LES

VOLCANS DE L'ECUADOR

PAR

Alph. STÜBEL

—

Planche IV

—

RÉSUMÉ

DES

THÉORIES D'INTÉRÊT GÉNÉRAL CONTENUES DANS CET OUVRAGE

PAR

W. PRINZ
Professeur à l'Université libre de Bruxelles.

Parmi les travaux sur le volcanisme parus dans ces dernières années, il importe de tirer hors de pair celui que M. Alphonse Stübel a consacré aux montagnes éruptives de l'Ecuador (République de l'Équateur) (1).

L'auteur, trop peu connu de la génération actuelle, est de ces chercheurs qui ne s'attachent qu'aux études de longue haleine, poursuivies dans des pays presque inaccessibles à notre bruyante civilisation. D'aucuns, retrouvant un nom qui n'a guère paru dans la littérature

(1) *Die Vulkanberge von Ecuador Geologisch-topographisch aufgenommen;* avec une carte en deux feuilles. Berlin, A. Ascher et Cie, 1897.

générale depuis une trentaine d'années, croient qu'il s'agit d'un descendant ou d'un homonyme. Il n'en est rien. M. Stübel, auquel on doit la fondamentale contribution volcanologique dont je désire donner un aperçu, est bien le géologue qui observait l'éruption de Santorin, en 1866, et qui n'a cessé depuis de parcourir les champs de lave des régions lointaines. C'est ainsi que, pour le dire de suite, M. Stübel fut un des rares voyageurs qui parcoururent la contrée peu sûre du désert volcanique syrien (1). Aussi, un grand intérêt est-il lié à la description qu'il nous en donne et qu'on trouvera plus loin.

J'achève cette rapide présentation, en mentionnant que les riches matériaux réunis par l'auteur sont offerts à divers instituts scientifiques de son pays, au fur et à mesure de leur classement et de leur description, afin qu'ils soient immédiatement prêts à servir à l'instruction des spécialistes et du public.

Tout cela a été réalisé avec la simplicité et la largeur de l'homme de science, véritablement ami de la nature, qui ne cherche d'autre récompense que le plaisir de contribuer à l'avancement des études auxquelles il a consacré le meilleur de sa vie.

De semblables travaux ne peuvent être enserrés dans le cadre étroit d'un article bibliographique. C'est une œuvre de justice, et surtout de progrès, que de leur donner une publicité proportionnée à leur importance. Mais, comme il est impossible de résumer un grand volume de cinq cent cinquante pages, dont une bonne partie se rapporte à des illustrations qu'on n'a pas sous les yeux, il m'a paru préférable de ne donner qu'un aperçu de l'ensemble et de ne suivre de plus près que les vues générales rassemblées dans les derniers chapitres de l'ouvrage.

Parti au commencement de 1868, en vue de parcourir quelques points des Andes, M. Stübel, séduit par les beautés naturelles de ce pays, à peine exploré géologiquement, séjourna près de dix années dans les hautes régions de la Colombie et de l'Ecuador. Ceux qui ont eu le plaisir d'entendre les récits de voyage que M. Émile de Ville, consul de Belgique à Quito, contait, il y a vingt ans, apprécieront les difficultés, souvent insurmontables, que l'explorateur a dû rencontrer dans ces contrées montagneuses et boisées, coupées de rivières torrentueuses, aux débordements inattendus. Qu'on joigne à cela l'absence de routes, d'habitations, de cartes détaillées, et l'on comprendra l'énergie qu'il a fallu dépenser pour rapporter, de ces sommets glacés, cent soixante-

(1) Les autres explorateurs sont MM. Wetzstein, de Voguë et M. von Oppenheim.

huit dessins, aquarelles et même tableaux à l'huile, représentant les seuls volcans de l'Ecuador. Un peintre, M. Troya, accompagna le géologue pendant un certain temps, achevant, sous sa direction, souvent après de pénibles attentes, les panoramas des deux Cordillères.

Ces illustrations sont actuellement exposées à demeure dans une grande salle du Musée ethnographique de Leipzig, et le volume dont il va être rendu compte est surtout destiné à leur servir de catalogue descriptif. Aussi, à part quatorze croquis, dont j'ai reproduit quelques spécimens, n'y a-t-il pas d'illustrations dans le texte. Cependant, une carte à grande échelle (1 : 250,000) y est jointe, permettant de repérer les descriptions; elle a été dressée par M. Th. Wolf, dont les travaux géologiques sur l'Ecuador sont bien connus. Les mesures servant de base à la carte ont été discutées par M. B. Peter, de l'Observatoire de Leipzig.

Des fragments climatologiques et une liste alphabétique des localités avec leur altitude terminent le livre. La liste comprend près de deux mille noms, dont la moitié environ sont reportés, souvent un grand nombre de fois, sur les diverses vues et peintures (1).

Il ressort des notes relatives au climat que les saisons sont peu tranchées et que le temps est remarquablement instable. La neige tranquille, la pluie, la tempête, les orages alternent brusquement avec de courtes heures ensoleillées et radieuses, de sorte que le voyageur est presque toujours devant les difficultés que les ascensionnistes de nos régions ne rencontreraient qu'en hiver. Voici, à titre d'exemple, les notes concernant une excursion sur le Condorasto; elles sont d'une expressive concision.

Du 17 au 22 octobre 1872.

17 octobre. Du campement au Pongo de Yuibug (4,277 mètres) vers Verde-Cocha au Condorasto (3,750 mètres). Matinée assez engageante; vent violent au Pongo et nuages; éclaircies; beaucoup de neige des deux côtés du Pongo. De 1 à 3 heures : éclaircies. L'Altar, assez visible; on voit la fumée du Sangay. Depuis 6 heures du soir : pluie qui dure toute la nuit. — *Le 18.* Vers le Condorasto, mauvais; tout est dans les nuages; bruine froide (paramitos); beaucoup de neige au Condorasto. Au coucher du soleil : éclaircies suivi de ciel serein, puis les vallées se remplissent de

(1) On a suivi ici, avec l'auteur, l'orthographe espagnole pour les noms américains. Donc *ch* = *dch* ou *tch*; *u* = *ou*; *qu* et *gu* = *q* et *g* dur, etc. Il faut prononcer : Qito, Pitchintcha, Roumignahoui, Pouloulagoua, etc. Pour les noms arabes, j'ai pris l'orthographe phonétique.

nuages. — *Le 19.* Au Condorasto (environ 4,100 mètres). Dans la nuit, forte chute de neige; gros flocons tombant tranquillement. Courte pause. Vers le soir, la neige reprend et dure toute la nuit. — *Le 20.* Retour du Condorasto au Pongo de Yuibug. La neige fraîche a deux pieds de hauteur. Très mauvais temps; pluie fouettée par le vent; gros nuages. Les pentes ruissellent; sur le chemin vers le Pongo le vent est épouvantable. Par places, neige jusqu'à la ceinture; la crête de la passe est libre, le vent l'a balayée. Plusieurs porteurs s'évanouissent; ils abandonnent leurs charges; fuite. Plus tard : passable; nuageux. Nuit claire. — *Le 21.* De Yuibug vers la Vaqueria d'Inquisai (3,509 mètres). Splendide matinée, nuageux ensuite; éclaircies; la pointe de l'Altar visible par moments. — Les 18 et 19, la température n'a pas dépassé + 2°; la nuit elle tombait à — 0°,5.

Si l'on ajoute aux documents énumérés plus haut les collections qui s'y rapportent, entre autres plus de six mille échantillons de roches, on estimera que M. Stübel a atteint le but qu'il s'était proposé : de faciliter à ses successeurs l'étude de cette partie des Andes.

La section de la chaîne considérée ici, s'étend de 0°33′ latitude nord à 2°18′ latitude sud ou, si l'on préfère, elle comprend les volcans qui se suivent depuis le Cotocachi dans le nord jusqu'au Sangay dans le sud.

Les volcans colombiens seront l'objet d'un travail ultérieur.

J'ai cru mieux servir les intérêts de la science en transmettant intactes les déductions qui furent suggérées à M. Stübel par ses savantes et patientes observations. Chacun les appréciera selon ses connaissances et ses tendances.

Il me paraissait surtout utile de propager les nouvelles vues sur la constitution possible de l'écorce terrestre; sur son épaisseur; sur la minime importance, au point de vue planétaire, du cortège des manifestations éruptives superficielles; sur le peu de stabilité de l'hypothèse contractionnelle, et d'autres aperçus encore, si heureusement groupés dans ce bel ouvrage.

La mise en valeur des jeux de dilatation qui accompagnent le refroidissement des magmas est également un point saillant de cette étude. La géologie n'a pour ainsi dire tenu aucun compte jusqu'ici de ce facteur important, que l'auteur fait intervenir si judicieusement dans ses théories.

La délicate discussion de ces sujets est régie par une juste appréciation des temps et des grandeurs, que l'on trouve bien rarement dans les écrits traitant de l'ensemble du Globe.

Buffon observe que l'esprit humain se perd dans l'évaluation de l'espace de la durée, plutôt encore que dans celui des grandes étendues, déjà bien difficiles à concevoir pourtant; il rappelle qu'une saine estimation ne peut être acquise que par la méditation suivie devant la nature elle-même.

Ce sont bien là les conditions dans lesquelles M. Stübel a si longtemps travaillé. L'isolement, en face de grandioses sujets d'étude qui nécessitaient une continuelle mise à l'échelle, lui a donné une remarquable rectitude de coup d'œil, que son exposé concis et clair contribue à mettre en relief.

Le plaisir que j'ai ressenti à la lecture de son livre disparaît malheusement dans la sécheresse de mon résumé. Toutefois, je suis certain que ceux qui le parcourront, penseront avec moi que si l'auteur n'a cherché à « élever qu'un échafaudage léger au milieu des forêts vierges », il lui a donné des fondations qui en font une œuvre importante, solide et durable.

Août-septembre 1900. W. Prinz.

Première et deuxième parties de l'ouvrage.

Le nombre des volcans de la région considérée est difficile à fixer, car beaucoup de cônes, que l'on serait tenté de séparer, appartiennent à un seul centre éruptif. On accorde souvent à des cônes accessoires une importance qu'ils n'ont pas, de sorte que M. Stübel en arrive à ne compter que quarante et un volcans dans l'Ecuador.

Malgré ce nombre relativement considérable, on peut les grouper en deux chaînes méridionales, qui encadrent le haut plateau écuadorien à l'est et à l'ouest. Ce plateau a 188 kilomètres de longueur, une largeur variable [de crête à crête une cinquantaine de kilomètres] et environ 2,000 mètres d'altitude. Certains édifices éruptifs sont isolés et ne se laissent rattacher ni à l'une ni à l'autre Cordillère.

Quelques pages d'introduction rappellent que l'étude des volcans a pour but de rechercher le lien qui existe encore maintenant entre les manifestations éruptives et les parties internes du Globe, restées en fusion, suivant l'hypothèse de Kant-Laplace.

En d'autres termes, les phénomènes volcaniques modernes dépendent-ils du développement de la Terre?

Bien qu'on soit disposé à répondre affirmativement, il y a cependant lieu de considérer le faible développement du volcanisme actuel, qui ne permet guère de l'attribuer entièrement à l'action du foyer central proprement dit. Ne perdons pas de vue la puissance considérable que doit avoir l'écorce terrestre; rappelons-nous que les sédiments cambriens avaient déjà, suivant Ramsay, 5,000 à 6,000 mètres d'épaisseur.

Quelle disproportion n'y a-t-il pas entre une coulée de lave et la profondeur d'où on la suppose venir, même en admettant une écorce de faible épaisseur ! Quant aux manifestations éruptives, telles que maares, fumeroles, geysers et autres, elles appartiennent avec plus de certitude encore aux parties superficielles de l'enveloppe solide de notre Planète.

Les tremblements de terre volcaniques, également, ne sont pas d'origine très profonde; il y aurait même lieu d'établir, avec plus de certitude qu'on ne l'a fait jusqu'ici, que les séismes tectoniques sont réellement indépendants de l'intervention des agents éruptifs.

Enfin, l'accumulation des volcans dans certains districts : Ecuador, Colombie, Bolivie, Chili, Mexique, Amérique centrale, Aléoutiennes, groupes de l'Atlantique, etc., est très remarquable, car il est évident que le foyer central, situé à une incommensurable profondeur, ne déverserait pas l'excédent de ses masses ignées par de multiples canaux étroits, mais bien par de grands orifices qui se maintiendraient ouverts durant toute la durée de la période éruptive. Chaque région aurait donc plutôt un immense centre volcanique, avec circonvallation, en activité permanente, qu'une foule de petits orifices éparpillés.

Ce mode de groupement nous pousse à admettre des foyers peu profonds, localisés, épuisables. L'activité actuelle de ces montagnes ne nous paraît plus qu'un écho affaibli des puissantes éruptions qui présidèrent à l'établissement des régions volcaniques plus ou moins nettement délimitées.

De semblables déductions s'appliquent *a fortiori* aux petites régions éruptives : Eifel, Hardt, Siebengebirge, Kaiserstuhl, Euganées, certains districts de la Bohême, appartenant aux formations sédimentaires récentes et qui, fréquemment, n'ont pas même émis de roches fondues.

Pourtant, la présence du volcanisme sur toute la Terre milite en faveur de l'existence d'une cause générale. D'autre part, le foyer central a dû se retirer à une profondeur croissant avec les progrès du refroidissement de la Planète, tandis que le volcanisme actuel nous amène à reporter le siège de son activité de plus en plus haut.

On se trouve donc devant deux alternatives : ou bien la Terre est

recouverte d'une écorce mince, quoique tout l'intérieur soit en fusion; ou bien elle est solide sur une grande épaisseur et ne renferme qu'un noyau limité de matériaux ignés. La première supposition rend facilement compte du volcanisme, mais ne concorde pas avec certains faits astronomiques et géologiques, tandis que la seconde, qui a bien des observations pour elle, ne cadre guère avec les phénomènes éruptifs.

Les recherches de l'auteur furent précisément entreprises en vue de tenter de faire disparaître cette contradiction et de jeter quelque lumière sur le lien encore obscur qui rattache les manifestations éruptives à la fluidité primordiale du Globe.

Abordant la seconde partie de son livre, M. Stübel donne la description détaillée des divers volcans de l'Ecuador, dans laquelle nous ne pouvons entrer. Cependant, comme il est utile que le lecteur ait un aperçu des observations auxquelles se rattachent les développements généraux qui vont suivre, nous résumerons également quelques-unes de ces descriptions, choisies parmi celles qui sont accompagnées d'un croquis. Elles serviront, en outre, à donner une idée du caractère de ces montagnes.

Le Cerro Altar (5,404 mètres).

Son nom indien, peu usité, est Cerro Collanes. C'est un vaste cirque, une *caldera*, de près de 3 kilomètres de diamètre. La supposition qu'elle aurait été autrefois surmontée d'un cône, qui se serait effondré dans la suite, n'est pas scientifiquement établie; elle va à l'encontre des faits

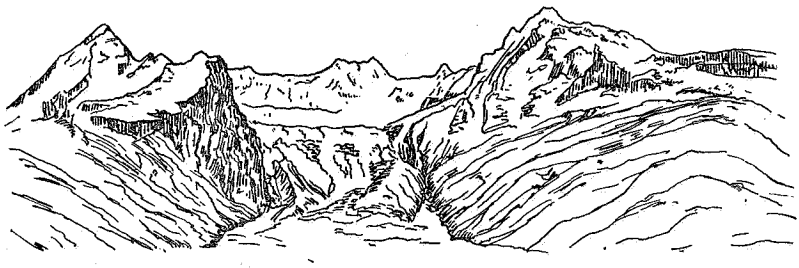


Fig. 1. — La caldera de l'Altar. *Au premier plan on voit la cascade de glace qui tombe, par une brèche du rempart, à 500 mètres plus bas. — Hauteur relative de la montagne, 1,700 mètres environ.*

d'observation et de ceux que l'on peut tirer de la comparaison avec des constructions analogues. La région est intéressante, parce qu'on y voit les matériaux volcaniques récents accumulés sur des reliefs hardis appar-

tenant aux roches anciennes. La caldera, elle, est remarquable par la présence d'un glacier important qui se déverse aujourd'hui hors de la brêche par laquelle s'écoulaient autrefois des masses fondues. La surface congelée est à 4,330 mètres d'altitude.

Les parois internes de la caldera sont à pic; elles montrent bien les bancs de conglomérats et de laves qui les constituent. Vers l'ouest s'ouvre une vallée, au fond uni, mais marécageux; elle est séparée du cirque par une marche de 300 mètres de haut, de laquelle le glacier tombe en une imposante cascade. M. Stübel estime l'épaisseur de la glace à une centaine de mètres.

Vu du nord, l'Altar se présente comme une montagne non homogène, reposant sur un soubassement de schistes micacés anciens; aussi, malgré son aspect majestueux, ce volcan ne mérite-t-il qu'une place de deuxième ou troisième rang parmi les édifices éruptifs de la région.

Le Chimborazo (6,310 mètres.)

Probablement le plus haut volcan de la Terre; seulement, la partie composée de matériaux éruptifs n'a guère que 2 à 3,000 mètres. Le Chimborazo est relié au Carihuairazo, son voisin, par une selle de 4,392 mètres. Sur le flanc nord, la limite des neiges est reportée assez haut, la raideur des pentes ne permettant pas au dépôt glacé de se maintenir en cet endroit, où les éboulements (*derrumbos*) ont été considérables et se continuent encore.

Fig. 2. — Le Chimborazo. *Amas volcanique un peu allongé et sans cratère. — Hauteur relative, 3,000 mètres environ.*

Il n'y a pas de cratère ni de contreforts marqués. Plus qu'aucun autre volcan du pays, le Chimborazo produit l'impression d'avoir été édifié d'un jet. Ce n'est pas un cône régulier, mais une crête allongée du sud-ouest au nord-est.

A propos de son dixième panorama général, l'auteur dit que probablement toute la vallée de Riobamba est un champ de lave. Cette opinion est confirmée par une coulé récente qui s'y est fait jour et par les cônes de Cuicui, de Lican et de Calpi, situés dans le sud-ouest.

Le Cotacachi (4,966 mètres) et le *maar* Cuicocha (3,404 mètres).

Volcan remarquable par le *maar* Cuicocha qui s'ouvre sur sa pente méridionale; cette association est unique dans l'Ecuador et la Colombie. Le Cotocachi a un profil typique que l'on retrouve, avec des variantes, dans maint volcan écuadorien : un soubassement, aux détails accentués, formés de contreforts (*lomas*) rayonnants autour d'une sorte de plateau qui supporte une pyramide rocheuse sans cratère. Dans une note accompagnant la classification des volcans, M. Stübel remarque que ces pyramides terminales, apparaissant là où on s'attendrait à trouver un gouffre, ne peuvent être un phénomène accidentel. Leur construction dépend de certaines réactions produites au cours de l'éruption puissante qui créa la masse de la montagne. Elles sont évidemment modifiées d'une façon notable par les agents atmosphériques, car ceux-ci ont enlevé les matériaux meubles dont elles étaient autrefois revêtues.

Fig. 3. — Le Cotacachi. *Type de volcan fréquent dans l'Ecuador. Il se compose de deux parties : d'un soubassement, formé de crêtes* (lomas) *qui rayonnent autour d'un plateau, et d'une pyramide terminale. — Hauteur relative, 2,500 mètres environ.*

La montagne est fort entamée par des glissements ou *derrumbos;* ceux du tremblement de terre de 1868 furent particulièrement considérables.

Quant au cratère-lac Cuicocha, son diamètre atteint à peu près 3 kilomètres. Son rempart domine la surface de l'eau d'environ 300 mètres. Deux îlots, hauts de 176 et de 60 mètres, sont au milieu du lac. Probablement que cette cuve n'avait pas, au début, le diamètre actuel; il se peut qu'elle provienne d'une montagne à conduit central de petite section, qui se serait graduellement effondrée et dont le rempart actuel serait le reste. La circonvallation est formée de bancs de tuf avec talus d'éboulement; il n'y a ni bancs de lave ni filons injectés. L'auteur pense que les deux îlots sont constitués par des roches volcaniques. Si cela se vérifiait, ces éruptions auraient leur part dans la formation du Cuicocha et elles nous avertiraient que dans les *maares* les matériaux en fusion peuvent être proches de la surface, même lorsque rien ne décèle leur présence. Ce cratère-lac est vraisemblablement dû à une dernière manifestation d'activité du foyer qui forma le Cotacachi.

Le Cotopaxi (5,943 mètres).

Avec le Tunguragua, le Sangay et le Pichincha, l'un des volcans actifs de l'Ecuador. Il a l'aspect d'un cône imposant, isolé, sans éminences parasites. Toutes les éruptions récentes ont eu lieu par le cratère terminal; elles ont peu d'importance relativement à la masse du volcan. Les coulées ne se laissent pas suivre jusqu'au bord du cratère, la raideur des pentes ayant amené leur déchirement sur une partie du trajet. Les bords de l'ouverture étant peu accidentés, la lave se déversait au-dessus, lors des fortes éruptions, par plusieurs points à la fois. En huit endroits, au moins, on reconnaît les coulées qui tranchent sur la carapace glacée du sommet; elles s'arrêtent déjà à 3,760 et 4,400 mètres d'altitude; plusieurs doivent dater d'une même époque.

Le cratère, allongé dans le sens nord-sud, a un diamètre d'environ 500 mètres; comme il a résisté à la pression des laves, il ne peut être constitué de débris et de scories, mais bien de roche solide. Il est probable que la masse principale du cône est le résultat d'une seule éruption continue, ce qui expliquerait l'intime jonction des bancs de lave et le peu de scories que l'on relève dans les coupes. Le volume des matériaux éjaculés durant les temps historiques est fort minime; il paraît surtout de faible importance lorsqu'on le compare au seul volume de la colonne liquide qui remplit le conduit vertical lors des éruptions. En reportant le foyer volcanique seulement au niveau de la mer, et sans tenir compte du diamètre possible de la cheminée, les matériaux déversés auraient la même importance relative qu'une gouttelette de mercure, grosse comme une tête d'épingle, vis-à-vis de toute la hauteur d'un tube barométrique. On peut donc dire que le Cotopaxi est une construction homogène et achevée, qui ne sert plus qu'à livrer passage aux produits des petites réactions qui se consomment dans son foyer; ensuite, qu'il s'est écoulé un temps immensurable entre la terminaison de cet édifice et l'activité médiatrice qui seule lui reste aujourd'hui.

Les ravages du Cotopaxi durant la période historique furent uniquement amenés par des phénomènes accessoires : fontes des neiges, tremblements de terre, pluies de cendres.

La base du cône repose sur un massif ancien, qui arrive à peu près jusqu'à la limite des neiges et possède un pic, El Picacho, de 5,000 mètres. Au-dessus et excentriquement s'élève le Cotopaxi, de manière à rappeler la disposition du Vésuve et de la Somma. Toute la base de la montagne est couverte de cendres, de tuf et de décombres.

Les bords est et ouest du cratère sont un peu plus bas, et c'est par là que les déversements se sont produits. Sur le versant oriental se trouve un large plan incliné, creusé en quelque sorte par les laves qui se pressaient tumultueusement de ce côté.

Le Pululagua (3,319 mètres).

C'est un vaste cirque, dont le diamètre, mesuré sur la carte, atteint 6 kilomètres. Il est comme enfoncé dans le terrain ancien qui l'entoure. Les hautes parois internes (environ 500 mètres) sont du tuf et des bancs de lave, mais leur base est cachée par des éboulis, dont plusieurs sont récents. La large ouverture de la *caldera*, vers l'ouest, est barrée par un cône isolé, aussi élevé que le rempart; on l'appelle Pondoña. Il est en lave solide et paraît de beaucoup postérieur au cirque. En réalité, le Pondoña se compose de deux cônes intimement associés, entourés jusqu'à mi-hauteur d'un bourrelet en forme de croissant; cependant le tout paraît l'œuvre d'une éruption ininterrompue.

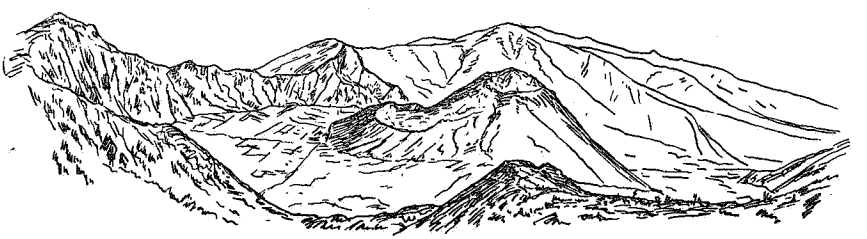


Fig. 4. — Vue d'ensemble de l'hémicycle du Pululagua. *La construction volcanique comprend toute la partie ombrée du croquis, tandis que la partie claire du fond, vers la droite, représente les roches anciennes. Là où la caldera se raccorde à la vallée, s'élève le cône Pondoña, haut de 500 mètres; à la base, il est partiellement entouré d'un rempart peu élevé.*

La crête qui continue le rempart vers l'ouest appartient en réalité à des formations anciennes de diorites, de diabases et de porphyrites, avec lesquelles le Pululagua est en contact direct. Cette partie est reconnaissable sur le croquis ci-dessus, où elle constitue le fond de la vue vers la droite.

Le Rumiñahui (4,757 mètres).

Ce volcan est également constitué par une caldera analogue à celles que l'on trouve fréquemment dans l'Amérique du Sud. La plupart ont une vallée de largeur variable, transformant parfois la cuve en un fer à cheval. Il arrive aussi, comme c'est le cas ici, que la crête de la caldera soit oblique, inclinée vers la brèche où débouche la vallée; cette dernière est alors en face du point le plus élevé de la circonvallation. L'obliquité du rempart ne peut être rapportée à une modification ultérieure, telle que l'écroule-

ment, par exemple. Les rapports tectoniques indiquent, au contraire, que cette disposition date du début de la formation.

Dans bien des cas, les cirques de ce genre sont le théâtre de nouvelles éruptions et les laves s'écoulent alors par la brèche ou la vallée qui lui fait suite; mais cela ne va pas à l'encontre du mode de formation monogène de la montagne elle-même. En effet, la croissance insensible, par éruptions séparées, hors d'un même orifice, amènerait l'accumulation circulaire des matériaux, et la réserve d'une vallée serait impossible.

Dans le Rumiñahui, il n'y a pas eu de réveil des forces éruptives à l'intérieur de la caldera; par contre, ses parois montrent des bancs de lave recoupés par des filons de même matière, ce qui est rare dans les volcans de l'Ecuador.

FIG. 5. — LA CALDERA DU RUMIÑAHUI. *La crête s'incline des deux côtés vers l'avant-plan, où s'ouvre une vallée, vue en raccourci, qui se dirige vers la gauche. — Hauteur relative, 1,800 mètres environ.*

Extérieurement, la montagne est sillonnée par des vallées, ou plutôt des rainures, isolant des côtes radiales, des bourrelets, qui doivent représenter, malgré la végétation dont ils sont couverts, les matériaux fondus dans leur disposition primitive. La circonvallation n'est pas construite par des coulées superposées, mais par une masse homogène, qui a bien une structure en bancs très inclinés par places; seulement on ne peut confondre celle-ci avec les stratifications des volcans à activité discontinue.

L'ensemble ne se laisse concevoir que par la sortie de masses pâteuses, assez mobiles toutefois pour s'étaler sur une certaine surface. Il paraît donc certain que l'établissement de la caldera a été précédé du dégorgement d'une énorme quantité de roche fondue et que la circonvallation représente la partie solidifiée du magma qu'il abandonna en se retirant dans l'intérieur de son conduit. Tout le processus éruptif qui avait eu la construction de la montagne pour suite, prenait fin à ce moment. La caldera n'est donc pas un cratère proprement dit, car il est vraisemblable que les forces éruptives épuisèrent à jamais leur activité par l'édification de la masse de la montagne.

Après ces descriptions détaillées, qui se suivent sur trois cents pages, M. Stübel développe, dans la troisième partie de son livre, quelques considérations géogénétiques. Ce sont ces chapitres, d'un intérêt général, qu'il importe surtout de faire connaître.

Troisième partie.

Différences que présentent les volcans au point de vue génétique.

La forme type des volcans construits par amoncellement progressif et intermittent est le cône; seules, des circonstances particulières, intervenant durant l'édification, amènent des formes aberrantes. Par contre, la forme des volcans construits en une fois jusqu'à leur hauteur actuelle, par l'émission d'énormes masses de matières fondues, est très variée.

En parlant de construction « en une fois », l'auteur ne suppose nullement l'accumulation subite d'une éminence de quelques milliers de mètres; il comprend une éruption pour ainsi dire continue et assez rapide des laves, permettant à la montagne de s'achever avant la solidification complète de l'amas, en sorte que tout conserve encore une certaine mobilité.

Semblable émission peut avoir duré des siècles, comme il a probablement aussi fallu des siècles pour amener le refroidissement complet de la masse. Néanmoins, on peut considérer cette dernière comme étant le résultat d'une seule éruption. Deux modes sont concevables : un amoncellement par coulées superposées; ou un gonflement du magma, pressé avec force, avec des déformations et des déchirures dans l'enveloppe déjà consolidée, qui se régénérerait sans cesse. Les deux modes peuvent avoir alterné de différentes façons dans un même volcan. Les moments principaux pour l'aspect final de la montagne sont: la quantité de magma et son degré de fluidité; la nature de l'orifice du conduit et du canal menant au cratère; enfin la configuration du sol auquel le conduit vient aboutir.

Des volcans de ce genre, sans modification ultérieure par un retour des agents éruptifs, reçoivent le nom de *monogènes*, par opposition aux volcans *polygènes* qui désignent les édifices éruptifs élevés successivement et avec des intermittences. Cette opposition se justifie surtout lorsque

la partie monogène du volcan est petite et se trouve complètement enfouie sous les matériaux des éruptions postérieures; les deux espèces de constructions peuvent donc se combiner.

Les volcans monogènes sont susceptibles, de par le genre de formation qu'on leur a prêté, d'une grande multiplicité d'aspects, qui s'explique encore par les mouvements, les glissements partiels, ou étendus, que toute la masse subit avant le refroidissement complet. En outre, des tassements, amenés soit par contraction, soit par la rentrée des matières internes fluides dans le canal d'émission, se produiront fréquemment. Ainsi naissent probablement bien des vallées débouchant dans les cratères et les calderas. (Voir ce qui est dit pour le Rumiñahui.)

Dans ces passages, l'auteur fait allusion au gonflement, silencieux au début, des laves lors de l'éruption de Santorin, auquel on peut ajouter les intumescences pâteuses d'autres éruptions sous-marines, ainsi que celle de Methana rappelée par Fouqué (1). M. Stübel note aussi que, lorsque ces formations insulaires sont accompagnées de véritables manifestations explosives, produisant même de petits cratères, ces phénomènes sont de courte durée, attendu qu'ils ne sont liés qu'au processus du refroidissement de l'amas émis à la surface.

Les volcans monogènes peuvent montrer des stratifications, des superpositions de coulées, de débris, de scories et des filons de lave. Ces derniers ne sont même concevables que dans une masse encore chaude, mobile, s'injectant de matériaux provenant de l'intérieur, resté fluide.

Il est probable que tous les volcans, même ceux à paroxysmes intermittents, ont un noyau monogène, et si l'auteur a admis semblable origine pour la plupart des volcans de l'Ecuador, c'est que leurs parties constitutives essentielles, telles que les contreforts rayonnants par exemple, ne sont pas explicables par une accumulation de coulées, ni par une érosion consécutive. Dans certains cas, l'érosion a, il est vrai, amené de tels ravages qu'on peut être indécis sur le volume à accorder à ce qui est enlevé par rapport à ce qui est resté. L'île Saô Vicente du cap Vert est un exemple à citer à ce sujet. Mais, dans l'Ecuador, il faudrait souvent admettre l'ablation de la moitié de la montagne, ce qui est incompatible avec les observations.

Le cratère peut exister, ou manquer, dans les volcans monogènes. De toute manière, il n'est qu'un accessoire sans importance relativement à l'éruption, dont il caractérise seulement les dernières phases.

(1) *Les anciens volcans de la Grèce.* (Revue des Deux-Mondes, 1867, p. 479.)

Les volcans monogènes se distinguent aussi des autres volcans parce que, une fois éteints, ils n'entrent plus en activité. Les forces éruptives réussissent plus facilement à s'ouvrir une nouvelle issue, qu'à utiliser l'ancienne cheminée. C'est ainsi que le Chimborazo, sans cratère, est accompagné au nord-est par le Carihuairazo, moins élevé, muni d'un vaste cratère, qui n'a jamais servi à des projections après l'extinction du volcan. Ce deuxième volcan est suivi du Puñalica, un cône éruptif de moindre hauteur encore, qui, lui aussi, n'a pas eu de réveil après son achèvement.

A première vue, la variabilité des matériaux volcaniques semble mal s'accorder avec les déductions précédentes. Il y a lieu de considérer que, même dans un foyer assez circonscrit, le magma peut avoir des compositions variables en différents points de sa masse; de plus, le mode de refroidissement, ne se faisant pas de la même manière dans les diverses parties de l'amas, contribuera également à modifier l'aspect final des roches. De là les nombreux passages entre les andésites et les dacites.

L'ensemble des observations de l'auteur le conduit à fixer cinq points capitaux :

1° La région étudiée est couverte d'un grand nombre de volcans serrés sur un espace restreint ;

2° Ces montagnes sont surtout composées de coulées;

3° Toutes sont des volcans monogènes, au moins au centre; cela est même vrai pour ceux qui sont encore actifs : le Cotopaxi, le Tunguragua, le Sangay;

4° Tous ces volcans sont éteints ou, comme les trois précédents, en voie d'extinction;

5° Pour autant qu'on en puisse encore juger, tous ont une grande analogie structurale.

Ces constatations ont pour conséquence les conclusions parallèles qui suivent :

ad 1. Le foyer volcanique doit être à peu de profondeur.

ad 2. Le but de l'éruption est le simple déversement de matériaux fondus.

ad 3. La formation de chaque montagne est le produit d'une quantité déterminée de magma.

ad 4. Le foyer était épuisable, ou, du moins, il marche vers un épuisement complet.

ad 5. Les matériaux de toutes ces montagnes émanent d'un seul foyer et ont été principalement épanchés vers une même époque.

On peut donc dire que la force volcanique, quelles que soient ses manifestations, est produite par la marche du refroidissement des masses ignées, enfermées dans un espace clos. Ce processus se ramène surtout à des changements de volume et probablement à une dilatation plus ou moins soudaine. Ces masses sont donc elles-mêmes les productrices de la force volcanique.

La comparaison entre le volcanisme ancien et le volcanisme moderne montre sa décroissance. Nous n'assistons plus à la naissance d'un Chimborazo ou d'une île de la grandeur de celles qui se trouvent dans les vastes océans. Cela nous frapperait moins si nous devions nous représenter les plus grandes de ces constructions comme résultant de la totalisation d'une série de petites éruptions distantes.

La nécessité où nous nous trouvons d'attribuer précisément aux plus colossales constructions volcaniques une origine monogène, nous permet d'apprécier sainement l'affaiblissement des forces internes, que l'on constate sur tout le globe.

Examen comparatif de deux autres régions volcaniques : le Jorullo et le Diret et-Touloûl avec le Haourân. (Voir pl. IV.)

Par les considérations précédentes, on se voit conduit à attribuer le volcanisme à la matière éjaculée elle-même, et l'on a l'impression que ces matières arrivèrent au jour parce que l'espace qui les contenait leur était subitement devenu trop étroit ; puis, qu'une fois l'équilibre rétabli, le repos temporaire perdurait jusqu'au moment où un nouveau trouble amenait la formation d'une autre accumulation montagneuse.

Avant d'examiner les conséquences découlant de là, il y a lieu de voir s'il existe, fût-ce à une échelle réduite, des éminences volcaniques dont nous puissions attribuer avec certitude la formation à des foyers *superficiels,* sans communication avec les réservoirs internes.

Les *boccas*, les *hornitos*, qui s'élèvent sur tant de coulées de lave et qui atteignent des dizaines de mètres de haut, peuvent être cités à l'appui de cette manière de voir.

L'éruption du Jorullo (Mexique), en 1759, illustre encore mieux la théorie qu'il s'agit d'établir. La classique description de Humboldt nous dit que les laves créèrent un plateau d'environ 3 kilomètres de diamètre, aux bords arrêtés, couvert de plusieurs centaines de petits cônes, témoignant de l'intensité des réactions provoquées par le refroidissement de cette masse. Ce champ de lave a reçu le nom de *malpays*.

Si toutes les coulées ne montrent pas de semblables excroissances, il faut en chercher la raison dans leur fluidité variable, ainsi que dans le degré d'individualisation de leurs éléments constitutifs. D'ailleurs, les déchirements que subissent ces matières pendant leur progression, facilitent les mouvements de dilatation, ainsi que l'échappement des gaz.

Comme pendant au Jorullo, quoique n'appartenant pas aux temps historiques, M. Stübel considère le Dîret et-Touloûl, en Syrie. C'est un plateau de laves, un *malpays*, qui s'élève à une centaine de mètres au-dessus du sol désertique environnant. Sa longueur est d'à peu près 60 kilomètres, sa largeur d'environ 35. Près de cent cônes, de hauteur variable et d'aspect différent, sont disséminés sur cette surface, tantôt par groupes, tantôt isolés. Les plus élevés, le Tell ed-Dekwa et le Djebel el-Akir, ont au delà de 200 mètres; beaucoup d'autres se rapprochent de ces dimensions.

La majeure partie de ces laves appartiennent sans doute à un même épanchement, issu probablement d'un nombre restreint de conduits; car on ne peut admettre qu'il y en ait autant que de cônes, d'autant plus que certains d'entre eux sont tout au bord du plateau. Il ne reste donc qu'une possibilité, c'est que ces éminences soient le produit du refroidissement des diverses parties de la nappe ignée.

Lorsqu'on parcourt le Dîret et-Touloûl, on remarque bientôt que la partie méridionale est la plus récente; l'ancien plateau y est recouvert d'épanchements nouveaux. L'auteur distingue les deux centres de Touloûl ed-Dours et de Touloûl er-Roghele, qui constituent des groupes de cônes comparables au Jorullo.

Un troisième centre, le Touloûl es-Safah, suit les précédents dans le sud, mais ne paraît plus avoir le plateau pour base. Le Safah a la forme d'un dôme aplati, de 15 à 20 kilomètres de diamètre et de 500 mètres de haut, couronné, suivant Wetzstein, d'une douzaine de petits cônes et de dix-huit enfoncements cratériformes. On doit le considérer comme résultant d'une seule éruption, peu ancienne, étant donné l'aspect frais des laves. Celles-ci constituent toute la montagne, et les *hornitos* qui la surmontent font corps avec la masse dont ils sont issus. Vers le nord, un édifice plus considérable, Abou Ghanim, est peut-être un point éruptif spécial, marquant les dernières phases du refroidissement.

Si une nouvelle éruption devait se produire, il est à supposer qu'elle s'ouvrirait une autre voie, ainsi que cela a eu lieu dans les environs, par exemple à Tell el-Karin dans l'est et à Tell el-Makhoul dans le nord.

L'étude de ces champs de laves, anciens ou modernes, met en discussion le rôle d'intermédiaire, attribué à la « montagne volcanique » dans les manifestations éruptives; ces dernières n'ont d'autre but que d'éloigner et d'émettre des matériaux fondus venant des profondeurs, et il dépendra des dispositions topographiques, ainsi que de la fluidité relative du magma, que l'épanchement forme un plateau ou une montagne. Peut-être pourra-t-on démontrer un jour que la fluidité des masses internes a changé dans le temps, aussi bien pour une région donnée que pour chaque volcan monogène en particulier. Le plus souvent, il y a lieu d'admettre que la mobilité était surtout considérable au début de la phase éruptive.

Des renseignements intéressants ont été aussi fournis à l'auteur par l'examen du Haourân, qui se trouve près du Dîret et-Touloûl. Ici encore on a l'impression d'une construction unique. Cet amas volcanique, constitué de coulées qui se superposent sur de faibles pentes, a 80 kilomètres de long sur environ 45 de large. Le sommet maximum, Tell ed-Djena, est à 1,802 mètres d'altitude, soit 1,000 mètres au-dessus du désert pierreux de l'est (El Harra), et à 1,200 mètres au-dessus des plaines fertiles de l'ouest (en Noukra).

Le Haourân semble surtout édifié d'une pièce à cause de sa hauteur constante et de l'absence d'élévations éruptives proportionnées à l'étendue des masses éjaculées. Les cônes qu'on y trouve sont, à l'égal de ce que l'on a vu pour le Dîret et-Touloûl, des amas datant sans doute de la période d'extinction de cette vaste accumulation de laves. Certains d'entre eux n'ont que quelques centaines de mètres, par exemple le Tell Salchad, dont le cratère abrite un vieux castel, et le Tell Abmar, qui supporte les restes d'un couvent.

Le Djebel el-Kouleb a plus du double des précédents; il contribue beaucoup à donner un aspect volcanique au paysage. Ce cône est sans cratère et se compose surtout de scories soudées entre elles; une coulée part du flanc sud-est, vers 1,500 mètres d'altitude, pour s'étaler sur une longueur de 5 kilomètres et une largeur de 1 à 2 kilomètres.

Des émissions de matériaux fondus eurent lieu aussi en d'autres endroits qui ne sont marqués ni par des cratères, ni par une modification quelconque du sol. C'est ainsi que la coulée el-Leddjah sortit près du lieu appelé Schouhba, au bord du massif, à une altitude de 1,140 mètres, et celle de el-Habis émane des environs du village Douma, à 1,180 mètres. Les pentes sont très faibles, en sorte que la différence d'altitude pour la première coulée, qui s'étend à 30 kilomètres, n'est que de 600 mètres.

Les bords (Lohf) de ces champs de laves sont abrupts, avec une hauteur de 10 à 40 mètres.

Il y a lieu d'insister sur la grande fluidité du magma déversé ainsi immédiatement sur le sol du désert; non seulement il couvrit environ 700 kilomètres carrés, mais il a pu, en certains endroits, s'allonger en bras étroits et peu épais (notamment dans la coulée du Tell ed-Dours citée plus haut).

Des émissions analogues ont eu lieu dans d'autres parties de la Syrie septentrionale. Près de Medjdel esch-Schem, au pied sud-est du Grand-Hermon, la lave est sortie directement des couches crétacées et sans formation de cratère, coulant, sur une largeur de plusieurs kilomètres, jusqu'à 40 kilomètres de là, vers Damas.

Intéressants encore sont les débris fondus qui couvrent certains points de la Harra, partie du désert située vers l'est. Ils ne sont pas superposés, mais placés les uns à côté des autres sur le sable, de sorte que l'aspect de l'ensemble rappelle le craquelé de la porcelaine de Chine, suivant une comparaison d'Oppenheim. L'épaisseur de ces blocs de lave bulleuse varie entre quelques décimètres et plus d'un demi-mètre; il est à supposer qu'ils ont constitué autrefois une nappe continue d'épaisseur variable et très faible. Certains petits espaces, appelés Kà, où ces pierres manquent, s'expliqueraient par des réserves que la lave aurait contournées. Si cette interprétation se vérifie, il faudra admettre une mobilité exceptionnelle de la lave, car elle a dû arriver d'assez loin, pour qu'on lui donne pour lieu d'origine le Haourân, ou le Touloûl es-Safah.

Quoi qu'il en soit, les observations recueillies dans la région volcanique de la Syrie appuient la proposition de l'auteur dans laquelle il admet que toute activité éruptive n'a d'autre but que l'expulsion de matériaux fondus.

Phénomènes qui accompagnent le refroidissement des masses fondues naturelles et artificielles.

L'existence de foyers isolés est confirmée par l'étude de plusieurs régions volcaniques dont on vient de lire la description. En outre, la nécessité de reporter la force éruptive dans ces foyers mêmes est apparue, et l'on a compris que le but de l'éruption est simplement de rejeter un excès de matières ignées. Cherchons maintenant à nous renseigner sur les causes du phénomène.

Il est hors de doute que des gaz et des vapeurs ont une part

importante dans les manifestations volcaniques; mais il y a lieu de se demander s'ils en sont la véritable cause, ou s'ils les accompagnent seulement.

Le conduit aboutissant au volcan traverse des terrains facilement accessibles aux eaux atmosphériques; cet élément joue donc un rôle prépondérant dans les puissantes émissions de vapeur et dans les explosions qui se produisent dans les cratères. On peut même dire que, dans les éruptions, nous sommes surtout impressionnés par les épisodes dérivant d'influences extérieures. Par contre, les grandes émissions laviques des volcans hawaiiens sont tranquilles.

Il ne faut pas s'exagérer l'importance des conclusions tirées de l'étude des gaz recueillis à la surface des volcans actifs, attendu qu'il est souvent impossible de déterminer leur origine avec certitude.

Les masses éruptives contiennent des gaz amenés des profondeurs; elles leur doivent la structure bulleuse qui leur est propre. Les magmas ressemblent sans doute aux produits industriels susceptibles d'absorber les gaz et de les dégager par rochage. L'occlusion des gaz expliquerait aussi la grande mobilité des laves.

L'auteur pense que toutes les hypothèses mises en avant pour expliquer les éruptions sont des échappatoires : la contraction de l'écorce, l'intrusion de l'eau de mer, et autres. Elles sont impuissantes à rendre compte de la périodicité et de l'épuisement local des forces volcaniques. Même en s'adressant à l'action mécanique des gaz, le problème reste sans solution satisfaisante; leur force motrice, tout en augmentant la mobilité de la matière, ne saurait s'accroître jusqu'à briser l'enveloppe terrestre. Leur compressibilité, leur condensation, et l'énorme pression qui pèse sur toute la masse, leur interdit semblable rôle. La puissance éruptive doit donc être dans le magma lui-même; elle doit consister en une modification de volume, et celle-ci ne peut être qu'une augmentation.

L'auteur rappelle sommairement que plusieurs corps se dilatent au moment de la solidification et flottent sur leur propre substance à l'état fondu; par exemple : la glace, l'alliage de Rose, le bismuth, etc. Pour le fer, qui surnage également, Wrighton a suivi les variations de densité, et il a trouvé :

Fer solide	6.95
— plastique	6.50
— liquide.	6.88

donc, en passant de l'état solide à l'état plastique, il y avait une dilata-

tion de 6.92 %, suivie d'une rapide contraction au moment où le métal se liquéfiait (1).

Parfois l'importance du changement de volume semble dépendre de la rapidité du refroidissement (2). Finalement, notons que la lave solide flotte sur la lave liquide, ainsi que cela a été constaté plusieurs fois, et dans de vastes proportions, au Kilauea.

Ces particularités se retrouvent dans les laitiers des hauts fourneaux; M. Stübel les a observées aux fonderies de Kladno (Bohême). Le laitier liquide, reçu dans des wagonnets de près de deux mètres cubes de capacité, se couvre assez rapidement d'une croûte. Si l'on perce celle-ci au moment opportun, l'ouverture livre passage à un jet de matière fondue, haut de deux à trois mètres, qui fournit la preuve de l'existence d'une tension considérable à l'intérieur de la masse. Il est évident que l'on ne peut rapporter cet effet à la force contractionnelle de la croûte encore mince, ni les attribuer à l'échappement des gaz. Les laitiers se recouvrent aussi de petits cônes éruptifs, qui se construisent lors des premiers stades du refroidissement; ils émettent, outre des gaz, des coulées minuscules.

Tous ces faits viennent appuyer la supposition d'un accroissement de volume et se rattachent aux constatations que l'on peut suivre dans la nature à une échelle infiniment plus considérable.

La dilatation des magmas ne produit pas seulement des effets passagers, elle laisse aussi des témoins durables de son intervention sous la forme d'éminences volcaniques. Celles-ci disent au géologue qu'elles constituent l'excédent de matière expulsé du foyer éruptif lorsque se produisirent les changements d'état qui viennent d'être mentionnés.

La lave se comporte donc comme l'eau. En admettant le même coefficient de dilatation pour les deux substances, abstraction faite de l'intervention des gaz, on arriverait déjà à des effets considérables. Un foyer d'une capacité d'un kilomètre cube fournirait la matière nécessaire à l'édification d'un cône de 274 mètres de hauteur, soit le double de l'élévation du Monte Nuovo, près de Naples.

Les montagnes annulaires de la Lune ont aussi pour origine vraisemblable le gonflement de roches fondues, suivi de leur retrait, qui abandonna une vaste dépression cratériforme entourée d'un rebord scoriacé. L'auteur trouve une confirmation de cette hypothèse dans la

(1) Pour d'autres exemples, voir : TOEPLER, *Bestimmung der Volumveränderung beim Schmelzen für eine Anzahl von Elementen.* (ANN. PHYS. ET CHIM., t. LIII, 1894.)

(2) REYER, *Theoretische Geologie*, p. 258.

construction de maints cirques de notre satellite, constitués par des bourrelets concentriques extérieurs, marquant, selon lui, les poussées successives des laves. Les terrasses internes correspondraient, au contraire, à des retraits du magma. Les éruptions lunaires pourraient être comparées au boursouflement et au débordement d'un liquide très chargé de gaz, tandis que le vide cratériforme donnerait une mesure de la quantité de ceux-ci. Pour autant qu'on en puisse juger, les éruptions terrestres actuelles sont entrées dans une phase où les émissions sont relativement pauvres en gaz occlus.

Revenant aux généralités, l'auteur estime que les foyers circonscrits ne sont pas soumis dans tous les points à la fois aux modifications moléculaires entraînant une augmentation de volume. De là une certaine périodicité dans le réveil des forces éruptives.

De par leur nature même, les modifications de volume des magmas restent identiques, qu'elles soient localisées dans une partie d'une coulée de lave ou qu'elles intéressent un globe tout entier; par contre, leur intensité varie avec la quantité de matière dont l'état change. On en arrive ainsi à rechercher ce qui a pu se passer lorsque la Terre en était aux premiers temps de sa solidification.

La phase la plus importante de l'évolution de la Terre au point de vue de sa configuration superficielle.

Nous ne savons que peu de chose de la structure de l'écorce terrestre, mais les hypothèses abondent. Le but de l'auteur n'est pas d'en allonger la liste : il a simplement voulu s'aider des remarques développées dans les pages précédentes pour se représenter l'évolution du Globe entre le moment de la formation de l'écorce première et l'apparition de la vie.

Avec les progrès du refroidissement, l'enveloppe solide a dû opposer une résistance croissante aux changements de volume et aux émissions du noyau interne. L'écorce fut rompue en nombre d'endroits, et l'équilibre ne put se rétablir que par l'épanchement de matériaux ignés s'étalant sur des milliers de kilomètres carrés. Ces déversements se sont répétés partout, en sorte que l'ensemble de la sphère a fini par se recouvrir de masses éruptives nouvelles. Ce revêtement, que l'on peut désigner sous le nom de *cuirasse*, a retardé le refroidissement du noyau. Son épaisseur serait difficile à chiffrer.

Si des volcans se sont formés à ce stade de développement, qui correspond peut-être à celui des étoiles variables, ils ressemblaient fort

peu aux montagnes que nous étudions aujourd'hui. L'extension horizontale des masses émises dominait; s'il y avait des cratères, ils devaient avoir une dimension considérable par rapport à leur rempart, ainsi qu'on le voit sur la Lune.

Certaines anomalies géodésiques et pendulaires sont vraisemblablement à rapporter à la disposition de la cuirasse éruptive.

C'est donc à ce revêtement primitif, et non à l'écorce due au refroidissement, que les agents géologiques et météorologiques empruntèrent les éléments de l'ensemble des roches sédimentaires ; à ce titre, elles sont toutes d'origine éruptive.

Jusqu'ici, on n'a considéré que les suites du refroidissement des régions internes du Globe. Il est évident que des réactions analogues se poursuivaient dans les amas considérables épanchés au-dessus de l'écorce et qui devenaient par ce fait, à leur tour, de véritables foyers éruptifs. On les appellera *foyers périphériques* par opposition au *foyer central*.

Ces foyers périphériques, auxquels on supposera une grande extension, ainsi qu'un volume énorme, étaient préservés d'une solidification complète par la faible conductibilité de leur enveloppe. Comme ils étaient encore alimentés par le foyer central, la force volcanique s'y est conservée durant un temps immense, peut-être jusqu'à nos jours.

A leur tour, ces foyers périphériques donnèrent lieu à des éruptions dont la puissance atteignait, selon toute apparence, celle du foyer central lui-même, d'où l'auteur déduit la formation de foyers périphériques de deuxième et troisième ordre, fournissant des constructions volcaniques d'importance décroissante. Ces centres secondaires ne peuvent plus être en relation avec le foyer central que d'une façon médiate, en sorte que leur isolement est concevable. Lorsque cette éventualité se produit, l'activité dernière se manifeste par l'émission de matériaux inertes, scories ou tufs ; les laves n'arrivent plus au jour. Finalement, toute communication avec un réservoir plus profond cesse et le foyer périphérique local s'éteint définitivement.

Les groupes de volcans, tels que ceux de l'Ecuador ou de la Syrie, sont rattachés par M. Stübel à de semblables amas périphériques, dont l'étendue et le contour seraient donc plus ou moins déterminables. Il reste cependant à établir si les diverses éminences que l'on trouve dans ces régions appartiennent à des réservoirs d'âge et de profondeur différents, ou si elles proviennent de périodes d'activité temporaire qui se succédaient dans un même foyer.

On entrevoit le temps immensurable nécessaire à l'établissement des foyers périphériques des divers ordres, en considérant qu'ils sont sou-

vent séparés par de puissants dépôts sédimentaires, atteignant des milliers de mètres, qui les soustraient à nos investigations.

Demandons-nous maintenant à quel stade de refroidissement se trouvait le Globe terrestre, lorsque les agents atmosphériques entreprirent la destruction de sa surface.

La suppression rationnelle est que cette intervention n'a pu se produire qu'au moment où la puissante cuirasse éruptive, ses foyers périphériques et leurs volcans, constituaient un sol suffisamment refroidi, quoique bouleversé encore par de vastes éruptions.

Mais la résistance de l'ensemble de l'enveloppe du Globe ne pouvait croître sans provoquer, dans le foyer central, une accumulation d'énergie qui devait se traduire, à un moment donné, par une recrudescence éruptive, dont la puissance dépassait les cataclysmes précédents et dont l'intensité ne fut plus atteinte dans la suite. Cette phase, que l'auteur suppose intervenir dans l'évolution de tous les globes, marque un moment critique dans l'histoire de ceux-ci, en ce sens que l'accroissement constant de leur écorce ne permettra plus aux agents éruptifs de dominer dans la suite, ni de dépasser ce point culminant de leur règne.

Cette période a reçu la dénomination significative de *catastrophe*.

M. Stübel ne tranche pas la question de savoir si la Terre a déjà dépassé ce point critique, les études sur les volcans et les diverses régions du Globe étant par trop incomplètes encore pour se prononcer définitivement. Il pense cependant que semblable travail confirmerait non seulement la fluidité ignée du noyau central, mais aussi la décroissance des phénomènes éruptifs, pour lesquels la période cataclysmique semble passée.

Nous pouvons entrevoir ce qui se passait alors, en considérant certains champs de lave, tels que ceux de Colombia (État-Unis), qui couvrent une étendue plus considérable que l'Allemagne, sur des épaisseurs de mille à quinze cents mètres (Russel). Or, si de semblables quantités de matériaux ont pu s'épancher à une époque aussi proche de nous, combien plus considérables n'ont pas dû être les émissions durant les premières périodes du refroidissement, lors de la marche ascendante du volcanisme?

Par le fait qu'on admet que la Terre a dépassé le moment des réactions tumultueuses, on suppose que l'écorce s'est consolidée sur une épaisseur telle qu'il est impossible de rattacher les mouvements orogéniques et autres, les plissements montagneux, les fractures, à une intervention du noyau central.

M. Stübel met aussi en doute la validité des déductions tirées des mesures géothermiques. Il se confirme de plus en plus qu'elles sont influencées par des causes locales, en sorte que les évaluations sur l'épaisseur de l'enveloppe solide du Globe, qu'on en tire, sont beaucoup trop minimes.

On risque de mal se représenter le mode de formation des roches et leur rôle dans la constitution de la surface actuelle de la Terre, en prêtant une trop faible durée au temps qui s'écoula entre la solidification de la croûte première et l'époque à laquelle les forces volcaniques régnaient exclusivement sur le Globe. Pourtant, cette période, quoique de durée immense, n'est qu'une fraction de celle qui suivit, pendant laquelle les agents atmosphériques commencèrent à s'attaquer aux matériaux de la *cuirasse* éruptive, pour les transformer en sédiments. Cette préparation a débuté dans des conditions particulières, incompatibles avec l'existence d'êtres vivants, de sorte que des amas métamorphiques, participant tantôt des roches éruptives, tantôt des roches neptuniennes, prirent d'abord naissance.

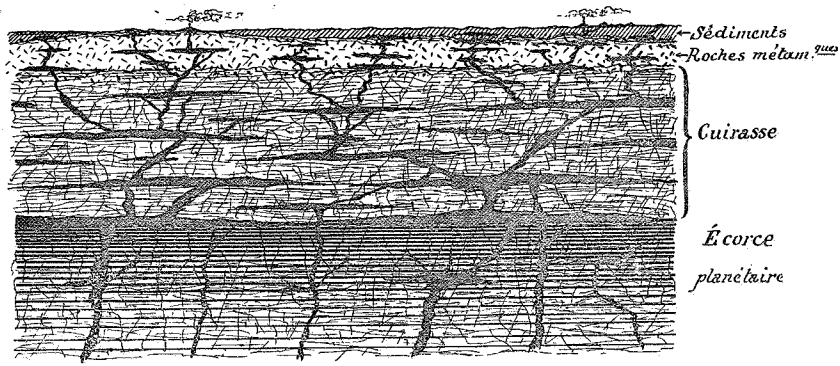


FIG. 6. — COUPE D'UNE PARTIE DE L'ÉCORCE TERRESTRE SUIVANT LES VUES DE M. STÜBEL. *En bas, enveloppe planétaire de premier refroidissement. Au-dessus, la cuirasse éruptive et ses foyers périphériques de premier ordre. La cuirasse, encore chaude, s'est recouverte de roches métamorphiques et cristallines dues à l'intervention de de l'eau. Enfin, cette dernière a donné naissance aux couches fossilifères recouvrant le tout. Les foyers périphériques de dernier ordre se sont constitués jusque dans les sédiments et nos volcans actuels sont alimentés par eux.*

La lutte entre les deux éléments ennemis s'est continuée dans un incalculable passé, se terminant par le triomphe de l'eau, qui déposa alors insensiblement les couches sédimentaires proprement dites, contenant des fossiles.

Quant à l'origine et à la constitution des canaux de communication entre les parties internes et superficielles de l'écorce, il ne peut en être question que d'une façon très générale. Au commencement, lorsque l'épaisseur de l'enveloppe du Globe se mesurait par fractions de kilomètres, des milliers de conduits la traversaient de part en part. Beaucoup d'entre eux disparurent avec le progrès de la solidification; d'autres persistèrent en s'élargissant, pour pouvoir encore livrer passage aux masses qui se pressaient vers l'extérieur. En outre, ils se sont coudés, ramifiés et renflés en réservoirs parfois considérables. Dans de semblables réservoirs s'élaborent sans doute des cendres et des lapilli, car ces produits ne sont pas seulement le résultat des projections du magma; ils proviennent aussi de roches plus ou moins solides, soumises pendant longtemps à de hautes températures, insuffisantes pour les refondre, assez élevées cependant pour les désagréger.

La largeur des canaux éruptifs atteint peut-être plusieurs kilomètres par places; mais comme ils sont ordinairement revêtus de masses éruptives anciennes, le conduit resté libre n'a qu'une fraction du diamètre primitif. L'auteur en conclut que les matériaux qui constituent nombre de montagnes volcaniques appartiennent à des éruptions successives d'un même foyer, amenant au jour des mélanges de magma nouveau et de magma ancien refondu.

La forme des édifices volcaniques dépend en grande partie de la facilité avec laquelle les laves se meuvent dans les conduits. Lorsqu'elles circulent librement et peuvent se retirer avec rapidité, elles établissent des remparts relativement bas, avec cratère considérable, comme en ont les volcans de la Lune. L'uniformité des cirques lunaires indique moins une relation avec des foyers isolés qu'avec des forces émanant de l'ensemble du foyer central, alors que le satellite traversait une période particulière de son évolution.

Après avoir rappelé la disproportion considérable entre les volcans de la Lune et ceux de la Terre, M. Stübel répète que les cirques du satellite sont construits par des déversements monogènes, suivis de la rentrée partielle de la matière encore fluide au centre, ainsi que cela a été dit au paragraphe précédent. A ce moment, un lac de lave remplissait l'intérieur du cirque et y constituait un foyer périphérique dont les phénomènes de refroidissement s'accusaient par des éruptions secondaires, créant des cônes et des bouches parasites qui s'établirent de tous côtés sur la construction principale. Le retrait de la matière fluide au milieu des cirques est encore indiqué par la situation de leur plancher au-dessous du niveau environnant extérieur et par la concavité générale de leur surface interne.

La configuration des cratères terrestres a été également influencée par la rentrée des laves; la supposition s'applique surtout aux montagnes à caldera. C'est l'étude de celles-ci qui a amené l'auteur, il y a vingt ans, aux théories qu'il publie aujourd'hui. A ce titre, nous accorderons une place à la description sommaire de deux de ces centres éruptifs, Madère et Ténériffe. Accessoirement, il sera aussi question de l'Etna.

L'île de Madère est une masse montueuse de plus de 1,800 mètres de hauteur et de 60 kilomètres de longueur sur 20 de largeur, formée surtout de deux volcans, qui furent apparemment actifs à la fois. Le plus élevé embrasse les deux tiers de l'île; il contient une vaste caldera de 4 $^1/_2$ kilomètres de diamètre et de 1,200 mètres de profondeur, appelée Corral das Freiras. Cette cavité communique avec la mer par une large vallée, dont la pente est de 600 mètres sur 11 kilomètres et qui se transforme en une gorge profonde vers la côte.

Le deuxième volcan est moins important, quoiqu'il ne soit guère que de 300 mètres plus bas. C'est un dôme, surmonté d'un plateau de 3 kilomètres de diamètre, désigné sous le nom de Paul da Serra.

Les matériaux des deux montagnes se touchent et même se mêlent. La limite entre elles est cependant marquée par deux vallées ouvertes, l'une vers le nord (Saõ Vicente), l'autre vers le sud (Rivera Brava). Comme elles s'élargissent en amont, leurs bassins ne sont séparés que par une mince crête reliant le Paul da Serra au bord ouest du Corral da Freiras. Il importe de remarquer que ces deux vallées, malgré leurs épanouissements caldériformes, n'ont rien de commun avec des dépressions volcaniques.

L'île possède encore quelques centres éruptifs secondaires, entre autres le Peña d'Agia.

Les petits cratères adventifs éparpillés sur le massif volcanique aujourd'hui éteint, montrent, par leur relation avec leur support, qu'ils émanent de réactions dont le siège était dans la masse montagneuse elle-même et non dans les profondeurs de l'écorce.

Les pentes que l'on observe à Madère offrent les mêmes particularités que celles des montagnes écuadoriennes, c'est-à-dire que les côtes radiales dont ces volcans sont formés, ont de plus faibles inclinaisons près du sommet qu'à la base.

Ténériffe est intéressant parce qu'on y voit une reproduction grandiose de ces associations d'une montagne à caldera et d'un cône éruptif, dont le Vésuve avec la Somma est le type classique.

La base de l'île est constituée par une construction monogène de 40 kilomètres de diamètre et de 2,700 mètres de hauteur au dessus de la surface marine. Le diamètre de la caldera est d'une quinzaine de kilomètres; elle se distingue de celle de Madère, qui est restée vide, par un

remplissage de matières éruptives, sur lequel s'est ensuite élevé le pic de Teyde, un cône de 1,700 mètres de hauteur.

Si des restes du rempart de la caldera nous sont conservés, c'est grâce à la hauteur plus considérable d'une partie de celui-ci (hémicycle des Cañadas). Le magma fondu ne pouvait monter, dans l'immense chaudière, que jusqu'aux deux échancrures voisines (Taora et Icod), dont les bords sont à 1,800 mètres, pour se déverser ensuite vers la mer.

Il ne faut pas perdre de vue que la caldera n'est que le couronnement d'un immense amas éruptif sous-marin de première formation. A une seconde époque commença le remplissage de la grande cuve et l'édification du Pic de Teyde qui marquait la phase dernière de l'activité interne.

Les cônes accessoires abondent sur ces deux constructions. Il faut chercher leur origine dans les réactions des parties centrales de la masse montagneuse elle-même ; une partie des matériaux du Pic de Teyde ne vient probablement aussi que de là.

L'Etna est encore une montagne à caldera, dont la partie monogène comprend le Val del Bove. Un cône polygène lui est associé ; seulement, il ne s'élève pas sur le fond de la caldera, mais plutôt sur sa crête. Les cratères parasites sont au nombre de plus de deux cents. Il serait difficile de les rapporter à autant de canaux alimentés par un foyer très profond. Leur activité éphémère, qui ne se manifeste que par des émissions bientôt taries, ne peut dépendre que de foyers limités, localisés dans la montagne. La formation de ces cônes est actuellement moins fréquente que durant la période où l'amas monogène subissait les changements de volume qui accompagnaient son refroidissement.

Le cirque lunaire qui servit de base aux déductions exposées plus haut, est Ptolémée, dont la masse est évaluée à 50,000 kilomètres cubes au minimum. L'écorce lunaire devait, dès lors, avoir une résistance considérable pour supporter semblable charge, d'autant plus que les constructions de pareille importance sont fort abondantes sur le satellite.

L'analogie planétaire entre la Lune et la Terre permet de supposer que notre Globe a traversé, lors de la *catastrophe*, une période analogue de volcanicité, mais à une échelle plus considérable encore, le volume de la Terre étant quarante-neuf fois celui de la Lune. Ainsi se sera établie la *cuirasse*, aujourd'hui enfouie, à des milliers de mètres de profondeur, sous les roches dont elle a fourni les éléments et auxquelles nous sommes habitués à donner l'importance de premières assises de l'écorce. L'illusion s'explique par la composition de ces roches, constituées de minéraux éruptifs, et par l'imposant spectacle des volcans en activité qui ne nous paraissent attribuables qu'aux forces encore juvéniles de la planète. Ici l'auteur rappelle fort à propos les faibles

dimensions relatives des plus hautes montagnes et la petitesse des entailles que les travaux d'art parviennent à creuser dans l'enveloppe du Globe. Les profils de Lingg (1), mettent ces proportions en évidence de manière bien instructive; ils sont à consulter au sujet de ces considérations.

Les théories de M. Stübel ne reprennent pas simplement, comme on voit, la supposition des foyers localisés, des *maculæ*, qui a déjà eu cours dans la science : elles nous expliquent encore une difficulté de cette manière de voir, en nous permettant de comprendre comment les foyers volcaniques, malgré les progrès du refroidissement, se sont reportés vers la surface, tout en perdant de leur puissance.

Parmi les conséquences qui découlent de l'admission de foyers périphériques, il en est dont l'application aux tremblements de terre se conçoit aisément. Leur intensité capricieuse, leur étendue et leur profondeur si variables se comprennent lorsqu'on les rapporte à l'action de foyers superficiels ou profonds, réduits ou considérables, associés ou isolés.

Les manifestations hydro-thermales, gazeuses et autres sont aussi à discuter dans ce sens.

Incidemment, l'auteur rattache encore à l'ordre d'idées qu'il a suivi, les changements d'inclinaison de l'axe et de durée de rotation de la Terre, qui ont pu être influencés par l'accumulation, à la surface du Globe, d'une prodigieuse quantité de matière. Des modifications climatériques locales, produites par la chaleur emmagasinée dans des foyers périphériques, lui semblent admissibles, et il lui paraît plus juste d'attribuer les effets mécaniques et métamorphiques superficiels à ces foyers limités, qu'à la puissance sans bornes du foyer central, ou à des efforts contractionnels que rien ne prouve.

A la fin de son exposé, M. Stübel rappelle que la Cordillère n'est pas une chaîne étroite, à versants rapides, couronnée de bouches éruptives. Elle correspond, en réalité, à un large bombement du sol empruntant son caractère montagneux aux nombreuses vallées qui s'y creusèrent, ainsi qu'à tous les accidents déterminés par sa constitution géologique. Cette intumescence s'étend sur une cinquantaine de degrés et sert de soubassement aux amas volcaniques, qui ne forment pas une chaîne continue, mais des groupes séparés par des lacunes, d'importance variable, atteignant parfois plusieurs degrés.

(1) *Erdprofil der Zone von 31° bis 65° N. Br. 1 : 1 000 000.* Munich, 1886.

L'un des groupes importants est celui de l'Ecuador; on y compte plus de quarante massifs volcaniques. Au nord, sont les quatre groupes colombiens, comprenant une trentaine de centres éruptifs. Vers le sud, après une interruption de 15°, viennent les groupes du Pérou et de la Bolivie, auxquels se joignent les groupes du désert d'Atacama; alors seulement, après un nouvel intervalle, commencent les groupes du Chili.

Il ne peut donc être question, au point de vue géogénétique tout au moins, d'un alignement volcanique de l'Amérique du Sud. Ces alignements, d'apparence continue, sont tracés sur des cartes à trop petite échelle, en négligeant de tenir compte de tous les centres éruptifs, dont la plupart, du reste, ne sont même pas connus de nom. De cette manière, on a été porté à croire que tous les volcans de ce continent étaient établis sur une seule fracture de l'écorce, ce qui est en contradiction avec la réalité.

La théorie des crevasses a été également appliquée à l'Amérique centrale, au Mexique et à bien d'autres pays. On a même admis que des groupes d'îles éruptives, tels que les Açores, les Canaries, les îles du Cap Vert, étaient situés sur une même fêlure, qui se continuerait dans le nord par les Féroë et l'Islande, et dans le sud, jusqu'à Ascension et Sainte-Hélène. L'auteur ne pense pas que la géologie dynamique retire grand profit de ces spéculations; toutefois, suivant une communication verbale, il ne met pas en doute les fractures *superficielles* indiquées par certains alignements volcaniques.

Relativement à l'Amérique du Sud, plus spécialement en cause ici, il ne faut pas oublier que, en dehors des volcans visibles, il y a encore bien des points éruptifs sous-marins, échelonnés le long de la côte occidentale, sur lesquels nous n'avons pas de renseignements. Leur existence se manifeste de temps en temps par des tremblements de terre et des raz de marée.

Les relations qui unissent les volcans sud-américains à leurs soubassements restent à déterminer. Dans l'Ecuador, la Cordillère est surtout composée de schistes métamorphiques accompagnés de roches syénitiques et granitiques, ainsi que de diorites, de diabases et de porphyrites; de puissantes assises crétacées leur sont associées.

Les porphyrites ont des caractères qui les rapprochent beaucoup des diorites et des diabases, auxquelles elles se rattachent par de remarquables brèches de nature métamorphique. Par contre, d'autres ressemblent tellement à des roches modernes, qu'on est sujet à les confondre, surtout si l'on ne voit que des échantillons. Souvent on doute si l'on a affaire à une porphyrite ancienne ou à une andésite

récente, et cependant il importe de les séparer autant que possible. Malheureusement, les reconnaissances géologiques sont fort difficiles dans ces contrées entièrement couvertes de forêts vierges.

Les roches éruptives récentes, qui sont l'objet d'un aperçu spécial, signé de M. Th. Wolf (pp. 417 à 439), appartiennent en grande majorité aux andésites.

Exceptionnellement, on rencontre des andésites riches en olivine et des laves basaltiques. Les trachytes et les phonolites manquent jusqu'ici. Les andésites avec forte teneur en quartz, ou en silice, ont été rangées parmi les dacites. Les séries suivantes furent établies :

Andésite à biotite	Rares.
— à biotite et amphibole. .	
— à amphibole	Communes.
— à amphibole et pyroxène.	
— à pyroxène	
Dacite à biotite	Communes.
— à biotite et amphibole . .	
— à amphibole	
— à amphibole et pyroxène .	Rares.
— à pyroxène	

Les amoncellements montueux, formés par ces matériaux, ne se sont pas élevés sur la surface du foyer périphérique auquel ils appartiennent, comme les cônes Akir et Dekwa sur le plateau du Dīret et-Touloûl. Ils en sont au contraire séparés par des dépôts d'une autre nature, d'épaisseur inconnue, sans doute très considérable.

Il ne paraît pas que ces foyers sous-jacents aient influencé l'élèvement de la Cordillère dont, du reste, plusieurs tronçons ne possèdent pas de volcans. Les épanchements éruptifs ne se règlent pas sur la configuration extérieure du sol. On en a une preuve, de proportions réduites, dans le Cerro Altar et le Tunguragua : l'un est établi en haut d'une éminence non volcanique, tandis que le second s'est construit tout près, mais au fond de la vallée.

Le magma igné semble chercher les points de moindre résistance, qu'il trouve souvent à la limite de deux formations, sans tendre à arriver au jour par le chemin le moins long.

MARSDEN-MANSON et T.-C. CHAMBERLIN. — **L'évolution des climats et les périodes glaciaires** (1).

Parmi les nombreuses questions qui intéressent à la fois les naturalistes, les astronomes et tous les esprits curieux, celle des modifications climatériques à travers les âges et du refroidissement général du globe à l'époque glaciaire est une des plus obscures. Les savants anglais et américains se sont particulièrement attachés à cette question et ont imaginé de nombreuses théories pour la résoudre.

L'une des plus simples a été développée récemment par M. Marsden Manson. Après avoir constaté l'échec de toutes les théories proposées, il en conclut que des fautes de raisonnement ont été commises, et, très sagement, il revient aux données fondamentales, définitivement acquises. La Terre était probablement, à l'origine, une masse fluide dont la température était supérieure à 100°. L'eau et quelques autres substances étaient volatilisées et formaient tout autour du globe une épaisse enveloppe gazeuse. On admet généralement que la chaleur initiale de la Terre a progressivement diminué. On admet aussi que deux sources de chaleur, la chaleur interne et la chaleur solaire, ont influencé les climats. A l'origine, la première source intervenait seule, car la chaleur solaire ne pouvait pas traverser l'épaisse atmosphère qui protégeait la Terre; aujourd'hui, la seconde source est à peu près exclusivement seule active. On pourra donc envisager deux phases climatériques, séparées par une période de transition qui, d'après l'auteur, coïnciderait avec l'époque glaciaire. M. M. Manson s'efforce d'abord de résoudre le problème suivant : Étant donné un globe constitué comme l'était la Terre, avec une température initiale supérieure à 100°, prouver qu'avant de passer sous la dépendance de la

(1) MARSDEN MANSON, *The Evolution of Climates*. (THE AMERICAN GEOLOGIST, vol. XXIV, 1899, 92 pages, 1 carte.)

T. C. CHAMBERLIN, *On attempt to frame a working hypothesis of the cause of glacial periods on an atmospheric basis*. (JOURNAL OF GEOLOGY, vol. VII, nos 6, 7 et 8. Chicago, 1899.)

chaleur solaire : 1° les changements de climats sont indépendants de la latitude; 2° que les régions continentales peuvent avoir des glaciers. Il est bien évident que si l'on admet une seule source de chaleur efficace pendant la première phase de l'évolution de la Terre, on doit aussi admettre que les climats étaient indépendants de la latitude et ne pouvaient varier qu'avec l'altitude, les surfaces isothermes de l'atmosphère étant rigoureusement parallèles à la surface terrestre. Rien ne s'opposait d'ailleurs à l'établissement des glaciers dans les régions montagneuses, à une altitude correspondant sensiblement à l'isotherme de 0°. Cette isotherme se trouvait certainement à l'intérieur de la zone d'action de la Terre, le Soleil étant incapable de maintenir une pareille température dans un milieu raréfié. Au delà de l'isotherme 0° se trouvaient d'autres surfaces, à la température décroissante, dont les plus externes étaient sous la dépendance exclusive du Soleil, ce qui implique l'existence d'une zone neutre soustraite à la fois à l'action de la Terre et à celle du Soleil. Donc, pendant toute cette période, les climats ont été uniformes à la surface de la Terre et, le refroidissement continu provoquant l'abaissement successif des isothermes, ces climats avaient des températures graduellement décroissantes. L'ère paléozoïque représentant la période des climats extratorrides, l'ère secondaire celle des climats tropicaux, l'ère tertiaire aurait d'abord joui de climats tempérés chauds, puis de climats à température décroissante jusqu'à la fin du Pliocène. Jusqu'à cette époque, l'identité de faune et de flore sur toute la surface du globe peut être considérée comme sensiblement exacte, les variations dans la flore pouvant tenir simplement à des différences d'altitude.

A la fin du Pliocène, l'isotherme de 0° s'abaissa sur la Terre et, comme elle était sous la seule dépendance de la chaleur interne, tous les points de la surface furent atteints en même temps. La glaciation universellement constatée sur la surface du globe se trouve ainsi expliquée. A partir de ce moment, les isothermes exclusivement régies par le Soleil s'abaissent sur la Terre; leur forme étant sphérique, ce sont les régions tropicales qui sont atteintes tout d'abord. Or ces isothermes ont une température supérieure à 0°, car les rayons calorifiques du Soleil sont capturés et absorbés par l'atmosphère; leur action se manifestera donc par une élévation de température dans la zone tropicale et la disparition des glaciers qui la couvraient. L'échauffement par le Soleil continuant, l'invasion glacière recule de plus en plus vers les pôles. C'est encore à cette période de régression générale des glaciers que se trouve la Terre.

L'auteur fait remarquer que les océans ont gardé plus longtemps, par suite de la grande chaleur spécifique de l'eau, la provision de chaleur emmagasinée dans leur masse, et ne sont arrivés à la température de 0° que bien après les continents. Lorsque les mers se furent refroidies jusqu'à un point voisin de leur maximum de densité, à un moment déterminé par l'universelle extension des faunes marines froides, l'évaporation s'arrêta et l'alimentation des glaciers se trouva insuffisante, ce qui accéléra encore leur régression. Le fond de l'Océan, s'étant refroidi plus tard que les continents, a subi aussi plus tardivement la contraction qui détermine les plissements et les fractures de l'écorce. La grande chaleur spécifique de l'eau nous explique la localisation actuelle de ces phénomènes orogéniques dans les zones océaniques, la température plus basse sur les côtes de l'immense masse d'eau du Pacifique et la plus grande extension ou plutôt la régression plus lente des glaciers antarctiques. L'atmosphère, purgée d'une grande partie de ses vapeurs par la glaciation, retient, par suite de son pouvoir absorbant, une proportion de plus en plus forte de chaleur solaire qui réchauffe graduellement l'atmosphère et les couches superficielles de l'écorce terrestre. Il en résulte un relèvement progressif de la température. Les phénomènes orogéniques considérables qui se sont produits pendant le Quaternaire ont pu libérer des quantités assez considérables de chaleur interne pour provoquer ces périodes interglaciaires à climat doux, qui ont été observées d'une façon si générale. Des causes particulières, locales, ont pu d'ailleurs exercer une influence marquée sur le climat. Ainsi l'*Unglaciated* (ou *Driftless Area*) de l'Amérique du Nord aurait été soustraite à la glaciation générale par les vents d'est réchauffés sur l'immense coulée éruptive qui s'épanchait dans la plaine de Colombie.

Depuis le début du Quaternaire, les climats solaires qui se sont établis diffèrent des climats terrestres par leur variabilité avec la latitude et avec les saisons; en outre, l'atmosphère emmagasinerait une partie de la chaleur solaire. La Terre marcherait donc vers des climats plus doux semblables à ceux de Mars qui n'a plus de calottes glaciaires, mais seulement des neiges disparaissant chaque été. Mars, plus petite que la Terre, s'est refroidie plus vite; elle a déjà traversé la période glaciaire et, comme elle possède aussi une atmosphère absorbante, elle jouit depuis longtemps des climats solaires. La planète Jupiter, plus grosse, s'est refroidie plus lentement; elle paraît encore se trouver à la période des climats torrides, comme semble l'indiquer son épaisse enveloppe de vapeurs.

Cette théorie cosmique, très séduisante, permet d'expliquer beaucoup de faits biologiques et orogéniques du passé de la Terre.

La plus grave objection opposée aux théories qui font intervenir la chaleur centrale dans l'établissement des climats est que cette chaleur ne peut se faire sentir jusqu'à la surface par suite de la mauvaise conductibilité des roches. Cette objection n'est peut-être pas absolument décisive; ne savons-nous pas qu'à l'époque actuelle, la chaleur interne fait sentir son action jusqu'à quelques mètres seulement de la surface, dans une zone qui conserve une température constante? En dehors de cette objection d'ordre général, il semble bien que M. Manson ne tienne pas un compte suffisant de lois physiques définitivement acquises. L'épaisse atmosphère de vapeurs qu'il suppose, un peu gratuitement peut-être, pendant les temps géologiques, était certainement traversée par les rayons solaires; la Terre était éclairée, comme le prouvent notamment les flores et les yeux si développés des animaux de ces périodes; la chaleur obscure était donc captée et le Soleil exerçait son influence sur les climats bien avant le Pleistocène.

Il est en outre regrettable que l'auteur passe si rapidement sur les rémissions interglaciaires, si embarrassantes mais cependant si bien établies.

Il eût été à désirer que cette théorie fût confirmée, car elle nous fait entrevoir pour la « machine ronde » une vieillesse prolongée et fort agréable, toute différente de la morne immobilité et du froid glacial que prédisent les théoriciens pessimistes.

Une autre théorie, tout aussi optimiste dans ses conséquences, vient d'être développée par M. T. C. Chamberlin. Un chimiste suédois, M. Svante Arrhénius, reprenant la théorie de Fournier et Pouillet, qui avaient mis en évidence le pouvoir diathermane de l'atmosphère, a montré que cette absorption sélective des rayons solaires par l'atmosphère, cette capture de la chaleur obscure, comparable à celle produite par une cloche en verre, était due à l'action de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau de l'air. Grâce à ces corps, l'atmosphère laisse passer la chaleur lumineuse du Soleil, mais, par contre, absorbe presque totalement la chaleur obscure rayonnée par le sol. D'après le physicien américain Langley, la température du sol, en plein soleil, serait à 200° si l'atmosphère n'existait pas. M. Arrhénius a calculé à son tour que si la quantité d'acide carbonique était doublée ou triplée, — et cette augmentation n'aurait aucune influence fâcheuse sur les êtres vivants, — la température moyenne s'élèverait de 8° ou 9°, ce

qui donnerait un climat semblable à celui du milieu du Tertiaire; inversement, une réduction de 55 à 62 % de la proportion actuelle d'acide carbonique abaisserait la température moyenne de 4° ou 5° et amènerait une glaciation comparable à celle du Pleistocène.

M. Chamberlin, utilisant ces données, a recherché les causes qui, au cours des périodes géologiques, ont pu provoquer des variations semblables dans la composition de l'atmosphère. Il distingue des sources de gain ou de perte permanentes ou temporaires. La principale source permanente d'enrichissement en acide carbonique est la sortie continuelle de ce gaz à travers les fissures de l'écorce; ce dégagement a été sans doute beaucoup plus considérable au moment des grandes périodes de fractures. Les agents permanents d'appauvrissement sont de deux ordres: 1° la conversion des silicates des roches exposées à l'air en carbonates, cette transformation est surtout rapide pendant les périodes de régression marine; et 2° la formation des dépôts charbonneux, qui a été si active à l'époque houillère. Ces agents permanents de gain ou de perte sont d'ailleurs considérés comme agissant avec une grande lenteur, et, en général, leurs effets se compensent.

Les sources temporaires sont beaucoup plus rapides dans leur action et produisent sans doute des effets plus intenses. Les sources de perte temporaire sont : 1° la combinaison de l'acide carbonique avec les carbonates, qui sont alors dissous à l'état de bicarbonates; 2° la dissolution de l'acide carbonique dans l'eau de mer; 3° sa disparition pour la formation de la matière organique. Le premier facteur est le plus important; il intervient d'une façon très active au moment des soulèvements de continents qui augmentent la surface des roches exposées aux intempéries, activent le ruissellement sur les pentes et favorisent ainsi la dissolution des carbonates. Les sources de gain temporaire comprennent : le dégagement de la moitié de l'acide carbonique des bicarbonates dissous dans l'eau de mer soit : 1° par l'action des organismes; ou 2° par dissociation; 3° le dégagement, par suite d'une élévation de température, d'une partie de l'acide carbonique dissous; et enfin 4° la mise en liberté de ce gaz par la décomposition des matières organiques.

Ces différentes sources de variations sont en relation avec les phénomènes d'élévation et d'extension des continents d'une part et de réduction de la Terre et d'extension marine d'autre part. Durant une période d'extension et d'élévation terrestres, les silicates sont convertis en carbonates en proportion croissante, les calcaires et les dolomies, transformés en bicarbonates, sont entraînés à la mer. Ces deux processus tendent à diminuer la quantité d'acide carbonique atmosphérique. En

même temps, la zone de mer peu profonde, qui abrite surtout les organismes à test calcaire, se trouve réduite, la quantité d'acide carbonique mise en liberté par des organismes aux dépens des bicarbonates dissous est aussi atténuée. Cette diminution de l'acide carbonique de l'atmosphère provoque, comme l'on sait, un abaissement de température qui va permettre la dissolution d'une nouvelle quantité de gaz par l'océan et réduire encore la proportion d'acide carbonique atmosphérique.

Dans les périodes de transgression marine, au contraire, les organismes calcaires, très nombreux dans les mers continentales, vont mettre en liberté beaucoup d'acide carbonique et assurer une élévation de température qui facilitera le dégagement des gaz dissous et la dissociation des bicarbonates, tandis que la carbonation sera réduite au minimum sur les continents. Pendant les périodes de transgression marine, l'abondance d'acide carbonique assurait à tout le globe un climat doux, humide, uniforme, tandis que les périodes de régression marine présentaient les extrêmes d'humidité et de sécheresse, de chaleur et de froid.

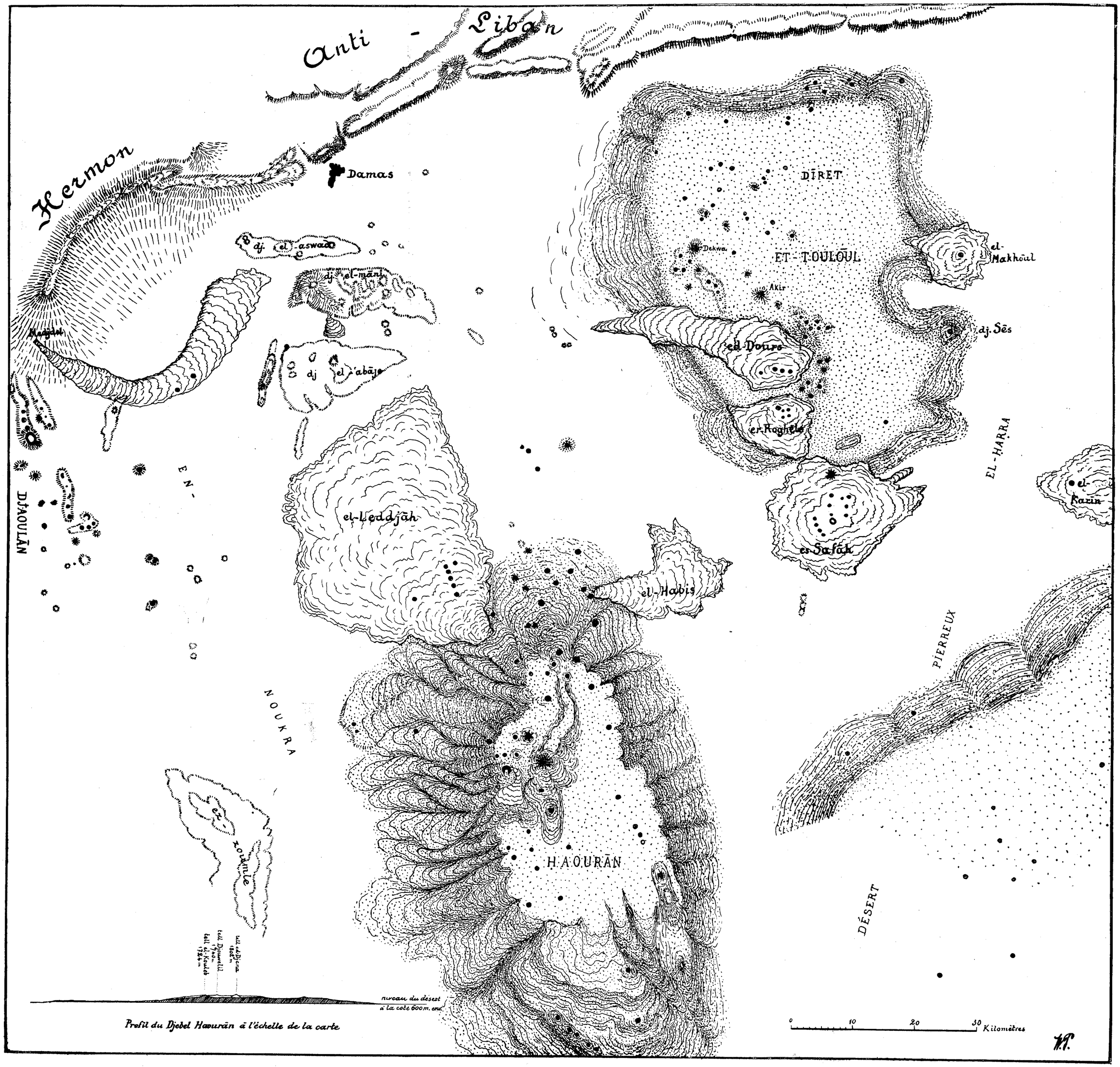
L'auteur applique ensuite ces observations aux deux périodes pendant lesquelles on a observé des glaciations bien nettes : la période permienne et le Pleistocène. Nous nous bornerons à le suivre dans l'explication de la glaciation pleistocène, qui nous intéresse plus particulièrement.

Tout d'abord, quelle est la cause générale qui a déterminé la glaciation pleistocène? Elle résiderait, d'après M. Chamberlin, dans la grande extension en altitude et en surface des continents, extension qui s'est produite à la fin du Pliocène, à une période que M. Le Conte a récemment désignée par le nom d'*ozarkienne*. Tandis qu'au Miocène moyen, alors que le climat était encore très doux, la surface continentale peut être évaluée à 70 millions de kilomètres carrés, elle était de 104 millions pour la période ozarkienne et serait aujourd'hui de 87 millions environ. En outre, l'altitude moyenne des continents à la fin du Pliocène devait être deux ou trois fois plus élevée que pour le Miocène moyen. Cette extension de la zone continentale aurait suffi pour abaisser la proportion d'acide carbonique jusqu'à 0.03 % et amener ainsi, d'après les calculs de M. Arrhénius, une glaciation intense. La glaciation va s'aggraver par suite de l'intervention des causes secondaires qui, comme on l'a vu plus haut, tendent encore à diminuer la quantité d'acide carbonique. La surface gelée ou couverte de neige va s'accroître. Mais comme cette surface est désormais soustraite à l'action de l'atmosphère, elle n'absorbera plus d'acide carbonique qui va de nouveau augmenter

et provoquer un relèvement de température et la retraite des glaciers. Cette retraite s'arrête bientôt, la carbonatation reprend en effet; elle est même très active, car elle porte sur les matériaux du drift étalés par les glaciers et qui présentent une grande surface de contact avec l'air. Une nouvelle invasion glaciaire se produit alors, qui sera suivie d'une seconde retraite des glaces et ainsi de suite. Les glaces s'étendent de moins en moins, car les océans s'enrichissant sans cesse en bicarbonates, la pression de l'acide carbonique diminuant de plus en plus, la dissociation des bicarbonates s'opère très activement et vient, en régénérant l'atmosphère, relever la température. De sorte que les périodes glaciaires et interglaciaires se succéderaient et les écarts entre leurs températures iraient en s'atténuant de plus en plus jusqu'à la disparition complète de la glaciation. Un mouvement d'affaissement en restreignant le domaine continental est d'ailleurs venu accélérer cette série d'oscillations et rétablir le climat de l'époque actuelle.

Comme on le voit, cette théorie repose sur une base toute différente de la précédente; elle fait intervenir comme cause fondamentale de la variation des climats le changement de composition de l'atmosphère ou, en dernière analyse, les oscillations du sol, que M. Manson considérait comme de simples causes secondaires. Une parcelle de vérité se trouve sans doute dans chacune des deux hypothèses. Celle de M. Chamberlin, appuyée sur les données géologiques les plus sérieuses, doit certainement se rapprocher de la vérité lorsqu'elle explique la dernière glaciation. Elle est malheureusement d'une application assez difficile dans le passé et l'efficacité des agents invoqués n'est pas suffisamment démontrée. Elle serait rassurante pour l'avenir : la quantité d'acide carbonique déversée dans l'atmosphère par la combustion journalière de masses toujours plus considérables de charbon, augmenterait assez rapidement pour nous faire espérer, dans quelques milliers de siècles, le retour des climats doux et humides du milieu de l'époque tertiaire.

(Résumé de M. J. Giraud dans le n° 2-3 du tome XI (1900) de l'Anthropologie.)



Carte de la Région Volcanique du Nord de la Syrie

d'après les levés de M. Stübel et la carte de M. H. Fischer