

ROGER
FRISON-ROCHE



**LES MONTAGNES
DE LA TERRE**

- II -

frison-roche

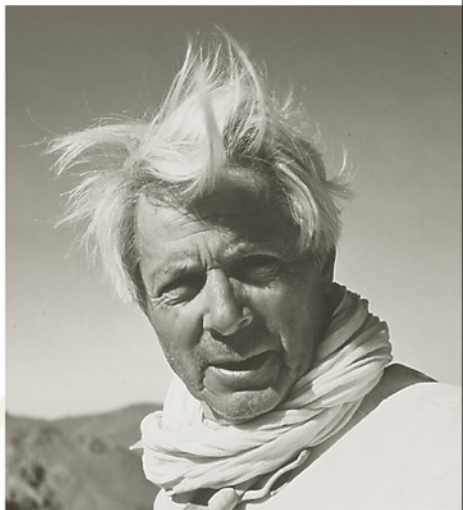
ARTHAUD

ROGER FRISON-ROCHE

LES MONTAGNES DE LA TERRE - II

Les montagnes sont les cathédrales de la Terre. L'homme a tout oublié du passé : les siècles d'isolement et d'obscurité, le monde clos des vallées perdues, le climat rigoureux, l'absence de ressources. Il aura suffi d'une centaine d'années pour que la montagne, qui était hostile, lui apporte tout : l'énergie de ses eaux, les richesses du sous-sol, et cette nouvelle forme d'apport et d'économie que sont le tourisme d'été et d'hiver. Par la montagne, l'homme a pu quêter la beauté, trouver le repos de l'âme dans l'action physique salutaire, s'évader des termitières métropolitaines, comprendre la poésie du silence retrouvé.

Photo : © Pierre Lairraz



ARTHAUD

Les montagnes de la Terre

II

Roger Frison-Roche

Les montagnes de la Terre

II

La montagne et l'homme

ARTHAUD

© Flammarion, Paris, 1964, 2018
87, quai Panhard-et-Levassor
75647 Paris Cedex 13
ISBN : 978-2-0814-1118-0

PRÉFACE

En nous promenant à travers toutes les montagnes de la Terre, nous avons pu constater, dans le premier volume de cet ouvrage, d'extraordinaires contrastes régionaux.

Peut-on comparer sans risques d'erreur les Alpes françaises ou italiennes aux Alpes suisses et autrichiennes ? Le géographe qui s'en tiendrait à la seule étude, par exemple, des vallées de la Stura ou de l'Arc ne saurait en tirer un enseignement, qui serait contredit par la richesse agricole et pastorale des montagnes de Suisse ou d'Autriche où, depuis plus d'un siècle et demi, l'économie rurale et touristique forme un ensemble harmonieux qui en fait l'un des pays les plus habitables de la Terre, tant par son climat que par les possibilités de vie qu'il offre à ses habitants.

Quel point de comparaison trouver pour mettre sur le même plan les montagnes froides et vides de Scandinavie ou d'Alaska, à la limite des terres polaires, aux basses vallées couvertes de taïga ou de toundra, avec les Alpes, les Carpates ou le Caucase ou encore les chaînes nord-africaines (montagnes tempérées, très peuplées, quoique moins bien douées pour l'habitat humain que les plaines d'alluvions fertiles ou les bas pays) ou encore les montagnes tropicales, Kenya, Éthiopie, Andes, souvent préférables aux régions basses, malsaines et désertiques ?

Les Rocheuses d'Amérique du Nord sont vides, quoique souvent moins rudes que les Alpes.

On pourrait multiplier à l'infini ces exemples.

Cependant, d'une façon générale, l'opposition entre montagne et bas pays est bien établie. Aussi, dans ce second volume, avons-nous essayé de dégager des idées générales, de faire une synthèse des caractéristiques des montagnes : comment se forment-elles, quelles lois spéciales subissent-elles pour leur climat, leur faune et leur flore, comment sont-elles habitées ? Autant de questions auxquelles nous nous sommes efforcés de répondre d'une façon méthodique, sinon scientifique.

Or nous assistons, depuis quelques années, à une véritable transformation de la vie dans les montagnes. À leurs propres habitants, qui vivent depuis des millénaires selon des méthodes qui ont peu évolué, s'ajoutent à présent soit des visiteurs qui viennent pour se reposer, se soigner ou se distraire, soit des techniciens qui exploitent les grandes ressources naturelles des montagnes : l'énergie des eaux, les minerais. Il y a donc un phénomène passionnant d'interpénétration de deux mondes, phénomène dont on prend conscience à travers ses manifestations les plus voyantes : la montée des touristes et la descente des montagnards ; l'opposition de la vie rude des habitants permanents avec la détente que cherchent les touristes ; le contraste des travaux traditionnels avec l'industrie moderne.

C'est pourquoi la seconde partie de ce volume, l'Homme et la Montagne, est particulièrement développée. La conquête de la montagne par l'homme dans son aspect le plus spectaculaire, l'alpinisme et ses victoires sur les plus hauts sommets, termine cette confrontation vertigineuse qui permet aux humains de se dépasser mais aussi de prendre conscience de leur valeur à la fois infiniment petite et infiniment grande. « L'homme est la mesure des choses », disait le philosophe grec.

Chacun connaît l'aventure rocambolesque de deux Anglais, Pooke et Windham, qui, en 1741, « découvrirent » la vallée de Chamonix. Ils avaient organisé, au départ de Genève, une véritable expédition comprenant mulets, serviteurs et ravitaillement, et ils emportaient des armes pour se défendre des bandits qui, leur avait-on dit, peuplaient le pays des glaciers ! Avec le recul du temps, il peut paraître invraisemblable qu'en plein XVIII^e siècle le monde « civilisé » découvrit ainsi, à 60 km à vol d'oiseau de Genève, une population

Préface

dont ce que nous appelons aujourd'hui le grand public ignorait jusqu'au mode de vie lui-même, mais qui vivait là depuis l'an 1000 en une communauté agricole organisée, hiérarchisée, payant tribut et impôt à ses seigneurs et souverains.

Les gens des plaines ont toujours eu tendance à considérer les habitants des montagnes comme de bons ou d'affreux sauvages vivant à l'abri dans leurs vallées fermées, coupés des grandes villes trop éloignées par la rareté des chemins et la difficulté d'accès. Mes souvenirs personnels me prouvent que si les choses ont changé, ce n'est pas depuis longtemps.

Je passais mes vacances d'enfant dans les alpages du Beaufortin, partageant la vie fruste et saine de mes cousins. Le chalet comportait une grande chambre commune, le pèle (du nom du fourneau central) où, l'hiver, se regroupaient tous les habitants ; il était meublé de lits à rideaux, aux paillasses bourrées de feuilles de maïs, garnis de draps de chanvre grossier roui, cardé et tissé à la maison. Il n'y avait, bien sûr ! pas d'électricité, pas de routes ; mais on avait déjà abandonné le corzolet ou créju (c'est-à-dire la lampe romaine à huile ou à graisse) pour la lampe à pétrole.

Un jour d'été 1913, un homme jeune et de belle prestance se présenta à la porte du chalet ; les hommes faisaient les foin, le gros du troupeau était « en montagne », et il ne restait à la maison qu'une vieille femme, ma tante, et le petit garçon turbulent que j'étais. L'homme se présenta comme un des ingénieurs chargés de faire le relevé du terrain en prévision du percement d'une galerie d'amenée d'eau qui traverserait la montagne pour alimenter la première usine hydro-électrique de la vallée du Doron. C'était le début, ou presque, de la houille blanche : à mes yeux – et aussi, probablement, aux yeux de la vieille Savoyarde –, cet homme apparaissait un peu comme un sorcier, dans ce chalet solidement bâti mais si vieux, si vieux qu'on pouvait lui attribuer plusieurs siècles sans se tromper. Il désirait manger et ne comprenait pas les hésitations de la vieille femme ; il ne pouvait savoir que, de sa vie, elle n'avait jamais servi un étranger dans cette vieille maison, et qu'elle s'effrayait à la pensée d'avoir à cuisiner pour ce visiteur des mets compliqués dont elle n'avait même pas idée.

Les montagnes de la Terre

On le servit dans le pèle, car il eût semblé incorrect à ma tante de le faire asseoir dans la grande cuisine, sous le manteau de la cheminée, et de le servir sur la longue table noircie où les montagnards prenaient leurs repas. Il parcourait du regard, avec étonnement, la grande pièce au plancher craquant, détaillait le travail au crochet des couvertures de laine, examinait avec un brin d'ironie les gravures qui, souvenir de l'annexion de la Savoie à la France, représentaient Napoléon III et Victor-Emmanuel I^{er}. Ma tante le servait debout, non pas avec humilité, mais avec la dignité qui convient à une femme de la montagne qui, à cette époque, s'asseyait rarement à la table commune. Il apprécia le café bu sur le solaret au balcon de bois tourné et engagea la conversation.

Il était étonné d'apprendre que les gens qui vivaient ici avaient des rapports avec les gens des plaines, que le petit garçon dont il caressait la tête était un petit Savoyard de Paris revenu au pays, de découvrir chez cette vieille dame une culture insoupçonnée et une éducation au-dessus de la moyenne. Puis il parla de ses travaux : « Dans quelques années, dit-il, il y aura partout dans vos fermes l'électricité ; le bien-être pénétrera dans la vallée, vos travaux seront simplifiés. » Ma tante approuvait poliment ; mais, quand il fut parti, elle hocha la tête : « Il pensait donc trouver des sauvages ? », me dit-elle.

En grandissant, j'ai vu évoluer devant moi cette vallée que j'avais connue encore intacte et préservée et qui devenait un vaste chantier. Je pense souvent à cette visite, un jour d'été, dans le vieux chalet accroché à la montagne, au milieu de son verger de pommiers sauvages, de celui qui annonçait les temps nouveaux. C'était le sorcier moderne ; nul ne se doutait, à l'époque, que, en dressant sa planchette et plantant ses mires à travers les couloirs, les ravins et les clairières, il inaugurerait une ère nouvelle qui ferait disparaître complètement ce que les gens des villes appellent des conditions de vie périmées, des usages folkloriques, pour transformer peu à peu la montagne de tous les millénaires en une montagne asservie aux besoins des hommes, une montagne truquée, perforée, hérissée de câbles et de pylônes, perdant ses eaux vives et se gonflant de lacs artificiels, victime d'un chaos bien ordonné qui ne respecte plus rien, ni les coutumes des montagnards, ni leurs traditions, ni le rythme créateur des eaux dans

Préface

les vallées, faisant passer d'un versant à l'autre les eaux de ruissellement, asséchant un torrent pour grossir un autre fleuve à des distances prodigieuses.

Ainsi, cet homme de 1913 était vraiment l'apprenti sorcier ; et sans doute lui-même ne se doutait-il pas encore de la force en puissance qu'il détenait et que ses successeurs allaient employer pour modifier la vie de l'homme dans les montagnes et les montagnes elles-mêmes.

Première partie

LA NATURE MONTAGNARDE

Géologues et géographes ont de la chance ! Les montagnes sont là pour appuyer leurs thèses, dérouler devant leurs yeux leurs stratifications grandioses, montrer par les plaies à vif de leurs gorges, les entailles de leurs canyons, les falaises de leurs failles, comment est constituée l'écorce terrestre sur plusieurs milliers de mètres d'épaisseur. Jamais le livre de la nature n'a été ouvert d'une façon aussi intelligible à l'homme de science. Le Grand Canyon du Colorado apparaît à ses yeux comme une maquette de laboratoire où les couleurs vives des roches étagées qui alternent en bande régulière ajoutent encore à la compréhension. Et que dire de ces merveilleuses entailles faites par les glaciers d'autrefois à travers les roches les plus dures ! De ces vallées tibétaines, où l'érosion plus rapide que le soulèvement a permis un creusement de l'écorce à une échelle insoupçonnée. Les montagnes sont pour nous des régions privilégiées, vivantes comme leur chair minérale blessée, fendue, gonflée par le soulèvement, ouverte par l'érosion. Ce sont ces phénomènes d'une ampleur exceptionnelle, ces soulèvements, ces plissements, ces fractures, ces glissements, ces éruptions, qui nous renseignent sur la vie de l'écorce terrestre.

Et puis l'altitude est là, qui provoque dans les montagnes une érosion particulièrement rapide et violente ! Cette érosion sans cesse renouvelée, qui tend à niveler l'écorce terrestre et que l'on peut étudier à loisir en gravissant les cimes. C'est en montagne qu'on a pour la première fois compris les règles de l'érosion, qu'on les a définies.

La nature montagnarde

Mais l'altitude des montagnes nous permet mieux encore d'observer, sous toutes les latitudes, la décroissance de la température qui se manifeste sur la Terre, en latitude comme en altitude. N'est-il pas surprenant de passer, sous l'équateur, de la forêt vierge à la prairie alpine et aux neiges éternelles, voire aux glaciers, en gravissant les montagnes du centre de l'Afrique ou des Andes septentrionales ? Ces glaciers équatoriaux, abondants, sans cesse renouvelés par les précipitations de la zone chaude du globe, qui couvrent les montagnes du Ruwenzori, du Kenya, de la cordillère Colombienne, et que, sans l'altitude, il faudrait aller chercher dans les régions polaires !

Merveilleuses montagnes qui font apparaître à la surface de la Terre des occasions d'étude tout à fait privilégiées. On ne peut pas, en parlant des montagnes, se dispenser d'évoquer ces problèmes d'origine, de relief, de climat, de faune et de flore, d'abord à cause de l'intérêt qu'ils présentent pour tout esprit curieux, ensuite à cause de l'influence de la nature montagnarde sur l'utilisation des montagnes par les hommes.

Étudier les montagnes, c'est aussi étudier l'homme dans ses origines, son implantation sur Terre et dans ses diverses civilisations.

Vaste, inépuisable sujet.

À la hauteur de l'Himalaya !

L'ORIGINE DES MONTAGNES

La définition la plus simple et la plus classique des montagnes est celle qui les présente comme des accumulations locales ou régionales de matériaux de l'écorce terrestre. On peut dire des montagnes qu'elles sont les taupinières du globe : comme la taupinière, elles sont le produit d'une force d'origine interne et, comme elle, elles sont nivelées par des actions d'origine externe ; l'érosion remplace le râteau du jardinier. Mais, à l'échelle géologique du temps, les forces externes qui tendent à niveler la Terre ne sont ni suffisamment puissantes, ni assez rapides pour compenser l'action des forces internes, qui édifient plus vite que l'érosion ne démolit.

Ces forces internes nous sont malheureusement cachées et nous sommes obligés de les reconstituer à partir de leurs effets, ce qui, souvent, ne peut se faire que par hypothèse.

Les montagnes volcaniques

Elles nous sont familières. Par leurs formes coniques, par leurs légendes, par leurs drames. Comment oublier les éruptions les plus célèbres : celle du Vésuve, celle de la montagne Pelée, celle du Krakatoa ? Depuis le commencement de l'Histoire, les récits nous content les drames causés sur Terre par les volcans en activité. Bien que la volcanologie soit une science très récente, les plus anciens textes mentionnent et expliquent les effets visibles des éruptions. Et

ce qui ne pouvait être expliqué entrainé dans le domaine mythologique, rejoignait Vulcain. Belle histoire que celle des volcans !

Les montagnes volcaniques sont le cas le plus simple des excroissances de la croûte terrestre. Ce sont, en général, des accumulations de matériaux montés à la surface par une fissure de l'écorce, sous la pression de la vapeur d'eau et des gaz. Comme la taupinière est édifiée avec la terre que la taupe retire de ses galeries. Ce sont donc des reliefs surajoutés aux roches qui forment normalement la surface du sol.

Les matériaux sont accumulés selon trois processus, soit séparés, soit successifs, soit contemporains, ce qui permet de distinguer plusieurs types de volcans.

L'image parfaite du volcan est le cône : Fuji-Yama, Vésuve, Etna.

Le volcan représente la montagne idéale.

L'élancée régulière vers le ciel, les formes parfaites, la blancheur des neiges qui coiffent les plus élevés font souvent du volcan une montagne mystique capelée d'éternelles vapeurs. Quoi d'étonnant qu'on y ait placé le séjour des dieux !

Cette forme parfaite est due à l'accumulation de débris expulsés de la cheminée interne du volcan : les cendres, les scories, les blocs, les bombes, retombent autour de la cheminée et édifient normalement le cône selon les règles les plus précises de la pesanteur ; l'éruption dégage en général une énorme fumée chargée de ces débris, qui retombent en quantité décroissante tout autour du point d'émission ; d'où le cône. Plus les débris sont fins, plus le cône est large ; plus ils sont grossiers, plus il est haut et étroit, les matériaux ne s'écartant pas beaucoup du point de sortie.

Le volcan peut être formé aussi par l'accumulation des laves, c'est-à-dire des roches fondues qui montent par la cheminée et s'écoulent de son ouverture supérieure, le cratère. Ces laves sont de composition variée et, à cause de cela, de fluidité différente. Les plus fluides s'écoulent loin avant que le refroidissement ne les fige. Elles édifient alors des plateaux de coulées superposées et non des montagnes aux formes aiguës ; mais elles peuvent atteindre de grandes altitudes à cause d'une épaisseur énorme : ainsi le Mauna-Loa s'élevant à 4 100 m au-dessus des îles Hawaï.

L'origine des montagnes

Souvent les volcans sont édifiés par un mélange de ces deux techniques ; ils sont faits de débris et de laves selon un processus qui a été observé à partir de février 1943 avec le Paricutin, volcan nouveau-né à l'ouest de Mexico.

Si les phénomènes de l'érosion, du plissement ou du soulèvement général de l'écorce terrestre se produisent durant des temps géologiques qui nous échappent, les éruptions volcaniques, par leur soudaineté, se peuvent étudier à l'échelle de notre temps ; certaines ne sont même pas à l'échelle d'une vie humaine ; quelques mois, une année suffisent pour livrer tous leurs secrets. Ainsi en fut-il du Paricutin.

En février 1943, donc, un laboureur mexicain guidant son araire sur le haut plateau voit s'ouvrir subitement devant lui un trou. Phénomène banal, qui peut résulter de l'effondrement d'une cavité d'un sous-sol, de la mise au jour d'une ruine enfouie... Mais quelle n'est pas sa surprise quand, le lendemain matin, se rendant à son travail, notre homme voit s'élever sur la plaine, en place du trou, un cône de huit mètres de hauteur, fumant comme une meule de charbonnier ! Dès lors, tout ira très vite et l'on accourra de loin pour assister à la naissance d'un nouveau volcan. C'est comme si la nature voulait donner une leçon de choses. Chaque jour, le cône augmente en dimension : il pousse très vite, constamment couronné de nuages de fumée épaisse ; une semaine après, il atteint 180 m de hauteur, deux mois plus tard, 300 m (la hauteur de la tour Eiffel), six mois après, 500 mètres. Puis des coulées de lave dépassent le cône et ravagent les environs, brûlant tout sur leur passage. Le monstre devient menaçant, des explosions terrifiantes se produisent, modifiant la forme parfaite du cône, altérant la pureté de ses formes. Dès lors, le Paricutin n'est plus qu'un volcan nouveau en activité, avec tout ce qu'il comporte comme danger pour les gens du voisinage. Un visage de la Terre immuable depuis des millions d'années vient de se modifier.

Les explosions comme celles du Paricutin expliquent que la plupart des volcans aient des formes complexes, traduisant des phases successives ; la forme la plus courante est celle d'un premier cône, éclaté au sommet, bouleversé par les explosions, et formant un

immense cratère ou caldeira, dans lequel pousse un deuxième cône, qui sera peut-être à son tour détruit par une troisième explosion, puis reformé. Ainsi du Vésuve où, depuis l'époque romaine, ont pu être observées ces différentes modifications de formes.

Quelquefois, les caldeiras renferment d'étranges lacs, bouillonnant de laves en fusion, offrant la nuit un spectacle terrifiant, flamboyant ou bien certains vieux volcans éteints depuis des siècles voient les flancs de leur caldeira se peupler d'espèces végétales ou ils enchâssent des lacs perfides aux eaux dormantes. Toujours, le volcan offre à l'homme un spectacle digne de respectueuse admiration.

Parfois, l'érosion naturelle détruit ces formes classiques du cône ou du plateau de laves. Il ne reste alors que des montagnes volcaniques isolées, aux formes très aiguës, qui ne sont que les culots de lave solidifiés dans la cheminée et mis au jour par la destruction des cônes de débris qui les entouraient. Sans aller bien loin, en France, les roches Tuillère et Sanadoire en Auvergne, le rocher Corneille qui surplombe la ville du Puy nous en donnent des exemples remarquables. Mais c'est au Hoggar que se rencontrent les manifestations les plus grandioses de cette forme de relief, qui a conféré au paysage de la Koudia et de l'Attakor son étrangeté irréaliste : Iharen, Daouda, Oul, Tindi, Saouinan sont autant de pitons célèbres, plantés quelquefois dans le fond des vallées, devenus le domaine préféré des grimpeurs de rochers depuis quelques années.

Le point le plus obscur dans la formation des volcans reste l'origine de l'eau dont la vaporisation fournit la force qui fait monter les produits volcaniques à la surface du sol ou jusqu'au sommet des montagnes. Pour certains, elle proviendrait d'infiltrations de l'eau des mers ; pour d'autres, elle serait de l'eau libérée par des roches portées à très haute température.

Les montagnes complexes

Sous leur simple apparence, les montagnes précédemment expliquées étaient déjà complexes, mais, pour ainsi dire, au premier degré ; car il en existe de beaucoup plus complexes encore, dont les

Alpes peuvent être considérées comme le type et prises pour exemple parce que nulle chaîne de montagnes n'a été aussi étudiée. Cela ne veut pas dire d'ailleurs que les autres grandes montagnes sont semblables aux Alpes : chacune a sa personnalité et ses problèmes propres ; mais les Alpes fournissent néanmoins un échantillon extrêmement complet et qui aide à comprendre les montagnes récentes en général, qu'il s'agisse de la nature hétérogène de leurs matériaux, de la pluralité des mouvements qui les ont bâties ou des causes qui peuvent les expliquer.

Hétérogénéité des matériaux

Il y a des notions qui nous sont familières : on distingue les roches dures et les roches tendres, les calcaires, le granite, les schistes variés. Les alpinistes, plus particulièrement, attachent une grande importance à la constitution des roches : les roches dures ont leur préférence mais certaines roches tendres se laissent « pitonner » plus aisément ; si le granite, par sa solidité, permet des ascensions franches, certains schistes ou des calcaires délités offrent de grands dangers ; la technique varie selon la formation des roches, leur stratification ; la longueur de l'encordement n'est pas la même selon qu'il s'agit de granite ou de calcaire ; enfin, chaque roche a son adhérence propre.

Mais c'est surtout dans le paysage que nous sont sensibles les différences des roches ; peut-on trouver contraste plus frappant que celui des Préalpes avec les Alpes tout au long du noyau central cristallin ? Qu'on arrive par la cluse de l'Arve en vue du majestueux mont Blanc, qu'on traverse les défilés du Vercors pour déboucher face à l'Oisans, qu'on remonte les canyons calcaires des Alpes maritimes dans un paysage de Colorado pour parvenir brusquement, sans transition, dans les hautes vallées cristallines de la Vésubie, le changement est total, prodigieux. Aux barres tabulaires, aux murailles impressionnantes de plusieurs centaines de mètre de hauteur, aux canyons gigantesques succède brusquement le fin découpage des aiguilles cristallines, dégagées en dentelle au-dessus des cirques glaciaires. Parfois, l'on se trouve à cheval sur deux mondes différents,

comme au col d'Anterne, au pied de la muraille des Fiz, face aux prestigieuses aiguilles de Chamonix, aux clochetons découpés des aiguilles Rouges.

On est amené à constater ainsi l'existence de deux grandes classes : les roches cristallines, les roches sédimentaires.

Roches cristallines

On les classe en deux catégories : les roches purement cristallines et les roches cristalloyphylliennes ou métamorphiques ; et il n'est pas toujours facile de les distinguer, car elles ont des points communs.

- Roches purement cristallines

Formées de cristaux, ce sont des roches d'origine profonde, qui ont monté vers la surface en se cristallisant lentement. Les cristaux qui les composent sont emmêlés et donnent naissance à des roches au toucher rugueux (quartz, feldspath, mica).

La recherche du quartz pur a provoqué autrefois, dans certaines hautes vallées telles que Chamonix, une industrie locale dangereuse et captivante : les « cristalliers » ont porté leurs investigations très haut, sur des aiguilles alors ignorées du massif du Mont-Blanc, et il est plus que probable que certains grands sommets des Alpes, dont la première ascension relatée remonte à l'âge d'or (1860-1870) de l'alpinisme, avaient été fouillés de fond en comble par de hardis prédécesseurs inconnus. Dans le massif du Mont-Blanc, ces cristaux de quartz hyalin (généralement fumé, d'où son nom) existent encore dans des « fours » mystérieusement ennoyés dans la protogine des aiguilles ; quelquefois, l'usure provoquée par l'érosion glaciaire les découvre ; d'autres fois, le retrait des neiges sur certaines arêtes met au jour des filons importants ; et alors, même de nos jours, certains guides de Chamonix reprennent les outils des « cristalliers » – burins, marteaux, pics, barres à mines, ringards – et vont les cueillir ; il était temps : l'été suivant, telle arête autrefois dégagée n'est plus qu'un feston de corniches de neige ou une pente de glace vive.

« Les cristalliers » sont encore de nos jours considérés comme les ancêtres des guides de montagne, tant il est vrai que les plus grands

de ces derniers ne furent au début que d'humbles chercheurs de cristaux, tels Jacques Balmat, Cachat le Géant, etc.

Parmi ces roches cristallines, certaines (dont les granites), formées de cristaux un peu gros, donnent une excellente surface pour les grimpeurs : cette particularité, jointe à la solidité des prises, a contribué à la vogue exceptionnelle des escalades dans les aiguilles de Chamonix, comme elle a facilité les exploits sensationnels des grimpeurs dans le val Bregaglia (Grisons), notamment au Piz Badile.

La dureté est la qualité principale du granite comme des roches cristallines ; elle est due à la dureté même des minéraux qui forment les cristaux, en particulier la silice. Le quartz, ne l'oublions pas, raye l'acier.

Les roches granitiques donnent dans les Alpes des massifs d'étendue variable, soit seules, soit mêlées à d'autres roches cristallines. Ce ne sont pas nécessairement des roches très anciennes ; il y a des granites d'âge varié, car on pense qu'ils sont contemporains des divers plissements qui ont provoqué leur ascension vers la surface de l'écorce. Cependant, la plupart datent, dans les Alpes, de l'ère primaire, comme beaucoup de roches métamorphiques.

- Roches cristallophylliennes

Les deux mots sont explicatifs ; cristallophylliennes : roches à la fois cristallines et feuilletées ; métamorphiques : qui ont changé de forme. On ne saurait mieux dire. Ce sont d'anciennes roches sédimentaires, c'est-à-dire dépourvues de cristaux, amorphes à l'origine, et devenues cristallines par le phénomène appelé métamorphisme. Transformation puissante, supposant le jeu de fortes pressions avec de hautes températures, et des apports de matière venant de l'intérieur de l'écorce. Ces roches accompagnent les plissements qui, justement, mettent en action des forces énormes agissant très longtemps. En fait, la nature, à une échelle énorme, reproduit des phénomènes que les hommes réalisent parfois sur de petites quantités de matière : quand ils transforment le charbon et le fer en acier, laminent l'acier, produisent l'aluminium et, du minerai brut d'étain ou de cuivre, tirent le beau métal ! Ainsi en

est-il dans ces transformations des roches métamorphiques, qui donnent parfois des cas particuliers : des roches vertes forment des massifs solides à l'intérieur de la masse la plus friable des schistes lustrés, par exemple le mont Viso ; on sait maintenant que ce sont des roches volcaniques (basaltes) ayant subi le métamorphisme.

Les effets du métamorphisme sur les roches sont plus ou moins poussés : certaines deviennent purement cristallines (tels les granites, dont on dit que leur formation est le dernier terme du métamorphisme) ; d'autres sont très cristallines, tout en conservant une structure feuilletée héritée de leur première nature (ainsi les gneiss, souvent rubannés : Caire de Cougourde, Poncet) ; d'autres ont beaucoup moins l'allure cristalline (schistes lustrés). Il en résulte des formes de relief variant avec la résistance de la roche et des propriétés différentes, en particulier une inégale dureté. Leur âge également est variable. On peut généraliser en disant qu'il y a métamorphisme quand il y a plissement. Dans les Alpes, on retrouve deux périodes favorables : au primaire, à l'occasion du plissement hercynien, au tertiaire, pendant le plissement alpin. Les pétrographes savent reconnaître les roches qui ont subi ces deux métamorphoses et celles qui n'en ont subi qu'une.

Roches sédimentaires

Ce sont les archives de la Terre, les roches les mieux datées à cause de leurs fossiles. Elles ne comprennent pas de cristaux, mais sont formées soit de débris d'autres roches, soit de débris végétaux (charbon), soit de squelettes d'animaux, soit de plancton (diatomite) dans le fond des mers et des lacs, soit d'accumulation de ces divers éléments à la surface des continents.

Une partie des roches sédimentaires est d'âge primaire, le métamorphisme ayant épargné les roches de cette ère à partir du carbonifère ou houiller, au moins partiellement. La grande majorité est d'âge secondaire (étages du trias, du lias, du jurassique, du crétacé, avec de nombreuses subdivisions) et d'origine marine. Une partie, enfin, est d'âge tertiaire, faite des premiers débris arrachés

aux Alpes partiellement émergées : ce sont des grès et des schistes de la mollasse, du flysch, faisant figure de roches plutôt tendres. Au quaternaire et de nos jours, il s'y ajoute les alluvions glaciaires ou fluviales et les éboulis pas encore consolidés en roches (ainsi l'épaisseur étonnante des alluvions dans le Sillon alpin au nord de Grenoble). Le faciès des roches sédimentaires est excessivement varié, il dépend de la nature des apports et de la profondeur des dépôts sous les eaux, les produits les plus fins se déposant à plus grande profondeur.

Les principales variétés de roches sédimentaires sont les suivantes.

- Calcaires

Ils peuvent être soit purs, soit marneux (couleur plus sombre), soit dolomitiques (ces derniers sont formés de carbonate de chaux et de carbonate de magnésie). Leur épaisseur est très variable, allant jusqu'à 500 et 700 m. Les calcaires sont tantôt massifs, c'est-à-dire sans lits bien marqués, tantôt lités, séparés par des lits plus marneux, ce qui donne un aspect rubanné. Leur dureté est variable et d'autant plus grande que le calcaire est plus pur et plus épais.

De même que les roches cristallines, les roches calcaires ont donné leur visage aux Alpes. Au nord et au sud du soulèvement cristallin, elles forment un merveilleux pays touristique, généralement connu sous le nom de Préalpes, mais qui atteint, notamment dans les Alpes centrales suisses, des hauteurs avoisinant 4 000 m. En dehors de ces grandes montagnes – exceptionnelles –, les calcaires forment souvent des massifs secondaires puissamment individualisés : Vercors, Chartreuse, Bauges, Aravis, Oberland, Alpes bavaroises, Dolomites. Plus friables que les granites, moins fissurées, moins « diaclasées », moins déchiquetées, les montagnes calcaires ont pour elles la verticalité absolue, voire la surplombante majesté de leurs parois redressées parfois sur près de 2 000 m au-dessus de canyons impressionnants. C'est dans ces massifs qu'est né l'alpinisme moderne avec pitons et étriers ; moyens artificiels nécessités justement par les particularités de la roche, forée de mille trous, de mille petites fentes élargies par la

dissolution des roches perméables, et qui favorise le pitonnage comme il permet l'escalade.

En ce genre, les Dolomites atteignent à l'archétype de l'escalade classique.

- Schistes

Ces roches sédimentaires sont des marnes comportant une grande proportion d'argile, qui ont été feuilletées par le plissement : l'exemple le plus parfait en est fourni par les schistes ardoisiers, que l'on peut découper en plaques minces. Ce sont des roches de couleur sombre, tendres, correspondant à des creux et non à des reliefs. Certaines ont provoqué une exploitation industrielle active (ardoisières de la Meuse dans la traversée des Ardennes, ardoisières d'Angers), d'autres, plus modestes, confèrent l'originalité de ses toitures à tout un pays (lauzes du Val d'Aoste).

- Marnes

Ce sont des roches argileuses qui ne sont pas devenues des schistes et qui ne sont pas feuilletées. Elles sont encore plus tendres que les schistes.

Souvent intercalées entre des feuillets calcaires importants, elles provoquent ces glissements de terrain à l'échelle des grands phénomènes terrestres, qui ont parfois modifié certains aspects contemporains de nos régions (éboulement de Disentis dans les Grisons, par exemple).

- Grès

Curieux destin que celui des grès : ce sont des amas de sable soudés par un ciment et qui, dans les régions de la Terre où ils dominent le plus (Sahara, Tassili, Tibesti, Libye), retournent peu à peu à l'état de sable par suite de l'intense érosion éolienne de ces régions désertiques.

Les grès sont de deux sortes selon la composition du ciment qui lie entre eux les sables. Quand ce ciment est calcaire, on lui doit les grès calcaires de la mollasse ; quand il est siliceux, il forme les quartzites, très dures, faites de grains de silice pure soudés par de la

silice. On a utilisé la solidité des quartzites comme appui pour le barrage de Tignes. On doit aux grès les paysages les plus étranges de la Terre, notamment les Tassilis sahariens, modelés par l'érosion et formant de véritables forêts de colonnes de pierres qui dominent des canyons gigantesques, dont les plus célèbres sont ceux de Tamrit (Tassili des Ajjer), les Enneris du Djado, les canyons du Tibesti.

- **Conglomérats**

Ces roches sédimentaires sont des amas de cailloux à angle vif. Assez peu fréquents dans les Alpes, une certaine variété a donné cependant des élancements curieux et appréciés des alpinistes : les aiguilles d'Arve, Pierra Menta, et, en Catalogne, les fameuses aiguilles de Montserrat.

Dans la formation des montagnes, on peut noter la prépondérance des roches cristallines ou métamorphiques, des calcaires et des schistes. Ces matériaux content l'histoire des montagnes du monde.

Résultats de l'orogénie

Ils se traduisent par un gonflement d'ensemble de la chaîne, énorme puisque des roches qui se trouvent à plusieurs milliers de mètres d'altitude ont été formées à plusieurs milliers de mètres sous les eaux des mers de l'ère secondaire.

Ce gonflement d'ensemble est la somme de trois phénomènes que nous allons étudier successivement : le soulèvement, le plissement, le charriage.

Soulèvement

Le soulèvement est un mouvement non accompagné d'une déformation des roches. Il est surtout propre aux masses cristallines, plus rigides que les roches sédimentaires. Cependant, ce n'est pas un simple mouvement de bas en haut !

La nature montagnarde

a) Il y a eu des déplacements : des blocs cristallins se soudent les uns aux autres en écrasant les roches sédimentaires intermédiaires. Un exemple type de ce phénomène à grande échelle est constitué par les massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles-Rouges comprimant la zone de Chamonix sédimentaire avant son déblayage par l'érosion fluviale et glaciaire. Mais il existe de nombreux exemples de ce phénomène à plus petite échelle, où de simples lames sédimentaires sont souvent pincées dans le cristallin.

b) Il y a eu des broyages de roches cristallines, réduites à l'état de mylonites ou roches écrasées. Des exemples grandioses nous sont offerts dans le massif du Mont-Blanc, notamment aux cols du Chardonnet, du Requin, du Midi, du Dôme du Goûter, au col Infranchissable, dans la haute vallée de Tré-la-Tête.

c) Mais le phénomène le plus fréquent dans le soulèvement cristallin est la formation dans la masse cristalline d'une multitude de cassures, les diaclases ; elles sont très importantes, car c'est par là que l'érosion s'introduit dans les roches cristallines. De beaux exemples existent au sommet sud de l'aiguille du Midi, où le granite a été pour ainsi dire feuilleté. Mais le phénomène interne a été étudié magnifiquement, ces dernières années, au cours du percement du tunnel du Mont-Blanc ; car c'est par ces diaclases que s'écoulaient en crues subites les eaux de fusion introduites dans la masse par les fissures des sommets et utilisant ces cheminées souterraines,

d) Il y a eu, enfin, des cassures accompagnées de dénivellations et connues sous le nom de failles : versant de Chamonix, des aiguilles Rouges, bordure orientale des montagnes Rocheuses sur le désert de Nevada.

Plissement

Les roches – et principalement les roches sédimentaires primitivement horizontales – dessinent, en se soulevant, des plis, comme le ferait une étoffe ; lorsque ces plis sont convexes vers le ciel, on les nomme les anticlinaux, lorsqu'ils sont concaves vers le ciel, des

synclinaux. Ce plissement signifie avant tout un raccourcissement de l'espace primitif occupé par les roches sédimentaires. Des exemples de ces plissements nous sont donnés tout au long des Alpes, de Nice à Vienne, par les Préalpes calcaires où abondent synclinaux et anticlinaux ; le livre de la nature s'ouvre particulièrement sous nos yeux en France dans le Vercors, la Chartreuse ou les Bauges ; les plis de la falaise supportant Villard-Notre-Dame, au-dessus de Bourg-d'Oisans, sont parmi les plus caractéristiques du genre.

Ces plis sont plus ou moins réguliers à cause de la variation d'épaisseur et de plasticité des couches. Souvent les anticlinaux sont incomplets, la voûte, la partie la plus fragile, ayant cassé au cours du plissement, ce qui a donné naissance à un pli faille.

Charriage

Nous voici devant le plus gros problème posé par les Alpes, le plus surprenant également pour les non-initiés. Le point de départ de cette audacieuse théorie a été la présence de masses de roches loin de leur lieu de formation : à des distances de plusieurs kilomètres, voire plusieurs dizaines de kilomètres ! Ces phénomènes de superposition anormale des roches sédimentaires abondent : il est fréquent qu'une roche relativement ancienne recouvre une roche plus récente qu'elle, ce qui ne correspond plus à la genèse sédimentaire. Cette difficulté a été résolue par la notion des charriages, découverte à la fin du XIX^e siècle : on admet que les roches qui ne sont pas à la place où elles devraient être se sont déplacées latéralement et sont ainsi venues en recouvrir d'autres. Cette notion du charriage est devenue classique, elle a maintes fois été vérifiée dans les Alpes et, sans elle, on ne comprendrait rien à une bonne partie de la chaîne.

Ce qui est plus discutable pour certaines personnalités scientifiques, c'est l'importance donnée aux charriages. On les a constatés, au début, dans des régions sédimentaires, où ils sont faciles à démontrer, les roches étant bien datées par leurs fossiles et bien reconnaissables grâce aux différences de faciès. Puis on a étendu la notion à des zones de roches cristallines, où les

charriages sont bien plus difficiles à démontrer, car le manque de fossiles et la monotonie du faciès empêchent toute chronologie des roches. La part de l'hypothèse devenait beaucoup plus grande.

Les causes

Toute la difficulté du problème est là : il faut trouver une cause capable d'expliquer des mouvements variés puisqu'il y a eu, sur le même emplacement, pour ne parler que du plissement alpin, mouvement d'enfoncement, phase de sédimentation et mouvement de surrection dans le sens vertical, tout cela complété par les mouvements latéraux qui ont donné lieu aux plis et aux nappes de charriage.

Tout d'abord, on constate l'abandon général par les théoriciens de la vieille explication par le refroidissement chère à notre enfance ; vous savez, la Terre comparée à une pomme qui se ride en vieillissant ! L'écorce de notre planète se racornissant à mesure que diminuerait la chaleur interne ! On oppose à cette théorie facile beaucoup d'objections, la plupart d'ailleurs découlant de notre connaissance de plus en plus étendue de la physique et de la géochimie ; on n'est plus très sûr, maintenant, que la Terre, depuis qu'elle existe en tant que planète constituée, se refroidisse, car se posent à l'intelligence humaine les problèmes nouveaux des dégagements de chaleur d'origine radioactive. D'ailleurs, le refroidissement, phénomène supposé continu, ne cadre pas avec les phases successives de gonflement et d'enfoncement de l'écorce qui marquent l'histoire des montagnes. Et cette théorie ne cadre pas non plus avec la distribution si inégale des montagnes à la surface du globe.

Alors restent en présence, pour expliquer les causes de la formation des montagnes et, partant, des continents, deux hypothèses : l'une relativement ancienne et que l'on abandonne au profit de l'autre hypothèse, plus récente, qui s'impose progressivement.

La première est l'hypothèse de Wegener, la seconde celle de la gravité.

Hypothèse de Wegener

On la connaît aussi sous le nom de théorie de la dérive des continents.

Elle fut formulée en 1915 par Wegener et fit sensation. L'auteur donne une explication générale des montagnes du monde par des poussées tangentielles. Selon lui, la partie superficielle de l'écorce, à base de silice et d'alumine (d'où le terme de « sial » forgé avec les symboles chimiques du silicium et de l'aluminium), se déplacerait sur la zone profonde, à base de silicium et de magnésium (sima). Les continents seraient ainsi des radeaux de sial flottant sur le sima. Au cours des déplacements, il y aurait des phases de distension, provoquant la formation des fosses dans lesquelles s'accumulent les sédiments (on les nomme géosynclinaux), et des phases de compression ou d'écrasement, faisant naître les montagnes.

On en donnait des exemples saisissants : les Alpes seraient nées de l'écrasement du géosynclinal alpin entre l'Afrique dérivant vers le nord comme une serre mobile et l'Europe hercynienne servant de butoir et formant serre fixe ; l'Himalaya aurait été comprimé entre le Dekkan dérivant vers le nord et la plate-forme de l'Asie centrale ; les Andes auraient gonflé comme un bourrelet qui se rebrousse à l'avant de l'Amérique du Sud dérivant vers l'ouest.

Les cartes géographiques même semblaient appuyer de tout leur graphisme ces théories audacieuses en y mêlant une note poétique. Ainsi, il était frappant de constater que la partie orientale de l'Amérique du Sud s'emboîtait exactement dans le golfe du Bénin, comme si l'Amérique s'était détachée de l'Afrique à une époque très reculée et avait dérivé vers l'ouest...

Cette hypothèse séduisante a été particulièrement utilisée dans les Alpes par Émile Argand : selon cet auteur, les nappes de charriage résulteraient de la poussée venant du sud ; cette poussée aurait permis à certaines d'entre elles de passer du bord de la plaine du Pô jusqu'au nord des Alpes et de former, pour citer quelques exemples, le Chablais, les Préalpes de Fribourg. La fameuse calotte calcaire qui subsiste sur le sommet cristallin du Belvédère des aiguilles Rouges venait souvent à l'appui de cette thèse.

Ces idées connurent un très grand succès de 1910 à 1950.

Aujourd'hui elles sont abandonnées. Pourquoi ?

D'une part, la désaffection de la théorie de Wegener qui voulait, à la surface de la Terre, expliquer trop de choses. Wegener tombe dans l'oubli. Sa théorie reposait sur un échafaudage d'hypothèses dont l'ensemble avait belle allure, mais dont les différents éléments, un à un, se désagrègent.

D'autre part, les déductions très détaillées qu'Argand en avait tirées pour les Alpes sont aussi peu à peu réformées par le progrès des études. On ne croit plus qu'une poussée reçue au bord de la plaine du Pô ait pu faire traverser la chaîne, sur toute sa largeur, à des massifs entiers. Le schéma très ordonné qu'il avait donné, avec des nappes se déroulant de France en Autriche, ne résiste pas aux études sur le terrain, qui démontrent que chaque secteur des Alpes a son originalité propre, qu'il n'est pas un simple morceau d'un long accident. Ces théories reposaient sur peu de faits et beaucoup d'imagination, et l'accumulation des faits les vieillit.

De l'imagination, il en fallait, et de la plus séduisante, pour soulever comme une vague de fond les sédiments du Piémont, les faire basculer en couches épaisses de plusieurs milliers de mètres, par-dessus les Alpes cristallines, et les disloquer sur le versant nord des Alpes ! Il est vrai qu'à l'échelle du temps et des continents...

Hypothèse actuelle : la gravité

La notion nouvelle et féconde a été la découverte du rôle que la pesanteur ou gravité avait joué dans la création des montagnes : c'est la force la plus universelle, une force que l'on n'a pas besoin d'imaginer pour les besoins de la cause. C'est une extension de phénomènes bien connus, mais à plus petite échelle : les glissements de terrains qui se produisent dans les masses argileuses que l'eau rend plastiques ; le glissement d'un glacier, corps solide qui pourtant avance sous l'effet de la pesanteur et dont le mouvement a été connu et étudié depuis longtemps.

Quant à l'effet de la pesanteur, on sait que le poids des glaces a pesé fortement sur les terres émergées de la période glaciaire et que

leur niveau s'est relevé de façon sensible depuis la fonte des calottes glaciaires.

Le problème préalable était de prouver la plasticité des roches dures ; ceci a été résolu. Les physiciens ont montré que les matériaux les plus rigides pouvaient couler à condition que le mouvement fût très lent.

Dans les études sur modèles réduits, quand on veut faire des expériences mettant en jeu les roches de l'écorce terrestre, comme on ne peut pas leur donner une durée comparable au temps géologique, on les figure par de la pâte dentifrice ou même de l'huile. Cette notion d'une durée extrêmement longue est peut-être la plus difficile à assimiler quand on n'est pas familier avec ces questions. On dit qu'en tectonique l'unité de temps est le million d'années. Nous entrons ici dans le domaine des chiffres extraordinaires, des durées qui dépassent l'entendement humain. De même, en astronomie mesure-t-on les distances en années-lumière. Ceci admis, il n'y a donc pas d'impossibilité à penser que les roches coulent sur des pentes inclinées par le seul effet de la pesanteur.

On a fait à cette théorie une objection : les vallées devraient être comblées, les falaises s'aplatir comme s'aplatit le camembert qui n'est plus contenu par les bords de sa boîte. Objection apparente seulement, car tout n'est qu'une question de temps. De même qu'on peut redonner son apparence au camembert coulant en détachant avec le couteau la pâte qui dépasse de la croûte, de même l'érosion agit sur les vallées et les falaises ; le creusement des vallées par les rivières, le dégagement des falaises par l'érosion qui travaille à leur pied sont des phénomènes beaucoup plus rapides que l'écoulement des roches.

Cette notion d'écoulement s'est peu à peu imposée aux géologues que ne satisfaisait pas l'explication par les poussées.

Il y a des cas où elle est particulièrement suggérée par la nature. Par exemple, la nappe de l'Ubaye-Embrénais, dans les Hautes et Basses-Alpes, entre le sud du massif du Pelvoux et le nord du massif de l'Argentera. C'est une des régions les plus confuses des

Alpes, constituée par une énorme masse de flysch gréseux et schisteux, pour laquelle il est impossible d'imaginer une poussée du côté de l'est, car elle est isolée de la plaine du Pô par les Alpes cristallines piémontaises. Par contre, ses replis sont tout à fait ceux d'une énorme masse plastique s'écoulant librement sur une pente. On a attribué par extension ce système à d'autres nappes de charriage et aussi aux Préalpes (Vercors, Chartreuse, Bauges).

Cet écoulement était facilité par deux circonstances :

a) l'existence, à la base de la série sédimentaire, des gypses du trias, roche extrêmement plastique et remuante, qui a beaucoup facilité le décollement, c'est-à-dire le départ de la masse qui les surmontait. Le gypse jouait ici le rôle de la planche savonnée ou du lubrifiant,

b) l'existence, à l'intérieur de la série sédimentaire, de niveaux de schistes ou de marnes, plus plastiques que les calcaires et favorisant le mouvement de l'ensemble.

Il restait à trouver les pentes qui ont permis le glissement !

Là, on revient aux hypothèses, mais plus conformes que celle de Wegener aux progrès de la géophysique. La plus en faveur aujourd'hui repose sur les différences de température qui existent dans l'écorce. Cette notion, depuis longtemps familière, nous a été démontrée par les puits de mine et les tunnels, l'échauffement étant en moyenne de 1 °C par trentaine de mètres de profondeur.

Ces différences de température provoqueraient des courants de convection, ascendants et descendants, comme dans la casserole d'eau qu'on chauffe par en dessous ou comme dans une pièce chaude l'hiver (montée de l'air chaud, descente de l'air froid). Il ne se passe rien tant que les courants fonctionnent régulièrement ; mais, en cas de perturbation, il se produirait des soulèvements, c'est-à-dire des chaînes de montagnes, donc des pentes.

On a fait des expériences sur modèle réduit et elles ont donné une image saisissante de la naissance des montagnes.

Ces hypothèses ont été appliquées aux Alpes et, en particulier, aux Alpes occidentales. Voici comment on explique la formation des Alpes dans cette région.

Tout d'abord, il s'est formé un bourrelet montagneux (intumescence, géotumeur) sur l'emplacement des montagnes cristallines du Piémont, massifs du Grand-Paradis, de Sesia-Lanzo, de Dora-Maira. La couverture de ces masses cristallines aurait glissé vers l'ouest – probablement parce que le bourrelet s'était gonflé à partir de l'est – donnant des nappes de charriage de la zone des schistes lustrés : Briançonnais, la Maurienne, Tarentaise Chablais.

Plus tard se produisit le gonflement d'un deuxième bourrelet, celui de la ligne des massifs Pelvoux-Mont-Blanc, gonflement accompagné d'un mouvement de serrage vers l'ouest avec les conséquences suivantes :

- écrasement des roches sédimentaires entre les deux blocs parallèles des massifs, dont le plus bel exemple est la zone de Chamonix entre le mont Blanc et les aiguilles Rouges ;

- décollement et glissement vers l'ouest de leur couverture sédimentaire qui se plisse en glissant et donne les Préalpes ;

- contrecoups sur les nappes déjà formées. Celles qui étaient déjà passées à l'ouest des massifs vont un peu plus loin comme dans le Chablais ; celles qui étaient restées à l'est et qui avaient primitivement une pente d'est en ouest voient cette pente retournée dans leur bordure occidentale, et quelquefois elles coulent en sens inverse de leur premier mouvement.

Cette hypothèse explique bien des choses.

D'abord, comment les massifs cristallins ont perdu leur couverture sédimentaire. C'est un effet du glissement et non du travail de l'érosion ; la couverture n'a pas été détruite, elle a déménagé : la Chartreuse était sur Belledonne et le massif d'Allevard, les Bauges sur la chaîne de la Lauzière, les Aravis ont glissé du Beaufortin !

On comprend mieux le creusement de la grande dépression du Sillon alpin, c'est-à-dire la vallée du Drac, le Grésivaudan, la combe de Savoie, le val d'Arly, le bassin de Sallanches : le glissement des calcaires vers l'ouest a découvert par-dessous les roches plus tendres du jurassique moyen, du lias, où l'érosion des eaux et des glaces a facilement ouvert cette immense avenue.

Hypothèse féconde que celle du glissement par gravité, qui associe la naissance de la chaîne et son façonnement par les agents d'érosion, c'est-à-dire le façonnement du relief.

Histoire des Alpes

L'histoire des Alpes est un drame en quatre actes s'étendant sur trois cents millions d'années : de l'ère primaire à l'époque actuelle. Un drame obscur, tourmenté, fait de soulèvements, de révoltes, de destructions, d'aplanissements, de déluges, d'érections, de surrections, de plissements, de clivages, de charriages, dont la trame encore maintenant ne nous apparaît pas très clairement. Dans l'histoire de la tectonique, c'est un drame jeune. Qu'est-ce que trois cents millions d'années au regard des quelque quatre mille cinq cents milliards d'années que l'on donne comme âge probable de la Terre, et même des trois mille cinq cents milliards d'années (à 385 milliards d'années en plus ou en moins) cités comme étant l'ancienneté d'achèvement de l'écorce terrestre ?

Donc, si l'on veut bien comprendre l'histoire des Alpes, la plus compliquée peut-être des histoires de montagne du monde, il faut avant tout essayer de faire un prodigieux effort pour comprendre sa durée dans le temps, se dire que l'homme est apparu sur la Terre pour la première fois il y a environ cinq cent mille ans, peut-être six cent mille ! Que l'unité de temps tectonique est le million d'années ! Alors on sera saisi par l'effrayante pérennité de mouvements imperceptibles à l'homme et qui modifient constamment, et sans doute actuellement encore, la surface de notre planète.

Les quatre actes de l'histoire des Alpes correspondent aux quatre ères géologiques : primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire.

Ère primaire

À l'époque où se formaient les massifs hercyniens, environ trois cents millions d'années avant notre époque, une chaîne de montagnes naissait sur l'emplacement actuel des Alpes, avec

L'origine des montagnes

apport de roches cristallines et métamorphisme des roches sédimentaires de la première moitié de l'ère (cambrien, silurien, dévonien). Son élévation, son amplitude, il nous est difficile de les évaluer; quoi qu'il en soit, cette chaîne de montagnes devait être recouverte d'un magnifique tapis végétal, qui est à l'origine des couches de charbon nombreuses dans les Alpes occidentales. Mais à peine est-elle achevée que la grande loi naturelle de l'érosion joue à plein, provoque la destruction progressive de ces premières montagnes, dont les débris forment pour partie les roches carbonifères génératrices du charbon précité. Le très lent travail de destruction se poursuit inexorablement: à la fin du primaire, la chaîne est arasée, réduite à l'état de pénéplaine. Cent millions d'années pour rien! Les premières Alpes reposent au fond des mers.

Ère secondaire

C'est au fond de ces mers que se poursuit le lent travail de construction de la croûte terrestre. Sur les débris de la chaîne primaire se déposent les sédiments du trias (formés de calcaires et de gypses), ceux du lias (un peu de calcaire, beaucoup de marnes), du jurassique moyen (marnes et calcaires), du jurassique supérieur (calcaire), du crétacé inférieur (marnes et calcaires), du crétacé supérieur (calcaires). Nous possédons ainsi la plupart des matériaux constituant les montagnes actuelles du globe.

Il n'y a pas calme complet sous les étendues marines; un lent travail se poursuit que nous pouvons reconstituer: les variations du faciès traduisent des variations de la profondeur des mers; il y a des émerSIONS, des étages manquent (signalés par des lacunes stratigraphiques), et déjà des plissements se forment, par exemple dans le Dévoluy, où un plissement s'est produit entre le crétacé inférieur et le crétacé supérieur.

Ère tertiaire

C'est la période principale de formation des Alpes, avec des mouvements échelonnés dans le temps – du début à la fin de l'ère – et

La nature montagnarde

dans l'espace. Dans la plupart des régions, on identifie plusieurs phases successives de soulèvement et de plissement d'après l'âge des roches et leur arrangement. Des sédiments se déposent dans les mers du début de l'ère, que l'on connaît sous le nom de mer de la Mollasse, mer Nummulitique (les Nummulites sont les fossiles caractéristiques du début du tertiaire), dans la mer du Flysch. Ces sédiments proviennent de l'usure des parties émergées les premières ; déjà l'érosion est plus rapide que le soulèvement !

À la fin de l'ère tertiaire, le soulèvement paraît achevé. Quelle est sa hauteur ? On a parlé de 8 000 et 10 000 m, d'un Himalaya européen ; mais des recherches récentes réduisent beaucoup ces chiffres.

Ère quaternaire

L'acte IV du drame est seulement commencé. Nous avons vu qu'il avait fallu cent millions d'années pour élever une première chaîne et la détruire complètement, cent autres millions d'années pour que s'accumulent au fond des mers les matériaux nécessaires à la création de la nouvelle chaîne, quarante millions d'années auront suffi pour hausser les Alpes au-delà de leur niveau actuel mais, au quaternaire, commence la destruction généralisée, racontée par les dépôts d'origine glaciaire et fluvio-glaciaire, les éboulis, les alluvions des torrents et des rivières. Les glaciations paraissent jouer le rôle destructeur le plus important ; leur lent travail se poursuit de nos jours. Par contre, il n'est pas prouvé que la phase de création, de soulèvement, soit terminée. Pauvres de nous ! Comment pourrions-nous le juger, qui ne sommes vieux que de six cent mille ans et conscients depuis moins de dix mille !

Ce découpage facile correspondant aux quatre grandes ères de la formation de l'écorce terrestre ne doit pas nous faire oublier, d'une part, l'enchevêtrement des actions les plus diverses, le mélange perpétuel de création et de destruction, d'autre part, la continuité des mouvements sur une zone de l'écorce instable par excellence.

LE RELIEF DES MONTAGNES

Le relief des montagnes est une création constante, en perpétuelle évolution, à vrai dire un compromis entre les forces créatrices que nous venons d'évoquer (soulèvements, plissements, glissements, charriages, enfoncement du socle) et les forces qui travaillent sans arrêt à les détruire ! L'érosion, c'est le sculpteur modelant de ses doigts le bloc d'argile et lui donnant forme à sa volonté, c'est le burin taillant le marbre.

Par la diversité de la résistance de leurs roches, les montagnes se défendent plus ou moins bien et il faut quelquefois une très longue érosion pour les faire disparaître.

Le nombre des combinaisons possibles entre ces trois forces : force de création, force de destruction et force de résistance explique la variété des reliefs montagnards.

Les forces de destruction

Ces forces agissent partout sur la Terre, mais avec une efficacité particulière en montagne à cause de la pente et de l'altitude. La pente provoque les glissements de terrains, les éboulements, les avalanches, les chutes de débris qui, dénudant la roche ou la martelant, l'exposent sans cesse aux attaques. L'altitude rend le climat plus rude, favorise l'érosion éolienne dans les pays secs, donne au gel une activité extrême, fait enfin apparaître les glaciers, à qui l'on doit

les plus belles et les plus grandioses vallées des montagnes. L'eau, le vent, le gel, les glaciers lancent les grandes offensives chargées d'aplanir les montagnes.

L'eau

L'eau emploie plusieurs méthodes combinées avec la force mécanique de son ruissellement : la dissolution des roches solubles et la désagrégation des roches hétérogènes.

Toux ceux qui ont cheminé dans les pays calcaires ont été frappés par la ciselure curieuse des roches, qui présentent des cannelures, des arêtes vives, des volutes, comme si les blocs avaient réellement été sculptés et ornés de gravures abstraites ; ces curieux dessins sont dus à la dissolution des calcaires et on les rencontre partout sur les lapiaz : désert de Platé, Parmelan, Vercors méridional, chaînes des Préalpes du Sud, etc.

Cette dissolution agit également en profondeur et provoque le creusement de puits, de galeries, de cavernes, dont on connaît des exemples grandioses : Aven Martel, gouffre de Padirac dans les Causses, gouffre Berger dans le Vercors (considéré comme, peut-être, le plus profond du monde avec 1 000 m de dénivellation du plateau de Saint-Sornin aux cuves de Sassenage), grottes de la Lesse dans les Ardennes belges, et surtout les extraordinaires rivières souterraines du Karst yougoslave, se développant sur plusieurs dizaines de kilomètres.

L'exploration de ces grottes et de ces abîmes a provoqué la naissance d'une nouvelle science, audacieuse et sportive, la spéléologie, qui progresse avec les méthodes ou les moyens que lui offre la technique moderne et qui provoque une grande émulation entre nations ; l'ampleur des moyens utilisés est telle que nous assistons souvent à des explorations internationales : ainsi au gouffre de la Pierre-Saint-Martin sur la frontière franco-espagnole, à la lisière du Pays basque et du Béarn, au gouffre du Marguareis dans les Alpes maritimes italiennes !

Le relief des montagnes est très différent selon la qualité des roches et leur composition ; si les calcaires durs se caractérisent par

des formations en hauts plateaux désertiques couverts de lapiaz et taillés de gigantesques canyons (Causses, Karsts), certaines autres roches, la dolomie par exemple, donnent des paysages ruiniformes. La dolomie est constituée par du carbonate de calcium et du carbonate de magnésium. L'eau provoque la dissolution plus rapide du carbonate de calcium et cette inégalité de dissolution donne les paysages fantastiques des Dolomites, en tours, en aiguilles, dressées comme de gigantesques ruines au sud des Alpes orientales. Ces aiguilles ont donné naissance à la variété la plus acrobatique de l'escalade moderne : l'escalade artificielle.

L'importance de la dissolution des roches par l'eau est vérifiée par les phénomènes de dépôts qui se font dans les cavernes, où l'atmosphère ne permet plus à l'eau de contenir autant de calcaire en dissolution. Ces dépôts affectent des formes irréelles : chandelles dressées vers le plafond des grottes (stalagmites) ou érigées goutte à goutte et tendant à rejoindre les pendentifs du plafond (stalactites) ; ailleurs, ce sont les tufs déposés dans les lacs et que l'on peut reproduire expérimentalement sans être sorcier. Quelle ménagère des pays calcaires n'a pas maudit les dépôts qui se produisent lentement, mais sûrement, au fond des récipients de cuisine qu'elle emploie journellement ?

Si l'eau dissout les roches calcaires ou gypseuses, elle ne peut avoir sur les autres que des effets de désagrégation. Tel est le cas du granite.

Pour cette dernière roche, l'eau attaque les feldspaths et le mica plus facilement que le quartz, ce qui entraîne la destruction de l'ensemble. De là provient cette rugosité de la protogine des aiguilles de Chamonix, propriété fort appréciée des alpinistes. Cette action de désagrégation de l'eau sur les roches dures est particulièrement énergique sous les climats tropicaux chauds et humides ; elle affecte surtout certains granites alors que d'autres roches, des gneiss par exemple, résistent mieux. Le relief se caractérise alors par des montagnes en forme de pain de sucre, dont certaines ont acquis une réputation mondiale : la baie de Rio de Janeiro en donne un type parfait avec ses collines côtières, Pain de Sucre, Corcovado, dominant les dépressions creusées par la pourriture du granite.

La troisième force de destruction est la force mécanique des eaux, qui complète le travail de dissolution ou de désagrégation des roches ; c'est la mieux connue parce que la plus spectaculaire. Elle devient évidente quand il y a des crues violentes, qui peuvent modifier instantanément certaines parties du relief, provoquer un éboulement, un changement de lit. Mais il ne faut pas oublier que son action est permanente grâce à la vitesse des eaux et aux matériaux transportés, qui servent à bombarder et à mitrailler les roches les plus dures. La nature a inventé la foreuse bien avant les hydrologues ou les pétroliers ! Les « marmites de géants », ces cavités circulaires creusées par les tourbillons de l'eau dans les gorges étroites et sinueuses des montagnes, sont le résultat de l'action tourbillonnante de l'eau chargée de grains de sable ou de cailloux qui agissent exactement comme une foreuse.

Enfin, bien sûr, et il ne faut pas l'oublier, ce sont les eaux qui creusent les vallées.

Cette action est différente selon le relief, la qualité des roches, le volume d'eau transporté, la rapidité et la dénivellation du cours d'eau. Elle peut être très spectaculaire dans les roches tendres, particulièrement dans les schistes et les grès. Très près de nous se burinent les « terres noires » de l'Embrunais et du Gapençais, plus loin les schistes colorés de la Bolivie au sud de La Paz, les grès colorés du Bryce Canyon aux États-Unis, les canyons de l'Aurès ou du Tassili au Sahara. Quand elle agit sur les moraines, elle provoque ces extraordinaires pyramides coiffées, connues souvent sous le nom de « cheminées des fées », que l'on trouve un peu partout dans les Alpes : à Saint-Gervais en Haute-Savoie, dans le torrent du Vallauria, affluent de la Durance, au sud de Gap, où leur concentration extraordinaire a imposé le nom de « salle de Bal ».

Par la diversité de son travail, la force mécanique des eaux constitue l'action la plus universelle de destruction des montagnes.

Son action ne consiste pas seulement à détruire, mais aussi à transporter les alluvions arrachées aux montagnes.

Cette notion de l'arrachement et du transport des matériaux est symbolisée par le torrent, qui constitue à lui seul un modèle réduit du travail gigantesque accompli à l'échelle des grands fleuves de la

Terre. C'est par elle que l'on peut expliquer le Hoang Ho, ou fleuve Jaune, charriant le lœss chinois, ou le fleuve Rouge enrichissant le delta du Tonkin des argiles arrachées aux montagnes de l'Asie centrale. Plus près de nous, la grande crue du Nil Bleu transportant les terres ocre de l'Abyssinie jusqu'aux plaines de l'Égypte, le limon de l'Euphrate ayant formé le Croissant fertile, la Camargue s'enrichissant des apports transportés par le Rhône depuis les glaciers des Alpes.

Le fonctionnement d'un torrent alpestre, de la montagne à la vallée, résume à lui seul le travail de l'eau. En haut, le bassin de réception, sillonné de rigoles ; un exemple frappant en est donné par les sources de l'Arve, sous le col de Balme. Cet éventail de rigoles rejoint le canal d'écoulement creusé par les eaux réunies dans un collecteur unique ; la force augmente, elle est proportionnelle au volume des eaux transportées, immense en période de crue, insignifiante quand le bassin d'alimentation ne donne plus. Suffisante, en tout cas, pour avoir creusé dans les roches les plus dures des gorges profondes, qui débouchent généralement sur un flanc de vallée où la pente diminue. Alors se forme le cône de déjection, construit par les dépôts que la rivière principale ne peut pas évacuer. L'étendue des cônes mesure la puissance de l'érosion. Les exemples abondent : le Manival du Grésivaudan, entre Crolles et Bernin, couvre 1 000 hectares ; le cône de l'Illgraben, dans le Valais, forme un vaste désert forestier dans un fond de vallée peuplé, riche en vignobles, en vergers et en cultures.

Ces cônes de déjection, qui se renouvellent à chaque débouché du torrent adjacent dans la vallée principale, jouent un grand rôle dans le paysage alpin et dans la vie des montagnards. Souvent les habitations se tiennent à l'écart en raison des dangers sans cesse renouvelés des crues subites. Le profil bosselé pose des problèmes aux systèmes routiers ou ferroviaires ; si la route s'adapte facilement à un profil en montagnes russes, par contre la voie ferrée peut passer en tunnel, comme à Voreppe sous le cône de la Roize.

Il s'agit pour les hommes de se défendre contre le torrent ; on est souvent obligé de l'endiguer de façon énergique : torrent de la Griaz aux Houches, torrent des Contamines. Malgré ces précautions, il

n'est pas rare de voir les ponts emportés régulièrement par les crues. Quelquefois, on renonce à en construire et l'on utilise le vieux système du gué, cimenté et modernisé, comme en France sur la route du col d'Ornon, entre le Valbonnais et l'Oisans, et sur d'innombrables routes de montagne en Afrique du Nord où les crues subites et grandioses des oueds sont redoutables. Pourtant, certains cônes de très grandes dimensions paraissent stabilisés et sont à peu près à l'abri des crues actuelles ; ils ont été construits à la fin de l'époque glaciaire par des eaux beaucoup plus abondantes qu'à présent. Là où il n'y a plus qu'un petit nant sans importance coulaient autrefois les eaux de fonte d'un glacier !

L'action des eaux dans les pays arides affecte des formes différentes. Dans les déserts chauds, les pluies sont rares mais violentes ; il arrive parfois qu'il ne tombe pas une goutte d'eau pendant six à sept années et, pendant ces périodes sèches, la destruction des montagnes se poursuit par l'érosion éolienne, beaucoup plus importante qu'on ne l'imagine généralement.

Les noms d'oued, de wadi, de bahr, d'enneri, de kouri qui caractérisent les vallées asséchées des pays désertiques de l'Afrique définissent bien cette forme de relief spéciale, où l'action de l'eau ne se produit qu'à des intervalles extrêmement éloignés. Un oued est souvent une vallée sèche du quaternaire ou, pour être plus précis, le lit d'un ancien fleuve dont l'importance, autrefois exceptionnelle, se réduit maintenant à un simple parcours souterrain jalonné en surface par des puits ; l'Oued Irrarhar drainait les eaux du Hoggar et du Tassili en direction des chotts du Sud algérien ; l'Oued Tamanrasset, dont on suit le cours jusqu'au Tanezrouft, rejoignait probablement la branche orientale de la boucle du Niger ; enfin le Tafassasset coulait vraisemblablement du Tassili vers le sud à travers le Ténéré. D'après les résultats des dernières Missions Berliet (1960 et 1961), son assèchement total daterait d'environ deux mille ans avant J.-C.

Ces vallées fossiles sont souvent confondues dans la masse du relief ; il faudrait, pour en maintenir le creusement, le ruissellement d'eaux permanentes ; au contraire, les vents y charrient les débris arrachés aux montagnes gréseuses des Tassilis, et aussi bien l'Irrarhar que l'Oued Tamanrasset, ou le Tafassasset sont souvent recouverts par

d'immenses ergs, dunes provenant de la désagrégation des Tassilis. Quand il pleut sur les montagnes, les crues affectent des formes diluviennes ; dans les parties accidentées, elles se précipitent dans les gorges, arrachent tout sur leur passage, déblaient les matériaux apportés par le vent, puis débouchent dans les larges vallées fossiles où elles s'étalent et disparaissent ; elles constituent un danger permanent et aucun nomade ne s'y laisse prendre qui sait où planter sa tente. En décembre 1960, l'Oued Irrarhar « coulait », charriant les crues du Hoggar et du Tassili ; il avait emporté la piste sur plus de 100 km et, s'étalant en face du bordj d'Amguid, recouvrait la plaine de plus d'un mètre d'eau boueuse. Le poste militaire français était inondé, mais, à quelques centaines de mètres du poste, un « carré » de méharistes groupait ses tentes sur une sorte d'île plate, que n'atteignait pas le niveau de la crue ; moins de 50 cm de différence de niveau séparaient les régions inondées des régions préservées et chacun admira le sens inné des Touareg qui avaient su si bien choisir dans une vaste plaine le seul endroit à l'abri des crues.

Les déblais accumulés forment, en général, des glacis au flanc des montagnes ; ceux-ci sont plus ou moins inclinés et la rareté des crues n'y ménage pas de lit principal ; de nombreuses rigoles strient ces glacis, charrient les alluvions dans les plaines très plates où peuvent se former des lacs temporaires par grosses pluies. Ces lacs se nomment, selon les lieux, des « dayas » (région du M'zab), des « maader » (pays targui) et, lorsqu'ils sont plus salés par capillarisation, des « sebkras ». Ce sont, à l'exception de ces dernières, les seules terres de culture du Sahara.

L'érosion éolienne

Cette notion a été très combattue par les milieux scientifiques, mais, depuis quelques années, de nombreuses missions sahariennes en ont reconnu l'importance. Le travail du vent est considérable dans les zones arides. On pourrait citer la brume de poussière impalpable qui charrie le less sur toute l'étendue des déserts de l'Asie centrale ; on connaît mieux le vent de sable du Sahara.

Le vent de sable règne partout au Sahara où la terre desséchée donne prise au vent ; on lui doit le burinement extraordinaire des Tassilis. Certes, l'érosion éolienne reste secondaire, elle n'a d'effet que sur des reliefs déjà démantelés par les crues ; mais sa force est considérable. La Mission Tchad a trouvé en plein cœur du Ténééré, sur le récif granitique de Grein, presque entièrement recouvert par les sables, des boules de granite complètement évidées par le vent, comme des œufs dont il ne resterait que la coquille ! Et cet évidemment ne pouvait être attribué à d'autres causes, à d'autres forces, que celles de l'érosion éolienne.

Si l'on admet que les grands amas de dunes qui s'alignent sur des milliers de kilomètres en cordons orientés selon les vents dominants sont constitués par des particules arrachées aux Tassilis gréseux qui couvrent une immense étendue du Sahara, on est bien obligé de conclure qu'un volume égal à celui des dunes a été arraché patiemment par les vents dans les montagnes et les hauts plateaux ! Toutefois il est fort probable que cette érosion n'acquiert sa toute-puissance qu'après les pluies ou les crues sporadiques qui préparent la désagrégation des roches.

Enfin, une forme d'érosion minime, mais véritable, est provoquée par la chaleur. J'ai vu, de mes yeux vu, éclater les roches au Hoggar, dans la fournaise d'un mois de juin torride.

Mais si la sécheresse, le vent et la chaleur sont des forces de destruction minimales comparées à celles des eaux, le froid agit bien plus fortement et nous lui devons la formation du relief des hautes montagnes dans sa plus grande étendue.

Le gel

Pour être efficace, l'action du gel doit se combiner avec celle de l'eau. Le gel ne peut donc avoir aucune action sur les roches du Sahara qui ne reçoivent en principe pas de pluies, mais il est par contre très efficace dans les montagnes humides. On sait que l'eau augmente de volume en se congelant. Elle procède donc dans les fissures et dans les cheminées à la manière d'un coin développant des

pressions énormes. On a pu particulièrement l'étudier dans les granites des aiguilles de Chamonix, où son action s'est fait sentir jusqu'à modifier complètement des passages d'escalade : ainsi la fissure de l'arête sud-ouest de l'aiguille du Fou, dans laquelle les premiers grimpeurs (1931) ne pouvaient engager que les doigts ou la main, et qui est devenue une large fissure où, par endroits, les alpinistes peuvent s'introduire entièrement ! Pour que cette action du gel soit persistante, il faut moins des froids prolongés que de fréquentes périodes de gel. Ce phénomène se produit avec une cadence régulière en haute montagne pendant l'été, avec gel durant la nuit et dégel pendant la journée. Un résultat spectaculaire de cette alternance du gel et du dégel est fourni par les chutes de pierres qui commencent dès que la caresse du soleil a réchauffé les parois. C'est pour éviter cette mitraille que les grimpeurs montent de préférence de nuit à l'aiguille Verte par le couloir Whympfer. Les canonnades de pierres du Cervin ont été rendues célèbres par les récits de la conquête. Enfin, les chutes de pierres sont plus fréquentes pendant les années sèches, en raison de l'intense chaleur de la journée qui dégarnit les couloirs et les parois de leur neige ou de leurs névés et libère les pierres éclatées par le gel nocturne. Les effets du gel sont plus ou moins poussés selon la nature des roches.

Sur certains calcaires gélifs qui absorbent de l'eau, ils sont très grands. Ils sont très grands également dans les roches fissurées, même très dures : granites, protogines, gneiss, car l'eau s'insinue facilement dans les fissures. C'est le cas de beaucoup de roches cristallines et, en particulier, des schistes cristallins (métamorphiques) très feuilletés ; dans ces roches cristalloyphylloïennes, l'eau se glisse entre les feuilletés. Le travail de désagrégation est accéléré en haute montagne par l'eau de fonte des neiges, si fréquente, qui coule doucement, ne ruisselle pas, s'insinue très aisément dans les moindres fentes.

La contre-épreuve du gel est donnée par les éboulis. Ils s'accumulent au pied des parois en un grossier classement ; les plus gros vont le plus loin, roulant jusqu'au bas du talus ; les autres s'entassent en grosseur décroissante vers le sommet du talus. Cette disposition est facilement vérifiable dans les immenses « casses »

qui remontent le long des parois (surtout des parois calcaires) et finissent par les ensevelir : ainsi la casse Déserte du col d'Izoard, l'immense casse du Grand Rochebrune dans le Queyras, les éboulis qui ceignent par le bas les falaises calcaires du Dévoluy, de la Provence, des Alpes maritimes.

Enfin, l'action du gel sur les roches peut être observée sur certains sommets dégarnis de neige pendant de courtes périodes de l'été : ainsi au sommet du Brévent, où l'on peut voir l'éclatement en cubes et en dés réguliers des schistes cristallins ; au sommet du Ventoux, où un immense clapier marque, avec la limite de la végétation, une zone où l'action du gel combinée avec celle du vent et de la neige a provoqué un véritable désert d'éboulis, bordé de talus formés de débris de couleur lunaire, accentuant l'impression d'altitude absolue de ce petit sommet qui n'atteint pas 2 000 m (1 912 m).

Quand il y a des glaciers au pied des parois, les éboulis emportés par eux deviennent des moraines. Le glacier Noir du Pelvoux méridional, le glacier de Miage italien finissent par être entièrement couverts par les éboulis tombés de la face sud des Écrins ou des parois du mont Blanc, constamment ramonées par les avalanches. Enfin, c'est au gel que l'on doit la sculpture des roches cristallines en pics, aiguilles, crêtes minces ; l'eau s'infiltré d'abord par la surface, et c'est l'amincissement progressif de cette surface qui aboutit aux formes aiguës. Le sommet s'usant plus vite que la base, un moment arrive où l'aiguille elle-même disparaît, ayant atteint un taux de fragilité qui la met à la merci du moindre bouleversement : violent orage, gel subit, secousse tellurique ! On explique ainsi la disparition de plusieurs petites aiguilles dans le massif du Mont-Blanc ou des aiguilles Rouges : le gendarme de la brèche Charmoz-Grépon, le petit Doigt de Mesure, etc.

Les avalanches

Les avalanches sont des phénomènes climatiques ; mais, par leur puissance, elles travaillent à leur façon à la modification du relief. Elles possèdent une grande puissance de transport : les couloirs où se

produisent les avalanches régulières sont ramonés, creusés, et présentent parfois, au milieu d'un riant paysage forestier, une sorte de saignée rocheuse et désertique. Elles peuvent charrier aisément des pans de forêts entiers jusque dans la vallée et leur force s'accompagne d'une grande puissance de destruction et d'arrachement. L'avalanche hâte le descellement des blocs attaqués par le gel et, là où elle a déboisé, elle facilite l'action des eaux et de l'érosion torrentielle ; lorsqu'elle descend dans des roches tendres, elle contribue à l'élargissement des couloirs. Son action destructive ne peut être enrayée qu'à la source, au sommet, par des moyens empiriques (filets de Nylon, murettes) ou naturels (reboisement) ; mais il est parfois difficile de reboiser dans certains couloirs où justement l'avalanche a arraché toutes les parcelles de sol végétal.

Les débris charriés par les avalanches n'observent aucune loi naturelle de classement par grosseur et c'est ainsi qu'on peut les distinguer des éboulis ; ils sont d'ailleurs moins abondants et plus localisés.

Les glaciers

De même que l'érosion éolienne dans les zones arides, l'érosion glaciaire a ses adversaires et ses partisans.

Pour ses adversaires, non seulement la glace n'attaque pas le relief, mais elle le préserve en l'isolant du gel, de l'eau, en le mettant sous scellé.

Les partisans de l'érosion glaciaire observent au contraire de nombreuses preuves de son action érosive : ils objectent aux adversaires les roches striées, cannelées, polies, moutonnées, les vallées à profil en U (en auge) qui caractérisent les anciennes vallées glaciaires, alors que les vallées fluviales ont en général un profil en V ; ils signalent le creusement de lacs, soit à haute altitude (lacs de cirque), soit dans les vallées, à des profondeurs très grandes au-dessous du niveau de la mer.

Les lacs italiens en sont l'exemple le plus frappant : lac Majeur, – 175 m ; lac de Côme, – 213 m ; lac de Garde, – 195 m ; les fjords de

Norvège, beaucoup plus profonds que la mer qui les borde et dont ils sont séparés par un seuil rocheux sous-marin de faible profondeur.

Cette opposition tient surtout à ce qu'on a trop généralisé et pas assez distingué entre les types de glaciers. Il est évident que les glaciers de plateau ou de calotte, peu épais, presque immobiles, n'ont vraisemblablement pas une grande puissance érosive.

On peut citer dans ce genre : les glaciers de la Vanoise, la calotte glaciaire du Mont-de-Lans, certains hauts plateaux glaciaires de l'Oberland tels que le Petersgrat, le Hielo Continental de Patagonie et, à plus grande extension, l'Inlandsis du Groenland. Mais ces deux derniers exemples sont encore reliés aux vallées par de grands glaciers d'écoulement, qui ont totalement disparu des calottes glaciaires alpines.

Or les grands glaciers de vallée possèdent la plus grande force qui ait jamais été mise en œuvre pour modeler le relief. Certains glaciers des Alpes ont encore des épaisseurs énormes, notamment le glacier d'Aletsch à la Concordia Platz (500 m), la mer de Glace à la jonction de Leschaux et du Géant (228 m); mais ces véritables fleuves de glace ont eu pendant la période glaciaire des épaisseurs de 1 000, 1 500 m et peut-être plus. Près de Grenoble, on a trouvé des moraines sur le plateau de Saint-Nizier à 1 100 m d'altitude, alors qu'un sondage fait à Grenoble même n'a pas atteint la roche en place à 400 m sous les alluvions, c'est-à-dire à -200 m. Dans ce cas précis, c'est donc au moins 1 300 m de glace prouvés – et sans doute plus – que charriait le glacier quaternaire du Grésivaudan.

Or on peut prouver que le creusement effectué par les glaciers était proportionnel à leur épaisseur; il suffit d'observer le profil actuel des anciennes vallées glaciaires, procédant par étages, avec brusque approfondissement à chaque confluence.

Dans la vallée de Chamonix, notamment, se distinguent trois étages de plus en plus creux : l'étage du Planet (1 400 m), où le glacier du Tour rejoignait le glacier d'Argentière; l'étage d'Argentière (1 250 m), qui se poursuit jusqu'au verrou du Lavancher et de la Joux, pour tomber brusquement à 1 000 m dans la grande plaine qui s'étend des Tines à Chamonix. Car à cet endroit débouchait le plus

grand glacier du massif du Mont-Blanc, celui qui forme actuellement la mer de Glace et dont la langue de fusion descendait, il y a moins d'un siècle, à 1 000 m, alors qu'elle est maintenant remontée dans la vallée adjacente, dite de la mer de Glace.

Sous le poids des glaces coulant du cœur du massif, la vallée a été creusée très profondément et il faudrait, pour en connaître la profondeur réelle, sonder les alluvions de la plaine des Praz, comme il a été fait pour les alluvions de l'Isère à Grenoble.

Cette démonstration peut être répétée sur les fjords, qui ne sont que des vallées glaciaires noyées, où l'on mesure les profondeurs par sondage nautique et où les vallées secondaires sont suspendues au-dessus des vallées principales, comme le sont encore actuellement la vallée du Drac au-dessus de l'Isère et toutes les vallées de la chaîne Pennine au-dessus du fond du Valais : vallée de la Viège, val d'Arolla, val d'Hérémence, vallée de Bagnes, vallées des Dranses, etc.

C'est dans le Tyrol que Richter a observé pour la première fois cette érosion glaciaire et la formation des auges dans les vallées des Hohe Tauern.

Le glacier agit soit par abrasion, soit par arrachement.

Dans l'abrasion, le glacier fonctionne comme une meule qui broie les roches grâce à la pression et au mouvement, aidée par les cailloux ou grains de silice sertis dans la glace.

Cette usure est démontrée par les roches polies, on dirait poncées, que le glacier découvre là où il se retire ; c'est à elle que l'on doit la « farine de roches » formée de roches broyées en poudre très fine, tenues en suspension dans l'eau de fonte glaciaire et qui lui donnent sa couleur laiteuse. Phénomène observé journellement à Chamonix dans les eaux de l'Arve et de l'Arveyron pendant les heures chaudes, alors que durant les journées froides, où la fusion des glaces cesse, les torrents reprennent leurs eaux limpides. L'abondance de cette farine de roches est telle qu'elle a donné naissance dans la vallée de Chamonix à une industrie : les « sablières », où, par décantation, l'on obtient un sable très fin, lequel, pressé et mouillé, donne des briques de construction : les fameux « plots » avec quoi sont bâties toutes les constructions de la vallée.

Mais il n'y a pas que des avantages dans ces eaux chargées de sable glaciaire ; celui-ci provoque l'usure rapide des turbines, alimentées par les eaux des glaciers, malgré les dessableurs spéciaux interposés sur le parcours de l'eau.

Toutefois, l'abrasion est la seule action du glacier sur les roches très dures, massives et non fissurées.

Par contre, l'arrachement est très efficace sur les schistes et toutes les roches friables. Le glacier entraîne les blocs arrachés aux flancs de sa vallée ; il les descelle par pression, ou bien parce qu'ils sont soudés à la glace par le gel nocturne qui agit comme une ventouse. Cette action rapide exige beaucoup moins de force mécanique que l'abrasion.

Le glacier use, arrache, mais surtout transporte !

Il transporte tout, sans limite de poids ni de volume, ses propres débris arrachés aux reliefs comme ceux qui tombent du haut de la montagne sur lui (glacier Noir, glacier de Miage italien).

Une partie des débris transportée l'est à la surface du glacier, où elle forme les moraines branlantes, fastidieuses pour les alpinistes.

On distingue les moraines latérales et les moraines médianes.

Les moraines latérales s'alignent le long et au pied des parois ; les moraines médianes sont formées par la jonction de deux glaciers et la réunion de deux moraines latérales voisines.

Un bel exemple en est fourni par le confluent des glaciers de Leschaux et du Géant dans le Massif du Mont-Blanc : la moraine latérale droite du glacier de Leschaux devient la moraine latérale droite de la mer de Glace ; la moraine latérale gauche du même glacier se soude avec la moraine latérale droite du glacier des Périades, dont la moraine latérale gauche s'est confondue depuis le pied des séracs du Géant avec la moraine latérale droite du glacier du Géant ; puis toutes ces moraines médianes se rejoignent, ne formant plus qu'un immense chaos, qui rejoint finalement la moraine latérale droite de la mer de Glace, recouvrant le glacier sur la moitié de sa surface alors que sa partie gauche reste découverte et formée de glace bleue bien nettoyée. Cette disposition se retrouve dans tous les cirques de confluence ; elle est connue des autochtones depuis les

temps les plus reculés et ceux-ci semblent avoir observé, bien avant les milieux scientifiques, les mouvements du glacier.

Une partie des matériaux arrachés à la montagne par le glacier est transportée à l'intérieur de la glace. Les débris y ont pénétré par l'ouverture des crevasses, ou bien ils ont été enrobés dans les zones de formation de la glace (bassins d'alimentation).

Cette moraine interne ressort dans la partie inférieure à cause de la fusion et constitue la moraine d'ablation, parce qu'elle résulte de l'ablation de la glace superficielle ; elle la protège d'ailleurs d'une fusion trop rapide.

Les moraines frontales se forment lorsque la langue de fusion du glacier est en terrain horizontal : extrémité d'un petit glacier, par exemple. Contrairement aux moraines latérales, elles sont très souvent emportées par les eaux de fusion du glacier, qui les désagrègent ; mais, partout où elles subsistent, elles contribuent à la formation des lacs qui caractérisent les anciennes régions couvertes par la glaciation quaternaire (région des Grands Lacs en Amérique du Nord, Scandinavie, etc.).

La puissance de transport des glaciers est illimitée et n'a rien de comparable avec celle des rivières, dont la capacité d'évacuation est limitée à une charge maximale variable avec l'abondance des eaux et leur vitesse. On doit à cette puissance exceptionnelle l'abondance extraordinaire des alluvions qu'ils ont déposées en avant des montagnes, soit directement (moraines), soit par l'intermédiaire de leurs eaux de fonte (nappes d'alluvions fluvio-glaciaires).

Ces dépôts ont eu lieu quelquefois dans l'intérieur même des montagnes, comme c'est le cas pour la Durance moyenne, et surtout pour le bassin de Klagenfurt, à l'extrémité orientale des Alpes.

Les glaciers sont capables de transporter les plus gros blocs, de plusieurs centaines de mètres cubes parfois, qu'ils abandonnent loin de leur point d'origine. En quelque vingt ans, j'ai vu se desceller, sous l'action de la mer de Glace, le gros bloc de granite situé au lieu-dit l'Angle, où l'on prenait pied autrefois sur le glacier ; année par année, il a été transporté vers le bas par le glacier. Où est-il maintenant ? Ce sont ces blocs erratiques qui ont beaucoup fait pour

démontrer la réalité des glaciations quaternaires car on ne peut attribuer leur transport aux eaux courantes, malgré l'hypothèse diluviale qui a eu cours avant que l'hypothèse glaciaire ne soit acceptée, vers le milieu du XIX^e siècle.

Durant l'époque quaternaire, de vastes glaciers engendrés par le refroidissement du climat ont couvert la plus grande partie des montagnes tempérées et même l'avant-pays. Ainsi le glacier du Rhône s'étendait jusqu'à Lyon, où sa présence est attestée par l'énorme bloc erratique connu sous le nom de « Gros Caillou » qu'il a déposé sur la colline de la Croix-Rousse. On imagine difficilement le spectacle grandiose de ces glaciers, dont il ne reste plus comme exemple que les Immenses glaciers des régions arctiques. Ces glaciers, qui étaient alimentés par d'immenses calottes comparables aux inlandsis groenlandais ou patagonien, ont été les agents essentiels du façonnement des montagnes de la Terre, presque dans leur totalité, à l'exception des régions très sèches qui n'ont pas eu de glaciers.

Les traces de ces anciennes glaciations sont très visibles et l'on peut les classer sous deux rubriques : le façonnement mineur et le façonnement majeur.

Façonnement mineur

Les stries faites par le frottement des grains de silice sur les calcaires sont des marques abondantes, mais peu visibles, surtout s'il y a eu patine surajoutée sur la roche.

Les cannelures ont été creusées par les cailloux qui dépassaient de la glace à la manière de la lame d'un rabot. Les exemples sont très nets. L'un des meilleurs est celui de la roche de Rame dans la vallée de la Durance embrunaise.

Les roches polies et moutonnées s'observent surtout dans les vieilles montagnes qui avaient déjà des formes émoussées : bouclier canadien, bouclier scandinave, mais aussi dans les Alpes. Les rochers des Mottets, au-dessus des sources de l'Arveyron, reproduisent excellentement ces roches moutonnées dans leur formation actuelle ; le glacier, en effet, ne s'en est retiré que depuis une quarantaine d'années ! Enfin, ces surfaces moutonnées sont reconnaissables dans

les aiguilles Rouges, à Belledonne, partout où l'on se trouve en terrain de roches dures.

Façonnement majeur

Il a donné naissance au relief des montagnes tel qu'il nous apparaît dans sa plus grande généralité. Le glacier a en effet modelé deux types de relief qui se reproduisent partout où son action s'est exercée : le cirque et la vallée glaciaire.

- Cirques

Le cirque est une niche creusée à haute altitude et ouverte sur le versant de la vallée ; il présente à l'arrière une paroi très raide, voire un véritable mur rocheux. Le profil du fond présente souvent une contre-pente qui provoque la naissance de lacs. L'extension du nom de cirque dans son acception géographique à certains fonds de vallée caractéristiques peut provoquer une confusion. Le cirque du Fer à cheval et le cirque de Gavarnie ne sont que des fonds de vallées glaciaires et non des cirques au sens de relief glaciaire.

Le creusement des cirques glaciaires résulte d'une convergence d'actions diverses.

Au départ, il y a sans doute existence d'un creux relatif, soit d'origine torrentielle, soit préparé par la neige (niche de nivation dont deux beaux exemples sont la niche des Drus dans le massif du Mont-Blanc et le glacier Carré à la Meije). La niche initiale est agrandie progressivement par la glace et le gel : la glace use le fond, le gel ronge les bords où l'humidité et le froid sont entretenus par le voisinage de la glace. Enfin les matériaux de chute s'accumulent dans les rimayes de décollement où elles commencent aussitôt leur travail de pierre ponce.

À mesure que le cirque s'enfonce et s'élargit, le glacier devient plus épais, plus étendu, plus puissant ; le mur de fond qui rabat la neige sur lui est d'autant plus efficace qu'il est plus haut. Ainsi le cirque d'Envers de Blaitière, dans les aiguilles de Chamonix, dominé par des parois de près de 1 000 m.

Enfin, l'action du gel ne s'arrête pas au niveau de la glace ; le mouvement du glacier vers l'aval dégage à l'amont, au pied du mur,

une large fente, la rimaye, pleine de neige l'hiver, vide l'été. On a vu plus haut qu'elle engloutit tout ce qui tombe des parois ou presque, et il est prouvé que les alternatives de gel et de dégel se font sentir jusqu'au fond de la rimaye, donc en partie sous le glacier.

Les cirques existent dans les montagnes à partir d'une certaine altitude, variable selon les massifs, mais à peu près constante pour un même massif ; cette altitude est la limite à partir de laquelle il y avait assez de neige pour former des glaciers. Dans la vallée de Chamonix, par exemple, on note la régularité des anciens cirques glaciaires de La Pendant sous l'aiguille Verte, de Blaitière sous les aiguilles de Chamonix, opposés aux anciens cirques des aiguilles Rouges : cirque de la Glière, cirque de la Charlanoz, cirque des Vioz. À noter que ces cirques constituent très souvent d'excellents alpages juste au-dessus de la limite de la forêt.

Les cirques apportent une contribution importante à la sculpture de certaines montagnes ; on leur doit, en particulier dans les Pyrénées, la beauté des paysages de roches moutonnées dans lesquels sont enchâssés des lacs de haute montagne constituant des réservoirs hydroélectriques importants. Ainsi les glaciers travaillaient-ils providentiellement, depuis des millénaires, à la formation de ces réserves d'eau indispensables à la survie de l'homme moderne !

Mais l'effet le plus remarquable du creusement du relief en cirque est l'amincissement du relief par l'action convergente des glaciers qui les entourent. Quel exemple plus parfait, plus magnifique que celui du mont Cervin, chanté par Guido Rey ! La pyramide par excellence, la montagne type rêvée par les poètes ! Mais il y a de nombreux Cervin imparfaits et les exemples abondent tout autour du seigneur : dent Blanche, dent d'Hérens, majestueux Weisshorn, tous taillés dans les schistes cristallins du Valais, plus tendres que le granite et permettant au sculpteur une plus large ébauche.

- Vallées glaciaires

Elles constituent l'immense majorité de toutes les vallées de montagne. On se rend compte, en les étudiant, de l'importance fondamentale de l'érosion glaciaire dans la formation du relief montagneux et des répercussions que le creusement de ces vallées a provoquées sur

le peuplement humain, les relations entre peuples, l'habitat, la faune et la flore.

Les vallées glaciaires sont innombrables, mais elles portent toutes la marque de caractères généraux : leurs vastes dimensions, le profil en U, l'inégalité du profil en long.

Il serait plus juste de parler de « lit glaciaire » quand on évoque une vallée creusée par les glaciers. Dans une vallée fluviale, le lit tient une place exiguë par rapport aux versants de la vallée. Dans une vallée glaciaire, le glacier, de vitesse lente, est beaucoup plus encombrant que la rivière ; le lit a pu acquérir une profondeur énorme, cachée aujourd'hui par des alluvions postglaciaires ou des lacs. Très souvent, la même vallée a connu des alternances de glaciation et de sécheresse, des retraits et des avances ; mais le passage du glacier reste caractérisé par ces grandes plaines à faible altitude qui fournissent à l'homme des voies de passage faciles et fréquentées, puissants couloirs qui aèrent les montagnes. Leur importance sur le peuplement humain est très grande : si les Alpes constituent des montagnes en grande majorité prospères et peuplées, c'est à l'importance de leurs vallées intérieures qu'elles le doivent ; par contre les Pyrénées, moins aérées, forment une série de massifs semi-désertiques, favorables à la faune mais contraires à la vie humaine en altitude.

Le profil en U est donné comme typique de la vallée glaciaire.

Il ne faudrait cependant pas généraliser. Le profil en U est parfait dans les roches les plus massives – granites, calcaires – mais la vallée glaciaire peut conserver le profil en V des vallées fluviales dans certains secteurs schisteux où, cependant, le passage du glacier est indéniable (en Maurienne, de Saint-Michel à Modane, par exemple) ; la vallée glaciaire peut adopter, à cause de la dureté inégale des roches, un profil mixte : une rive verticale et une oblique. Cette curieuse formation est explicable par l'étude des deux processus de l'érosion glaciaire. L'abrasion, qui exige une énorme force mécanique, est surtout efficace dans les parties les plus profondes du glacier où la pression et le poids sont les plus forts ; elle provoque donc dans les roches dures un élargissement de la vallée par le bas, ce qui la fait passer du profil de départ en V (ancienne vallée fluviale) au

profil en U. Dans les roches tendres, au contraire, c'est l'arrachement qui prédomine, et il est aussi efficace près de la surface que près du fond ; l'élargissement se fait donc sur toute la hauteur du versant, conservant le profil en V initial.

L'irrégularité du profil en long est la troisième caractéristique du passage des glaciers dans une vallée. Cette irrégularité est très apparente lorsque la vallée recoupe des couches de roches variées comme la Maurienne ou la Tarentaise. On retrouve ainsi une succession de bassins plus ou moins larges, à fond plat (plaines alluviales), et de défilés à travers des barres rocheuses plus ou moins bosselées.

Prenons pour exemple la vallée de l'Isère. Les sources traversent d'abord un premier replat, le bassin du Prarion (pré-circulaire) ; puis un premier verrou rocheux, par des gorges très étroites : c'est le défilé du Malpasset, le bien nommé ; plus bas, l'Isère serpente dans le fond plat du bassin de Val-d'Isère, avant de s'engager dans le défilé de la Daille (le coup de faux) pour aboutir au bassin de Tignes ; avant la construction du barrage qui a provoqué le lac actuel, le torrent traversait par le défilé des Boisses les gorges de Tignes et se décantait dans le bassin plat des Brévières ; venait ensuite un long défilé jusqu'au bassin de Séez-Longefoy, où l'Isère entre dans la moyenne Tarentaise. Se succèdent alors le défilé de Villette, le bassin de Centron, le défilé du Siaix, le bassin de Plombières, le défilé précédant Moutiers, le bassin de Moutiers (où commence la Basse Tarentaise), le défilé du Siboulet ou des Échelles d'Hannibal conduisant au bassin d'Aigueblanche ; enfin un long défilé de largeur inégale jusqu'à Tours, mais de profil en U, avec plaines alluviales à basse altitude.

Sur tous ces bassins, on trouve des villages : Val-d'Isère, Tignes (avant le barrage), les Brévières, Bourg-Saint-Maurice, etc., et ils constituent des lieux de peuplement privilégiés en raison de l'excellence des terres alluviales favorables à la culture et à l'élevage.

Ces bassins sont appelés « ombilics » en morphologie glaciaire ; ce sont des zones de creusement maximum, grâce à la présence de roches tendres ou fissurées sensibles à l'arrachement. Le creusement s'effectue en profondeur ; nous avons déjà souligné que dans le Grésivaudan, à Grenoble, la sonde a traversé 400 m d'alluvions

postglaciaires sans atteindre le fond de la vallée glaciaire. L'exemple des lacs italiens creusés au-dessous du niveau de la mer, celui des fjords scandinaves, concourt à la vérification de ce qui n'est plus maintenant une hypothèse, mais une certitude scientifique.

Les défilés traversent des masses de roches restées en saillie au-dessus des ombilics et que l'on appelle des verrous ; en effet, certains ombilics sont verrouillés de tous côtés, par exemple celui de Moutiers, qu'on dirait creusé au trépan. Ce sont toujours des masses de roches dures, sensibles essentiellement à l'abrasion. Très souvent, le torrent de fusion sous-glaciaire a creusé dans le fond des défilés de véritables entailles étroites, où les marmites de géant abondent, et qui portent les marques de l'action abrasive des eaux de glace. Ainsi les gorges de la Diosaz, taillées dans le verrou terminal de la vallée.

L'inégalité de creusement entre les verrous et les ombilics traduit l'inégalité d'efficacité entre l'abrasion et l'arrachement.

Cette inégalité a des répercussions humaines considérables. Les ombilics sont des plaines cultivables où la circulation est facile, des lieux de villages et de bourgs de commerce ; les verrous imposent, par contre, aux communications de grandes difficultés : ainsi le verrou du Siaix, qui était le grand obstacle de la route de France en Italie par le Petit-Saint-Bernard, où la route moderne passe en tunnel et en encorbellement ; ailleurs, c'est la voie ferrée qui traverse le verrou en tunnel, comme au pas du Roc, à l'aval de Saint-Michel-de-Maurienne. Quelquefois même, un simple chemin muletier doit être taillé dans le roc comme le « chemin du chanoine Frison » entre la Gittaz et les alpages de la Saussaz.

Par contre, les verrous jouent un rôle défensif éminent, utilisé par la stratégie depuis les temps historiques ; des fortifications couvrent le verrou de Château-Queyras ; Briançon est une vieille ville fortifiée bâtie sur les bosses du verrou de la Durance ; en Valais, Sion groupe ses maisons nobles autour des bosses d'un verrou.

Si les exemples alpins abondent et nous sont familiers, le phénomène caractéristique des vallées glaciaires se renouvelle partout quand la structure oppose des roches tendres à des roches dures.

TABLE

Préface	7
---------------	---

Première partie

LA NATURE MONTAGNARDE

1. L'origine des montagnes	15
2. Le relief des montagnes	37
3. Le climat	70
4. La faune et la flore	105
CONCLUSION. <i>Le rôle des montagnes sur la Terre</i>	147

Seconde partie

L'HOMME ET LA MONTAGNE

1. Les montagnards	155
2. La vie des montagnards	199
CONCLUSION. <i>Une vie de fatigue, de pauvreté, de liberté</i> ..	231
3. La conquête progressive de la montagne par l'homme ...	236
4. L'équipement et l'exploitation modernes de la montagne.	257
5. Le tourisme en montagne	317

Les Montagnes de la terre

6. Histoire de l'alpinisme	359
7. La conquête des autres montagnes du monde.....	482
Conclusion générale	571

Cet ouvrage a été mis en page par IGS-CP
à L'Isle-d'Espagnac (16)

N° d'édition : L.01EBNN000505.N001
Dépôt légal : février 2018