

Zeitschrift: Archives des sciences [1948-1980]
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 30 (1977)
Heft: 1

Artikel: Volcanisme lunaire et origine des planètes
Autor: Rittmann, Alfred
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-739806>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 30.06.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

VOLCANISME LUNAIRE ET ORIGINE DES PLANÈTES

PAR

Alfred RITTMANN

GÉNÉRALITÉS SUR LE VOLCANISME LUNAIRE

Jusqu'à l'alunissage des astronautes en 1969, il était généralement admis que les cratères et même les « mers » (« Maria ») de la Lune étaient dus à l'impact de météorites, selon l'hypothèse, alors très à la mode, de Urey (1952, etc.) sur l'origine des planètes par agglomération de météorites (« Accretion model »). L'étude des échantillons de roches lunaires rapportés par les astronautes américains et par une sonde spatiale russe a démontré depuis lors que la plupart de ces roches étaient des laves basaltiques. Ainsi, l'ancienne hypothèse considérant les cratères de la Lune comme des volcans n'est donc pas complètement erronée comme l'affirment certains sélénologues et géophysiciens modernes.

Jusqu'à ces dernières années, un grand nombre de géologues comparaient les cratères de la Lune avec ceux des volcans terrestres en ne se basant que sur les analogies morphologiques, sans tenir compte du fait que les dimensions et les conditions du milieu sont fondamentalement différentes. Les Champs Phlégréens par exemple ont souvent été décrits comme un « paysage lunaire » ce qui est évidemment une comparaison malheureuse. Si l'on veut comparer raisonnablement les cratères lunaires avec ceux de nos volcans terrestres, on ne doit jamais oublier que la gravité sur la Lune est six fois plus petite que sur la Terre et que ce satellite ne possède ni atmosphère ni hydrosphère. En conséquence, les magmas basaltiques de ce dernier doivent être certainement plus basiques, plus chauds et partant plus fluides que ceux qui font éruption sur la Terre. Les phénomènes éruptifs ne peuvent donc être que très différents dans les deux cas, de même que les édifices volcaniques qui en résultent.

Le fait que beaucoup de basaltes lunaires sont vacuolaires prouve que les magmas lunaires contenaient des gaz en solution comme les magmas terrestres. On doit donc admettre que le principe fondamental du mécanisme éruptif doit être le même sur la Lune et sur la Terre. Supposant un magma d'égal contenu en gaz (substances volatiles), la quantité de pyromagma éruptible doit être sur la Lune au moins six fois plus

grande que sur la Terre, son dégazage étant d'ailleurs beaucoup plus facile. Il s'ensuit qu'une fontaine de lave de type hawaïien doit avoir sur la Lune un caractère bien différent. Par suite de la gravité moindre et de l'absence d'atmosphère, le dégazage devait être très violent sur la Lune et le magma pulvérisé. Les cendres ainsi formées étaient éjectées à très grande altitude et retombaient sans triage sur un vaste territoire. Il semble donc probable que la régolithe (sol lunaire incohérent) soit partiellement due à de telles cendres à côté de débris et de poussières dérivant de l'écrasement des roches par l'impact de météorites. Dans la régolithe, on trouve parfois jusqu'à dix pour-cent de petites sphères vitreuses provenant de gouttes de lave liquide ou de roches fondues par impact. Leur forme parfaitement sphérique est due à la tension superficielle. Elles correspondent aux « larmes de lave » du Kilauea dont les queues filiformes, dites « cheveux de Pélé », se forment par suite du frottement dans l'air.

Sur la Lune, les coulées de lave ont pu parcourir des distances énormes en fonction des facteurs suivants: très fort débit, très grande fluidité, température élevée, refroidissement extrêmement lent et friction très réduite vu la faible gravité, la lenteur du refroidissement étant due à l'absence d'atmosphère. En effet, sur la Lune, la perte de chaleur à la surface de la coulée se fait uniquement par rayonnement, alors que sur la Terre elle est beaucoup plus forte par suite du transport de chaleur par les courants de convection de l'air réchauffé par la coulée. Le substratum des coulées lunaires étant formé de matériel poreux et sec dont les interstices sont complètement vides, est très réfractaire. La perte de chaleur par conduction est donc très faible sur la Lune. Sur la Terre les surfaces sur lesquelles s'épandent les coulées sont souvent humides et les interstices de leur matériel sont remplis d'air. L'évaporation de l'eau soustrait à la coulée la chaleur latente d'évaporation, ce qui accélère considérablement le refroidissement.

Les dimensions énormes des coulées lunaires et la lenteur de leur refroidissement favorisent la formation de canaux de lave et de tunnels dont le toit s'écroule facilement. Les canyons méandriformes qui en résultent sont bien visibles sur la Lune. Certains ont à leur origine un petit cratère. Parfois on constate sur leur tracé des interruptions, de larges « ponts », le toit du tunnel ne s'étant pas écroulé.

Il me semble très probable que l'évolution des magmas lunaires a eu pour conséquence la formation de magmas résiduels très visqueux et très riches en gaz susceptibles de produire des volcans coniques et des laves mousseuses (« foam lava »). Au front d'une coulée de « foam lava » débordant d'un cratère, les bulles de gaz éclatent et transforment la lave en une suspension de ponces et de cendres flottant dans des gaz incandescents, ressemblant à une espèce de nuée ardente. La brusque expansion des gaz dans la partie centrale du front de la coulée confère à la nuée une forte poussée en direction radiale par rapport au cratère. Ne trouvant aucune résistance celle-ci se déplace en droite ligne à très grande vitesse et dépose peu à peu son matériel en suspension. A mon avis, c'est ainsi qu'on pourrait expliquer l'origine

des rayons des cratères lunaires comme, par exemple, ceux de Tycho, de Kepler, de Copernicus, d'Aristarchus, etc. (Rittmann, 1971).

Quant aux cratères lunaires de plus grande dimension on ne doit pas les comparer avec les cratères des volcans terrestres mais avec les caldeiras d'effondrement de type hawaïen présentant également des failles circulaires en échelon, comme, par exemple, celle du Halemaumau au Kilauea. Le fait que les dimensions des cratères lunaires sont en général beaucoup plus grandes s'explique par la différence établie entre les phénomènes éruptifs lunaires et terrestres dont nous avons déjà parlé. En ce qui concerne les « Maria » elles sont tout à fait comparables à nos plateaux basaltiques.

Rappelons encore qu'il a été observé sur la Lune des phénomènes pouvant être interprétés comme des éruptions volcaniques. Ainsi Kozyrev a réussi à mettre en évidence à partir de spectrogrammes des éruptions dans les cratères Alphonsus en 1958 et Aristarchus en 1959. D'après ces spectrogrammes il en déduit qu'il s'agissait d'éruptions de gaz incandescent (hydrogène) et probablement d'une effusion de lave à la température de 900-950° C. En juillet 1969 un point lumineux a été observé dans le cratère Aristarchus simultanément par les astronautes d'Apollo 11 et par l'Observatoire de Bochum en Allemagne. C'est dans ce même cratère que depuis le XVIII^e siècle on a observé des phénomènes analogues quelques dizaines de fois. Il semble donc très probable que le volcanisme lunaire est encore actif de nos jours.

NATURE ET AGE DU MATÉRIEL LUNAIRE

Selon leur composition minéralogique et chimique, leur structure et leur provenance, on peut classer les roches lunaires comme suit :

- A. Anorthosites jusqu'à gabbros (basaltes) des « continents » (high-lands) de la Lune.
- B. Basaltes des « Maria » (low-lands).
- C. Roches de composition pegmatitique.
- D. Brèches et microbrèches constituées par des fragments des roches A, B et C, fracassées par l'impact de météorites.
- E. Régolithe = sol lunaire incohérent, provenant du mélange des roches précédentes avec moins d'un pour-cent de fragments de météorites et localement jusqu'à dix pour-cent de petites sphères vitreuses.

L'âge absolu de ces formations a été établi pour la série anorthositique (A) à environ 4,7 milliards d'années, pour la série des basaltes des « Maria » (B) à environ 3 à 4 milliards d'années et pour les roches acides (C) à environ 4,6 milliards d'années. Ces dernières seraient donc plus anciennes que les basaltes des « Maria » (B). Les

anorthosites et les roches associées représentent selon toute probabilité la première lithosphère de la Lune dont la formation aurait été terminée avant 4,6 milliards d'années. Selon les données actuellement à notre disposition, les grands épanchements basaltiques des « Maria » ont dû commencer au moins 600 millions d'années plus tard. On trouvera la composition minéralogique de quelques échantillons caractéristiques dans notre figure 1 (R — norme, Rittmann 1973).

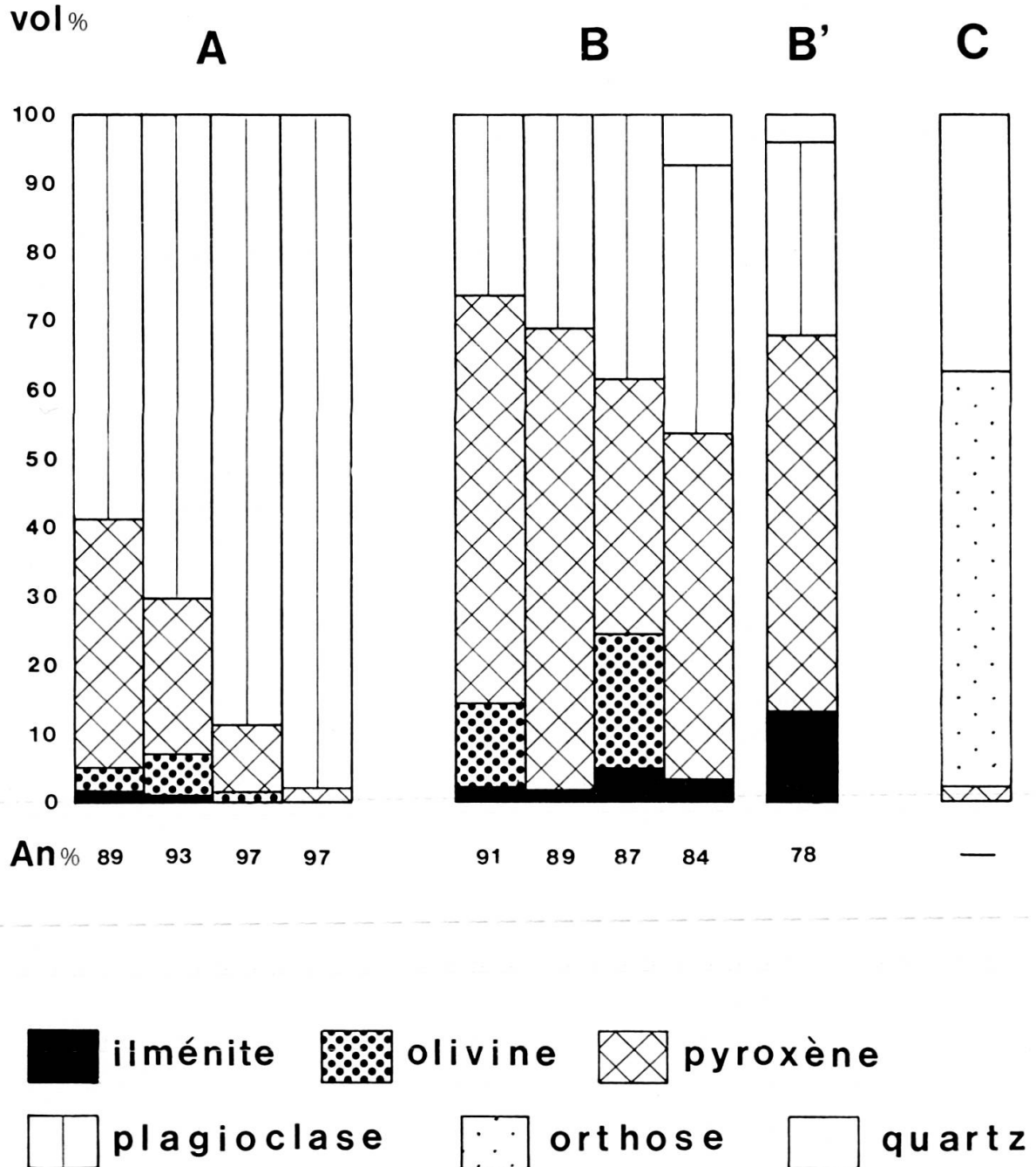


FIG. 1. — Composition minéralogique de quelques roches lunaires typiques

A. Série anorthosique-basaltique des « continents ».

B. Série basaltique des « Maria »; B' riche en ilménite.

C. Roches acides pegmatitoïdes.

L'examen plus poussé des roches lunaires a amené les spécialistes à la conclusion que l'on avait affaire à deux séries de roches volcaniques engendrées par la cristallisation fractionnée de magmas basiques. Quant à la différenciation gravitationnelle, les deux séries montrent une différence fondamentale. Selon les lois thermo-dynamiques bien établies par la pétrologie expérimentale, les premiers plagioclases qui se forment après l'olivine et le pyroxène sont les plus riches en anorthite. Dans une série de différenciation normale on a donc une diminution contemporaine du contenu en anorthite du plagioclase et de l'indice de couleur (pourcentage des minéraux femiques). C'est ce que l'on constate dans les magmas différenciés terrestres et c'est ce que l'on a constaté dans la série (B) des basaltes des « Maria » de la Lune. Par contre, dans la série des anorthosites (A) ces deux paramètres sont antithétiques, c'est-à-dire que lorsque le pourcentage d'anorthite des plagioclases diminue, l'indice de couleur augmente (voir fig. 1). Les membres anorthositiques de la série se sont donc formés avant les membres plus riches en éléments femiques. La seule explication possible de ce fait est la suivante: dans un magma très basique se sont formés des cristaux d'olivine et de pyroxène qui par différenciation gravitationnelle s'accumulèrent en profondeur en formant des cumulithes. Au moment où la composition du magma résiduel eut rejoint la ligne cotectique pyroxènes-plagioclases commença la cristallisation des plagioclases qui, étant plus légers que le magma, flottèrent en surface et formèrent des épicumulithes. Celles-ci, après refroidissement, constituèrent la première croûte solide de la Lune. En s'accroissant vers le bas, cette lithosphère primitive s'enrichit en minéraux femiques associés à des plagioclases moins basiques.

La comparaison des roches lunaires avec leurs correspondants terrestres révèle, entre autres, deux faits très significatifs: l'absence de fer ferrique (et partant absence de magnétite) et une grande pauvreté en sodium, dans toutes les roches lunaires (voir An % dans la fig. 1).

Les faits très résumés qui précèdent — auxquels on pourrait ajouter de nombreux détails — permettent de conclure que la Lune, passé son état de fusion, a été recouverte, il y a environ 4,7 milliards d'années, par une croûte d'anorthosite-basalte sur laquelle se déposait probablement une couche de roche acide. Six cents millions d'années plus tard commença une longue série d'effusions basaltiques. Il semble probable qu'aujourd'hui encore il existe sous la lithosphère lunaire du magma liquide capable de donner lieu à des éruptions. Par rapport à ce formidable volcanisme l'ensemble des chutes de météorites qui ont produit d'innombrables cratères d'impact est bien peu de chose, ce qui d'ailleurs est confirmé par la rareté de matériel météoritique dans la régolithe lunaire.

La grande importance du volcanisme cosmique vient d'être également mise en évidence par les excellentes images de la surface de Mars transmises récemment par la sonde américaine « Mariner 9 ». On y voit de gigantesques volcans à bouclier dont le plus grand a été nommé « Mons Olympus ». Ce dernier présente à sa base un diamètre de 500 à 600 km, sa hauteur étant de 23 000 m! A son sommet existe un

cratère d'effondrement complexe. Trois autres volcans du même type ont des diamètres d'environ 400 km et des hauteurs d'environ 19 km (± 3 km). L'« Alba Patera » est un plateau basaltique ayant un diamètre de 1600 km. De plus, on y a repéré beaucoup d'autres volcans moins grands. On a également pu remarquer que la surface de Mars était aussi criblée de petits cratères d'impact. Leur distribution a permis d'estimer l'âge des différentes formations et de conclure que le volcanisme martien doit avoir été actif pendant toute l'histoire de cette planète.

Le volcanisme terrestre peut sembler être relativement moins important que celui de Mars. Mais cette impression est erronée car on sait que sur la Terre les formations volcaniques anciennes ont été érodées ou métamorphisées pendant les orogènes, alors que sur la Lune, même celles datant de 4 milliards d'années sont encore bien conservées. Il n'y a donc pas de doute que le volcanisme joue un rôle de tout premier ordre dans l'évolution des planètes. Toute spéculation cosmogonique doit en tenir compte.

« ACCRETION MODEL » ET HÉLIOGÉNIE

Le fameux « Accretion model », si brillamment exposé par son auteur (UREY, 1952 et suivant) a été accepté en son temps avec enthousiasme par les géophysiciens et les géochimistes et — par voie de conséquence — par la plupart des géologues. Les quelques géologues et volcanologues qui émirent des critiques furent considérés par les « accretionists » comme des naturalistes dépassés. On inventa même des hypothèses « ad hoc » sans fondement pour répondre à leurs objections. Pour expliquer par exemple la haute température des magmas, on supposa que les météorites qui s'aggloméraient étaient très radioactives par suite de la présence d'éléments radioactifs de très courte vie. Mais la nature même des météorites et en particulier et surtout celle des achondrites, qui sont le produit d'une différenciation magmatique dans un champ de gravité planétaire, parle contre cette hypothèse d'appui improuvable, les éléments de courte vie ayant été détruits longtemps avant l'accrétionnement de la Terre. S'il est improbable que l'on puisse trouver une solution au problème de la fusion d'une Terre froide à l'origine, pour la Lune, dont la masse est 81 fois plus petite, ce problème est absolument insoluble avec le modèle de l'accrétionnement météoritique. En outre, ce modèle ne permet pas une explication plausible de la bimodalité du volcanisme terrestre et de l'origine de la croûte continentale sialique. A propos de ce dernier problème, l'hypothèse suivante a été proposée: il y aurait eu une fois de gigantesques météorites de composition granitique qui, en tombant sur la Terre déjà formée par l'accrétionnement de météorites normales, s'écrasèrent à sa surface donnant ainsi naissance aux continents (Donn et al. 1965). Ce « modèle de l'œuf au plat » montre à quel degré de « science fiction » on peut arriver pour défendre à outrance une hypothèse devenue un dogme pour certaines personnes.

Voyons maintenant l'hypothèse généralement admise. Celle-ci affirme que le Soleil s'est formé par l'agglomération de poussière cosmique et de gaz d'une nébuleuse aplatie qui s'étendait au-delà des orbites actuelles des planètes. Cette hypothèse n'implique pas nécessairement que les planètes se soient formées de la même façon. On peut en effet aussi supposer que les planètes se sont développées à partir de matière solaire détachée du Soleil (ou d'un compagnon du Soleil). Cette hypothèse d'une origine « chaude » des planètes a été proposée en 1941 par Kuhn et Rittmann, de même que celle de l'évolution pré-géologique qui en est la conséquence et qui explique l'origine des magmas et celle de la croûte continentale (Rittmann 1948 et 1963). Cette hypothèse « chaude » n'est pas plus fantaisiste que l'hypothèse « froide » de l'agglomération de météorites dont elle offre une alternative possible. Examinons donc si cette hypothèse peut expliquer d'une façon plausible l'origine, l'évolution et l'état actuel de la Lune.

L'évolution d'une masse de matière solaire isolée dans l'espace peut être déterminée en appliquant les lois de la physique et de la physico-chimie à une sphère de gaz polytrophe à température initiale très élevée. Au début, la déperdition des éléments ionisés est d'autant plus grande, que le poids atomique et le potentiel d'ionisation sont plus petits et que surtout le champ de gravitation de la sphère gazeuse est plus faible. Il s'ensuit que la composition moyenne d'une planète est fonction de sa masse. Ainsi, par rapport à la Terre, la Lune devait être appauvrie en éléments légers, en particulier en sodium si facilement ionisable. Cette prévision théorique (1960) a été pleinement confirmée par les analyses des roches lunaires (1970, etc.).

Le refroidissement très rapide des couches externes de la sphère gazeuse est la cause de la transformation des ions en atomes et en molécules, puis de la condensation des molécules silicatées les plus réfractaires qui constituent une enveloppe de magma basaltique très fémique et pauvre en alcalis. Au-dessus du magma, les gaz non condensés forment une « pneumatosphère » puis se perdent peu à peu dans l'espace.

L'abaissement de la température en surface engendre la cristallisation fractionnée du magma et provoque la formation d'une croûte solide composée, comme nous l'avons vu, d'anorthosites et de roches basaltiques associées. La pneumatosphère se dissipant dans l'espace et ne pouvant plus tenir en solution les molécules silicatées, dépose rapidement par sublimation du quartz et de l'orthose sur la lithosphère. En raison de la basse pression de vapeur (P_{H_2O}), la formation de mica est impossible et les cristaux de quartz et d'orthose sont très petits. La formation de pegmatites typiques semblables à celles que l'on trouve sur la Terre n'est guère probable. Ainsi, parmi les roches des « continents » lunaires on a trouvé, selon les américains, quelques échantillons « granitiques ». Un exemple typique d'une telle roche constitue le ciment d'une brèche comportant de gros fragments de basalte. En coupe mince, ce ciment a l'aspect d'un micro-granophyre et semble être constitué d'un matériel relativement incohérent (Drake et al. 1970). D'après sa composition et sa structure, ce matériel

étrange pourrait bien être un échantillon du dépôt de la pneumatosphère éphémère de la Lune. Sa composition chimique est celle d'une pegmatite particulièrement potassique et relativement riche en baryum ce qui s'accorde bien avec cette interprétation.

Il est possible qu'après le dépôt de ce matériel pegmatitoïde ait encore subsisté un résidu de vapeur d'eau qui se précipita alors rapidement comme une pluie chaude sur la surface de la Lune. Cela expliquerait les restes de ravins d'érosion que l'on croit avoir observé. Mais cette hydrosphère embryonnaire s'est rapidement évaporée, se perdant dans l'espace avec les gaz encore présents ou libérés par les volcans.

Avec cette dernière phase, l'évolution présélénologique de la Lune est terminée.

L'absence d'atmosphère et d'hydrosphère sur la Lune exclut l'érosion et la sédimentation et par conséquent les orogénèses. Seuls le volcanisme et l'impact de météorites ont pu modifier ultérieurement sa morphologie générale. Mais à propos du volcanisme lunaire il se pose encore un autre problème : pourquoi les grands épanchements basaltiques ont-ils eu lieu presque exclusivement sur l'hémisphère visible, cela après une longue période de relative tranquillité ?

La solution la plus probable de ce problème est la suivante : à l'origine, la Lune était une petite planète en rotation. Après la formation de sa lithosphère il n'y eut pas de mouvements tectoniques capables de produire des fissures abyssales le long desquelles le magma fémique subcrustal aurait pu monter en surface. Lorsque la Lune fut captée par le champ de gravitation terrestre, les forces d'attraction freinèrent sa rotation et provoquèrent une déformation de celle-ci. Son centre de gravité fut déplacé et sa lithosphère soumise à des tensions telles que celles-ci furent à l'origine d'une tectonique cassante et de l'effusion du magma subcrustal. Si cette explication est correcte, la capture de la Lune aurait eu lieu il y a environ 4 milliards d'années.

CONCLUSIONS

Ainsi, selon notre hypothèse, l'intérieur de la Lune doit donc être constitué d'une épaisse enveloppe magmatique subcrustale contenant des zones de cumolithes périclinitiques. En profondeur la température doit augmenter rapidement et le magma passer graduellement au noyau formé de gaz comprimés. Originellement le noyau interne devait être fortement ionisé. Par suite du refroidissement progressif, durant des milliards d'années, l'épaisseur de la lithosphère et de la zone magmatique augmenta alors que le noyau se rétrécissait et que l'ionisation diminuait de plus en plus dans le noyau interne.

Ce modèle — que certains lecteurs jugeront peut-être comme une pure fantaisie — peut pourtant expliquer l'étrange comportement magnétique de la Lune, autrement inexplicable. En effet, un noyau de matière ionisée en mouvement engendre

un champ magnétique (Cagniard, 1962). Or, les basaltes de la Lune, vieux de 3 à 4 milliards d'années, montrent un paléomagnétisme considérable, tandis qu'actuellement la Lune ne présente pratiquement pas de magnétisme. Cela pour nous, parce que son noyau n'est plus ionisé. Par contre le noyau interne de la Terre, moins refroidi, est encore ionisé et produit un champ magnétique. La planète géante Jupiter, étant constituée d'une pneumatosphère immense et d'un grand noyau ionisé, possède un champ magnétique quelques centaines de fois plus fort que celui de la Terre. D'ailleurs il se peut bien que le comportement sismique de la Lune, semblable à celui d'une sphère creuse, s'explique à l'aide de notre hypothèse. Quant à l'explication des propriétés physiques de la Terre, elle a été donnée en détail dans nos publications antérieures auxquelles je renvoie le lecteur.

Vu le grand nombre de faits observés, explicables sans artifices par l'hypothèse d'une origine héliogène des Planètes et de la Lune, nous pensons que nous présentons là un modèle digne de comparaison avec celui de l'agglomération de météorites et méritant d'être examiné sérieusement et sans idées préconçues.

Catane, 29. 6. 1976.

PUBLICATIONS CITÉES

- CAGNIARD, L. (1962). « Introduction à la Physique du Globe ». Ed. Technip, Paris.
- CARR, M. H. (1976). « I Vulcani su Marte ». *Le Scienze* (trad. *Scientific American*). 16, nr. 93, 22-33, Milan.
- DONN, W. L. et al. (1965). « On the early history of the Earth ». *Geol. Soc. Am. Bull.* 76, 287-306, New York.
- DRAKE, M. J. et al. (1970). « Mineralogy and petrology of Apollo 12 sample No. 12013: a progress report. » *Earth Plan. Sc. Letters*, vol. 9, No. 2, p. 103-195.
- KOZYREV, N. A. (1959). « Volcanic activity on the Moon ». *Priroda* vol. 3, Moscou.
- (1964). « Spectral evidence of outflow of molecular hydrogen in the region of Aristarchus », Leningrad.
- KUHN, W. und A. RITTMANN. (1941). « Über den Zustand des Erdinnern und seine Entstehung aus einem homogenen Urzustand ». *Geol. Rundschau*, 32, 215.
- und S. VIELHAUER. (1953). « Beziehung zwischen der Ausbreitung von Longitudinal- und Transversalwellen in relaxierenden Medien ». *Z. Phys. Chemie*, 202, 124-190, Leipzig.
- LEONARDI, P. (1971). « Vulcani e bolidi sulla Luna e su Marte ». Ed. Vallagarina-Calliano (Trento). 435 pages, 602 fig.
- MOSER, P. et al. (1964). « Dynamic and static compressibility of glasses and the increase in density with depth in the Earth's interior ». *Bull. volc.* 27, 129-142, Naples.
- RITTMANN, A. (1948). « Zur geochemischen Entwicklung der praegeologischen Lithosphäre ». *Schweiz. Min. Petr. Mitt.* 28, 36.
- (1963). « Les Volcans et leur activité ». (Trad. de l'éd. allemande, 1960), Masson et C^{ie}, Paris.
- (1967). « Die Bimodalität des Vulkanismus und die Herkunft der Magmen ». *Geol. Rundschau*, 57, 277-295, Stuttgart.
- (1971). p. 200 dans LEONARDI. (« rayons des cratères lunaires »).
- (1973). « Stable minerals assemblages of igneous rocks ». Springer Verlag, Heidelberg, New York.
- (1976). « Vulkane und ihre Tätigkeit ». 3^e éd. mise à jour (en préparation).
- UREY, H. C. (1952). « The Planets ». Oxford Univ. Press, London, New York.

