas opposé l'érosion glaciaire à celle des cours d'eau, les glaciers étant comparables seulement aux cascades qui érodent à leurs pieds. Lautensach paraît méconnaître le mécanisme de l'érosion du lit dans les rivières à fond très irrégulier; dans celles-ci des ombilics se creusent au-dessous des barres, précisément comme dans les lits glaciaires.

Je n'ai pas prétendu que tous les verrous sont dus à des bancs de roches dures. Au contraire, j'ai montré que la coïncidence des verrous avec des roches résistantes, qui semble devoir être la règle si leur origine est due uniquement à l'érosion glaciaire, est, dans bien des vallées, loin d'être le cas le plus commun. Il est vrai que je n'ai pas suffisamment envisagé toutes les circonstances qui ont pu donner naissance à un verrou glaciaire. Je ne sache pas que la chose ait d'ailleurs jamais été faite, et, puisque l'occasion s'en présente nous terminerons en le faisant brièvement.

Le cas du verrou résultant d'un étranglement de la vallée dans une roche dure est bien connu.

Un cas particulier est celui où la vallée établie dans des roches peu résistantes, rencontre en s'enfonçant des bancs plus durs. Une dépression latérale peut se développer dans la couche meuble, si le contact s'abaisse normalement à la direction du thalweg. Nombreux sont les exemples de cette forme d'*épigénie*, qui réalise déjà l'apparence du verrou avec son encoche latérale, dans les Préalpes calcaires (vallée de l'Arve, près Cluses notamment).

Le soulèvement préglaciaire a pu être plus intense suivant certains axes tectoniques; les vallées principales ont persisté à s'enfoncer sur place, mais leur section est rétrécie. Il semble qu'on ait à tenir compte de cette possibilité d'*antécedance* pour expliquer les véritables cascades de verrous qui se présentent dans la traversée des massifs appelés jadis *Massifs-centraux* des Alpes occidentales.

L'évolution normale de l'érosion amène des *captures*, particulièrement fréquentes dans les montagnes rajeunies. Il en résulte des ruptures de pente et des encaissements qui ont pu être l'origine de verrous. Les exemples ne manquent pas. Un des plus remarquables paraît être celui de l'Albula en Suisse, dont le cours résulte de captures.

Enfin les *méandres*, ou les courbures accentuées des vallées peuvent donner naissance à des verrous³⁵. Le glacier passe en effet directement par dessus le lobe de rive convexe ou le coude interne; c'est comme s'il avait à franchir une barre.

Il serait facile de développer ces indications et de trouver de nombreux exemples de chaque cas. On pourrait de même envisager différentes origines pour les vallées suspendues et pour d'autres traits du relief glaciaire.

La théorie que j'ai exposée il y a vingt ans sur l'origine des traits originaux du relief glaciaire alpin est susceptible de perfectionnement et de développement. Son principe ne peut en tout cas plus être contesté.

Les formes glaciaires alpines sont dérivées de formes de rajeunissement plus ou moins modifiées par l'érosion des glaciers. L'observation le confirme de jour en jour, et nous en avons, dans les vallées des Alpes Maritimes, un exemple particulièrement démonstratif.

EMMANUEL DE MARTONNE.

NOTES

- ¹ W. M. Davis. The sculpture of mountains by glaciers. *Scot. Geogr. Magazine* XXII, 1906 p. 81. — Die erklärende Beschreibung der Landformen, Berlin 1912.
- ² Sur l'inégale répartition de l'érosion glaciaire dans le lit des glaciers alpins. *CR. Ac. des Sciences* Paris 27 Dec. 1909. — Sur la théorie mécanique de l'érosion glaciaire. *Ibid.* 10 Janv. 1910. — Sur la genèse des formes glaciaires. *Ibid.* 24 Janv. 1910. — Principes de l'analyse morphologique des niveaux d'érosion appliquée aux vallées alpines. *Ibid.* 24 Juillet 1911 — Résultats de l'analyse morphologique des niveaux d'érosion des vallées de l'Arc et de l'Isère. *Ibid.* 7 Août 1911. — Sur la chronologie des thalwegs pliocènes et quaternaires de l'Arc et de l'Isère. *Ibid.* 28 Août 1911. — L'Erosion glaciaire et la formation des vallées alpines. *Ann. de Géographie*, XIX, 1910 p. 289—317 et XX, 1911, p. 1—29. — Conditions de l'érosion glaciaire alpine. *CR. Congr. Nat. des Soc. françaises de Geogr.* Roubaix 1911. — L'évolution des vallées glaciaires alpines, en particulier dans les Alpes du Dauphiné. *Bull. Soc. Géologique de France*, (4) XII, 1912, p. 516—547.
- ³ H. Lautensach. Die Übertiefung des Tessingebiets, morphologische Studie. *Geogr. Abhandl. hgg. von A. Penck*, 1912, 156 p., et Ueber den heutigen Stand unserer Kenntnis vom präglazialen Aussehen der Alpen. *Zeitschr. d. Gesellsch. f. Erdkunde* Berlin, 1913, p. 610—624.
- ⁴ Distel. Die Formen alpiner Hochthäler, insbesondere im Gebiet der hohen Tauern und ihre Beziehung zur Eiszeit. *Landeskundliche Forschungen hgg. v. d. Geogr. Ges. München*, 1912, 132 p.
- ⁵ Rapport sur une mission dans les Alpes orientales. *Bull. Géogr. historique et descriptive* 1912 p. 391—413.
- ⁶ Nussbaum. Die Tal- und Bergformen des Vispgebietes. *Jahrb. d. Schweiz. Alpen-Clubs*, 1911, p. 229—250.
- ⁷ O. Ampferer. Ueber die Entstehung der Hochgebirgsformen in den Ostalpen. *Zeitschr. d. D. Oester. Alpenvereins* XLI, 1915.
- ⁸ J. Sölch. Beiträge zur eiszeitlichen Talgeschichte des Steirischen Randgebirges und seiner Nachbarschaft. *Forsch. z. D. Landes- und Volkskunde*, XXI, 1917, p. 304—378.
- ⁹ J. Sölch. *Op. cit.* p. 463.
- ¹⁰ J. Sölch. *Op. cit.* p. 448, 451—455.
- ¹¹ J. Sölch. *Op. cit.* p. 454.
- ¹² J. Sölch. Grundfragen der Landformen in den N. O. Alpen. *Geografiska Analer* Stockholm 1922, p. 147—192.
- ¹³ O. Ampferer. Glazialgeologische Beobachtungen im unteren Inntale. *Zeitschr. f. Gletscherkunde*, II, 1907, p. 21—54 et 112—127. — Ueber die Entstehung der Inntalterrassen. *Ibidem* 1908, p. 52—67 et 111—142. — Ueber die Aufschliessung der Liegendmoräne unter der Höttingerbreccie im östlichen Weitherburggraben bei Innsbruck, VIII, 1913, p. 145—159.
- ¹⁴ A. Penck. Die letzten Krustenbewegungen in den Alpen. *Geol. Foreningen, Stockholm*, XLI 1922, p. 607—622. — cf. Die Terrassen des Isartales in den Alpen. *Sitzbr. Preuss. Akad. d. Wissensch. Phys.-math. Kl.* Berlin 1922, p. 122 et *Schichtstörungen der letzten Interglazialzeit in den Nördlichen Alpen*, *Ibid.* p. 214.
- ¹⁵ Le détail des faits sur lesquels s'est appuyé A. Penck pour tracer ses „isobases“ lacustres ne m'est pas connu. On hésite à mettre en doute les conclusions d'un observateur aussi compétent et aussi pénétrant. Il semble cependant difficile de prouver que tous les deltas rencontrés, dans un état de conservation, évidemment très inégal appartiennent au même niveau du lac supposé.
- ¹⁶ Il est curieux de constater que Penck, non seulement se rapproche de Heim, mais arrive à construire des soi-disant „isobases“ pour chaque grande vallée longitudinale, tout comme l'a fait E. Romer pour le Valais, dans un mémoire dont les conclusions n'ont rencontré que le scepticisme, et où cet auteur, devenu un adversaire acharné de toute érosion glaciaire, s'efforçait d'expliquer les anomalies du relief alpin (verrous, vallées suspendues etc.) par des mouvements épeirogéniques, dont la preuve était précisément tirée des faits à expliquer (Mouvements épeirogéniques dans le bassin du Rhône et évolution du paysage glaciaire. *Bul. Soc. Vaudoise des Sc. nat.* XVII, 1911, p. 70—192).
- ¹⁷ Commencée avant la guerre, je n'ai pu la reprendre qu'en 1920 et l'achever qu'en 1922, en me limitant au Var en aval d'Entrevaux, à la Tinée et à la Vésubie. Voir: Sur le delta pliocène du Var et les niveaux d'érosion des vallées y débouchant. *CR. Acad. des Sc.* Paris 1923 t. 176 p. 41. — Observations sur le glacier quaternaire de la Vésubie. *CR. Sommaires des séances de la Soc. Géol. de France* 1923, p. 28—31. — L'ancien delta du Var

et les vallées des Alpes maritimes, étude de morphologie alpine et méditerranéenne. *Ann. de Géogr.* XXXII, 1923, p. 313—338.

¹⁸ Desor. Les anciens g'aciers des Alpes maritimes. *Bull. Soc. Sc. Nat. de Neuchâtel* XI, 1879, p. 519—525.

¹⁹ Keilhack. Die Vergletscherung der Alpen. *Prometheus* VI. 1895, p. 441.

²⁰ Voir article cité *Ann. de Géogr.* p. 323 fig. 4.

²¹ Pour plus de détails voir articles cités *Bul. Soc. Géol. de France* et *Ann. de Géogr.*

²² Caziol et Maury. Limons et alluvions pléistocènes de la vallée inférieure du Var. *Bul. Soc. Géol. de France* (4) XI, 1911, p. 177—189.

²³ Alpen im Eiszeitalter t. III., 1909, p. 738.

²⁴ L'indication d'un thalweg pliocène sur le sommet du Picciarvet, qui domine de 200 m la surface supposée de l'ancien delta et est une crête déchiquetée, a détourné Sion de poursuivre la recherche de ce niveau sur le Var. (*Le Var supérieur, étude de géographie physique*. Paris 1909, 8^o, 96 p.

²⁵ A. de Chambrun de Rosemont. Etudes géologiques sur le Var et le Rhône pendant les périodes tertiaire et quaternaire. *Le Déluge*. Paris, 1873, en 8^o, 130 p. — 8 pl.

²⁶ Voir pour les détails mon article dans *Annal. de Géographie* 1923 cité plus haut.

²⁷ Depéret et Caziol. Notice sur les gisements pliocènes et quaternaires marins des environs de Nice. *Bul. Soc. Géol. de France* 4 III, 1903, p. 321—347.

²⁸ Voir pour les détails mon article dans *Annal. de Géographie* 1923, cité plus haut.

²⁹ La seule vallée affluente importante, celle du Roubion, est parfaitement raccordée, quoiqu'on voie encore à Roure la trace de l'ancien gradin (figure 10).

³⁰ L'Erosion glaciaire. *Ann. de Géogr.* 1911, cité plus haut.

³¹ L'Erosion glaciaire. *An. de Géogr.* 1911.

³² J. Sölch. Beiträge zur eiszeitlichen Talgeschichte des Steirischen Randgebirges... *Forschungen z. D. Landes- und Volkskunde* 1917, spéc. p. 450.

³³ Je l'ai déjà fait sommairement dans mon article de 1912 (*Bul. Soc. Géol. de France*) spéc. p. 520 et 523. Aucune des critiques essentielles n'a été négligée; mais il semble d'après l'attitude de Sölch, que la démonstration ait été trop résumée pour être bien comprise.

³⁴ Certaines avaient déjà été présentées par E. Romer dans son mémoire sur les mouvements épeirogéniques dans le Bassin du Rhône (*Bul. Soc. Vaudoise du Sc. Nat.* 1911), alors que seules avaient paru mes notes préliminaires aux Comptes rendus de l'Académie des Sciences. J'ai eu l'occasion de réfuter par correspondance l'argument en apparence le plus fort, qui m'avait été présenté par A. Penck, avant que ne parut le mémoire de Lautenschach, visiblement inspiré par son maître.

³⁵ Possibilité envisagée par W. M. Davis (*Die erklärende Beschreibung der Landformen*).

