

Alexandre DAUVILLIER

Professeur au Collège de France

LE VOLCANISME LUNAIRE ET TERRESTRE

Collection " SCIENCES d'AUJOURD'HUI " dirigée par André George.

Le volcanisme, si important qu'il puisse nous paraître, n'est pourtant qu'un reflet bien pâle de ce qu'il fut à l'aube des temps géologiques et, surtout, lors de la naissance de la Terre, il y a quelque 4 milliards d'années. La Terre a été enfantée dans le feu ! L'auteur montre, dans ces pages, l'œuvre grandiose du volcanisme dans l'évolution de notre planète, dans l'élaboration de son relief fondamental : ses fosses océaniques, dans la formation des océans et de son atmosphère. Mais il doit, pour cela, considérer le volcanisme d'un point de vue plus général, qui n'est pas familier au géologue, c'est-à-dire du point de vue *cosmique*, sur la base de la cosmogonie et de la géochimie et l'étudier comparativement sur la Terre et sur son satellite.

Il calcule l'énergie géothermique interne d'origine radioactive, source du volcanisme, et en souligne l'importance *technique* future. Il analyse le mécanisme

INTRODUCTION

C'est ainsi que naissent les volcans !... Mais le poète n'a vu qu'en imagination Stromboli émerger des eaux, — car il n'y avait pas encore d'hommes sur la Terre, — tandis que le 20 août 1955, un pilote de l'U. S. Navy a vu naître un volcan au large d'Hawaï. Cependant, ce volcan sous-marin était, peut-être, déjà fort ancien et nombre de ceux-ci ne sont apparus que d'une manière éphémère. Mais, le 20 février 1943, la « fumée légère » annonciatrice s'est élevée dans le sillon qu'un paysan mexicain venait de tracer dans son champ. Bientôt, le célèbre Paricutin atteignait 500 mètres de hauteur et recouvrait un kilomètre carré !

Ce volcanisme, si important qu'il puisse nous paraître, n'est pourtant qu'un reflet bien pâle de ce qu'il fut à l'aube des temps géologiques et, surtout, lors de la naissance de la Terre, il y a 4,5 milliards d'années. La Terre a été enfantée dans le feu. Nous voulons, dans ces pages, montrer l'œuvre grandiose du volcanisme dans l'évolution de notre planète, dans l'élaboration de son relief fondamental : ses fosses océaniques, dans la formation des océans et de son atmosphère. Mais nous devons, pour cela, considérer le volcanisme d'un point de vue plus général, qui n'est pas familier au géologue, c'est-à-dire du point de vue *cosmique*, sur la base de la cosmogonie et de la géochimie et l'étudier compa-

rativement sur la Terre et sur son satellite. C'est la « philosophie » du volcanisme que nous dégagerons de cette étude, en montrant son importance insoupçonnée dans l'histoire du Globe.

Cet ouvrage ne devra pas être lu par les savants dépourvus d'imagination, timides ou attardés, car ils n'y verraient que confusion. Ils ne sauraient comprendre que l'on traite de front des considérations aussi diverses que l'astronomie, la chimie des météorites, la radioactivité, le magnétisme, et bien d'autres... C'est que trop de spécialistes ont perdu de vue l'unité de la Nature, qui ignore nos artificielles disciplines. C'est précisément cette unité que nous chercherons, surtout, à mettre en évidence, nous inspirant pour cela de l'esprit de Buffon, d'Arago, d'Al. von Humboldt, ces esprits encyclopédiques. Dans 20 ans, les conceptions que nous exposons ici sembleront naturelles et seront familières aux enfants des écoles.

Mais il faut se garder, en ce domaine, d'édifier une « théorie de cabinet », comme nous en avons vu trop souvent. Il sera toujours imprudent de formuler une théorie sur le volcanisme, non seulement sans avoir approfondi la géophysique et la géochimie, mais sans avoir visité beaucoup de volcans et sous les latitudes les plus diverses. Pour émettre une opinion autorisée sur ce sujet, il ne suffit pas d'être théoricien, encore faut-il être descendu dans les cratères, s'être quelque peu roussi à la lave brûlante ou déchiré dans les coulées coupantes comme du verre, avoir reçu quelques lapilli, suffoqué dans les gaz, lutté dans la neige, la glace, le vent terrible des grands volcans océaniques...

Le volcanisme ne sera donc pas traité dans ces pages comme il l'est dans les ouvrages de Géologie. Nous ne décrirons pas les volcans. Il faudrait, pour cela, avoir visité la plupart de ceux du Globe et le cadre de cet ouvrage ne le permettrait déjà pas. Nous ne décrirons pas les roches volcaniques, dont

la minéralogie est si complexe qu'elle exige la spécialisation d'un savant durant toute sa carrière. Nous n'exposerons pas l'aspect légendaire, historique, folklorique et sportif du volcanisme. Mais en nous limitant ainsi, nous espérons mieux faire ressortir l'unité de notre sujet.

L'ORIGINE DU SYSTÈME TERRE-LUNE

Pour comprendre le volcanisme, il faut donc remonter jusqu'à la cosmologie. Il faut rendre compte de l'existence du système Terre-Lune, ce couple unique et si singulier dans le système solaire. Et pour comprendre l'origine de ce système lui-même, il faut remonter jusqu'à la structure de la Galaxie et l'évolution de l'Univers.

L'étude de la Lune est inséparable de celle de la Terre. C'est le seul corps céleste qui, par sa proximité, nous permette une étude minutieuse de son relief. Nous soupçonnons bien que les reliefs de Mercure et de Mars sont « lunaires », mais, seule, la Lune a une valeur inestimable, — quoi qu'en ait dit Bouasse !, — en nous montrant ce que fut le relief terrestre il y a 4 milliards d'années, avant la condensation des océans.

Nous avons déjà montré comment le problème cosmogonique restreint de l'origine du système solaire avait un triple aspect : astronomique, mécanique et chimique. Le problème astronomique est inséparable de celui, plus général, de l'évolution de la Galaxie et de l'Univers lui-même.

L'étude du rôle cosmologique des rayons cosmiques nous a conduit à formuler une hypothèse dans laquelle les Amas globulaires jouent un rôle cosmogonique essentiel, en étant le lieu des interactions stellaires responsables du rajeunissement perpétuel de l'Univers. L'hypothèse est fondée sur l'appli-

cation de la théorie cinétique des gaz aux populations stellaires, selon les idées de Lord Kelvin et de Poincaré, les étoiles jouant le rôle de molécules.

L'énergie mécanique stellaire est la source de toutes les autres formes d'énergie que nous connaissons : énergie nucléaire ou radioactive, électromagnétisme, chaleur et lumière, en accord avec les conceptions de la Relativité.

Le modèle est indépendant de l'expansion relativiste de l'espace, qui ne s'exerce pas dans la Métagalaxie où la densité matérielle moyenne est supérieure à la densité critique d'Einstein. Introduisant l'électromagnétisme cosmique, on peut montrer comment l'évolution des éléments chimiques, des étoiles et des galaxies sont étroitement associées et comment l'Univers évolue en équilibre statistique, sans commencement et sans fin. L'électromagnétisme, par l'intermédiaire des rayons cosmiques, apparaît comme le « remontoir » s'opposant à la dégradation quantique dans l'Univers.

Les interactions stellaires ayant lieu au centre des Amas globulaires et des Noyaux galactiques, où la population stellaire est extrêmement dense, sont de trois sortes :

1° les pseudo-chocs, très fréquents, engendrant des effets de marée, assurant l'équipartition de l'énergie cinétique stellaire. Des captures, suivies de la formation de couples d'étoiles doubles, en sont la conséquence ;

2° les collisions rasantes, plus rares, entraînant la jonction de deux étoiles en une seule. C'est le mode de formation des systèmes planétaires ;

3° les collisions centrales, qui sont des événements rares, mais catastrophiques, produisant des températures de plusieurs milliards de degrés assurant la synthèse de nouveaux éléments chimiques à partir de la matière nucléaire indifférenciée dont sont constituées les étoiles hyperdenses. Il apparaîtra de nouvelles Géantes rouges formées de ces nouveaux éléments capables d'assurer leur rayonnement.

Il en résulte que l'abondance des systèmes planétaires dans la Galaxie est intermédiaire entre l'abondance des couples d'étoiles doubles, très nombreux, et celle des Géantes rouges, très rares. La Galaxie comprenant quelque 200 milliards d'étoiles, le nombre de ces systèmes planétaires inobservables ne saurait être inférieur au milliard. Mais, les collisions rasantes pouvant s'effectuer entre des étoiles de types et de masses les plus divers, ils ne seront pas tous semblables au système solaire. Ils pourront, par exemple, posséder des planètes sans satellites, gravitant sur des orbites très excentriques et des planètes plus massives que Jupiter, mais alors hyperdenses et de la taille d'Astéroïdes.

Nous avons traité le problème mécanique de l'origine du système solaire sur la base de la théorie des planètes jumelles. Comme il faut deux étoiles pour engendrer un système planétaire, il faut deux planètes jumelles qui fusionneront, pour engendrer un système satellitaire. En outre, la circularité remarquable des orbites dans le système solaire exige la combinaison d'orbites excentriques coplanaires, symétriques et sécantes. Selon la masse des planètes jumelles, leur jonction les trouvera dans un *état physique* différent, qui conditionnera les modalités de leur capture et de leur jonction.

1° Dans le cas des planètes géantes, se rencontrant au bout de quelques millénaires, encore *gazeuses*, la capture avec collisions rasantes, s'est produite dans le seul cas de Saturne. Ainsi s'explique l'analogie structurale existant entre son système satellitaire et le système planétaire. Elle possède, en effet, deux satellites géants : Titan et Japet. Ainsi s'expliquent aussi les discontinuités que l'on observe dans les distances et les masses des planètes et des satellites. Dans le cas de Jupiter et d'Uranus, les deux jumelles ont fusionné d'emblée et l'oscillation résultante n'a engendré qu'une famille de satellites Nains. Ainsi s'expliquent les rotations différentielles du Soleil et des planètes géantes.

2° Dans le cas des planètes naines terrestres, dont les jumelles ont fusionné après quelques siècles à l'état *fondue*, des satellites normaux ne pouvaient être engendrés. Mais, dans le cas exceptionnel de la Terre, les deux jumelles ont fusionné tangentiellement en apportant un moment angulaire élevé ayant conduit au piroïde de Poincaré et au système Terre-Lune, planète *double* ayant évolué selon la théorie de Darwin.

3° Enfin, dans le cas des deux jumelles devant constituer la planète d'Olbers, manquant entre Mars et Jupiter, les proto-planètes étaient si petites que leur rencontre tardive les a trouvées entièrement *solidifiées* et parvenues au terme ultime de leur évolution chimique et *minéralogique*. Elles se sont disloquées *progressivement* le long de l'orbite *circulaire* résultante, en donnant naissance aux Astéroïdes, puis à *toute* la matière solide dispersée dans le système solaire : comètes, météorites, poussière cosmique. La genèse des Anneaux de Saturne a été identique : les deux proto-satellites nains, devant constituer le premier de ses satellites, étaient si petits, que leur jonction les a trouvés à l'état cristallin et que les forces de marée les ont disloqués le long d'une orbite circulaire de rayon égal au bord *externe* des Anneaux.

Ainsi, la théorie des planètes jumelles apporte une base rationnelle à la théorie du piroïde de Poincaré et à celle de Darwin. Disons aussi que la forte *dissymétrie* exigée pour la formation du piroïde, ne peut être trouvée que dans la jonction de deux proto-planètes à l'état fondu possédant un *noyau central dense*. Celui-ci n'a pas été intéressé par la formation du piroïde. Il en résulte que la Lune est une sphère homogène de Sima possédant la même densité moyenne que la lithosphère terrestre. Elle aura donc une évolution physico-chimique identique à celle éprouvée par notre planète durant son refroidissement cosmique. Mais, pour prévoir la nature de ce chimisme cosmique, il est nécessaire de connaître la

composition interne de la Terre. Nous avons montré que la connaissance de l'*abondance cosmique* des éléments chimiques, de la nature du « mélange solaire » de H. N. Russell, l'interprétation cosmogonique des météorites, selon les idées de Daubrée, et la théorie des planètes jumelles, permettaient de justifier le modèle proposé par E. Roche en 1881, sur la base de considérations tirées de la mécanique céleste. L'application aux proto-planètes de la théorie cinétique des gaz, selon les idées de Johnstone Stoney, et la spectroscopie des taches solaires, permettent enfin de poser les bases théoriques de la géochimie et de rendre compte des natures si différentes du Soleil, des planètes géantes et terrestres et des météorites.

L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

L'on croyait, au siècle dernier, que la chaleur interne du Globe révélée par le gradient géothermique, le thermalisme et le volcanisme, était un reste de chaleur cosmique, chaleur fossile, témoin de la formation du système solaire. De laborieux calculs furent faits pour évaluer la vitesse de refroidissement du Globe, considérée comme un pur problème de *conduction*. Mais c'était, là encore, un faux problème, car tout l'intérieur du Globe est demeuré à l'état fondu et son refroidissement interne s'effectue par *convection*. On peut toutefois estimer la vitesse de refroidissement de la *surface* terrestre, et l'on trouve qu'elle a été très rapide : en moins d'un million d'années les océans possédaient déjà leur température actuelle.

La découverte de la radioactivité a bouleversé ces conceptions en nous faisant, d'abord, connaître l'âge réel de la Terre et en nous montrant que la chaleur interne est d'origine purement radioactive. Les travaux de J. Joly, Strutt, Holmes

et d'autres, montrèrent que le gradient géothermique devait être interprété par une localisation tout à fait superficielle des radioéléments, compte tenu de leur concentration dans les roches. Cette localisation fut expliquée sur des bases géochimiques par V. M. Goldschmidt. Les trois radioéléments actifs, du point de vue géothermique, sont l'uranium, le thorium et le potassium. Des informations sur l'activité du sima et du noyau nous sont données par les mesures statistiques portant sur la radioactivité des deux classes de météorites. Se basant sur le modèle de Roche, justifié par l'abondance cosmique des éléments, la mécanique céleste et l'analyse chimique statistique des météorites, on peut alors calculer la chaleur interne du Globe. On trouve que la production de chaleur est quelque 10 fois plus grande que celle accusée par le gradient géothermique. Elle est apportée à la base de la croûte terrestre, vitreuse et cristalline, par de lents courants internes de convection, dont la vitesse, accusée par les phénomènes isostatiques, est de l'ordre du centimètre par an. C'est dans cette chaleur que nous trouverons l'énergétique du volcanisme. Connaissant la concentration isotopique actuelle des radio-éléments et leur vie moyenne, il est également possible d'estimer l'énergie géothermique dans le passé. On trouve que peu après la naissance de la Terre, il y a quelque 4 milliards d'années, cette production de chaleur interne était le double de ce qu'elle est aujourd'hui.

J. Joly a montré qu'il était possible, connaissant la conductibilité thermique des roches et leur radioactivité, de calculer la loi d'accroissement de la température, tout au moins dans les 50 premiers kilomètres de profondeur, soit dans la croûte cristalline et vitreuse où la chaleur n'est transmise que par conduction. Mais au-dessous de l'isotherme 800° C, qui correspond sensiblement au seuil de fluage thermique, l'état devient convectif et le problème demeure indéterminé dans l'ignorance où nous sommes de la grandeur et de la distribution

des cellules convectives et des vitesses des courants magmatiques. Moyennant quelques hypothèses, on peut cependant tenter d'estimer la température centrale du Globe, qui pourrait ne pas dépasser 2 000° C. Il n'en est pas moins certain que notre planète est en fusion dans 98 % de sa masse, mais la gravité lui confère une rigidité globale supérieure à celle de l'acier.

Ainsi, tandis que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui assure l'évolution des étoiles, la radioactivité n'y étant pour rien, c'est, au contraire celle-ci qui assure l'évolution des planètes terrestres, l'énergie de fusion nucléaire n'y jouant aucun rôle, par suite d'une température interne insuffisante.

Cette énergie considérable que nous avons sous nos pieds ne pourrait-elle être utilisée techniquement ? Elle l'est déjà, dans certaines régions volcaniques privilégiées, telles que la Toscane, l'Islande, la Californie et la Nouvelle-Zélande. C'est ainsi que Larderel a établi, au siècle dernier et sans le savoir, la première centrale électro-thermique utilisant l'énergie nucléaire ! Mais on peut songer à faire mieux. Lord Kelvin, il y a un siècle, proposait déjà le chauffage thermodynamique avec sa pompe à chaleur utilisant l'énergie géothermique ! Sans chercher à faire des forages jusqu'à plus de 10 kilomètres de profondeur, on peut songer à créer des sources thermales artificielles, lorsque la géologie du terrain et la disposition des failles naturelles s'y prêtent. Un vaste avenir semble ouvert à ces perspectives.

L'ÉVOLUTION CHIMIQUE DU SYSTÈME TERRE-LUNE

Connaissant la nature du mélange solaire de Russell et l'évaporation fractionnée subie par les proto-planètes gazeuses

durant leur contraction gravifique, il est possible de retracer le chimisme cosmique primitif du Globe, en particulier, l'évolution chimique de la lithosphère. Ces proto-planètes gazeuses étaient essentiellement constituées d'atomes et de molécules biatomiques, qui apparaissent dans les *taches* solaires. Il s'y ajoute des corps endothermiques, tels que l'acétylène et l'ozone. La condensation du noyau central de ferro-nickel s'effectue à l'état gazeux par changement d'état, c'est-à-dire sous forme de pluies de ferro-nickel. Alors que les métaux ferreux sont aisément fusibles, ils sont plus difficilement vaporisables. Au contraire, les oxydes terreux et alcalino-terreux sont réfractaires, mais volatils. Ils se condenseront sur le noyau métallique fondu en donnant naissance à la chimie complexe des silicates. Le sial superficiel, qui donnera naissance à la première croûte solide, vitreuse et plastique, sera léger, acide, riche en silice, réfractaire, de la nature des tectites et des verres volcaniques comme l'obsidienne. Au contraire, le sima profond, dense, fusible et alcalin, riche en magnésium et en fer, sera analogue au péridot et à la fayalite, ce péridot noir qui est un silicate ferreux.

H. Moissan a montré, avec son four électrique à arc, que la chimie des hautes températures était celle de composés endothermiques stables à ces températures : hydrures, borures, carbures, nitrures, siliciures. Ce sont de tels composés que nous montrent les météorites. Ils existent encore à l'intérieur du Globe. Il est probable, par exemple, ainsi que le croyait Daubrée, que les carbures métalliques, le graphite et le diamant abondent aux grandes profondeurs. Il est vraisemblable que la Terre a perdu son atmosphère primitive d'acétylène et de gaz rares lors de l'expulsion de la Lune. L'eau de ses océans et les gaz de son atmosphère ne sauraient être primitifs. L'eau et le gaz carbonique, ces deux corps qui ont joué un rôle si essentiel dans l'évolution géochimique de notre planète, n'existaient pas à l'origine, car ils sont instables au-

dessus de 1 500° C. et ils seraient dissociés. Leur apparition a été le résultat d'une évolution chimique complexe.

L'ozone a réagi, au cours du refroidissement, sur les hydrures, tels que les siliciures d'hydrogène. Mais la plus grande partie de l'eau qui devait constituer les océans, résultera de la réaction des hydrures du magma sur le sesquioxyde de fer stable à haute température. Celui-ci sera transformé en *magnétite*, qui s'aimantera ultérieurement en passant par son point de Curie, dans le champ magnétique cosmique environnant la Terre et dû aux rayonnements corpusculaires du Soleil. L'eau hypercritique apparaît ainsi comme l'exhalaison volcanique essentielle de la Terre juvénile. Elle était retenue par notre planète, tandis qu'elle était aussitôt perdue par la Lune, comme le montre la théorie cinétique, par suite de sa faible masse.

L'eau hypercritique du magma joue un rôle fondamental, aussi bien au cours de cette évolution chimique que dans le volcanisme actuel. Elle réagit, en effet, sur les hydrures, borures, carbures, nitrures et siliciures, en donnant naissance à des composés oxygénés : le bore passe à l'état d'acide borique, le carbone à l'état d'oxyde de carbone, le silicium à l'état de silice. L'azote, par contre, conduit à l'ammoniac, qui apparaît sous forme de chlorure ou de carbonate d'ammonium. Tous ces composés volatils créent, dans le magma superficiel, une énorme *pression magmatique* interne qui a engendré dans la croûte vitreuse des déformations mécaniques toujours apparentes sur notre satellite. L'exhalaison de la lithosphère primitive était analogue à l'exhalaison volcanique. Mais, tandis que l'ammoniac est stable par refroidissement, l'oxyde de carbone endothermique ne l'est pas : il conduit au gaz carbonique.

Ainsi, comme Moissan l'avait montré, le carbone, d'abord engagé dans les carbures métalliques, donna ensuite naissance par l'action de l'eau surchauffée, aux hydrocarbures, puis à

l'oxyde de carbone, enfin, au gaz carbonique. Et, en effet, les autres planètes terrestres douées d'atmosphère, telles que Mars et Vénus, parvenues depuis longtemps au terme de leur évolution chimique, nous montrent la présence d'atmosphères plus riches en gaz carbonique que celle de la Terre. Au contraire, les planètes géantes, sur lesquelles l'enveloppe congelée représentant les océans n'est pas le résultat de l'évolution chimique d'un magma, mais le fait de synthèses originelles directes, possèdent une atmosphère d'hydrocarbures.

Dès sa formation et avant sa condensation, l'atmosphère d'eau hypercritique contenait déjà en *solution gazeuse*, les halogénures alcalins, de la silice et un grand nombre de sels. Elle a réagi sur la croûte vitreuse en donnant naissance aux gneiss et aux premiers granites. L'hydrosphère possédait déjà, avant sa condensation, sa salure actuelle. Notre atmosphère est l'aboutissement d'une longue évolution chimique. Elle n'est nullement primitive et sa composition résulte d'un équilibre à très courte période. L'oxygène, qui ne saurait subsister à l'état libre dans l'atmosphère d'aucune planète, est rapidement combiné avec l'azote par la foudre, et absorbé par un grand nombre de minéraux et de laves oxydables. C'est le produit de la fonction chlorophyllienne de la biosphère. Le gaz carbonique et l'azote juvéniles sont continuellement apportés par l'exhalaison volcanique. L'argon 40, issu de la désintégration du potassium 40, est aussi un produit du volcanisme. Il s'accumule dans l'atmosphère.

Le gaz carbonique juvénile volcanique est rapidement absorbé par les roches granitiques, qu'il transforme en argiles kaoliniques, et entraîné dans les océans à l'état de carbonates solubles. Concentré dans les eaux marines, il est utilisé par la biosphère et fixé à l'état de calcaires sédimentaires, de coraux et de dolomies. Le cycle du carbone n'est qu'en partie réversible. Si nous résumons l'histoire du carbone, nous le trouvons successivement à l'état atomique, moléculaire et de

« suie cosmique », dans les atmosphères stellaires ; à l'état de carbures métalliques et d'hydrogène dans les magmas ; en gaz carbonique dans l'exhalaison volcanique ; en matières organiques dans la biosphère et sous forme de calcaires dans les sédiments. Ceux-ci renferment quelque 600 fois plus de gaz carbonique que l'hydrosphère, la biosphère et l'atmosphère réunies.

L'ÉVOLUTION PHYSIQUE DU COUPLE TERRE-LUNE

Cette chimie du magma, avons-nous vu, engendre une pression magmatique interne considérable capable d'exercer des déformations mécaniques sur la croûte vitreuse, incandescente et plastique, qui seront conditionnées par les *cellules* thermiques convectives de la lithosphère. Celle-ci n'était, ni chimiquement, ni thermiquement, parfaitement homogène, et ces cellules ne pouvaient avoir une structure géométrique régulière. Bénard a montré qu'elles forment, dans les corps fondus se refroidissant, un *réseau polygonal*. C'est dans celui-ci que s'inscrira, comme Loewy et Puiseux l'ont montré, le relief lunaire, demeuré inchangé depuis l'époque de la consolidation superficielle du magma.

Ce relief est essentiellement en *creux*. Il comporte, par ordre de grandeur décroissante, trois sortes d'accidents caractéristiques : les mers, les cirques et les cratères. Il y a continuité complète entre ces formations, mais, tandis que les mers et les cirques ont un contour polygonal et un fond convexe, les cratères sont concaves. Ces accidents ne sont pas distribués au hasard. Les cirques le sont surtout sur le pourtour des mers et les grands cratères sur la périphérie des cirques. La plupart des cratères s'alignent sur des failles circulaires et rectilignes de l'écorce.

Sur la Terre, ce faciès en creux s'est intégralement conservé sous la protection offerte par le recouvrement des eaux océaniques. Nos mers lunaires sont devenues les bassins océaniques, découpés comme à l'emporte-pièce dans un plateau continental unique primitif. Les cirques sont nos fosses méditerranéennes, des Antilles, boréales et australes, et de l'Insulinde. De grands cirques existent aussi au sein des océans, tels ceux des Açores et des Canaries, dont la périphérie est jalonnée d'îles volcaniques. Les cratères sont nombreux au fond des fosses océaniques, à côté des volcans insulaires : ce sont les cratères d'explosion. L'écorce terrestre, comme l'écorce lunaire, est fissurée d'immenses failles atteignant des milliers de kilomètres, comme le Fossé Africain, la grande Ceinture d'argent américaine, la Ceinture d'or de l'Alaska, etc...

Ce relief est commun aux planètes terrestres dont la lithosphère est la même et nous pouvons en discerner les grands traits sur Mars et sur Mercure. C'est ainsi que les célèbres « canaux » de Mars ont été interprétés par Antoniadi comme des chapelets de taches alignées : vraisemblablement des cratères nés sur une même faille.

La Lune est aussi parsemée de nombreux cônes en relief de la taille de nos volcans. Ils sont distribués dans les mers et occupent fréquemment la région centrale des cirques : ce sont les « pitons centraux ». Tous possèdent un *craterlet sommital*.

Les travaux des sélénographes : Nasmyth, Carpenter, Loewy, Puiseux, Delmotte, Spurr, s'accordent pour attribuer à ce relief un évident caractère volcanique : les mers, les cirques, les cratères et les volcans, témoignent de forces éruptives internes d'intensité progressivement décroissante au cours du temps avec la température et la pression magmatique. Les événements s'alignent, comme sur la Terre, sur les points faibles de l'écorce, c'est-à-dire sur les fractures. Les travaux de Spurr ont montré la grande analogie existant entre ces

forces et celles régissant le relief terrestre. Cependant, les théories les plus fantaisistes ont été proposées pour rendre compte du relief lunaire. On y a vu d'anciens récifs coralliens (atolls), l'effet d'érosions glaciaires... Nous ne nous y arrêtons pas. Gruithuisen, en 1824, a suggéré une théorie balistique, d'après laquelle ces accidents seraient les empreintes laissées par l'impact d'énormes bolides. Cette idée s'appuie sur une analogie trompeuse et commet une erreur d'échelle de l'ordre de cent ! Mais elle a plu par son caractère populaire et enfantin, qui considère notre satellite comme une cible qu'il est amusant de bombarder pour « faire des trous dans la Lune » ! Elle a été défendue par Elihu Thomson, A. Wegener, Baldwin, mais les sélénographes ne l'ont pas retenue. Nous possédons par bonheur, un cratère météorique authentique dans le désert d'Arizona : c'est le Meteor Crater du Cañon Diablo. C'est une concavité en forme de calotte sphérique, dont le diamètre atteint 1170 mètres et la profondeur centrale 171 mètres. Il est entouré d'un rempart s'élevant à 40 mètres. De plus grands cratères sont connus, mais ils ont tous une origine volcanique, car on n'y retrouve aucune trace de météorites. On connaît, en outre, au moins 6 craterlets météoriques plus petits, mais ils ne seraient pas discernables sur la Lune.

Le calcul de l'énergie nécessaire pour fondre et volatiliser un tel volume de grès montre qu'il faut s'adresser à un bolide tout à fait exceptionnel, comme on n'en a jamais observé durant la période historique. De plus, la prospection magnétique a confirmé la présence, à plusieurs centaines de mètres de profondeur, de millions de tonnes de ferro-nickel. Un tel Astéroïde aurait eu une masse de l'ordre du milliard de tonnes et l'on n'en connaît qu'un : Hermès, s'approchant assez de la Terre pour risquer d'être capturé. Or, une capture serait beaucoup plus probable qu'une collision et il est significatif que depuis 4 milliards d'années, ni la Lune, ni la Terre, n'ont

capturé d'Astéroïdes qui seraient devenus leurs microsattelites, tels ceux de Mars. Le relief de Mercure, si analogue à celui de la Lune, deviendrait inexplicable par une telle hypothèse balistique. Cependant, le Meteor Crater, unique sur la Terre, passerait tout à fait inaperçu sur la Lune, où il n'apparaîtrait que comme un infime craterlet. Enfin, les formations lunaires, à part ces innombrables craterlets, n'ont nullement les caractéristiques du Meteor Crater. Cette hypothèse simpliste ne permet pas d'expliquer la convexité des cirques, leur contour polygonal, les remparts multiples emboîtés, les dômes, les cônes, les pitons centraux et leur cratère sommital, les crevasses, les veines saillantes, les rayonnements, les sublimés et les cendres. Si la théorie ne rend compte que d'un craterlet sur mille, elle est inutile et superflue, car une théorie visant à interpréter le relief lunaire doit être *unitaire*, c'est-à-dire être capable de rendre compte, à la fois, des mers, des cirques, des cratères et de tous les accidents du relief.

Ainsi, et contrairement à l'opinion classique assurant que la Lune nous offre l'état final par lequel passera notre planète dans l'avenir, la Lune nous montre, au contraire, un aspect juvénile de la surface terrestre avant la condensation des océans. La théorie nous conduit ainsi à la conception de la *permanence* des grands traits fondamentaux de la face de la Terre, défendue, il y a un siècle, par J. D. Dana, contrairement aux hypothèses simplistes des « ponts » continentaux traversant les océans et des « translations » continentales de Taylor et Wegener.

LE VOLCANISME TERRESTRE

Le volcanisme est encore aujourd'hui le plus grandiose des phénomènes de la Nature, par l'énergie qu'il met en œuvre.

Et cependant, le volcanisme actuel n'est plus qu'un pâle reflet de ce qu'il était, par exemple, à la fin du secondaire, il y a 60 Méga-ans, au primaire, et, surtout, lors du refroidissement cosmique superficiel de la lithosphère, il y a 4,5 milliards d'années. Bien que l'on connaisse des dizaines de milliers de volcans éteints, il n'en demeure guère en activité que quelques centaines. Il se produit, en moyenne, une grande éruption par an. Ce volcanisme est essentiellement *océanique* et il est distribué sur toutes les grandes failles curvilignes ou « rectilignes » de l'écorce, telles que le pourtour du Pacifique, le Seuil Atlantique, le Fossé Africain. Les volcans sont groupés en familles homogènes, les événements, d'altitude comparable, étant alignés sur une même faille. Le volcanisme sous-océanique, très actif, se manifeste par des séismes et l'apparition d'îles, le plus souvent éphémères. Les grands volcans ont un diamètre à la base dépassant 100 kilomètres et peuvent s'élever à plus de 10 kilomètres au-dessus de leur socle.

Mais le volcanisme n'est pas seulement caractérisé par des cônes de déjection de forme régulière, dont la pente dépend de l'acidité et de la viscosité des laves. Il peut affecter les formes les plus diverses : épanchements, cirques, caldeira, cratères, diatrèmes, salses, soufflards, geysers, selon la nature de l'exsudat, la pression interne, la nature géologique du socle et l'activité du magma. Ses dernières manifestations se traduisent par le thermalisme et les sources de gaz carbonique. Le volcanisme explosif semble avoir possédé une grande puissance dans le passé, si l'on en juge d'après la dimension colossale des cirques dans lesquels se dressent aujourd'hui les volcans actifs, tels des « pitons centraux ». L'exploration des fonds océaniques a révélé, depuis la fin du siècle dernier, tout un volcanisme sous-marin explosif se traduisant par des cratères très profonds, telle la célèbre Fosse de l'Hirondelle, aux Açores. De telles perforations, comme les diatrèmes ou cheminées diamantifères du Cap, sont également connues sur

les continents et il semble que plusieurs cratères, d'abord considérés comme météoriques, ont une telle origine.

Il en résulte que l'éruption volcanique peut affecter la plus grande diversité. Ce peut être un phénomène permanent continu et tranquille, telles les célèbres lacs et fontaines de lave hawaïens. Elle peut apparaître selon un rythme régulier ou non, comme au Vésuve. Ce peut être un phénomène soudain et explosif d'une grande violence, comme ce fut le cas au Krakatoa, à la Montagne Pelée, au Katmaï... capable de réduire en cendres une île tout entière.

Une telle puissance ne peut être trouvée que dans l'énergie géothermique. Aucun phénomène chimique, tel que la décomposition des magmas endothermiques, ou physique, tel que la cristallisation des magmas vitreux, ne peut être invoqué pour rendre compte de l'énergétique du volcanisme. Il s'en faut d'un ordre de grandeur. Seule, l'énergie nucléaire, accusée par le gradient géothermique, est adéquate pour en rendre compte, mais elle ne suffit pas à elle seule, puisque la Lune, de même nature chimique que notre lithosphère et douée, par conséquent, de la même chaleur interne, ne présente pas trace de volcanisme actif.

L'hydrosphère joue donc un rôle essentiel dans ce phénomène, comme le montrent aussi la nature de l'exhalaison volcanique et le cycle volcanique du sel. Le volcanisme est une machine thermique à foyer nucléaire, mais elle met en jeu l'eau dans un état très particulier : l'état hypercritique qui lui confère des propriétés remarquables et toutes spéciales.

Le foyer possédant une température très élevée, de l'ordre de 1 000° C, et la source froide étant l'atmosphère ou l'eau des océans, le rendement thermo-dynamique de cette machine fonctionnant selon un cycle de Carnot, est très élevé et voisin de 80 %. De nombreux travaux ont fait connaître la nature et l'abondance statistique de l'exsudat volcanique. L'exsudat solide est de l'ordre du kilomètre cube par an et la quantité

d'eau mise en œuvre est mille fois plus grande. Cette eau est si abondante que toute l'hydrosphère passerait dans le cycle volcanique en quelques Méga-ans seulement. Elle ne saurait donc être juvénile, contrairement à l'opinion de Suess.

Il en est de même pour la plupart des nombreux produits de l'exhalaison volcanique : sels alcalins, alcalino-terreux et terreux et halogènes marins. Cependant, le gaz carbonique, les hydrocarbures, l'ammoniac et l'azote, qui sont absorbés dans des cycles biogènes, sont juvéniles.

Ces données permettent d'estimer l'énergétique du volcanisme et l'on trouve que ce phénomène est capable d'utiliser toute l'énergie interne non accusée par le gradient géothermique. On conçoit ainsi que le volcanisme ait pu présenter des périodes de paroxysme au cours des époques géologiques. Il évacue, en effet, une grande quantité de chaleur interne qui n'est apportée que fort lentement, par les très lents courants de convection magmatiques. Il affecte ainsi un *cycle de relaxation*, d'intensité décroissante et de durée croissante avec l'épuisement des radioéléments. Ce cycle est de l'ordre des centaines de Méga-ans.

On doit au volcanisme la formation d'un grand nombre de filons et de gîtes minéraux, déposés dans les failles par les fumerolles. Mais on lui doit surtout le maintien de la vie à la surface du Globe. Nous avons déjà vu quelle avait été l'histoire cosmique et géochimique du carbone et comment il échappait au cycle biogène en combustibles fossiles et, surtout, en sédiments calcaires, en coraux et en dolomies. C'est le gaz carbonique juvénile issu du volcanisme qui entretient la vie sur notre planète. Mais c'est aussi le volcanisme qui entretient la vie marine en assurant la constance de l'alcalinité des eaux océaniques par le « cycle volcanique du sel ».

Boyle (1673) croyait que les océans primitifs étaient d'eau douce et qu'ils devaient leur salure progressive à l'apport salin fluvial. Behrend a aussi suggéré que cette salure avait

été progressive, mais il l'attribuait à l'exhalaison volcanique. Cependant J. Joly, cherchant à estimer, par cette méthode du sel, l'âge des océans, trouvait, au début du siècle, un âge d'une centaine de millions d'années, en opposition complète avec l'âge des minéraux, attesté par les halos pléochroïques du mica. Les océans ne renferment pas assez de sodium, compte tenu du ruissellement et de la dénudation des massifs feldspathiques. Ils renferment, par contre, beaucoup trop de chlore, en fait, la plus grande partie des halogènes terrestres. C'est l'*énigme du sel*, soulignée par P. Termier. On ne saurait imaginer un « cycle météorologique » du sel, les embruns marins étant purement locaux. En outre, l'apport fluvial n'a nullement la nature de la salinité océanique. Les bassins isolés, comme la Mer Morte, montrent des salures fort différentes de celle de l'eau de mer.

Nous avons suggéré un « cycle volcanique du sel », basé sur le cycle volcanique de l'eau et sur les propriétés remarquables de l'eau hypercritique. Les eaux océaniques, qui pénètrent par les failles sous-océaniques recouvertes par les séismes, jusqu'à la profondeur de 13 kilomètres, s'y transforment, sans bouillir, en eau hypercritique capable de dissoudre et de transporter à l'état gazeux tous les sels qu'elle renferme.

Pénétrant par diffusion thermique, jusqu'au magma incandescent, les halogénures réagissent sur la silice, elle-même en solution dans cette eau, en produisant des hydracides et des silicates qui s'incorporent au magma. Ces réactions endothermiques ont lieu en phase gazeuse. Les halogènes retournent à l'océan sous forme de *fumerolles acides*, tandis que les alcalins sont retenus. Ainsi les alcalins, continuellement apportés aux océans par les fleuves, sont-ils soustraits au milieu marin, tandis que les halogènes parcourent un cycle fermé. On explique ainsi la concentration du bore et des halogènes dans les océans.

Mais la vie marine exige, pour son maintien, un strict équilibre de l'alcalinité. Il doit donc exister, de même, un cycle parfaitement fermé du sodium. Or les silicates alcalins solubles dans l'eau hypercritique et véhiculés par les courants magmatiques internes, donnent lieu à des *fumerolles alcalines*. Celles-ci pénétrant à la base des géosynclinaux où sont enfouies les argiles kaoliniques, sous des sédiments profonds, à des températures excédant 300° C et sous des pressions atteignant 2 500 atmosphères, y reconstituent le quartz, les feldspaths alcalins, le mica, le pyroxène et l'amphibole, en un mot, les minéraux des *granites*, qui avaient été détruits par l'action du gaz carbonique et l'érosion atmosphérique. Le thermalisme ramène aussi à la surface de la lithine, du borax et du natron. Ainsi la vie marine est-elle suspendue à ce cycle volcanique du sel depuis près de 4 milliards d'années. La théorie se prête à des observations comparées sur l'exsudat des volcans continentaux et marins et à des recherches expérimentales sur la ségrégation isotopique des halogènes du soufre et du potassium.

La première croûte continentale terrestre était vitreuse, légère et acide, vraisemblablement de la nature des tectites et des obsidiennes. Lors de la formation d'une atmosphère d'eau hypercritique, tenant en solution de la silice et des halogénures alcalins, elle a subi la même évolution chimique à des températures excédant 300° C et sous des pressions supérieures à 300 atmosphères et s'est transformée en gneiss et en granites. Les fonds océaniques inondés, au contraire, de laves périclites alcalines, n'ont pas donné naissance au granite. Leur nature spéciale est confirmée par la séismologie, la gravimétrie et le magnétisme.

De nombreuses théories ont été suggérées pour rendre compte du volcanisme. Elles sont inadéquates tant qu'elles ne font pas appel à l'énergie nucléaire et au cycle de l'eau hypercritique. Cependant, J. Noetzelin en 1939 a suggéré une inté-

ressante hypothèse, basée sur la scission nucléaire de grandes concentrations locales de radioéléments, par réactions en chaînes sous l'influence de neutrons. Mais de telles concentrations, dépourvues de toute trace d'éléments neutrophages, sont hautement improbables. Les régions volcaniques ne sont pas celles où se constituent les filons radioactifs et les exsudats ne sont pas particulièrement actifs. Le volcanisme devrait alors toujours affecter un caractère explosif, ce qui n'est pas le cas. Enfin, l'observation n'a pas confirmé la présence de radioéléments à vie brève dans les exsudats. C'est bien l'énergie nucléaire qui est la source de la chaleur interne et du volcanisme, mais c'est une énergie diffuse de très faible densité, dispersée dans toute la masse du Globe.

VOLCANISME ET OROGÉNÈSE

Nous devons examiner maintenant les effets géodynamiques grandioses du volcanisme. Nous avons vu comment la pression magmatique interne originelle avait donné naissance aux reliefs lunaire et terrestre primitifs. Le volcanisme géologique poursuit cette œuvre en créant des « remparts lunaires » d'un nouveau genre : à savoir nos chaînes de montagnes.

Elie de Beaumont, Lowthian Green et d'autres, ont voulu coordonner géométriquement le relief terrestre en considérant les montagnes comme l'« ossature », le « squelette », des continents, alors que ce ne sont que des rides éphémères et marginales à la surface du plateau continental. On estime la valeur actuelle de l'érosion mondiale à $4,5 \text{ km}^3/\text{an}$ et, à ce taux, les chaînes seraient complètement nivelées en quelques dizaines de millions d'années.

Comme l'a montré J. D. Dana au siècle dernier, les chaînes

sont essentiellement constituées de sédiments marins lentement accumulés dans les géosynclinaux des mers épicontinentales, charriés, soulevés et plissés par des pressions tangentielles issues des fosses océaniques et méditerranéennes contiguës. Comme nous avons attribué la subsidence de ces bassins abyssaux au volcanisme océanique, nous attribuons l'orogénèse à cet effet. Tandis que les laves et les coraux surchargent localement les socles océaniques, les cendres et les dépôts biogènes constituent la surcharge des sédiments abyssaux. Il résulte de la sphéricité des corps célestes, que toute aire océanique, en forme de calotte convexe, engendre en s'effondrant, des pressions marginales dans le bord du plateau continental, lieu des mers épicontinentales.

Le problème peut être traité géométriquement, ainsi que dans le cas de la formation de remparts, par la subsidence d'un cirque lunaire. Connaissant l'exsudat volcanique solide mondial statistique, de l'ordre du kilomètre cube par an, on peut calculer une subsidence moyenne de l'ordre de quelques mètres par Méga-ans, entraînant l'érection de chaînes bordières de plusieurs kilomètres d'altitude, en un cycle de quelques centaines de Méga-ans. Il en résulte que, depuis 4 milliards d'années, les socles sous-océaniques se sont déjà effondrés de plusieurs kilomètres, fait mis en évidence par la découverte récente, lors des campagnes océanographiques de H. Pettersson, de sédiments océaniques puissants de plusieurs kilomètres.

Cette subsidence générale justifie la célèbre théorie des atolls de Ch. Darwin, confirmée d'une manière éclatante par la découverte récente de nombreux guyots. Elle entraîne, en outre, la flexure des rivages du type Atlantique, de Suess, et la formation des estuaires fluviaux fossiles profondément engloutis, tel le célèbre Gouf de Cap-Breton.

On peut montrer que le travail effectué par la machine volcanique, aussi bien pour remonter les laves d'une cinquan-

taine de kilomètres, que pour charrier, soulever et plisser les chaînes de montagnes, n'est qu'une faible fraction de l'énergie mise en œuvre dans le cycle volcanique de l'eau. La masse des montagnes est très inférieure à celle de l'exsudat volcanique et elles ne sont élevées que d'une dizaine de kilomètres.

De nombreuses théories orogéniques ont été proposées, depuis l'hypothèse de la contraction thermique de Descartes, jusqu'à celle de « l'écoulement » par gravité. Elles sont toutes inadéquates du point de vue énergétique et aucune ne rend compte de la *localisation* des chaînes. En l'absence d'érosion, le relief est absolument stable, comme le montre la conservation parfaite du relief lunaire depuis près de 4,5 milliards d'années. Le fluage thermique ne débute, en présence de l'eau hypercritique, qu'aux températures supérieures à 800° C soit aux profondeurs excédant — 50 kilomètres.

Ainsi les deux sources d'énergie qui modèlent la face de la Terre sont en définitive, la *radioactivité* de la lithosphère, qui engendre le volcanisme et l'orogénèse et le *rayonnement solaire*, qui engendre l'érosion et la sédimentation. Le cycle volcano-orogénique est une oscillation de relaxation contrôlée par la chaleur interne et la vitesse des courants magmatiques. L'érosion tend à niveler les continents et à restaurer l'équilibre isostatique. Si le volcanisme cessait d'exister, la « meule météorologique » nivellerait bientôt les chaînes, le potentiel gravifique serait minimum et le Globe prendrait la forme d'un ellipsoïde parfait, aux fosses océaniques près. L'orogénèse serait arrêtée et l'on voit que, pour qu'elle persiste, il faut faire appel à une énergie interne qui est la radioactivité. Toutes les théories négligeant ce facteur sont nécessairement inadéquates. Dans l'avenir, le relief terrestre ira en s'atténuant avec l'épuisement des radioéléments naturels.

VOLCANISME ET GÉOMAGNÉTISME

Nous avons attribué le magnétisme terrestre à l'aimantation fossile acquise par les minéraux ferro-magnétiques du magma superficiel lors de leur passage par leurs points de Curie, au cours du refroidissement cosmique. La Terre gravitait, en effet, comme aujourd'hui, dans le champ magnétique cosmique engendré par les rayonnements corpusculaires issus du Soleil. La magnétite prenait naissance en même temps que l'eau et il existe une relation numérique entre la masse des océans et le moment magnétique du Globe. Nous traitons ainsi l'écorce terrestre, comme la brique argileuse qui est cuite dans un champ magnétique et en conserve une aimantation thermo-rémanente permanente et durable.

C'est ainsi que les anomalies magnétiques locales sont dues à des intrusions profondes ou superficielles de laves volcaniques et à des gisements de minerais ferro-magnétiques.

Par suite de la chaleur interne, ce ferro-magnétisme est tout à fait superficiel, le point de Curie de la magnétite étant atteint vers 580° C, température régnant vers — 22 kilomètres sous les continents et — 27 kilomètres sous les océans. Les socles océaniques jouent un rôle prépondérant dans le géomagnétisme, comme H. Wilde l'avait montré en 1891 avec son Magnetarium, par suite de la richesse en magnétite des laves ferrugineuses dont ils sont constitués. Cette interprétation permet de rendre compte de la *variation séculaire* du géomagnétisme. Le champ magnétique en un lieu varie rapidement en grandeur et en direction et l'effet statistique de toutes ces variations élémentaires conduit à un déplacement des pôles et une variation du moment magnétique du Globe. Depuis un siècle, le géomagnétisme a diminué de 7 % et une

variation aussi énorme et aussi rapide ne saurait s'interpréter en dehors des considérations ci-dessus. Si l'épaisseur aimantée de la croûte terrestre est aussi faible que 25 kilomètres, on conçoit que de faibles variations du niveau de l'isotherme 580° C suffisent à produire localement une forte variation magnétique, comme l'a montré Bidlingmaier en 1910. Le géomagnétisme est contrôlé par la chaleur interne et l'on peut concevoir une relation entre la variation séculaire et le volcanisme, déjà confirmée par l'observation.

Cette interprétation « fossile » du magnétisme terrestre semble confirmée par l'existence de nombreux dykes de lave de différents âges géologiques, répartis sur toute la Terre, aimantés en *sens inverse* du champ terrestre. B. Brunhes a montré, en 1905, que ces inversions n'étaient dues, ni au retournement des dykes, ni à leur nature minéralogique et que, par exemple, un banc d'argile miocène, *cuit* en place par une coulée basaltique le recouvrant, présentait la même inversion que le basalte. Nous avons suggéré en 1948 que ce magnétisme inverse durable et exceptionnel, était dû au renversement momentané du champ magnétique cosmique dans lequel s'est trouvé le Globe lors du passage par leur point de Curie de ces minéraux. Ce renversement peut être dû à deux causes distinctes : soit à des orages magnétiques d'une intensité exceptionnelle, soit plutôt à une dérive lente d'*ensemble*, de toute la croûte terrestre, par rapport à l'axe de rotation du Globe demeurant fixe, et amenant la région considérée dans l'hémisphère opposé, par rapport au plan de l'écliptique. S'il en est bien ainsi, ce phénomène si mystérieux du magnétisme local inverse, rentrerait simplement dans le mécanisme suggéré de l'entretien cosmique du géomagnétisme.

Ainsi, le géomagnétisme est apparu lorsque les laves inondant les « mers lunaires » de la Terre juvénile se sont refroidies vers 580° C. C'est un magnétisme fossile, qui a débuté il y a 4 milliards d'années et a augmenté asymptoti-

quement jusqu'à sa valeur présente, lorsque cette surface isotherme a atteint la profondeur limite d'une trentaine de kilomètres. Il est entretenu par le jeu de l'activité solaire et les variations de niveau de cette surface qui provoquent la variation séculaire.

VOLCANISME ET BIOSPHÈRE

C'est grâce à l'exhalaison volcanique, apportant à la biosphère le gaz carbonique et l'azote juvéniles, que la vie persiste à la surface du Globe. Nous avons vu aussi comment le cycle volcanique du sel permettait, en assurant l'équilibre de l'alcalinité océanique, le maintien de la vie marine. Mais c'est le paléo-volcanisme qui, en fournissant aux océans primitifs, le gaz carbonique et l'ammoniac, a permis la genèse photochimique de la vie.

E. Desguin et l'auteur ont montré, en 1939, sur la base du chimisme cosmique du Globe et en se fondant sur les photosynthèses ultraviolettes des composés organiques ternaires et quaternaires, réalisées, en 1910, par D. Berthelot et H. Gauduchon, comment les eaux chaudes primitives s'étaient bientôt recouvertes de bancs de matières organiques gélatineuses et comment avait pris naissance notre atmosphère d'oxygène libre. La théorie rend compte de l'apparition de *macromolécules asymétriques*, qui ont conditionné l'apparition de la vie et dont le rôle est fondamental ainsi que l'a montré L. Pasteur.

Dans ces synthèses, l'acide phosphorique et les nombreux éléments indispensables à la vie étaient trouvés d'emblée dans les eaux marines, dont la salure et l'alcalinité sont demeurées invariables. Les noyaux hétérocycliques, nécessaires

à l'édification de macromolécules essentielles, étaient trouvés dans les pyrosynthèses qui s'étaient antérieurement effectuées, au cours du refroidissement cosmique à partir des hydrocarbures. La vie a débuté par une fermentation anaérobie, dès l'apparition des acides adénosine-phosphoriques et de quelques dizaines d'enzymes. Dans ce milieu vivant, bien que privé encore d'organismes, des macromolécules à base d'acide désoxyribonucléique douées de continuité génétique ont pu se reproduire. Ainsi, la vie débuta, non par l'apparition d'êtres vivants autotrophes, mais, au contraire, hétérotrophes, qui trouvèrent dans cette formation géologique organique d'un nouveau genre, une nourriture assurée.

De nos jours, le volcanisme joue encore un très grand rôle biogène en alimentant la biosphère en *oligo-éléments* indispensables à la vie. Le magma avons-nous vu, est un milieu fluide, brassé depuis des milliards d'années par de lents courants de convection. Tous les éléments chimiques y sont présents, au moins à l'état de traces. Ainsi peut-on concevoir la fertilité des régions volcaniques.

CHAPITRE PREMIER

L'ORIGINE DU SYSTEME TERRE-LUNE

Nous montrerons, dans ce chapitre, comment les problèmes de l'origine de la Terre et de la Lune sont inséparables et doivent être situés dans le cadre de l'origine du système solaire. Nous situerons, de même, ce dernier dans le problème, plus général, de l'évolution de l'Univers.

I. — L'ÉVOLUTION DE L'UNIVERS

La cosmogonie est aujourd'hui basée sur la connaissance de l'architecture de l'Univers et l'abondance cosmique des éléments chimiques. Cette abondance est un effet statistique valable pour la Galaxie, mais elle peut varier d'une étoile à une autre, selon son âge et son type spectral. Elle découle des travaux spectrographiques relatifs à l'abondance à la surface du Soleil et des divers types stellaires, dans la matière interstellaire, les nébuleuses, les planètes, les comètes et les météores. L'étude chimique statistique des diverses classes de météorites et la géochimie, complètent ces informations. Enfin,